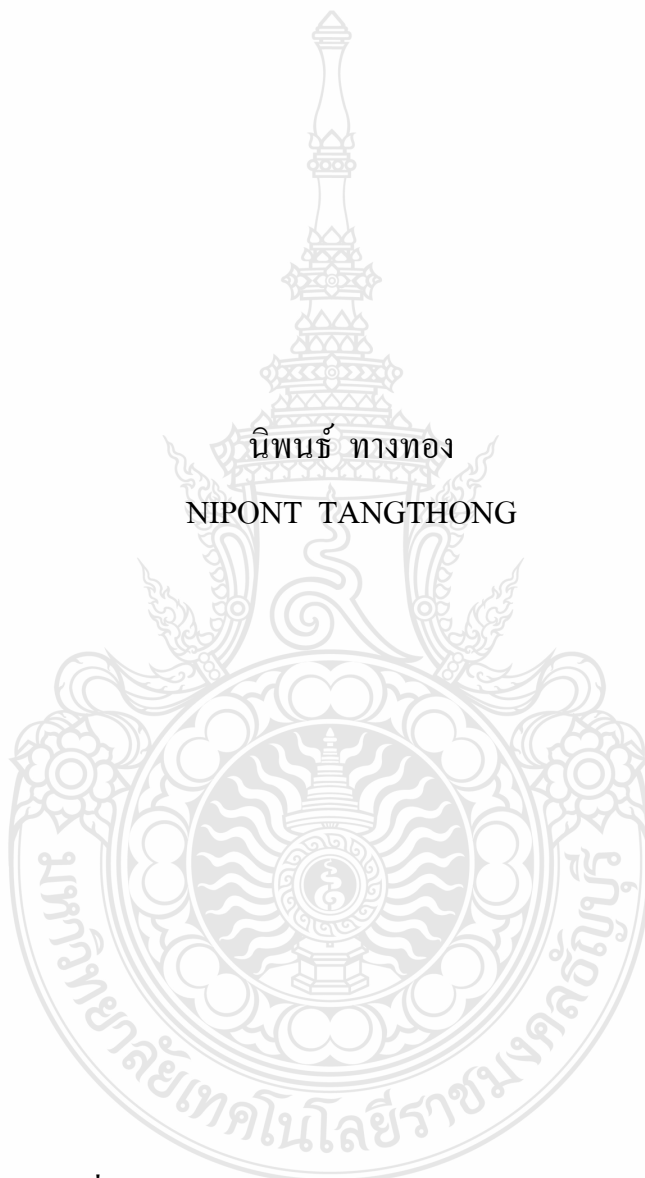


สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

CPW-FED PLANAR CIRCULAR MONOPOLE ANTENNA

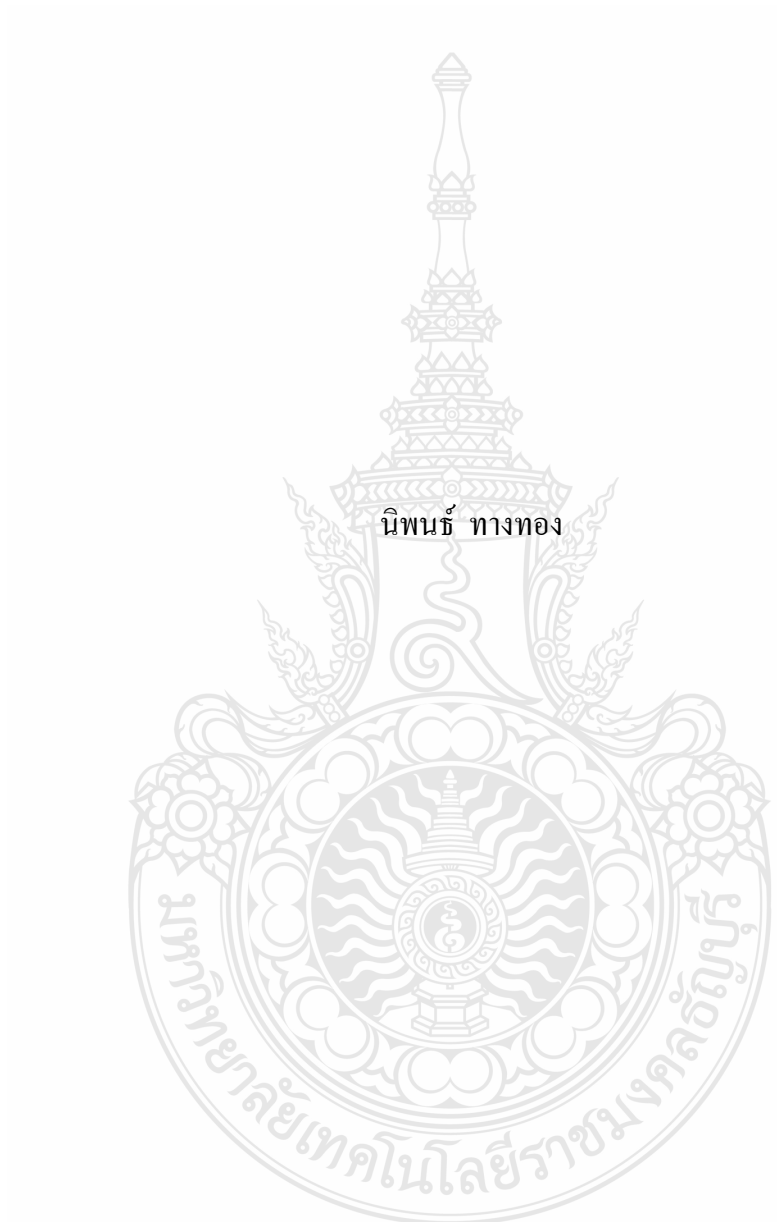
นิพนธ์ ทางทอง  
NIPONT TANGTHONG



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม



นิพนธ์ ทางทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

# CPW-FED PLANAR CIRCULAR MONOPOLE ANTENNA



NIPONT TANGTHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายนิพนธ์ ทางทอง



หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบ ท่อนำคลื่นระนาบร่วม
นักศึกษา	นายนิพนธ์ ทางทอง
รหัสประจำตัว	1149704020-4
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปี พ.ศ.	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอสายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่มีเทคนิคในการออกแบบสำหรับแถบความถี่ย่านกว้าง โดยเทคนิคที่นำเสนอนี้จะใช้สายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบโมโนโพลรูปแบบวงกลม ซึ่งมีข้อดีคือสามารถเชื่อมต่อส่วนประกอบวงจรที่เป็นแอคทีฟและพาสซีฟได้ง่าย มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีโครงสร้างที่ง่าย ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบสื่อสารไร้สาย

สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม เป็นสายอากาศที่นำเสนอเป็นอันดับแรก จากนั้นได้ทำการพัฒนาสายอากาศโดยทำให้สามารถจำกัดแถบความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานได้ โดยช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานจะอยู่ในช่วงความถี่ 3.31-3.73 GHz สายอากาศที่นำเสนอทั้งสองรูปแบบนี้จะถูกสร้างอยู่บนวัสดุฐานรอง FR-4 ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.4 และมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร

จากการจำลองพิสูจน์ให้เห็นได้ว่าสายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม มีความถี่ใช้งานในช่วง 3.258-6.416 GHz แบนด์วิดธ์ของระบบสายอากาศที่ออกแบบจะกว้างประมาณ 56.24% เมื่อค่าแบนด์วิดธ์พิจารณาที่ค่าความสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ส่วนผลที่ได้จากการวัด สายอากาศมีความถี่ที่ใช้งานในช่วง 3.3 – 8.0 GHz แบนด์วิดธ์ของระบบสายอากาศที่ออกแบบจะกว้างประมาณ 83 % ส่วนสายอากาศที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สามารถจำกัดแถบความถี่ที่ไม่ใช้งาน ผลจากการจำลองพบว่าสายอากาศมีความถี่ใช้งานในช่วง 1.63 – 3.28 GHz หรือ 67.21 % และมีความถี่ใช้งานในช่วง 3.76 – 7 GHz หรือ 60.22 % ช่วงความถี่ที่จำกัดแถบความถี่นั้นจะอยู่ในช่วง 3.31 – 3.73 GHz หรือ 11.93 % โดยมีความถี่เรโซแนนซ์การจำกัดความถี่ที่ 3.5 GHz

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล แถบความถี่ย่านกว้าง การกระตุ้นสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

**Thesis Title :** CPW-FED PLANAR CIRCULAR MONOPOLE ANTENNA  
**Student Name :** Mr. Nipont Tangthong  
**Student ID :** 1149704020-4  
**Degree Award :** Master of Engineering  
**Study Program :** Electrical Engineering  
**Year of Achievement :** 2010  
**Thesis Advisor :** Dr.Chatchai Suppitaksakul

### ABSTRACT

This thesis presents a CPW-Fed Planar Circular Monopole Antenna is designed on coplanar-waveguide-fed structure. This technique can be used in wideband frequencies. The CPW-Fed is applied on planar circular patch monopole antenna. The CPW-Fed antenna has the advantages of active and passive components. The CPW-Fed antenna has small size, light weight and simple structure. The antenna is applied in wireless communication systems.

The first propose a CPW-Fed Planar Circular Monopole Antenna is designed on coplanar-waveguide-fed structure. Then, the antenna is developed with frequency band notch. The frequency bandwidth within range of 3.31-3.73 GHz. Both propose antenna are fabricated on FR-4 substrate with a dielectric constant of 4.4 and a thickness of 1.6 mm.

The simulation of a CPW-Fed Planar Circular Monopole Antenna can be proved that bandwidth is within a range of 3.258-6.416 GHz, fractional bandwidth is 57.42 % and return loss is better than -10 dB. The measured bandwidth is within a range of 3.3-8 GHz, fractional bandwidth is 83 %. The antenna is developed with frequency band notch. The simulation can be proved that bandwidth is within a range of 1.63-3.28 GHz, fractional bandwidth is 67.2 % and bandwidth is within a range of 3.76-7 GHz, fractional bandwidth is 60.22 %. The frequency band notch bandwidth is within a range of 3.31-3.73 GHz, fractional bandwidth is 11.93 %. A resonant frequency for frequency band notch is 3.5 GHz.

Keyword: monopole antenna, wideband frequencies, CPW-Fed

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล ซึ่งได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้มาโดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษา ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ และอาจารย์วิโรจน์ พิราจเนนชัย ที่คอยให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ มาโดยตลอดทั้งยังคอยห่วงใยและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์เจษฎา ก้อนแพง และ อาจารย์สุทธิ ทับทองดี ที่ได้ช่วยเหลือผู้จัดทำในทุกด้านของการดำเนินงานให้ข้อมูลและวัสดุอุปกรณ์ประกอบงานค้นคว้าอย่างมากมาย ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่เคยอดรมสั่งสอนและให้ความรู้กับผู้จัดทำ นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

คุณความดีใดๆที่พึงได้รับจากงานวิจัยเล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ทุกๆ สิ่งแก่ผู้วิจัย ด้วยความรักเคารพและบูชายิ่ง

นิพนธ์ ทางทอง  
6 มีนาคม 2554

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.5 เครื่องมือที่ใช้	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพลและสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วม	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 สายอากาศโมโนโพล	9
2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ	10
2.4 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ	14
2.5 สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม	16
2.6 สายอากาศร่อง	23
2.7 การปรับปรุงสายอากาศร่องกว้าง	32
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศ	35
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	35
3.2 สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลม	36
3.3 สายอากาศแถบความถี่กว้างที่จำกัดแถบความถี่	40
บทที่ 4 ผลการสร้างสายอากาศและการทดสอบ	46
4.1 สายอากาศโมโนโพลแพตช์รูปวงกลม	46
4.2 สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลม ที่จำกัดย่านความถี่	52



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลวิจัย	61
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	
ก คุณสมบัติของแผ่น PCB ชนิด FR4	67
โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานสายอากาศ	68
ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	72
ประวัติผู้เขียน	80



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่างๆ	12
3.1	ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงความยาว R	39
3.2	ผลการจำลองค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ S	40
3.3	ขนาดของพารามิเตอร์สายอากาศที่ออกแบบ notch ความถี่	41
5.1	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของสายอากาศที่สร้างกับงานวิจัยในอดีต	61



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศไดโพล	10
2.2	โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศโมนโพล	10
2.3	การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน	11
2.4	บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ	12
2.5	แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว	13
2.6	สายอากาศในโหมดการส่ง	14
2.7	การป้อนแบบ microstrip line	15
2.8	การป้อนแบบ probe feed	15
2.9	การป้อนแบบ aperture coupling	16
2.10	การป้อนแบบ proximity coupling	16
2.11	โครงสร้างของสายส่งสัญญาณ	18
2.12	โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง	18
2.13	โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง	18
2.14	สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง	20
2.15	ก) สายอากาศร่องแคบที่มีความยาว $L_s = \lambda/2$ ในแผ่นระนาบโลหะขนาดอนันต์ ข) สายอากาศไดโพลยาว $\lambda/2$	24
2.16	ก) สนามไฟฟ้า สายอากาศร่องแคบยาว $\lambda/2$ ในแผ่นระนาบโลหะขนาดอนันต์ ข) การจำลองโดยใช้การป้อนแบบไมโครสตริป ค) การจำลองโดยใช้ป้อนแบบโครงสร้างระนาบร่วม	25
2.17	ก) การกระจายกระแสแม่เหล็กในสายอากาศร่องแคบความยาว $\lambda/2$ ขนาดอนันต์ ข) เมื่อการป้อนแบบไมโครสตริป ค) เมื่อป้อนโครงสร้างระนาบร่วม	25
2.18	ก) การกระจายของกระแสในสายอากาศร่องแคบยาว $\lambda/2$ เมื่อป้อนแบบไมโครสตริป ข) การป้อนโครงสร้างระนาบร่วม	27
2.19	ก) สนามการแผ่กระจายคลื่นของร่องในแผ่นโลหะขนาดอนันต์ ข) สนามการแผ่กระจายคลื่นของไดโพล	28
2.20	สนามการแผ่กระจายคลื่นของร่องในแนวตั้งวางในแผ่นระนาบตัวนำขนาดอนันต์	28
2.21	ก) มุมมองสามมิติการแผ่กระจายคลื่น ในสายอากาศร่องแคบขนาดอนันต์ ข) มุมมองสามมิติการแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศร่องแคบขนาดจำกัด	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 ก) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสองมิติบนแผ่น โลหะมีขนาดอนันต์ ระบาย $x-y$ ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสองมิติบนแผ่น โลหะมีขนาดจำกัด ระบาย $x-z$	30
2.23 อิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศร่องป้อนด้วย โครงสร้างระบายร่วมที่มีความกว้าง ร่อง ( $W_s$ ) แตกต่างกัน เมื่อ $L_s = 78$ มิลลิเมตร $\epsilon_r = 4.4$ และ $h = 1.4$ มิลลิเมตร	31
2.24 ก) การกระจายสนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก เมื่อให้ร่องขนาด 2 มิลลิเมตร ข) การกระจายสนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก เมื่อให้ร่องขนาด 10 มิลลิเมตร ค) การกระจายสนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก เมื่อให้ร่องขนาด 45 มิลลิเมตร	32
2.25 ก) สายอากาศร่องแบบสี่เหลี่ยมที่มีการใช้สตัด์ป้อนมีรูปร่างเหมือนกับร่อง ข) สายอากาศร่องแบบสามเหลี่ยมที่มีการใช้สตัด์ป้อนมีรูปร่างเหมือนกับร่อง ค) สายอากาศร่องแบบวงกลมที่มีการใช้สตัด์ป้อนมีรูปร่างเหมือนกับร่อง	33
2.26 ก) สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่มีการใช้สตัด์รูปสี่มุม ข) สายอากาศร่องสามเหลี่ยมที่มีการใช้สตัด์รูปวงกลม ค) สายอากาศร่องวงกลมที่มีการใช้สตัด์รูปสี่เหลี่ยม	33
2.27 ก) สนามไฟฟ้าจากการจำลองของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมใช้สตัด์ป้อนจูนสี่เหลี่ยม ข) สนามแม่เหล็กจากการจำลองของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมใช้สตัด์ป้อนจูนสี่เหลี่ยม	34
2.28 ก) สายอากาศร่องใช้โพลสตริกวางไว้ด้านข้างร่อง ข) สายอากาศร่องใช้โพลสตริกวางไว้มุมทั้งสี่ด้านของร่อง ค) สายอากาศร่องใช้โพลสตริกวางไว้ด้านบนของร่อง	34
3.1 การคำนวณสายนำสัญญาณแบบระบายร่วมด้วยโปรแกรม AppCad for Windows	37
3.2 สายอากาศโมโนโพลวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งท่อนำคลื่นระบายร่วม	37
3.3 ผลการจำลองค่า $S_{11}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมีแพตช์	38
3.4 ผลการจำลองค่า $S_{11}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ $s$	39
3.5 ก) โครงสร้างและขนาดของสายอากาศที่ notch ความถี่ ข) แบบขยายตำแหน่งและขนาดของตัวหนอนบนขอบกราวด์	40
3.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) จากการจำลอง	42
3.7 ผลการจำลองค่า $S_{11}$ เมื่อทำการลดระยะ $s_1$	43
3.8 ผลการจำลองค่า $S_{11}$ เมื่อทำการเพิ่มระยะ $s_1$	43
3.9 ผลการจำลองค่า $S_{11}$ เมื่อปรับความยาวตัวหนอนมากขึ้น	44
3.10 ผลการจำลองค่า $S_{11}$ เมื่อปรับความยาวตัวหนอนให้สั้นลง	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ก) การเชื่อมต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้า ข) สายอากาศที่สร้างขึ้น	46
4.2 เปรียบเทียบค่า $S_{11}$ จากการจำลองและการวัดสายอากาศที่ออกแบบ	47
4.3 เปรียบเทียบค่า VSWR จากการจำลองและการวัดสายอากาศที่ออกแบบ	47
4.4 การจัดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น	48
4.5 ก) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ xz ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ yz	49
4.6 ก) การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.8 GHz ระนาบ xz ข) การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.8 GHz ระนาบ yz	50
4.7 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น 3 มิติที่ความถี่ 5.2 GHz	51
4.8 การกระจายกระแสบนสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz	51
4.9 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น 3 มิติที่ความถี่ 5.8 GHz	52
4.10 การกระจายกระแสบนสายอากาศที่ความถี่ 5.8 GHz	52
4.11 ก) สายอากาศแถบความถี่กว้างที่ notch ความถี่ที่สร้างขึ้น ข) รูปขยายตัวหนอนที่ขอบบนของระนาบกราวด์	53
4.12 เปรียบเทียบค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดและการจำลอง	53
4.13 การกระจายกระแสบนแพตช์เมื่อมีการแผ่กระจายคลื่น	54
4.14 ตัวหนอนจะเก็บสะสมกระแสไม่ให้อ่านเข้าไปในแพตช์เพื่อ notch ความถี่ 3.5 GHz	55
4.15 ความหนาแน่นของกระแสมากที่สุดที่ความถี่ notch 3.5 GHz	55
4.16 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz ระนาบ xz	56
4.17 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz ระนาบ yz	56
4.18 การแผ่กระจายคลื่นแบบสามมิติที่ความถี่ 2.45 GHz	57
4.19 การกระจายกระแสบนสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz	57
4.20 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.5 GHz ระนาบ xz	58
4.21 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.5 GHz ระนาบ yz	58
4.22 การแผ่กระจายคลื่นแบบสามมิติที่ความถี่ 5.5 GHz	59
4.23 การกระจายกระแสบนสายอากาศที่ความถี่ 5.5 GHz	59
4.24 เปรียบเทียบเกณฑ์การขยายของสายอากาศที่ได้จากการวัดจริงและการจำลอง	60

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการสื่อสารไร้สาย (wireless communication system) ต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูล นั่นคือสายอากาศ ในปัจจุบันเครื่องมือสื่อสารจะมุ่งเน้นออกแบบเป็นลักษณะของการพกพา ซึ่งจะต้องมีโครงสร้างกระทัดรัด สะดวกต่อการพกพาหรือเคลื่อนที่ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ เครื่องค้นหาตำแหน่ง (GPS) เครื่องมือวัดต่าง ๆ รวมถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น แม้แต่คอมพิวเตอร์แบบพกพา ก็ยังมีระบบสื่อสารไร้สายติดตั้งอยู่ด้วย เช่น Bluetooth, wireless local area network (WLAN) โดยที่ระบบสื่อสารเหล่านี้จำเป็นต้องมีสายอากาศไว้เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลกับสถานีให้บริการ ระบบสื่อสารไร้สาย ดังกล่าวจะใช้งานย่านความถี่ที่ต่างกัน เช่น ระบบ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 มีหลายมาตรฐานที่ใช้งานความถี่ต่างกัน ไป เช่น มาตรฐาน IEEE 802.11 b/g ใช้งานย่านความถี่ 2.4 - 2.4835 GHz มาตรฐาน IEEE 802.11 a ใช้งานย่านความถี่ 5.15-5.35/5.725-5.825 GHz ส่วนมาตรฐาน IEEE 802.11j จะใช้งานที่ย่านความถี่ 4.9-5.091 GHz สำหรับการสื่อสารไร้สายที่ใช้เทคโนโลยีใหม่ที่เรียกว่า worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) จะมีมาตรฐาน IEEE 802.16-2004 หรือ IEEE 802.16e ซึ่งสนับสนุนการใช้งานแบบเคลื่อนที่ (mobile WiMAX) จะใช้งานอยู่ 3 ย่าน คือ 2.5-2.7 GHz 3.3 - 3.7 GHz และ 5.25 - 5.85 GHz [1] เห็นได้ว่าทั้งสองระบบคือ WLAN และ WiMAX มีย่านความถี่การใช้งานที่ใกล้เคียงกัน และในบางย่านความถี่จะทับซ้อนกันอยู่ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศให้สามารถรองรับย่านความถี่ WLAN/WiMAX ให้ได้ทั้งหมดนั้น จะทำให้อุปกรณ์สื่อสารมีขนาดกระทัดรัดเหมาะสมกับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นเป้าหมายสำคัญของระบบ mobile WiMAX รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์สื่อสาร ที่มีขนาดกระทัดรัด นอกจากนี้แล้ว สายอากาศที่สามารถใช้งานได้หลายความถี่หรือ มีแถบความถี่การใช้งานที่ครอบคลุมทั้งหมดยังช่วยลดต้นทุนการผลิตอุปกรณ์สื่อสารในระบบดังกล่าวลง

สายอากาศที่ใช้งานกับอุปกรณ์สื่อสารแบบเคลื่อนที่ หรือแบบมือถือ นิยมออกแบบเป็นสายอากาศไมโครสตริป ที่มีขนาดเล็ก ทำงานได้หลาย ๆ ความถี่ และติดตั้งง่าย โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป จะเป็นแผ่นตัวนำไมโครสตริปที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่น (radiator) มักนิยมเรียกว่าแพตช์ (patch) หรือสายอากาศแบบแพตช์ (patch antenna) โดยแพตช์จะวางราบอยู่บนวัสดุฐานรอง(substrate) และมีแผ่นตัวนำที่กราวด์อยู่อีกด้านของฐานรอง สายอากาศไมโครสตริปได้รับความนิยมนอย่างมากตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 เป็นต้นมา [2] ปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริป มีหลากหลายรูปแบบ รูปแบบหนึ่งของสายอากาศไมโครสตริปที่มีขนาดเล็กกระทัดรัด ประสิทธิภาพดี คือสายอากาศแบบขั้วเดียว (monopole antenna) โดยจะออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ซึ่งมีชื่อ

เรียกต่าง ๆ กันไป เช่น printed monopole หรือ planar monopole และอื่น ๆ ตามลักษณะการทำงาน หรือการตอบสนองความถี่ โดยรวมแล้วมีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน สายอากาศแพตช์โมโนโพล สามารถจัดการป้อน (feed) สัญญาณได้หลายรูปแบบ เช่น ป้อนด้วยสายส่งแกนร่วม (coaxial feed line), สายส่งไมโครสตริป (microstrip feed line), สายส่งระนาบร่วม (coplanar waveguide feed line) และแบบคัปปลิ่ง (couple feed) เป็นต้น การป้อนด้วยสายส่งไมโครสตริปและแบบระนาบร่วม นิยม ออกแบบร่วมกับสายอากาศแบบแพตช์โมโนโพลแนวระนาบ หากพิจารณาถึงความอ่อนตัว สะดวก ต่อการใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมโดยที่ไม่ต้องทำ via hole จะพบว่า การป้อนแบบสายส่ง ระนาบร่วมมีความเหมาะสมกว่าการป้อนแบบสายส่งไมโครสตริป นอกจากนี้แล้ว การป้อนด้วยสาย ส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม จะมีแถบความถี่ที่กว้างกว่าแบบสายส่งไมโครสตริป [3] และการ สูญเสียจากการแผ่กระจายคลื่นของส่วนการป้อนก็มีค่าน้อยกว่า

การออกแบบสายอากาศแพตช์แนวระนาบ ป้อนด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ผู้วิจัย จะออกแบบสายอากาศมีโครงสร้างแพตช์ขนาดใกล้เคียงกับค่า  $\lambda/4$  ของความยาวคลื่นความถี่ต่ำที่ใช้ งาน และทำการปรับปรุงโครงสร้างแพตช์ หรือส่วนประกอบอื่นเพื่อทำให้สายอากาศมีความถี่เรโซแนนซ์ ย่านความถี่ที่สองหรือความถี่สูง เช่น การแยกทางไหลของกระแส [3],[4] หรือใช้การเจาะ ช่องเล็ก ๆ ที่แพตช์ [5] เพื่อให้เกิดทางเดินกระแสที่ยาวขึ้น ในงานวิจัย [6] เป็นสายอากาศโมโนโพล แนวระนาบ ใช้การป้อนที่ลึกลงไปในตัวแพตช์และปรับสายป้อนให้มีความลาดเอียงไปสู่จุดป้อนที่ แพตช์ทำให้ได้สายอากาศที่มีความถี่ในย่าน WLAN แต่ถึงอย่างไรยังไม่ครอบคลุมไปถึงย่าน WiMAX สายอากาศย่าน WLAN มีความถี่ที่ครอบคลุมถึงย่าน WiMAX นั้น จะต้องทำให้เกิดย่านความถี่ 3.5 GHz ซึ่งใน [7] จะใช้หลักการที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ ขึ้นมาอีก ด้วยการใส่สตาปโพลด์ที่เป็นตัวเรโซแนนซ์แบบเปิดที่อยู่คนละด้านของตัวแผ่กระจายคลื่น ทำให้เกิดความถี่ย่าน 2.4 และ 3.5 GHz ส่วน แพตช์จะเป็นตัวกระตุ้นความถี่ย่าน 5.5 GHz ในสายอากาศที่มีแถบความถี่กว้างที่สามารถใช้งานใน ย่าน WLAN/WiMAX [8] โครงสร้างตัวแผ่กระจายคลื่นเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ต่อสตาปออกไปสอง ข้าง เพื่อให้เกิดความถี่ที่ครอบคลุมย่านความถี่ทั้งหมด แต่เนื่องจากสายอากาศดังกล่าว ใช้การป้อน แบบสายส่งไมโครสตริป ซึ่งเป็นข้อด้อย ในการเพิ่มเติมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างงานวิจัยที่เป็น สายอากาศโมโนโพลแนวระนาบ ป้อนด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ดังต่อไปนี้

T.H. Kim and D.C. Park [9] นำเสนอสายอากาศ CPW-fed compact monopole antenna for dual-band WLAN applications ทำงานในย่านความถี่ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/a โครงสร้างสายอากาศเป็นเส้นสตริปตัวนำที่ขดเป็นก้นหอย และรูปตัว L กลับด้านวางติดกัน ป้อนด้วย สายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม การทำงานของสายอากาศ ความถี่เรโซแนนซ์ 2.4 GHz เกิดจาก สตริปก้นหอย ส่วนย่านความถี่ 5 GHz นั้น เกิดจากความถี่เรโซแนนซ์ที่สองของสตริปก้นหอย และ ความถี่เรโซแนนซ์แรกของสตริปตัว L กลับด้าน แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบคล้ายรอบตัว ออกแบบสร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร และมีค่าคงที่ 4.4

W.-C. Liu [10] ได้นำเสนอ Wideband dual-frequency double inverted-L CPW-fed monopole antenna for WLAN application มีย่านการทำงาน WLAN ที่ย่านความถี่ 2.4, 5.2 และ 5.8 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802b/g/a โครงสร้างสายอากาศเป็นแพตช์สี่เหลี่ยมที่มีร่องรูปตัว L กลับหัววางตะแคงบนแพตช์ โดยใช้หลักการแบ่งกระแสให้ไหลเป็นสองทางทำให้เกิดเป็นความถี่เรโซแนนซ์สองความถี่ สตรีปรูป L กลับด้านหงายขึ้น จะเป็นส่วนกระตุ้นย่านความถี่ต่ำ ส่วนย่านความถี่สูง จะขึ้นอยู่กับความยาวของรูปตัว L อีกตัวที่วางหงายขึ้น การแผ่กระจายคลื่นคล้ายกับสายอากาศรอบตัวสายอากาศสร้างบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

W.-C. Liu and H.-J. Liu [11] นำเสนอ Compact triple-band slotted monopole antenna with asymmetrical CPW grounds สายอากาศสามารถตอบสนองย่านความถี่ 2.43, 5.23 and 7.14 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ของ WLAN โครงสร้างสายอากาศเป็นแพตช์สี่เหลี่ยมที่เจาะร่องด้านข้างเข้าไปในตัวแพตช์ ป้อนด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม และยังออกแบบให้กราวด์ข้างหนึ่งเป็นรูปตัว L กลับหัวยื่นเข้าไปในแพตช์ ผลจากการเจาะร่องที่แพตช์ และการจัดลักษณะของกราวด์ดังกล่าว ทำให้สายอากาศตอบสนองได้สามย่านความถี่ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่คล้ายกับรอบตัวออกแบบสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

Wen-Chung Liu, Chao-Ming Wu, and Nien-Chang Chu [12] นำเสนอ A compact CPW-fed slotted patch antenna for dual-band operation ใช้หลักการเจาะช่องบนแพตช์สี่เหลี่ยม และเจาะร่องบนระนาบกราวด์ทั้งสองข้างของสายส่งระนาบร่วมเป็นรูปตัว L ตะแคง ที่สมมาตรกัน ทำให้ได้ความถี่ตอบสนองในย่าน WLAN ทั้งสองย่าน นอกจากนี้ยังครอบคลุมไปถึงความถี่ด้านสูงของย่านอัลตราไวด์แบนด์ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบคล้ายรอบตัว ออกแบบสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

K.G.Thomas and M. Sreenivasan [13] นำเสนอ Compact CPW-fed dual-band antenna ลักษณะ โครงสร้างสายอากาศเป็นแพตช์สี่เหลี่ยมใช้หลักการป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วมลึกเข้าไปในตัวแพตช์ และจัดให้สายส่งมีความลาดเอียงเพื่อทำให้เกิดการแมตช์ซึ่งที่เหมาะสมทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กและตอบสนองต่อความถี่ WLAN ทั้งสองย่านความถี่ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีลักษณะเป็นแบบคล้ายรอบตัว ออกแบบสร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

Hsien-Wen Liu, Chia-Hao Ku, and Chang-Fa Yang [14] นำเสนอ Novel CPW-fed planar monopole antenna for WiMAX/WLAN applications โครงสร้างสายอากาศมีแพตช์เป็นรูปห้าเหลี่ยม สายอากาศตอบสนองแถบความถี่กว้าง จากนั้นเจาะร่องสองร่องที่กลางแพตช์ เพื่อทำการจำกัดความถี่ที่ไม่ต้องการ ทำให้ได้สายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ WLAN WiMAX ได้ทั้งหมด ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม สร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4



Angelopoulos, E.S., Stratakos, Y.E., Kostaridis, A.I., Kaklamani, D.I., and Uzunoglu, N.K [15] ได้ออกแบบและการพัฒนาสายอากาศแบบสองย่านความถี่ CPW – fed ใช้กับการสื่อสารไร้สาย ระบบ GSM (1.7-1.9 GHz) และตามมาตรฐาน IEEE 802.11b (2.4 - 2.5 GHz WLAN) ย่านความถี่ที่สองใช้งานตามมาตรฐาน 802.11b (2.4-2.5 GHz) และ 802.11b (5.1-5.9 GHz) สายอากาศเหล่านี้สามารถจะติดตั้งบน backplane ของพีดีเอ สมาร์ทโฟนหรือโน้ตบุ๊ก

Chen, H.D [16] ได้นำเสนอสายอากาศแบบ CPW-fed ที่มีสัดของการปรับแต่งความถี่กว้าง การปรับแต่งความถี่ในช่องสี่เหลี่ยมและอิมพีแดนแบนด์วิดธ์ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดโดยความกว้างและความยาวของสัดบ โดยต้องเลือกตำแหน่งที่ตั้งและขนาดของสัดบให้เหมาะสม

นอกจากนี้มีการศึกษาวิจัยถึงรูปแบบสายอากาศโมโนโพลในความถี่ย่านกว้าง เช่น เป็นแพตช์วงรี สี่เหลี่ยม แบบช่องเปิดหรือสล็อต และในแบบต่างๆ อีกมากมาย [17-20]

Y. F. Weng<sup>1</sup>, W.J. Lu<sup>1,2</sup>, S. W. Cheung<sup>1</sup> and T. I. Yuk<sup>1</sup> [21] ได้นำเสนอสายอากาศที่สามารถปรับจูนความถี่ในช่วงที่ไม่ต้องการ(notch)ใช้งานได้ โดยการเจาะร่องกราวด์ให้มีรูปคเคี้ยว แต่มีกราวด์ทั้งด้านบนและด้านล่าง

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นตัวอย่างงานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคที่หลากหลาย โดยภาพรวมแล้วคุณลักษณะของสายอากาศที่ใช้งานในย่าน WLAN/WiMAX นั้น ควรมีคุณลักษณะตอบสนองการใช้งานแบบแถบความถี่กว้าง หรือหลายแถบความถี่ โครงสร้างไม่ซับซ้อน ให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบตัว หรือคล้ายรอบตัวและแถบความถี่กว้างพอที่จะครอบคลุมย่านทั้งหมด นอกจากนี้แล้วคุณลักษณะอื่น เช่น สายอากาศยังจะต้องมีความอ่อนตัวหรือสะดวกต่อการนำไปประยุกต์เข้ากับแผ่นวงจรไมโครเวฟที่ต้องการใช้งาน และติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นเพิ่มเติมได้ง่าย

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจะได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลแบบวงกลม ที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม โดยสายอากาศที่มีคุณลักษณะการตอบสนองย่านความถี่กว้างมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ข้อดีของการนำสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมมาใช้ในการวิจัยนี้ คือสามารถเชื่อมต่อกับส่วนประกอบวงจรที่เป็นแอกทีฟและพาสซีฟได้ง่าย โดยที่ไม่ต้องเจาะรูที่ฐานรอง(via hole) ซึ่งต่างจากสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่การต่ออุปกรณ์ต้องเจาะรูผ่านฐานรอง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ การตอบสนองความถี่และคุณลักษณะโดยรวมของสายอากาศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

1.2.2 วิเคราะห์คุณลักษณะของการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ ของสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

1.2.3 วิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบ

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม
- 1.3.2 สายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะใช้รูปแบบแผ่นวงกลม ใช้งานในแถบความถี่ย่านกว้าง ตามมาตรฐานระบบการสื่อสารไร้สาย WLAN และ WiMAX
- 1.3.3 สายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่สามารถจำกัดแถบความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานได้ (frequency band notch)

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีหลักการออกแบบและงานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม
- 1.4.2 ศึกษาโปรแกรม IE3D ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม
- 1.4.3 จำลองการทำงานของสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ
- 1.4.4 ใช้โปรแกรม AUTO CAD เขียนวงจรเพื่อนำไฟล์ที่ได้ไปใช้ในการกัดแผ่นวงจรพิมพ์
- 1.4.5 สร้างและทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมในการแผ่กระจายคลื่น
- 1.4.6 วิเคราะห์ผลจากการทดสอบ แล้วนำเสนอ

### 1.5 เครื่องมือที่ใช้

- 1.5.1 เครื่องคอมพิวเตอร์
- 1.5.2 โปรแกรม IE3D
- 1.5.3 โปรแกรม App CAD
- 1.5.4 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดที่มีค่าไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r = 4.4$
- 1.5.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer)

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถนำหลักการออกแบบสายอากาศที่ได้ ไปใช้ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้
- 1.6.2 สายอากาศต้นแบบ สามารถนำไปใช้งานได้จริง ในระบบ WLAN หรือ WiMAX ได้
- 1.6.3 สามารถนำแนวคิดในการออกแบบสายอากาศ ไปประยุกต์ใช้เพื่อช่วยลดต้นทุน การผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากใช้วัสดุฐานรองที่มีราคาต่ำ หาได้ง่าย รวมไปถึงออกแบบด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อน

1.6.4 แนวทางการออกแบบสายอากาศในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปได้

1.6.5 สามารถนำหลักการ วิธีการจำกัดแถบความถี่(frequency band notch) ในสายอากาศแถบความถี่กว้าง ไปใช้ออกแบบสายอากาศที่ต้องการจำกัดแถบความถี่อื่นได้



## บทที่ 2

# งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล และสายส่งที่นำคลื่นระนาบร่วม

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และพื้นฐานของสายส่งสัญญาณแบบที่นำคลื่นระนาบร่วม โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบต่างๆ ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของสายอากาศแบบโมโนโพลที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบที่นำคลื่นระนาบร่วม

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการลดขนาดของสายอากาศและตัวสายอากาศนั้นยังสามารถรองรับการสื่อสารไร้สายในย่าน WLAN และ WiMAX ดังนี้

T.H. Kim and D.C. Park [9] นำเสนอสายอากาศ CPW-fed compact monopole antenna for dual-band WLAN applications ทำงานในย่านความถี่ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/a โครงสร้างสายอากาศเป็นเส้นสตริปตัวนำที่ขดเป็นก้นหอย และรูปตัว L กลับด้านวางติดกัน ป้อนด้วยสายส่งแบบที่นำคลื่นระนาบร่วม การทำงานของสายอากาศ ความถี่เรโซแนนซ์ 2.4 GHz เกิดจากสตริปก้นหอย ส่วนย่านความถี่ 5 GHz นั้น เกิดจากความถี่เรโซแนนซ์ที่สองของสตริปก้นหอย และความถี่เรโซแนนซ์แรกของสตริปตัว L กลับด้าน แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบคล้ายรอบตัว ออกแบบสร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร และมีค่าคงที่ 4.4

W.-C. Liu [10] นำเสนอ wideband dual-frequency double inverted-L CPW-fed monopole antenna for WLAN application มีย่านการทำงาน WLAN ที่ย่านความถี่ 2.4, 5.2 และ 5.8 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802b/g/a โครงสร้างสายอากาศเป็นแพตช์สี่เหลี่ยมที่มีร่องรูปตัว L กลับหัววางตะแคงบนแพตช์ โดยใช้หลักการแบ่งกระแสให้ไหลเป็นสองทางทำให้เกิดเป็นความถี่เรโซแนนซ์สองความถี่ สตริปรูป L กลับด้านหงายขึ้น จะเป็นส่วนกระตุ้นย่านความถี่ต่ำ ส่วนย่านความถี่สูง จะขึ้นอยู่กับความยาวของรูปตัว L อีกตัวที่วางหงายขึ้น การแผ่กระจายคลื่นคล้ายกับสายอากาศรอบตัว สายอากาศสร้างบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

W.-C. Liu and H.-J. Liu [11] นำเสนอ compact triple-band slotted monopole antenna with asymmetrical CPW grounds สายอากาศสามารถตอบสนองย่านความถี่ 2.43, 5.23 and 7.14 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ของ WLAN โครงสร้างสายอากาศเป็นแพตช์สี่เหลี่ยมที่เจาะร่องด้านข้างเข้าไป

ในตัวแพตช์ ป้อนด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม และยังออกแบบให้กราวด์ข้างหนึ่งเป็นรูปตัว L กลับหัวยื่นเข้าไปในแพตช์ ผลจากการเจาะร่องที่แพตช์ และการจัดลักษณะของกราวด์ดังกล่าว ทำให้สายอากาศตอบสนองได้สามย่านความถี่ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่คล้ายกับรอบตัว ออกแบบสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

Wen-Chung Liu, Chao-Ming Wu, and Nien-Chang Chu [12] นำเสนอ a compact CPW-fed slotted patch antenna for dual-band operation ใช้หลักการเจาะช่องบนแพตช์สี่เหลี่ยม และเจาะร่องบนระนาบกราวด์ทั้งสองข้างของสายส่งระนาบร่วมเป็นรูปตัว L ตะแคง ที่สมมาตรกัน ทำให้ได้ความถี่ตอบสนองในย่าน WLAN ทั้งสองย่าน นอกจากนี้ยังครอบคลุมไปถึงความถี่ด้านสูงของย่านอัลตราไวด์แบนด์ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบคล้ายรอบตัว ออกแบบสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 หนา 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

K.G.Thomas and M. Sreenivasan [13] นำเสนอ compact CPW-fed dual-band antenna ลักษณะ โครงสร้างสายอากาศเป็นแพตช์สี่เหลี่ยมใช้หลักการป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วมลึกเข้าไปในตัวแพตช์ และจัดให้สายส่งมีความลาดเอียงเพื่อทำให้เกิดการแมตช์ซึ่งที่เหมาะสมทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กและตอบสนองต่อความถี่ WLAN ทั้งสองย่านความถี่ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีลักษณะเป็นแบบคล้ายรอบตัว ออกแบบสร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

Hsien-Wen Liu, Chia-Hao Ku, and Chang-Fa Yang [14] นำเสนอ novel CPW-fed planar monopole antenna for WiMAX/WLAN applications โครงสร้างสายอากาศมีแพตช์เป็นรูปห้าเหลี่ยม สายอากาศตอบสนองแถบความถี่กว้าง จากนั้นเจาะร่องสองร่องที่กลางแพตช์ เพื่อทำการจำกัดความถี่ที่ไม่ต้องการ ทำให้ได้สายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ WLAN WiMAX ได้ทั้งหมด ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม สร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรอง FR4 ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร ค่าคงที่ 4.4

Angelopoulos, E.S., Stratakos, Y.E., Kostaridis, A.I., Kaklamani, D.I., and Uzunoglu, N.K [15] ได้ออกแบบและการพัฒนาสายอากาศแบบสองย่านความถี่ CPW – fed ใช้กับการสื่อสารไร้สายระบบ GSM (1.7-1.9 GHz) และตามมาตรฐาน IEEE 802.11b (2.4 - 2.5 GHz WLAN) ย่านความถี่ที่สองใช้งานตามมาตรฐาน 802.11b (2.4-2.5 GHz) และ 802.11b (5.1-5.9 GHz) สายอากาศเหล่านี้สามารถจะติดตั้งบน backplane ของพีดีเอ สมาร์ทโฟนหรือโน้ตบุ๊ก

Chen, H.D [16] ได้นำเสนอสายอากาศแบบ CPW-fed ที่มีสตัปของการปรับแต่งความถี่กว้าง การปรับแต่งความถี่ในช่องสี่เหลี่ยมและอิมพีแดนแบนด์วิดธ์ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดโดยความกว้างและความยาวของสตัป โดยต้องเลือกตำแหน่งที่ตั้งและขนาดของสตัปให้เหมาะสม

Yeo, J., Lee, Y. and Mittra, R.[17] ได้นำเสนอสายอากาศแบบรูปปล่องควีนูเขาไฟ ที่มีย่านความถี่การใช้งานตั้งแต่ 1.4-6 GHz และมีแบนด์วิดธ์ 125 % โครงสร้างของสายอากาศจะมีขนาด 130 x 135

มิลลิเมตร และเป็นแบบมีกราวด์ล้อมรอบ ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่

สัญญา พรหมเทพ [18] ได้นำเสนอสายอากาศรูปแผ่นวงกลม ที่มีย่านความถี่การใช้งาน ตั้งแต่ 1.85-6.39 GHz มีแบนด์วิดท์ 140 % จากการวัด โครงสร้างของสายอากาศจะมีขนาด 72 x 75 มิลลิเมตร และเป็นแบบมีกราวด์ล้อมรอบ ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่

J. Liang, C.C. Chiau, X. Chen and C.G. Parini.[19-20] ได้นำเสนอสายอากาศรูปแผ่นวงกลม ที่มีย่านความถี่การใช้งานตั้งแต่ 2.78-9.78 GHz โครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบมีกราวด์ด้านล่าง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ไมโครเวฟ หรืออุปกรณ์อื่นๆ จะต้องมีการเจาะรูผ่านวัสดุฐานรอง ทำให้เกิดการสูญเสียที่ย่านความถี่สูง

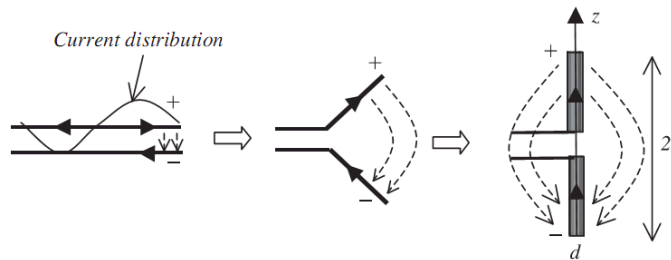
Y. F. Weng<sup>1</sup>, W.J. Lu<sup>1,2</sup>, S. W. Cheung<sup>1</sup> and T. I. Yuk<sup>1</sup> [21] ได้นำเสนอสายอากาศที่สามารถปรับจูนความถี่ในช่วงที่ไม่ต้องการ(notch)ใช้งานได้ โดยการเจาะรูกราวด์ให้มีรูปคดเคี้ยว แต่มีกราวด์ทั้งด้านบนและด้านล่าง โครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบมีกราวด์ด้านล่าง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ไมโครเวฟ หรืออุปกรณ์อื่นๆ จะต้องมีการเจาะรูผ่านวัสดุฐานรอง ทำให้เกิดการสูญเสียที่ย่านความถี่สูง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาเป็นการออกแบบสายอากาศที่ใช้กับระบบสื่อสารไร้สาย WLAN และระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมีย่านการใช้งานอยู่สองย่านความถี่ โดยไม่สามารถเลือกย่านความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานได้ [9-20] สำหรับงานวิจัยที่สามารถเลือกย่านการใช้งานได้ [21] มีข้อเสียคือมีกราวด์ทั้งด้านล่างไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์ประเภทแอททิฟเพราะจะต้องมีการเจาะรูชั้นเซตารท เมื่อนำมาใช้กับย่านความถี่สูงจะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงทำให้มีความผิดเพี้ยนได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอสายอากาศแบบ โมโน โพลที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่มีกราวด์ด้านบนเพียงอย่างเดียวและใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย WLAN และ WiMAX ตลอดจนสามารถใช้งานกับอุปกรณ์ประเภทแอททิฟและพาสซีฟได้ง่าย รวมทั้งสายอากาศมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีโครงสร้างที่ง่าย

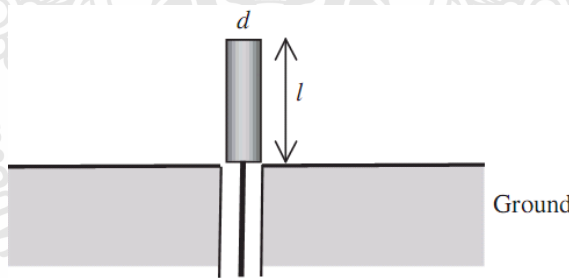
## 2.2 สายอากาศโมโนโพล

สายอากาศโมโนโพล เป็นการพัฒนารูปแบบและการทำงานจากสายอากาศไดโพล ที่ทำงานแบบสองขั้ว พื้นฐานการทำงานของสายอากาศไดโพลแสดงดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างจะเป็นสายส่งสองตัวนำปลายเปิดสองเส้น จุดที่ความยาวจากปลายสุดเท่ากับ  $\lambda/4$  เมื่อโค้ง หรือหักงอให้ปลายสายมีลักษณะบานออกหรือหันไปทางตรงข้ามกันจะทำให้สายตัวนำเกิดการแผ่กระจายคลื่นออกไป ซึ่งเรียกว่าสายอากาศไดโพล ความยาวทั้งหมดของสายอากาศไดโพลเป็น เท่ากับ  $\lambda/2$  ของความถี่ที่ใช้งาน ส่วนสายอากาศโมโนโพล จะใช้ตัวนำด้านบนเพียงตัวเดียวที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่น ส่วนตัวนำด้านล่างจะเป็นระนาบกราวด์ จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่เดียวกัน สายอากาศโมโนโพลจะมีความยาวตัวแผ่กระจายคลื่น เท่ากับ  $\lambda/4$  แต่สายอากาศไดโพล จะเป็น เท่ากับ  $\lambda/4$  สองข้าง สามารถพิจารณาได้

ว่า สายอากาศไดโพลอาศัยหลักการทำงานครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล และมีระนาบกราวด์เข้ามาทดแทน อีกครึ่งหนึ่งเพื่อให้กระบวนการทำงานสมบูรณ์ จากรูปที่ 2.2 สายอากาศโมโนโพล จะป้อนสัญญาณเพียงขั้วเดียว และจะใช้ระนาบกราวด์แทนขั้วที่เหลือ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลจะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของระนาบกราวด์ ซึ่งในทางอุดมคติแล้วระนาบกราวด์ของสายอากาศโมโนโพลจะเป็นระนาบกราวด์สมบูรณ์แบบ และเป็นอนันต์ ส่งผลให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีเพียงด้านบน หรือเพียงครึ่งด้านบนของสายอากาศไดโพล แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะพบว่า ไม่สามารถออกแบบระนาบกราวด์ได้ตามอุดมคติ ดังนั้นระนาบกราวด์สายอากาศโมโนโพลในทางปฏิบัติจึงเล็กกว่าในทางทฤษฎีมาก จึงทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเกิดการเปลี่ยนทิศทางออกไปทางด้านหลังของระนาบกราวด์ด้วย หากออกแบบให้สายอากาศโมโนโพล มีระนาบกราวด์ขนาดเล็กมาก จะพบว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ซึ่งมักจะเรียกกันว่า มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นคล้ายรอบตัว (like omnidirectional)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศไดโพล



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศโมโนโพล

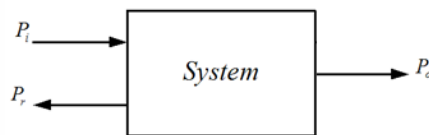
## 2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.3.1 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss)

การสูญเสียจะเกิดขึ้น เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณกับสายอากาศมีค่าไม่เท่ากัน หรือที่เรียกกันว่า ไม่แมตช์กัน ก็จะทำให้การส่งกำลังไปยังสายอากาศไม่สามารถส่งได้อย่างสมบูรณ์

จึงมีกำลังบางส่วนสะท้อนกลับเข้าไปในสายส่ง ซึ่งเรียกว่า เกิดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ แต่หากสายอากาศและสายส่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากันหรือแมตช์กัน ก็จะไม่มีการสะท้อนกลับ เนื่องจากสายอากาศเป็นการแผ่กระจายคลื่น ดังนั้นการพิจารณาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ จึงใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า scattering parameter และค่าสูญเสียจากการย้อนกลับมีชื่อเรียกว่า  $S_{11}$  ค่าการสูญเสีย หรือ  $S_{11}$  นี้ นิยมบอกเป็นหน่วย dB โดยค่าที่ยอมรับได้ในการออกแบบสายอากาศก็คือ จะต้องมีย่าน  $S_{11}$  น้อยกว่า -10 dB เนื่องจากการพิจารณาการสะท้อนของสัญญาณในสายส่งที่ส่งไปยังโหลด จึงสามารถพิจารณาใช้ค่า VSWR แทนได้ โดยพิจารณาค่า VSWR ที่ต่ำกว่า 2 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ เห็นได้ว่าไม่ว่าจะใช้ค่า  $S_{11}$  หรือ VSWR ก็สามารถบ่งบอกถึงความแมตช์ของสายส่งสัญญาณกับสายอากาศได้เช่นกัน พื้นฐานการคำนวณค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่เป็น  $S_{11}$  พิจารณาได้จาก รูปที่ 2.3

เมื่อส่งกำลังเข้าในระบบ จะเกิดการสะท้อนกลับ ของพลังงานเนื่องจากความไม่แมตช์กันของอิมพีแดนซ์ ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน

จากรูปที่ 2.3  $P_i$  คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต  
 $P_r$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ  
 $P_o$  คือ กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต

ซึ่งค่าของ Return loss สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Return loss (dB)} = -10 \log(P_r/P_i) \quad (2.1)$$

จากสมการจะพบว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเป็นอัตราส่วนของ  $P_r$  กับ  $P_i$  ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่าน หากว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำมาก ๆ จะหมายถึง มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังไปยังโหลดได้สูง หรือมีประสิทธิภาพการส่งกำลังที่ดี

### 2.3.2 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (wave radiation pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ตามพิกัดตำแหน่ง (space coordination) การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมี 3 ระยะ คือบริเวณสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (reactive near

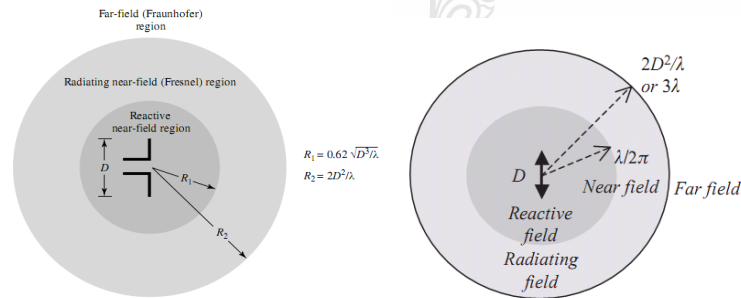


field) สนามการแผ่กระจายคลื่นระยะใกล้ (radiating near field) และบริเวณการแผ่กระจายคลื่นสนามระยะไกล (far-field) โดยแต่ละบริเวณจะพิจารณาจากระยะห่างจากสายอากาศออกไปรอบ ๆ เป็นรัศมีเท่าใด ซึ่งพิจารณาได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่าง ๆ

Antenna size (D)	$D \ll \lambda$	$D \approx \lambda$	$D \gg \lambda$
Reactive near field	$r < \lambda/2\pi$	$r < \lambda/2\pi$	$r < \lambda/2\pi$
Radiating near field	$\lambda/2\pi < r < 3\lambda$	$\lambda/2\pi < r < 3\lambda \text{ and } 2D^2/\lambda$	$\lambda/2\pi < r < 2D^2/\lambda$
Far field	$r > 3\lambda$	$r > 3\lambda \text{ and } 2D^2/\lambda$	$r > 2D^2/\lambda$

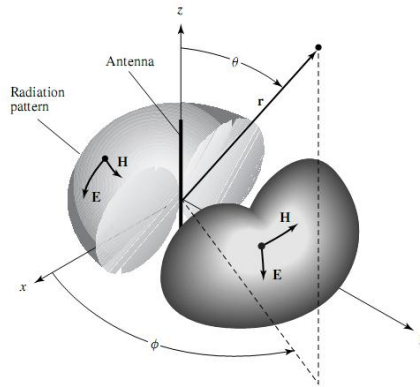
D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ,  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นที่พิจารณา และ R เป็นรัศมีหรือระยะห่างจากสายอากาศ เพื่อให้เห็นถึงสนามแต่ละบริเวณจึงแสดงในรูปของการแผ่กระจายคลื่นในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของการสังเกตตลอดบริเวณรอบ ๆ สายอากาศ



รูปที่ 2.4 บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

ดังนั้นเส้นการกวาดของการแผ่กระจายคลื่นที่ตำแหน่งรัศมีคงที่ และรอบสายอากาศ เรียกว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (radiation pattern) ในการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสามารถแสดงได้ทั้งแบบสองมิติ และสามมิติ แต่มักนิยมรูปแบบสองมิติก็พอเพียงต่อการพิจารณาคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ออกไปรอบตัวเท่ากันหมดหรือรอบทิศทางที่เท่ากันหมด เรียกว่า การแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (isotropic) ซึ่งเป็นแบบรูปในอุดมคติที่พิจารณาจากสายอากาศไดโพลขนาดเล็กรวม ส่วนแบบรูปที่ได้จากสายอากาศไดโพลในอุดมคตินั้น จะเป็นแบบรอบทิศทางระนาบเดียว (omni direction) ดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ หากแบบรูปมีการเปลี่ยนหรือเบนไปก็จะพิจารณาแบบมีทิศทาง (direction) รายละเอียดทั้งหมดจะมีอยู่ในตามเอกสารอ้างอิง[22]



รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

### 2.3.4 อัตราการขยายของสายอากาศ (antenna gain)

ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือ

1) อัตราการขยายจริง (absolute gain) ของสายอากาศ เป็น อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มการแผ่กระจายคลื่นที่ได้รับเข้ามา

2) อัตราขยายสัมพัทธ์ (relative gain) เป็น อัตราส่วนของอัตราการขยายการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนด ต่ออัตราการขยายการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ใช้ต่ออัตราการขยายการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบกันทั้งสองแบบจะต้องเหมือนกัน หรือมีค่าเท่ากัน

### 2.3.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance)

อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input Impedance) ของสายอากาศ เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศ โดยอาจพิจารณาเป็นอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสดันกับกระแสที่ขั้วของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่ง ๆ จากรูปที่ 2.6 ที่จุด a และ b อัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วนี้ขณะไม่มีโหลดใดๆ ต่ออยู่ จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ

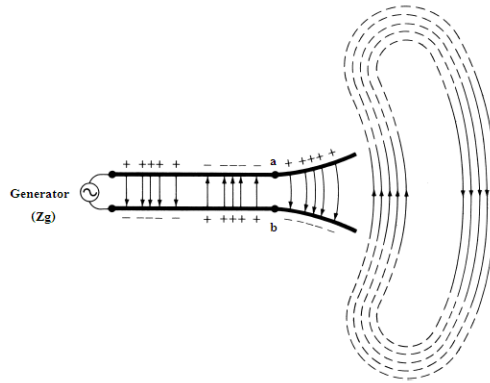
$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.2)$$

โดยที่  $Z_A$  = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a, b (โอห์ม)

$R_A$  = ค่าความต้านทานของสายอากาศที่ขั้ว a, b (โอห์ม)

$X_A$  = ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a, b (โอห์ม)

ปกติอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะแมตช์กับสายส่งสัญญาณในช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้น การออกแบบสายอากาศ จะกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ให้เป็น  $50 \Omega$  เนื่องจากสายส่งและตัว SMA connector ที่ใช้มีค่าอิมพีแดนซ์  $50 \Omega$  ซึ่งในการวิจัยนี้ ได้ออกแบบสายอากาศที่ใช้การเชื่อมต่อด้วย SMA และมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์  $50 \Omega$



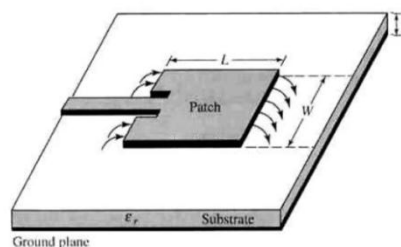
รูปที่ 2.6 สายอากาศในโหมดการส่ง

## 2.4 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ

รูปแบบการป้อนสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศแบบแผ่น มีรูปแบบที่นิยมใช้มีอยู่ 4 ชนิด ดังนี้

### 2.4.1 การป้อนด้วยไมโครสตริปไลน์ (microstrip line feed)

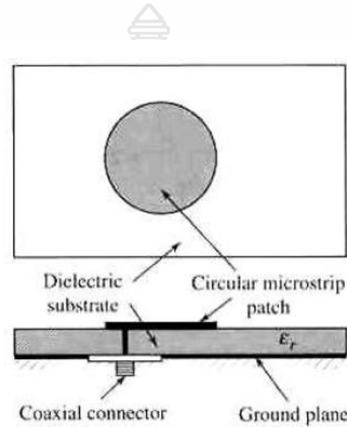
สายป้อนแบบไมโครสตริป เป็นสายป้อนที่เล็กกว่าแพตช์ การป้อนแบบไมโครสตริป นั้นสร้างง่ายและแมตช์ได้ง่าย โดยการควบคุมตำแหน่งการป้อน อย่างไรก็ตามการใช้ฐานรองที่หนาขึ้น ทำให้คลื่นที่ผิวและการแพร่กระจายคลื่นจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติการออกแบบจะมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด (ปกติที่ 2 - 5 %) ตัวอย่างการป้อนดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การป้อนแบบ microstrip line

### 2.4.2 การป้อนแบบสายโพรบ (probe feed)

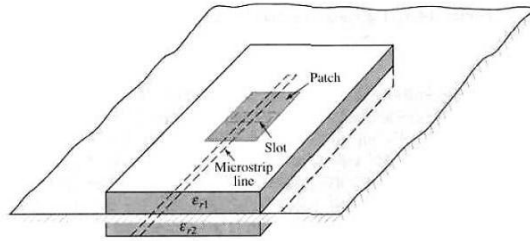
รูปที่ 2.8 เป็นการป้อนด้วยสายโพรบ ลักษณะการป้อนแบบนี้ จะทำให้ตัวนำด้านในของสายเชื่อมต่อกับแพตช์ และตัวนำด้านนอกต่อกับระนาบกราวด์ การป้อนแบบนี้เป็นวิธีที่ง่ายทั้งการสร้างและการทำแพตช์ และมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมน้อย แต่อย่างไรก็ตามมันจะให้แบนด์วิดท์ที่แคบเมื่อมีฐานรองที่หนาขึ้น ( $h > 0.02\lambda_0$ )



รูปที่ 2.8 การป้อนแบบ probe feed

### 2.4.3 การป้อนแบบช่องเปิด (aperture coupling)

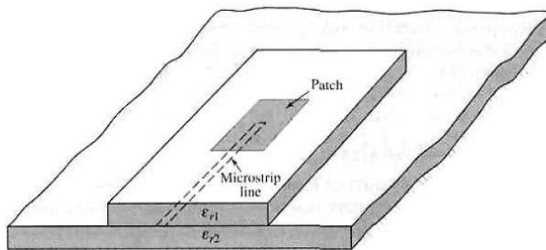
การป้อนทั้งสองแบบข้างต้นมีคุณลักษณะที่ไม่สมมาตร ที่ก่อให้เกิดโหมดที่สูงขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้การป้อนที่ไม่สัมผัสกับแพตช์ นั่นก็คือการใช้การป้อนแบบช่องเปิด การป้อนแบบนี้จะสร้างยากที่สุดและมีแบนด์วิดท์ที่แคบ แต่ไม่ยากในการจำลองแบบ และมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอม การป้อนนี้ประกอบด้วยวัสดุฐานรองสองชั้นที่คั่นกลางด้วยแผ่นตัวนำกราวด์ ที่ผิวด้านล่างของแผ่นวัสดุฐานรองอันล่าง จะเป็นสายส่งไมโครสตริป ที่ใช้สำหรับการส่งผ่านพลังงานไปยังแพตช์ผ่านช่องเปิดบนระนาบกราวด์ ลักษณะนี้จะทำให้การปรับแต่งเป็นไปได้ง่ายและอิสระต่อกันทั้งสายส่งและแพตช์ โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองอันล่างที่เป็นส่วนของสายส่งและระนาบกราวด์ จะกำหนดให้มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกฐานรองที่สูง ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองของแพตช์จะต่ำกว่าและมีความหนาที่มากกว่า การที่มีระนาบกราวด์คั่นตรงกลางทำให้ผลของการรบกวนที่เกิดจากการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมมีน้อย และไม่รบกวนต่อโพลาริเซชัน ลักษณะการป้อนแบบช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การป้อนแบบ aperture coupling

#### 2.4.4 การป้อนแบบคัปปลิง (proximity coupling)

ลักษณะการป้อนดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด (> 13 %) และรูปแบบจำลองบางอย่างไม่ซับซ้อนและมีการแพร่กระจายคลื่นปลอมที่ขมขื่นต่ำ แต่การสร้างจะมีความยุ่งยากการควบคุมการทำแมตซิ่ง ทำได้โดยการควบคุมความยาวของสตัป และอัตราส่วนความกว้างต่อสายของแพตช์



รูปที่ 2.10 การป้อนแบบ proximity coupling

### 2.5 สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

สายส่งสัญญาณที่ถูกนำมาใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟมีอยู่หลายชนิด เช่น สายส่งโคแอกเซียล ไมโครสตริปและสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ซึ่งสายส่งไมโครสตริปกับสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการออกแบบและการสร้าง รวมทั้งยังสามารถพัฒนาไปเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ จากผลการวิจัยและพัฒนาที่ผ่านมาโครงสร้างที่เป็นไมโครสตริปจะประสบปัญหาและข้อจำกัด เช่น เมื่อต้องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์จำเป็นจะต้องมีช่องผ่าน (via hole) เพื่อเชื่อมต่อตัวนำด้านบนกับระนาบกราวด์ด้านล่าง ซึ่งจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณสูง (high dispersion) และการสูญเสียสูง (high insertion loss) เพื่อแก้ปัญหาทางงานวิจัยดังกล่าวจึงนำเสนอสายอากาศโครงสร้างระนาบร่วมที่มีกราวด์ด้านบน สามารถลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ (low dispersion) และการสูญเสีย (low insertion loss) โครงสร้างที่ได้มีความแข็งแรงที่สามารถลดช่องผ่านและเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบเพื่อใช้งาน

สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (coplanar waveguide : CPW) มีการป้อนสัญญาณระหว่างช่องเปิดสองข้างที่อยู่ระนาบเดียวกันกับกราวด์ ทำให้มีข้อได้เปรียบคือ เป็นสายอากาศที่ให้แถบความถี่กว้าง ออกแบบโดยใช้รูปแบบง่าย โดยใช้การปรับขนาดช่องเปิดทั้งสองข้าง และความยาวของสายป้อนสัญญาณ

### 2.5.1 โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

โครงสร้างที่ใช้สายส่งสัญญาณบนวงจรรวมไมโครเวฟมีโครงสร้างเป็นแบบระนาบ ซึ่งมีใช้กันทั่วไป มีดังนี้ คือ สายส่งสัญญาณไมโครสตริป (microstrip) สายส่งสัญญาณแบบร่อง (slot line) สายส่งสัญญาณระนาบแบบคู่ (coplanar strips) และ สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม coplanar waveguide (CPW) แสดงในรูปที่ 2.11

สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (coplanar waveguide : CPW) และชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (conductor-backed coplanar waveguide) ในรูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง ซึ่งประกอบไปด้วยสายส่งสัญญาณ (strip) อยู่ตรงกลางด้านบนของฐานรองไดอิเล็กตริก (substrate) โดยมีความกว้างของสายส่งสัญญาณคือ  $W$  ด้านข้างทั้งสองด้านของสายส่งสัญญาณมีลักษณะเป็นร่อง (slot) และระนาบกราวด์ตามลำดับ มีความกว้างระหว่างสายส่งสัญญาณถึงระนาบกราวด์คือ  $g$  และมีความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริกคือ  $h$  ส่วนสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่างแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งต่างกับชนิดแรกตรงที่จะมีกราวด์ทางด้านล่างของฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นมา ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าบนสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะเป็นแบบ Quasi-TEM ข้อดีของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมคือสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องการเจาะรูผ่านฐานรองไดอิเล็กตริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้น สามารถนำมาต่อรวมในวงจรเดียวกันกับไมโครสตริปได้ง่าย การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ (dispersion) และค่าความสูญเสีย (losses) ต่ำกว่าการใช้ไมโครสตริป จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นทำให้โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมเหมาะกับการทำเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่เป็นแบบพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) จะอยู่ในเทอมอัตราส่วนของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์อันดับแรก (complete elliptic integral of the first kind) โดยกำหนดให้

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ

$C^a$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับ  $C$  แต่จะแทนไดอิเล็กตริกทั้งหมดด้วยอากาศ โดยจะได้ว่า

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C^a} \quad (2.3)$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.4)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.5)$$

$$Z_0 = \frac{1}{CV_p} = \frac{1}{c \sqrt{\epsilon_{re}} C^a} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$\epsilon_{re}$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

$V_p$  คือ ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

$\lambda_g$  คือ ความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

$Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

$c$  คือ ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ ( $3 \times 10^8$  m/s)

ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณหาได้จากสมการ

$$Z_0 = \frac{30\pi K'(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k_1)} \quad (2.7)$$

โดยที่  $K(k_1)$  และ  $K'(k_1)$  เป็น complete elliptical integral of the first kind [25]

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.8)$$



โดยที่

$$q = \frac{1K(k_2)K'(k_1)}{2K'(k_2)K(k_1)} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $q$  คือ Filling Factor

และ

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (2.10)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a / 2h)}{\sinh(\pi b / 2h)} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$a = \frac{S}{2} \quad (2.12)$$

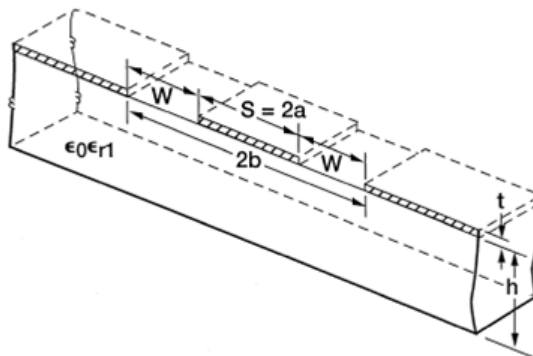
$$b = \frac{(2W + S)}{2} \quad (2.13)$$

โดยที่

$h$  คือ ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก

$S$  คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณ

$W$  คือ ความกว้างของร่องสตริป



รูปที่ 2.14 สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

การอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก(complete elliptical integral of the first kind )สามารถหาได้โดย จาก incomplete form ;

$$K(k) = \int_0^{\phi} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}}, \quad \begin{cases} 0 \leq k^2 < 1 \\ 0 \leq \phi < \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.14)$$

จาก complete elliptic integral  $K(k)$  of the first kind

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} = \int_0^1 \frac{dt}{(1-t^2)(1-k^2 t^2)} \quad (2.15)$$

$$\lim_{k \rightarrow 0^+} K(k) = \frac{\pi}{2}; \quad \lim_{k \rightarrow 1^-} K(k) = +\infty \quad (2.16)$$

เมื่อ  $k$  คือ modulus of elliptical integral ,  $0 < k < 1$

กรณี complementary modulus  $k'$ ,  $0 < k' < 1$

$$K'(k) = K(k') = K\sqrt{1-k^2} \quad (2.17)$$

$$\lim_{k \rightarrow 0^+} K'(k) = +\infty; \quad \lim_{k \rightarrow 1^-} K'(k) = \frac{\pi}{2} \quad (2.18)$$

และอัตราส่วนของ  $K(k) / K'(k)$  สามารถหาได้โดยการประมาณคือ

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln[2(1+\sqrt{k'})/(1-\sqrt{k'})]} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq k \leq 0.707 \quad (2.19)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln[2(1+\sqrt{k})/(1-\sqrt{k})] \quad \text{เมื่อ } 0.707 \leq k \leq 1 \quad (2.20)$$

โดย  $k'$  เป็น Complementary modulus

### 2.5.3 สายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่างหาได้เช่นเดียวกับที่ใช้ในสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่างดังสมการ

$$Z_o = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{K(k_1)/K'(k_1) + K(k_3)/K'(k_3)} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$k_3 = \frac{\tanh(\pi a / 2h)}{\tanh(\pi b / 2h)} \quad (2.22)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_{r-1}) \quad (2.23)$$

เมื่อ  $q$  คือ Filling Factor

โดยที่

$$q = \frac{K(k_2)/K'(k_2)}{K(k_1)/K'(k_1) + K(k_3)/K'(k_3)} \quad (2.24)$$

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์แสดงดังสมการ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.25)$$

$$\epsilon_{reff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\lambda_o$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศที่ความถี่ออกแบบ

$\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นที่นำเข้าไปที่ความถี่ออกแบบ

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

$\epsilon_{reff}$  คือ ค่าประสิทธิผลของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

สำหรับการออกแบบสายอากาศ เลือกใช้การจำลองของวัสดุฐานรอง (substrate) ซึ่งใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.4

ความหนาของวัสดุฐานรอง  $h = 1.6$  มิลลิเมตร

การออกแบบสายอากาศเริ่มจาก ความกว้างของตัวป้อนไมโครสตริป ( $w$ ) ออกแบบเพื่อแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ 50 โอห์ม ด้วยสมการ

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $B = \frac{60\pi^2}{Z_o \sqrt{\epsilon_r}}$  และ  $\left[ \frac{w}{h} \right] > 1$

## 2.6 สายอากาศร่อง (slot antenna)

สายอากาศร่อง (slot antenna) ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีลักษณะแบนราบและขนาดเล็กโดยสายอากาศร่องแบบต่างๆ ซึ่งเป็นรูปแบบคู่ประกอบของเส้นลวดหรือสายส่งสัญญาณ

ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศร่องสามารถคำนวณได้จากคุณลักษณะของสายอากาศเส้นลวดหรือสายส่งสัญญาณ โดยจะใช้หลักการของบาบินเนต (babinet's principle) โดยร่องที่ใช้อย่างสายอากาศมีทั้งร่องแคบ (narrow slot) และร่องกว้าง (wide slot) ซึ่งสายอากาศร่องแคบมีจุดที่น่าสนใจหลักๆ คือคุณลักษณะของอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศแมตช์กับสายส่งสัญญาณได้ดี ในขณะที่สายอากาศร่องกว้างมีข้อจำกัดในเรื่องของอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่แคบและมีค่าโพลาไรซ์เซชันไขว้สูง (high cross-polarization) ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำสายอากาศร่องกว้างไปใช้งาน นอกจากนี้แล้วผลกระทบของร่องกว้างจะทำให้เกิดการกระจายเฟสของสนามไฟฟ้าในร่องที่ไม่เท่ากันซึ่งส่งผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และบีมหลักในระนาบสนามไฟฟ้าเกิดมุมเอียง (tilt)

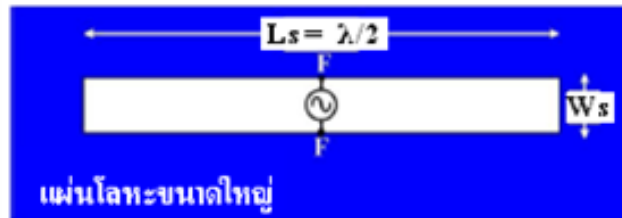
โดยรายละเอียดของการศึกษาทั้งสายอากาศร่องแคบและกว้างจะกล่าวต่อไป รวมทั้งในตอนท้ายจะได้นำเสนอสายอากาศร่องกว้างที่มีการปรับปรุงโครงสร้างให้มีแบนด์วิดท์กว้างที่มีค่าโพลาไรซ์เซชันแบบไขว้ต่ำ โดยป้อนแบบโครงสร้างระนาบร่วม (CPW) และการปรับปรุงแบนด์วิดท์จะใช้สอง

เทคนิคร่วมกันคือการป้อนโดยใช้สตับจูน (tuning Stub) และสตริปโหลด (loading strip) ในการศึกษาและวิเคราะห์ผลจะใช้โปรแกรมจำลองการทำงานทางแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D ช่วยในการจำลองการทำงานทั้งการสูญเสียย้อนกลับ อิมพีแดนซ์และการกระจายของกระแสและสนามต่างๆ

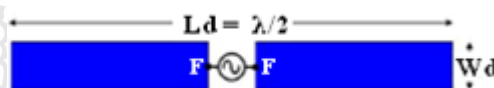
ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะต่างๆ สายอากาศร่องบนแผ่นระนาบทั้งร่องแคบและร่องกว้าง เทคนิคการป้อนแบบต่างๆ ทั้งสายส่งสัญญาณไมโครสตริปเปรียบเทียบกับ โครงสร้างระนาบร่วม รวมทั้งเทคนิคการทำให้สายอากาศร่องมีแบนด์วิดธ์ที่กว้าง

### 2.6.1 สายอากาศร่องแคบ

ในเบื้องต้นจะทำการศึกษาค้นสมบัติเบื้องต้นที่สำคัญของสายอากาศร่องแคบเพื่อใช้ในการอ้างอิงโครงสร้างสายอากาศร่องประกอบด้วยตัวแผ่พลังงาน (radiator) ซึ่งเกิดจากการเจาะร่องของแผ่นโลหะขนาดใหญ่แสดงดังรูปที่ 2.15 ก โดยทั่วไปร่องจะมีความยาวคลื่น  $(\lambda/2)$  ณ ความถี่ที่ต้องการและความกว้างของร่องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมากๆ ( $W_s \ll \lambda$ )



(ก)

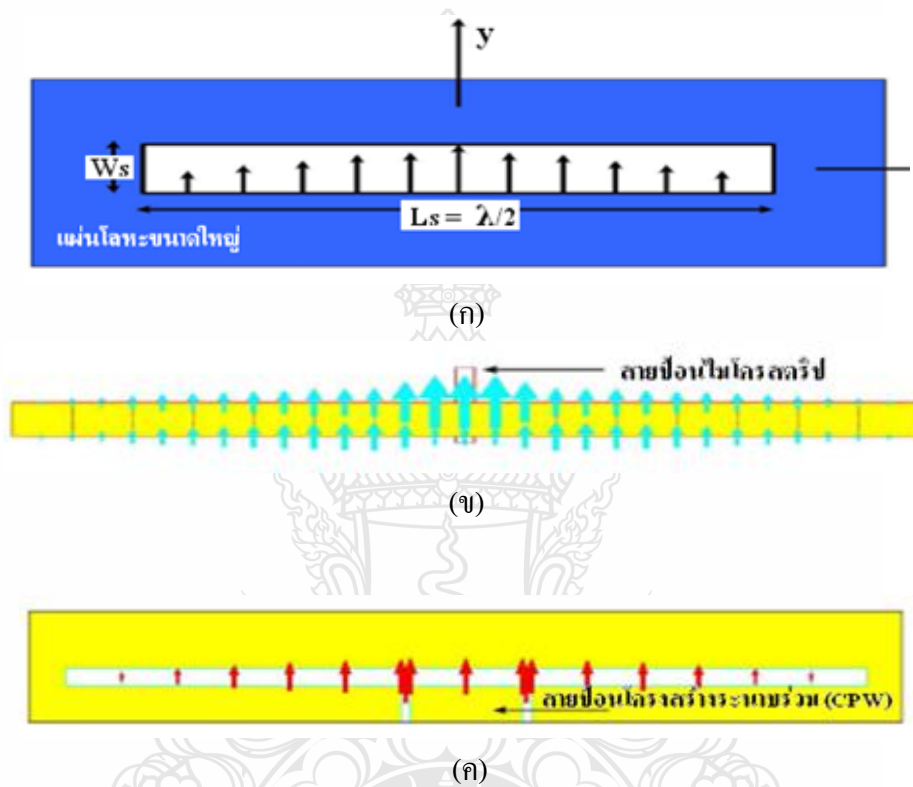


(ข)

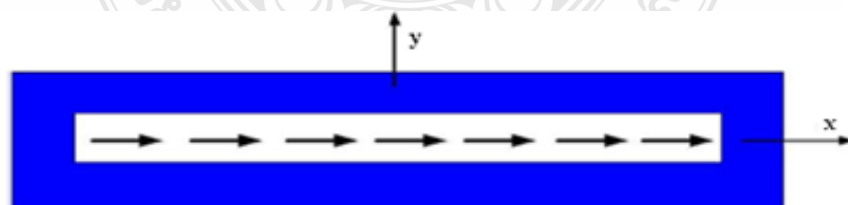
รูปที่ 2.15 ก) สายอากาศร่องแคบที่มีความยาว  $L_s = \lambda/2$  ในแผ่นระนาบโลหะขนาดอนันต์  
ข) สายอากาศไดโพลยาว  $\lambda/2$

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องแคบบนแผ่นโลหะขนาดอนันต์ พิจารณาสายอากาศร่องแนวนอน ยาว  $L_s = (\lambda/2)$  ความกว้างของร่องคือ  $W_s$  บนแผ่นโลหะขนาดอนันต์แสดงดังรูปที่ 2.15 ก ร่องถูกป้อนพลังงานที่จุด F-F โดยการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องมีลักษณะเหมือนกับสายอากาศไดโพลสตริปที่มีความยาว  $\lambda/2$  ที่มีความกว้าง  $W_d$  และป้อนที่ตรงตำแหน่ง F-F แสดงดังรูปที่ 2.15 ข แต่มีสิ่งที่แตกต่างกันสองประการหลักๆ ประการแรกคือสนามไฟฟ้า (electric field) และสนามแม่เหล็ก (magnetic field) จะสลับกันโดยในกรณีสายอากาศ

ไดโพลจะมีเส้นสนามไฟฟ้าตามแนวแกนนอน ขณะที่วงรอบเส้นสนามแม่เหล็กจะอยู่ในระนาบแนวตั้ง ส่วนสายอากาศร่องเส้นสนามแม่เหล็กจะอยู่ในแนวนอนและเส้นสนามไฟฟ้าจะอยู่ในแนวตั้ง โดยเส้นสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างร่องและมีขนาดสูงสุดที่จุดป้อนตัวอย่างการป้อนสายอากาศร่องแคบที่บริเวณตรงกลางร่องแสดงดังรูปที่ 2.16 ก ส่วนรูปที่ 2.16 ข และค แสดงผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม IE3D

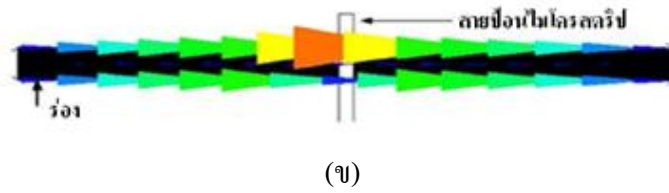


รูปที่ 2.16 ก) สนามไฟฟ้า สายอากาศร่องแคบยาว  $\lambda/2$  ในแผ่นระนาบโลหะขนาดอนันต์  
 ข) การจำลองโดยใช้การป้อนแบบไมโครสตริป  
 ค) การจำลองโดยใช้ป้อนแบบโครงสร้างระนาบร่วม



(ก)

รูปที่ 2.17 ก) การกระจายกระแสแม่เหล็กในสายอากาศร่องแคบความยาว  $\lambda/2$  ขนาดอนันต์  
 ข) เมื่อการป้อนแบบไมโครสตริป  
 ค) เมื่อป้อนโครงสร้างระนาบร่วม



(ข)



(ค)

- รูปที่ 2.17 (ต่อ) ก) การกระจายกระแสแม่เหล็กในสายอากาศร่องแคบความยาว  $\lambda/2$  ขนาดอนันต์  
 ข) เมื่อการป้อนแบบไมโครสตริป  
 ค) เมื่อป้อน โครงสร้างระนาบร่วม

โดยสนามไฟฟ้าจากรูปที่ 2.17 ก) เมื่อวางร่องตามแนวแกน  $x$  การกระจายของสนามไฟฟ้าในร่องสามารถเขียนได้ดังนี้

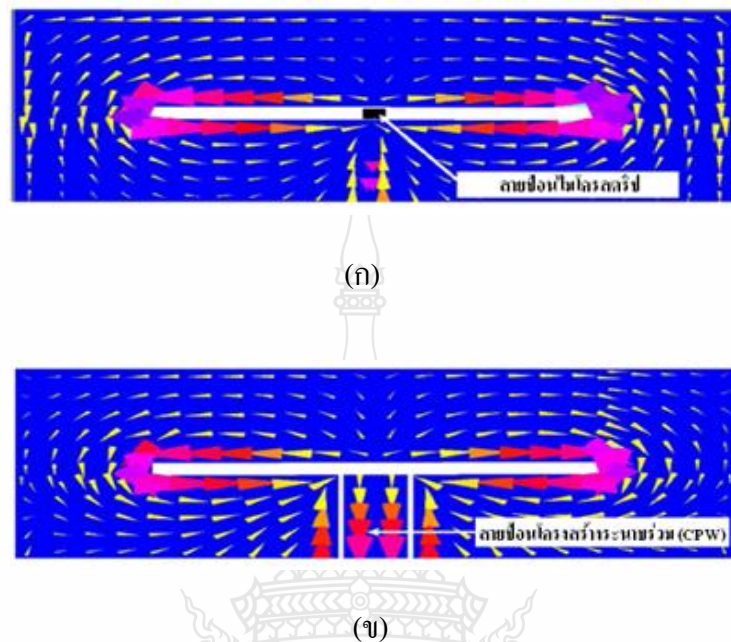
$$E_y = E_0 \cos(\pi x/L_s), W_s \ll \lambda_0 \quad (2.28)$$

จากสมการจะพบว่า เมื่อมีการป้อนที่ตรงกลางของร่องสนามไฟฟ้าจะเกิดสูงสุดที่จุดตรงกลาง และจะมีเฉพาะสนามไฟฟ้าตามแนวแกน  $y(E_y)$  และลดลงตามแนวความยาวจากการจำลองด้วยโปรแกรมที่มีการป้อนโดยใช้สายส่งสัญญาณไมโครสตริป (รูปที่ 2.17 ข) และโครงสร้างระนาบร่วม (รูปที่ 2.17 ค) จะพบว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกับสมการที่ (2.27) และรูปที่ 2.17 ข ส่วนการกระจายของกระแสแม่เหล็ก (magnetic current distribution) สามารถหาได้จาก

$$\vec{M}(x, y) = \vec{E}(x, y) \times \hat{z} = E_y \hat{y} \quad (2.29)$$

ผลของสมการที่ 2.28 และการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 2.18 จากรูปจะพบว่ากระแสแม่เหล็กจะไหลอยู่ในเฉพาะส่วนของร่องและมีทิศทางไปตามแกน  $+x$  จากผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างสายอากาศร่องกับไดโพลสตริป ผลที่ได้ก็คือโพลาริเซชันการแผ่กระจายของร่องตามแนวอนจะมีโพลาริเซชันแนวตั้ง แต่ถ้าเป็นร่องแนวตั้งจะได้โพลาริเซชันแนวอน ส่วนข้อแตกต่างที่สองระหว่างสายอากาศร่องกับไดโพลสตริปคือองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของร่องจะตั้งฉากกับระนาบแผ่โลหะซึ่งจะไม่ต่อเนื่องจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งและมีทิศทางของ

สนามตรงข้ามกัน แต่ของไดโพลจะมีทิศทางเดียวกัน ส่วนองค์ประกอบแนวแทนเจนต์ (tangent) ของสนามแม่เหล็กก็เช่นกันคือไม่ต่อเนื่องขณะที่ของไดโพลจะวิ่งต่อเนื่องครบรอบ

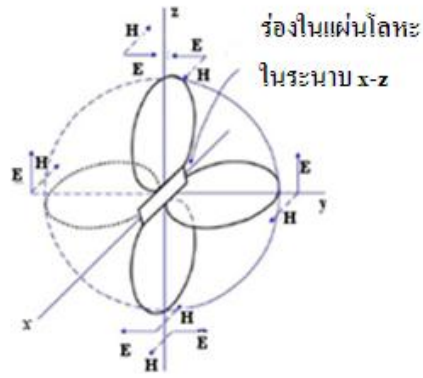


รูปที่ 2.18 ก) การกระจายของกระแสในสายอากาศร่องแคบยาว  $\lambda/2$  เมื่อป้อนแบบไมโครสตริป

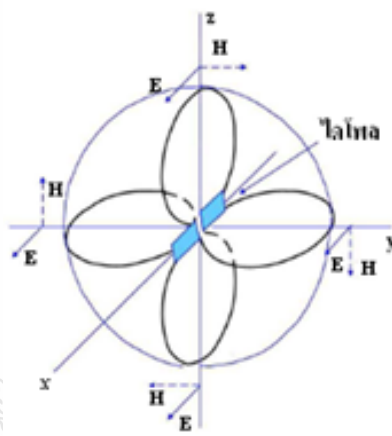
ข) การป้อนโครงสร้างระนาบร่วม

เมื่อมีการจ่ายพลังงานผ่านสายส่งสัญญาณไปยังสายอากาศร่องแคบการกระจายกระแสไฟฟ้า (electric current distribution) จะวิ่งอยู่บนแผ่นโลหะซึ่งกระแสเหล่านั้นจะไม่จำกัดอยู่ที่เฉพาะขอบของร่องแต่จะกระจายออกไปตามแผ่นโลหะรูปที่ 2.13 แสดงผลการจำลองของการกระจายกระแสไฟฟ้าบนแผ่นโลหะที่ใช้เจาะร่องที่ป้อนด้วยสายป้อนไมโครสตริป และโครงสร้างระนาบร่วมจะพบว่า การไหลของกระแสจะมีทิศทางเดียวกันด้วยการป้อนที่แตกต่างกันสองแบบ การที่กระแสไฟฟ้าวิ่งกระจายไปทั่วทั้งแผ่น ดังนั้นการแผ่กระจายคลื่นจะออกทั้งสองด้านของแผ่นโลหะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องความยาว ( $\lambda/2$ ) เปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพล โดยถ้าวงแผ่นโลหะขนาดใหญ่ในระนาบ x-z และมีการเจาะร่องตามแนวแกน x แสดงดังรูปที่ 2.14 ก ส่วนสายอากาศไดโพลที่เป็น คู่กันวางบนแกน x แสดงดังรูปที่ 2.19 ข การแผ่กระจายคลื่น ของสายอากาศทั้งสองมีลักษณะเดียวกันคือลักษณะคล้ายรูปโดนัทแต่มีทิศทางของสนาม E และ H สลับกันแสดงดังรูปที่ 2.19 จากรูป เส้นทึบแสดงสนามไฟฟ้า E ส่วนเส้นประจะแสดงสนามแม่เหล็ก H ถ้าระนาบ x-y คือระนาบแนวนอนและแกน z คือแนวตั้งรูปที่ 2.19 ก แสดงการแผ่กระจายคลื่นจากร่องแนวนอนจะมีโพลาไรซ์แนวตั้งในทุกๆ ที่บนระนาบ x-y ขณะที่เมื่อทำการหมุนร่องให้วางในแนวตั้ง (ตามแนวแกน z) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะหมุนไป  $90^\circ$  แสดงดังรูปที่ 2.19



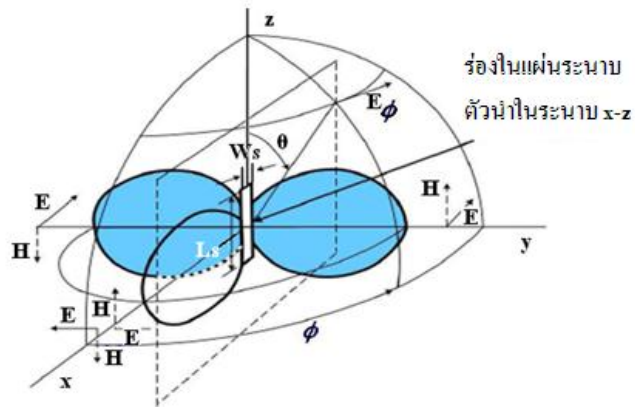


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.19 ก) สนามการแผ่กระจายคลื่นของร่องในแผ่นโลหะขนาดอนันต์  
ข) สนามการแผ่กระจายคลื่น ของไดโพล



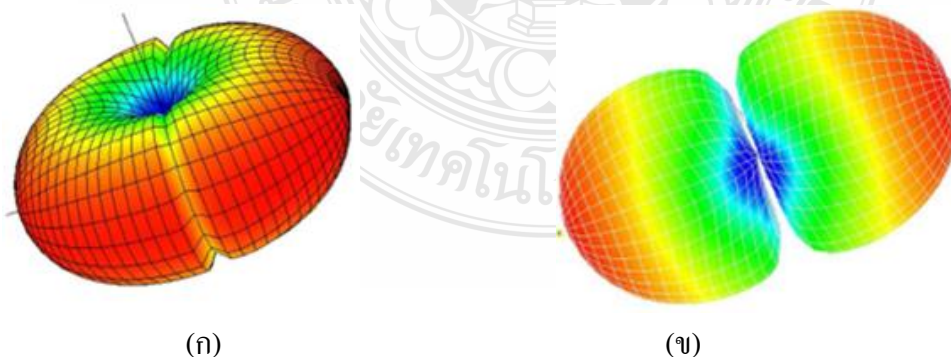
รูปที่ 2.20 สนามการแผ่กระจายคลื่นของร่องในแนวตั้งวางในแผ่นระนาบตัวนำขนาดอนันต์

ซึ่งจะมีโพลาไรซ์เซชันแนวนอนในทุก ๆ ที่ ความหมายก็คือมีเพียงสนามไฟฟ้าเฉพาะ  $E\phi$  เท่านั้น โดยถ้าร่องมีความกว้างเล็กมาก ๆ ( $W_s \ll \lambda$ ) และมีความยาว  $\lambda/2$  ( $L_s = \lambda/2$ ) การเปลี่ยนแปลงของ  $E\phi$  จะเป็นฟังก์ชันของมุม  $\theta$  โดยความสัมพันธ์ดังนี้

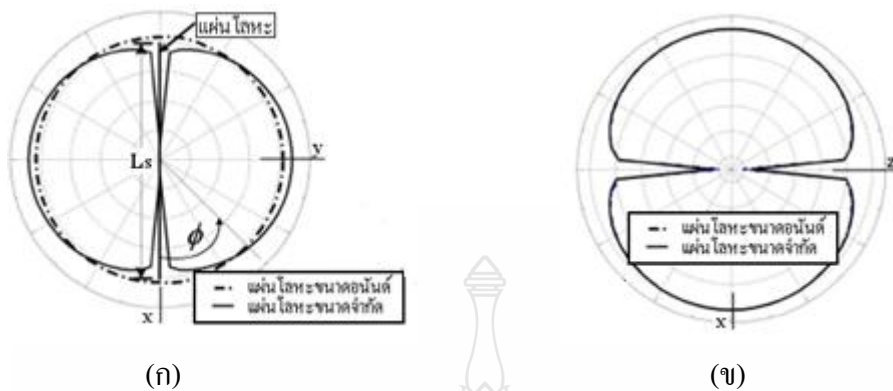
$$E\phi(\theta) = \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \quad (2.30)$$

ถ้าสมมุติว่าแผ่นโลหะเป็นตัวนำอย่างสมบูรณ์และมีขนาดอนันต์สนาม  $E\phi$  จะมีค่าคงที่เท่ากับฟังก์ชันของ  $\phi$  ที่ค่า  $\theta$  ใด ๆ หรือ  $E\phi(\theta) =$  ค่าคงที่และผลการจำลองของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ทั้งรูปสามมิติของแผ่นโลหะขนาดอนันต์เปรียบเทียบกับแผ่นโลหะจำกัดแสดงดังรูปที่ 2.16 จากรูปจะพบว่าขนาดของแผ่นโลหะของร่องส่งผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นอย่างมากกล่าวคือ เมื่อขนาดของแผ่นโลหะมีขนาดอนันต์แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นลักษณะรูปโดนัท หรือมีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นออกรอบตัวแต่เมื่อขนาดของแผ่นโลหะมีขนาดเล็กกลงจะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายออกเป็นสองลูกคลื่นในสองทิศทางหรือเป็นแบบรูปแบบสองทิศทางโดยถ้าเพิ่มขนาดของแผ่นโลหะให้ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นก็จะมีรูปร่างคล้ายรูปโดนัทขึ้นเรื่อยๆเช่นกันส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสองมิติแสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งจะมีโพลาไรซ์เซชันแนวนอนในทุก ๆ ที่ ความหมายก็คือมีเพียงสนามไฟฟ้าเฉพาะ  $E\phi$  เท่านั้น โดยถ้าร่องมีความกว้างเล็กมาก ๆ ( $W_s \ll \lambda$ ) และร่องมีความยาว  $\lambda/2$  ( $L_s = \lambda/2$ ) การเปลี่ยนแปลงของ  $E\phi$  จะเป็นฟังก์ชันของมุม  $\theta$  โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$E\phi(\theta) = \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.21 ก) มุมมองสามมิติการแผ่กระจายคลื่น ในสายอากาศร่องแคบขนาดอนันต์  
ข) มุมมองสามมิติการแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศร่องแคบขนาดจำกัด



รูปที่ 2.22 ก) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสองมิติบนแผ่นโลหะมีขนาดอนันต์ ระนาบ x-y  
 ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสองมิติบนแผ่นโลหะมีขนาดจำกัด ระนาบ x-z

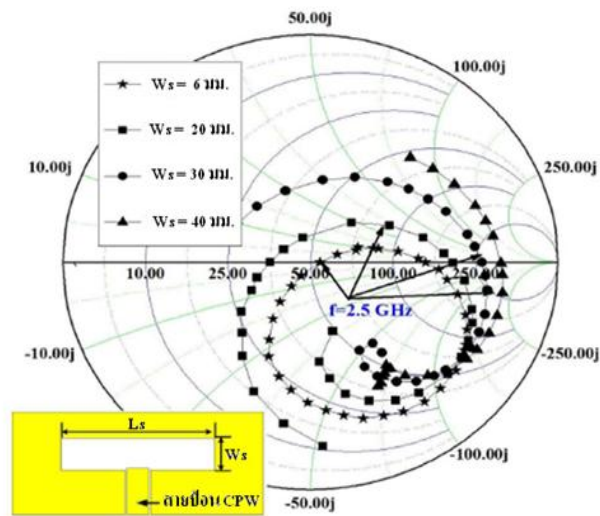
### 2.6.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศร่องแคบ

โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์ของสายอากาศร่องแคบ ( $Z_s$ ) จะมีความสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล ( $Z_d$ ) โดยตรงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z_s$  และ  $Z_d$  แต่อย่างไรก็ตามในที่นี้ได้ใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ ดังนั้นในส่วนนี้จะใช้ผลจากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ผลของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศร่องแคบ

### 2.6.3 สายอากาศร่องกว้าง

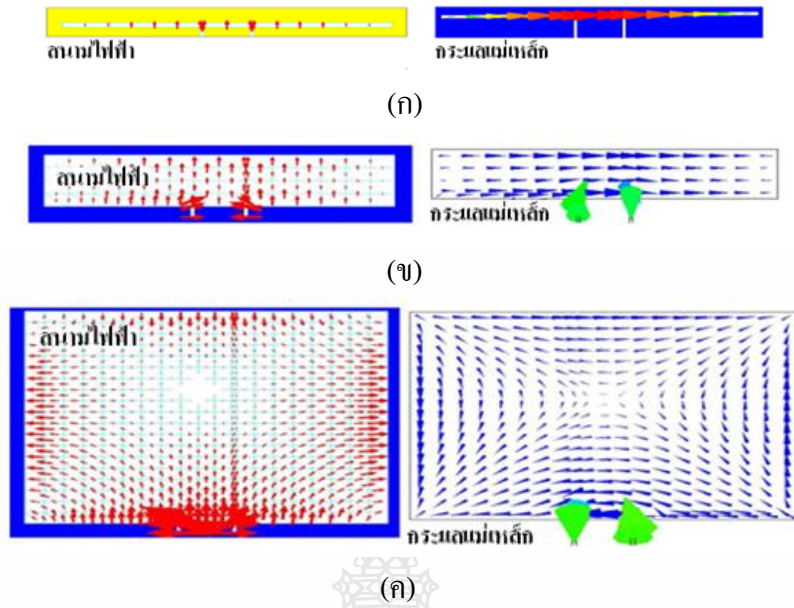
เริ่มต้นจากการเพิ่มขนาดความกว้างของร่อง ( $W_s$ ) และเพื่อทำความเข้าใจโครงสร้างทางกายภาพเพื่อใช้ในการปรับปรุงสายอากาศ โดยรูปที่ 2.18 แสดงอิมพีแดนซ์อินพุทของสายอากาศร่องที่ป้อนด้วย CPW ที่มีความกว้างของร่องที่แตกต่างกันจาก 6 มิลลิเมตร ถึง 40 มิลลิเมตร เมื่อความยาวร่อง  $L_s = 78$  มิลลิเมตร วางบนแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีความสูง ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) = 4.4 จากรูปจะพบว่าวงรอบของอิมพีแดนซ์อินพุทจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปโดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อความกว้างของร่องเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทาน (ค่าจริงบนสมิทชาร์ต) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวอย่างที่ความถี่ 2.5 GHz ค่าความต้านทานจะเพิ่มจาก 50, 91, 270 และ 287 โอห์ม เมื่อขนาดของร่องเพิ่มจาก 6 ถึง 40 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ (ค่าจินตรูปบนสมิทชาร์ต) จะมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0, 35, 14 และ 189 โอห์ม ทั้งนี้เนื่องจากร่องเมื่อมีความกว้างของร่องเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทาน (ค่าจริงบนสมิทชาร์ต) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวอย่างที่ 2.5 GHz ค่าความต้านทานจะเพิ่มจาก 50, 91, 270 และ 287 โอห์ม เมื่อขนาดของร่องเพิ่มจาก 6 ถึง 40 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ (ค่าจินตรูปบนสมิทชาร์ต) จะมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0, 35, 14 และ 189 โอห์ม ทั้งนี้เนื่องจากร่องเมื่อมีความกว้างของร่องเพิ่มมากขึ้นจะเพิ่มค่าเก็บประจุมากขึ้นซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ สายอากาศร่องเมื่อมีความกว้างเพิ่มขึ้นจะมีอิมพีแดนซ์แมต칭 (matching

impedance) แยกออกจากจุดกึ่งกลางของสมิธชาร์ต นอกจากนี้ยังส่งผลต่อค่าโพลาไรซ์เซชัน ไขว้ให้สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก มีทิศทางไม่ไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.23 อิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศร่องป้อนด้วยโครงสร้างระนาบร่วมที่มีความกว้าง ร่อง ( $W_s$ ) แตกต่างกัน เมื่อ  $L_s = 78$  มิลลิเมตร  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $h = 1.4$  มิลลิเมตร

เพื่อให้เข้าใจมากยิ่งขึ้นรูปที่ 2.24 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบของการกระจาย สนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กเมื่อขนาดของร่องแตกต่างกัน จากรูปจะพบว่าเมื่อขนาดเพิ่มจาก 2 มิลลิเมตร เป็น 10 มิลลิเมตร รูปที่ 2.24 ก และ ข ตามลำดับทิศทางของสนามไฟฟ้าทั้งหมดจะมีทิศทาง เดียวกันคือ ชี้ขึ้นด้านบน (ยกเว้นสนามไฟฟ้าที่สายป้อน CPW ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกัน นั่นคือ สนามไฟฟ้าของสายป้อน CPW จะหักล้างกันและจะไม่ส่งผลต่อร่องตัวแผ่พลังงาน) ในทำนองเดียว กันกระแสแม่เหล็กที่วิ่งอยู่ในร่องมีทิศทางเดียวกันคือ ชี้ไปในทิศทาง +x ในทางกลับกันเมื่อขนาดร่อง เพิ่มขึ้นเป็น 45 มิลลิเมตร ทิศทางของสนามไฟฟ้า (รูปที่ 2.24 ค) จะเกิดการเลี้ยวเบนออกหาระนาบ กราวด์ไปทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวารวมทั้งบริเวณที่อยู่เหนือกลางร่องเล็กน้อย สนามไฟฟ้าจะเกิด การหักล้างกันหมดเนื่องจากทิศทางสนามไฟฟ้าที่ด้านบนของร่องมีทิศทางตรงกันข้ามกับด้านสาย ป้อน นอกจากนี้กระแสแม่เหล็กที่วิ่งอยู่ในร่องกว้างก็มีทั้งวิ่งไปตามแนวนอน (จากมุมล่างด้านขวาไป ยังมุมล่างด้านซ้ายและมุมบนด้านซ้ายไปยังมุมบนด้านขวา) และแนวตั้ง (จากมุมล่างด้านขวาไปยังมุม บนด้านขวาและมุมบนด้านซ้ายไปยังมุมล่างด้านซ้าย) ซึ่งจากผลของการที่สนามไฟฟ้าและกระแส แม่เหล็กมีทิศทางไม่ไปในทางเดียวกันจะส่งผลทำให้ค่าโพลาไรซ์เซชัน ไขว้สูงขึ้น นอกจากนี้แล้วยัง ส่งผลต่อแบนด์วิธอิมพีแดนซ์ด้วย



รูปที่ 2.24 ก) การกระจายสนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก เมื่อให้ร่องขนาด 2 มิลลิเมตร  
 ข) การกระจายสนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก เมื่อให้ร่องขนาด 10 มิลลิเมตร  
 ค) การกระจายสนามไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก เมื่อให้ร่องขนาด 45 มิลลิเมตร

## 2.7 การปรับปรุงสายอากาศรอกว้าง

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะพบว่า เมื่อเพิ่มความกว้างของร่องเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อสายอากาศรอกอย่างเด่นชัด 2 อย่างคืออิมพีแดนซ์อินพุตซึ่งส่งผลต่อแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์และค่าโพลาไรซ์เซชันไขว้ที่สูงขึ้นจริงๆ แล้วค่าทั้งสองจะส่งผลกระทบต่ออัตราขยายและประสิทธิภาพของสายอากาศโดยตรงเพื่อปรับปรุงข้อด้อยทั้งสองซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศรอกเพิ่มมากขึ้น สามารถทำได้สองรูปแบบหลัก ๆ คือการเลือกรูปร่างของร่องและเทคนิคสตัดป์จูน (stub tuning) ที่ต่อจากสายป้อนโดยสตัดป์จูนจะทำการแมตชิ่งระหว่างสายป้อนกับร่อง รวมทั้งเพื่อทำการจัดเรียงสนามไฟฟ้าหรือกระแสแม่เหล็กในร่องให้อยู่ในทิศทางเดียวกัน ส่วนเทคนิคที่สองคือการใส่โหลดเพื่อทำการรบกวนร่อง (perturbation) เพื่อทำให้เกิดการแยกกันของความถี่เรโซแนนซ์หรือให้เกิดเรโซแนนซ์ความถี่ใหม่ผลที่ได้คือจะทำให้แบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์มากขึ้นตลอดจน โหลดบางอย่างสามารถลดค่าโพลาไรซ์เซชันไขว้ลงได้ด้วย



(ก)



(ข)



(ค)

- รูปที่ 2.25 ก) สายอากาศร่องแบบสี่เหลี่ยมที่มีการใช้สตัดป์จูนป้อนมีรูปร่างเหมือนกับร่อง  
 ข) สายอากาศร่องแบบสามเหลี่ยมที่มีการใช้สตัดป์จูนป้อนมีรูปร่างเหมือนกับร่อง  
 ค) สายอากาศร่องแบบวงกลมที่มีการใช้สตัดป์จูนป้อนมีรูปร่างเหมือนกับร่อง



(ก)



(ข)

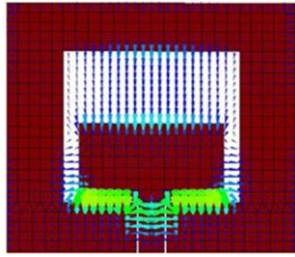


(ค)

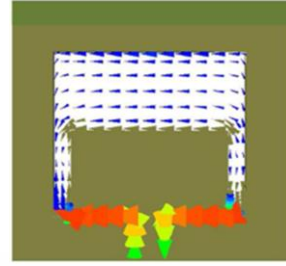
- รูปที่ 2.26 ก) สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่มีการใช้สตัดป์รูปส้อม  
 ข) สายอากาศร่องสามเหลี่ยมที่มีการใช้สตัดป์รูปวงกลม  
 ค) สายอากาศร่องวงกลมที่มีการใช้สตัดป์สี่เหลี่ยม

### 2.7.1 การเลือกรูปร่างของร่องและเทคนิคสตัดป์จูน

หนึ่งทางที่จะเพิ่มแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศร่องกว้างคือการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของสตัดป์จูน โดยทั่วไปรูปร่างของสตัดป์จูนที่ใช้กันจะมีสองลักษณะคือแบบแรกซึ่งเป็นที่นิยมมากจะใช้ตัวป้อนที่มีรูปร่างเหมือนกับร่องกล่าวคือถ้าร่องมีรูปร่างเป็นวงกลมสตัดป์จูนก็จะมีรูปร่างวงกลมเช่นเช่นกันตัวอย่างของร่องและสตัดป์จูนที่มีรูปร่างเดียวกันแสดงดังรูปที่ 2.27 ส่วนอีกแบบคือสตัดป์จูนมีลักษณะที่แตกต่างกับร่องแสดงดังรูปที่ 2.28 ซึ่งสตัดป์จูนที่นิยมใช้กันคือแบบสี่เหลี่ยมและรูปส้อม (fork shape: รูปที่ 2.27 ก) ข้อดีของการใช้สตัดป์จูนป้อนมีรูปร่างเหมือนร่องคือจะให้แบนด์วิดท์ที่กว้างแต่ข้อด้อยคือแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะไม่สมมาตรที่ความถี่สูง อย่างไรก็ตามการใช้สตัดป์จูนป้อนที่แตกต่างกับร่องและยังให้แบนด์วิดท์ที่กว้างที่นิยมคือ การใช้สตัดป์จูนรูปส้อม ตัวอย่างการจำลองการทำงานของสตัดป์จูนกับร่องกว้างในรูปของสนามไฟฟ้า และกระแสแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 2.27 จากรูปจะพบว่า สนามไฟฟ้ามีการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันคล้ายกับร่องแคบและต่างกับร่องกว้างกรณีที่ไม่มีการปรับจูนสตัดป์จูน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.27 ก) สนามไฟฟ้าจากการจำลองของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมใช้สตัดป์ป้อนจูนสี่เหลี่ยม

ข) สนามแม่เหล็กจากการจำลองของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมใช้สตัดป์ป้อนจูนสี่เหลี่ยม

### 2.7.2 การใส่โหลด

หนึ่งในตัวอย่างของการรบกวนคือ การใส่โหลดสตริปเข้าไปยังร่องตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.28 ซึ่งการใส่โหลดสตริปนอกจากจะทำให้ค่าโพลาไรเซชันไขว้ลดลงยังทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ซึ่งทำให้สายอากาศมีแบนวิดท์มากขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.28 ก) สายอากาศร่องใช้โหลดสตริปวางไว้ด้านข้างร่อง

ข) สายอากาศร่องใช้โหลดสตริปวางไว้มุมทั้งสี่ด้านของร่อง

ค) สายอากาศร่องใช้โหลดสตริปวางไว้ด้านบนของร่อง

## บทที่ 3

### การออกแบบสายอากาศ

สายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม IE3D ของ zeland ผลการจำลองต่าง ๆ เช่น ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งบอกถึงความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ ขั้นตอนการดำเนินงานและการจำลองสายอากาศดังจะ ได้กล่าวต่อไป

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยสายอากาศโมโนโพลบนโครงสร้างสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม นั้น ประกอบไปด้วยขั้นตอนการวางแผนการดำเนินงานดังนี้

##### 3.1.1 วางแผนการดำเนินงาน

การวางแผนการดำเนินงาน เริ่มต้นจากการศึกษารวบรวมข้อมูลสายอากาศโมโนโพลที่จัดการป้อนแบบสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม จากงานวิจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบสายอากาศ เมื่อได้รูปแบบหรือโครงสร้างที่ต้องการแล้วจึงทำการจำลองการทำงานต่อไป

##### 3.1.2 การจำลองการทำงานสายอากาศ

สายอากาศที่ออกแบบจะถูกจำลองการทำงาน ด้วยโปรแกรม IE3D ของ zeland เพื่อหาคูณลักษณะต่าง ๆ เช่น ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ หรือ  $S_{11}$  แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น และเกณฑ์ของสายอากาศ เมื่อได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะตามต้องการแล้ว จึงสร้างสายอากาศที่มีโครงสร้างและขนาดตามที่ได้จากการจำลอง แล้วจึงนำสายอากาศที่สร้างเสร็จแล้ว ไปทำการวัดการทำงานจริง เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลอง

##### 3.1.3 การวัดคุณลักษณะของสายอากาศที่ออกแบบ

จากการจำลองการทำงานของสายอากาศที่ออกแบบจนได้คุณลักษณะตามต้องการแล้ว สายอากาศจะถูกสร้างขึ้น โดยมีขนาดเดียวกันกับสายอากาศจากการจำลอง และสายอากาศที่สร้างขึ้นนี้จะถูกนำไปวัดหาคูณลักษณะต่าง ๆ เช่น ค่า  $S_{11}$  แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น และเกณฑ์ของสายอากาศ โดยทำการวัดในห้องโล่งแจ้ง

##### 3.1.4 การวิเคราะห์ผล

ทำการเปรียบเทียบผลการวัดจริงของสายอากาศที่ออกแบบ กับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D แล้ววิเคราะห์ผล ดังจะ ได้กล่าวในบทที่ 4 จากนั้นจะสรุปผล ดังจะกล่าวในบทที่ 5



## 3.2 สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลม

### 3.2.1 การออกแบบสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม แถบความถี่กว้าง

ในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม AppCad for Windows สำหรับออกแบบสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่มีค่าอิมพีแดนซ์  $50 \Omega$  และวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศเป็นแผ่นวงจรพิมพ์แบบหน้าเดียวใช้ฐานรอง FR-4 ในการออกแบบ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบดังนี้

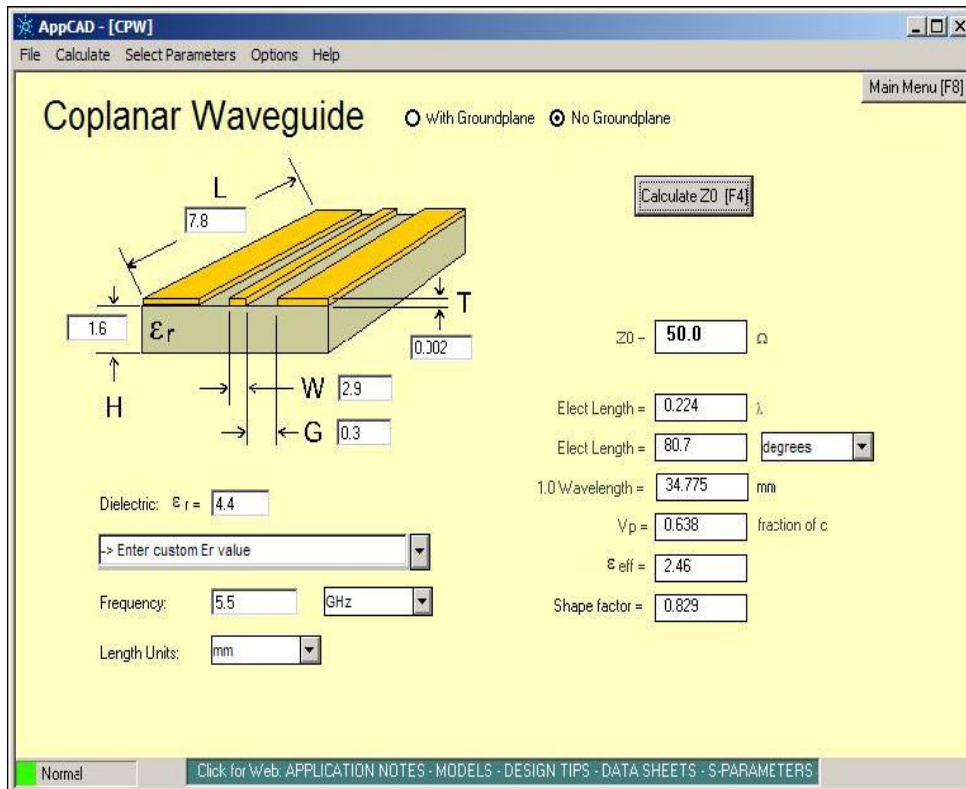
ความกว้างของสตริป ( $Wf$ )	= 2.90 mm
ความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกราวด์ ( $G$ )	= 0.3 mm
ความหนาของทองแดง ( $T$ )	= 0.002 mm
ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก ( $H$ )	= 1.6 mm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ )	= 4.4
ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ( $\tan \delta$ )	= 0.02
เลือกความถี่กลาง	= 5.5 GHz

ผลจากการคำนวณด้วย AppCAD for Windows ได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง  $50 \Omega$  และความยาวของสายส่ง 7.8 มิลลิเมตร และช่อง gap 0.3 มิลลิเมตร จึงนำพารามิเตอร์เหล่านี้ ไปใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลวงกลมแถบความถี่กว้างในโปรแกรม IE3D โดยออกแบบแพตช์เป็นรูปวงกลม ที่มีการตอบสนองแถบความถี่กว้าง และเพื่อหลีกเลี่ยงที่ความถี่ WLAN ย่าน 2.45 GHz จึงได้ทำออกแบบสายอากาศที่มีความถี่ต่ำสุดประมาณ 3 GHz ใช้หลักการออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่  $\lambda/4$  ของความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุดของการใช้งาน เมื่อรวมกับสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะมีขนาดไม่เกิน  $\lambda/2$  สามารถใช้สมการที่ 3.1 สำหรับการคำนวณเบื้องต้นได้

$$f_r = \frac{3 \times 10^8}{4h} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $f_r$  คือความถี่ต่ำสุดที่ต้องการใช้งาน

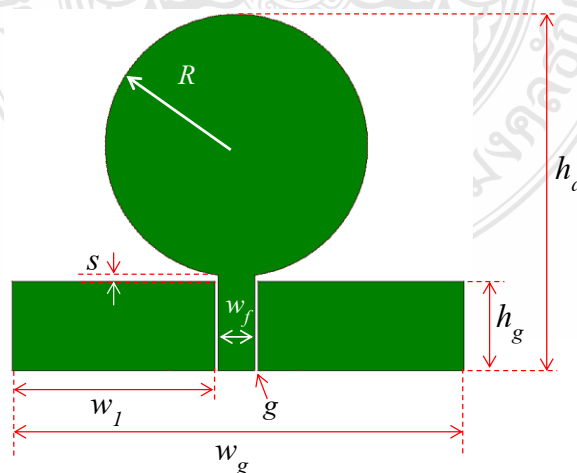
$h$  คือขนาดของสายอากาศโมโนโพล  $\lambda/4$



รูปที่ 3.1 การคำนวณสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมด้วยโปรแกรม AppCad for Windows

### 3.2.2 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นรูปวงกลม

จากการคำนวณเบื้องต้นที่ความถี่ 3 GHz จะได้ค่า  $\lambda/4$  ในอวกาศว่างเท่ากับ 25 มิลลิเมตร แสดงว่าต้องออกแบบให้ความสูงของแพตช์มีค่าไม่เกินกว่า 25 มิลลิเมตร สายอากาศจึงจะการตอบสนองความถี่ต่ำประมาณ 3 GHz ผู้วิจัยจึงเลือกออกแบบแพตช์วงกลมรัศมี 10.5 มิลลิเมตร เพื่อจะได้ความถี่ไม่ต่ำกว่าที่ได้กำหนดไว้ โครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.2



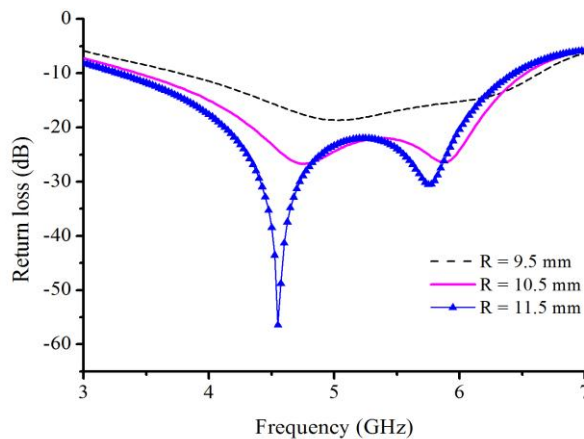
รูปที่ 3.2 สายอากาศโมโนโพลวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วม

จากรูปที่ 3.2 เป็นโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นรูปวงกลม ที่กระตุ้นด้วยสายส่งท่อนำคลื่นแบบระนาบร่วม โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้  $R$  คือ รัศมีของแพตช์วงกลม,  $h_u$  คือ ความสูงทั้งหมดของสายอากาศ,  $h_g$  คือความสูงระนาบกราวด์,  $s$  คือระยะห่างขอบล่างของแพตช์กับขอบบนของระนาบกราวด์,  $w_f$  คือความกว้างของสายตัวนำ CPW,  $w_l$  คือความกว้างของกราวด์ด้านเดียว,  $w_g$  คือความกว้างทั้งหมดของระนาบกราวด์,  $g$  คือระยะระหว่างตัวนำ CPW กับระนาบกราวด์ทั้งสองข้าง

ในการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D จะต้องทำการปรับปรุงขนาดของโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลดีที่สุด (optimize) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการต่าง ๆ จึงเป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบเท่านั้น ผลที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายจากโปรแกรม IE3D จึงอาจมีค่าพารามิเตอร์ที่ต่างออกไปจากการคำนวณ

### 3.2.3 การจำลองสายอากาศโมโนโพลแบบวงกลม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

ทำการจำลองสายอากาศโดยการเปลี่ยนแปลงรัศมีของแพตช์ ( $R$ ) โดยจะกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ดังนี้ ให้  $w_g = 37$  มิลลิเมตร,  $w_l = 16.75$  มิลลิเมตร,  $h_g = 7.3$  มิลลิเมตร,  $g = 0.3$  มิลลิเมตร,  $s = 0.5$  มิลลิเมตร, และ  $w_f = 2.9$  มิลลิเมตร ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมีแพตช์

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า  $R$  หรือรัศมีของแพตช์ 3 ค่า ดังรูปที่ 3.3 กราฟเส้นประสีดำคือ  $R = 9.5$  มิลลิเมตร เส้นสีชมพูคือ  $R = 10.5$  มิลลิเมตร และเส้นสีน้ำเงินกับสามเหลี่ยมคือ  $R = 11.50$  มิลลิเมตร จากรูปจะพบว่าขนาดของแพตช์มีผลต่อค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับหรือค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศ และเมื่อพิจารณาถึงค่า  $S_{11}$  ที่มีความสม่ำเสมอกัน จะพบว่า การใช้ค่า  $R = 10.50$  มิลลิเมตร จะให้ค่า  $S_{11}$  ที่สม่ำเสมอกันดีกว่าอีกสองแบบ ดังนั้นจะเลือกนำค่าพารามิเตอร์  $R = 10.50$

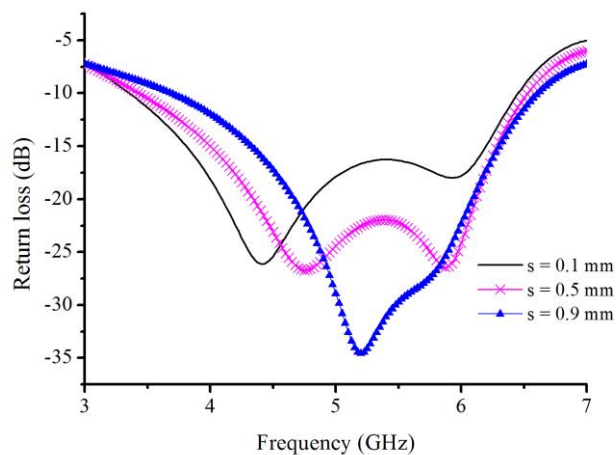
มิลลิเมตร นี้ไปทำการสร้างสายอากาศจริง เพื่อทำการทดสอบต่อไป ผลของความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศที่ทำการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยการเปลี่ยนแปลงความยาว R

รัศมีสายอากาศ(mm)	แถบความถี่(GHz)	ความกว้างแถบ(GHz), คิดเป็นเปอร์เซ็นต์
R = 9.50	3.750 - 6.633	2.88, 55.53 %
R = 10.50	3.323 - 6.526	3.203, 65.04 %
R = 11.50	3.258 - 6.416	3.158, 65.28 %

จากตารางที่ 3.1 พบว่า สายอากาศแพทช์วงกลมที่มีรัศมี(R) ต่างกันทั้งสามแบบ มีค่าความกว้างแถบที่มากกว่า 50 % ทั้งสามแบบ โดยสายอากาศแพทช์วงกลมรัศมี 11.05 มิลลิเมตร โดยมีความกว้างแถบมากที่สุด 65.28 % รองลงมาเป็นสายอากาศที่แพทช์วงกลมรัศมี 10.05 มิลลิเมตร มีความกว้างแถบ 65.04 % ส่วนสายอากาศแพทช์วงกลมรัศมี 9.05 มิลลิเมตร มีความกว้างแถบน้อยที่สุด 55.53 %

ทำการจำลองสายอากาศโดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขอบล่างของแพทช์กับขอบบนของระนาบกราวด์ (s) โดยจะกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ดังนี้ ให้ R = 10.50 มิลลิเมตร,  $w_g = 37$  มิลลิเมตร,  $w_l = 16.75$  มิลลิเมตร,  $h_g = 7.3$  มิลลิเมตร,  $g = 0.3$  มิลลิเมตร,  $s = 0.5$  มิลลิเมตร, และ  $w_f = 2.9$  มิลลิเมตร ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ s

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า s หรือระยะห่างของแพทช์กับขอบบนของระนาบกราวด์ โดยการกำหนด 3 ค่า ดังรูปที่ 3.4 กราฟเส้นสีดำคือ s = 0.1 มิลลิเมตร เส้นสีชมพูกับกากบาทคือ s = 0.5 มิลลิเมตร และเส้นสีน้ำเงินกับสามเหลี่ยมคือ s = 0.9 มิลลิเมตร จากรูปที่ 3.4 พบว่า ค่า s

จะมีผลต่อความกว้างแถบความถี่ และค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศ เมื่อกำหนด  $s = 0.5$  มิลลิเมตร จะทำให้สายอากาศมีความกว้างแถบและค่า  $S_{11}$  ที่ดีที่สุด ความกว้างแถบความถี่จากการจำลอง ดังตารางที่ 3.2

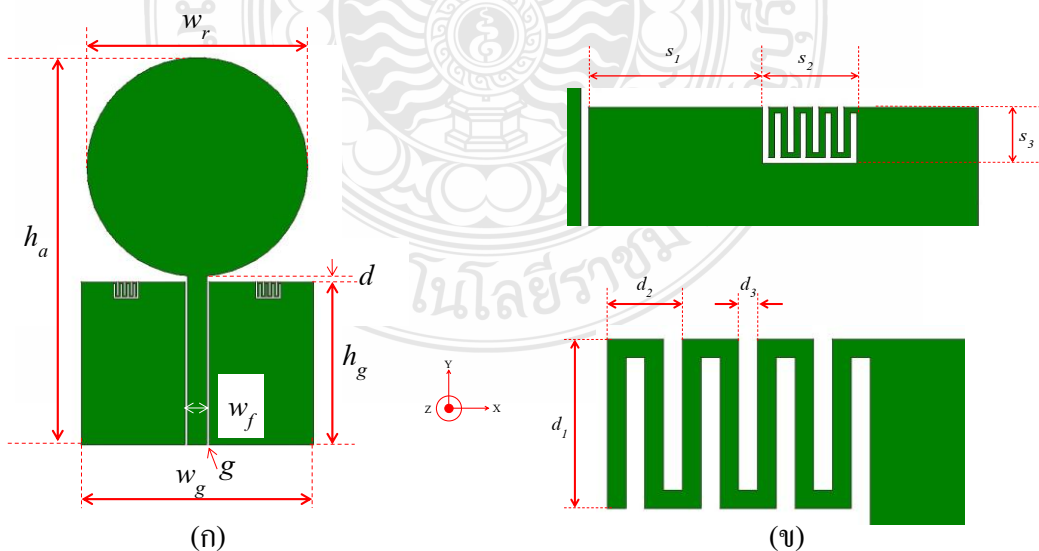
ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ  $s$

ระยะ $s$ (mm)	แถบความถี่(GHz)	ความกว้างแถบ(GHz), คิดเป็นเปอร์เซ็นต์
$s = 0.1$	3.358 – 6.425	3.067, 62.7 %
$s = 0.5$	3.434 - 6.526	3.09, 62.09 %
$s = 0.9$	3.575 – 6.60	3.025, 61.89 %

จากตารางที่ 3.2 พบว่า สายอากาศแพทช์วงกลมที่มีรัศมี( $R$ ) 10.5 มิลลิเมตร ที่กำหนดระยะห่างของแพทช์กับขอบบนของระนาบกราวด์ต่างกันสามค่า มีความกว้างแถบความถี่ดังนี้ เมื่อระยะ  $s = 0.1$  มิลลิเมตร จะมีความกว้างแถบความถี่สูงที่สุด 62.7 % รองลงมาเมื่อระยะ  $s = 0.5$  มิลลิเมตร มีความกว้างแถบ 62.09 % ส่วนสายอากาศที่มีระยะ  $s = 0.9$  มิลลิเมตร มีความกว้างแถบความถี่น้อยที่สุด 61.89 % เมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของค่า  $S_{11}$  พบว่าสายอากาศที่มีค่า  $s = 0.5$  มิลลิเมตร ให้ผลที่ดีที่สุด

### 3.3 สายอากาศแถบความถี่กว้างที่จำกัดแถบความถี่

ในหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบสายอากาศแถบความถี่กว้าง ที่มีการจำกัดแถบความถี่ (wideband antenna with frequency band notch) โดยจะออกแบบสายอากาศให้มีแถบความถี่ย่าน WLAN/WiMAX และมีการจำกัดแถบในย่าน 3.3 – 3.7 GHz โดยมีความถี่กลางอยู่ที่ 3.5 GHz ซึ่งย่านความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานออกไป การออกแบบใช้สายอากาศแพทช์วงกลม ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วม เป็นแนวทางการออกแบบ โครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ก) โครงสร้างและขนาดของสายอากาศที่ notch ความถี่

ข) แบบขยายตำแหน่งและขนาดของตัวหนอนบนขอบกราวด์

จากรูปที่ 3.5  $w_r$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแพทช์วงกลม,  $h_a$  คือความสูงทั้งหมดของสายอากาศ,  $h_g$  คือความสูงระนาบกราวด์,  $d$  คือระยะห่างขอบล่างของแพทช์กับขอบบนของระนาบกราวด์,  $w_f$  คือความกว้างของสายตัวนำ CPW,  $w_g$  คือความกว้างทั้งหมดของระนาบกราวด์,  $g$  คือระยะห่างระหว่างตัวนำ CPW กับระนาบกราวด์ทั้งสองข้าง,  $s_1$  คือระยะห่างของช่องตัวหนอนกับขอบกราวด์ด้านใน,  $s_2$  คือความกว้างของช่องที่ใส่ตัวหนอน,  $s_3$  คือความสูงของช่องที่ใส่ตัวหนอน,  $d_1$  คือ ความสูงของตัวหนอน,  $d_2$  คือ ความกว้างของตัวหนอนหนึ่งตัว และ  $d_3$  คือระยะห่างของตัวหนอนแต่ละตัว

จากการออกแบบสายอากาศที่ notch ที่ความถี่ 3.5 GHz มีพารามิเตอร์ข้างต้นดังตารางที่ 3.3 โดยขนาดของพารามิเตอร์ทั้งหมดมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ตารางที่ 3.3 ขนาดของพารามิเตอร์สายอากาศที่ออกแบบ notch ความถี่

พารามิเตอร์	$w_r$	$h_a$	$h_g$	$d$	$w_f$	$w_g$	$g$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
ขนาด	38	67.06	28.18	1.12	3.4	40	0.4	8	4.33	2.88	2.6	1.15	0.29

### 3.3.1 การคำนวณความยาวตัวหนอน

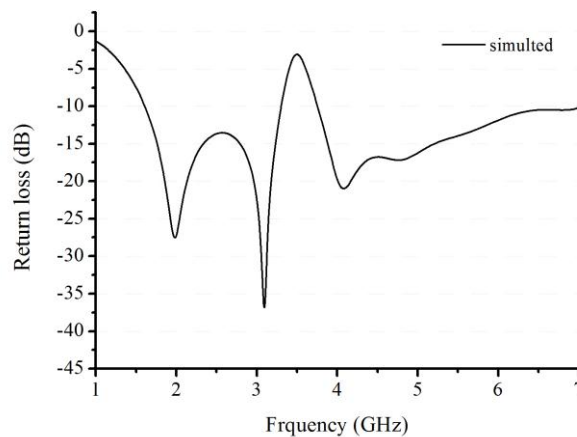
ใส่ตัวหนอนทั้งหมด 3 ตัวเรียงติดกัน โดยความยาวทั้งหมดของตัวหนอนทั้งสามตัวมีค่าเป็น  $\lambda/4$  ของความถี่ที่ต้องการ notch โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1 [22]

$$f_{notch} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}} \times 4l} \quad (3.2)$$

- เมื่อ  $f_{notch}$  คือความถี่ที่ต้องการ notch
- $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ของฐานรอง
- $l$  คือความยาวของตัวหนอนแต่ละข้าง

จากสมการ 3.2 เมื่อทราบความถี่กลางที่ต้องการ notch ก็จะสามารถหาค่าความยาวโดยรวมตัวหนอนได้ เช่น ความถี่ที่ต้องการ notch คือ 3.5 GHz ดังนั้นจะคำนวณค่า  $4l$  ได้เท่ากับ 52.16 มิลลิเมตร และ  $l$  ก็คือ 13.04 มิลลิเมตร ดังนั้น จะต้องสร้างตัวหนอนให้มีความยาวข้างละ 13.04 มิลลิเมตร และเมื่อรวมความยาวสองข้างเข้าด้วยกัน จะได้ค่า 26.06 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้เกิดการ notch ที่ความถี่ที่ต้องการ เมื่อออกแบบขนาดของตัวหนอนได้แล้วจึงนำไปออกแบบร่วมกับสายอากาศโมโนโพลที่มีแพทช์วงกลม โดยวางตัวหนอนที่ขอบบนของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านดังรูปที่ 3.5 โดยให้มีลักษณะสมมาตรกัน จากนั้นจึงจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม IE3D ปรับ

โครงสร้างต่าง ๆ จนได้สายอากาศโมนโพล ที่สามารถจำกัดความถี่ตามต้องการ ผลการจำลองสายอากาศ ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.3 ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) จากการจำลอง

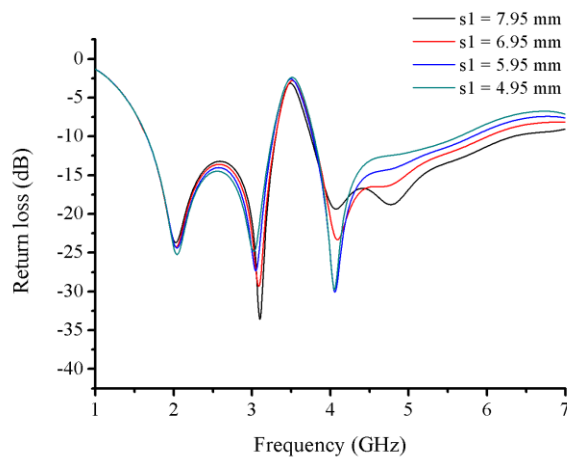
จากรูปที่ 3.6 จะพบว่า สายอากาศเกิดความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นสามความถี่ มีลักษณะการตอบสนองความถี่เป็นแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ โดยแถบความถี่แรกตั้งแต่ 1.7 - 3.3 GHz หรือมีความกว้างแถบ 64 % แถบความถี่ที่สอง 3.8 – 6.3 GHz หรือมีความกว้างแถบ 49.5 % ส่วนย่านความถี่ notch เริ่มตั้งแต่ 3.35 – 3.75 GHz โดยมีความถี่กลางที่ 3.5 GHz

การวิจัยในส่วนนี้ ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของการ notch ความถี่ของสายอากาศเป็นหลัก ดังจะเห็นได้ในขั้นตอนการออกแบบตัวหนอน (meander strip line) พารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อการ notch ความถี่มี 2 พารามิเตอร์ คือความยาวของตัวหนอน และตำแหน่งการวาง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ทั้งสองตัวดังต่อไปนี้

### 3.3.2 ผลการปรับตำแหน่งของตัวหนอนบนระนาบกราวด์

ตำแหน่งการวางของตัวหนอนบนระนาบกราวด์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.5 ข คือระยะ  $s_1$  การปรับแต่ละตำแหน่งจะถูกจำลองผลด้วยโปรแกรม IE 3D เพื่อให้เห็นถึงผลการวางตำแหน่งตัวหนอนต่อค่า  $S_{11}$  วิธีการปรับตำแหน่งตัวหนอนให้เลื่อนไปทางซ้ายหรือขวา เพื่อปรับระยะ  $s_1$  นั้น ตัวหนอนทั้งสองตัวจะต้องปรับให้สัมพันธ์กันและสมมาตรกันของแต่ละครั้งในการปรับตำแหน่ง ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับตำแหน่งตัวหนอนดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8

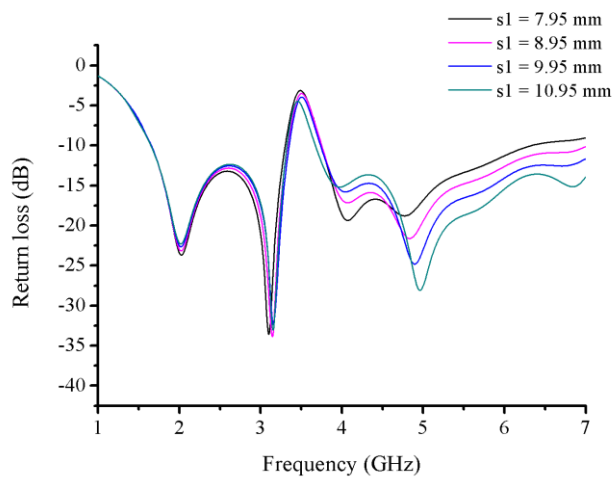
- 1) การเลื่อนตำแหน่งการวางตัวหนอน โดยลด ระยะ  $s_1$  ลงครึ่งละ 1 มิลลิเมตร ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อทำการลดระยะ  $s_1$

จากรูปที่ 3.7 จะพบว่า เมื่อตำแหน่งตัวหนอนใกล้กับแนวกึ่งกลางของสายอากาศมากขึ้นตำแหน่งความถี่กลางของการ notch ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนแถบความถี่การ notch เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ความถี่เรโซแนนซ์ที่สองและสามดีขึ้นแต่ที่ความถี่สูงขึ้น ค่า  $S_{11}$  กลับมีค่าสูงขึ้นตามระยะ  $s_1$  ที่ลดน้อยลง ส่วนด้านความถี่ต่ำค่า  $S_{11}$  มีค่าต่ำลงเล็กน้อย โดยรวมแล้วการปรับตำแหน่ง  $s_1$  ให้ลดลงไม่มีผลต่อความถี่การ notch

2) การเลื่อนตำแหน่งการวางตัวหนอน โดยเพิ่ม ระยะ  $s_1$  ลงครั้งละ 1 มิลลิเมตร ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อทำการเพิ่มระยะ  $s_1$

จากรูปที่ 3.8 จะพบว่า เมื่อตำแหน่งตัวหนอนมีระยะห่างกับแนวกึ่งกลางของสายอากาศมากขึ้นจะทำให้แถบความถี่ notch เลื่อนต่ำลงเล็กน้อย ความถี่เรโซแนนซ์ที่สามลดลง ค่า  $S_{11}$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่สี่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่งผลให้ที่ความถี่สูงขึ้นไปมีค่า  $S_{11}$  ลดลง ตามระยะ  $s_1$  ที่เพิ่ม

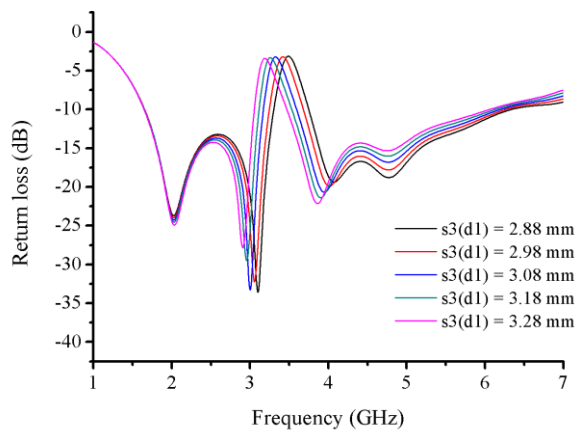


มากขึ้น ด้านความถี่ต่ำไม่มีผลกระทบ และที่  $s_1$  มีค่า 10.95 มิลลิเมตร ทำให้ความกว้างแถบความถี่ notch ลดลงเล็กน้อย

### 3.3.3 การปรับความยาวของตัวหนอน

ความยาวของตัวหนอนสามารถปรับได้หลายวิธี แต่วิธีที่เหมาะสม คือการใช้การปรับค่า  $d_1$  ร่วมกับค่า  $s_3$  ซึ่งจากรูปที่ 3.5 ข จะพบว่า การปรับความค่า  $d_1$  และ  $s_1$  พร้อมกันจะเป็นการทำให้ความยาวตัวหนอนเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการปรับความยาวตัวหนอน จึงปรับได้สองแบบ คือ ปรับให้ยาวขึ้นและปรับให้สั้นลง ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับความยาวตัวหนอนแสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10

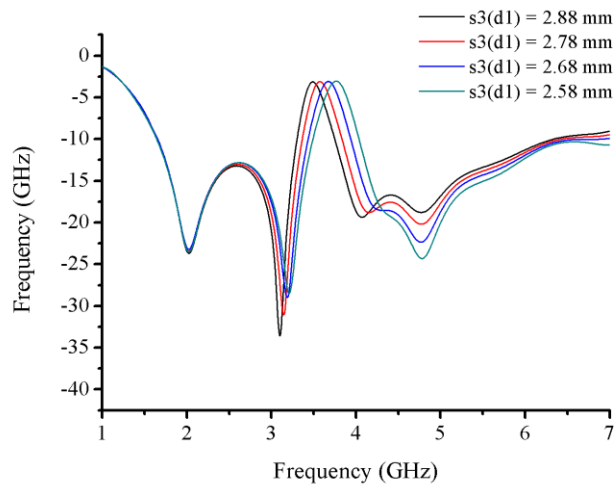
1) การปรับให้ตัวหนอนมีความยาวมากขึ้น ดังได้ทราบแล้วว่าความยาวตัวหนอนมีผลต่อความถี่กลางของแถบความถี่ที่ต้องการ notch วิธีการปรับความยาวตัวหนอนให้มีความยาวมากขึ้น ด้วยการปรับค่า  $s_3$  และ  $d_1$  ให้มากขึ้นพร้อม ๆ กัน ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับให้ตัวหนอนมีความยาวมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับความยาวตัวหนอนมากขึ้น

จากรูปที่ 3.9 จะพบว่า เมื่อปรับ  $s_3$  พร้อมกับ  $d_1$  ให้มากขึ้นครั้งละ 0.1 มิลลิเมตร จะทำให้ความถี่กลางของการ notch เลื่อนต่ำลง โดยที่ความกว้างแถบความถี่ notch ยังคงเดิม เห็นได้ว่าเมื่อความยาวของตัวหนอนเพิ่มขึ้น การตอบสนองย่านความถี่ที่สูงจะไม่ดีขึ้น หรือมีกราฟค่า  $S_{11}$  สูงขึ้น ส่วนทางด้านความถี่ต่ำไม่มีผลกระทบ

2) การปรับให้ตัวหนอนมีความยาวน้อยลง วิธีการปรับความยาวตัวหนอนให้มีความยาวน้อยลงด้วยการปรับค่า  $s_3$  และ  $d_1$  ให้สั้นลงพร้อม ๆ กัน ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับให้ตัวหนอนมีความยาวน้อยลงแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับความยาวตัวหนอนให้สั้นลง

จากรูปที่ 3.10 จะพบว่า เมื่อปรับ  $s_3$  พร้อมกับ  $d_1$  ให้สั้นลงครั้งละ 0.1 มิลลิเมตร จะทำให้ความถี่กลางของการ notch เลื่อนสูงขึ้น โดยที่ความกว้างแถบยังคงเท่าเดิม เมื่อตัวหนอนสั้นลงการตอบสนองต่อในย่านความถี่สูงจะดีขึ้น หรือพิจารณากราฟค่า  $S_{11}$  จะลดต่ำลง ส่วนทางด้านความถี่ต่ำไม่มีผลกระทบ

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.3 จะนำไปสร้างสายอากาศจริงแล้วนำไปทำการวัดคุณลักษณะต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D ว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ โดยรายละเอียดการวัดและผลการวัดจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4

## บทที่ 4

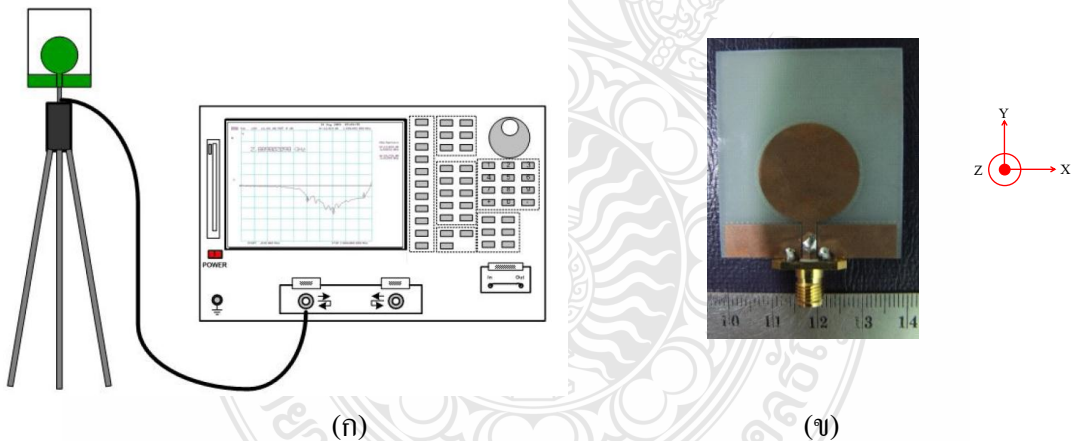
### ผลการสร้างสายอากาศและการทดสอบ

การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้น แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ การทดสอบวัดค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับหรือพารามิเตอร์  $S_{11}$  และการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการวัดคุณลักษณะของสายอากาศในงานวิจัยนี้ ทำการวัดในห้องปฏิบัติการทั่วไป ที่ไม่มีการป้องกันการแผ่กระจายคลื่นจากภายนอก

#### 4.1 สายอากาศโมนโพล แพตช์รูปวงกลม

##### 4.1.1 การติดตั้งเครื่องมือวัด และการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

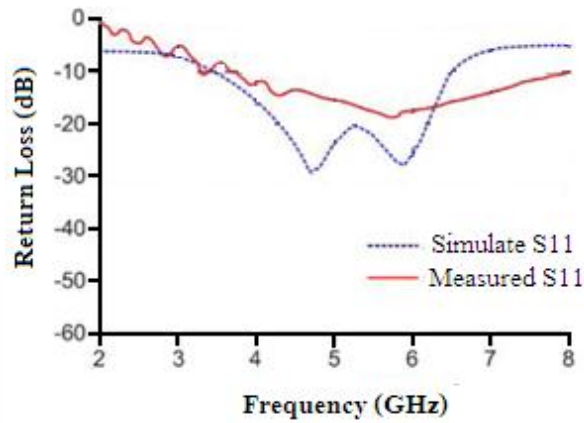
การวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ด้วยการติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า (network analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น N5230C โดยตั้งย่านการวัดความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz การต่อการวัดค่า  $S_{11}$  สายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.1 ทำการวัดทดสอบสายอากาศในห้องปฏิบัติการทั่วไปที่ไม่ใช่ห้อง shield room



รูปที่ 4.1 ก) การเชื่อมต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า  
ข) สายอากาศที่สร้างขึ้น

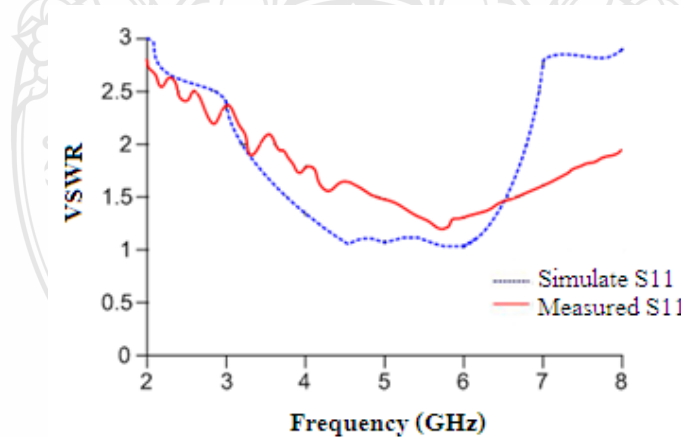
##### 4.1.2 ผลการวัดค่า $S_{11}$

ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงสายอากาศที่ออกแบบ ดังรูปที่ 4.1 เพื่อทำการวัดค่า  $S_{11}$  จากเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า ค่าที่ได้จากการวัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE 3D



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  จากการจำลองและการวัดสายอากาศที่ออกแบบ

จากรูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D กับการวัดทดสอบการทำงานด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้ำข่ายงานของสายอากาศโมโนโพลแนวระนาบ ที่แพตช์รูปวงกลม จากกราฟเปรียบเทียบผลการวัด จะพบว่า ผลจากการจำลองจะมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ ( $S_{11} < -10$  dB) ตั้งแต่ 3.34 – 6.25 GHz หรือความกว้างแถบ 60.69 % โดยการตอบสนองความถี่ที่ดีที่สุดที่ 4.8 GHz และ  $S_{11}$  เท่ากับ  $-29$  dB ส่วนผลที่ได้จากการวัดจริง พบว่า สายอากาศที่ออกแบบมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ตั้งแต่ 3.3 – 8.0 GHz หรือความกว้างแถบ 83 % โดยรวมแล้วการตอบสนองความถี่ต่ำมีความสอดคล้องกันเล็กน้อย แต่ผลที่ได้จากการวัดจริงการตอบสนองต่อความถี่ที่ความถี่สูงขึ้น มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองมาก แม้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับมีค่าน้อยกว่าการจำลอง



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า VSWR จากการจำลองและการวัดสายอากาศที่ออกแบบ

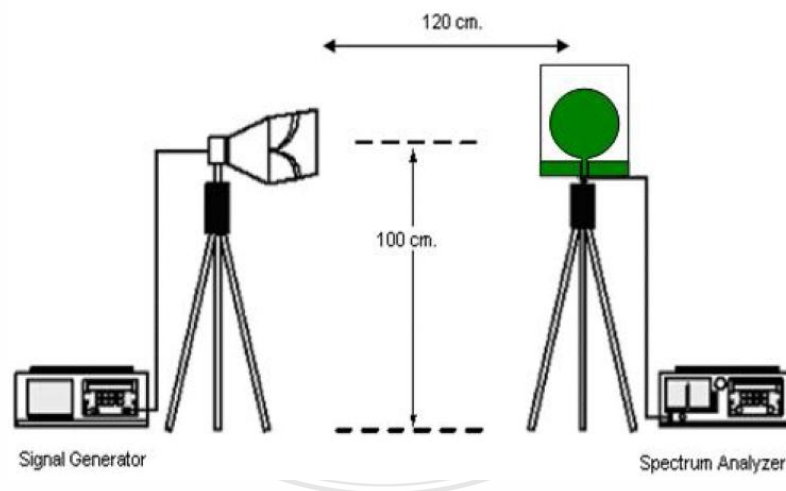
จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบค่า VSWR ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D กับการวัดทดสอบการทำงานด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้ำข่ายงาน ของสายอากาศโมโนโพล แบบระนาบที่มีแพตช์รูปวงกลมจากกราฟเปรียบเทียบผลการวัด จะพบว่า ผลการจำลองมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์

(VSWR < 2) ตั้งแต่ 3.34 – 6.25 GHz หรือความกว้างแถบ 60.69 % ส่วนผลที่ได้จากการวัดจริงพบว่า สายอากาศที่ออกแบบมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 3.3 – 8.0 GHz หรือความกว้างแถบ 83 % โดยรวมแล้วการตอบสนองความถี่ต่ำมีความสอดคล้องกันเล็กน้อย แต่ผลที่ได้จากการวัดจริงการตอบสนองต่อความถี่ที่สูงขึ้น มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองมาก

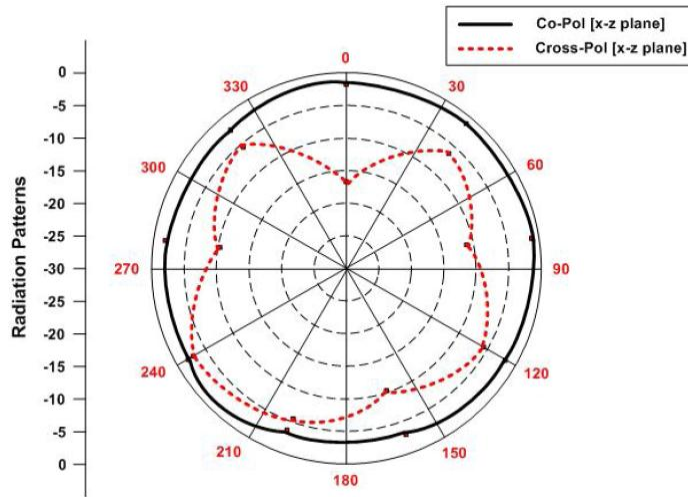
#### 4.1.3 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รูปสัญญาณไฟฟ้า (spectrum analyzer) Agilent รุ่น E4407B และเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (RF signal generator) ต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.3 วัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz และ 5.8 GHz ตามลำดับ วิธีการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะใช้สายอากาศรูปปากแตร (Horn antenna) เป็นสายอากาศส่งความถี่ที่กำหนดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูง ไปยังสายอากาศที่ออกแบบเป็นตัวรับสัญญาณที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมและเครื่องเครื่องพล็อตกราฟที่ควบคุมการหมุนสายอากาศรับสัญญาณแบบรอบตัว 0 – 360 องศา จัดวางสายอากาศทั้งสองสูง 100 cm และวางห่างกันเป็นระยะทาง 120 cm

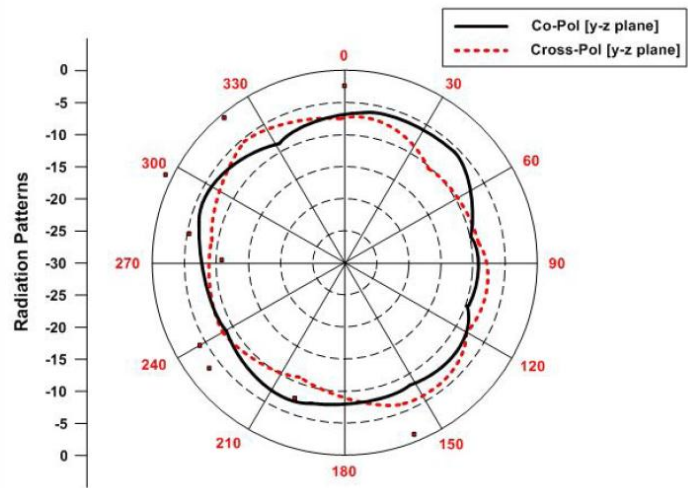
การวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น จะทำการวัดสองระนาบ คือ ระนาบ xz และระนาบ yz ทั้งสองระนาบจะวัดสัญญาณที่เป็นโพลาไรซ์เซชันเดียวกัน (co-polarization) และโพลาไรซ์เซชันไขว้ (cross-polarization) รูปการติดตั้งอุปกรณ์การวัดดังแสดงในรูป 4.4 และผลการแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นวัดแสดงดังรูป 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 การจัดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น



(ก)

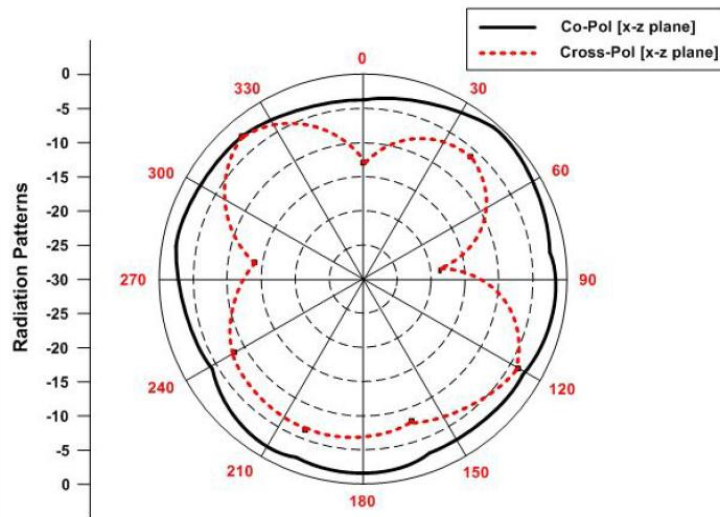


(ข)

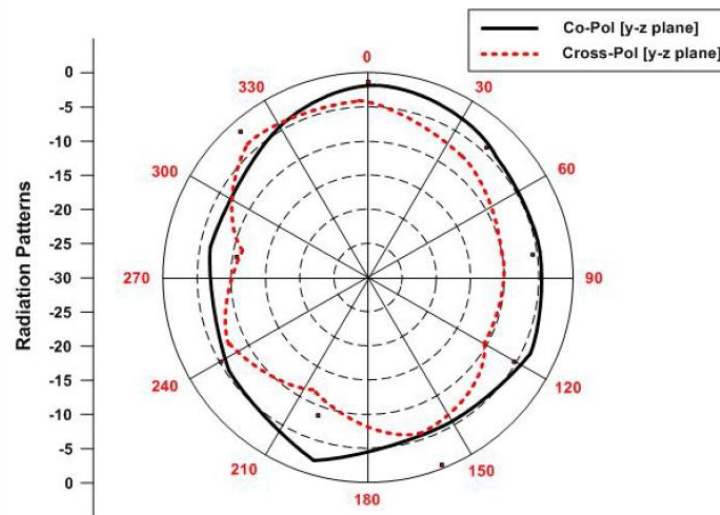
รูปที่ 4.5 ก) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ xz

ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz ระนาบ yz

จากรูปที่ 4.5 ก เป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ 5.2 GHz บนระนาบ xz เส้นทึบแสดงถึงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเมื่อสายอากาศรับและส่งมีโพลาไรซ์เดียวกัน ส่วนเส้นประเป็นโพลาไรซ์ไขว้ ผลจากการเปรียบเทียบ พบว่า ผลการวัดที่ระนาบ xz แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่มีโพลาไรซ์เดียวกัน มีลักษณะรอบตัว ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้ มีลักษณะคล้ายรอบตัวแม้มีการบิดเบี้ยว ที่มุม 240 องศา และมีการแผ่กระจายคลื่นที่มีค่าใกล้เคียงกับโพลาไรซ์ร่วม รูปที่ 4.5 ข แสดงการแผ่กระจายคลื่น 5.2 GHz บนระนาบ yz เส้นทึบเป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเมื่อสายอากาศรับและส่งมีโพลาไรซ์เดียวกัน ส่วนเส้นประเป็นโพลาไรซ์ไขว้ ผลจากการวัดพบว่า บนระนาบ yz แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่มีโพลาไรซ์เดียวกัน จะมีลักษณะรอบตัว ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้มีลักษณะรอบตัวเช่นกัน และมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน



(ก)



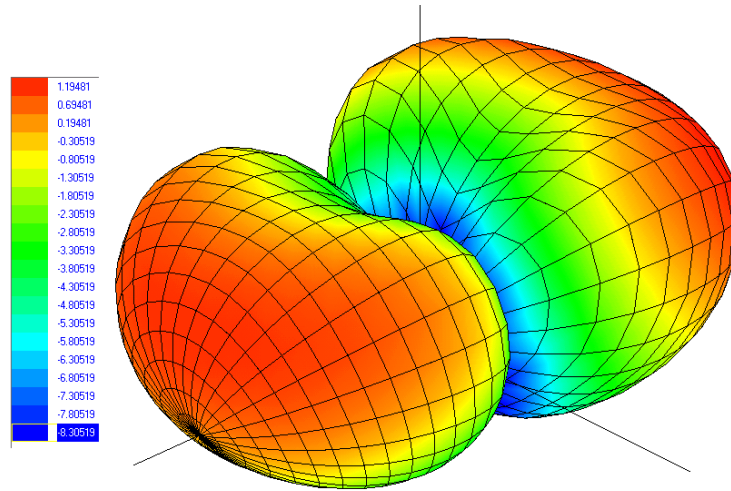
(ข)

รูปที่ 4.6 ก) การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.8 GHz ระนาบ xz

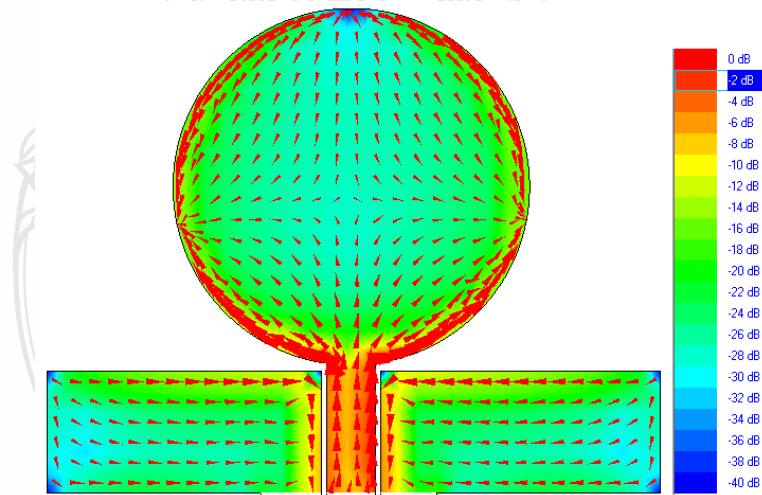
ข) การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.8 GHz ระนาบ yz

ที่ความถี่ 5.8 GHz แสดงดังรูปที่ 4.6 ก พบว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่มีโพลาไรซ์เดียวกัน มีลักษณะเป็นแบบรอบตัว ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้ มีลักษณะคล้ายรอบตัว แต่มีแบบรูปที่บิดเบี้ยว โดยเฉพาะที่มุม 320 องศา มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่มีค่าใกล้เคียงกับโพลาไรซ์ร่วม ส่วนผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 4.6 ข พบว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่มีโพลาไรซ์เดียวกัน มีลักษณะเป็นแบบรอบตัว และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้ก็มีลักษณะรอบตัวเช่นกัน โดยมีขนาดของแบบ

รูปการแผ่กระจายคลื่นใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สามารถพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นทั้งสองความถี่  
 ในรูปสามมิติ และการกระจายของกระแสนสายอากาศ ดังรูปที่ 4.7 - 4.8 และ 4.9 - 4.10

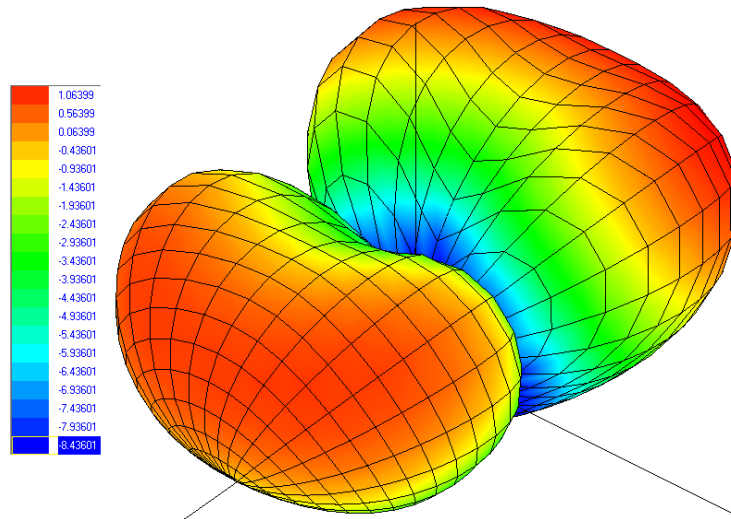


รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น 3 มิติที่ความถี่ 5.2 GHz

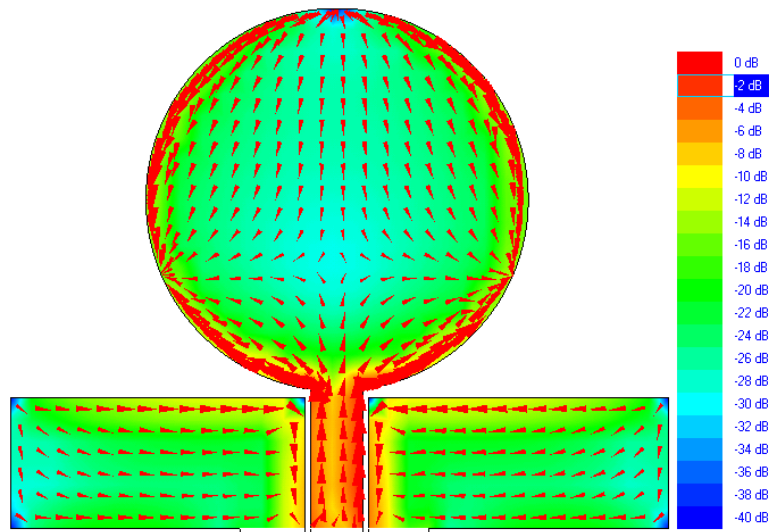


รูปที่ 4.8 การกระจายกระแสนสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz





รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น 3 มิติที่ความถี่ 5.8 GHz

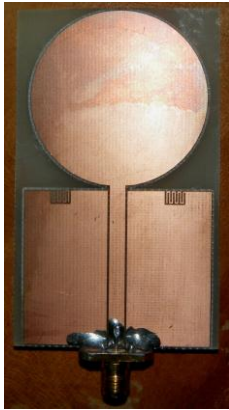


รูปที่ 4.10 การกระจายกระแสบนสายอากาศที่ความถี่ 5.8 GHz

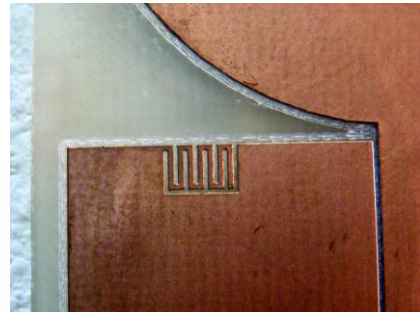
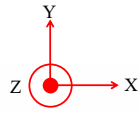
## 4.2 สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลม ที่จำกัดย่านความถี่

### 4.2.1 ผลการวัดค่า $S_{11}$

การจัดตั้งเครื่องมือวัด  $S_{11}$  เช่นเดียวกันกับการวัดในหัวข้อที่ผ่านมา แต่สายอากาศที่ใช้วัดเป็นสายอากาศโมโนโพลแพทช์วงกลมที่จำกัดย่านความถี่ ที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4.11 ส่วนผลการวัดค่า  $S_{11}$  เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังในรูปที่ 4.12



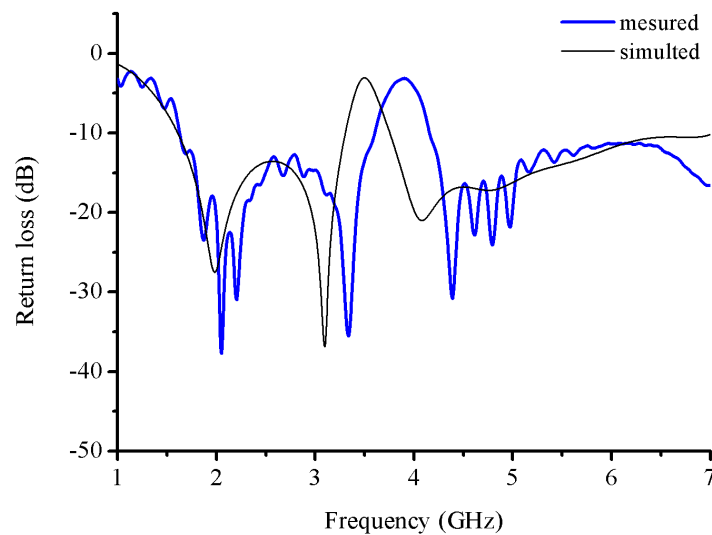
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ก) สายอากาศแถบความถี่กว้างที่ notch ความถี่ที่สร้างขึ้น

ข) รูปขยายตัวหนอนที่ขอบบนของระนาบกราวด์

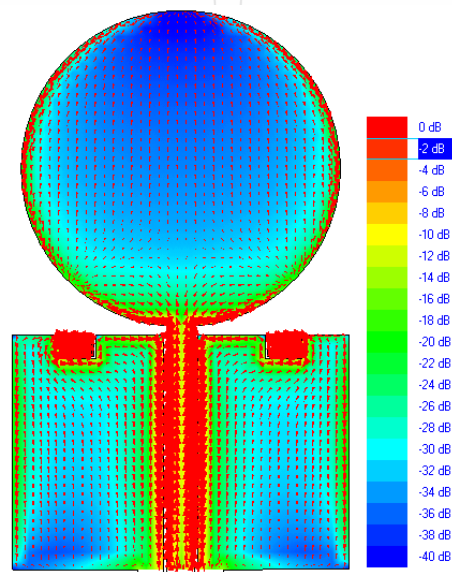


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ที่ได้จากการวัดและการจำลอง

จากรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ที่ได้จากการวัดจริงสายอากาศที่ออกแบบกับการจำลองด้วย IE3D กราฟเส้นสีน้ำเงินเป็นผลจากการวัดจริง ส่วนเส้นสีดำเป็นผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D การเปรียบเทียบ พบว่า สายอากาศที่สร้างขึ้นมีการตอบสนองความถี่เป็นแบบแถบความถี่กว้างสองแถบความถี่ โดยแถบความถี่ต่ำจะเริ่มตั้งแต่ 1.63 – 3.58 GHz หรือ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความถี่แถบได้เป็น 74.86 % ส่วนแถบความถี่สูง เริ่มตั้งแต่ 4.18 GHz ไปถึง มากกว่า 7 GHz หรือ มากกว่า 50.45 % และแถบความถี่ notch ตั้งแต่ 3.61 – 4.15 GHz หรือ 13.92 % โดยความถี่เรโซแนนซ์การ notch อยู่ที่ 3.9 GHz ส่วนผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม พบว่า สายอากาศมีแถบความถี่ต่ำเริ่มที่

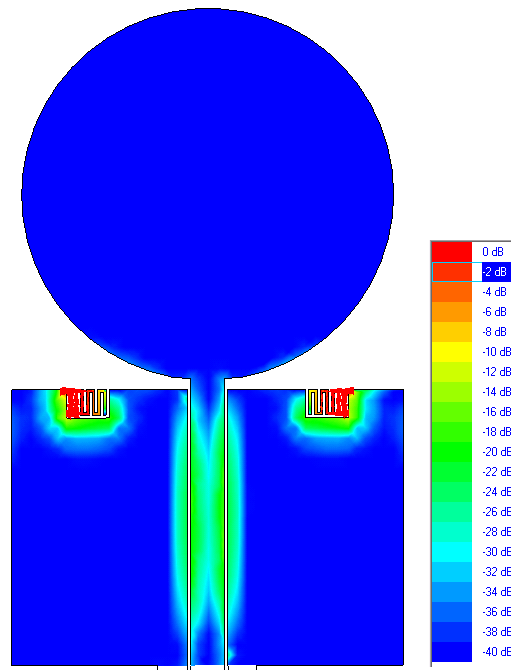
1.63 – 3.28 GHz หรือ 67.21 % ส่วนแถบความถี่สูงมีความกว้างแถบที่ 3.76 – 7 GHz หรือ 60.22 % และมีแถบความถี่ notch ตั้งแต่ 3.31 – 3.73 GHz หรือ 11.93 % โดยมีความถี่เรโซแนนซ์การ notch ที่ 3.5 GHz เปรียบเทียบผลการวัดสายอากาศที่สร้างขึ้นกับการจำลอง ด้านแถบความถี่ต่ำผลจากการวัดและจากการจำลองมีความสอดคล้องกัน ส่วนแถบความถี่สูงผลการวัดเกิดมีการรบกวนมากขึ้นกว่าด้านความถี่ต่ำจึงทำให้มีความสอดคล้องกันน้อยกว่า ส่วนการ notch ความถี่ ผลจากการวัดจริงเกิดการเลื่อนความถี่ notch ไป 400 MHz และความกว้างแถบการ notch มากกว่าประมาณ 120 MHz

โดยทั่วไปแล้วการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อกระแสมีการกระจายไปตามขอบ หรือกระจายเข้าไปภายในบริเวณแพตช์ซึ่งจะเป็นสีแดงเข้ม แสดงดังรูปที่ 4.13

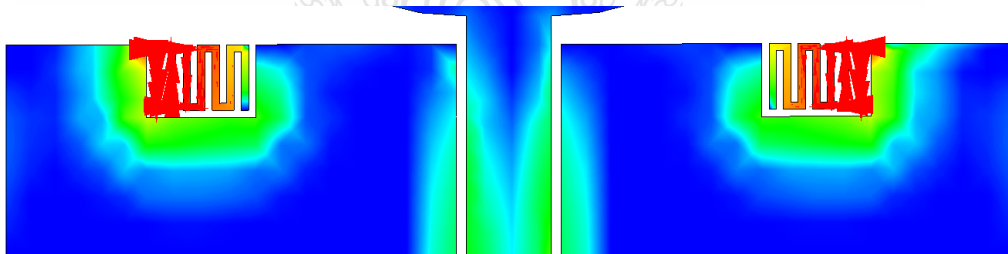


รูปที่ 4.13 การกระจายกระแสบนแพตช์เมื่อมีการแผ่กระจายคลื่น

ส่วนการเกิดการ notch ความถี่นั้น พิจารณาจากการที่ไม่มีกระแสไหลไปยังแพตช์ จะเป็นสีน้ำเงิน จากรูปที่ 4.13 ใช้รูปทรงตัวหนอนวางที่ขอบด้านบนของกราวด์ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวหนอน กระแสส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในตัวหนอน ดังรูป 4.13 ไม่มีกระแสผ่านไปยังแพตช์ได้ จึงไม่มีการแผ่กระจายคลื่น พื้นที่ส่วนที่เป็นสีน้ำเงินจะมีความหนาแน่นกระแสต่ำที่สุด ส่วนสีแดงจะเป็นส่วนที่มีความหนาแน่นกระแสสูงที่สุด สีเหลืองกับสีเขียวจะมีความหนาแน่นกระแสที่รองลงมาตามลำดับ



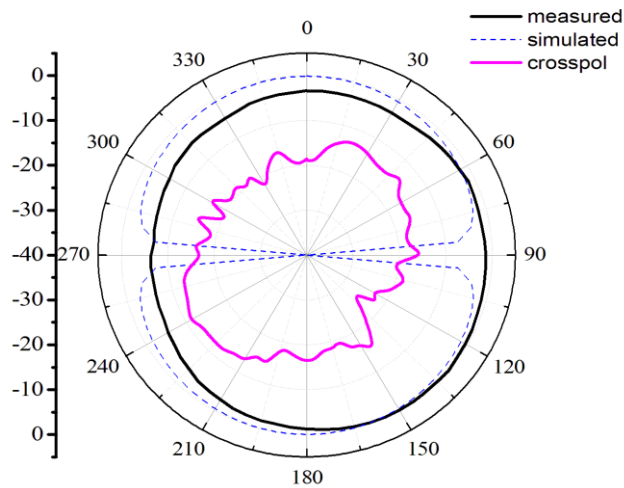
รูปที่ 4.14 ตัวหนอนจะเก็บสะสมกระแสไม่ให้อ่านเข้าไปในแพตช์เพื่อ notch ความถี่ 3.5 GHz



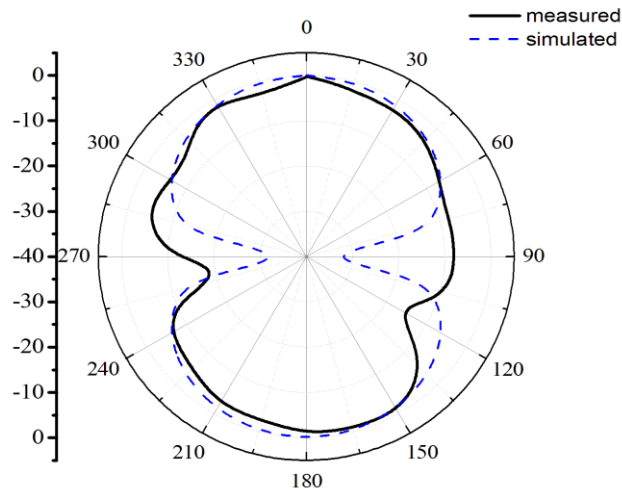
รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของกระแสมากที่สุดที่ความถี่ notch 3.5 GHz

#### 4.2.2 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

การจัดตั้งเครื่องมือวัดเช่นเดียวกันกับการวัดสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นรูปวงกลม ในการวัดการแผ่กระจายคลื่นในหัวข้อนี้ จะเปรียบเทียบการวัดโพลาริซั่วมในระนาบ  $xz$  เท่านั้น ส่วนการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะทำการวัดสองระนาบ คือ ระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  โดยมีความถี่ที่ทำการวัดคือ 2.45 GHz และ 5.5 GHz ผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแสดงดังรูป 4.16



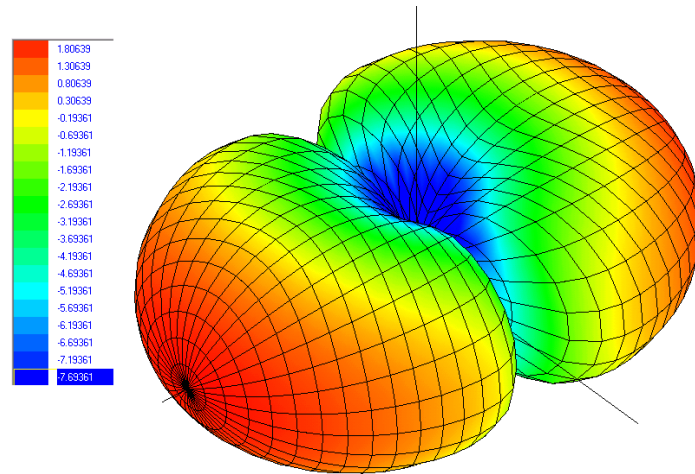
รูปที่ 4.16 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz ระนาบ xz



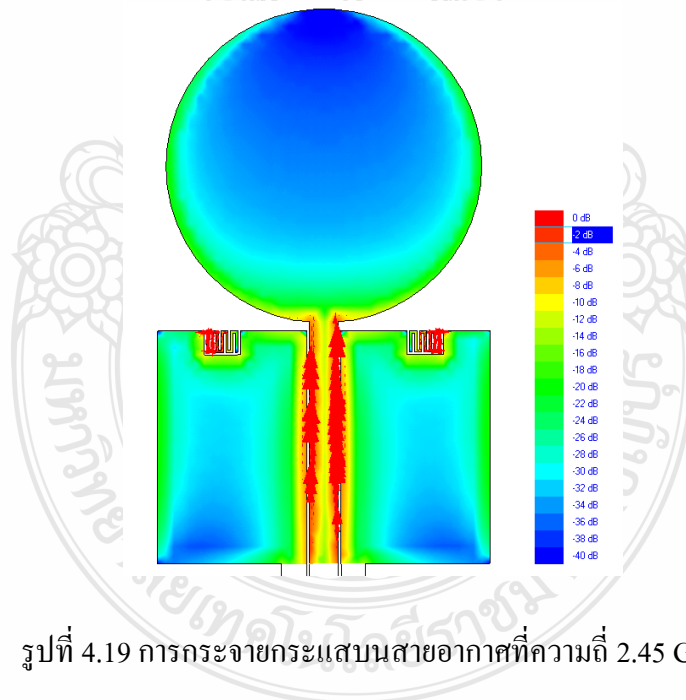
รูปที่ 4.17 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz ระนาบ yz

จากรูปที่ 4.16 เป็นการแผ่กระจายคลื่นที่ 2.45 GHz บนระนาบ xz เส้นทึบสีดำเป็นผลจากการวัดจริงที่แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเมื่อสายอากาศรับและส่งมีโพลาไรซ์เดียวกัน ส่วนเส้นประเป็นผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D ส่วนเส้นทึบสีชมพูเป็นการวัดจริงแบบโพลาไรซ์ไขว้ ผลจากการวัดพบว่า บนระนาบ xz แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะรอบตัว ที่ตรงตามผลที่ได้จากการจำลอง ส่วนการวัดแบบโพลาไรซ์ไขว้ พบว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายรอบตัวแต่มีการบิดเบี้ยวที่มุมประมาณ 240 องศาจะมีค่าสูงสุด ส่วนการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลจากการจำลอง เส้นทึบเป็นผลจากการวัดจริง เส้นประเป็นผลจากการจำลอง พบว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการวัดจริง มีลักษณะสอดคล้อง

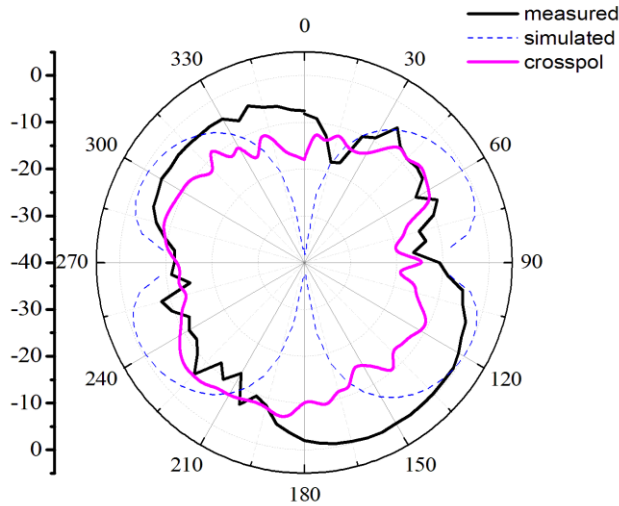
กับผลที่ได้จากการจำลอง ในรูปที่ 4.18 เป็นรูป 3 มิติ การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz ส่วนรูปที่ 4.19 เป็นการกระจายกระแสบนสายอากาศ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D



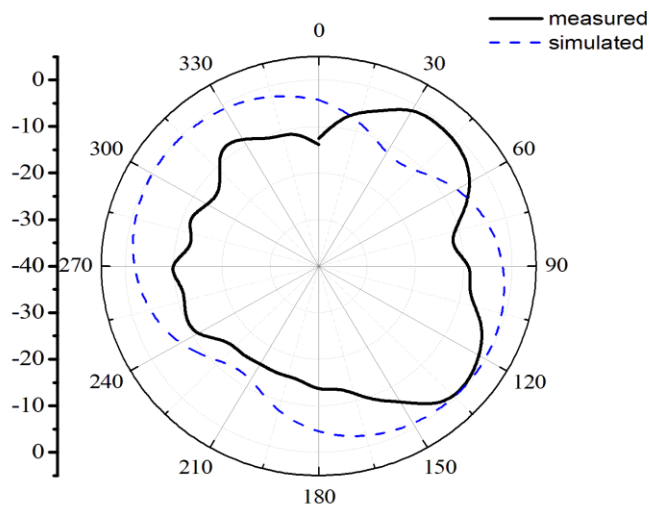
รูปที่ 4.18 การแผ่กระจายคลื่นแบบสามมิติที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.19 การกระจายกระแสบนสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.20 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.5 GHz ระนาบ xz

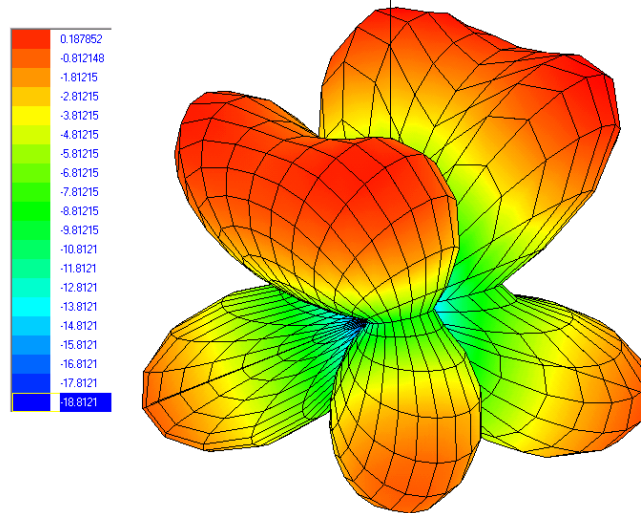


รูปที่ 4.21 การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.5 GHz ระนาบ yz

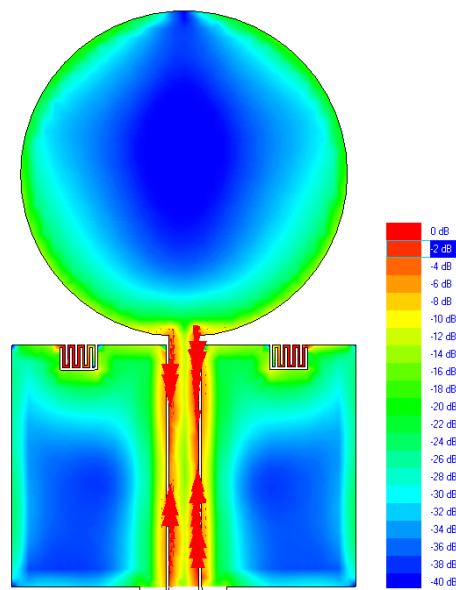
จากรูปที่ 4.20 เป็นการแผ่กระจายคลื่นที่ 5.5 GHz บนระนาบ xz เส้นทึบสีดำเป็นผลจากการวัดจริงที่แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเมื่อสายอากาศรับและส่งมีโพลาริซเดี่ยวกัน ส่วนเส้นประเป็นผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D ส่วนเส้นทึบสีชมพูเป็นการวัดจริงแบบโพลาริซไขว้ ผลจากการวัดพบว่า บนระนาบ xz แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายรอบตัวแต่มีการบิดเบี้ยว ที่มุมประมาณ 15 องศา มีการลดลงมากที่สุดของการแผ่กระจายคลื่น ส่วนผลการจำลองมีการแตกออกของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นทิศทางที่มุม 60, 120, 240 และ 300 องศา ส่วนผลการวัดแบบโพลาริซไขว้ พบว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายรอบตัวใกล้เคียงกันมากแม้จะมี

แบบรูปที่บิดเบี้ยวไป โดยที่มุมประมาณ 230 องศา จะมีขนาดที่สูงกว่าแบบโพลาริซร่วม แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลจากการจำลอง เส้นทึบเป็นผลจากการวัดจริง ส่วนเส้นประ เป็นผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการวัดจริง มีลักษณะคล้ายรอบตัว แม้จะมีความบิดเบี้ยวในมุมประมาณ 45 และ 135 องศา ที่แสดงความเป็นทิศทางออกมา แต่ไม่เด่นชัดมาก ส่วนผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายรอบตัวโดยที่มุมประมาณ 35 และ 210 องศา มีการหดลงเล็กน้อย แต่ก็ยังคงรูปเป็นแบบคล้ายรอบตัว

ในรูปที่ 4.22 เป็นรูป 3 มิติ การแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.5 GHz ส่วนรูปที่ 4.23 เป็นการกระจายกระแสบนสายอากาศ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D สำหรับ การเปรียบเทียบผลการวัดเกณฑ์สายอากาศที่สร้างขึ้น กับผลจากการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.24

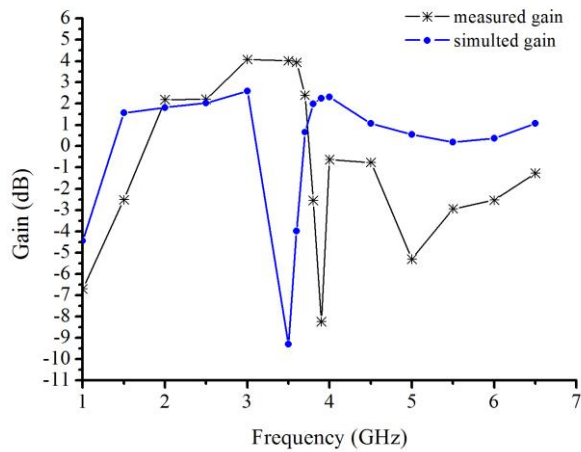


รูปที่ 4.22 การแผ่กระจายคลื่นแบบสามมิติที่ความถี่ 5.5 GHz



รูปที่ 4.23 การกระจายกระแสบนสายอากาศที่ความถี่ 5.5 GHz





รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบเกณฑ์การขยายของสายอากาศที่ได้จากการวัดจริงและการจำลอง

ผลการวัดเกณฑ์ของสายอากาศที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่า ผลการวัดจริงที่แถบความถี่ต่ำเกณฑ์สูงสุดอยู่ที่ 4.08 dB ที่ความถี่ 3.0 GHz โดยทางด้านแถบความถี่สูงตั้งแต่ 4.18 GHz มีเกณฑ์ที่ต่ำกว่า 0 dB จุดที่สูงสุด -0.75 dB ที่ความถี่ 4.5 GHz ส่วนแถบความถี่ notch จะมีเกณฑ์ต่ำสุด -8.25 dB ที่ความถี่ 3.9 GHz ส่วนผลการจำลองพบว่า แถบความถี่ต่ำเกณฑ์สูงสุด 2.56 dB ที่ความถี่ 3.0 GHz ด้านแถบความถี่สูงมีเกณฑ์สูงสุด 2.3 dB ที่ความถี่ 4 GHz ส่วนแถบความถี่ notch จะมีเกณฑ์ต่ำสุดที่ -9.29 dB ที่ความถี่ 3.5 GHz



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่สามารถจำกัดแถบความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานได้ สายอากาศที่ออกแบบจะรองรับการสื่อสารไร้สาย WLAN ที่มีมาตรฐานการใช้งานต่างๆ เช่น ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g (2.4-2.4835 GHz), มาตรฐาน IEEE 802.11 a ( 5.15-5.35 GHz) (5.725-5.825 GHz) ,มาตรฐาน IEEE 802.11j (4.9-5.091 GHz) และมาตรฐาน IEEE 802.16-2004 สำหรับ WiMAX จะมีย่านความถี่ใช้งานคือ 2.5-2.7 GHz และ 5.7-5.9 GHz ตลอดจนนำมาใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่าน 1800 MHz.

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การลดขนาดของสายอากาศ

สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่สร้างขึ้นจะเป็นแบบไม่มีกราวด์รอบตัว มีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [17-18] แสดงดังตารางที่ 5.1 โดยที่สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมยังคงสามารถใช้ในการสื่อสารไร้สายระบบ WLAN ,WiMAX ตลอดจนใช้งานย่านความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่าน 1800 MHz. ได้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของสายอากาศที่สร้างกับงานวิจัยในอดีต

สายอากาศของงานวิจัยในอดีต	สายอากาศที่สร้างขึ้น	
ขนาด (mm <sup>2</sup> )	ขนาด (mm <sup>2</sup> )	ลดขนาดลง(%)
[18] 135 mm. x 135 mm. (18225 mm <sup>2</sup> )	37 mm. x 45 mm. (1665 mm <sup>2</sup> )	90.86 %
[19] 70 mm. x 72 mm. (5040 mm <sup>2</sup> )	37 mm. x 45 mm. (1665 mm <sup>2</sup> )	66.96 %

##### 5.1.2 การกระตุ้นด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่สร้างขึ้นจะใช้การกระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [19-20] จะพบว่ามีข้อดีกว่าคือสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องการมีการเจาะรูผ่านฐานรอง

ไดอิเล็กตริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้น และสามารถนำมาต่อรวมในวงจรเดียวกันกับ โมโน โพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมได้ง่าย ซึ่งทำให้เกิดการ ผิดเพี้ยนของสัญญาณและค่าความสูญเสียที่ต่ำกว่าการใช้ไมโคร สตรีป

### 5.1.3 แบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราการขยายพลังงานของสายอากาศ

สายอากาศโมโน โพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นแบบรอบตัว อัตราการขยายพลังงานสูงสุดของสายอากาศผลการวัดจริงที่แถบความถี่ต่ำเกณฑ์สูงสุดอยู่ที่ 4.08 dB ที่ความถี่ 3.0 GHz โดยทางด้านแถบความถี่สูงตั้งแต่ 4.18 GHz มีเกณฑ์ที่ต่ำกว่า 0 dB จุดที่สูงสุด -0.75 dB ที่ความถี่ 4.5 GHz ส่วนแถบความถี่ notch จะมีเกณฑ์ต่ำสุด -8.25 dB ที่ความถี่ 3.9 GHz ส่วนผลการจำลองพบว่า แถบความถี่ต่ำเกณฑ์สูงสุด 2.56 dB ที่ความถี่ 3.0 GHz ด้านแถบความถี่สูงมีเกณฑ์สูงสุด 2.3 dB ที่ความถี่ 4 GHz ส่วนแถบความถี่ notch จะมีเกณฑ์ต่ำสุดที่ -9.29 dB ที่ความถี่ 3.5 GHz

### 5.1.4 ผลการเปรียบเทียบการวัดและการจำลองแบบ

จากผลการเปรียบเทียบการวัดและการจำลองแบบของสายอากาศทั้งสามรูปแบบนั้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแล สามารถนำไปประยุกต์ในการออกแบบและสร้างสายอากาศ แบบ แถบความถี่กว้างของระบบสื่อสารไร้สายต่างๆ เช่น DCS, PCS, UMTS, WLAN 802.11 a/b/g, Bluetooth และ ครอบคลุมย่านความถี่ IEEE 802.16 WiMAX

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ )

แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูง ๆ จะทำให้สามารถออกแบบสายนำสัญญาณที่มีขนาดเล็ก แต่ในการออกแบบวงจรไมโครเวฟ ที่มีขนาดสายนำสัญญาณที่เล็ก หรือ ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณแคบ ๆ มากเกินไป ซึ่งถ้าหากมีขนาดเล็กกว่าความสามารถในการเซาะของดอกสว่านจะไม่สามารถเซาะขึ้นงานได้ตามขนาดที่ต้องการ จะส่งผลให้ค่าของสัญญาณที่ทำการวัดและทดสอบของงานจริงมีค่าต่างกับค่าของการจำลอง ขณะเดียวกันถ้าหากแผ่นวงจรพิมพ์มีค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำ ๆ สายนำสัญญาณโมโน โพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่น ระนาบร่วมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามค่าที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดใหญ่ไม่ เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

### 5.2.2 ค่าความหนาของชั้นสารฉับสเตรท

แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีขนาดบางมากเกินไป เครื่องเซาะก็อาจไม่สามารถจับชิ้นงานให้คงที่ได้ และดอกสว่านอาจจะทำการเซาะถึงเนื้อชั้นสารฉับสเตรท จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในชิ้นงานเพิ่มขึ้นและจะทำให้ค่าผลการวัดและทดสอบมีค่าแตกต่างมากขึ้นจากการจำลองการทำงาน ในการออกแบบชิ้นงานควรซื้อแผ่นวงจรพิมพ์ที่ต้องการใช้ในการสร้างสายอากาศเพื่อนำมาวัดความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์แล้วนำค่าที่ได้นั้นใส่ในค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบชิ้นงานในโปรแกรม IE3D

### 5.2.3 แนวทางการพัฒนาสายอากาศ

เนื่องจากสายอากาศโมโน โพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัว มีโพลาริซัชันแบบลิเนียร์ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานเป็นสายอากาศตัวรับสัญญาณ ถ้าต้องการนำมาใช้งานให้เป็นสายอากาศตัวส่งควรพัฒนาให้เป็นโพรไฟล์แบบวงกลม



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Available on : <http://www.fcc.gov/pshs/techttopics/techttopics10.html>.
- [2] William F. Richards. "Microstrip antennas," Edited by Y. T. Lo and S. W. Lee. Antenna Handbook . Newyork: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1988.
- [3] Liu. W.-C., "Wideband dual-frequency double inverted-L CPW-fed monopole antenna for WLAN application," in *Proc. IEEE Microwaves Antennas and Propag.*, 2005, pp. 505 – 510.
- [4] Kim, T.H., and Park, D.C., "CPW-fed compact monopole antenna for dual-band WLAN applications," *Electron. Lett.*, vol. 41, pp.291 – 293, 2005.
- [5] Liu, W.-C., and Liu, H.-J., "Compact triple-band slotted monopole antenna with asymmetrical CPW grounds" *Electron. Lett.*, vol. 42, pp. 840 – 842, 2006.
- [6] Thomas, K.G., and Sreenivasan, M., "Compact CPW-fed dual-band antenna," *Electron. Lett.*, vol. 46, pp. 13 – 14, 2010.
- [7] Chaimool, S., and Chung, K.L., " CPW-fed mirrored-L monopole antenna with distinct triple bands for WiFi and WiMAX applications," *Electron. Lett.*, vol. 45, pp. 928 – 929, 2009.
- [8] Thomas, K.G., and Sreenivasan. M., "Compact triple band antenna for WLAN/WiMAX applications," *Electron. Lett.*, vol. 45, pp. 811 – 813, 2009.
- [9] Kim, T.H., and Park, D.C., "CPW-fed compact monopole antenna for dual-band WLAN applications," *Electron. Lett.*, vol. 41, pp.291 – 293, 2005.
- [10] Liu. W.-C., "Wideband dual-frequency double inverted-L CPW-fed monopole antenna for WLAN application," in *Proc. IEEE Microwaves Antennas and Propag.*, 2005, pp. 505 – 510.
- [11] Liu, W.-C., and Liu, H.-J., "Compact triple-band slotted monopole antenna with asymmetrical CPW grounds" *Electron. Lett.*, vol. 42, pp. 840 – 842, 2006.
- [12] Wen-Chung Liu, Chao-Ming Wu, and Nien-Chang Chu, " A Compact CPW-Fed Slotted Patch Antenna for Dual-Band Operation," *IEEE Antennas Wireless Propag. Let.*, vol. 9, pp. 110-113, 2009.
- [13] Thomas, K.G., and Sreenivasan, M., "Compact CPW-fed dual-band antenna," *Electron. Lett.*, vol. 46, pp. 13 – 14, 2010.
- [14] Hsien-Wen Liu, Chia-Hao Ku, and Chang-Fa Yang, " Novel CPW-Fed Planar Monopole Antenna for WiMAX/WLAN Applications ," *IEEE Antennas Wireless Propag. Let.*, vol. 9, pp.240 – 243, 2010.

- [15] Angelopoulos, E.S., Stratakos, Y.E., Kostaridis, A.I., Kaklamani, D.I., and Uzunoglu, N.K.: “Multiband miniature coplanar waveguide slot antennas for GSM-802.11b and 802.11b-802.11a wireless applications”, IEEE Wirel. Commun. Netw., 2003, 1, pp. 103–108
- [16] Chen, H.D.: “Broadband cpw-fed square slot antenna with a widened tuning stub”, IEEE Trans. Antennas Propag., 2003, 51, (8), pp. 1982–1986
- [17] Yeo, J., Lee, Y. and Mittra, R. “Design of a wideband planar volcano-smoke slot antenna (PVSA) for wireless communications,” IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 2, pp 655-658, Jun. 2003. [1]
- [18] สัญชัย พรหมเทพ, “สายอากาศสี่เหลี่ยมที่มีร่องวงกลมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าพระนครเหนือ, 2548
- [19] J. Liang, C.C. Chiau, X. Chen and C.G. Parini., “Printed circular disc monopole antenna for ultra-wideband applications”, ELECTRONICS LETTERS 30th September 2004 Vol. 40 No. 20
- [20] J. Liang, C.C. Chiau, X. Chen and C.G. Parini., “Study of a Printed Circular Disc Monopole Antenna for UWB Systems”, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 53, NO. 11, NOVEMBER 2005
- [21] Y. F. Weng<sup>1</sup>, W.J. Lu<sup>1,2</sup>, S. W. Cheung<sup>1</sup> and T. I. Yuk<sup>1</sup>: “UWB Antenna with Single or Dual Band-Notched Characteristic for WLAN Band using Meandered Ground Stubs”, 2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference, 16-17 November 2009, Loughborough, UK, pp.757-760
- [22] Constantine A. Balanis, “ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN”, Third Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2005
- [23] Gupta, K. C., Garg, R., Bahl, I.J. and Bhartia, P. 1996. Microstrip Line and slot lines. Norwood, MA :Artech House.
- [24] Collin, R. E. 1992. Foundations for Microwave Engineering. New York: McGraw-Hill.
- [25] E. Jahnke and F. Emde, “Tables of Functions with Formulae and Curves, 4<sup>th</sup> ed.” New York : Dover 1945

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของแผ่น PCB. ชนิด FR4

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของสายอากาศ



ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของ แผ่น PCB. ชนิด FR4

<b>DS – 7405 (ANSI : FR-4)</b>			Designation	DS-7405	
<b>GENERAL PROPERTIES</b>			ANSI Grade	FR-4	
Test Item	Unit	Treatment	Property Data		
			Standard Value	Guaranteed Value	
Tg	$^{\circ}C$	DSC	135	above 130	
		TMA	135	above 130	
		DMA	155	above 160	
CTE x-axis	$ppm/^{\circ}C$	Ambient to Tg	18	less than 20	
y-axis			13	less than 15	
z-axis			55	less than 60	
Flammability		UL-94	V-0	V-0	
Insulation Resistance	ohm	C-96/20/65	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$	Above $5 \times 10^{11}$	
		C-96/20/65+D-2/100	$1 \times 10^{10} - 1 \times 10^{11}$	Above $1 \times 10^9$	
Volume Resistance	ohm-cm	C-96/20/65	$1 \times 10^{14} - 1 \times 10^{15}$	Above $1 \times 10^{12}$	
		C-96/20/65+C-96/40/90	$1 \times 10^{13} - 1 \times 10^{14}$	Above $1 \times 10^{12}$	
Surface Resistance	ohm	C-96/20/65	$5 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14}$	Above $1 \times 10^{12}$	
		C-96/20/65+C-96/40/90	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$	Above $1 \times 10^{11}$	
Arc Resistance	min.seconds		110	Above 60	
Dielectric Constant (1MHz)	-	C-96/20/65	4.5-4.8	less than 5.5	
		C-96/20/65+D-48/50	4.6-5.2	less than 5.8	
Dissipation Constant (1MHz)	-	C-96/20/65	0.015-0.020	less than 0.035	
		C-96/20/65+D-48/50	0.018-0.023	less than 0.045	
Comparative Tracking Index	volt	IEC Method	-	-	
Solder Float(250 $^{\circ}$ C)	sec	A	Above 180	Above 120	
Peel Streng	Cu.foll1 oz (0.035mm)	kg/cm	A	1.8-2.2	Above 1.43
Flexural Strength	Kgt/mm $^2$	A	40-50	Above 32.7	
Water Absorption	%	E-24/50+D-24/23	0.10-0.15	Less than 0.25	

Specimen Thickness : 1.6mm



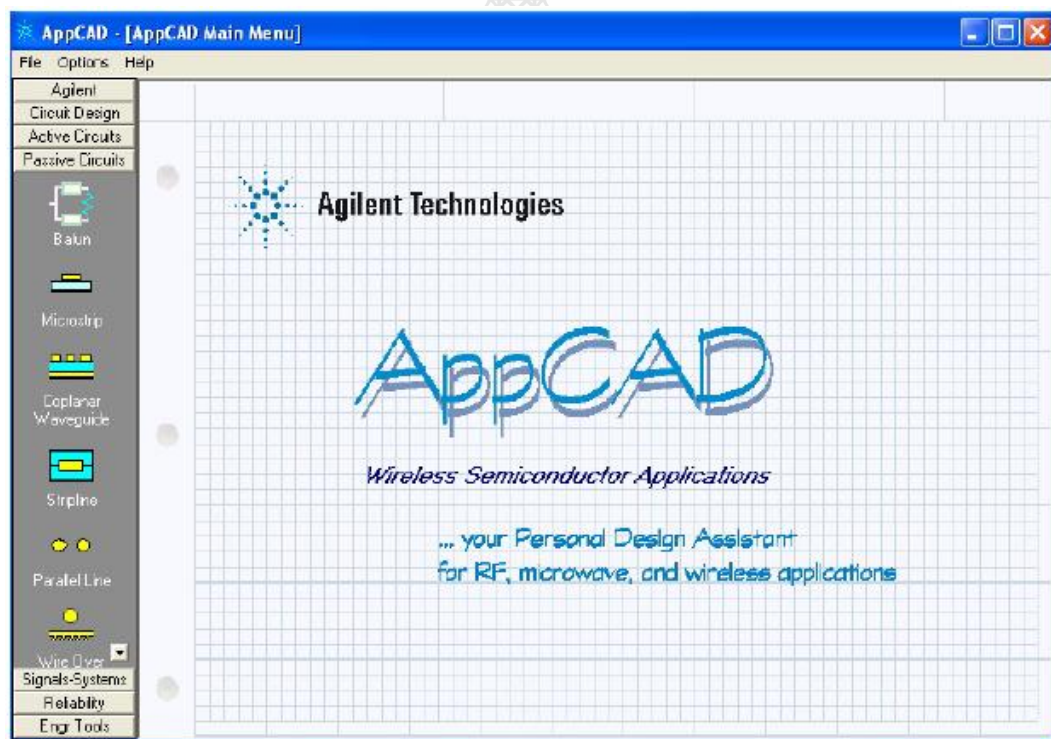
### **PERCHASING INFORMATION**

- Copper foil : 0.5 oz/ ft<sup>2</sup> (0.018 mm), 1 oz/ ft<sup>2</sup> (0.035 mm), 2 oz/ ft<sup>2</sup> (0.070mm) available.
- Trickness : 0.2mm to 3.2mm

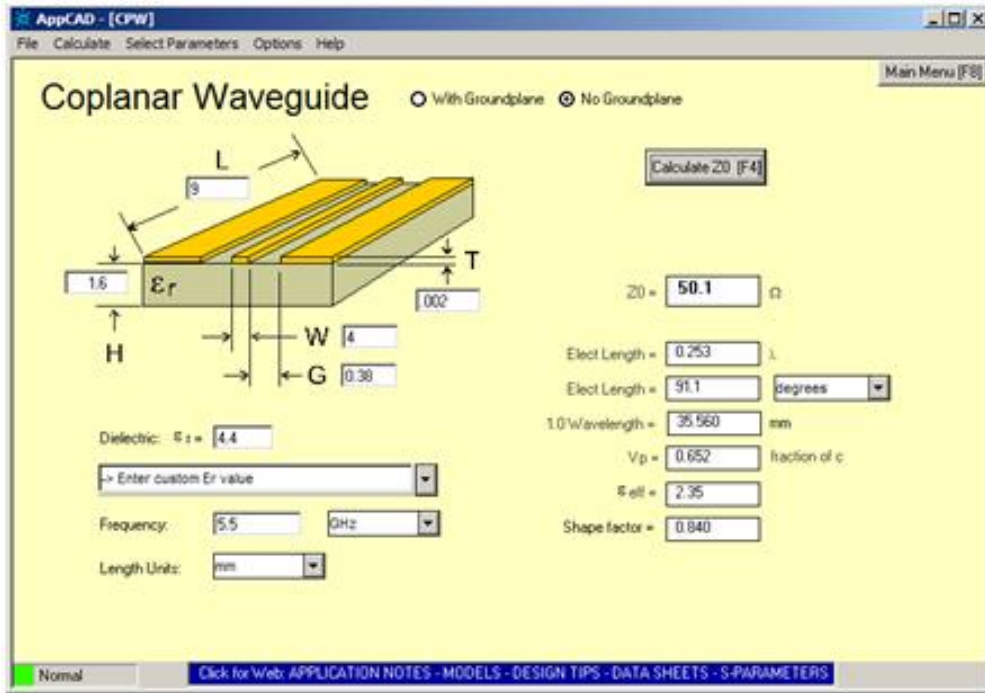
Standard Side		Tolerance(mm)
1,020x1,220mm(40"x48")	915x1,220mm(36"x48")	+3
1,070x1,220mm(42"x48")	970x1,220mm(38"x48")	0

\*Other sheet size and thickness could be available upon request.

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณสายนำสัญญาณ



รูปที่ ก.1 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณสายนำสัญญาณ (AppCAD for window)

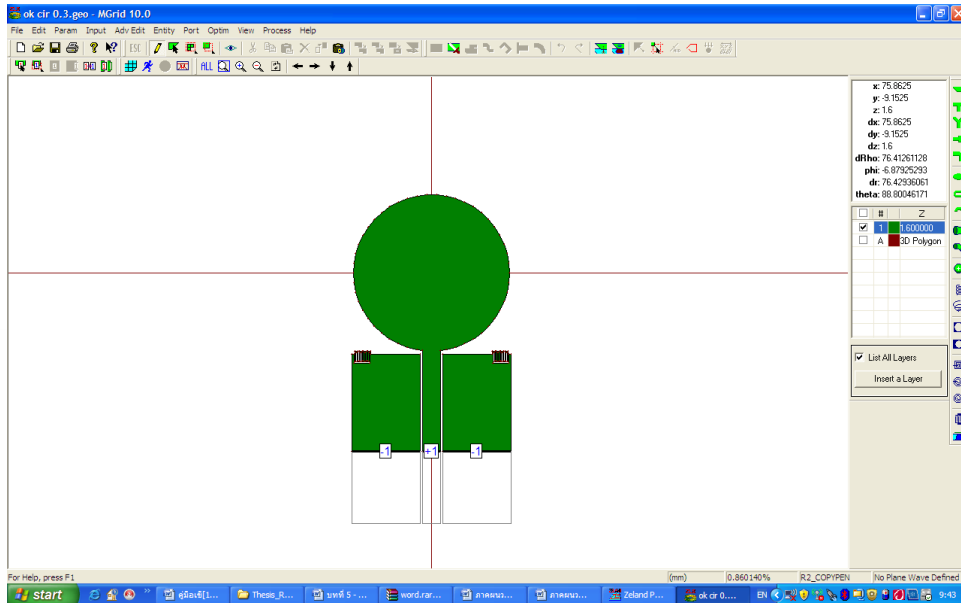


รูปที่ ก.2 การคำนวณสายนำสัญญาณ 50 Ω

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานสายอากาศ

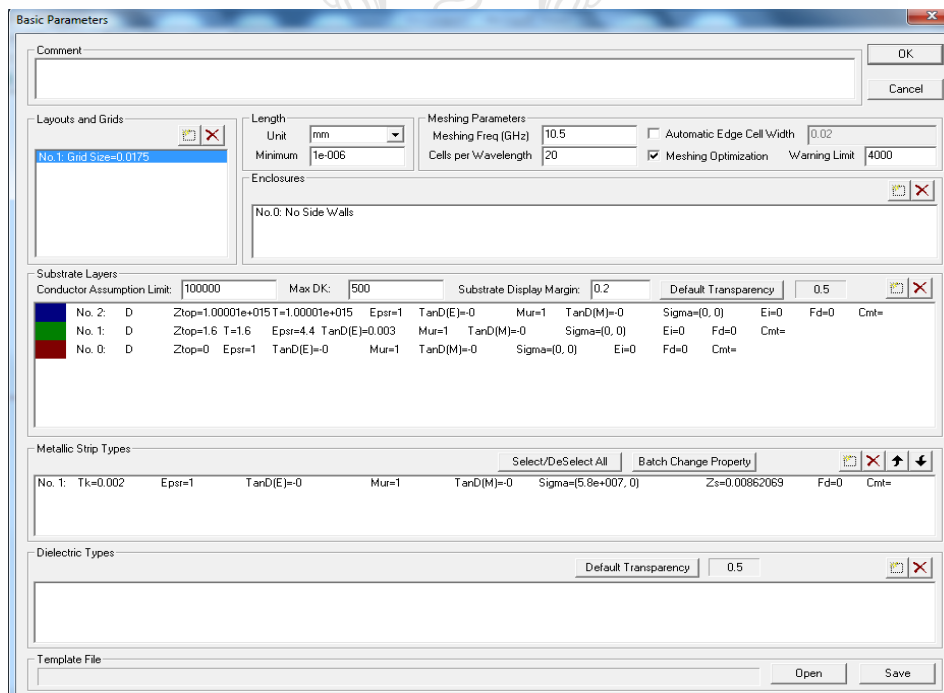


รูปที่ ก.3 โปรแกรมจำลองการทำงานความถี่ย่านไมโครเวฟ (IE3D Zeland)



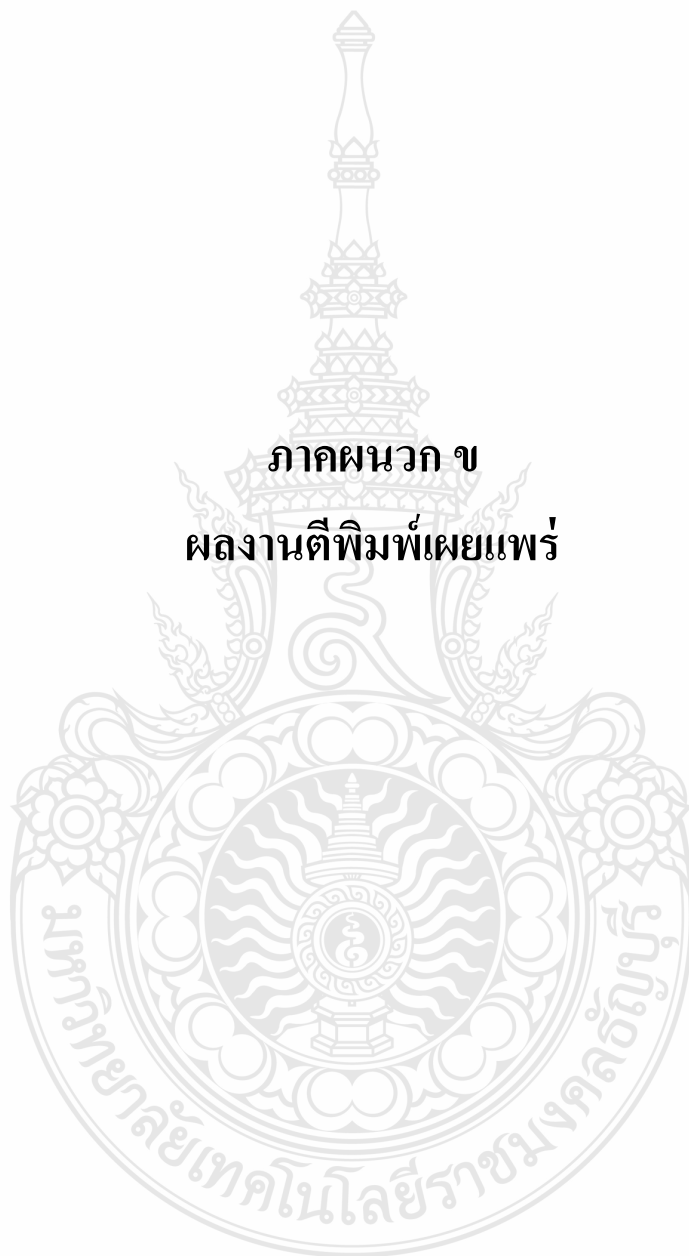
รูปที่ ก.4 การจำลองการทำงานสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน



รูปที่ ก.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสายอากาศ

ภาคผนวก ข  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





# **JICTEE-2010**

## **Programs and Abstracts**



Copyright.. JICTEE-2010

## รายชื่อ reviewers บทความที่นำเสนอ

Home > Technical Program > List of Reviewers

### List of Reviewers

C. Chantrapornchai	Silpakorn University
Canasai Kruengkrai	TCL/NICT
Charnyote Pluempitiwiriyawej	Mahidol University
Chiranut Sa-ngiamsak	KKU
Choochart Haruechaiyasak	NECTEC
Chuchart Pintavirooj	KMITL
Chutima Prasartkaew	RMUTT
Damras Wongsawang	Mahidol University
Jirawat Panklang	KMITL
Jumpol-Polvichai	KMUTT
Jun-ichi Takada	Tokyo Institute of Technology
Kasin Vichienchom	KMITL
Komkrit Chomsuwan	KMUTT
Kosin Chamnongthai	KMUTT
Mognkolnavin	CU
Montri Karnjanadecha	PSU
Napat Triroj	KKU
Nipon Theera-Umpon	CMU
Noppadol Maneerat	KMITL
Nuttapol Prayongpun	KMUTNB
Pakorn Kaewtrakulpong	KMUTT
Peerapon Siripongwutikorn	KMUTT
Poj Tangamchit	KMUTT
Prakasit Tunti-a-longkarn	KMUTNB
Pramote Wardkien	KMITL
Priyakorn Pusawiro	KMUTT
Rardchawadee Silapunt	KMUTT
Shingo Yoshizawa	Hokkaido University
SOMCHAI SALEEKAW	KMUTNB
Somsak Choomchuay	KMITL
Songphol Kanjanachuchai	CU
Suksan Wangsathitwong	KMUTNB
Suphakant Phimoltares	CU
Surapan Airphaiboon	KMITL
Thanate KHAORAPAPONG	PSU
Thumrongrat Amornraksa	KMUTT
Tiranee Achalakul	KMUTT
Toshio Wakabayashi	Tokai University
Varakorn Kasemsuwam	KMITL
Werapon Chiracharit	KMUTT
Wuttipong Kumwilaisak	KMUTT
Yongyuth Permpoontanalarp	KMUTT
Yutana Kidjuidure	KMITL

## ดัชนีบทความที่นำเสนอ

● ● ● | Luang Prabang, Laos.

Koshiro Kitao	17
Kosin Chamnongthai	76
Kralson Aunchaleevarapan	127
Krishnaphong Meechunuek	105, 106, 108, 110
Kritsada Piemsrinuan	42
Kunnthphong Srisathit	16
Kyohei Kamiyama	3

Author	Page
Laddawan Supadee	11
Lunchakorn Nintarat	43

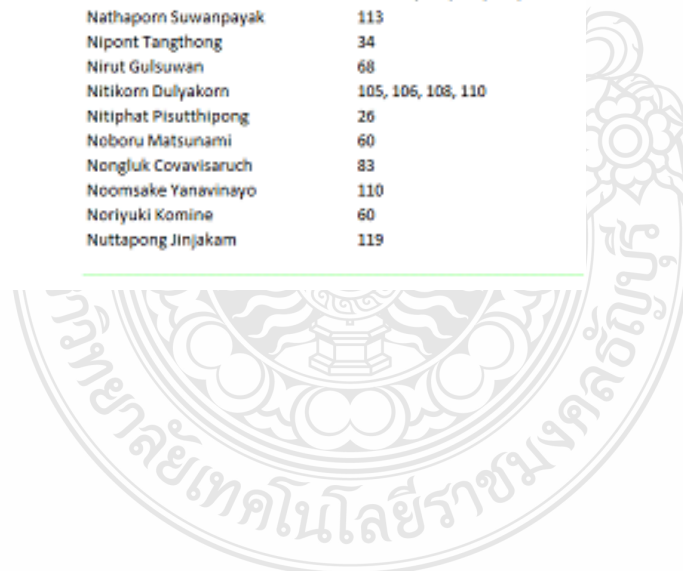
L

Author	Page
M. Sangwarasilp	64
M. Sangworasil	63
Mana Sriyudthsak	70
Manas Sangworasil	24, 30
Manithaphone Mahaxay	120
Masaru Fujieda	4, 14
Mir Ghoraishi	17
Mongkol Mongkolwongroj	5
Montree Siripruchyanun	75
Mr.Pruet Putjorn	90

M

Author	Page
N. Anantrasirichai	56
N. Sirimasakul	48
N. Suwanpayak	117
Naoki Matsumoto	10
Narasak Boonthep	76
Narongrit Mekloi	66
Nasaran Mahittichatkul	105-106, 108, 110, 113, 132
Nathaporn Suwanpayak	113
Nipont Tangthong	34
Nirut Gulsuwan	68
Nitikorn Dulyakorn	105, 106, 108, 110
Nitiphat Pisutthipong	26
Noboru Matsunami	60
Nongluk Covavisaruch	83
Noomsake Yanavinayo	110
Noriyuki Komine	60
Nuttapong Jijakam	119

N





JICTEE-2010

**ID: 5108**

**Wideband CPW- Fed Planar Monopole  
Antenna**

**Nipont Tangthong, Paitoon Rakluea, Chatchai  
Suppitaksakul**

Department of Electronic and Telecommunication Engineering,  
Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi Pathumthani  
12110,Thailand

---

**Abstract:**

This paper presents a wideband CPW-Fed planar monopole antenna. The CPW-Fed is applied on planar circular patch monopole antenna. The circular patch monopole is printed on the same side of a FR4 dielectric substrate. The simulation is performed by using the IE3D program. The simulation result can be proved that bandwidth is within a range of 3.323-6.526 GHz, fractional bandwidth is 56.24%. The measured impedance bandwidth is 3.3-8 GHz which cover WLAN and WiMax band. The measured results of resonant frequencies are coincident well with the simulated results. The proposed antenna has small size, light weight and simple structure. The antenna is applied in wireless communication systems.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายนิพนธ์ ทางทอง
วัน เดือน ปีเกิด	6 ตุลาคม 2513 ที่จังหวัดอุบลราชธานี
ที่อยู่	เลขที่ 2 ถ.นางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
ประวัติการศึกษา	<p><b>ปีการศึกษา 2532</b> ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ</p> <p><b>ปีการศึกษา 2535</b> ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</p> <p><b>ปีการศึกษา 2544</b> ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล</p> <p><b>ปีการศึกษา 2549</b> ระดับปริญญาโท สาขาโครงข่ายโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรังสิต</p>
ประวัติการทำงาน	<p><b>พ.ศ.2536 - ปัจจุบัน</b> อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ</p>
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	<p>Nipont Tangthong, Paitoon Raklua and Chatchai Suppitaksakul, “Wideband CPW-Fed Planar Monopole Antenna”, JICTEE-2010 Luang Phabang, Lao PRD. Dec 21-24 , 2010 , pp. 145-148.</p>