

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทาง  
โดยใช้โครงสร้างปรสิต

IMPROVEMENT OF ULTRA-WIDEBAND BIDIRECTIONAL ANTENNA  
USING PARASITIC STRUCTURES



T117896



ประชา โอษคลัง  
PRACHA OSKLANG

ณ.  
2233ก  
2554

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **117896**  
วัน,เดือน,ปี...2.2...ค.ค...2554

b...1235028x  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-EN-M-010-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IMPROVEMENT OF ULTRA-WIDEBAND BIDIRECTIONAL ANTENNA  
USING PARASITIC STRUCTURES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2011**

**KMITL-2011-EN-M-010-072**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2011**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทาง โดยใช้โครงสร้างปรสิต
นักศึกษา	นายประชา โยศคลัง
รหัสประจำตัว	52611203
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมโดยใช้โครงสร้างปรสิต ซึ่งออกแบบใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 3.1GHz ถึง 10.6GHz ตามมาตรฐาน Federal Communications Commission (FCC) โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมออกแบบสายอากาศย่านความถี่ไมโครเวฟ (Computer Simulation Technology Microwave Studio : CST Microwave Studio) โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นลักษณะสองทิศทาง โดยมีลวดทองแดง พร้อมทั้งแท่งปรสิตคู่ที่วางอยู่บริเวณผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม และแท่งปรสิตที่วางบริเวณผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม สำหรับปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอให้ผลแบนด์วิดท์เท่ากับ 144% ( $|S_{11}| < -10\text{dB}$ ) ครอบคลุมตลอดย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองและการทดสอบตลอดย่านความถี่ในทิศทางที่ต้องการ ( $\theta = 0^\circ$  และ  $\phi = 90^\circ$ ) เท่ากับ 3.5 dBi ถึง 6.8 dBi และ 3.1 dBi ถึง 5.3 dBi ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Improvement of Ultra-wideband Bidirectional Using Parasitic Structures
<b>Student</b>	Mr. Pracha Osklang
<b>Student ID.</b>	52611203
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2011
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### ABSTRACT

This paper proposes an ultra-wideband (UWB) rectangular ring antenna excited by circular monopole with using parasitic structures. This antenna is designed for covering frequency range from 3.1 to 10.6 GHz of FCC standard and simulated by Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST Microwave Studio). The antenna structure consists of a rectangular ring is excited by circular monopole radiating bidirectional radiation patterns. The copper rod and parasitic bars at the top and parasitic bars at the bottom of side walls rectangular ring are used to improve the radiation patterns at upper edge frequency. The antenna yields an impedance bandwidth of 144% ( $|S_{11}| < -10\text{dB}$ ) covering frequency range from 3.1 to 10.6 GHz. The minimum and maximum gains of simulation and measurement at the desired direction ( $\theta = 0^\circ$  and  $\phi = 90^\circ$ ) along the frequency range are 3.5 to 6.8dBi and 3.1 to 5.3 dBi, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องด้วยความกรุณาใส่ใจดูแลและให้คำแนะนำปรึกษาในกระบวนการวิจัยอย่างสม่ำเสมอ ตลอดจนแนวคิดต่างๆจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ ทั้งใคร่ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศลวิตร ผู้ซึ่งให้คำแนะนำทางด้านเนื้อหาวิชาการที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ และต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ ดร.สถาพร พรหมวงส์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประสบผลสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และเสียสละเวลาในการให้ข้อมูลและช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ จาก คุณรัฐพงษ์ สุวลักษณ์ คุณศุภกิต แก้วดวงตา และสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบสื่อสารไร้สายทุกท่าน ผู้เขียนขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้วยดีเป็นอย่างสูง

สำหรับบุคคลที่สำคัญยิ่งและจะขาดเสียมิได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจสำคัญมาโดยตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาศึกษาสุดท้ายขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมา ผู้เขียนจึงขอมอบคุณค่าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แก่ผู้ที่มีพระคุณทุก ๆ ท่านที่ได้กล่าวมาแล้ว

ประชา โยษคลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์และความสำคัญของปัญหา.....	1
บทที่ 2.....	9
ทฤษฎีและหลักการ.....	9
2.1 หลักการสื่อสารความถี่กว้างยิ่งยวด .....	9
2.1.1 The FCC Report and Order.....	9
2.1.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน (Power Spectral Density) .....	10
2.1.3 รูปร่างสัญญาณพัลส์(Pulse Shape) .....	11
2.1.4 ขบวนสัญญาณพัลส์(Pulse Train).....	14
2.1.5 กรอบสเปกตรัม (Spectral Masks).....	16
2.1.6 ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม(Spatial and Spectral Capacities) .....	17
2.2 ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ.....	20
2.2.1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อน (SWR and Reflected Power).....	20
2.2.2 อัตราขยาย (Gain).....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) .....	22
2.3 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Waveguide).....	23
2.3.1 คลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric: $TE^z$ ).....	25
2.4 สรุป .....	26
บทที่ 3.....	27
วิวัฒนาการของสายอากาศ.....	27
3.1 สายอากาศที่มีมาก่อน.....	27
3.1.1 สายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมบนแผ่นสะท้อน.....	27
3.1.2 สายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน.....	28
3.1.3 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	30
3.2 สายอากาศที่นำเสนอ.....	31
3.3 สรุป .....	37
บทที่ 4.....	38
การศึกษาพารามิเตอร์และการจำลองสายอากาศ.....	38
4.1 พารามิเตอร์และการจำลองของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	38
4.2 พารามิเตอร์และการจำลองของลวดทองแดง.....	44
4.2.1 พารามิเตอร์ความยาว $L$ ของลวดทองแดง.....	44
4.3 พารามิเตอร์และการจำลองของแท่งปรสิตที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	47
4.3.1 พารามิเตอร์ความสูง $h_1$ ของแท่งปรสิต.....	47
4.3.2 พารามิเตอร์ระยะห่าง $s_1$ ของแท่งปรสิต.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4 พารามิเตอร์และการจำลองของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	54
4.4.1 พารามิเตอร์ความสูง $h_2$ ของแท่งปรสิติ.....	55
4.4.2 พารามิเตอร์ระยะห่าง $s_2$ ของแท่งปรสิติ.....	58
4.5 การจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยายของสายอากาศ.....	62
4.6 การจำลองสภาพการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ที่มุมต่างๆ.....	63
4.6.1 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆใน โดเมนเชิงเวลา (Time domain).....	64
4.6.2 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆใน โดเมนเชิงความถี่ (Frequency domain).....	70
4.6.3 ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ของสัญญาณอิมพัลส์.....	73
4.7 สรุป.....	76
บทที่ 5.....	78
การสร้าง การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศ.....	78
5.1 การสร้างและทดสอบสายอากาศ.....	78
5.2 ผลการทดสอบของสายอากาศ.....	79
5.2.1 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ( $ S_{11} $ ).....	79
บทที่ 6.....	86
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	86
6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ประเภทของสายอากาศตามลักษณะ โครงสร้างและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น .....	5
2.1 ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารแบบไร้สายแบบต่างๆ .....	11
2.2 การเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ .....	18
2.3 การเปรียบเทียบของอัตราบิดของ ความถี่กว้างยิ่งยวด กับมาตรฐานของระบบไร้สายและไร้สายอื่น...	18
2.4 การบริโภคกำลังงานของชิพเซต ความถี่กว้างยิ่งยวด และชิพเซตการสื่อสารเคลื่อนที่แบบต่างๆ.....	19
3.1 แสดงแบนด์วิดท์ เมื่อเปลี่ยนแปลง $L$ ขนาดต่างๆและขอบเขตของความถี่ที่ค่า $ S_{11} $ ต่ำกว่า-10dB .....	28
3.2 การเปรียบเทียบค่า $ S_{11} $ ที่ต่ำกว่า -10dB และแบนด์วิดท์ระหว่างตัวกระตุ้น โมโน โพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม และโมโน โพลแผ่นระนาบวงกลม.....	33
4.1 แสดงสัดส่วน $I/b$ และ $b/a$ ซึ่งให้ผลที่เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำ 3.0GHz และด้านสูง 10.6GHz..	41
5.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สายอากาศรูปทรงกรวยคู่ของ Lodge [2] .....	2
1.2 สายอากาศรูปทรงกรวย [3].....	2
1.3 สายอากาศ Cross-section ของ Lindenblad [4] .....	3
1.4 สายอากาศไดโพลรูปเพชรของ Master [5] .....	3
1.5 สายอากาศโมโนโพลทรงกลม [6] .....	4
1.6 (ก) สายอากาศช่องบากชนิดแผ่นระนาบของ Farzin Lalezari และคณะ [7] .....	4
1.7 สายอากาศสองทิศทางช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิต.....	7
2.1 ระบบความหนาแน่นกำลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูง.....	11
2.2 (ก) รูปร่างสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด ที่รับได้เชิงอุดมคติ ( $w_{\infty}$ ) .....	13
2.2 (ข) สเปกตรัมเชิงอุดมคติของสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด เดียวที่รับได้ .....	13
2.3 แบบจำลองวงจรในโปรแกรม MATLAB อย่างง่ายเพื่อจะสร้าง Gaussian doublet.....	13
2.4 รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร ความถี่กว้างยิ่งยวด โดยทั่วไป.....	14
2.5 (ก) ขบวนการสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด.....	15
2.5 (ข) สเปกตรัมของขบวนการสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด .....	15
2.6 สเปกตรัมของขบวนการสัญญาณได้รับการ Dither โดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ไปข้างหน้าและ .....	16
2.7 กรอบสเปกตรัมที่กำหนดโดย FCC 15.517 (b c) สำหรับระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด ภายในอาคาร.....	16
3.1 สายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมบนแผ่นสะท้อน [13].....	27
3.2 สายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน [14] .....	27
3.3 โครงร่างของสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน ที่ใช้เซลล์แบบสามเหลี่ยม [15] .....	29
3.4 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก[16].....	30
3.5 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ใช้ตัวกระตุ้น โมโนโพลแผ่นระนาบ .....	31
3.6 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ ของสายอากาศที่ใช้ตัวกระตุ้น โมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด $A$ ที่ขนาดต่างๆ (เมื่อ $a = 50\text{mm}$ $b = 25\text{mm}$ และ $c = 25\text{mm}$ ) .....	32
3.7 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ ของสายอากาศที่ใช้ตัวกระตุ้น โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม เมื่อเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด $A$ ที่ขนาดต่างๆ (เมื่อ $a = 50\text{mm}$ $b = 25\text{mm}$ และ $c = 25\text{mm}$ ) .....	32
3.8 สายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิต .....	33
3.9 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	36
3.11 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีลวดทองแดง. 36	36
3.12 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีแท่งปรสิติและลวดทองแดง ผนังภายในด้านบน.....	36
3.13 สายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความกว้างยั้งยวดที่กระตุ้นใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	36
4.1 สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	39
4.2 แบนด์วิดท์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำ ที่ความยาว $c$ ต่างกัน เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วน $b/a$ (เมื่อ $a = 50\text{mm}$ และ $l = 25\text{mm}$ ).....	39
4.3 ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำของสัดส่วน $b/a$ ที่ขนาดต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วน $l/b$ (เมื่อ $a = 50\text{mm}$ และ $c = 15\text{mm}$ ) .....	40
4.4 ความถี่เรโซแนนซ์ด้านสูง (Upper resonant frequency) ของสัดส่วน $b/a$ ที่ขนาดต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วน $l/b$ (เมื่อ $a = 50\text{mm}$ และ $c = 15\text{mm}$ ).....	40
4.5 ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำและด้านสูง เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้าง $a$ (เมื่อ $b = 35\text{mm}$ และ $l = 0.62b = 21.7\text{mm}$ .).....	41
4.6 สายอากาศสองทิศทางวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นด้วย โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม .....	42
4.7 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $2r$ (เมื่อ $a = 40\text{mm}$ $b = 28\text{mm}$ และ $c = 15\text{mm}$ ) .....	42
4.8 สายอากาศสองทิศทางวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นด้วย โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีลวดทองแดง 43	43
4.9 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความยาว $L$ ของลวดทองแดง.....	44
4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของลวดทองแดง $L$ ....	46
4.11 สายอากาศสองทิศทาง โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีลวดทองแดงและแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	47
4.12 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง $h_1$ ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	47
4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง $h_1$ ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง $s_1$ ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	51
4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง $s_1$ ของการวางแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	53
4.16 สายอากาศสองทิศทางโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีลวดทองแดงและแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	54
4.17 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง $h_2$ ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	55
4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง $h_2$ ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	58
4.19 $ S_{11} $ เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง $s_2$ ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	59
4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง $s_2$ ของการวางแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม .....	61
4.21 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0^\circ$ ของสายอากาศที่นำเสนอ .....	62
4.22 อัตราการขยายเทียบกับความถี่ของสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดโดยใช้โครงสร้างปรสิติ.....	63
4.23 การจำลองสายอากาศที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ .....	64
4.24 สัญญาณอินพุตของสายอากาศใน โดเมนเชิงเวลา .....	65
4.25 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมยก .....	67
4.26 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมกวาด .....	69
4.27 สัญญาณอินพุตของสายอากาศใน โดเมนเชิงความถี่ .....	70
4.28 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆ ใน โดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมยก .....	71
4.29 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆ ใน โดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมกวาด.....	73
4.30 ตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมยก .....	74
4.31 ตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมกวาด.....	75
5.1 สายอากาศต้นแบบ.....	78
5.2 ผลการทดสอบและการจำลองค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศ.....	80
5.3 ผลการทดสอบและการจำลองอัตราการขยายของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการขออนุญาตใช้แล้ว มิฉะนั้นขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	82
5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบแม่เหล็ก ที่ความถี่ต่างๆ.....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

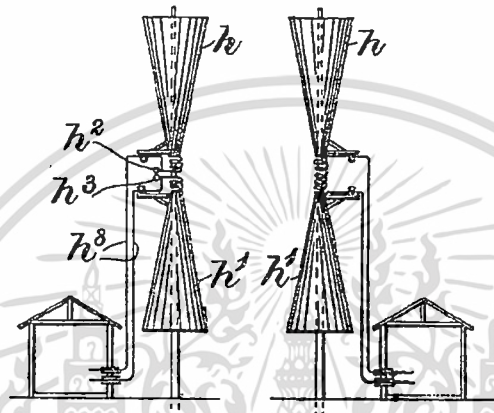
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์และความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีในด้านระบบสื่อสารโทรคมนาคม จัดได้ว่ามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ทั้งในปัจจุบันและในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดต่อสื่อสารในช่วงความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งมีใช้งานในระบบสื่อสารต่างๆ มากมาย เช่น ระบบสื่อสารดาวเทียม ระบบวิทยุสื่อสาร ระบบเรดาร์ งานด้านการแพทย์ ด้านทางการทหาร อีกทั้งยังนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านการศึกษา งานด้านสำรวจทรัพยากรและงานด้านธุรกิจ ดังนั้นในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายได้เพิ่มความสำคัญขึ้นเป็นลำดับ และในระบบสื่อสารไร้สายนั้น สายอากาศจัดได้ว่าอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่มีความสำคัญที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณระหว่างต้นทางกับปลายทาง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสายอากาศเพื่อประยุกต์ใช้งานให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้ เทคโนโลยีสายอากาศจึงได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงมิได้ ในขณะที่แนวโน้มเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันที่อยู่ในยุค 3G ที่กำลังผลักดันไปสู่ยุค 4G ซึ่งโครงข่ายทั้งหมดเป็นแบบ IP (All IP Networks) โดยข้อมูลที่รับส่งกันจะเป็นแบบแพ็คเกจเป็นหลักและเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายต่างๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน และสิ่งที่เกิดขึ้นในอนาคตจะต้องได้รับการผนวกเข้าด้วยกันเพื่อให้ระบบต่างๆ สามารถทำงานร่วมกันได้ เช่น Wide Area Networks (WANs) Wireless Area Networks (WLANs) Wireless Personal Area and Body Area Networks (WPANs and WBANs) รวมทั้งโครงข่าย Ad hoc ที่เชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสารไร้สายเข้าด้วยกัน

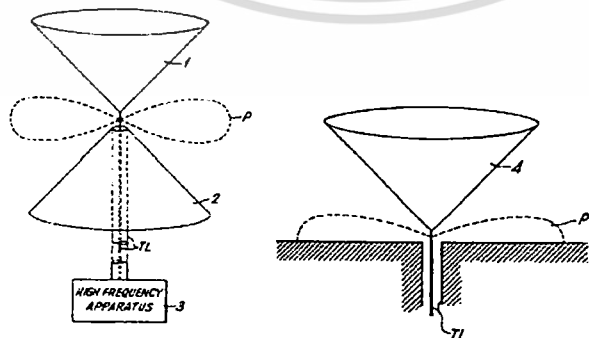
เมื่อเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายได้ผนวกเข้าด้วยกันแล้ว การให้บริการต่างๆ ก็จะมีลักษณะแบบยูบิควิตัส (Ubiquitous) และ ไคเวอร์ซิตี (Diversity) ผู้ใช้บริการสามารถใช้บริการได้ทุกหนทุกแห่งหรือเวลาใดก็ตาม โดยไม่ขึ้นกับระบบหรืออุปกรณ์โครงข่าย มีความยืดหยุ่นตามความต้องการของแต่ละผู้ใช้บริการที่แตกต่างกัน และสามารถรองรับความต้องการใช้งานอย่างหลากหลายในเวลาเดียวกันได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคิดค้นเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายใหม่ขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาในด้านต่างๆ เช่น การจัดการสเปกตรัม (Spectrum Management) และวิศวกรรมทางด้านระบบวิทยุ (Radio System Engineering) หนึ่งในเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายระยะใกล้ (Short Range Wireless Technology) ที่ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาคือ Ultra-Wideband Radio Technology (UWB-RT) ได้รับการพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือเทคโนโลยีวิทยุย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิธกว้างมาก ในความเป็นจริง ต้นกำเนิดของย่านความถี่กว้างยิ่งยวดนั้นมีมากกว่า 100 ปีแล้ว ในช่วงปลายคริสต์วรรษที่ 18 วิธีการกำเนิดสัญญาณไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือสัญญาณพัลส์สั้น (Short Pulse) ที่กำเนิดโดยการใช้ตัวกำเนิดสัญญาณแบบ Spark-Gap ดังตัวอย่างในการทดลองของ Hertz และ Marconi ในเรื่องการสื่อสารข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1] ในปี ค.ศ.1898 Oliver Lodge [2] ได้นำเสนอหลักการของระบบที่ทำให้เกิดเสียง โดยมีแนวคิดที่ว่าเครื่องส่งและเครื่องรับควรที่จะมีความถี่เหมือนกันเพื่อให้ได้สัญญาณที่รับได้มีค่ามากที่สุด ในรูปที่ 1.1 แสดงสายอากาศรูปทรงกรวยคู่ของ Lodge ซึ่งใช้ในการรับ-ส่ง โดยใช้หลักการพื้นฐานของสายอากาศโมโนโพลที่มีกราวด์เป็นพื้นโลก



รูปที่ 1.1 สายอากาศรูปทรงกรวยคู่ของ Lodge [2]

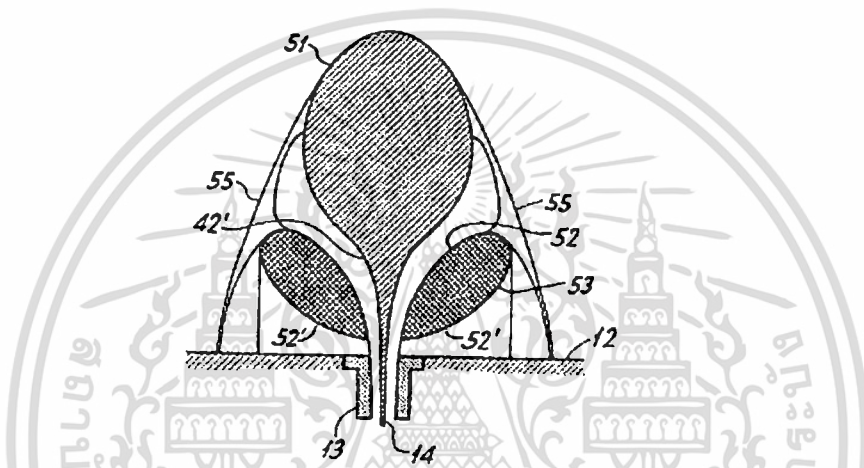
ในปี ค.ศ. 1939 Carter [3] ได้ทำการออกแบบสายอากาศที่มีช่วงความถี่กว้าง โดยลักษณะรูปทรงของสายอากาศจะเป็นแบบกรวยคู่และโมโนโพลทรงกรวย ดังแสดงในรูปที่ 1.2 รูปที่ 1.2 (ก) และ (ข) โดยสายอากาศทั้งสองจะถูกพัฒนามาจากสายอากาศรูปทรงกรวยของ Lodge โดยมีการกระตุ้นที่ตรงจุดยอดของกรวย



(ก) สายอากาศรูปทรงกรวยคู่ (ข) สายอากาศโมโนโพลรูปทรงกรวย

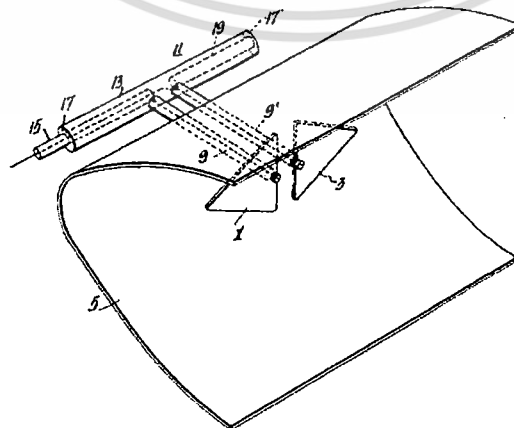
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศช่วงความถี่กว้างที่มีบทบาทมากในปี ค.ศ. 1914 คือสายอากาศ Cross-section ของ Lindenblad [4] ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดย Lindenblad มีแนวคิดเริ่มต้นมาจากไดโพลที่มีลักษณะเป็นท่อซึ่งทาง Radio Corporation of America (RCA) ได้นำสายอากาศตัวนี้มาทำการทดสอบในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ แนวคิดของทาง RCA มีอยู่ว่าในการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ จะต้องอยู่ภายใต้การควบคุมที่ศูนย์กลางเพียงเดียว โดยสายอากาศสามารถที่จะส่งสัญญาณวีดีโอหลายสัญญาณพร้อมๆกันในเวลาเดียวกันได้ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดในแนวคิดของทาง RCA ในการทดสอบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ สายอากาศจะวางอยู่บนยอดของตึก Empire State ในประเทศสหรัฐอเมริกา



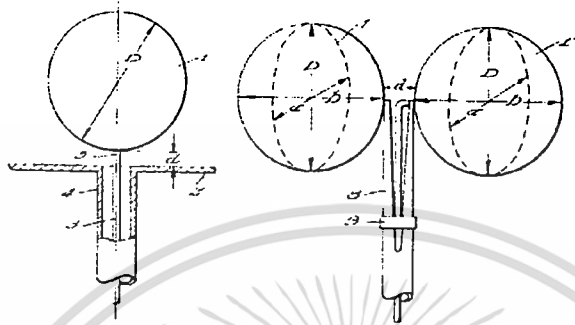
รูปที่ 1.3 สายอากาศ Cross-section ของ Lindenblad [4]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1947 Robert W. Master [5] ได้นำเสนอสายอากาศไดโพลรูปสามเหลี่ยมกลับกันหรือที่เรียกกันว่า “สายอากาศไดโพลรูปเพชร” ซึ่งใช้กับเครื่องรับโทรทัศน์ย่าน UHF โดยสายอากาศนี้จะให้คุณสมบัติที่มีช่วงความถี่กว้าง ลักษณะของสายอากาศไดโพลรูปเพชร ดังแสดงในรูปที่ 1.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 1.4 สายอากาศไดโพลรูปเพชรของ Master [5] ภาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

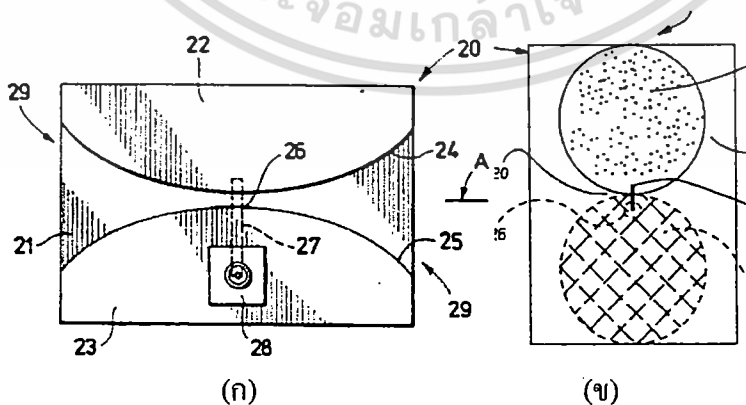
ในปี ค.ศ. 1968 Water Stohr [6] ได้นำเสนอสายอากาศอย่างง่ายอีกทั้งยังให้คุณสมบัติที่มีช่วงความถี่กว้างอีกด้วย คือสายอากาศไดโพลและโมโนโพลทรงกลม แสดงดังรูปที่ 1.5 (ก) และ (ข) ซึ่งข้อดีของสายอากาศแบบนี้ คือราคาถูก สร้างง่าย ง่ายต่อการสร้างสายอากาศแบบแถวลำดับ และการปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ



(ก) สายอากาศโมโนโพลทรงกลม (ข) สายอากาศไดโพลทรงกลม ของ Stohr

### รูปที่ 1.5 สายอากาศโมโนโพลทรงกลม [6]

ในปี ค.ศ. 1989 Farzin Lalezari และคณะ [7] ได้นำเสนอสายอากาศช่องปากชนิดแผ่นระนาบ แสดงดังในรูปที่ 1.6 (ก) สายอากาศนี้จะมีข้อจำกัดในเรื่องสมรรถนะของสายอากาศเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องที่ตรงปลายของ Taper การสะท้อนที่มาจากความไม่ต่อเนื่องนี้จะทำให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ทำได้ยาก ต่อมาในปี ค.ศ. 1994 Mike Thomas และคณะ[8] ได้นำเสนอสายอากาศที่มีความต่อเนื่องกันที่ตรง Taper คือสายอากาศไดโพลวงกลมชนิดแผ่นระนาบ สายอากาศชนิดนี้จะสามารถแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ดีกว่าเนื่องจากที่ตรง Taper มีความต่อเนื่อง ในรูปที่ 1.6 (ข) จะเป็นสายอากาศไดโพลวงกลมชนิดแผ่นระนาบของ Mike Thomas



รูปที่ 1.6 (ก) สายอากาศช่องปากชนิดแผ่นระนาบของ Farzin Lalezari และคณะ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (ข) สายอากาศไดโพลวงกลมชนิดแผ่นของ Mike Thomas และคณะ [8] ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาในปี ค.ศ.2002 ได้มีการออกรายงานฉบับแรกโดยหน่วยงาน FCC ซึ่งเป็นหน่วยงานอิสระของรัฐบาลสหรัฐอเมริกาที่รับผิดชอบด้านโทรคมนาคม ซึ่งกำหนดย่านความถี่ ตั้งแต่ 3.1 – 10.6 GHz [9] สำหรับนำไปใช้ในการสื่อสารข้อมูลและเรดาร์รวมทั้งอุปกรณ์รักษาความปลอดภัย และหลังจากนั้น การสื่อสารย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ได้มีการศึกษาวิจัยโดยวิธีการที่แตกต่างกัน โดยในเรื่องของ Time Hopping Impulse Radio เป็นหัวข้อแรกๆ ที่ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง [10],[11]

คุณสมบัติสำหรับสายอากาศนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามการใช้งานและระบบที่ต้องการ ซึ่งในการจัดประเภทสายอากาศนั้นสามารถที่จะหยาบๆ จุดเด่นในเรื่องของความถี่ในการทำงาน ลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิต ลักษณะการทำงาน วัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้าง และอื่นๆ การออกแบบสายอากาศนั้นอาจจะออกแบบให้มีโครงสร้างรูปทรงแบบสองมิติหรือสามมิติ มีคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) หรือแบบเจาะจงทิศทาง (Directional) สำหรับในระบบการสื่อสารความถี่กว้างยิ่งยวด มีสายอากาศจำนวนมากๆ ที่ได้มีการออกแบบรูปทรง ทดสอบใช้ในการเชื่อมต่อความ ของสายอากาศขึ้นมาได้ให้จัดได้ตามช่วงตำแหน่งของความถี่ปฏิบัติงาน โครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศตามรูปทรงทางเรขาคณิต ตลอดจนวัสดุของโครงสร้างสายอากาศและอื่นๆ ซึ่งในการออกแบบสายอากาศนั้นสามารถออกแบบโครงสร้างในรูปทรงแบบสองมิติ หรือ สามมิติ ที่ต้องการให้ได้คุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางหรือแบบเจาะจงทิศทาง ดังนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทของสายอากาศออกอย่างคร่าวๆ ได้ 4 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 1.1 [12]

ตารางที่ 1.1 ประเภทของสายอากาศตามลักษณะ โครงสร้างและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

	Directional Antenna	Omni-directional Antenna
Two-dimension	Vivaldi Antenna	
	Tapered Slot Antenna	Planar Dipole
	Log-periodic Antenna	Slot Antenna
	Planar Log-Spiral Antenna	Printed Antenna on PCB
	Conical Spiral Antenna	
Three-dimension		Loaded Cylindrical Dipole
	TEM Horn Antenna	Bi-conical Antenna
	Ridge Horn Antenna	Disc-cone Antenna
	Reflector Antenna	Roll Antenna

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพัฒนาสายอากาศเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งานในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นความต้องการในเรื่องต้นทุนในการสร้างที่มีราคาถูกรวมทั้งขนาดเล็กกะทัดรัด ซึ่งสายอากาศสำหรับย่านความถี่กว้างยิ่งยวดก็เป็นอีกชนิดที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก ทำการศึกษาและวิจัย ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น งานที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ได้มีมากกว่า 100 ปี โดยในช่วงเริ่มแรกสายอากาศเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบกรวยคู่ (Biconical Antenna) และสายอากาศไดโพลแบบทรงกลม (Spherical Dipole) ซึ่งให้คุณลักษณะแบนด์วิดท์ที่กว้าง และต่อมาการพัฒนาสายอากาศให้มีขนาดเล็กก็ได้รับความสนใจ จึงมีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทำการศึกษาและวิจัยสายอากาศให้มีขนาดเล็กและมีคุณลักษณะแบนด์วิดท์ที่กว้าง ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศแบบพิมพ์ (Printed Antenna) สายอากาศแบบร่อง (Slot Antenna) เป็นต้น ซึ่งโดยปกติสายอากาศย่านความถี่กว้างยิ่งยวดนั้น มีความต้องการที่จะให้ค่าอิมพีแดนซ์แมตซ์ (Impedance Matching) อัตราการขยาย (Gain) และทิศทาง (Direction) ครอบคลุมการใช้งานตลอดย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและวิจัยสายอากาศประเภทต่างๆ หลายรูปแบบ งานวิจัยสายอากาศที่มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Antenna) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย [13-14] ในขณะที่สายอากาศที่มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบเจาะจงทิศทาง (Directional Antenna) เริ่มได้รับความสนใจในการวิจัยเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นสายอากาศที่เหมาะสมนำไปใช้ในบางพื้นที่เฉพาะงานที่มีพื้นที่จำกัด มีลักษณะแนวยาวและแคบ เช่น ทางเดินระหว่างอาคาร บนทางด่วน บนถนน ทางรถไฟ และในอุโมงค์ เป็นต้น ซึ่งสายอากาศที่มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวหรือแบบสองทิศทางจะเหมาะสมกับการใช้งานมากกว่าแบบรอบทิศทางเนื่องจากความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นครอบคลุมพื้นที่ในทิศทางการกวาด ซึ่งเหมาะที่นำมาติดตั้งเป็นสายอากาศสถานีฐาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงและพัฒนาสายอากาศย่านความถี่กว้างยิ่งยวดจึงมีความจำเป็นมากขึ้น

ในการพัฒนาสายอากาศที่ตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดนั้น มีความต้องการที่จะให้ค่าอิมพีแดนซ์แมตซ์ อัตราการขยาย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) และทิศทาง (Direction) ครอบคลุมการใช้งานตลอดย่านความถี่กว้างยิ่งยวดตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz

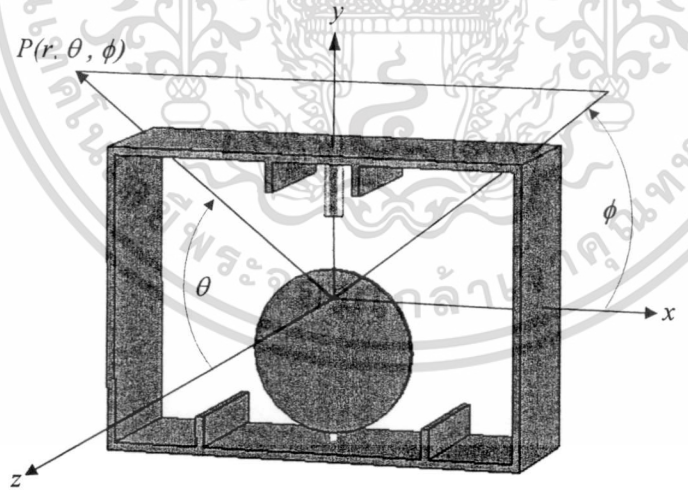
ปัญหาหนึ่งที่พบโดยส่วนใหญ่ คือเมื่อความถี่สูงขึ้น แบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดความเพี้ยนส่งผลทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่สมมาตร ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดการพัฒนาสายอากาศขึ้นมา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิท โดยใช้การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และได้ทำการทดสอบ คุณสมบัติ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายและอัตราการขยายตลอดย่านความถี่ โดยสายอากาศที่นำเสนอเป็นการประยุกต์หลักการเดิมของสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน [14-15] ซึ่งก็มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง และสายอากาศ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองทิศทางที่ใช้โพรบป้อนวงแหวนสี่เหลี่ยม [16] ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและ จากคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้กล่าวมา ได้นำมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อประยุกต์ใช้กับสายอากาศในย่านความถี่กว้างยิ่งยวด โดยมุ่งเน้นการพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ อันได้แก่ การปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ชอบความถี่ด้านสูงของช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิต

**1.1 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตของวิทยานิพนธ์**

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิต สำหรับระบบที่ต้องการลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยใช้โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม และโครงสร้างปรสิตซึ่งประกอบด้วยแท่งปรสิตและลวดทองแดงวางบริเวณผนังด้านในของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยจะกำหนดให้  $|S_{11}|$  มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางและมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นให้อยู่ทางด้านหน้าของสายอากาศทั้งสองด้าน ตลอดช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6 GHz



**รูปที่ 1.7** สายอากาศสองทิศทางช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิต

สายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ซึ่งได้อาศัยโปรแกรม CST Microwave Studio สำหรับช่วยในการจำลองการทำงานเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยพิจารณาจากผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นถึงการปรับปรุงปัญหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเพี้ยน ซึ่งทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความไม่สมมาตรของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ขอบความถี่ด้านสูงของช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด หรือปัญหาการยกขึ้นของลำคลื่น โดยใช้โครงสร้างของสายอากาศที่เป็นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีแท่งปรสิติและลวดทองแดงวางบริเวณผนังด้านในของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เป็นองค์ประกอบในการแก้ไขและใช้การกระตุ้นด้วยโมโน โพลแผ่นระนาบวงกลมกำหนดขอบเขตให้สายอากาศมี  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง และนอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆว่ามีความเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละมุมเป็นอย่างไร หลังจากนั้นทำการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำมาทดสอบและนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้องของค่า  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยาย กับผลที่ได้จากการจำลอง จากการศึกษาสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบและสร้างสายอากาศที่มีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางสำหรับช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดซึ่งเหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้งานในพื้นที่ที่มีลักษณะแนวเส้นตรง แนวยาว

### 1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาของปัญหาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ตลอดจนแนวความคิดและวิธีการในการพิจารณาสายอากาศ

บทที่ 2 เป็นการอธิบายทฤษฎี หลักการของสื่อสารความถี่กว้างยิ่งยวด โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของความถี่กว้างยิ่งยวดและหลักการของสายอากาศ ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 3 เป็นการอธิบายถึงวิวัฒนาการสายอากาศที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างของสายอากาศที่เคยมีมาก่อน และสายอากาศที่นำเสนอ หลักการในการออกแบบสายอากาศ

บทที่ 4 แสดงการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยพิจารณาจากค่า  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า -10 dB โดยอาศัยการจำลองผลจากโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งได้แสดงผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราการขยาย สัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลา (Time Domain) โดเมนเชิงความถี่ (Frequency Domain) ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ (Correlation Factor) ของสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิติ

บทที่ 5 แสดงผลการทดสอบสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิติ ซึ่งเป็นการนำผลของ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ และอัตราการขยาย ที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

บทที่ 6 เป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนวิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางในการพัฒนา เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการของการสื่อสารช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดหรือที่เรียกกันว่า ความถี่กว้างยิ่งยวด โดยจะเริ่มจากหลักการสื่อสารความถี่กว้างยิ่งยวด ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดมา ซึ่งกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของ ความถี่กว้างยิ่งยวด เช่น ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน และคุณสมบัติอื่นๆที่ทำให้การสื่อสารความถี่กว้างยิ่งยวดได้รับความสนใจ และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของสายอากาศ

#### 2.1 หลักการสื่อสารความถี่กว้างยิ่งยวด

ความถี่กว้างยิ่งยวดเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรูปแบบใหม่ ที่ใช้การส่งผ่านข้อมูลแบบพัลส์ (Pulse) สั้นๆ ผ่านคลื่นวิทยุกว้าง ต่างจาก การส่งผ่านข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุแบบระบบวิทยุแบบแถบความถี่แคบ (Narrowband) และ การส่งผ่านข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุแบบ Spread-Spectrum เช่น Bluetooth และ Wi-Fi ซึ่งทำให้สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าในระยะเวลาที่เท่ากัน ดังจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป เมื่อก้าวถึงพื้นฐานของสัญญาณพัลส์ในระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด โดยทั่วไปแล้วสัญญาณพัลส์ที่สั้นมากๆซึ่งเวลาของสัญญาณขึ้นและลงอย่างรวดเร็วจะมีสเปกตรัมกว้างและมีพลังงานที่ต่ำมาก จะเห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด ที่สั้นมากๆจะสามารถถูกรองไว้และยังพร้อมที่จะถูกแยกออกจากการสะท้อนของสัญญาณหลายเส้นทางที่ไม่ต้องการได้เพราะว่าความละเอียดทางเวลาที่ดี (Fine Time Resolution) ซึ่งจะนำไปสู่คุณลักษณะของการไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณหลายเส้นทาง ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด ทำให้สัญญาณแพร่กระจายคลื่นผ่านวัสดุอย่างเช่น อิฐหรือปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาคส่งและภาครับของ ความถี่กว้างยิ่งยวดไม่ต้องการส่วนประกอบที่ใหญ่และมีราคาแพงทำให้สามารถลดต้นทุน ขนาด น้ำหนักและการสิ้นเปลืองกำลังงานของระบบความถี่กว้างยิ่งยวด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบ โดยทั่วไป

##### 2.1.1 The FCC Report and Order

ในปี ค.ศ. 2002 FCC ได้ตีพิมพ์กฎของ ความถี่กว้างยิ่งยวด สำหรับนำไปใช้ในการสื่อสารข้อมูลและเรดาร์รวมทั้งอุปกรณ์รักษาความปลอดภัย โดย The FCC Report and Order จะเป็นตัวกำหนดพื้นฐานสำหรับกฎตามมาตรฐานของทาง FCC ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ดังนี้ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบนด์วิดท์ของ ความถี่กว้างยิ่งยวด : แแถบความถี่จะกำหนดขอบเขตโดยให้มีค่าเท่ากับ 10 dB ลงมาจากค่าที่มากที่สุดของกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น
- ความถี่กลางจะถูกกำหนดให้  $f_c = (f_H + f_L)/2$
- แบนด์วิดท์จะถูกกำหนดให้  $BW = 2(f_H - f_L)/(f_H + f_L)$  โดยแบนด์วิดท์ของ ความถี่กว้างยิ่งยวด จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz (ความถี่กว้างยิ่งยวด bandwidth  $\geq$  500 MHz)
- EIRP : Equivalent Isotropically Radiated Power เป็นตัวกำหนดกำลังงาน ไปยังสายอากาศ และอัตราการขยายของสายอากาศที่มีทิศทางจะมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไอโซทรอปิก
- สำหรับระบบภายในอาคารและระบบเคลื่อนที่ (ตัวอย่างเช่น Laptop Computer หรือ PDA) แบนด์วิดท์ของระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด ต้องอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz และต้องมีค่า EIRP เท่ากับ  $-43$  dBm

### 2.1.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน (Power Spectral Density)

โดยทั่วไปความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด จะพิจารณาให้มีค่าต่ำมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ทางการสื่อสาร ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (PSD) กำหนดให้เป็น [17]

$$PSD = \frac{P}{B} \quad (2.1)$$

โดยที่  $P$  เป็นกำลังงานส่งมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) และ  $B$  เป็นแบนด์วิดท์ของสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิร์ตซ์ (Hz) ส่วนความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานจะมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเฮิร์ตซ์ (W/Hz)

ที่ผ่านมามพบว่า การสื่อสารไร้สายจะมีใช้เฉพาะช่วงความถี่แคบซึ่งจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่สูงหรือจะกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เนื่องจากเรารู้ว่าความถี่และเวลาจะเป็นสัดส่วนที่ตรงข้ามกัน (Inversely Proportional) ระบบสัญญาณ ไซนูซอยด์จะมี  $B$  แคบและระยะเวลา ( $t$ ) นาน สำหรับระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด แล้วสัญญาณพัลส์จะมีเวลา  $t$  สั้น และช่วงความถี่  $B$  ที่กว้างมาก เพื่อให้เห็นความแตกต่างของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบแบบต่างๆ ดังนั้นตารางที่ 2.1 จะแสดงค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารไร้สายแบบต่างๆ จะเห็นได้ว่ากำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณและแบนด์วิดท์ที่ได้รับในระบบสื่อสารไร้สายแบบต่างๆ เป็นอย่างไร การเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบความหนาแน่นกำลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูงจะแสดงในรูปที่ 2.1 ปริมาณกำลังงานทั้งหมด

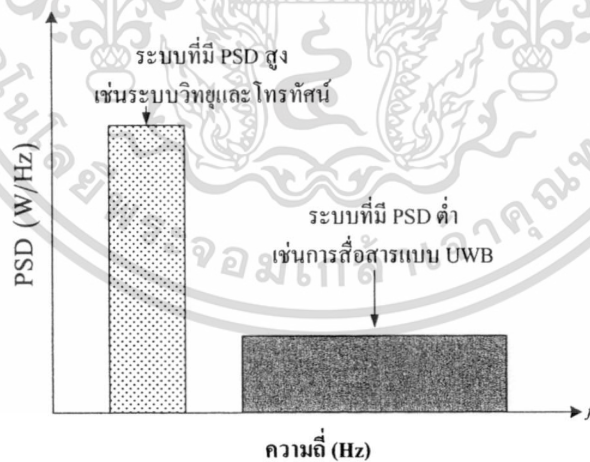
สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความถี่และความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน ระโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารแบบไร้สายแบบต่างๆ

ระบบ	กำลังงานส่ง (W)	แบนด์วิดธ์ (Hz)	ความหนาแน่น กำลังงาน (W/Hz)	ประเภทของช่วง ความถี่
วิทยุ	50 kW	75 kHz	666,600	ช่วงแคบ
โทรทัศน์	100 kW	6 MHz	16,700	ช่วงแคบ
เซลลูลาร์ 2G	10 mW	8.33 kHz	1.2	ช่วงแคบ
802.11a	1 W	20 MHz	0.05	ช่วงกว้าง
ความถี่กว้าง ยิ่งยวด	1 mW	7.5 GHz	0.013	ช่วงกว้างยิ่งยวด

สำหรับระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำมาก ประโยชน์ของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำคือความน่าจะเป็นในการตรวจจับสัญญาณได้ต่ำ (Low Probability of Detection) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจการประยุกต์ใช้ในทางทหาร ยกตัวอย่างเช่น การแปลงทางด้านการสื่อสารและเรดาร์ นอกจากนี้ยังจะเกี่ยวข้องกับการประยุกต์การใช้งานในระบบไร้สายที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูลสูง



รูปที่ 2.1 ระบบความหนาแน่นกำลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูง

### 2.1.3 รูปร่างสัญญาณพัลส์ (Pulse Shape)

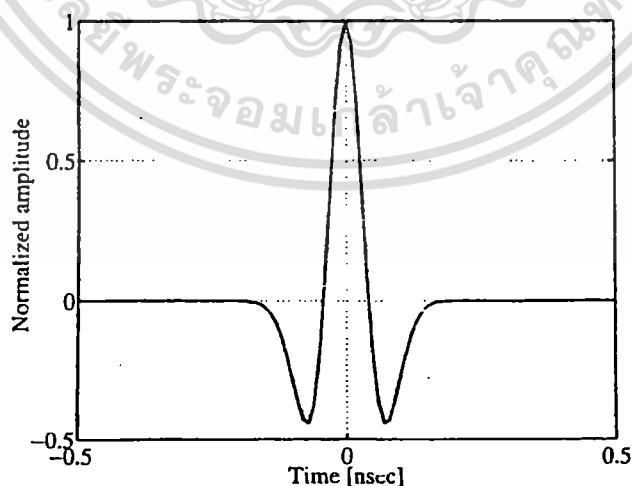
รูปร่างสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด ที่รับได้โดยทั่วไปบางทีอาจจะเรียกว่า Gaussian Doublet แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 สัญญาณพัลส์ดังกล่าวมักจะนำมาใช้ในระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด เพราะว่ามีรูปร่างที่ง่ายต่อการสร้าง โดยจะสร้างเป็นสัญญาณพัลส์ที่เหลื่อมกันจตุรัสจากเวลาสัญญาณ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัลส์ขึ้นและลงที่จำกัดและผลของการกรองสัญญาณของสายอากาศส่งและรับจึงทำให้รูปร่างสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด ที่รับ ได้จึงเป็นสัญญาณในรูปที่ 2.2 สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถสร้างขึ้นอย่างง่ายโดยการสวิตซ์การเปิดปิดตัวทรานซิสเตอร์อย่างรวดเร็ว

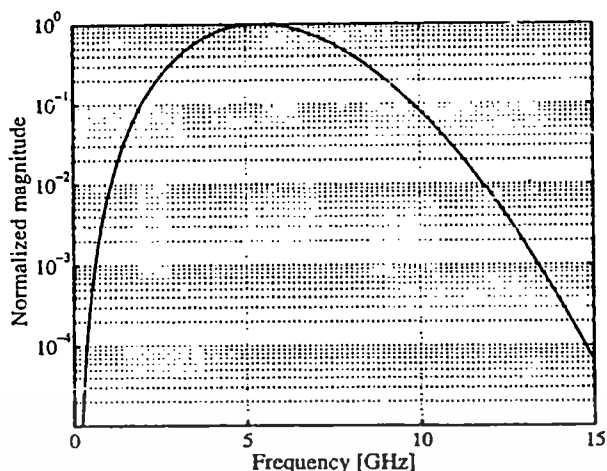
รูปแบบการสร้างสัญญาณอย่างง่ายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งทำให้เห็นถึงการเกิด Gaussian Doublet ที่ภาคส่ง ผลกระทบของสายอากาศและ ภาครับ จากรูปที่ 2.4 (ก) สัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด จะอยู่ในระดับนาโนวินาทีหรือพิโควินาที การสวิตซ์เปิดปิดอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ไม่ได้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมๆ ที่ถูกทำให้ราบลง รูปร่างสัญญาณพัลส์จะมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งของฟังก์ชันแบบเกาส์ สำหรับฟังก์ชันแบบเกาส์  $G(x)$  สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-x^2/\sqrt{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

โดยที่สมการที่ 2.2 จะสมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยศูนย์ (Zero Mean) จึงเป็นที่มาของคำว่าสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ (Gaussian Pulse) วงเดี่ยว (Monocycle) หรือ Doublet วงจรอย่างง่ายสำหรับการสร้าง Gaussian Doublet สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 การส่งสัญญาณพัลส์โดยตรงไปยังสายอากาศทำให้สัญญาณพัลส์ถูกกรองเนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศนั่นเอง การกรองนี้สามารถจำลองโดยการหาอนุพันธ์ [30] จะมีการกรองแบบเดียวกันนี้ที่สายอากาศรับด้วย ในที่นี้จะจำลองให้เวลาของสัญญาณถูกเลื่อนออกไปและสมมติให้สัญญาณพัลส์ถูกขยายที่ภาครับ

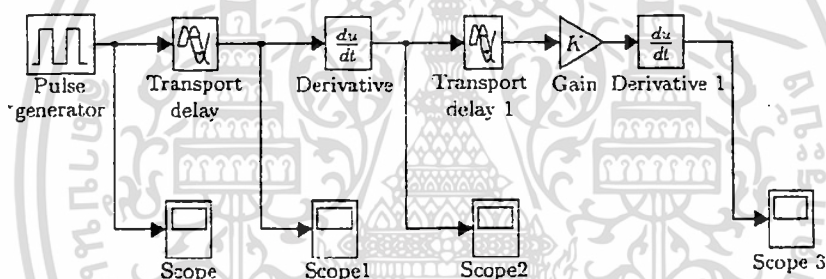


(ก)



(จ)

รูปที่ 2.2 (ก) รูปร่างสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด ที่รับได้เชิงอุดมคติ ( $w_{rx}$ ) และ (จ) สเปกตรัมเชิงอุดมคติของสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด เดียวที่รับได้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองวงจรใน โปรแกรม MATLAB อย่างง่ายเพื่อจะสร้าง Gaussian doublet

ซึ่งรูปร่างสัญญาณพัลส์ที่รับได้ในเชิงอุดมคติ ( $p_{rx}$ ) สามารถเขียนได้เป็น

$$p_{rx} = \left[ 1 - 4\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] e^{-2\pi(t/\tau_m)^2} \quad (2.3)$$

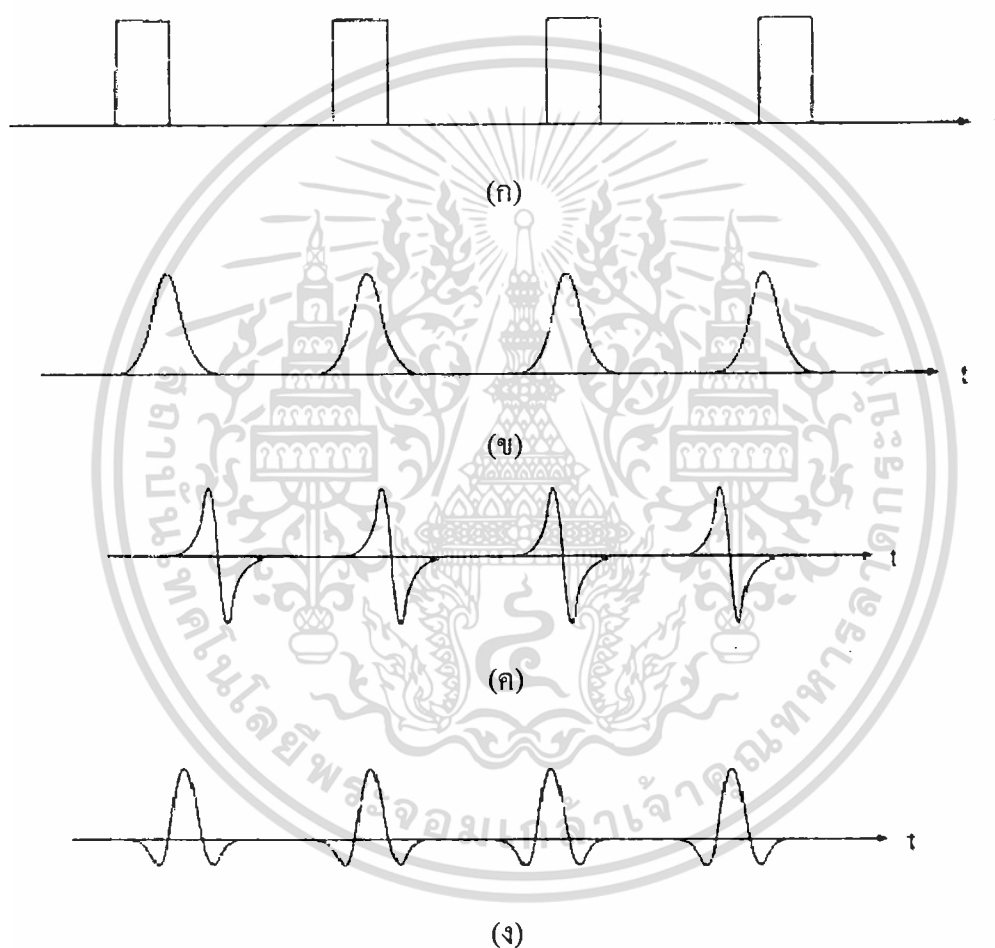
ซึ่งเป็นสมการที่นำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 2.2 (ก) ในที่นี้  $\tau_m$  จะสมมติให้มีค่าเท่ากับ 0.15 น่าจะกล่าวได้ว่า  $\tau_m$  เป็นพารามิเตอร์ตัวเดียวของสมการที่ 2.3 และสามารถกำหนดคุณลักษณะทางเวลาและความถี่ของ Gaussian Doublet ให้มีรูปแบบไม่ซ้ำกัน

สเปกตรัมของ Gaussian Doublet สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 (จ) ความถี่กลาง (Center Frequency) สามารถประมาณจากรูปได้อยู่ที่ 5 GHz และมีช่วงความถี่ 3 dB (Magnitude  $\geq 10^{-3}$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครอบคลุมความถี่หลาย GHz เมื่อเปรียบเทียบระบบสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบหรือแม้แต่ช่วงความถี่กว้างเองก็ตามจะเห็นได้ว่าระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด จะมีช่วงความถี่ที่กว้างมากจึงเป็นที่มาของชื่อ ความถี่กว้างยิ่งยวด

### 2.1.4 ขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse Train)

สัญญาณพัลส์อันเดียวนั้นไม่สามารถจะสื่อสารข้อมูลจำนวนมากได้ ดังนั้นข้อมูลจึงจำเป็นต้องจะผ่านการมอดูเลตกับลำดับของสัญญาณพัลส์ที่เรียกว่าขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse Train)

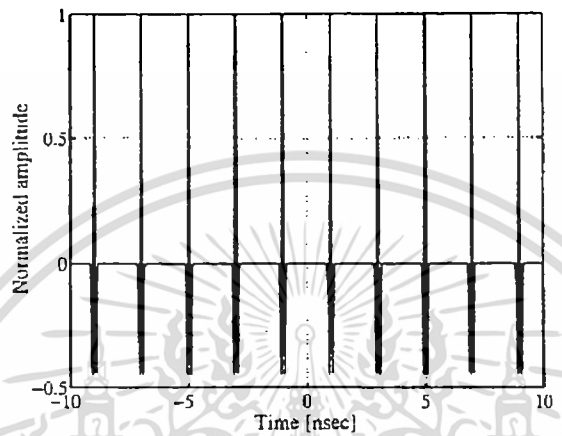


รูปที่ 2.4 รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร ความถี่กว้างยิ่งยวด โดยทั่วไป

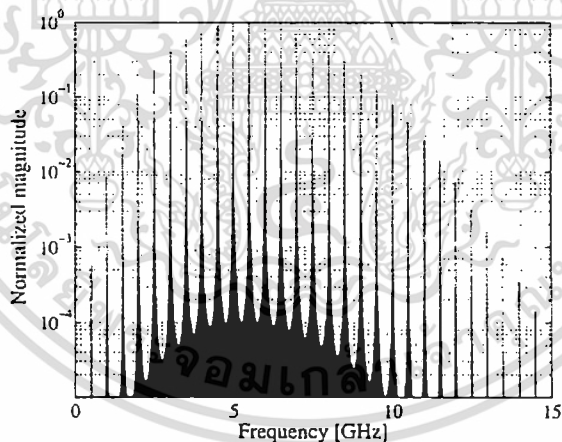
- (ก) ขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse Train)
- (ข) สัญญาณพัลส์แบบเหมือน Gaussian (Gaussian-like Pulse)
- (ค) สัญญาณพัลส์อนุพันธ์ครั้งที่ 1 (First-derivative Pulses)
- (ง) Gaussian Doublet ที่รับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ไปจะมีช่องว่างเวลาระหว่างสัญญาณที่มีเป็นระยะ บางที่จะเรียกว่า อัตราการส่งสัญญาณพัลส์ซ้ำ (Pulse Repetition) หรือรอบการทำงาน (Duty Cycle) ซึ่งจะทำให้ สเปกตรัมของสัญญาณประกอบไปด้วยยอดสูงสุดของกำลังงานที่ความถี่ที่แน่นอน ความถี่เหล่านี้ จะเป็นส่วนกลับของอัตราการส่งสัญญาณพัลส์ซ้ำและเส้นยอดสูงสุดของกำลังงานเหล่านี้จะเรียกว่า ซีทีวี (Comb Lines) เนื่องจากมีลักษณะเหมือนกับหวี ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก)



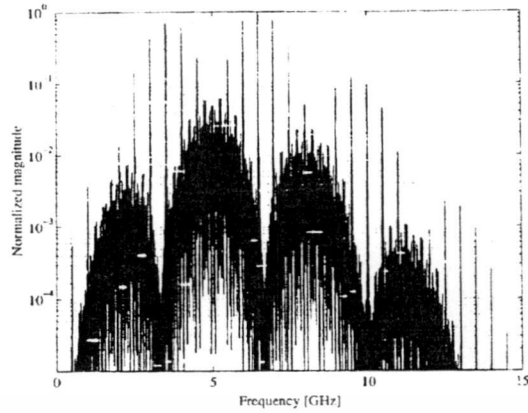
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) ขบวนสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด และ (ข) สเปกตรัมของขบวนสัญญาณพัลส์ ความถี่กว้างยิ่งยวด

ยอดสูงสุดเหล่านี้จะจำกัดกำลังส่งรวมทั้งหมดที่ไม่ต้องการได้ วิธีหนึ่งก็คือ Dither สัญญาณ โดยการเพิ่มตำแหน่ง Offset สั้นๆแบบสุ่มไปในสัญญาณพัลส์แต่ละสัญญาณ สเปกตรัมที่เป็นผลมาจาก Offset แบบสุ่มจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



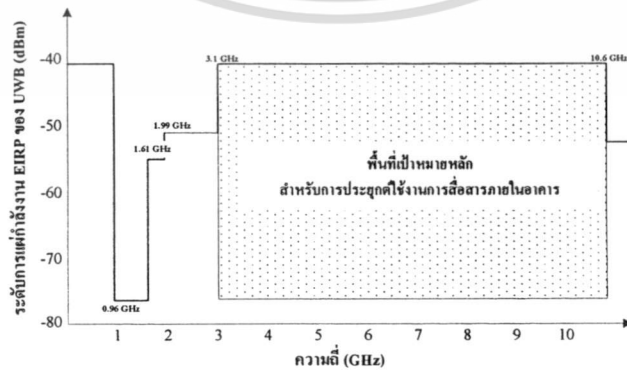
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของขบวนสัญญาณได้รับการ Dither โดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ไปข้างหน้าและไปข้างหลังของตำแหน่งเดิม

### 2.1.5 กรอบสเปกตรัม (Spectral Masks)

สเปกตรัมของสัญญาณ ความถี่กว้างยิ่งยวด เป็นหนึ่งในประเด็นหลักที่ต้องผ่านการพิจารณาทั้งทางด้านภาคอุตสาหกรรมและรัฐบาลเพื่อให้สามารถนำ ความถี่กว้างยิ่งยวด ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งเรื่องสเปกตรัมถือว่าเป็นหัวใจหลักของเทคโนโลยี ความถี่กว้างยิ่งยวด

การสื่อสารทางวิทยุทั้งหมดจะอยู่ภายใต้กฎหมายที่แตกต่างกันและข้อกำหนดเกี่ยวกับเอาต์พุตของกำลังงานในช่วงความถี่ใดช่วงความถี่หนึ่ง เพื่อจะป้องกันการแทรกสอดไปยังผู้ใช้อื่นที่ใช้ช่วงความถี่ใกล้เคียงกันหรือความถี่เดียวกัน

ระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด จะครอบคลุมสเปกตรัมที่กว้างมากและสามารถแทรกสอดกับผู้ใช้ที่มีอยู่แล้ว เพื่อให้การแทรกสอดเหล่านั้นมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นทาง FCC และองค์กรต่างๆจึงจำเป็นต้องระบุกรอบของสเปกตรัมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆซึ่งจะแสดงเอาต์พุตกำลังงานที่อนุญาตให้ใช้สำหรับความถี่ที่ได้ระบุไว้



รูปที่ 2.7 กรอบสเปกตรัมที่กำหนดโดย FCC 15.517 (b c) สำหรับระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด ภายในเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างของกรอบสเปกตรัมที่ FCC กำหนดไว้สำหรับระบบ ความถี่ กว้างยิ่งยวด ภายในอาคาร ซึ่งกำหนดให้ใช้งานได้ในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6GHz โดยที่จะต้องมีความถี่พัสดุกำลังงานมากที่สุดเท่ากับ -41.3 dBm/MHz

เหตุผลหลักสำหรับเอาต์พุตกำลังงานที่อนุญาตในช่วงความถี่ 0.96 ถึง 1.61GHz มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากแรงกีดกันจากกลุ่มที่เป็นตัวแทนของผู้ให้บริการที่มีอยู่แล้ว อย่างเช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System : GPS) และกลุ่มที่ใช้งานทางการทหาร

### 2.1.6 ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม (Spatial and Spectral Capacities)

คุณสมบัติพื้นฐานของระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด อีกอย่างก็คือมีความจุทางตำแหน่งที่สูง (Spatial Capacity) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อตารางเมตร (bps/m<sup>2</sup>) [18] ความจุทางตำแหน่งสามารถคำนวณได้เป็นอัตราข้อมูลสูงสุด (Maximum Aata Rate) ของระบบหารด้วยพื้นที่ที่ครอบคลุมการส่งของระบบ พื้นที่ในการส่ง (Transmission Area) สามารถคำนวณจากพื้นที่วงกลมที่สมมติให้ตัวส่งอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลาง โดยความจุทางตำแหน่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความจุทางตำแหน่ง (bps/m}^2\text{)} = \text{อัตราข้อมูลมากที่สุด (bps)} / \text{พื้นที่ในการส่ง (m}^2\text{)} \quad (2.4)$$

$$\text{พื้นที่ในการส่ง (m}^2\text{)} = \pi \times (\text{ระยะทางในการส่ง (Transmission Distance)})^2 \quad (2.5)$$

สำหรับระบบช่วงความถี่แคบการวัดความจุที่นิยมมากที่สุดก็คือ ความจุทางสเปกตรัม (Spectral Capacity) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ (bps/Hz) ก็เพราะสเปกตรัมเป็นแหล่งทรัพยากรที่ถูกจำกัดมากที่สุด โดยทั่วไปกำลังงานจะถูกจำกัดโดยเหตุผลทางความปลอดภัยและในเชิงพาณิชย์อย่างเช่น อายุของแบตเตอรี่ของอุปกรณ์แบบเคลื่อนที่ ความจุทางสเปกตรัมสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{ความจุทางสเปกตรัม (bps/Hz)} = \text{อัตราข้อมูลมากที่สุด (bps)} / \text{แบนด์วิดธ์ (Hz)} \quad (2.6)$$

สำหรับระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด ที่ทำงานในสเปกตรัมของระบบอื่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกำลังงานที่ต่ำมาก ๆ เป็นการชดเชยสำหรับการใช้งานที่มีช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด ตามปกติแล้วระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด จะมีความจุทางสเปกตรัมที่ต่ำเมื่อเทียบระบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความจุทางตำแหน่งกันแล้ว ระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดัง

แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ

ระบบ	อัตราส่งมากที่สุด (Mbps)	ระยะการส่ง (m)	ความจุทางตำแหน่ง (kbps/m <sup>2</sup> )	ความจุทางสเปกตรัม (bps/Hz)
ความถี่กว้างยิ่งยวด	100	10	318.3	0.013
IEEE802.11a	54	50	6.9	2.7
Bluetooth	1	10	3.2	0.012
IEEE802.11b	11	100	0.350	0.1317

### 2.1.7 ความเร็วของการส่งข้อมูล (Data Rate)

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบของอัตราบิตของ ความถี่กว้างยิ่งยวด กับมาตรฐานของระบบไร้สายและไร้สายอื่น

ความเร็ว (Mbps)	มาตรฐาน
480	ความถี่กว้างยิ่งยวด และ USB 2.0
200	ความถี่กว้างยิ่งยวด (ระยะที่น้อยที่สุด 4 เมตร) และ 1394a (4.5 m)
110	ความถี่กว้างยิ่งยวด (ระยะที่น้อยที่สุด 10 เมตร)
90	อีเทอร์เน็ตความเร็วสูง (Fast Ethernet)
54	802.11a
20	802.11g
11	802.11b
10	อีเทอร์เน็ต
1	Bluetooth

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของการส่ง ความถี่กว้างยิ่งยวด สำหรับการสื่อสารก็คือ อัตราข้อมูลที่สูง การประยุกต์ใช้งานในทางการสื่อสาร ความถี่กว้างยิ่งยวด มีเป้าหมายความเร็วการส่งข้อมูลอยู่ในช่วง 100 Mbps ถึง 500 Mbps [19] ซึ่งจะมากกว่าความเร็วของการส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบอื่น ไม่ว่าจะเป็นระบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bluetooth 100 ถึง 500 เท่า และประมาณ 50 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของการส่งข้อมูลของมาตรฐาน 802.11b หรือ 10 เท่าของมาตรฐาน 802.11 a WLAN

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าอัตราข้อมูลสำหรับการส่ง ความถี่กว้างยิ่งยวด ไร้สายภายในอาคารจะอยู่ระหว่าง 110 Mbps และ 480 Mbps และเปรียบเทียบกับมาตรฐานแบบใช้สายและไร้สายในปัจจุบัน ในความจริงแล้ว ความเร็วของการส่งจะถูกกำหนดมาตรฐานไว้ที่ 3 ความเร็ว ดังนี้

- 110 Mbps สำหรับระยะการส่งที่เท่ากับ 10 m หรือมากกว่า
- 200 Mbps สำหรับระยะการส่งที่เท่ากับ 4 m หรือมากกว่าแต่ไม่เกิน 10 m
- 480 Mbps สำหรับการส่งระยะ ใกล้ที่ไม่เกินระยะเท่ากับ 4 m

### 2.1.8 การบริโภคกำลังงาน (Power Consumption)

ด้วยการออกแบบทางวิศวกรรมที่เหมาะสมทำให้การสูญเสียกำลังงานของ ความถี่กว้างยิ่งยวด มีค่าที่ต่ำ ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีใดก็ตาม ต่างก็คาดหวังว่ามีการบริโภคกำลังงานที่ลดลง และมีวงจรที่มีประสิทธิภาพรวมทั้งสามารถประมวลผลสัญญาณได้มากขึ้นบนชิพขนาดเล็ที่ใช้แรงดันในการทำงานต่ำ

ในปัจจุบันได้ตั้งเป้าหมายสำหรับการบริโภคกำลังงานของชิพเซต ความถี่กว้างยิ่งยวด ให้น้อยกว่า 100 mW ส่วนตารางที่ 2.4 จะแสดงค่าการบริโภคกำลังงานของชิพเซตที่มีใช้กันในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.4 การบริโภคกำลังงานของชิพเซต ความถี่กว้างยิ่งยวด และชิพเซตการสื่อสารเคลื่อนที่แบบต่างๆ

ชิพเซตตามการประยุกต์ใช้งาน	การบริโภคกำลังงาน (mW)
802.11a	1500-2000
400 Mbps 1394 LSI	700
โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ RISC 32-bit MPU	200
ตัวแปลง A/D ของกล้องดิจิทัล 12-bit	150
ความถี่กว้างยิ่งยวด (เป้าหมาย)	100
โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบหน้าจอสี TFT	75
ตัวถอดรหัส MPEG-4 LSI	50
โทรศัพท์เคลื่อนที่เข้ารหัสเสียง LSI	19

### 2.1.9 ราคา (Cost)

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของเทคโนโลยี ความถี่กว้างยิ่งยวด ก็คือเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากระบบ ความถี่กว้างยิ่งยวด สามารถสร้างขึ้นจากส่วนประกอบที่เป็นแบบดิจิทัลเกือบทั้งหมด โดยมีส่วนประกอบทางด้านความถี่วิทยุ (RF) หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไมโครเวฟน้อยที่สุด ส่วนประกอบของระบบที่น้อยจะนำไปสู่การลดลงของต้นทุน ภาคส่ง ความถี่กว้างยิ่งยวด ที่ง่ายที่สุดจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดพัลส์ วงจรทางเวลาและตัวสายอากาศ อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการอัตราข้อมูลที่สูงกว่าก็จำเป็นที่จะใช้วงจรทางเวลาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้สามารถเข้าถึงได้หลายรูปแบบจึงจำเป็นที่ต้องเพิ่มในส่วนนี้เข้าไป ซึ่งก็ทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นไปด้วย ยิ่งไปกว่านั้นราคาของชิปเซตก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของการผลิตอย่างมาก

### 2.1.10 ขนาด (Size)

ขนาดที่เล็กของภาคส่ง ความถี่กว้างยิ่งยวด เป็นความต้องการที่จะรวมเข้าไปกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้กันในปัจจุบัน ในกลุ่มทำงานของมาตรฐาน 802.15 บริษัทอิเล็กทรอนิกส์ได้กำหนดเป้าหมายขนาดของวงจรไร้สายให้มีขนาดเล็กพอที่จะนำไปบรรจุลงในตัวเก็บข้อมูลแบบ SD

เหตุผลหลักที่ต้องการให้ภาคส่งและรับของ ความถี่กว้างยิ่งยวด มีขนาดเล็กเนื่องจากการลดลงของส่วนประกอบแบบพาสซีฟ (Passive) อย่างไรก็ตาม ขนาดและรูปร่างของสายอากาศ ก็เป็นตัวประกอบที่จำเป็นต้องพิจารณาเช่นเดียวกัน

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการสื่อสารซึ่งใช้ในการรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานต่างๆของสายอากาศ ตัวอย่างเช่น ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ และอัตรการขยายของสายอากาศ ฯลฯ

### 2.2.1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อน (SWR and Reflected Power)

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio :SWR) เป็นตัวบ่งบอกว่าการแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีแค่ไหนและเป็นตัวบ่งบอกว่าคุณสมบัติจะถูกสะท้อนกลับก่อนที่จะแพร่กระจายคลื่น โดยสายอากาศมากแค่ไหน ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อนมีแนวทางในการวัดที่ต่างกัน ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่า 2:1 หรือน้อยกว่าจะถูกพิจารณาว่าดี อย่างไรก็ตามสายอากาศในทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณใหญ่จะถูกกำหนดให้มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ 1.5:1 หรือน้อยกว่าในบางแบนด์วิดท์ สมมติว่ากำลังงาน 100 วัตต์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่า 1.5:1 จะมีกำลังงานที่สามารถส่งผ่านได้เท่ากับ 96 วัตต์ และกำลังงานที่ถูกสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ หรือมีกำลังงานที่ถูกสะท้อนกลับเท่ากับ 4.2% ของกำลังงานที่สามารถส่งผ่านได้

### 2.2.2 อัตราการขยาย (Gain)

อัตราการขยาย ของสายอากาศนั้น เป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากค่าสภาพเจาะจง โดยการรวมเอาประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงแสดงคุณสมบัติในการที่ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น การคิดอัตราขยายของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศ คือ กำลังสองของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มของสนามที่มากที่สุดเช่นเดียวกับของสายอากาศอ้างอิงหรืออาจจะแสดงในรูปของอัตราส่วนของกำลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มของสนามขนาดเท่ากัน ณ จุดเดียวกันในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดหรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด  $\lambda/2$  หรือแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ซึ่งมีการกระจายคลื่นได้รอบทิศทางในปริมาณที่เท่ากัน

กำลังอัตราขยาย (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้โดยทั่วไปแล้วจะคิดกำลังอัตราขยายในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด

$$\text{Gain} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.7)$$

โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของกำลังขยายในทิศทางที่กำหนดให้ต่อกำลังอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source) ที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $P_{in}$  คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด ( $P_{rad}$ ) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ ( $P_{in}$ ) ดังสมการ

$$P_{rad} = e_i P_{in} \quad (2.9)$$

เมื่อ คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ(ไม่มีหน่วย) ทำให้สมการที่ (2.8) และ (2.9) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (2.10)$$

และมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_i D_g(\theta, \phi) \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ

$$\begin{aligned} G_o &= G_g(\theta, \phi) |_{\max} \\ &= e_i D_g(\theta, \phi) |_{\max} \\ &= e_i D_o \end{aligned} \quad (2.12)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะมีค่าเป็น

$$G_o \cong \frac{30,000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อก้าวถึงอัตราขยายจะหมายถึง กำลังอัตราขยายที่มีค่าสูงสุดแสดงได้ดังนี้

$$G_o(dB) = 10 \log_{10} e[e_i D_o] \quad (2.14)$$

### 2.2.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

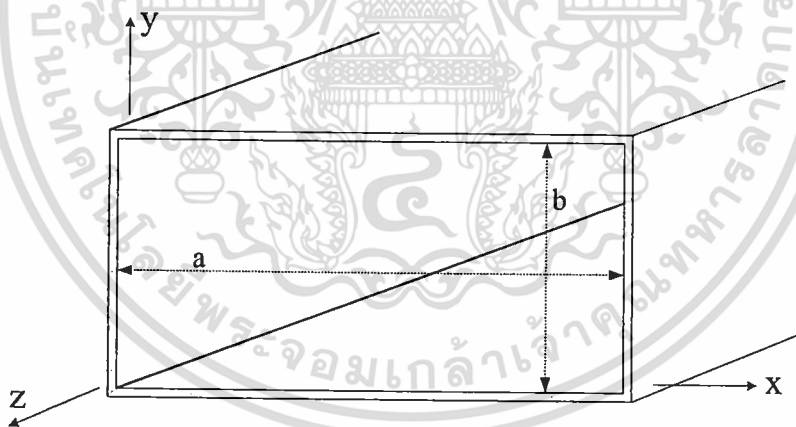
ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นการอธิบายความสามารถของสายอากาศในทิศทางที่เจาะจง อัตราขยายของสายอากาศมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทางกันอย่างใกล้ชิดสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Gain} = \eta \times \text{Directivity} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\eta$  เป็นค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ เราสามารถเห็นพฤติกรรมของค่าสภาพเจาะงทิสทางที่เพิ่มขึ้น โดยการเปรียบเทียบแสงของหลอดไฟกับแสงสปอตไลท์ โดยแสงสปอตไลท์ 100 วัตต์ จะให้แสงในทิศทางที่เจาะงมากกว่าแสงของหลอดไฟ 100 วัตต์ ซึ่งสามารถพูดได้ว่าแสงสปอตไลท์มีค่าสภาพเจาะงทิสทางที่มากกว่าแสงของหลอดไฟ สำหรับอัตราการขยายของสายอากาศจะถูกอ้างอิงกับสายอากาศมาตรฐาน สายอากาศที่ถูกอ้างอิงคือสายอากาศไอโซทรอปิกและสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นเรโซแนนซ์ โดยสายอากาศไอโซทรอปิกจะมีการแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทางเท่ากันหมด สายอากาศไอโซทรอปิกเป็นสายอากาศในทางอุดมคติซึ่งไม่มีอยู่จริงแต่มีประโยชน์ในการนำมาเปรียบเทียบหรืออ้างอิงกับสายอากาศที่มีอยู่จริง สมมติว่าสายอากาศมีอัตราการขยายเป็น 2 หรือเท่ากับ 3 dB เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิกจะสามารถเขียนได้เป็น 3 dBi สำหรับสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นเรโซแนนซ์มีประโยชน์สำหรับนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศอื่น ๆ ที่มีความถี่เดียวหรือมีแถบของความถี่ที่แคบมากๆ สมมติว่าสายอากาศมีอัตราการขยายเป็น 1 หรือเท่ากับ 0 dB เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลจะสามารถเขียนได้เป็น 0 dBd

### 2.3 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Waveguide)



รูปที่ 2.8 ลักษณะของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงเรื่องราวเกี่ยวกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพารามิเตอร์ที่น่าสนใจก็คือโหมดต่างๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและความถี่ตัด ความยาวคลื่นภายในท่อนำคลื่น และองค์ประกอบอื่นๆ โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างที่เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะใช้ระบบพิกัดมุมฉากในการวิเคราะห์ ซึ่งรูปร่างของสนามจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างเหล่านั้น โดยต้องเป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์หรือสมการคลื่นและเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดหน้าตัด  $a \times b$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยเริ่มต้นจะสมมติให้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวเป็นอนันต์และภายในท่อนำคลื่นปราศจากสิ่งใดๆ เพื่อที่จะหาโหมดต่างๆที่อยู่ภายในท่อนำคลื่น การอธิบายที่เหมาะสมสำหรับส่วนตัดขวางสี่เหลี่ยมมุมฉากสามารถจะได้รับการจาก

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} & E_y &= -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ H_x &= -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{j\omega\varepsilon}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} & H_y &= -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{j\omega\varepsilon}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $h^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu\varepsilon = A^2 + B^2$  มีความเป็นไปได้ของสนามไฟฟ้า (TE) และแม่เหล็ก (TM) ที่หลากหลาย (2.16) ซึ่งความสนใจจะอยู่ที่การจัดการได้ง่ายในทางคณิตศาสตร์ 2 รูปแบบคือรูปแบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง TE ในทิศทาง  $E_z = 0$  และรูปแบบสนามแม่เหล็กตัดขวาง TM ในทิศทาง  $H_z = 0$  ทุกๆความเป็นไปได้ของคำตอบสามารถจะจำแนกจากการรวมกันเป็นเชิงเส้นของสนาม TE และ TM ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาแต่ละกรณีแยกจากกันได้ ผลลัพธ์ที่สำคัญ 3 ประการสามารถจะแสดงสำหรับแต่ละโหมดของ TE หรือ TM ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8 คือ  $A = m\pi/a$   $B = n\pi/b$  เมื่อ  $m$  และ  $n$  เป็นจำนวนเต็มและการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อ  $\gamma$  เป็นสิ่งสมมุติขึ้นในขั้นต้น ( $\omega^2 \mu\varepsilon = -[j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}]^2$ )

$$\omega^2 \mu\varepsilon \geq \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2.17)$$

ดังนั้นมีความถี่ตัด  $\omega_c$  (Radian) ที่มีความสอดคล้องกับ  $f_c$  (Hertz) จะได้รับเมื่อค่าในสมการที่ (2.17) มีความเท่ากันอย่างเหมาะสม หากค่าต่ำเกินไปท่อนำคลื่นจะไม่แพร่กระจายคลื่นซึ่งความยาวคลื่นตัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon} f_c} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}} \quad (2.18)$$

ดังนั้น

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \sqrt{1 - (f_c/f)^2} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $c$  เป็นความเร็วของคลื่นในที่ว่างประกอบด้วยตัวกลางเดียวกันกับท่อนำคลื่น ( $\mu, \varepsilon$ )  $\lambda_c$  เป็นความยาวคลื่นตัด (สัมพันธ์กับ  $f_c$ ) และ  $\lambda_g$  เป็นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น ( $\lambda_g > \lambda_c$ ) ที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ปฏิบัติงาน  $f$  (เมื่อ  $f > f_c$ ) การแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า TE ใดๆในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมอันที่อธิบายด้วยสมการของแมกซ์เวลล์อาจจะเริ่มต้นจากสองกลุ่มของความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) C \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-i\beta z} \\ E_y &= \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) C \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-i\beta z} \end{aligned} \quad (2.20)$$

และ

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) C \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-i\beta z} \\ H_y &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) C \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-i\beta z} \\ H_z &= C \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-i\beta z} \end{aligned} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $C$  เป็นค่าคงที่อิสระ สำหรับค่าจำนวนเต็ม  $m$  และ  $n$  จะตอบสนองตำแหน่งรูปแบบความสัมพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์และคำตอบเหล่านี้จะอ้างอิงไปสู่ โหมด  $TE_{mn}$  เมื่อ  $m$  และ  $n$  กำหนดโหมดของการแพร่กระจายคลื่น โหมดนั้นจะเรียกจำนวนมากที่สุดและน้อยที่สุดของแต่ละสนามในท่อนำคลื่น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะโหมด  $TE'$  เท่านั้น

### 2.3.1 คลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric: $TE^z$ )

ระบบพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉากในโหมด  $TE^z$  ที่ได้มาจากวิธีตัดขั้วเวกเตอร์ [20] สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมืองค์ประกอบของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial y} & H_x &= -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 F_z}{\partial x \partial z} \\ E_y &= \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial x} & H_y &= -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 F_z}{\partial y \partial z} \\ E_z &= 0 & H_z &= -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) F_z \end{aligned} \quad (2.22)$$

และค่าเป็นความถี่ตัดในโหมด  $TE_{mn}$  จะแสดงในสมการที่ 2.23

$$(f_c)_{mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \begin{array}{l} m = 0, 1, 2, \dots \\ n = 0, 1, 2, \dots \end{array} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $(f_c)_{mn}$  เป็นความถี่ตัดในโหมด  $TE_{mn}$   $a$  คือความกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ  $b$  คือความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากสมการที่ (2.23) โหมดที่เป็นใหญ่สำหรับ  $a > b$  เป็นโหมด  $TE_{10}$  ดังนั้นความถี่ตัดในโหมด  $TE_{10}$  สามารถเขียนได้เป็น

$$(f_c)_{10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.24)$$

สำหรับโหมดที่มีความถี่ตัดสูงกว่าถัดไปเป็นโหมด  $TE_{20}$  และโหมด  $TE_{01}$  ซึ่งความถี่ตัดในโหมดดังกล่าวสามารถเขียนได้เป็น

$$(f_c)_{20} = \frac{1}{a\sqrt{\mu\epsilon}} = 2(f_c)_{10} \quad (2.25)$$

$$(f_c)_{01} = \frac{1}{2b\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.26)$$

ดังนั้นแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดของโหมด  $TE_{10}$  จะเป็น

$$(f_c)_{10} \leq f \leq 2(f_c)_{10} = (f_c)_{20} \leq (f_c)_{01} \quad (2.27)$$

และจะเกิดเงื่อนไขว่า

$$2b \leq a \Rightarrow b \leq a/2 \Rightarrow 2 \leq a/b \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.27) เห็นได้ว่าแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดของโหมด  $TE_{10}$  จะมีขนาดหน้าตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับ  $2b \leq a$  ดังนั้นในการจำลองผลสายอากาศของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของขนาดช่องเปิดสี่เหลี่ยมของสายอากาศเท่ากับ  $a = 2b$  เพื่อให้สายอากาศอยู่ในโหมด  $TE_{10}$  มากที่สุดและง่ายต่อการจำลองผลของสายอากาศ

## 2.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการสื่อสารความถี่กว้างยิ่งยวดโดยรวมและถัดมาได้กล่าวถึงคุณสมบัติทางด้านสเปกตรัมไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน รูปร่างสัญญาณพัลส์ ขบวนการสัญญาณพัลส์ กรอบสเปกตรัม ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม ความเร็วของการส่งข้อมูล รวมทั้งคุณสมบัติอื่นๆที่ทำให้การสื่อสารย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้รับความสนใจ และหลักการพื้นฐานต่างๆของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบนด์วิดท์ของสายอากาศ และอัตราการ

ขยาย ส่วนสุดท้ายได้กล่าวถึงหลักการของท่อนำคลื่น ภาคนั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

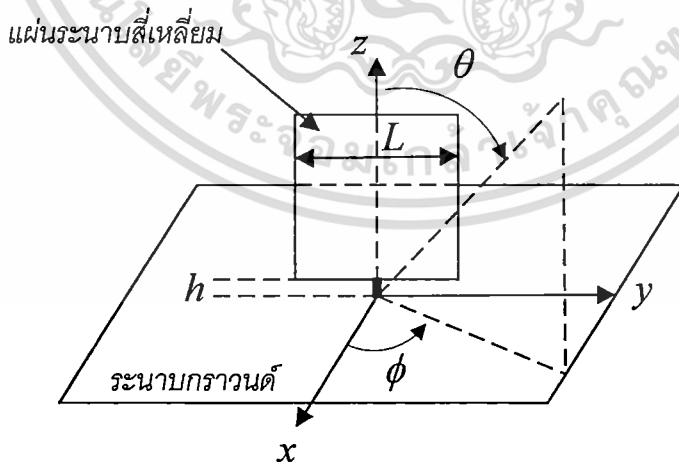
## วิวัฒนาการของสายอากาศ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวิวัฒนาการของสายอากาศที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่นำเสนอ โดยเริ่มต้นจากสายอากาศที่ได้มีการวิจัยมาก่อน ได้แก่ สายอากาศโมนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมบนแผ่นสะท้อน [13] สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการกระตุ้นด้วยโมนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน [14-15] สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม [16] และสุดท้ายจะได้กล่าวถึงสายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปรสิติและลวดทองแดง

### 3.1 สายอากาศที่มีมาก่อน

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษา วิจัยและพัฒนาสายอากาศประเภทต่างๆอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศโมนโพลก็เป็นอีกชนิดที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้เช่น สายอากาศโมนโพลสี่เหลี่ยมบนแผ่นสะท้อน[13] สายอากาศโมนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน[14-15] สายอากาศดังกล่าวมาเป็นสายอากาศแบบระนาบที่ยื่นตั้งฉากจากระนาบกราวนด์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ถึง 3.2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง

#### 3.1.1 สายอากาศโมนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมบนแผ่นสะท้อน



รูปที่ 3.1 สายอากาศโมนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมบนแผ่นสะท้อน [13]

สายอากาศโมนโพลชนิดแผ่นระนาบที่มีตัวแพร่กระจายคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยโมนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม ซึ่งใช้วัสดุที่เป็นทองเหลือง ที่มีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาเท่ากับ 0.5mm วางอยู่บนแผ่นระนาบกราวด์ขนาดเท่ากับ  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  ซึ่งเป็นวัสดุทองแดง และสำหรับการกระตุ้นได้ใช้ตัวเชื่อมแบบ SMA ในการเชื่อมต่อกับตัวกระตุ้น

สำหรับการพิจารณาสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส [13] จะพิจารณาจากค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบ โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $L$ ) ซึ่งเริ่มต้นจากขนาดของ  $L = 60\text{mm}$  ไปจน 20mm โดยการเปลี่ยนแปลงครั้งละ 5mm ซึ่งแบนด์วิดท์ที่ได้นั้นมีขอบเขตของความถี่ทางด้านต่ำและด้านสูง ที่ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10dB และช่องว่างของการกระตุ้นที่เหมาะสม ได้แสดงในตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** แบนด์วิดท์ เมื่อเปลี่ยนแปลง  $L$  ขนาดต่างๆและขอบเขตของความถี่ที่ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10dB

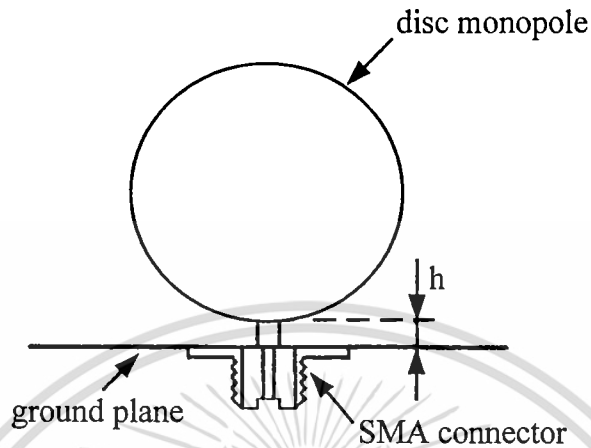
ขนาดของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม $L$ (mm)	ขอบเขตของความถี่ (GHz)	แบนด์วิดท์ (MHz)	ระยะช่องว่างของการกระตุ้นที่เหมาะสม (mm)
60	1.16 – 2.08	920	3
55	1.23 – 2.19	960	3
50	1.34 – 2.35	1010	3
45	1.44 – 2.59	1150	2.5
40	1.59 – 2.96	1370	2.5
35	1.86 – 3.53	1670	2.5
30	1.98 – 4.05	2090	2.5
25	2.38 – 5.20	2820	2.5
20	2.68 – 6.50	3820	2.2

### 3.1.2 สายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน

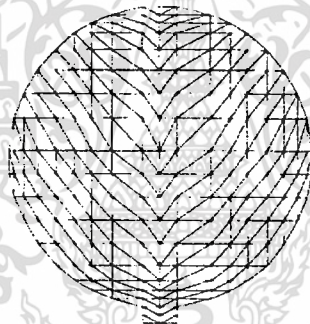
สายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อนเคยถูกนำไปใช้งานเป็นสายอากาศโทรทัศนในย่านความถี่ 90 ถึง 770MHz [14] ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสายอากาศมีการสูญเสียย้อนกลับ ครอบคลุมย่านความถี่กว้าง (2.25 ถึง 17.25GHz) โดยใช้แบบจำลองกริดเชิงเส้น (Wire Grid) ในการวิเคราะห์ สำหรับวิธีในการคำนวณจะใช้วิธีโมเมนต์ สำหรับรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นโครงร่างที่ใช้เซลล์แบบสามเหลี่ยมในการคำนวณหาสูตร

โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมซึ่งถูกสร้างด้วยแผ่นทองเหลือง ที่มีขนาดความหนา 0.5mm ด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง 25mm โดยมีตัวเชื่อมแบบ SMA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ซึ่งมีระยะ  $h$  เป็นระยะห่างระหว่างขอบของแผ่นระนาบโมนโพลวงกลม อยู่ตรงกลางของแผ่นสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $300 \times 300 \text{ mm}^2$



รูปที่ 3.2 สายอากาศโมนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน [14]



รูปที่ 3.3 โครงร่างของสายอากาศโมนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อนที่ใช้เซลล์แบบสามเหลี่ยม [15]

สำหรับการวิเคราะห์ที่ได้ใช้วิธีของโมเมนต์ ที่ใช้องค์ประกอบแบบสามเหลี่ยม ซึ่งได้ถูกพัฒนาและใช้สำหรับการศึกษาปัญหาของการเลี้ยวเบนบนโครงสร้างที่เป็นโลหะในรูปร่างแบบต่างๆ [21] สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศโมนโพลกลมบางจะนำแบบจำลองการป้อนสัญญาณ (Feeding Model) มาประยุกต์ใช้ที่ขอบโครงสร้างที่เป็นวงกลมและพัฒนาให้เป็นวงแหวนของกระแสแม่เหล็ก ซึ่งหลีกเลี่ยงการนำโหมดที่เกิดขึ้นที่สายอากาศไปยังจุดเชื่อมต่อของตัวเชื่อมแบบ SMA ถึงแม้ว่าแบนด์วิดท์ที่ได้จะกว้าง (2.25 ถึง 17.25GHz) แต่ความถี่ที่สามารถใช้งานจะถูกจำกัดด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แย่ง ซึ่งปรากฏให้เห็นได้ที่ความถี่ 12GHz จากที่กล่าวมาในข้างต้นว่า โครงสร้างของสายอากาศถูกสร้างขึ้นด้วยแผ่นทองเหลือง จึงไม่มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) แต่เนื่องจากทองเหลืองมีค่าความนำที่สูงและสายอากาศมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดการแพร่กระจายคลื่นมีค่าที่ดีมาก ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

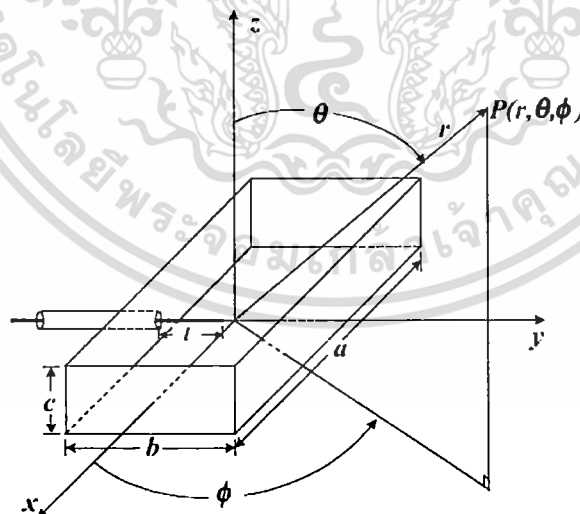
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในระบบสื่อสารเคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ สายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศสถานีฐาน โดยทั่วไปจะเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ให้บริการรูปวงกลม แต่สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบไมโครเซลล์จะมีลักษณะการสื่อสารไปในทิศทางที่เป็นไปตามแนวถนน ซึ่งปกติจะถูกรเรียกว่า Street Cell และหากนำสายอากาศแบบสองทิศทางมาใช้งานก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น ดังนั้นสายอากาศแบบสองทิศทางจึงเหมาะกับพื้นที่ให้บริการที่เป็นถนนและพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแนวยาว เช่น อุโมงค์ และทางเดินระหว่างตึก เป็นต้น ซึ่งสายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก [16] ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้างมาเพื่อรับรองระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีพื้นที่ให้บริการเป็นลักษณะของถนน อุโมงค์ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

#### โครงสร้างสายอากาศ

โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิดทั้งสองด้าน ซึ่งมีความกว้าง  $a$  ความสูง  $b$  และความยาว  $c$  โดยใช้โพรบไฟฟ้าเชิงเส้น (Linear Probe) ขนาดความยาว  $l$  กระตุ้นยื่นเข้าไปตามแนวแกน  $y$  บนระนาบ  $z = -c/2$  และ  $z = c/2$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังในรูปที่ 3.4



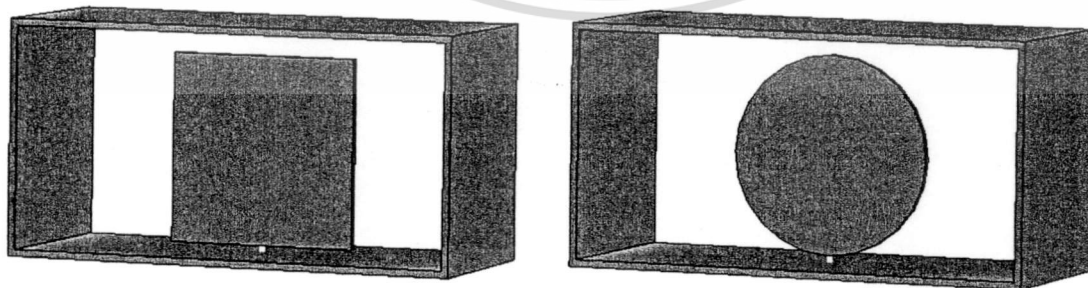
รูปที่ 3.4 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก[16]

สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก สายอากาศถูกออกแบบให้ทำงาน ณ ความถี่ 1.9 GHz ซึ่งเหมาะที่นำไปประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศสถานีฐาน ในระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โทรศัพท์เคลื่อนที่ สำหรับพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแนวยาว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สายอากาศที่นำเสนอ

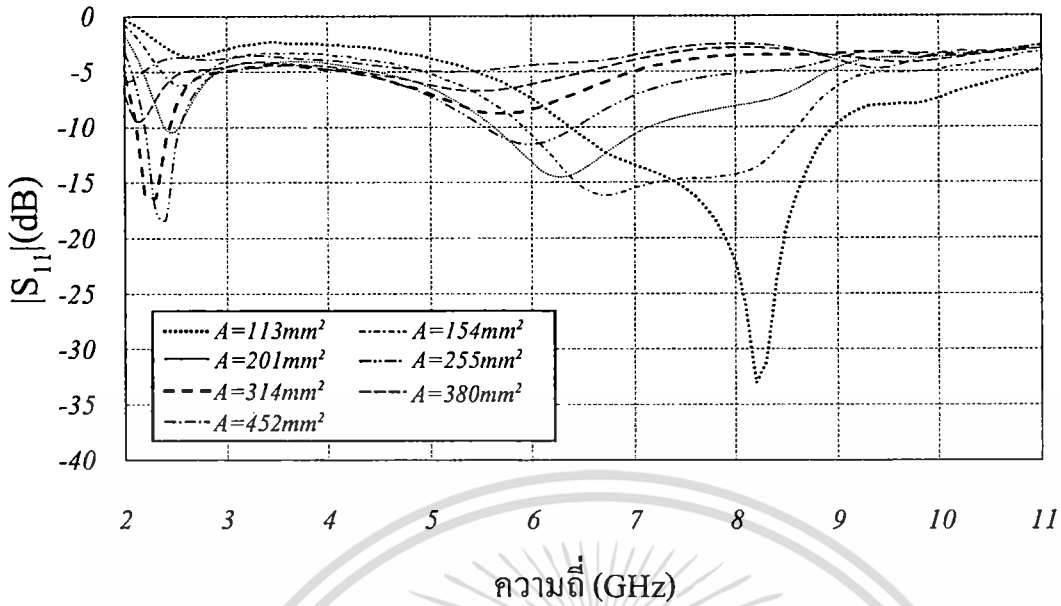
จากลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางที่ได้จากสายอากาศแบบรอบทิศทางก็ยังมีข้อด้อยคือเมื่อคลื่นที่แพร่กระจายออกไปรอบทิศทางแล้วเกิดการกระทบกับวัตถุ หรือ โลหะที่มีลักษณะเรียบ คลื่นจะเกิดการหักเห เบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม หากนำแผ่นโลหะที่มีลักษณะเป็นรูปกรอบมาครอบสายอากาศแบบรอบทิศทางจะส่งผลให้ไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นผ่านในทิศทางที่มีกรอบโลหะออกไปได้แต่คลื่นจะเกิดการสะท้อนและหักเหแพร่กระจายออกไปในทิศทางช่องเปิดของกรอบโลหะทำให้ได้การแพร่กระจายลักษณะแบบสองทิศทาง ดังเช่นสายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังที่ได้นำเสนอมาข้างต้นนั้น สายอากาศได้ถูกออกแบบมาให้รองรับการทำงานในย่านความถี่ 1.9GHz สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังนั้นหากต้องการให้สายอากาศสามารถตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6GHz ซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง จึงจำเป็นต้องออกแบบให้ขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมและเลือกใช้ตัวกระตุ้นที่เหมาะสม ดังนั้นจากสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน [13] และสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน [14] เพื่อเป็นการประยุกต์ใช้ตัวกระตุ้นโมโนโพลที่เหมาะสมจึงได้นำตัวกระตุ้นโมโนโพลทั้งสองแบบมาประยุกต์กับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เพื่อพิจารณาค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  เพื่อเลือกโมโนโพลที่ตอบสนองต่อแบนด์วิดท์ที่กว้าง โดยในการจำลองได้กำหนดวงแหวนสี่เหลี่ยมให้มีขนาดความกว้าง  $a$  เท่ากับ 50mm ความสูง  $b$  เท่ากับ 25mm ( $a = 2b$ ) ความยาว  $c$  เท่ากับ 25mm ( $\lambda/4$ ) ความกว้าง  $a$  ความสูง  $b$  และความยาว  $c$  เท่ากับ ตามหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิดทั้งสองด้าน เพื่อให้เกิดโหมด  $\text{TE}_{10}$  โดยให้มีความถี่ตัดที่ 3.0GHz (Cutoff frequency)



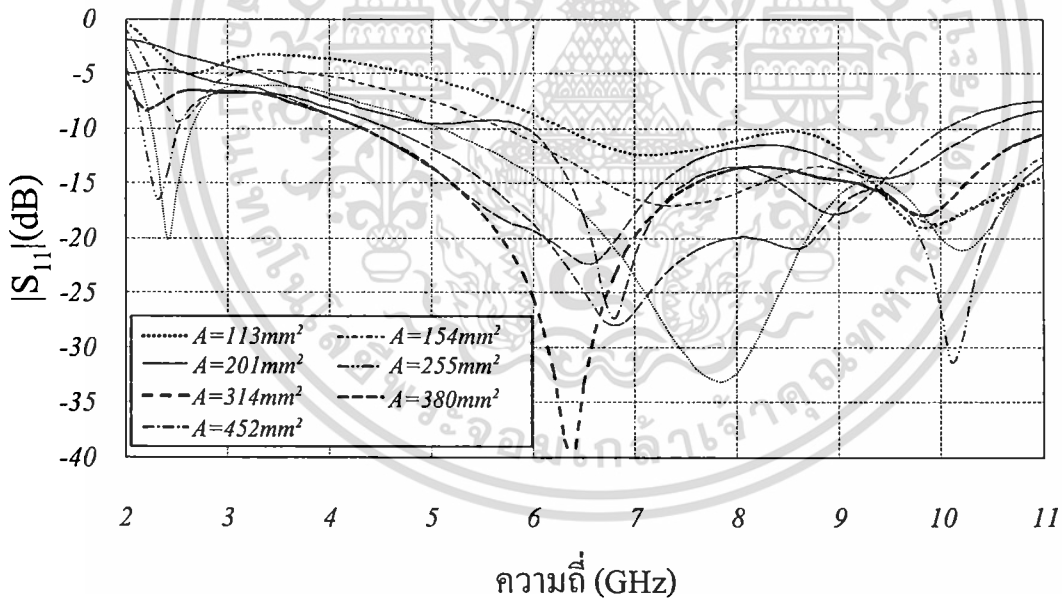
(ก) กระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม (ข) การกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม

#### รูปที่ 3.5 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ใช้ตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ ของสายอากาศที่ใช้ตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด  $A$  ที่ขนาดต่างๆ (เมื่อ  $a = 50\text{mm}$   $b = 25\text{mm}$  และ  $c = 25\text{mm}$ )



รูปที่ 3.7  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ ของสายอากาศที่ใช้ตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม เมื่อเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด  $A$  ที่ขนาดต่างๆ (เมื่อ  $a = 50\text{mm}$   $b = 25\text{mm}$  และ  $c = 25\text{mm}$ )

จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวกระตุ้นโมโนโพลทั้งสองแบบ มีขนาดที่เท่ากัน การกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมจะให้ค่า  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  ครอบคลุมช่วงความถี่ที่กว้างกว่าหรือผลของแบนด์วิดธ์ที่

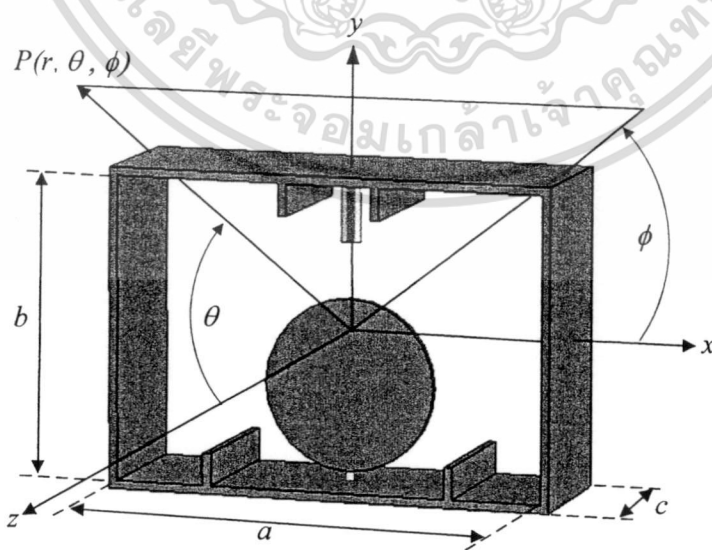
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างกว่าผลที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมมาเป็นตัวกระตุ้นสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิติก

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบค่า  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า -10dB และแบนด์วิดธ์ระหว่างตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม

ขนาดพื้นที่หน้าตัด แผ่นระนาบ ( $\text{mm}^2$ )	โมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม		โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม	
	ขอบเขตความถี่ (GHz)	แบนด์วิดธ์ (GHz)	ขอบเขตความถี่ (GHz)	แบนด์วิดธ์ (GHz)
113	6.4 – 8.9	2.5	6.4 – >11	> 6.4
154	6.0 – 8.5	2.5	5.8 – >11	> 5.2
201	5.7 – 7.1	1.4	5.7 – >11	> 5.3
255	5.6 – 6.4	0.8	4.6 – >11	> 6.4
314	-	-	4.4 – >11	> 6.6
380	-	-	4.4 – 10.4	6.0
452	-	-	6.0 – 10.0	4.0

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิติก ดังแสดงในรูปที่ 3.8

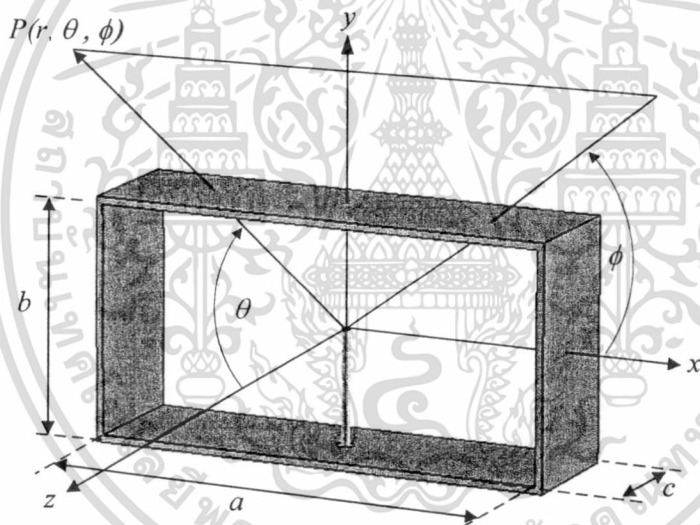


รูปที่ 3.8 สายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นการประยุกต์จากหลักการเดิมของสายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากและสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน โดยได้นำโครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมาใช้ ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิดทั้งสองด้าน โดยโครงสร้างของสายอากาศจะทำให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง

สำหรับในการพิจารณาออกแบบสายอากาศที่นำเสนอนี้ จะเริ่มต้นจากการกำหนดขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมซึ่งอาศัยหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิดทั้งสองด้าน โดยเลือกขนาดความกว้าง  $a$  และความสูง  $b$  ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อให้เกิดโหมด  $TE_{10}$  โดยให้มีความถี่ตัดที่ 3.0GHz โดยใช้โพรบไฟฟ้ากระตุ้นยื่นเข้าไปด้านในวงแหวนสี่เหลี่ยม ดังในรูปที่ 3.9 รูปที่ 3.9 เพื่อหาขนาดวงแหวนสี่เหลี่ยมและขนาดความยาวของตัวกระตุ้นที่เหมาะสม โดยเลือกความถี่ตัดที่มีขอบเขตค่าต่ำกว่า -10dB ที่ใกล้ความถี่ 3.0GHz มากที่สุดและมีแบนด์วิดธ์ที่กว้างที่สุด



รูปที่ 3.9 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม

สำหรับการพิจารณาขนาดความกว้าง  $a$  และความสูง  $b$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยม จะอาศัยโครงสร้างซึ่งใช้หลักการท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดโหมด  $TE_{10}$  หรือโหมดเป็นใหญ่ (Dominant Mode) โดยให้มีความถี่ตัดที่ 3.0GHz โดยพิจารณาจาก ค่าความถี่ตัดในโหมด  $TE_{mn}$  จะแสดงในสมการที่ 3.1

$$(f_c)_{mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \begin{matrix} m = 0, 1, 2, \dots \\ n = 0, 1, 2, \dots \end{matrix} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $(f_c)_{mn}$  เป็นความถี่ตัดในโหมด  $TE_{mn}$   $a$  คือความกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ  $b$  คือความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้เพื่อให้นักศึกษาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.1 โหมดที่เป็นใหญ่สำหรับ  $a > b$  เป็นโหมด  $TE_{10}$  ดังนั้นความถี่ตัดในโหมด  $TE_{10}$  สามารถเขียนได้เป็น

$$(f_c)_{10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3.2)$$

สำหรับโหมดที่มีความถี่ตัดสูงกว่าตัดไปเป็นโหมด  $TE_{20}$  และโหมด  $TE_{01}$  ซึ่งความถี่ตัดในโหมดดังกล่าวสามารถเขียนได้เป็น

$$(f_c)_{20} = \frac{1}{a\sqrt{\mu\epsilon}} = 2(f_c)_{10} \quad (3.3)$$

$$(f_c)_{01} = \frac{1}{2b\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3.4)$$

ดังนั้นแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดของโหมด  $TE_{10}$  จะเป็น

$$(f_c)_{10} \leq f \leq 2(f_c)_{10} = (f_c)_{20} \leq (f_c)_{01} \quad (3.5)$$

และจะเกิดเงื่อนไขว่า

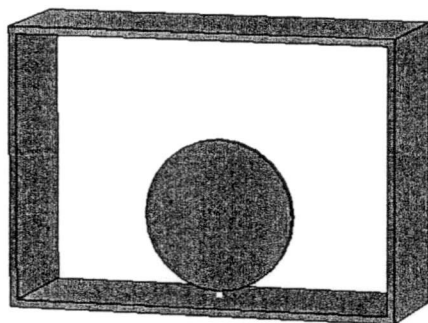
$$2b \leq a \Rightarrow b \leq a/2 \Rightarrow 2 \leq a/b \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.5 เห็นได้ว่าแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดของโหมด  $TE_{10}$  จะมีขนาดหน้าตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับ  $2b \leq a$  ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้ค่าเริ่มต้นในการจำลองผลของสายอากาศ ที่ขนาดความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมช่องเปิดเท่ากับ  $a = 2b$  เพื่อให้สายอากาศอยู่ในโหมด  $TE_{10}$  มากที่สุด

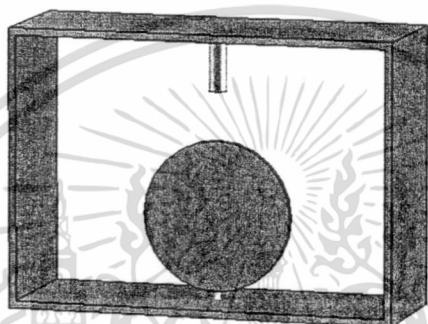
จากนั้นเพื่อให้สายอากาศตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6 GHz จึงได้ใช้ตัวกระตุ้นโมโนโพลระนาบแผ่นวงกลม ดังในรูปที่ 3.10 ซึ่งทำให้ผลของแบนด์วิดท์ที่กว้างและเพื่อเป็นการปรับปรุงปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ด้านสูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด จึงได้นำลวดทองแดงพร้อมทั้งแท่งปรสิติกุ่มาวางบริเวณผนังภายในด้านบนและบริเวณผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังในรูปที่ 3.11 ถึง รูปที่ 3.13 โดยได้ปรับหาขนาดความยาวของลวดทองแดงและระยะแท่งปรสิติกที่เหมาะสม เพื่อเลือกนำมาใช้งาน ดังนั้นเนื้อหาในส่วนของสายอากาศที่น่าเสนอนี้จะได้กล่าวครอบคลุมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบวงกลม เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศที่น่าเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

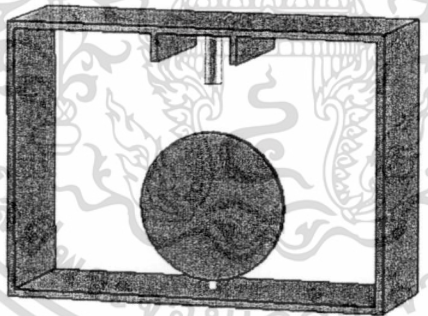
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



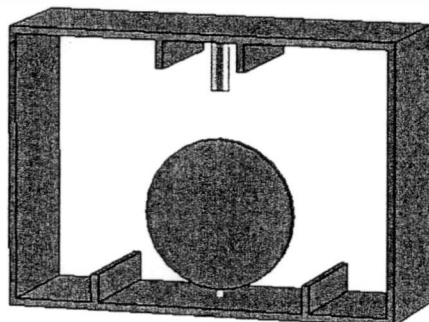
รูปที่ 3.10 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.11 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีลวดทองแดง



รูปที่ 3.12 สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีแท่งปรสิตและลวดทองแดง ผันงภายในด้านบน



รูปที่ 3.13 สายอากาศสองทิศทางตอบสนองอย่างกว้างยิ่งยวดที่กระตุ้นใช้โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอวิวัฒนาการของสายอากาศที่มีมาก่อนซึ่งเกี่ยวข้องกับสายอากาศที่นำเสนอและหลักการที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปรสิติและลวดทองแดง ซึ่งเนื้อหาได้กล่าวถึงวิวัฒนาการของสายอากาศที่เกี่ยวข้องที่ได้มีมาก่อน ซึ่งเป็นสายอากาศที่ใช้ตัวกระตุ้นชนิดแผ่นระนาบที่มีรูปร่างแบบต่างๆ โดยเริ่มต้นจากสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน ซึ่งพบว่ามีคุณสมบัติที่ให้ผลตอบสนองช่วงความถี่ที่กว้าง และหลังจากนั้นได้กล่าวถึงสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมบนแผ่นสะท้อนซึ่งมีลักษณะของตัวกระตุ้นแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยพบว่า เบนด์วิดท์ที่ได้นั้นมีขอบเขตของความถี่ทางด้านต่ำและด้านสูง ที่ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  ขึ้นอยู่กับขนาดความยาว  $L$  ของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและระยะช่องว่างของการกระตุ้นที่เหมาะสม ซึ่งสายอากาศทั้งสองที่ได้กล่าวมานั้นเป็นสายอากาศที่มีตัวกระตุ้นวางตั้งฉากกับระนาบกราวด์และมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และต่อมาได้กล่าวถึงสายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ด้วยคุณลักษณะของสายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากและคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน ที่มีช่วงตอบสนองช่วงความถี่ที่กว้าง หากนำสายอากาศทั้งสองมาผนวกเข้าด้วยกัน ด้วยลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่สอดคล้องกันแล้ว จะส่งผลให้ได้สายอากาศที่ตอบสนองช่วงความถี่ที่กว้างและมีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอนี้จึงเป็นการประยุกต์จากหลักการเดิมของสายอากาศดังที่ได้กล่าวมา โดยได้นำโครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมาใช้ ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิดทั้งสองด้าน และการพิจารณาออกแบบสายอากาศที่นำเสนอนี้ จะเริ่มต้นจากสายอากาศที่ใช้โพรบเป็นตัวกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อหาขนาดความกว้าง ความสูง และความยาวของตัวกระตุ้นที่เหมาะสม จากนั้นเพื่อให้สายอากาศตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6GHz จึงได้ใช้ตัวกระตุ้นโมโนโพลระนาบแผ่นวงกลม ซึ่งทำให้ผลของแบนด์วิดท์ที่กว้าง และเพื่อเป็นการปรับปรุงปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ด้านสูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด จึงได้นำลวดทองแดงพร้อมทั้งแท่งปรสิติคู่มาวางบริเวณด้านบนและวางแท่งปรสิติคู่มุมด้านล่างของผนังภายในวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยได้ปรับหาขนาดความยาวของลวดทองแดงและระยะแท่งปรสิติที่เหมาะสม เพื่อเลือกนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงใช้สายอากาศที่มีองค์ประกอบเป็น โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมและตัวกระตุ้น โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม การจำลองผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

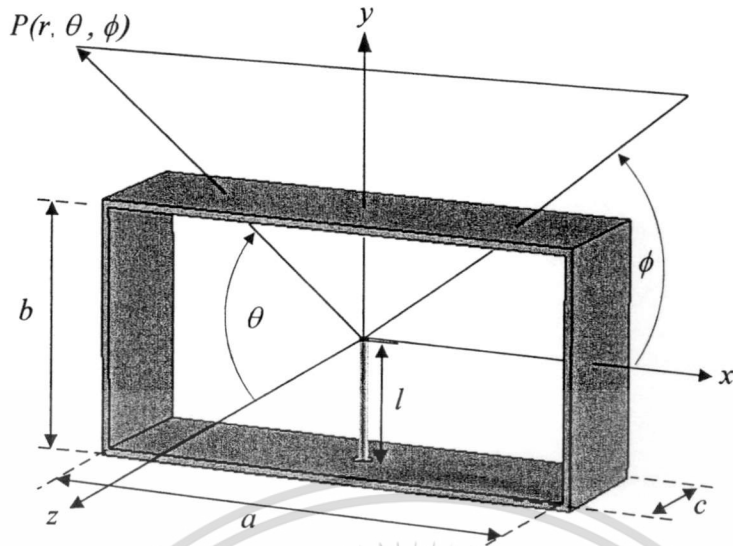
## บทที่ 4

### การศึกษาพารามิเตอร์และการจำลองสายอากาศ

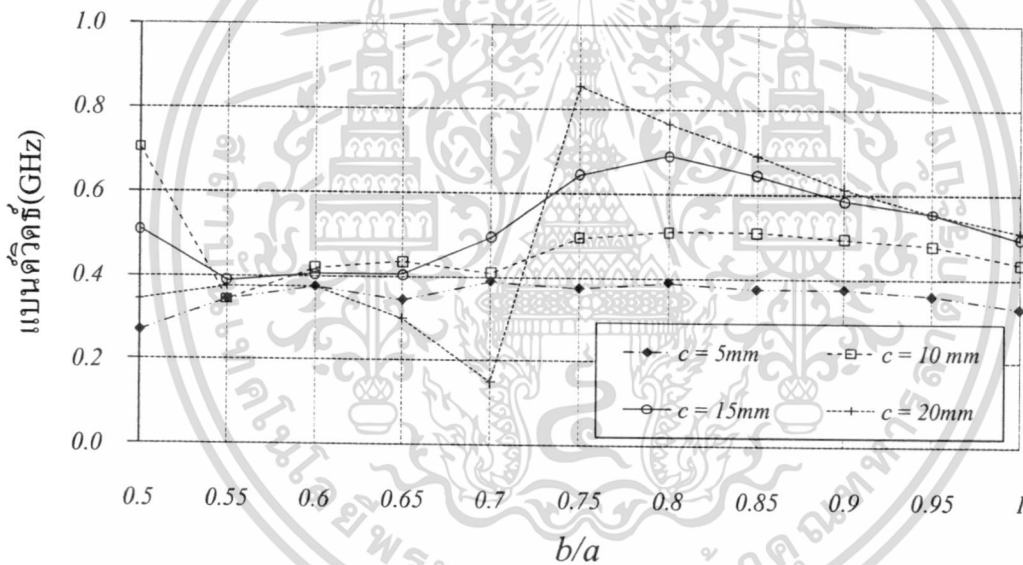
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบสายอากาศ โดยนำเอาทฤษฎีจากบทที่ผ่านมา มาออกแบบและวิเคราะห์พารามิเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม CST Microwave Studio สำหรับช่วยในการจำลองค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบนั้น จะเริ่มจากการศึกษาและนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีมาก่อนซึ่งได้กล่าวมานั้นจากบทที่ผ่านมา คือ สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยเริ่มต้นจากการเลือกขนาดความกว้าง  $a$  ความสูง  $b$  ความยาว  $c$  ที่เหมาะสม ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม และความยาวของตัวกระตุ้นที่เหมาะสม จากนั้นเพื่อให้สายอากาศตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6 GHz จึงได้ใช้ตัวกระตุ้นโมโนโพลระนาบแผ่นวงกลม ซึ่งทำให้ผลของแบนด์วิดท์ที่กว้าง และเพื่อเป็นการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ด้านสูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด จึงได้นำลวดทองแดงพร้อมทั้งแท่งปรสิติกุ่มาวางบริเวณด้านบนและวางแท่งปรสิติกุ่มาวางด้านล่างของผนังภายในวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยได้ปรับหาขนาดความยาวของลวดทองแดงและระยะแท่งปรสิติกุ่มาวางที่เหมาะสม เพื่อเลือกนำมาใช้งาน สำหรับในการจำลองสายอากาศเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม จะพิจารณาจากค่า  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าอัตราขยายตลอดช่วงความถี่ตอบสนองที่ต้องการ

#### 4.1 พารามิเตอร์และการจำลองของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในการพิจารณาหาขนาดความยาว  $c$  ที่เหมาะสมนั้น ได้กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดความกว้าง  $a$  ความสูง  $b$  ของสายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตามหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อให้เกิดโหมด  $TE_{10}$  หรือโหมดเป็นใหญ่ โดยมีขนาดความกว้างเท่ากับสองเท่าของความสูง ( $a=2b$ ) โดยมีความถี่ตัดที่ 3.0GHz ดังนั้นในการเริ่มต้นจึงได้กำหนดขนาดความกว้าง  $a$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิด มีขนาดเท่ากับ 50mm โดยที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดวงแหวนสี่เหลี่ยมในเทอมของสัดส่วนความกว้างต่อความสูง ( $b/a$ ) โดยใช้โพรบที่มีความยาวเท่ากับควอเตอร์เวฟ ( $l=\lambda/4$ ) เท่ากับ 25mm เพื่อหาพารามิเตอร์ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำ (Lower Resonant Frequency) เข้าใกล้ 3.0GHz มากที่สุดและแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด

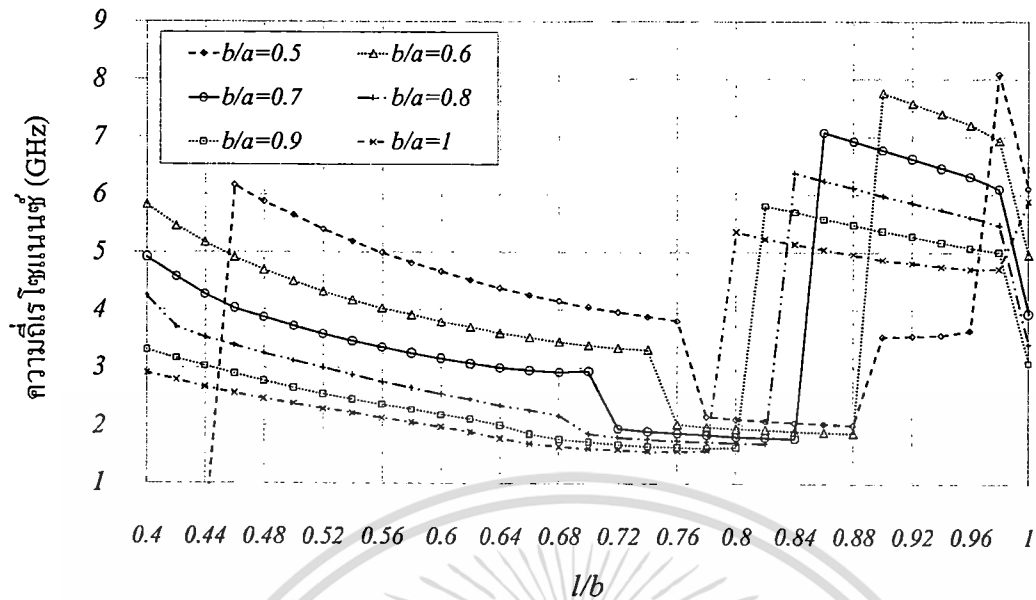


รูปที่ 4.1 สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

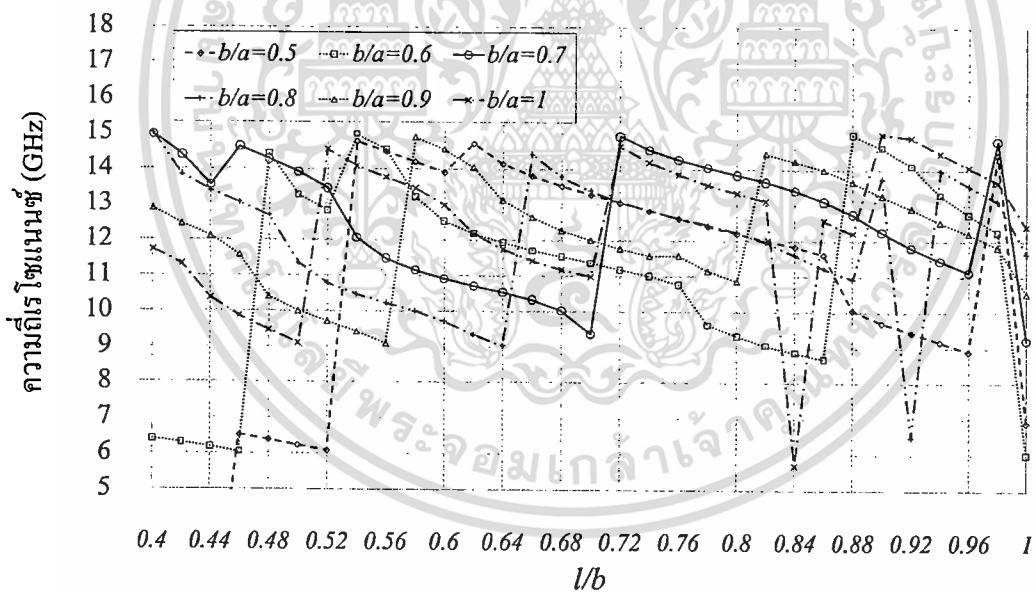


รูปที่ 4.2 แบนด์วิดท์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำที่ความยาว  $c$  ต่างกัน เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วน  $b/a$  (เมื่อ  $a = 50\text{mm}$  และ  $l = 25\text{mm}$ )

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อพิจารณาจากผลของแบนด์วิดท์ที่ได้และขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมที่เหมาะสม คือแบนด์วิดท์ที่กว้างและขนาดเล็กกะทัดรัด จะได้ขนาดความยาว  $c$  ที่เหมาะสมคือ  $c$  เท่ากับ  $15\text{mm}$  และสัดส่วนความกว้างต่อความสูง ( $b/a$ ) เท่ากับ  $0.7$  หลังจากที่ได้ค่าเริ่มต้นของขนาดความกว้าง  $a$  ความสูง  $b$  และความยาว  $c$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยมที่เหมาะสม เพื่อเป็นการหาเงื่อนไขของขนาดที่เหมาะสมสำหรับรองรับย่านความถี่กว้างยิ่งยวด จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวโพรบ  $l$  ในเทอมของความยาวโพรบต่อความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยม ( $l/b$ ) เมื่อสัดส่วนความกว้างต่อความสูง ( $b/a$ ) ที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำของสัดส่วน  $b/a$  ที่ขนาดต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วน  $l/b$  (เมื่อ  $a = 50\text{mm}$  และ  $c = 15\text{mm}$ )



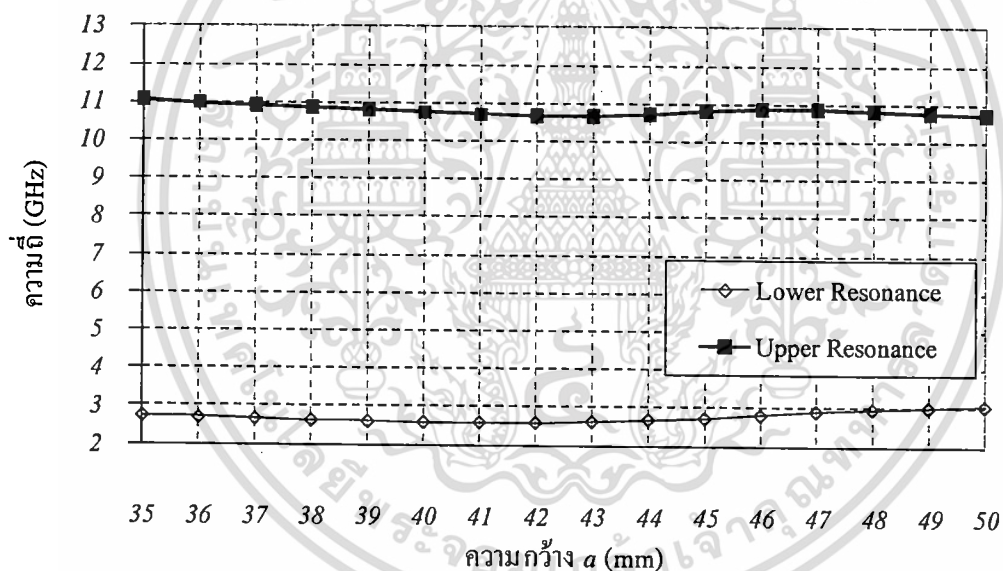
รูปที่ 4.4 ความถี่เรโซแนนซ์ด้านสูง (Upper resonant frequency) ของสัดส่วน  $b/a$  ที่ขนาดต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วน  $l/b$  (เมื่อ  $a = 50\text{mm}$  และ  $c = 15\text{mm}$ )

จากรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาจากความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำและด้านสูง ที่เข้าใกล้ 3.0GHz และ 10.6GHz ตามลำดับ พบว่าสัดส่วนของความยาวโพรบต่อความสูงวงแหวน  $l/b$  และสัดส่วนความกว้างต่อความสูงของวงแหวน  $b/a$  ที่เหมาะสม ได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสัดส่วน  $l/b$  และ  $b/a$  ซึ่งให้ผลที่เข้าใกล้ความถี่ โชนแนซด้านต่ำ 3.0GHz และ ด้านสูง 10.6GHz

$l/b$	1	0.52	0.62
$b/a$	0.90	0.8	0.70

เนื่องจากความต้องการทางด้านขนาดของสายอากาศที่เล็กกะทัดรัด จากสัดส่วน  $l/b$  และ  $b/a$  ที่ได้ในตารางที่ 4.1 จึงได้เลือกขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมในสัดส่วนที่เหมาะสม คือ  $l/b$  เท่ากับ 0.62 และ  $b/a$  เท่ากับ 0.7 มาใช้งาน และนอกจากนั้นขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมยังสามารถลดขนาดลงได้อีก โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้าง  $a$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยมเพื่อให้ได้ขนาดกะทัดรัดลงยิ่งขึ้น ซึ่งยังคงให้ได้ความถี่โชนแนซทางด้านต่ำและด้านสูง เข้าใกล้ความถี่ 3.0GHz และ 10.6GHz ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



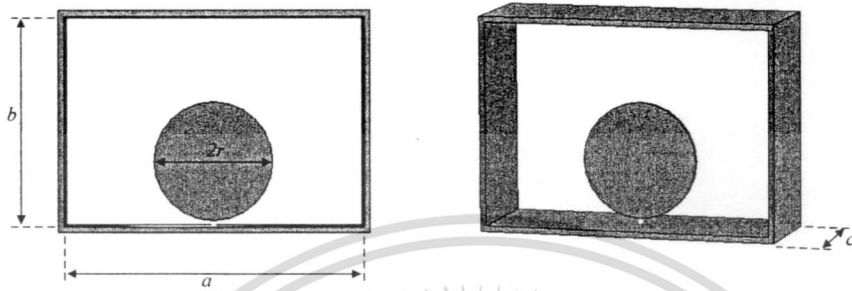
รูปที่ 4.5 ความถี่ โชนแนซด้านต่ำและด้านสูง เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้าง  $a$  (เมื่อ  $b = 35\text{mm}$  และ  $l = 0.62b = 21.7\text{mm}$ .)

จากรูปที่ 4.5 พบว่าขนาดความกว้าง  $a$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยมที่เหมาะสม คือ  $a$  เท่ากับ 40mm ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความกว้าง ความสูง ความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมและความยาวโพรบ ของสายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งทำให้ได้ความถี่โชนแนซเข้าใกล้ 3.0GHz และ 10.6GHz ดังนั้นขนาดวงแหวนสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ ความกว้าง  $a$  เท่ากับ 40mm ความสูง  $b$  เท่ากับ 28mm ความยาว  $c$  เท่ากับ 15mm จากนั้นเพื่อให้สายอากาศตอบสนองครอบคลุมตลอดย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง

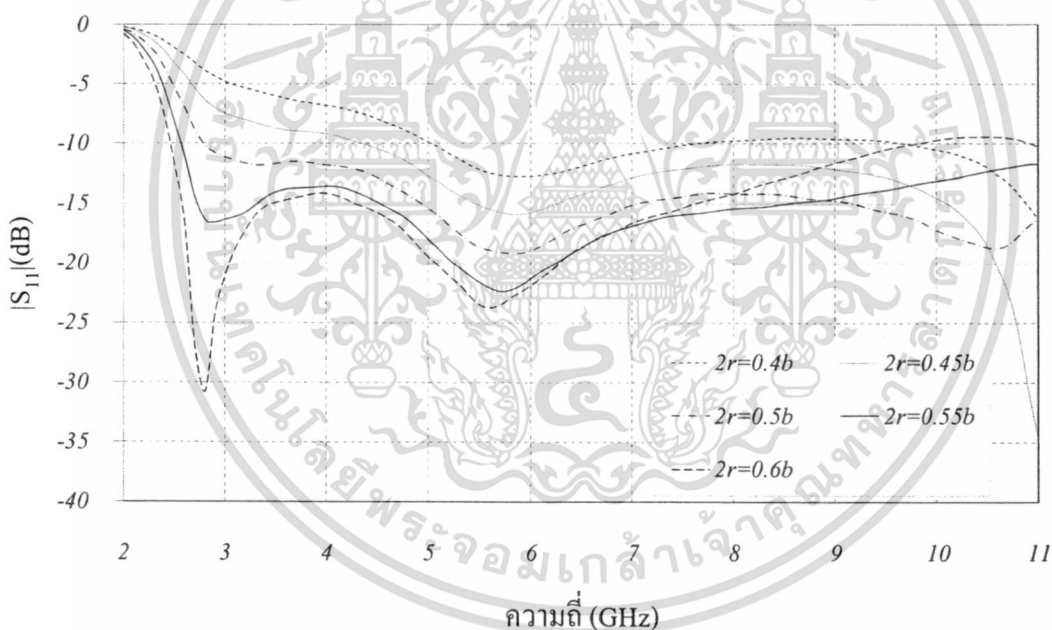
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบเซอร์ขอทานการคัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.6GHz โดยมีค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10$ dB จึงได้นำโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม มาใช้เป็นตัวกระตุ้น แทนตัวกระตุ้นแบบโพรบ ดังในรูปที่ 4.6 และเพื่อหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2r$  ของโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่เหมาะสม จึงได้ทำการการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2r$  ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 สายอากาศสองทิศทางวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม



รูปที่ 4.7  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2r$  (เมื่อ  $a = 40$ mm  $b = 28$ mm และ  $c = 15$ mm)

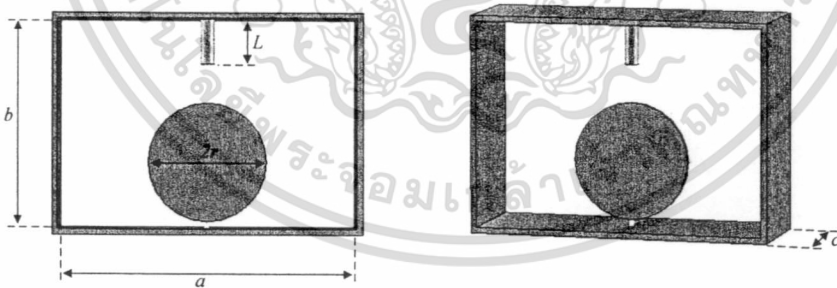
จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2r$  มีขนาดน้อยกว่า  $0.45b$  ของความสูงวงแหวนสี่เหลี่ยม ส่งผลให้ค่า  $|S_{11}|$  สูงกว่า  $-10$  dB โดยตัดออฟที่ความถี่ 4.3GHz และเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2r$  มีขนาดเท่ากับ  $0.6b$  ส่งผลให้ตอบสนองต่อความถี่ด้านต่ำดีขึ้น แต่สำหรับผลตอบสนองต่อความถี่ด้านสูงไม่ดีขึ้น โดยมีความถี่ตัดที่ 2.5GHz และ 9.7GHz ตามลำดับ ซึ่งไม่ครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด และเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเท่ากับ  $0.5b$  และ  $0.55b$  การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ผลตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด จากผลการจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม ได้ขนาดที่เหมาะสมเท่ากับ  $0.55b$  หรือเท่ากับ  $7.7\text{mm}$  เนื่องจาก ให้ผลตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด และให้ผลตอบสนองต่อความถี่ด้านต่ำดี โดยมี ความถี่ตัดด้านต่ำที่  $2.6\text{GHz}$  และความถี่ด้านสูง มากกว่า  $10.6\text{GHz}$  ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ ได้เลือกใช้คือ ความกว้าง  $a$  เท่ากับ  $40\text{mm}$  ความสูง  $b$  เท่ากับ  $28\text{mm}$  ความยาว  $c$  เท่ากับ  $15\text{mm}$  และ เส้นผ่านศูนย์กลาง  $2r$  เท่ากับ  $7.7\text{mm}$  เพื่อใช้ในการจำลองหาพารามิเตอร์อื่นต่อไป

## 4.2 พารามิเตอร์และการจำลองของลวดทองแดง

### 4.2.1 พารามิเตอร์ความยาว $L$ ของลวดทองแดง

หลังจากที่ได้ขนาดวงแหวนสี่เหลี่ยมและขนาด โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่เหมาะสม แล้ว เพื่อช่วยในการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้ได้แบบรูปที่สมมาตรมากขึ้นและปรับค่า คลื่นให้ชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  ที่ต้องการและจึง ได้นำลวดทองแดงขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง  $2\text{mm}$  โดยนำมาแทรกเข้าไปตรงกึ่งกลางบริเวณด้านบนของผนังภายในวงแหวนสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการพิจารณาขนาดความยาวของลวดทองแดง เมื่อทำ การเปลี่ยนแปลงความยาว  $L$  ของลวดทองแดง โดยพิจารณาค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  และแบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ  $yz$  และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ใน ระนาบ  $xz$  ที่เกิดขึ้น

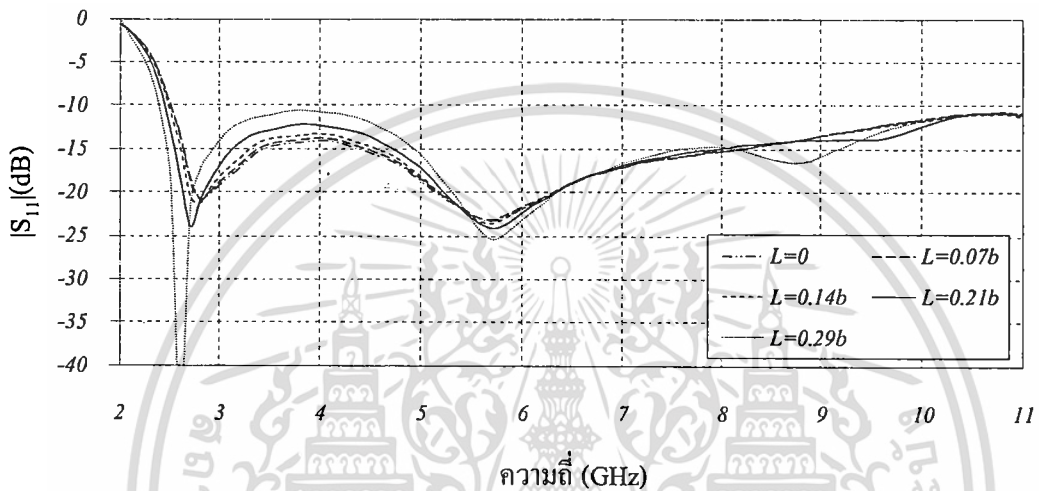


รูปที่ 4.8 สายอากาศสองทิศทางวงแหวนสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นด้วย โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มี ลวดทองแดง

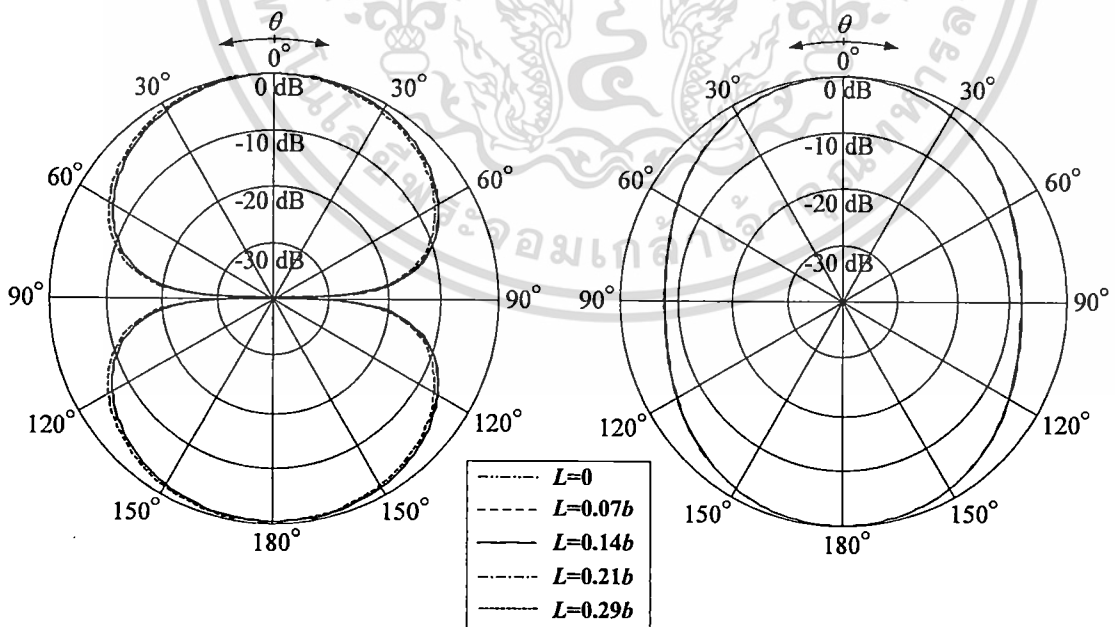
จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อขนาดความยาว  $L$  ของลวดทองแดงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า  $|S_{11}|$  สูงขึ้น เข้าใกล้  $-10\text{dB}$  ในช่วงความถี่  $3\text{GHz}$  ถึง  $5\text{GHz}$  และความถี่ด้านต่ำ มีความถี่ตัดต่ำลงเล็กน้อย แต่ยังมี ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  ตลอดช่วงความถี่  $3.1\text{GHz}$  ถึง  $10.6\text{GHz}$  และต่อมาได้พิจารณาแบบรูปการ แพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ถึง (จ) จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความยาว  $L$  ของลวดทองแดงเพิ่มขึ้นจะทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ช่วงความถี่สูงขึ้นไปมีทิศทางลำคลื่นชี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  และเกิดความสมมาตรมากขึ้น ซึ่งจากผลที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาว  $L$  เท่ากับ  $0.21b$  (6 mm) และ  $0.29b$  (8 mm) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ 3.1GHz 5GHz และ 6.8GHz ยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ในขณะเดียวกันที่ความถี่ 9GHz และ 10.6 GHz มีแนวโน้มที่ดี คือ มีทิศทางลากลื่นขึ้นไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  และเกิดความสมมาตรมากขึ้น จากผลที่ได้นี้จึงได้เลือกใช้ขนาดความยาว  $L$  เท่ากับ  $0.21b$  (6 mm) สำหรับการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอนี้



รูปที่ 4.9  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความยาว  $L$  ของลวดทองแดง

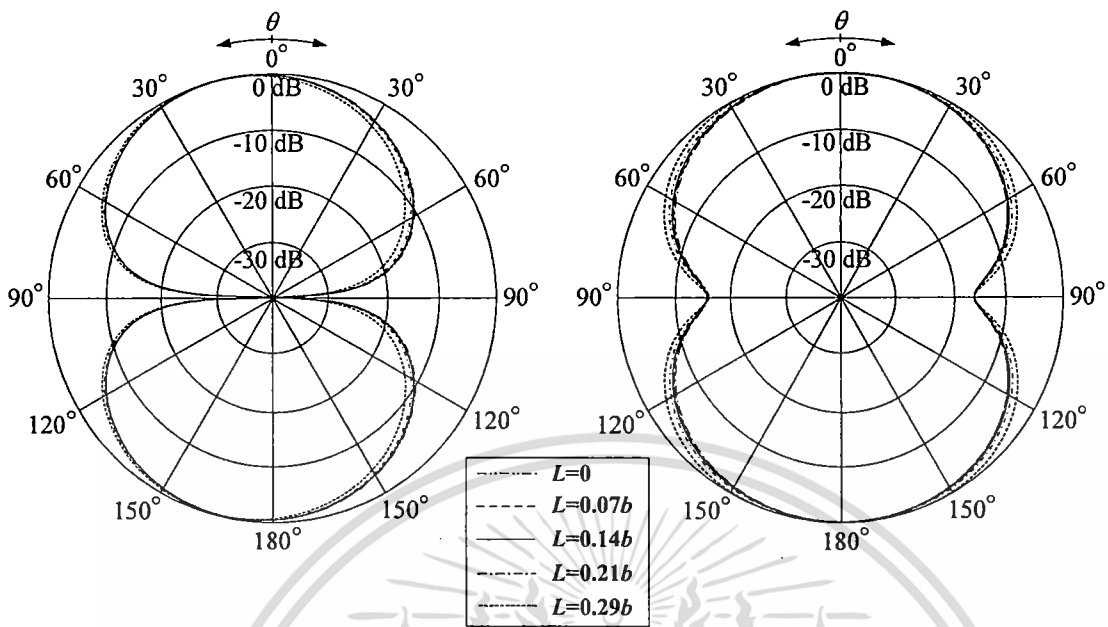


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ก) ความถี่ 3.1GHz

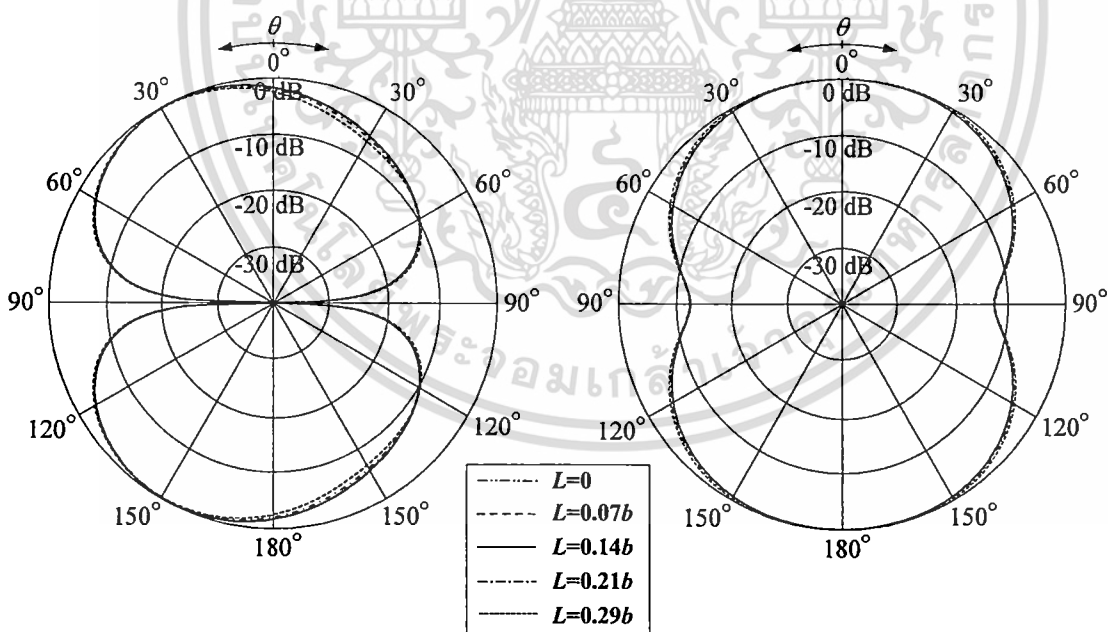
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ข) ความถี่ 5GHz

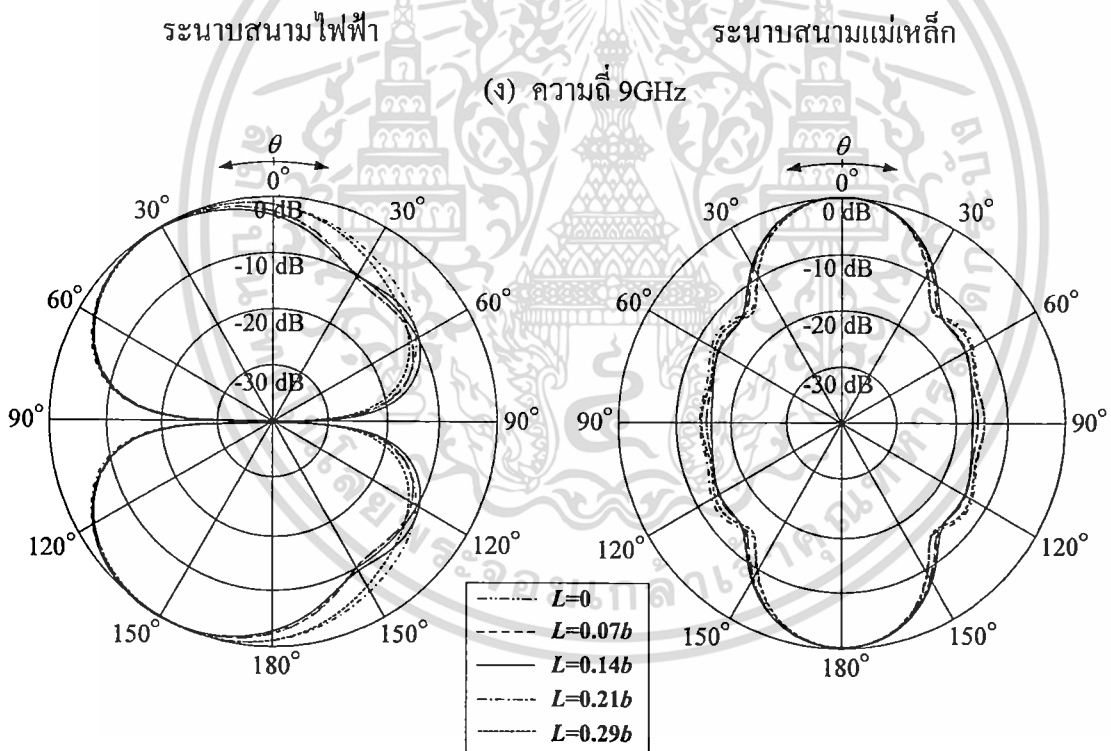
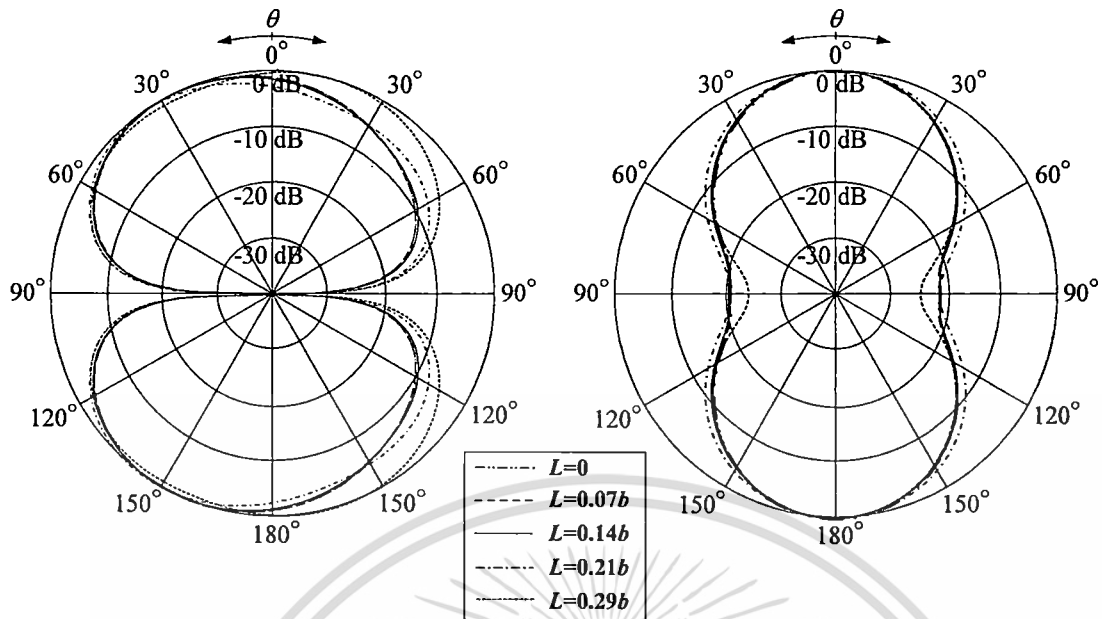


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ความถี่ 6.8GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



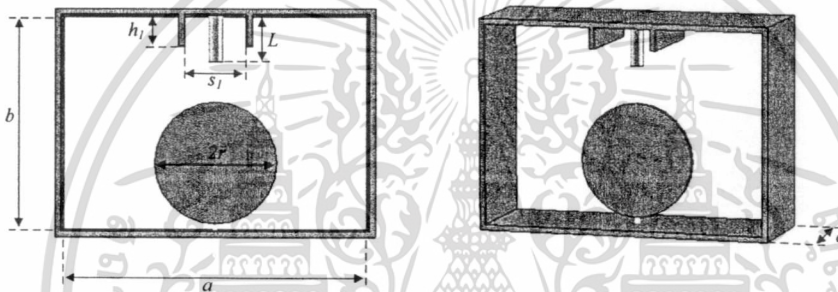
**รูปที่ 4.10** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของหลอดทองแดง  $L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

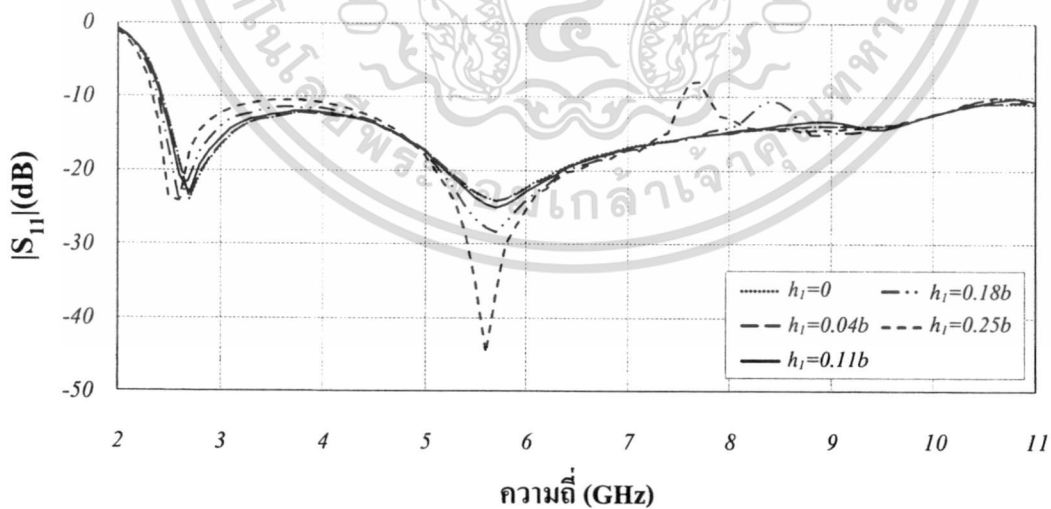
## 4.3 พารามิเตอร์และการจำลองของแท่งปริสติกที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม

### 4.3.1 พารามิเตอร์ความสูง $h_1$ ของแท่งปริสติก

จากหัวข้อ 4.2 ที่ผ่านมามีผลจากการที่ได้เพิ่มหลอดทองแดงเข้าไป ทิศทางลำคลื่นที่ได้ยังไม่เป็นไปตามที่ต้องการคือ ชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  รวมทั้งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ ยังไม่สมมาตรเท่าที่ควร จึงได้นำแท่งปริสติกคู่เข้าไปวางบริเวณทั้งสองข้างของหลอดทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับช่วยในการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยได้เริ่มต้นการวางแท่งปริสติกที่ระยะห่าง  $s_1$  เท่ากับ  $24\text{mm}$  ( $\lambda/4$ ) และได้เปลี่ยนแปลงขนาดความสูง  $h_1$  ของแท่งปริสติกเพื่อหาขนาดความสูง  $h_1$  ของแท่งปริสติกที่เหมาะสม โดยพิจารณาพร้อมกับค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{ dB}$



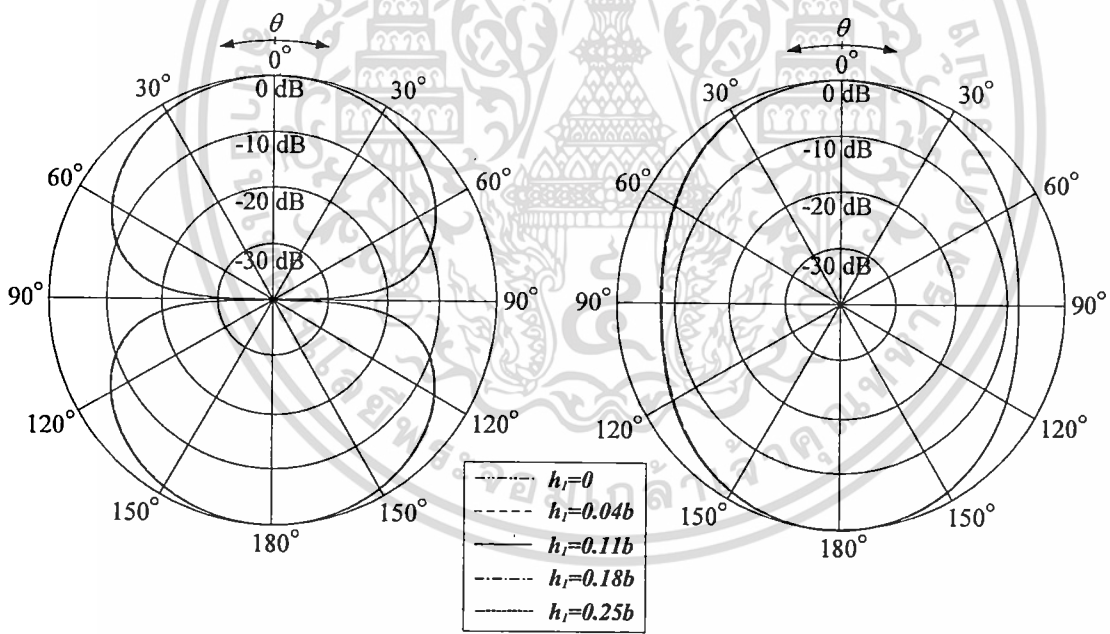
รูปที่ 4.11 สายอากาศสองทิศทาง โมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีหลอดทองแดงและแท่งปริสติกที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.12  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง  $h_1$  ของแท่งปริสติกที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

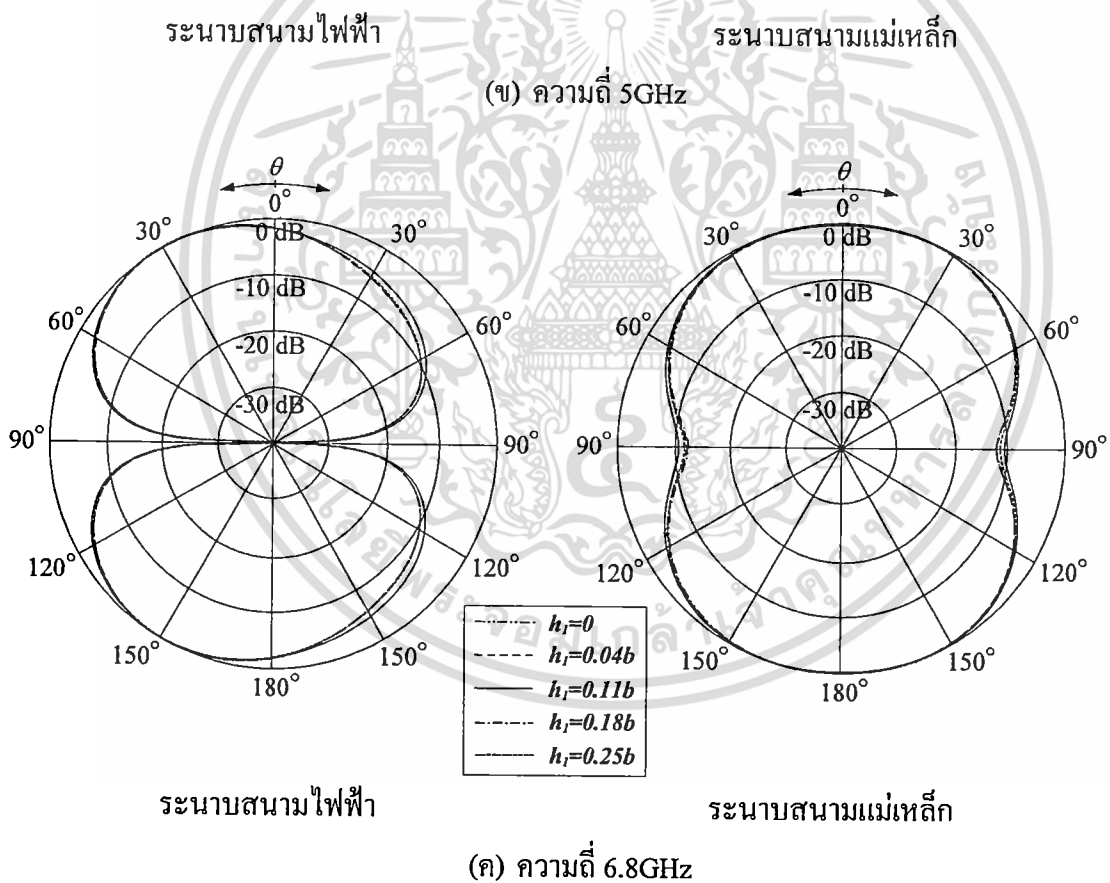
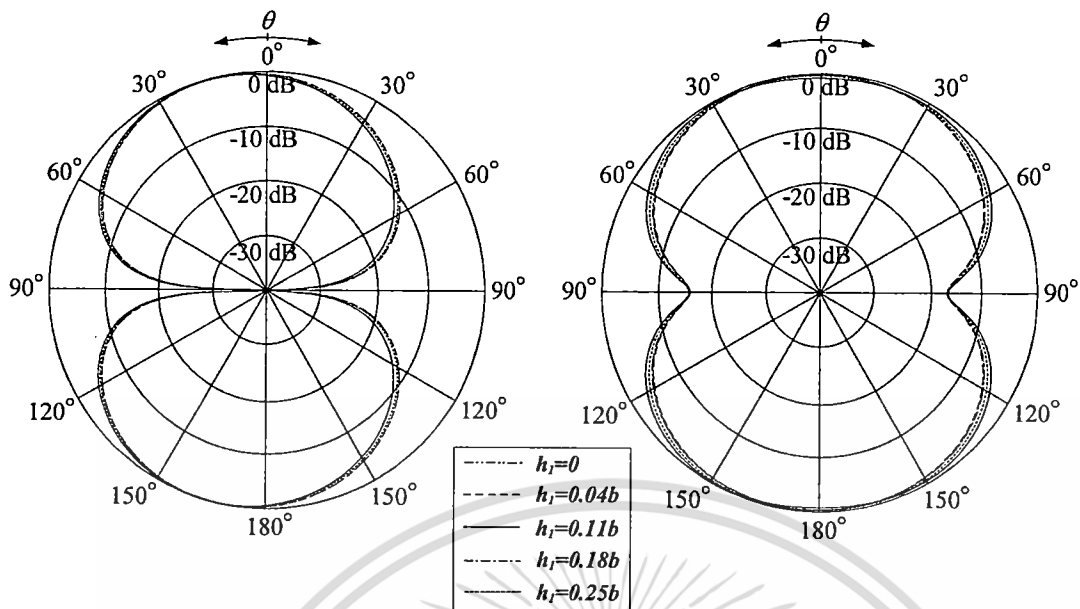
จากรูปที่4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความสูง  $h_1$  ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้นพบว่าจะส่งผลให้ค่า  $|S_{11}|$  เริ่มสูงขึ้นเข้าใกล้ -10dB ในช่วง 2.5 ถึง 4GHz และมีค่าสูงกว่า -10dB ในช่วงความถี่ 7.7 ถึง 7.8GHz เมื่อความสูง  $h_1$  เท่ากับ 0.25b หรือ 7mm และที่ความสูง  $h_1$  เท่ากับ 0.18b จะเข้าใกล้ -10 dB ที่ความถี่ 8.4GHz ในขณะที่ความถี่เดียวกัน จากรูปที่4.13 (ก) ถึง (จ) เมื่อขนาดความสูง  $h_1$  ของแท่งปรสิติเพิ่มขึ้น จะทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่สูงขึ้นไปทิศทางลำคลื่นขึ้นไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  และเกิดความสมมาตรมากขึ้น เช่นเดียวกันเมื่อความสูง  $h_1$  เท่ากับ 0.11b (3mm) ส่งผลแบบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.6GHz มีความสมมาตรมากขึ้น ในขณะที่ความสูง  $h_1$  เท่ากับ 0.18b (5 mm) และ  $h_1$  เท่ากับ 0.25b (7 mm) ก็จะผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 9GHz และ10.6GHz มีความสมมาตรมากขึ้น ในขณะที่ความถี่ 3.1GHz 5GHz และ6.8GHz ยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เนื่องจากเมื่อความสูง  $h_1$  ของลวดทองแดงเท่ากับ  $h_1$  เท่ากับ 0.18b (5 mm) และ  $h_1$  เท่ากับ 0.25b (7 mm) ส่งผลให้  $|S_{11}|$  เข้าใกล้ -10dB และสูงกว่า -10dB ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวมา จึงได้เลือกใช้ความสูง  $h_1$  เท่ากับ 0.11b (3 mm) สำหรับสายอากาศที่นำเสนอนี้



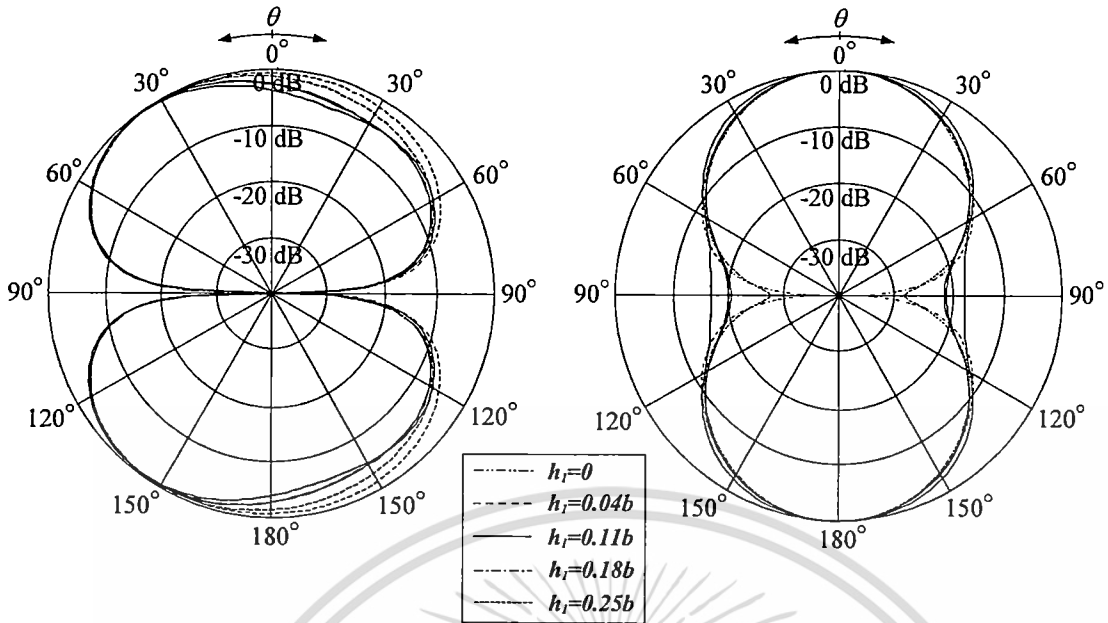
ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ก) ความถี่ 3.1GHz



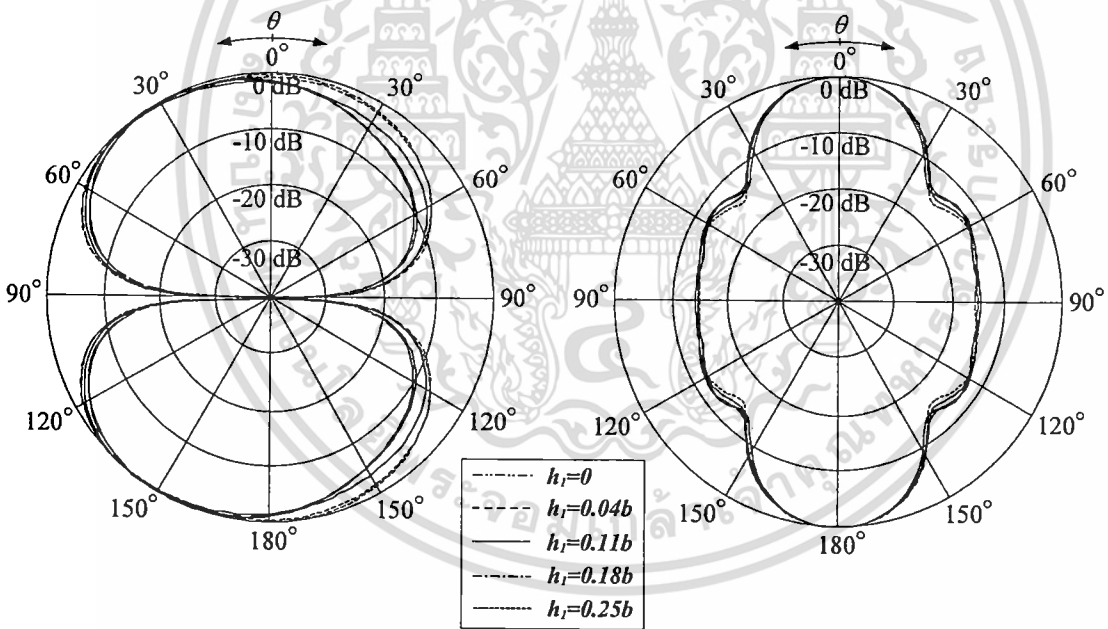
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ง) ความถี่ 9GHz



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

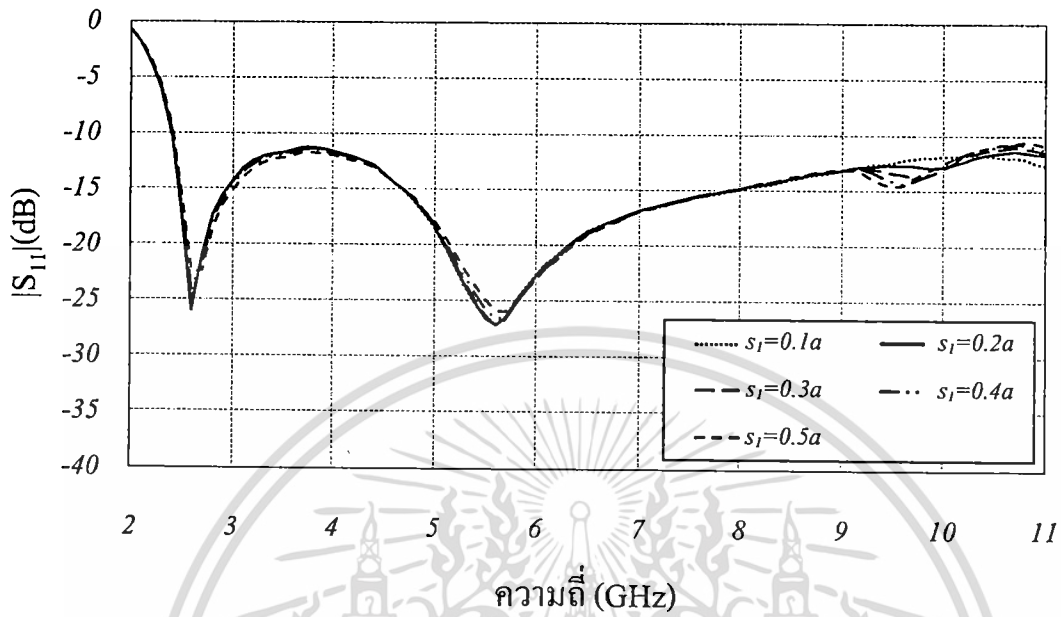
(จ) ความถี่ 10.6GHz

รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง  $h_1$  ของแท่งปรสิตที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม

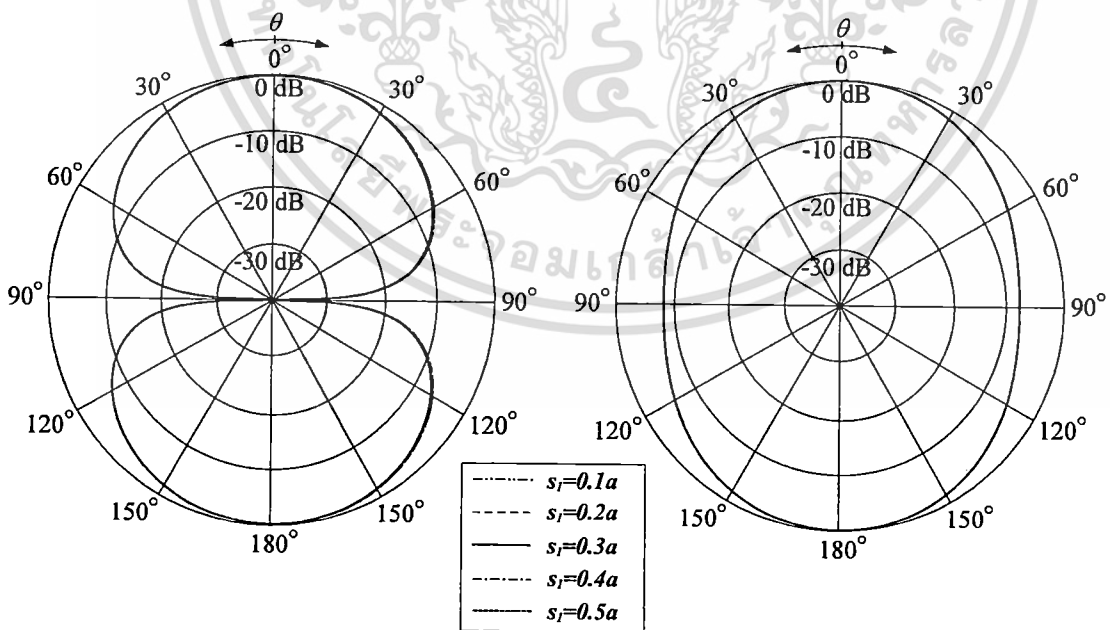
### 4.3.2 พารามิเตอร์ระยะห่าง $s_1$ ของแท่งปรสิต

เมื่อได้ขนาดความสูง  $h_1$  ของแท่งปรสิตที่เหมาะสมแล้ว ต่อมาเป็นการหาระยะห่าง  $s_1$  ที่เหมาะสมของแท่งปรสิตที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$s_1$  และพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ  $yz$  และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ  $xz$  ที่เกิดขึ้น ร่วมกับพิจารณาค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB



รูปที่ 4.14  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $s_1$  ของแท่งปรสิตที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม

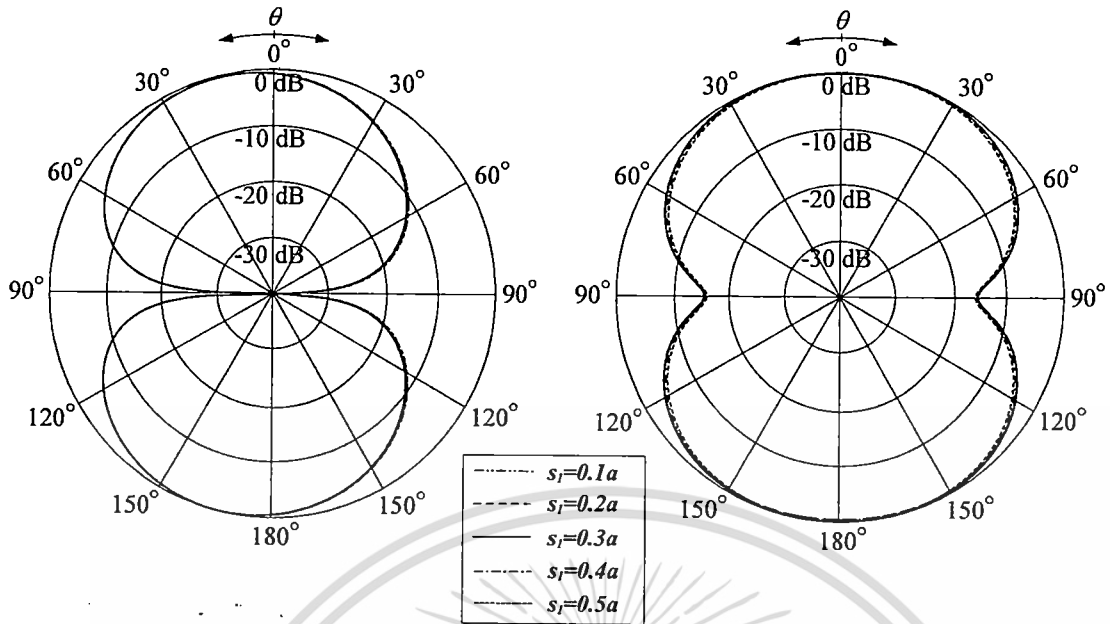


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ความถี่ 3.1GHz

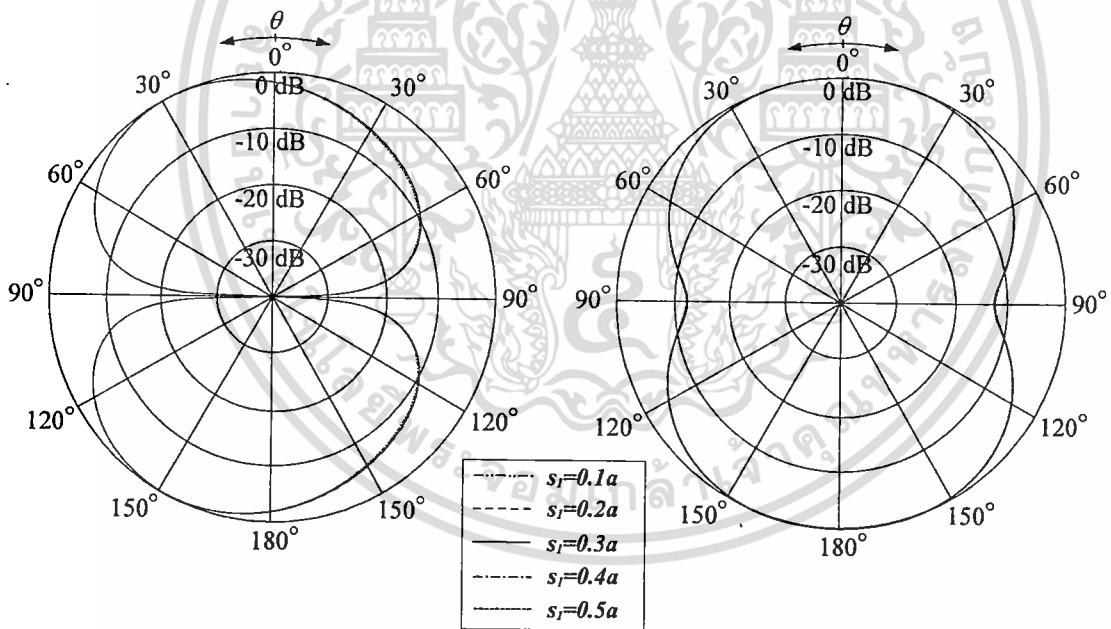
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ข) ความถี่ 5GHz

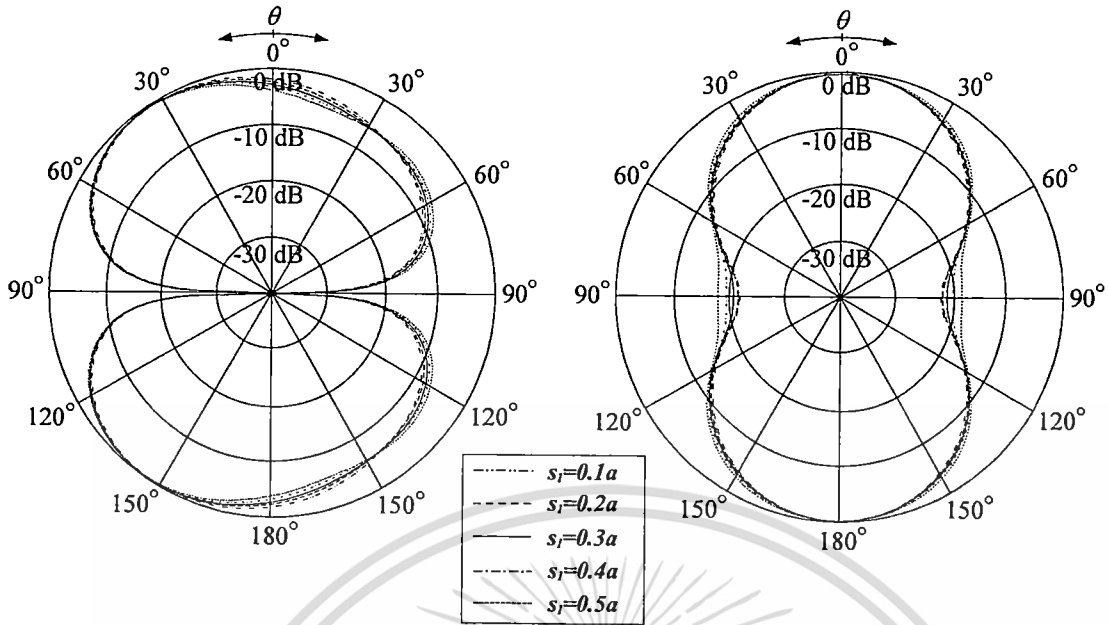


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ความถี่ 6.8GHz

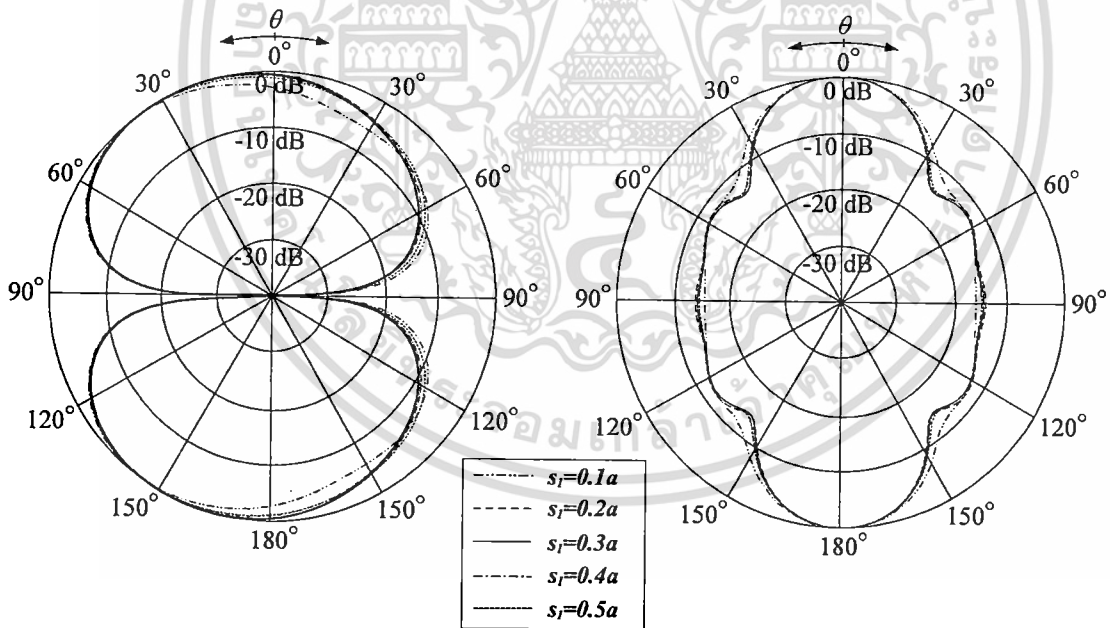
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ง) ความถี่ 9GHz



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(จ) ความถี่ 10.6GHz

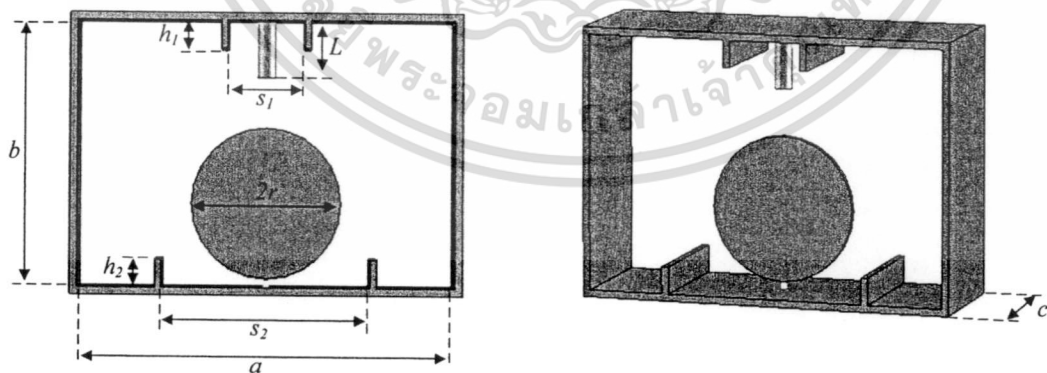
รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $s_1$  ของการวางแท่งปรสิติกที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อได้เปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $s_1$  ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม ค่า  $|S_{11}|$  จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักและยังต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  ตลอดช่วงความถี่ 3.1GHz ถึง 10.6GHz และในส่วนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะพบว่าที่ความถี่ 3.1GHz 5GHz และ 6.8GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 9GHz ซึ่งไม่มากนัก ในขณะที่ความถี่ 10.6GHz เมื่อระยะห่าง  $s_1$  ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม เท่ากับ  $0.1a$  (4mm) จะส่งผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเกิดความไม่สมมาตรมีทิศทางการลำคลื่นที่ออกจาก  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  ค่อนข้างมาก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกิดการยกขึ้นของลำคลื่นค่อนข้างมาก แต่เมื่อระยะห่าง  $s_1$  เท่ากับ  $0.2a$  (8mm) เป็นต้นไป แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ระยะห่าง  $s_1$  เท่ากับ  $0.2a$  (8mm) สำหรับในการจำลองของสายอากาศที่นำเสนอ

#### 4.4 พารามิเตอร์และการจำลองของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม

หลังจากที่ได้พารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสม จากหัวข้อ 4.1, 4.2 และ 4.3 แล้ว ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาพารามิเตอร์ความสูง  $h_2$  และระยะ  $s_2$  ของแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม เมื่อพารามิเตอร์  $a \times b \times c$  เท่ากับ  $40 \times 28 \times 15\text{ mm}$  ความยาวหลอดทองแดง  $L$  เท่ากับ 6mm ความสูง  $h_1$  ของแท่งปรสิติเท่ากับ 3mm และระยะห่าง  $s_1$  ของแท่งปรสิติเท่ากับ 8mm ดังแสดงในรูปที่ 4.16

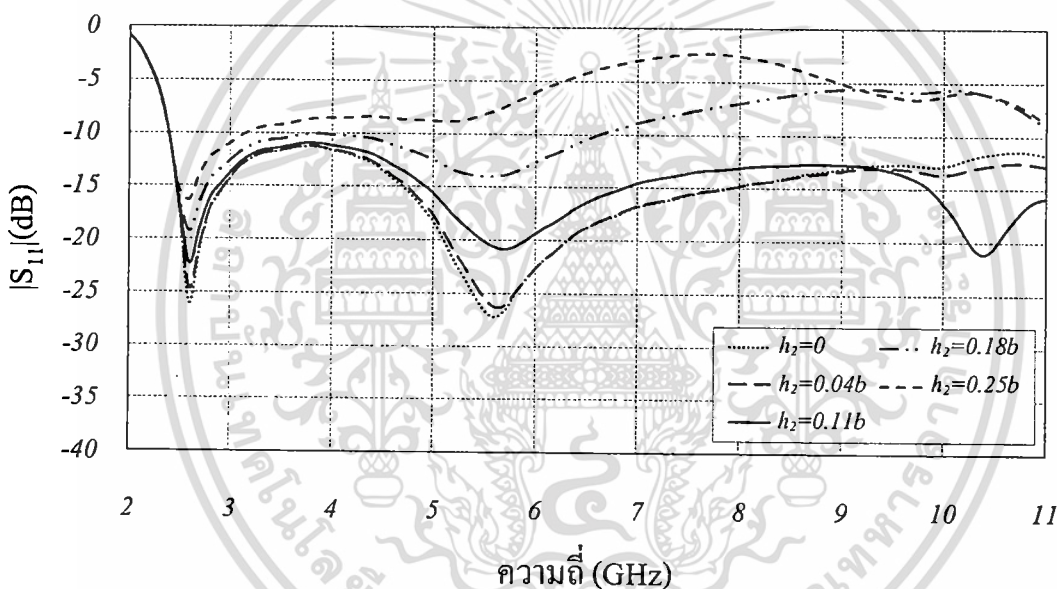


รูปที่ 4.16 สายอากาศสองทิศทางโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีหลอดทองแดงและแท่งปรสิติที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 พารามิเตอร์ความสูง $h_2$ ของแท่งปริสติก

ในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 ที่ผ่านมา ได้นำลวดทองแดงและแท่งปริสติกมาวางที่ผนังภายใน ด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม ตามลำดับ ซึ่งได้ผลต่างๆดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมาและ เพื่อเป็นการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้ได้ดียิ่งขึ้น จึงได้เพิ่มแท่งปริสติกเข้าไปวางที่ผนังภายใน ด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม บริเวณทั้งสองข้างของตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยการพิจารณาค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใน ระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ  $yz$  และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ  $xz$  ที่เกิดขึ้น เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความสูง  $h_2$  ของแท่งปริสติก โดยได้เริ่มต้นการวางแท่งปริสติกที่ระยะห่าง  $s_2$  เท่ากับ  $24\text{ mm} (\lambda / 4)$  เพื่อหาขนาดความสูง  $h_2$  ของแท่งปริสติกที่เหมาะสม

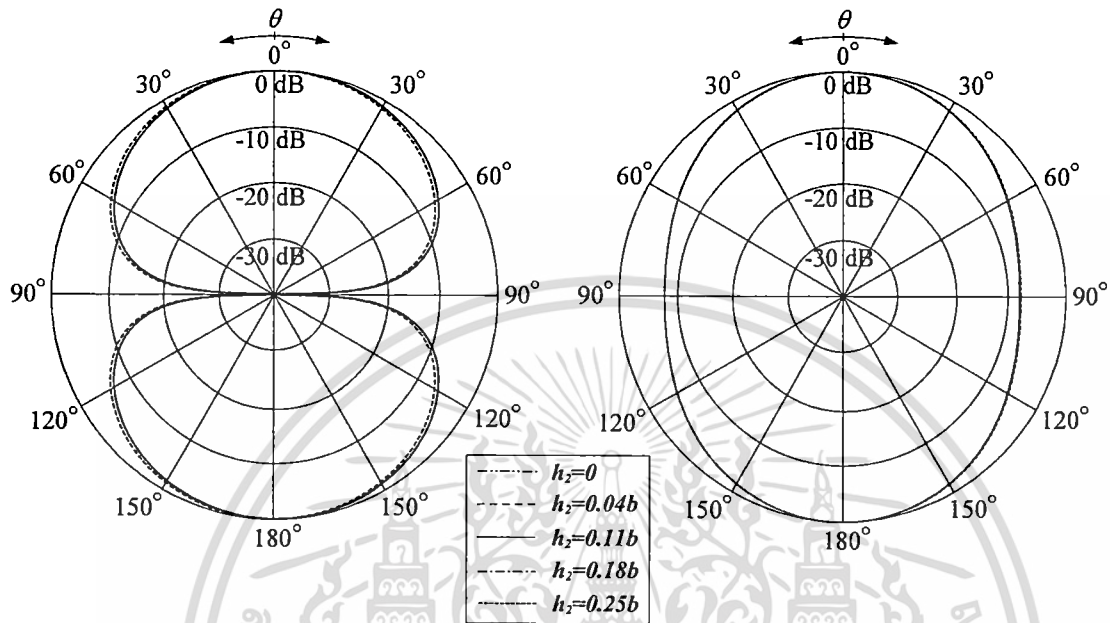


รูปที่ 4.17  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง  $h_2$  ของแท่งปริสติกที่ผนังภายใน ด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.17 แสดงผลค่า  $|S_{11}|$  เมื่อได้เปลี่ยนแปลงความสูง  $h_2$  ของแท่งปริสติกที่ผนังภายใน ด้านบนของวงแหวนสี่เหลี่ยม จากผลที่ได้จะพบว่า เมื่อความสูง  $h_2$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ตั้งแต่ความถี่ 3GHz มีค่า  $|S_{11}|$  นั้นสูงขึ้นด้วย โดยเมื่อความสูงของแท่งปริสติก  $h_2$  เท่ากับ  $0.18b$  (5mm) เป็นต้นไป จะส่งผลให้ค่า  $|S_{11}|$  นั้นสูงกว่า  $-10\text{dB}$  ตั้งแต่ช่วงความถี่ 6.6GHz ลงมา

จากรูปที่ 4.18 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูง  $h_2$  ของแท่งปริสติก จะเห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อความสูง  $h_2$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $0.18b$  (5mm) และเมื่อความถี่สูงขึ้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเกิดความเพี้ยนที่ความถี่ 6.8GHz ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $|S_{11}|$  ที่สูงขึ้นกว่า  $-10\text{dB}$  ซึ่งจากผลที่ได้จึงเลือกไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

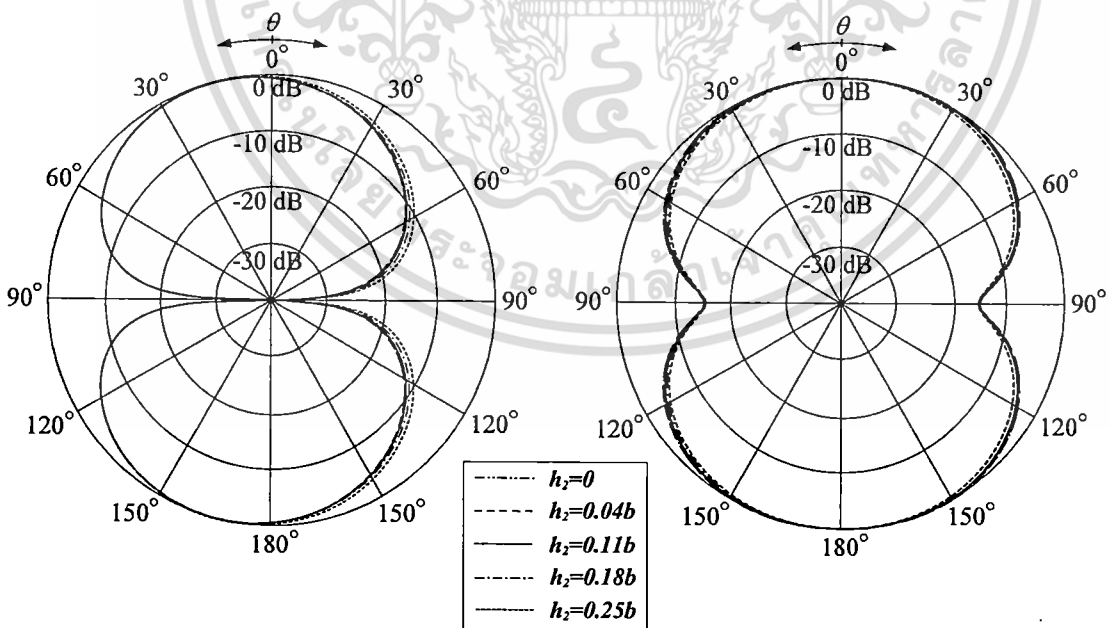
ขนาดความสูง  $h_2$  ของแท่งปรสิติกเท่ากับ  $0.11b$  (3mm) เนื่องจาก  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  และมีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงความถี่ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เพี้ยนน้อยที่สุด สำหรับใช้ในการจำลองพารามิเตอร์อื่นต่อไป



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ก) ความถี่ 3.1GHz

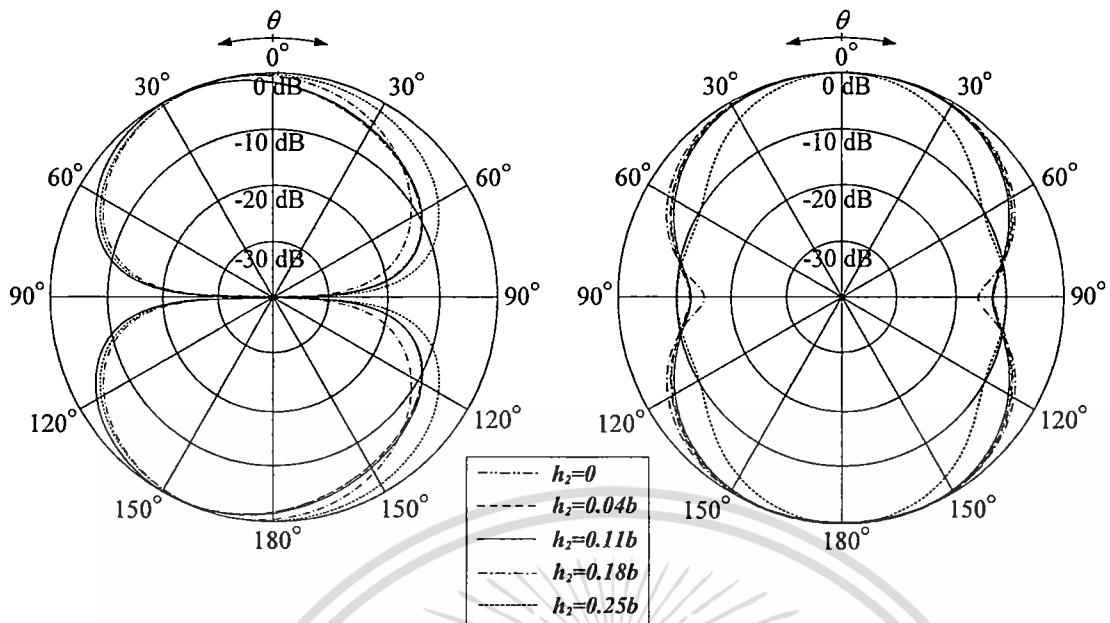


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ข) ความถี่ 5GHz

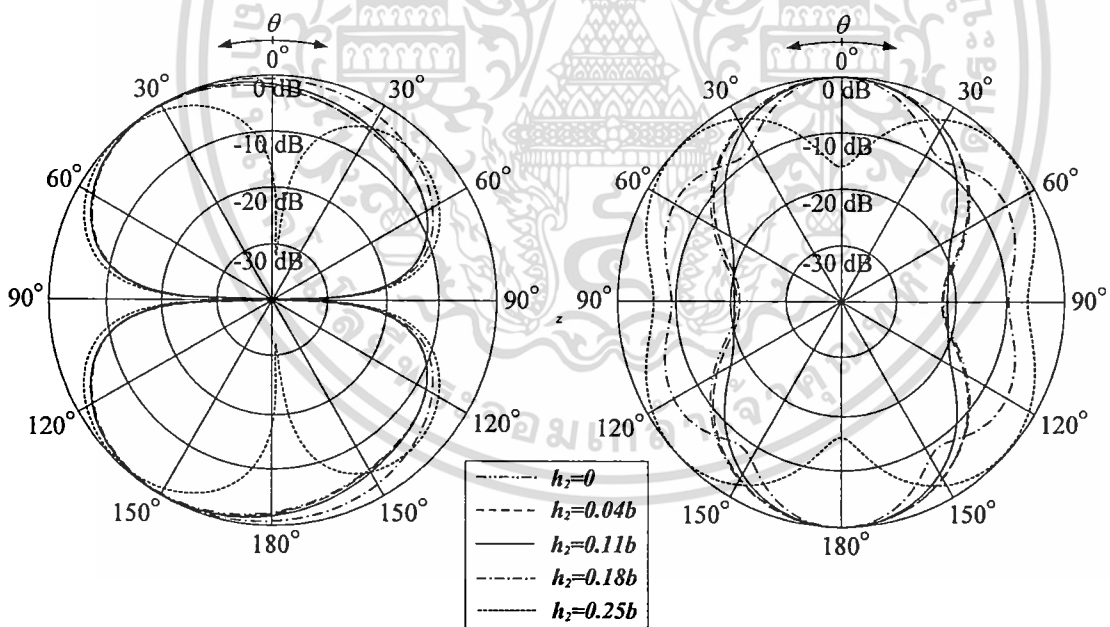
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ความถี่ 6.8GHz

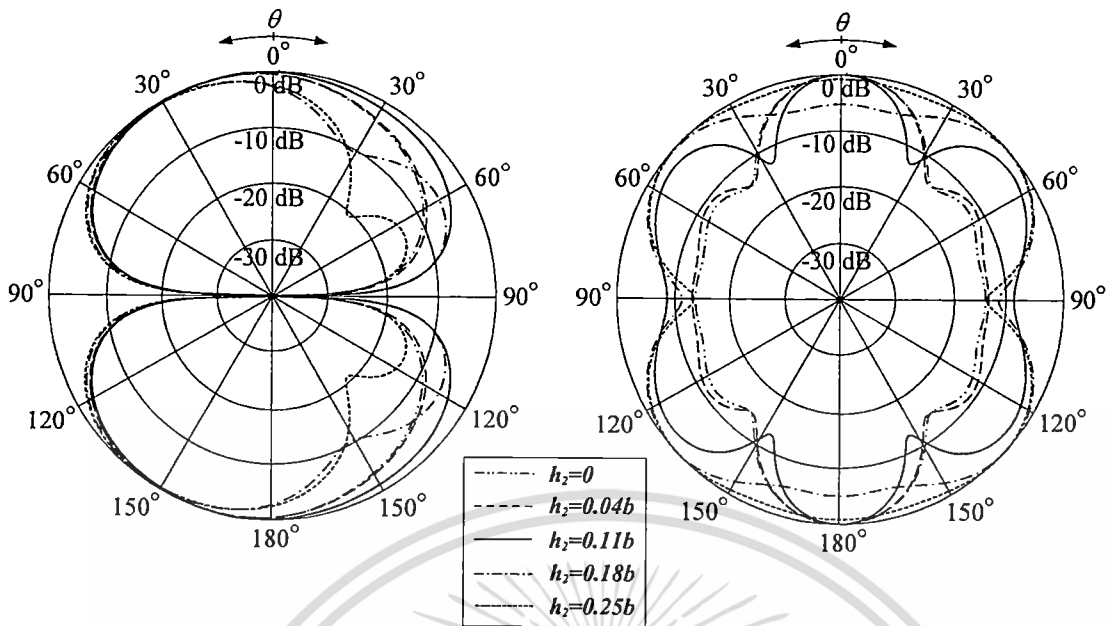


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ง) ความถี่ 9GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(จ) ความถี่ 10.6GHz

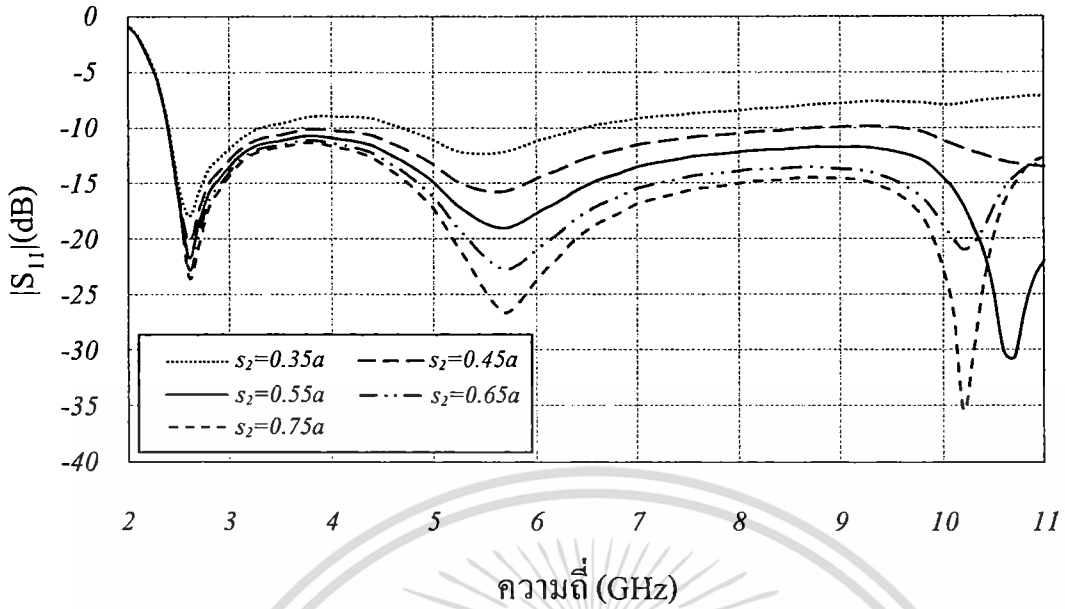
รูปที่ 4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง  $h_2$  ของแท่งปรสิติกที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม

#### 4.4.2 พารามิเตอร์ระยะห่าง $s_2$ ของแท่งปรสิติก

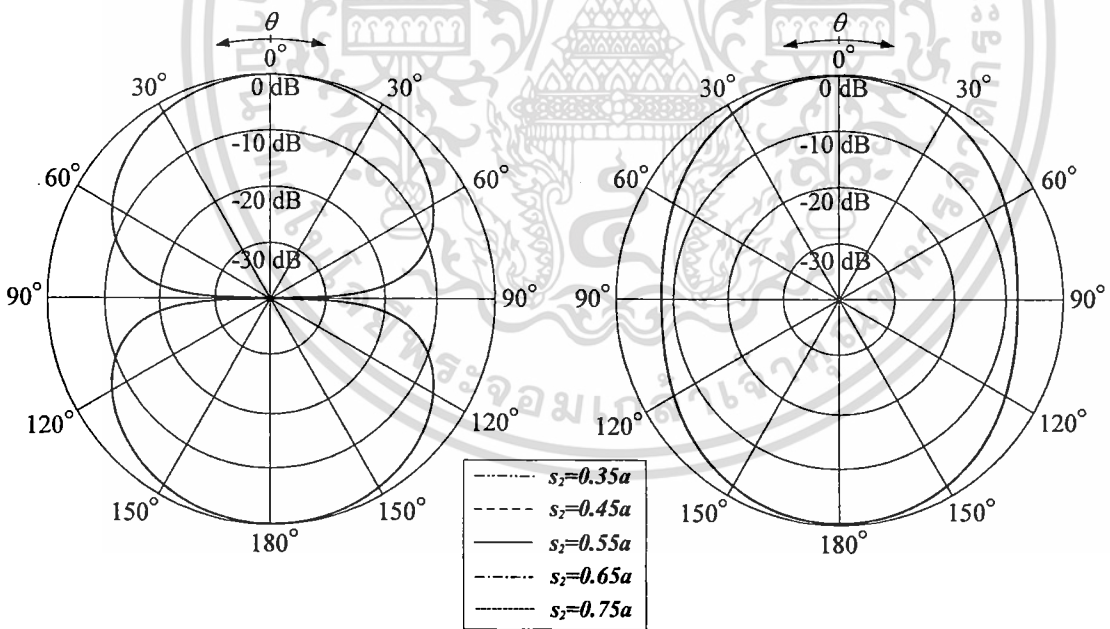
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาระยะ  $s_2$  ซึ่งเป็นระยะการวางแท่งปรสิติกที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยการเปลี่ยนแปลงระยะ  $s_2$  เมื่อพารามิเตอร์  $a \times b \times c$  เท่ากับ  $40 \times 28 \times 15$  มม ความยาวลวดทองแดง ซึ่งได้เริ่มต้นที่ระยะ  $s_2$  เท่ากับ  $0.35a$  (14mm) และพิจารณาค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10dB และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น เช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา

จากรูปที่ 4.20 แสดงค่า  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $s_2$  ของแท่งปรสิติกที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม ซึ่งจากรูปจะพบว่าเมื่อระยะห่าง  $s_2$  มีระยะเข้าใกล้กับตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมโดยมีระยะห่าง  $s_2$  เท่ากับ  $0.35a$  (14mm) และ  $0.45a$  (18mm) จะส่งผลให้ค่า  $|S_{11}|$  สูงกว่า -10dB และเมื่อระยะห่าง  $s_2$  มีค่าเท่ากับ  $0.55a$  (22mm) หรือมากกว่า  $0.55a$  ค่า  $|S_{11}|$  มีแนวโน้มที่ดี คือมีค่าต่ำกว่า -10dB ตลอดช่วงความถี่ 3.1GHz ถึง 10.6GHz โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 5.5GHz ถึง 6GHz และ 10GHz ถึง 11GHz มีค่า  $|S_{11}|$  ที่ต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19  $|S_{11}|$  เทียบกับความถี่ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $s_2$  ของแท่งปรสิติกที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม

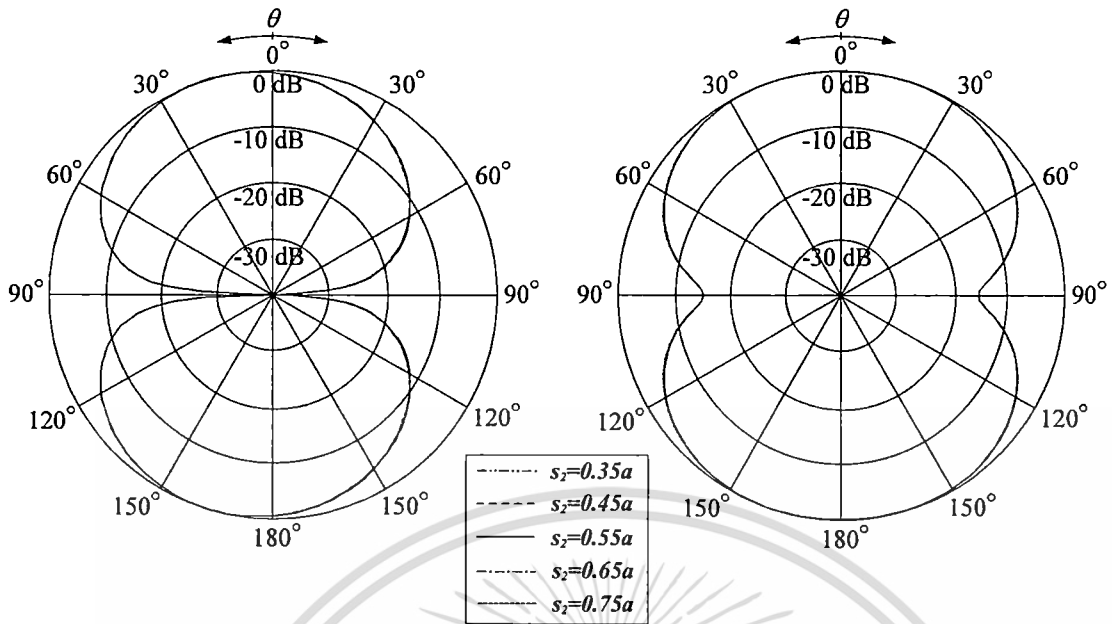


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ก) ความถี่ 3.1GHz

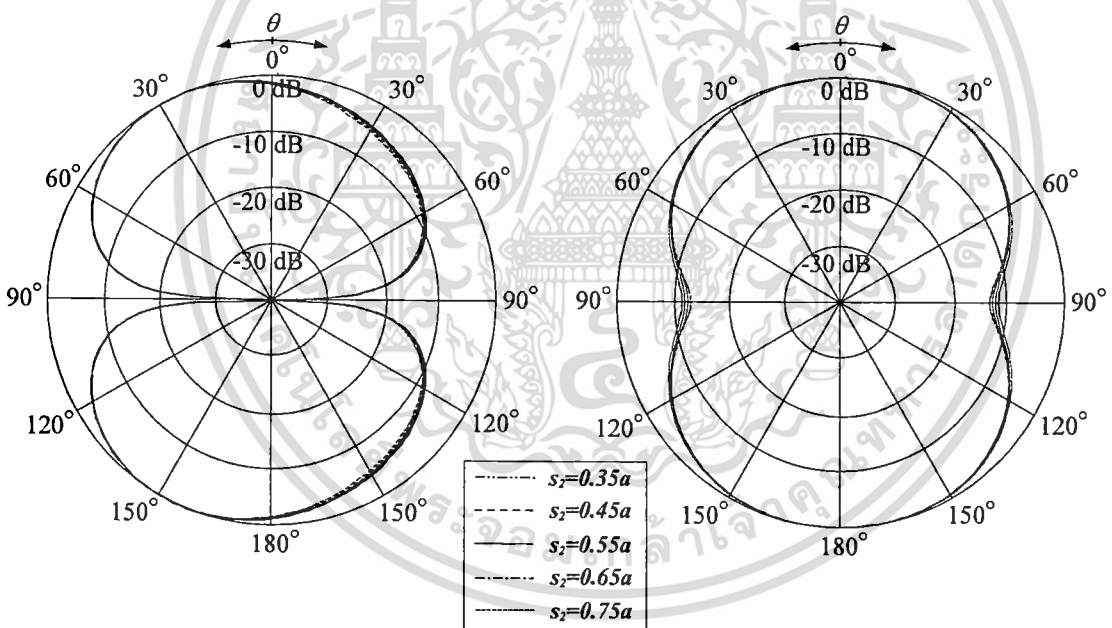
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ข) ความถี่ 5GHz

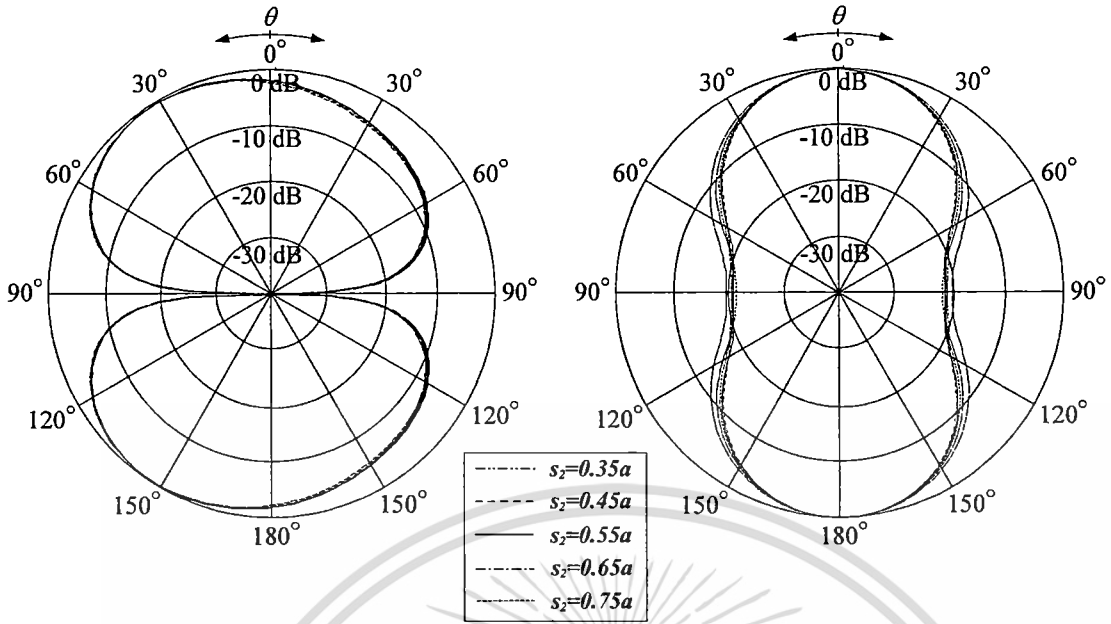


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ความถี่ 6.8GHz

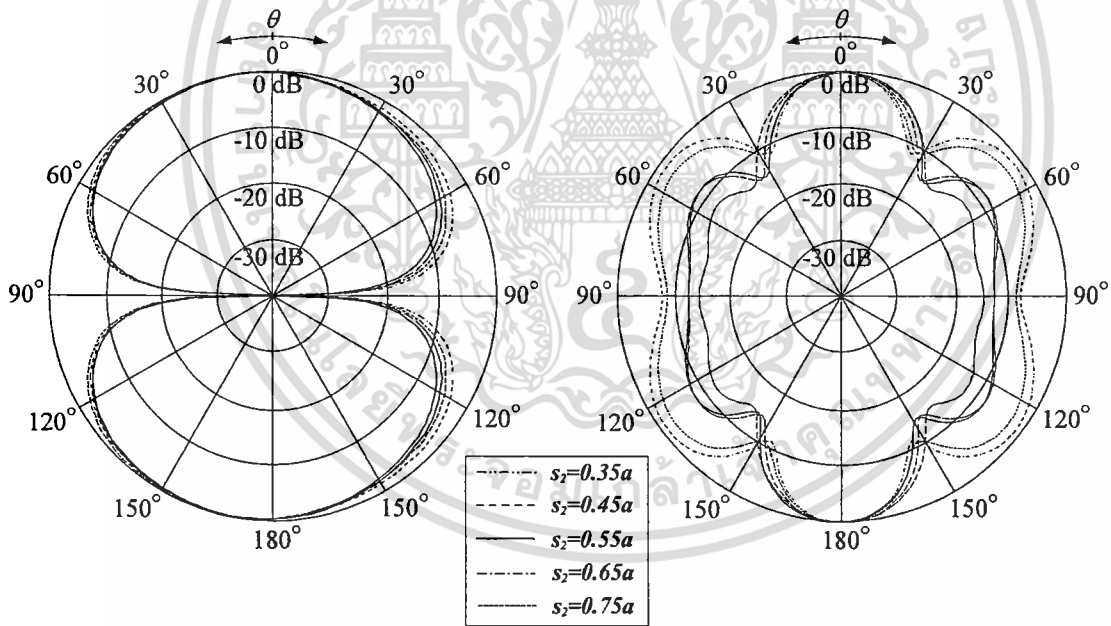
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ง) ความถี่ 9GHz



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(จ) ความถี่ 10.6GHz

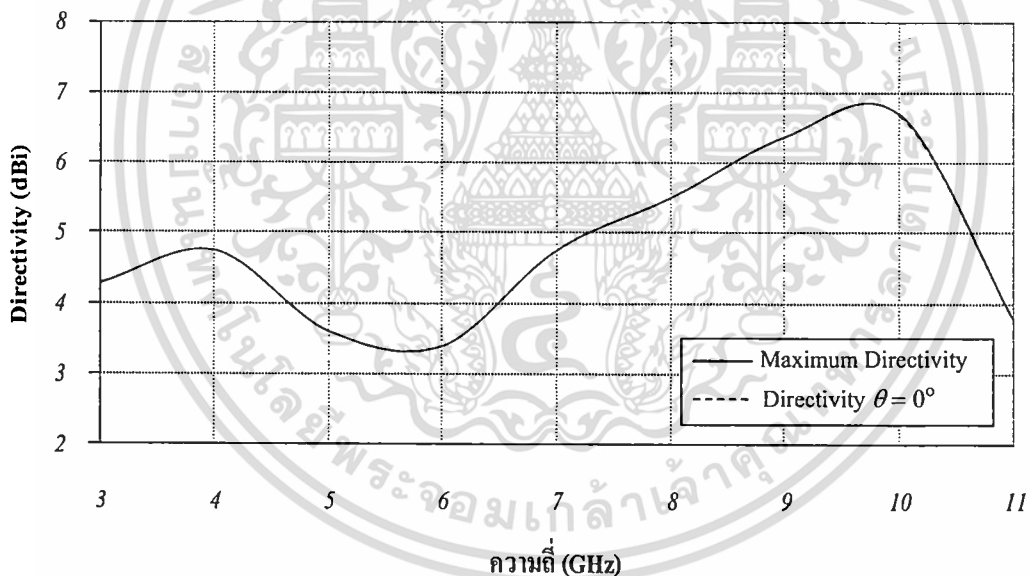
รูปที่ 4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $s_2$  ของการวางแท่งปรสิติกที่ผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.20 (ก) ถึง (จ) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ  $yz$  และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ  $xz$  ที่ความถี่ 3.1GHz 5GHz 6.8GHz 9GHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 10.6GHz จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $s_2$  ของแท่งปรสิต แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 3.1GHz 5GHz 6.8GHz และที่ความถี่ 9GHz จะมีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มากนัก และเมื่อระยะห่าง  $s_2$  เท่ากับ  $0.65a$  (26mm) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 10.6GHz จะเกิดการสมมาตรกันมากขึ้น โดยลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กในแต่ละความถี่ จะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป โดยมีความแรงสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  ตลอดทั้งย่านความถี่

#### 4.5 การจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยายของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ซึ่งจะแสดงผลโดยการเปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุม  $\theta = 0^\circ$  ของสายอากาศที่นำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

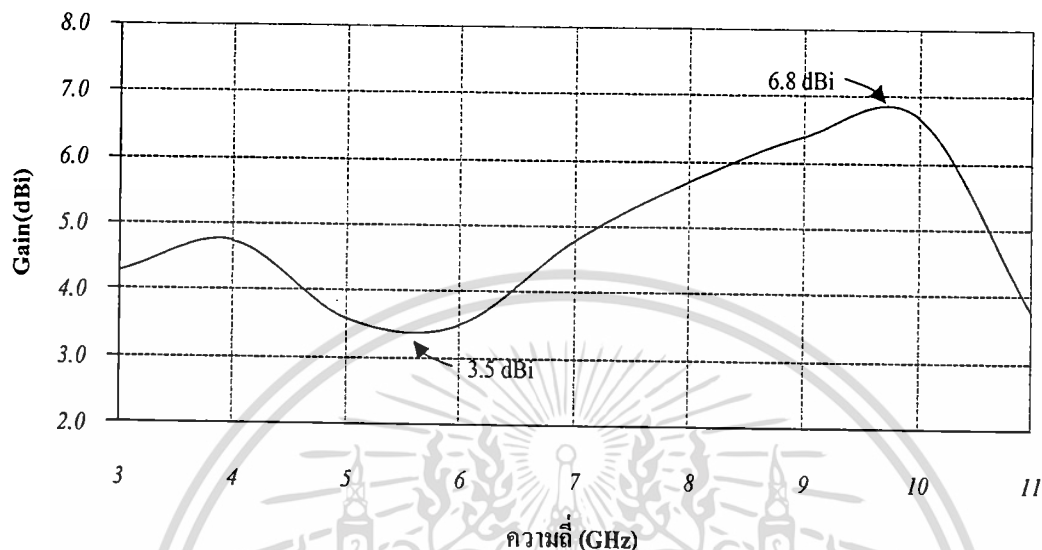


รูปที่ 4.21 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม  $\theta = 0^\circ$  ของสายอากาศที่นำเสนอ

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม  $\theta = 0^\circ$  ของสายอากาศสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิต พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม  $\theta = 0^\circ$  ของสายอากาศ มีค่าเท่ากันตลอดช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6GHz ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าถ้าคลื่นในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  มีความแรงมากที่สุด บริเวณตรงกลางของวงแหวนสี่เหลี่ยมช่องเปิดทั้งสองด้านของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ผลการจำลองอัตราขยายในทิศทางที่ต้องการ ( $\theta = 0^\circ$  และ  $\phi = 90^\circ$ ) ตลอดช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6GHz ค่าอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดที่ได้เท่ากับ 3.5dBi และ 6.8dBi ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



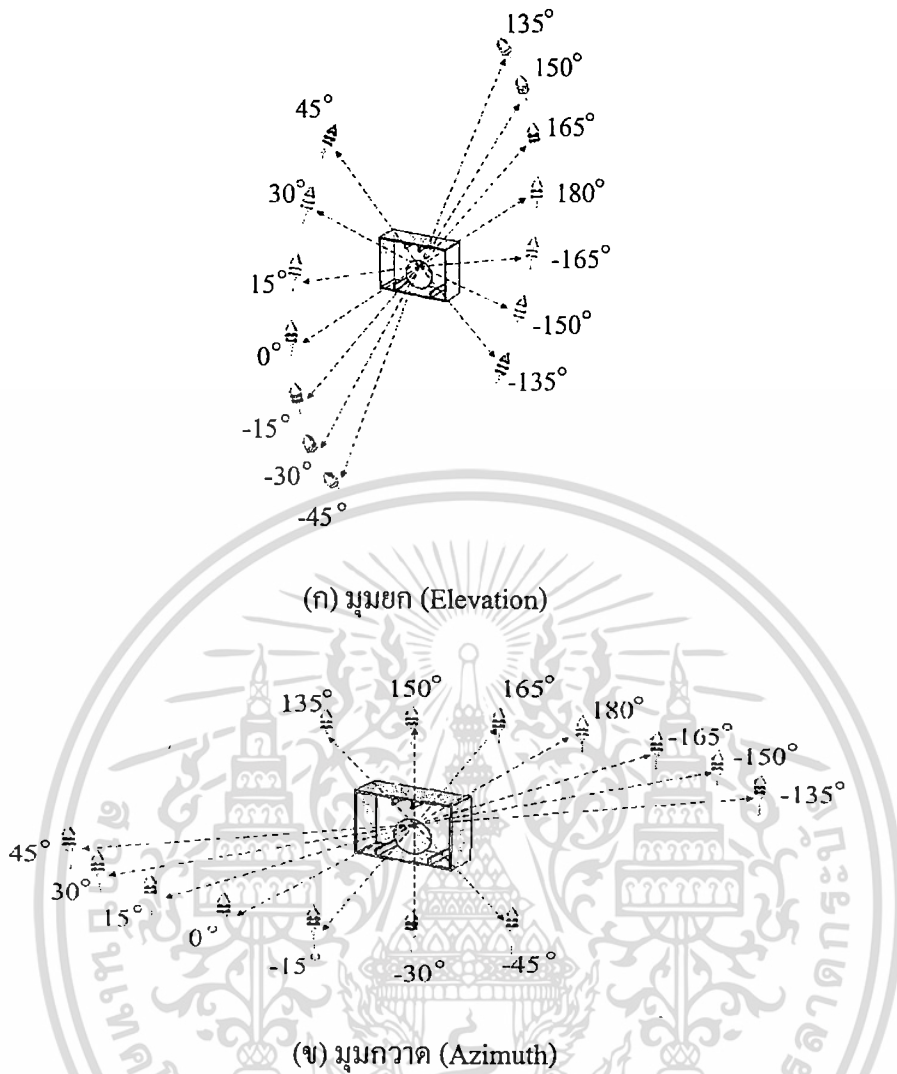
รูปที่ 4.22 อัตราขยายเทียบกับความถี่ของสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดโดยใช้โครงสร้างปริสติก

#### 4.6 การจำลองสภาพการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ที่มุมต่างๆ

ในการส่งและรับสัญญาณใดๆแบบไร้สายโดยผ่านทางสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ สัญญาณที่ส่งและรับมาได้นั้นควรจะต้องมีความสมบูรณ์หรือผิดเพี้ยนน้อยที่สุด ซึ่งในการจำลองการส่งและรับสัญญาณของสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้จำลองการส่งสัญญาณอิมพัลส์โดยที่สายอากาศทางด้านส่งเป็นสายอากาศที่นำเสนอ คือ สายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปริสติกและลวดทองแดงและสายอากาศทางด้านรับกำหนดให้เป็นโพรบเสมือนจริง ดังแสดงลักษณะการจำลองในรูปที่ 4.23 (ก) และ (ข)

สำหรับการจำลองการส่งและการรับสัญญาณอิมพัลส์นั้นจะแสดงให้เห็นถึงความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ที่มุมต่างๆจากสัญญาณอิมพัลส์เดียวกันนั้น ในแต่ละมุมมีความผิดเพี้ยนไปมาน้อยเพียงใด โดยการพิจารณาค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณส่งและสัญญาณเอาต์พุตที่รับได้จากโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆ โดยมีระยะทางในการส่งสัญญาณอิมพัลส์จากสายอากาศส่งไปยังโพรบเสมือนจริงเท่ากับ 30cm ซึ่งอยู่ในขอบเขตสนามระยะไกลของสายอากาศทางด้านส่งและรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 การจำลองสายอากาศที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์

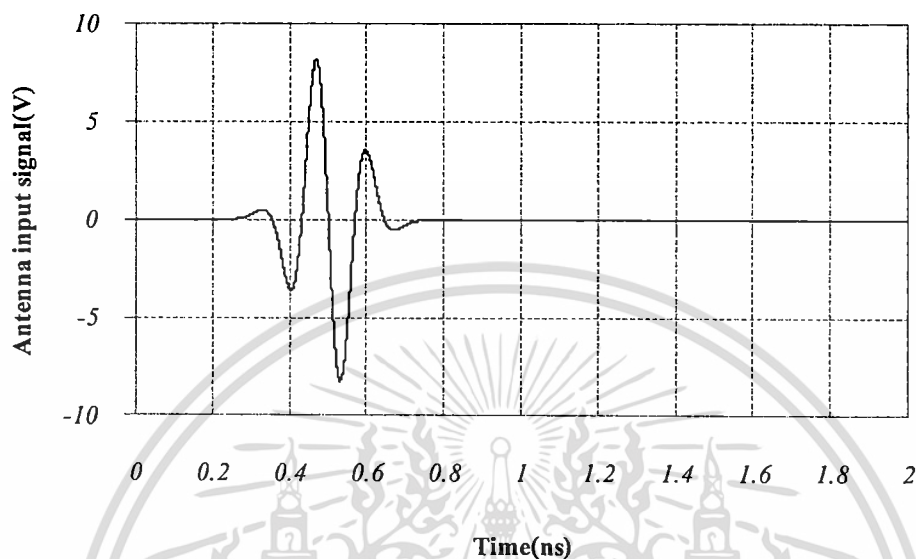
#### 4.6.1 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงเวลา (Time domain)

ในการจำลองการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ สัญญาณที่นำมาใช้ในการพิจารณาเป็นสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ [22 - 23] ซึ่งใช้ในย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ซึ่งถูกกำหนดตามมาตรฐานของ FCC เนื่องจากสัญญาณพัลส์แบบเกาส์จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง สำหรับระบบภายในอาคาร [24] โดยสัญญาณอิมพัลส์แบบเกาส์จะเป็นพัลส์แบบเกาส์ที่เป็นอนุพันธ์อันดับที่ 5 แสดงดังสมการที่ 4.1

$$s_1(t) = c \left( -\frac{t^5}{\sqrt{2\pi}\sigma^{11}} + \frac{10t^3}{\sqrt{2\pi}\sigma^9} - \frac{15t}{\sqrt{2\pi}\sigma^7} \right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

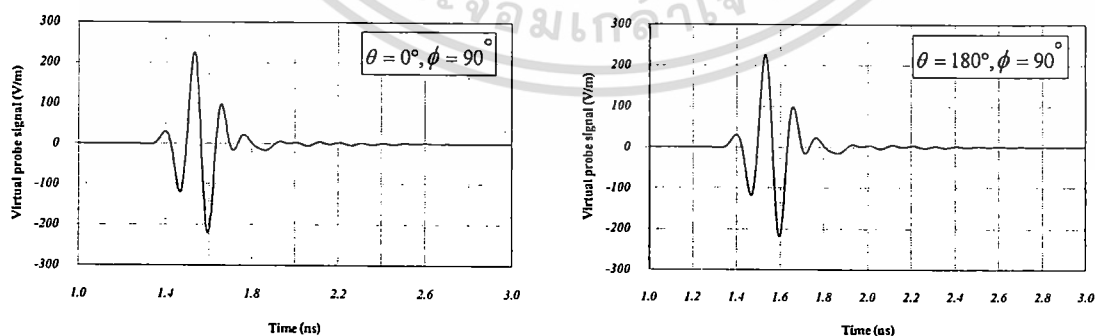
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $c$  เป็นค่าคงที่ที่ทาง FCC เป็นผู้กำหนดซึ่งมีค่าเท่ากับ  $10^{-7}$  และ  $\sigma$  มีค่าเท่ากับ 51 ps เพื่อที่ทำให้รูปร่างของสเปกตรัมเป็นไปตามที่ FCC กำหนด สัญญาณอิมพัลส์ที่ทำการพิจารณาจะเป็นสัญญาณอินพุตของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.24



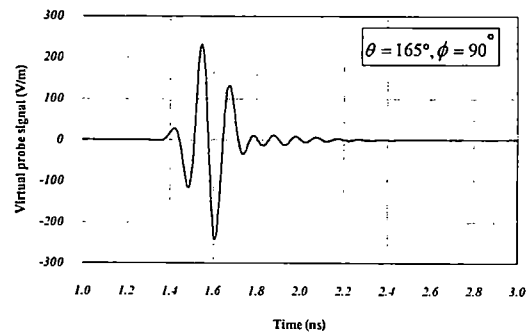
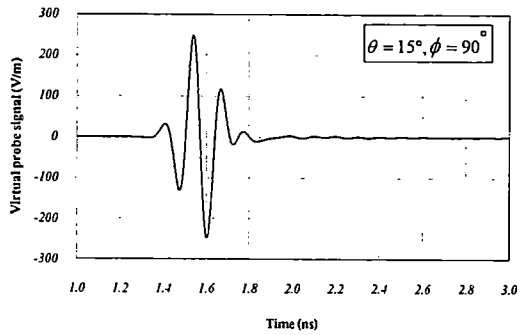
รูปที่ 4.24 สัญญาณอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงเวลา

จากรูปที่ 4.24 แสดงถึงสัญญาณอินพุตของสายอากาศที่ได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ เป็นสัญญาณพัลส์สั้นซึ่งทำให้สเปกตรัมทางความถี่มีความกว้างจนครอบคลุมถึงย่านความถี่กว้างยิ่งยวด และสัญญาณอินพุตที่ได้นี้จะถูกส่งสัญญาณจากสายอากาศที่นำเสนอที่ได้ทำการจำลองไว้ ส่งไปยังโพรบเสมือนจริง ซึ่งผลการจำลองของสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆ ดังได้แสดงในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26

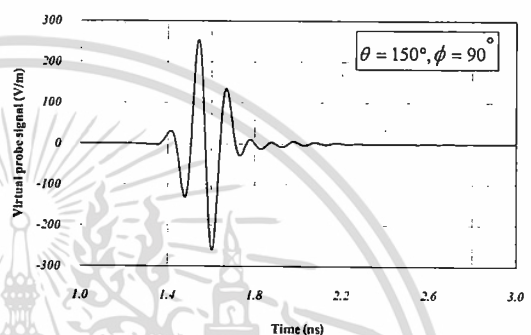
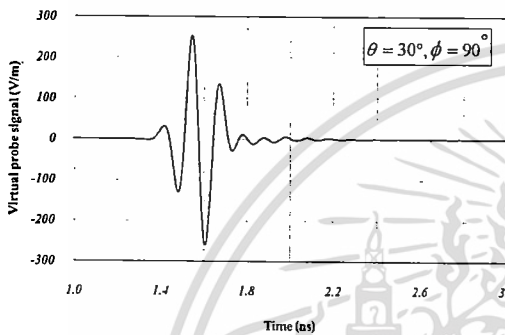


(ก) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $180^\circ$

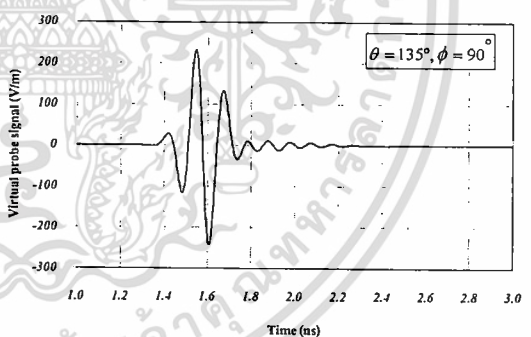
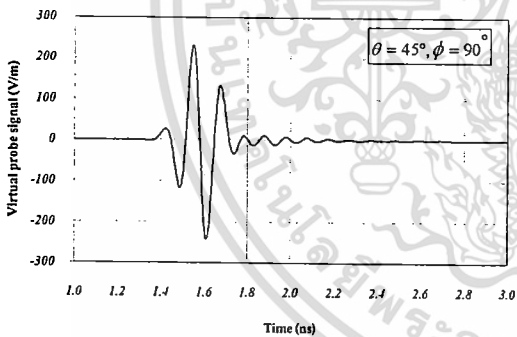
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



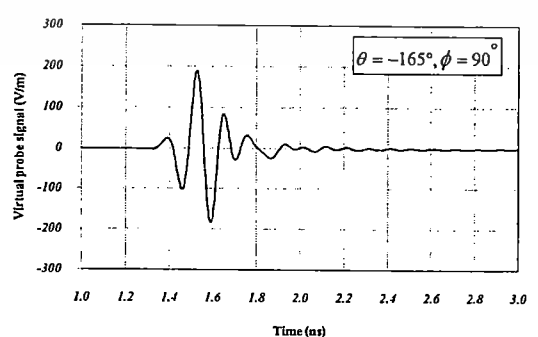
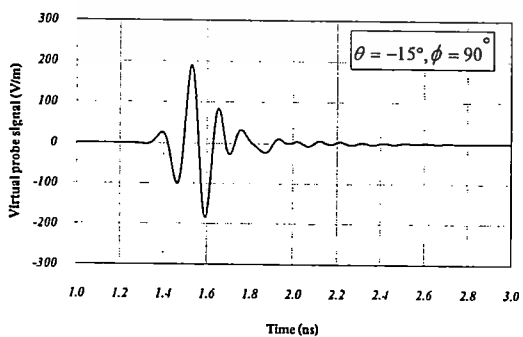
(ข) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 15^\circ$  และ  $165^\circ$



(ค) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 30^\circ$  และ  $150^\circ$

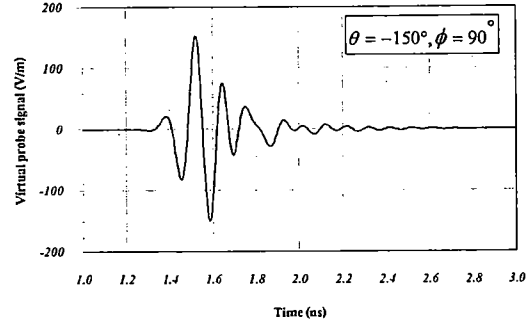
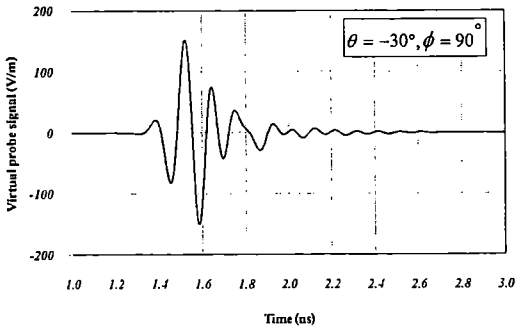
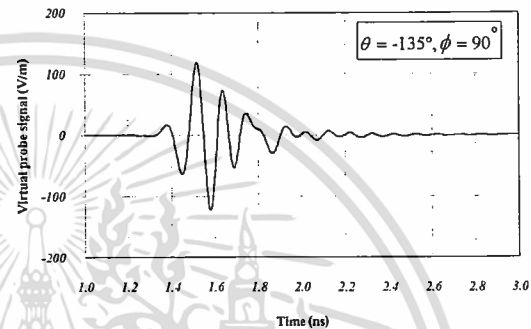
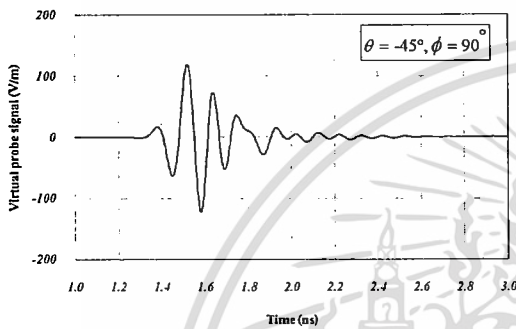


(ง) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 45^\circ$  และ  $135^\circ$



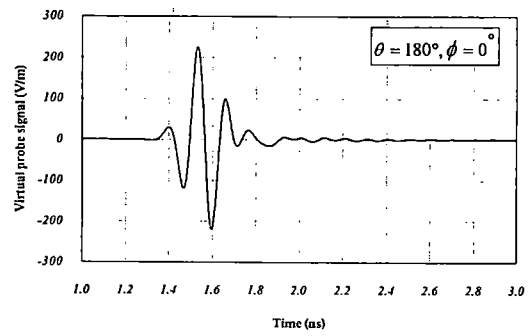
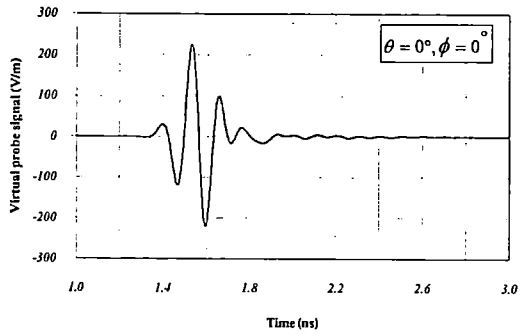
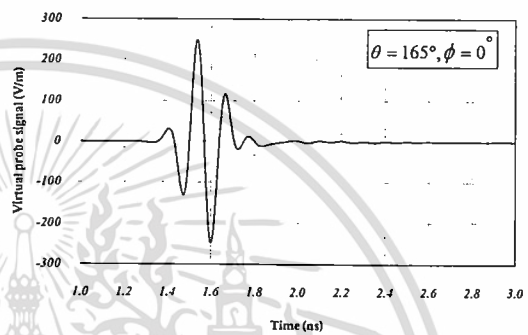
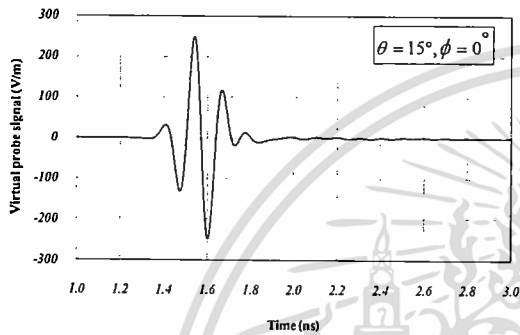
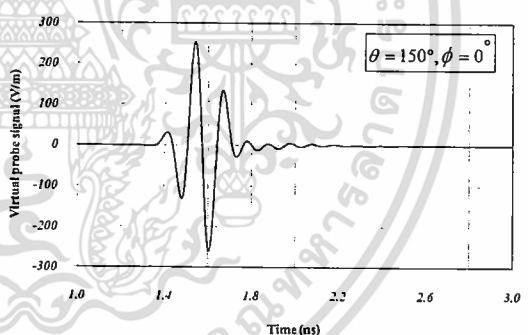
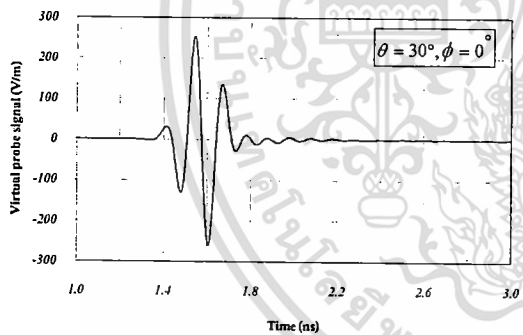
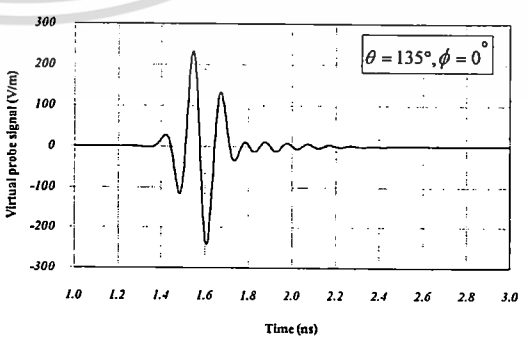
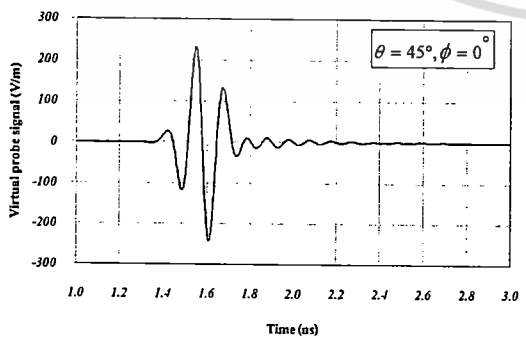
(จ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = -15^\circ$  และ  $-165^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

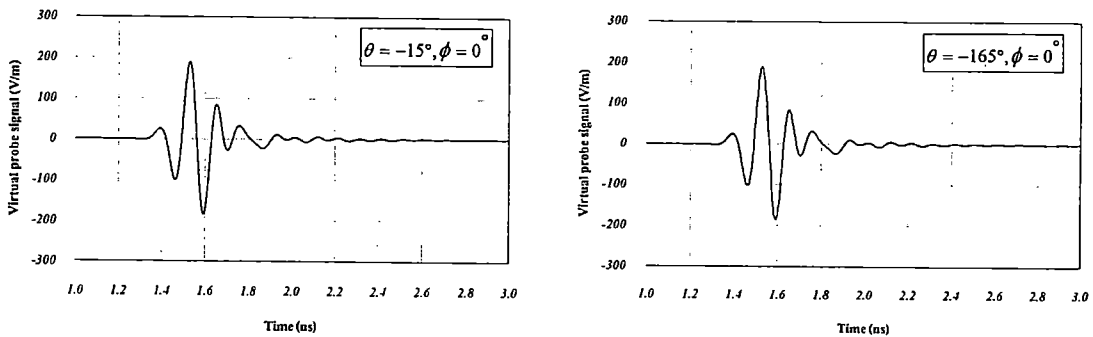
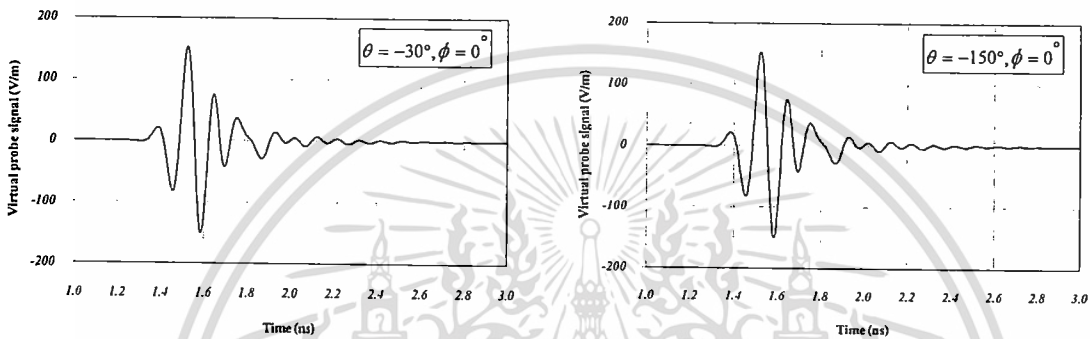
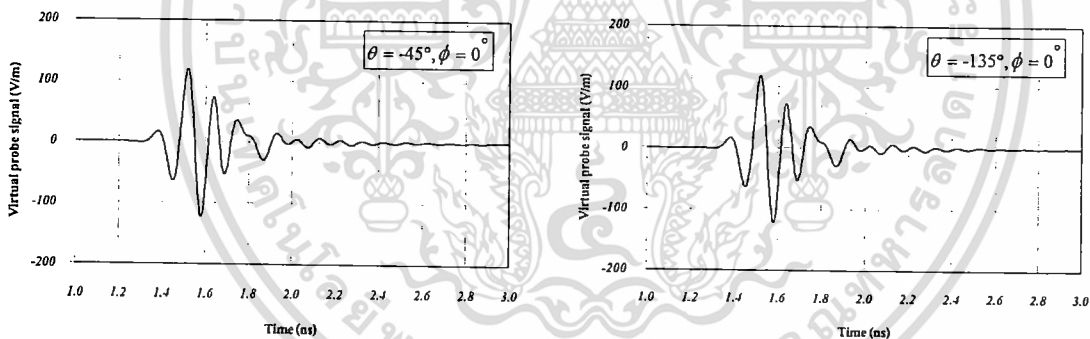
(จ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = -30^\circ$  และ  $-150^\circ$ (ข) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = -45^\circ$  และ  $-135^\circ$ 

#### รูปที่ 4.25 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมยก

จากรูปที่ 4.25 แสดงถึงสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมยก ( $\phi = 90^\circ$ ) ที่มุม  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, -15^\circ, -30^\circ, -45^\circ, 180^\circ, 165^\circ, 150^\circ, 135^\circ, -165^\circ, -150^\circ$  และ  $-135^\circ$  พบว่าสัญญาณที่รับได้โดยโพรบเสมือนจริงที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  ซึ่งเป็นบริเวณตรงกึ่งกลางทั้งสองด้านของช่องเปิดของวงแหวนสี่เหลี่ยม จะมีลักษณะของสัญญาณที่รับได้เหมือนกันทั้งสองมุม และมีความเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ ซึ่งความเพี้ยนของสัญญาณจะมีลักษณะแตกต่างกันไปเนื่องจากมุมในการรับสัญญาณที่มืองศาต่างกัน โดยมีความไม่สมมาตรขององค์ประกอบในโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมยกและยังพบว่าลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ มีลักษณะที่เหมือนกัน เมื่อโพรบรับสัญญาณ วางในทิศทางแนวแกน z ที่มีมุมยกขึ้นเท่ากัน

(ก) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $180^\circ$ (ข) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 15^\circ$  และ  $165^\circ$ (ค) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 30^\circ$  และ  $150^\circ$ (ง) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = 45^\circ$  และ  $135^\circ$ 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = -15^\circ$  และ  $-165^\circ$ (ฉ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = -30^\circ$  และ  $-150^\circ$ (ช) สัญญาณที่รับได้ที่มุม  $\theta = -45^\circ$  และ  $-135^\circ$ 

รูปที่ 4.26 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมกวาด

จากรูปที่ 4.26 แสดงเป็นสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมกวาด ( $\phi = 0^\circ$ ) ที่มุม  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, -15^\circ, -30^\circ, -45^\circ, 180^\circ, 165^\circ, 150^\circ, 135^\circ, -165^\circ, -150^\circ$  และ  $-135^\circ$  ซึ่งจะพบว่าลักษณะสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  มีลักษณะของสัญญาณที่รับได้เหมือนกันทั้งสองมุม และมีความเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ ซึ่งความเพี้ยนของสัญญาณจะมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละมุม แต่ลักษณะความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เหมือนกัน เมื่อโพรบรับ อยู่ในมุมที่เท่ากัน เช่นเดียวกันกับการรับสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับในระนาบมุมยกในมุมต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

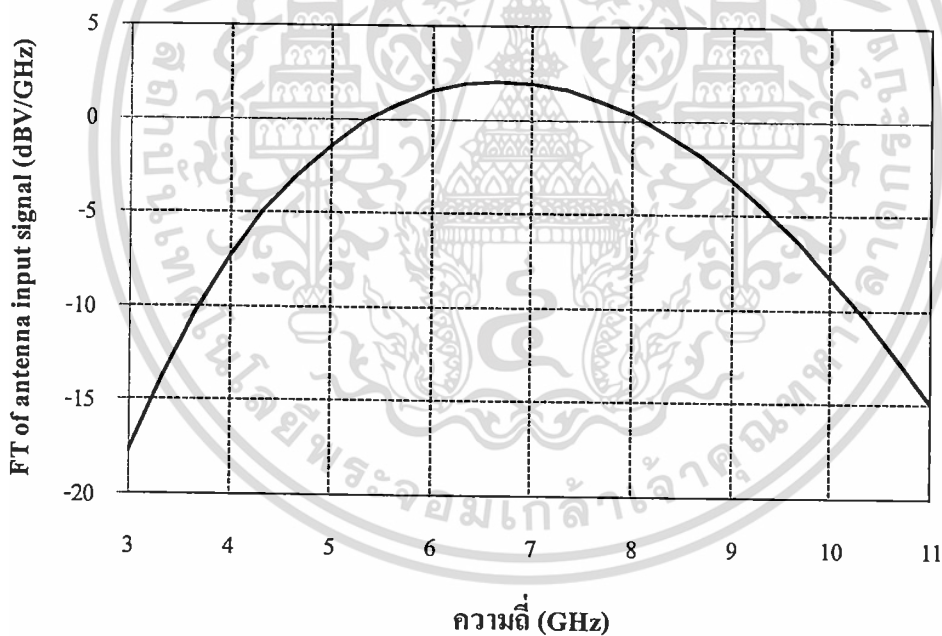
#### 4.6.2 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ (Frequency domain)

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาสัญญาณทางด้านรับที่ได้ส่งมาจากสายอากาศที่นำเสนอ โดยการพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงในโดเมนเชิงความถี่ที่มุมต่างๆ ซึ่งสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงความถี่สามารถหาได้โดยการแปลงฟูรีเยร์จากสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลา สำหรับสมการการแปลงฟูรีเยร์และการแปลงฟูรีเยร์ผกผัน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad k=0, \dots, N-1 \quad (4.2)$$

$$s_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad n=0, \dots, N-1 \quad (4.3)$$

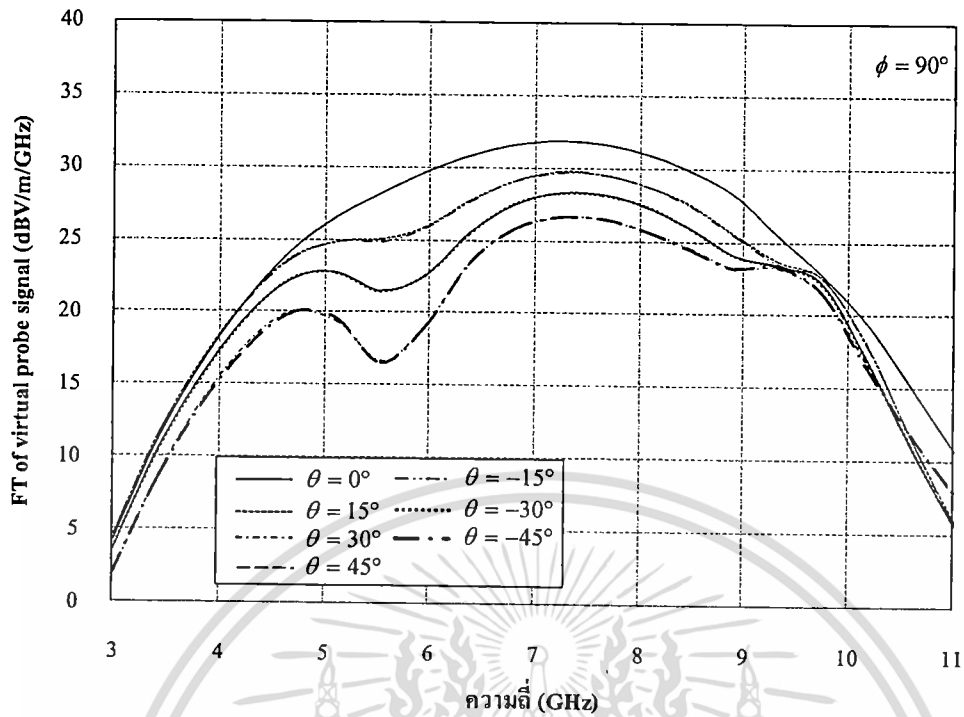
เมื่อ  $N$  คือ จำนวนเชิงซ้อน และ  $i$  คือ หน่วยจินตภาพ สำหรับสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.27



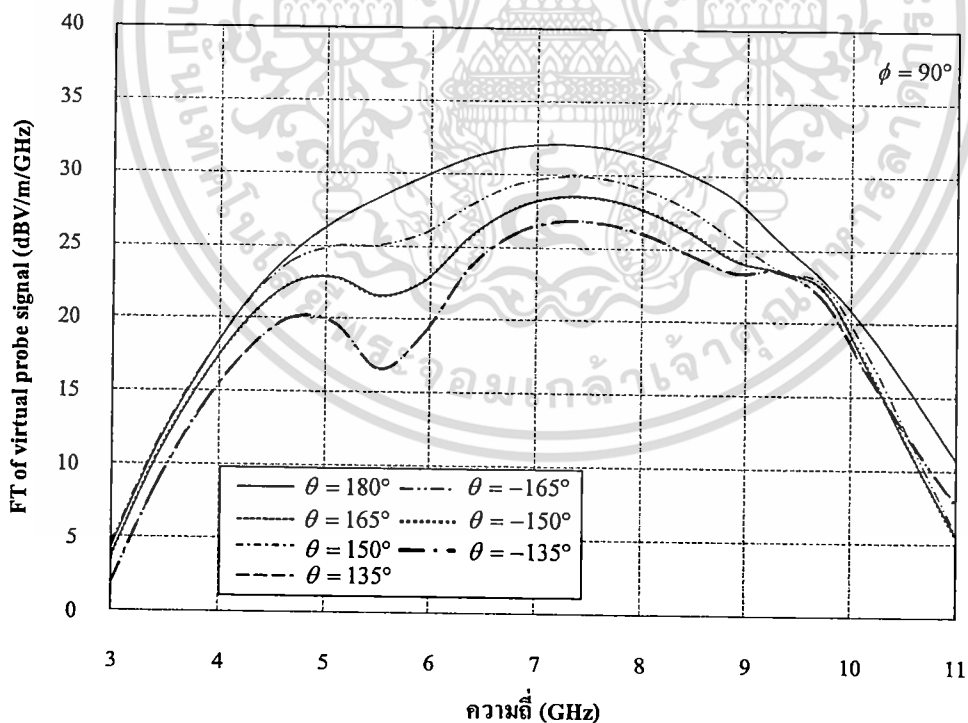
รูปที่ 4.27 สัญญาณอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงความถี่

จากรูปที่ 4.27 แสดงถึงสัญญาณอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงความถี่ ซึ่งสามารถหาได้โดยการแปลงฟูรีเยร์ของสมการที่ 4.2 และ 4.3 จากสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลา ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของสายอากาศที่ได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งสัญญาณอินพุตของสายอากาศจะถูกส่งไปยังโพรบเสมือนจริง และผลของสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ ได้แสดงดังในรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29

การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในทิศทาง +z



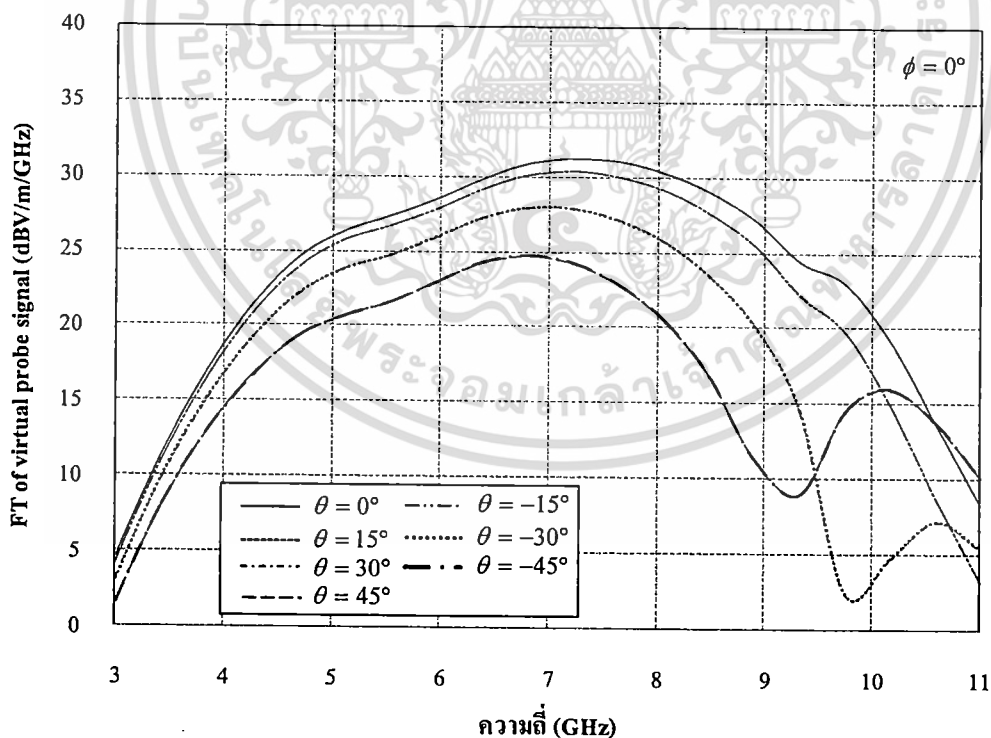
(ข) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในทิศทาง -z

รูปที่ 4.28 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

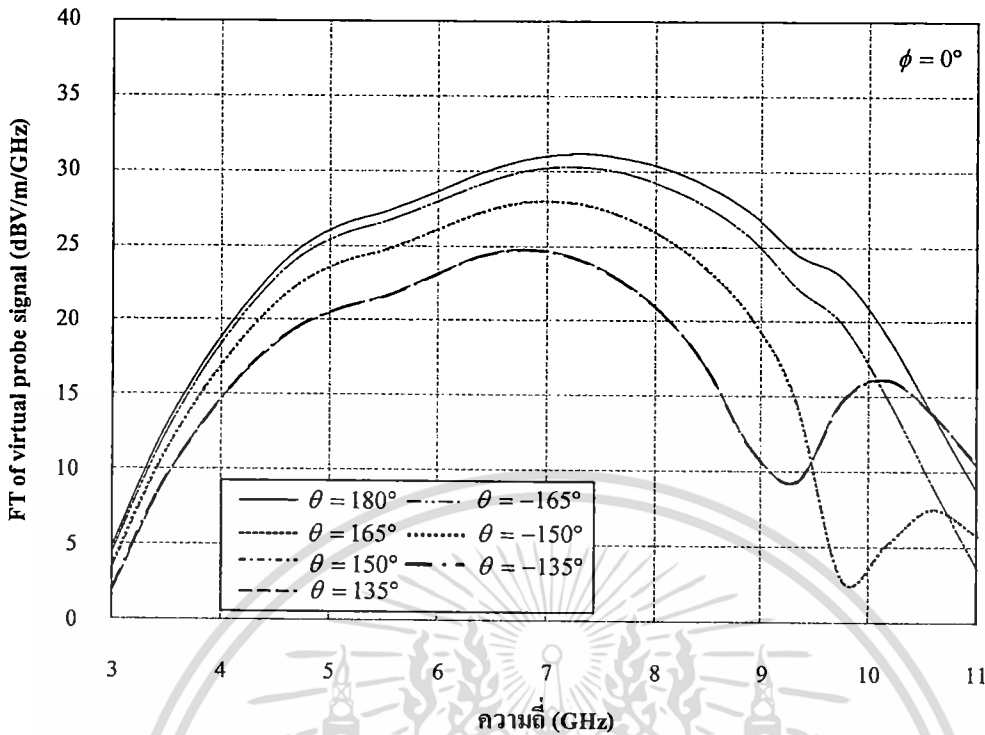
จากรูปที่ 4.28 เป็นสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมยก ( $\phi = 90^\circ$ ) ในโดเมนเชิงความถี่ที่มุม  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, -15^\circ, -30^\circ, -45^\circ, 180^\circ, 165^\circ, 150^\circ, 135^\circ, -165^\circ, -150^\circ$  และ  $-135^\circ$  ซึ่งพบว่าลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ในแต่ละมุมมีลักษณะความถี่ของสัญญาณที่แตกต่างกันในแต่ละมุม ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ จะมีลักษณะที่เหมือนกัน เมื่อโพรบรับสัญญาณ วางในทิศทางแนวแกน z ที่มีมุมยกขึ้นเท่ากัน ซึ่งสัญญาณที่รับได้โดยโพรบเสมือนจริงจะมีความถี่ที่น้อยที่สุด อยู่ที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  เมื่อเทียบกับมุมอื่น ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมยก ซึ่งมีลวดทองแดงและแท่งปรสิติดเป็นองค์ประกอบ

จากรูปที่ 4.29 รูปที่ 4.25 ได้แสดงลักษณะของสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมกวาด ( $\phi = 0^\circ$ ) ที่มุม  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, -15^\circ, -30^\circ, -45^\circ, 180^\circ, 165^\circ, 150^\circ, 135^\circ, -165^\circ, -150^\circ$  และ  $-135^\circ$  ซึ่งพบว่าสัญญาณที่มีความถี่ที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  เมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ และจะพบว่าเมื่อมุมของโพรบรับสัญญาณมีมุม  $\theta = 0^\circ, \theta = 180^\circ, \theta = \pm 15^\circ, \pm 165^\circ, \theta = \pm 30^\circ, \pm 150^\circ$  และมุม  $\theta = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$  ลักษณะของสัญญาณที่รับได้จะมีลักษณะที่เหมือนกันเมื่อมุมโพรบมีมุมในระนาบแนวกวาดที่เท่ากันที่เท่ากัน



(ก) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆ ในทิศทาง +z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆ ในทิศทาง -z

รูปที่ 4.29 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆ ในโดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมกวาด

#### 4.6.3 ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ของสัญญาณอิมพัลส์

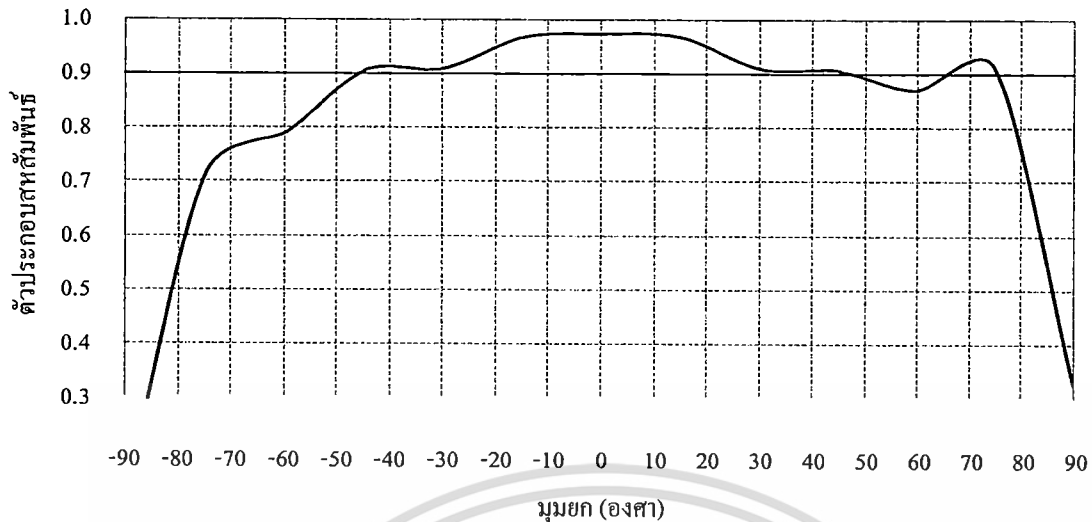
หัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตของสายอากาศที่นำเสนอ โดยได้จากการจำลองกับสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆ ซึ่งค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ดีควรมีค่ามากกว่า 0.9 โดยมีสมการดังนี้

$$\rho = \max_{\tau} \left\{ \frac{\int s_1(t) s_2^*(t-\tau) dt}{\sqrt{\int s_1^2(t) dt} \sqrt{\int s_2^2(t-\tau) dt}} \right\} \quad (4.4)$$

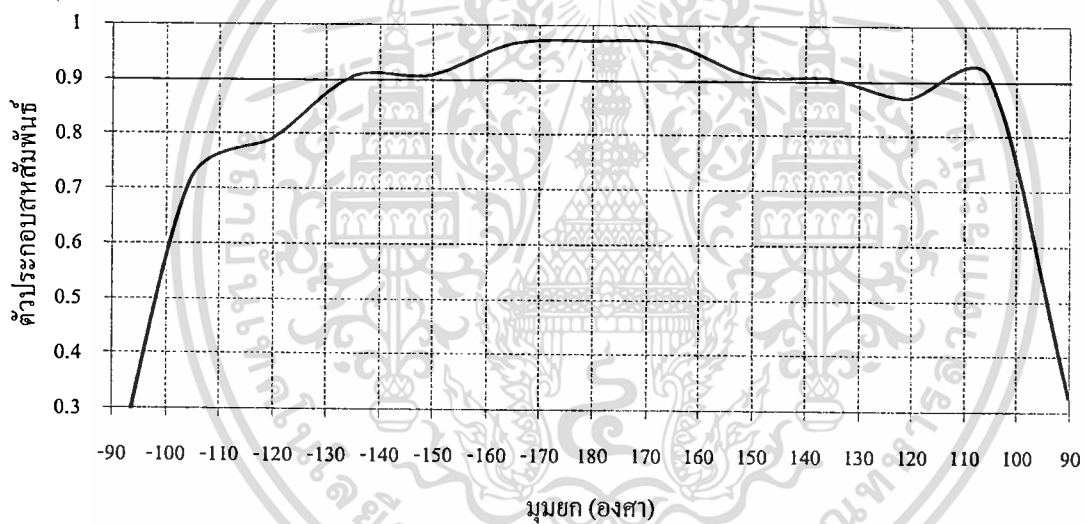
เมื่อ  $s_1(t)$  คือสัญญาณอินพุตของสายอากาศ  $s_2(t)$  คือสัญญาณที่รับได้ของโพรบเสมือนจริง โดยค่าของสัญญาณที่รับได้เป็นค่าที่ได้มาจากการจำลอง และ  $\tau$  คือเวลาที่ประวิงไป

ผลของค่าสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสัญญาณอินพุตและสัญญาณที่รับได้ที่มุมต่างๆ ได้แสดงดังในรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง +z

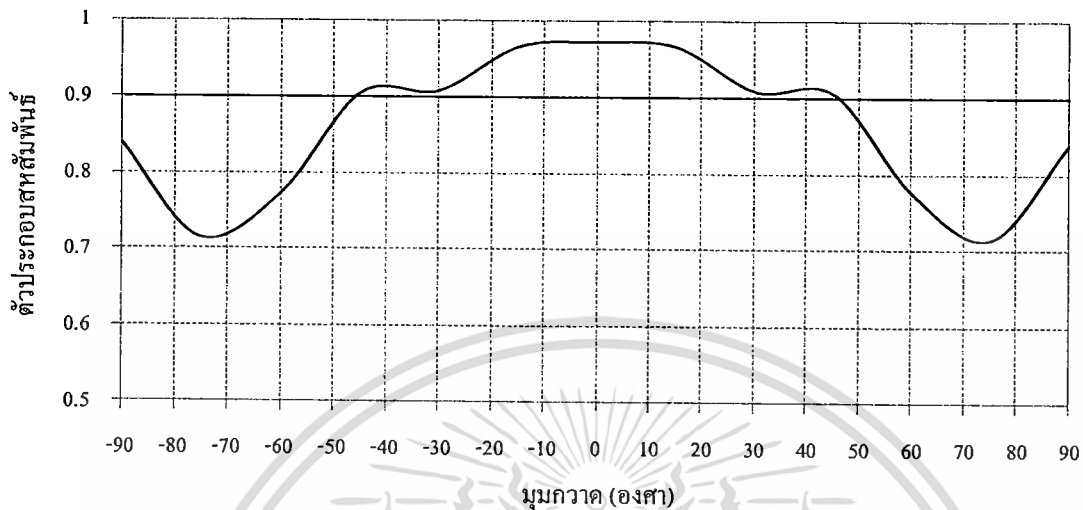


(ข) ค่าประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง -z

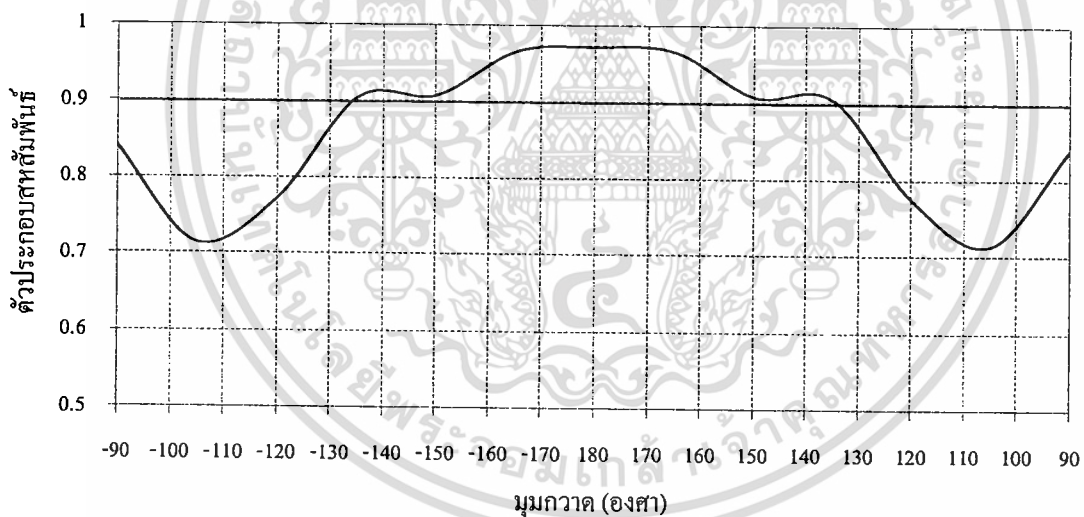
รูปที่ 4.30 ค่าประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมยก

จากรูปที่ 4.30 ได้แสดงค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆ ในระนาบมุมยก ซึ่งพบว่ามุมที่มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ อยู่ระหว่างมุม  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.973 ซึ่งแสดงถึงสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงที่รับได้ อยู่ระหว่างมุม  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุตของสายอากาศมากที่สุด และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่า 0.9 อยู่ระหว่างมุม  $\theta = 48^\circ$  ถึง  $\theta = -45^\circ$  และ  $\theta = 132^\circ$  ถึง  $\theta = -135^\circ$  ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ  $93^\circ$  นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ในระนาบมุมยกระหว่างมุมทางด้านนี้บวกกับทางด้านลบบางส่วนมีค่าไม่เท่ากัน ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมยกและมุมในการรับสัญญาณที่มีองศาต่างกัน



(ก) ตัวประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง +z



(ข) ตัวประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง -z

รูปที่ 4.31 ตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด

จากรูปที่ 4.31 แสดงค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด ซึ่งพบว่ามุมที่อยู่ในช่วง  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.973 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในช่วงมุม  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุตของสายอากาศมากที่สุด และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่า 0.9 อยู่ระหว่างมุม  $\theta = 46^\circ$  ถึง  $\theta = -46^\circ$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $\theta = 134^\circ$  ถึง  $\theta = -134^\circ$  ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ  $92^\circ$  และยังพบอีกว่าค่าตัวประกอบ สหสัมพันธ์ในระนาบมุมกวาดระหว่างมุมทางด้านบวกกับทางด้านลบที่มีองศาเดียวกันจะมีค่า เท่ากัน เนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมกวาดและมุมในการรับ สัญญาณมีองศาที่เท่ากัน

#### 4.7 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบ สายอากาศ โดยนำเอาทฤษฎีจากบทที่ผ่านมา มาออกแบบและหาพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมเพื่อ นำไปสร้างสายอากาศต้นแบบนั้น จะเริ่มจากการศึกษาและนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศที่ มีมาก่อนซึ่งได้กล่าวมานั้นจากบทที่ผ่านมา คือ สายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุม ฉาก โดยเริ่มต้นจากการเลือกขนาดความกว้าง  $a$  และความสูง  $b$  ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อให้เกิด โหมด  $TE_{10}$  หรือโหมดเป็นใหญ่ โดยให้มีความถี่ตัดที่ 3.0GHz และทำการจำลองเพื่อหาขนาด ความยาว  $c$  ที่เหมาะสม ขนาดความกว้าง ความสูง และความยาวของตัวกระตุ้นที่เหมาะสม จากนั้น เพื่อให้สายอากาศตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6GHz จึงได้ใช้ตัวกระตุ้น โมโนโพลระนาบแผ่นวงกลม ซึ่งทำให้ผลของแบนด์วิดท์ที่กว้าง และเพื่อเป็นการปรับปรุงแบบ รูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ด้านสูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด จึงได้นำลวดทองแดงพร้อมทั้ง แท่งปรสิติกุ่มาวางบริเวณด้านบนและวางแท่งปรสิติกุ่มาวางบริเวณด้านล่างของผนังภายในวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยได้ปรับหาขนาดความยาวของลวดทองแดงและระยะแท่งปรสิติกุ่มาวางที่เหมาะสม เพื่อเลือกนำมาใช้งาน สำหรับพารามิเตอร์การจำลองและผลการจำลองสายอากาศและทำการหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่า  $|S_{11}|$  ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่า สภาพเจาะจงทิศทาง และค่าอัตราการขยายตลอดช่วงความถี่ตอบสนองที่ต้องการ ซึ่งขั้นตอน สามารถสรุปย่อๆได้ดังนี้

- พิจารณาขนาดความยาว  $c$  ที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดความกว้าง  $a$  ความ สูง  $b$  ของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ตามหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อให้เกิดโหมด  $TE_{10}$  หรือโหมดเป็นใหญ่ โดยให้มีความถี่ตัดที่ 3.0GHz และและและความยาวโพรบ  $l$  เท่ากับ  $\lambda/4$
- พิจารณาสัดส่วนความยาวโพรบต่อความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยม ( $l/b$ ) ตลอดจนสัดส่วน ความสูงต่อความกว้างวงแหวนสี่เหลี่ยม ( $b/a$ ) และหาขนาดความกว้าง  $a$  ที่เหมาะสม โดย ใช้การเลือกจากขนาดความกว้าง  $a$  ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ทางด้านต่ำและด้านสูง เข้าใกล้ที่ 3.1GHz และ 10.6GHz ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พิจารณาขนาดโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม ( $2r$ ) ที่ให้ผลของค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  และมีขอบเขตความถี่ทางด้านต่ำและความถี่ทางด้านสูง ครอบคลุมย่านความถี่กว้าง 3.1 ถึง  $10.6\text{GHz}$
- หาความยาวลวดทองแดง ( $L$ ) ความสูง ( $h_1$ ) และระยะห่างแท่งปรสิติกู่ ( $s_1$ ) ด้านบนของผนังภายในวงแหวนสี่เหลี่ยม และสุดท้ายพิจารณา ความสูง ( $h_2$ ) และระยะห่าง ( $s_2$ ) แท่งปรสิติกู่บริเวณผนังภายในด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยพิจารณาจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมแล้วจากนั้นทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราการขยาย และสัญญาณอิมพัลส์ของสายอากาศ ซึ่งผลที่ได้พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กในแต่ละความถี่จะมีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่เหมือนกัน ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  เมื่อเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด มีค่าเท่ากันตลอดย่านความถี่ตอบสนอง 3.1 ถึง  $10.6\text{GHz}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลวดทองแดงและแท่งปรสิติกู่สามารถช่วยปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและทิศทางของลำคลื่นได้ และอัตราการขยายมีการเปลี่ยนแปลงตลอดย่านความถี่ตอบสนอง ซึ่งค่าอัตราการขยายในทิศทางที่ตั้งองการ ( $\theta = 0^\circ$  และ  $\phi = 90^\circ$ ) ตลอดช่วงความถี่ตอบสนองนั้นมีค่าอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดที่ได้เท่ากับ  $3.5\text{ dBi}$  และ  $6.8\text{ dBi}$  ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆ โดยพิจารณาผลจากการแปลงฟูริเยร์ และ ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์เทียบกับย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการ พบว่า สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ ในช่วงระหว่างมุม  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  มีความเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆที่ทำการพิจารณา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอขึ้นซึ่งมีองค์ประกอบของลวดทองแดงและแท่งปรสิติกู่ สามารถช่วยในการปรับปรุงปัญหาเรื่องการควบคุมทิศทางของลำคลื่นหรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ให้เกิดความสมมาตรมากขึ้น โดยเฉพาะที่ขอบความถี่ด้านสูง และจากนั้นจะได้นำค่าพารามิเตอร์ซึ่งได้จากการจำลองในบทนี้ นำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลในบทที่ 5 ต่อไป

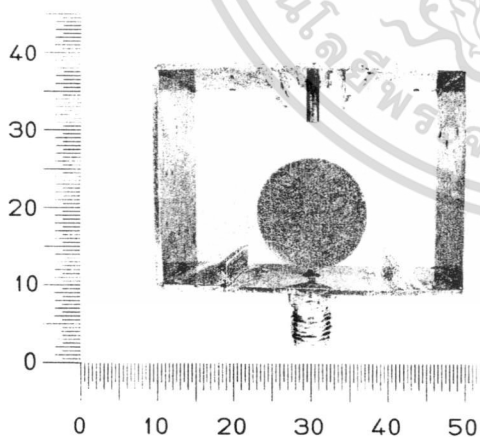
## บทที่ 5

### การสร้าง การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปรสิตและลวดทองแดง ซึ่งเป็นการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองผลในบทที่ 4 มาสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบและนำผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้ และผลที่จะได้นำมาเปรียบเทียบ ประกอบด้วยผลของ  $|S_{11}|$  อัตราการขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

#### 5.1 การสร้างและทดสอบสายอากาศ

สายอากาศต้นแบบของสายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปรสิตและลวดทองแดง ซึ่งเป็นสายอากาศที่ตอบสนองย่านความถี่ ยิงยวด 3.1 ถึง 10.6GHz ซึ่งได้กำหนดโดยหน่วยงาน FCC ซึ่งสายอากาศถูกสร้างด้วยวัสดุทองเหลือง เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนทานต่อสนิม โดยสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอนี้ได้สร้างขึ้นสำหรับการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง ของพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้กล่าวมาในบทที่ 4 ที่ผ่านมา ดังได้แสดงสายอากาศต้นแบบ ในรูปที่ 5.1 และพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับการสร้างสายอากาศต้นแบบ ในตารางที่ 5.1



(ก) ด้านหน้า



(ข) มุมมองสามมิติ

รูปที่ 5.1 สายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ	ขนาดทางไฟฟ้า
$a \times b \times c$	$40 \times 28 \times 15 \text{mm}$	$0.413\lambda \times 0.289\lambda \times 0.155\lambda$
$2r$	15.4mm	$0.159\lambda$
$h_1$	3mm	$0.031\lambda$
$h_2$	3mm	$0.031\lambda$
$s_1$	8mm	$0.083\lambda$
$s_2$	22mm	$0.227\lambda$
$g$	0.7mm	$0.007\lambda$
$L$	6mm	$0.062\lambda$

## 5.2 ผลการทดสอบของสายอากาศ

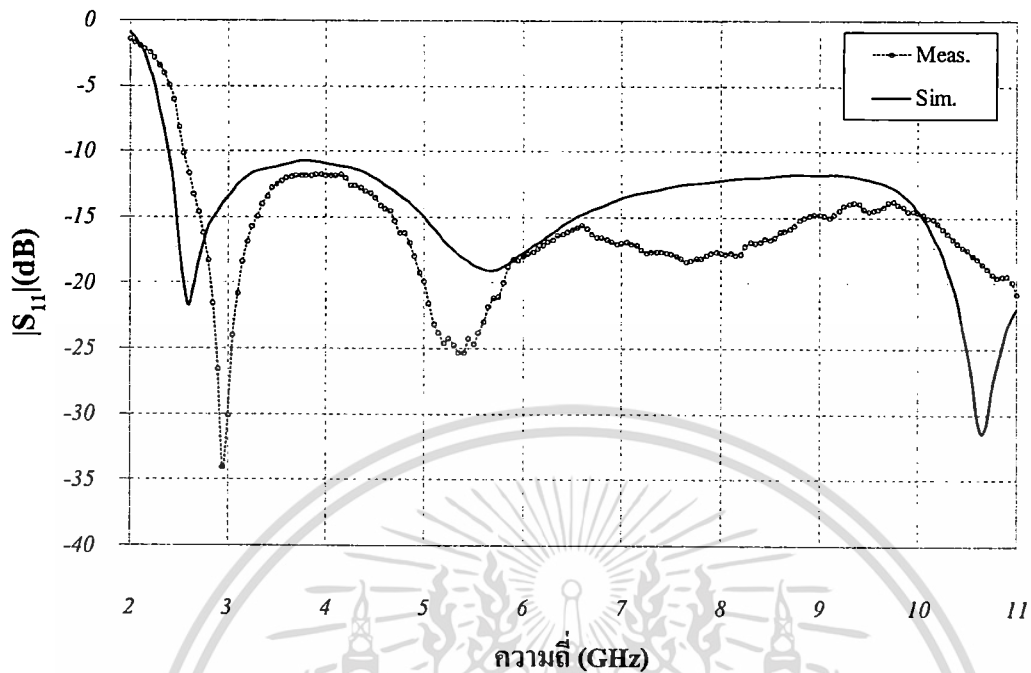
เมื่อได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการออกแบบ จึงได้ทำการทดสอบแล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยาย ตลอดจนความถี่ที่ต้องการ

### 5.2.1 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ( $|S_{11}|$ )

ผลการทดสอบค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ตลอดจนความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6GHz ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.2

จากรูปที่ 5.2 แสดงผลของค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้การจำลองและจากการทดสอบ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณโครงข่าย (Network Analyzer) ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการแมตซ์ของสายอากาศหรือแบนด์วิดท์ที่ได้ โดยผลจากการจำลองค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  คือ 2.4 ถึง 14.6GHz (ความถี่กลางอยู่ที่ 8.5GHz) เทียบเท่ากับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 144% และผลที่ได้จากการทดสอบคือ 2.9 ถึง 13.8GHz (ความถี่กลางอยู่ที่ 8.4GHz) ซึ่งเทียบเท่ากับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 131% จะเห็นได้ว่าผลของ  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลองมีแนวโน้มเดียวกัน แต่ก็มีผลที่ผิดเพี้ยน สาเหตุเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล เช่น พารามิเตอร์ต่างๆ โมโนโพลชนิดแผ่นระนาบวงกลมและแท่งปรีสตี มีค่าก่อนข้างละเอียดและขนาดก่อนข้างเล็ก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการจำลอง แต่ผล  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า  $-10\text{dB}$  ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ 3.1 ถึง 10.6GHz ซึ่งผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

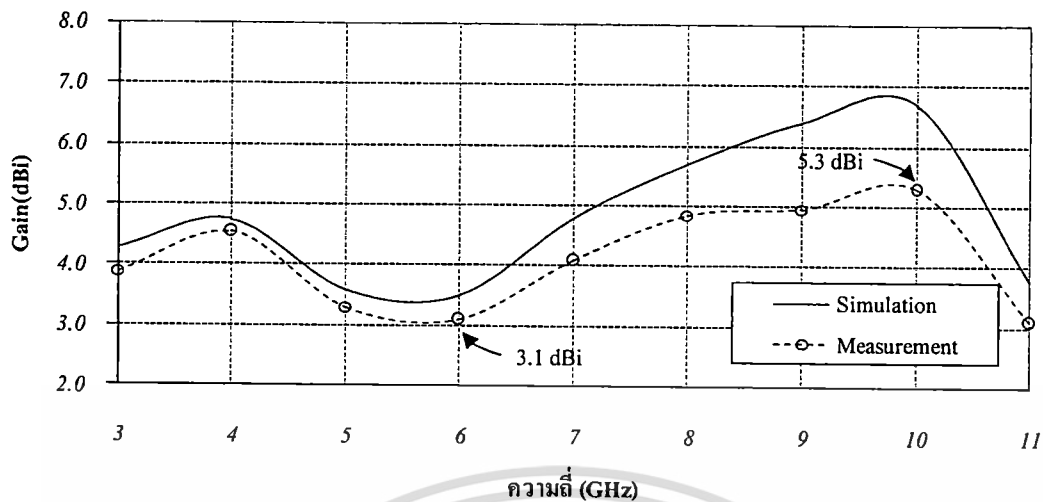


รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบและการจำลองค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

### 5.2.2 การทดสอบอัตรการขยายของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลของอัตรการขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการของผลที่ได้จากการทดสอบกับจากการจำลอง โดยในการทดสอบสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอทั้งทางด้านส่งและด้านรับ ใช้ระยะห่างในการส่งและรับเท่ากับ 30cm ซึ่งผลของอัตรการขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง แสดงดังในรูปที่ 5.3

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าผลของอัตรการขยายในทิศทางที่ต้องการ ( $\theta = 0^\circ$  และ  $\phi = 90^\circ$ ) ตลอดย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6GHz ที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามผลของอัตรการขยายที่ได้ในแต่ละความถี่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนกันอยู่ ซึ่งมีสาเหตุอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมในการทดสอบ ตลอดจนความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายสัญญาณ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและจากตัวสายอากาศต้นแบบเอง ซึ่งในขณะที่ผลที่ได้การจำลองจะไม่มีปัจจัยเหล่านี้เข้ามาเกี่ยวข้อง ด้วยเหตุผลนี้ดังนั้นจึงทำให้ผลของอัตรการขยายที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไป โดยผลของอัตรการขยายต่ำสุดและสูงสุดที่ได้จากการจำลองและการทดสอบ เท่ากับ 3.5dBi ถึง 6.8dBi และ 3.1dBi ถึง 5.3dBi ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ

### 5.2.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

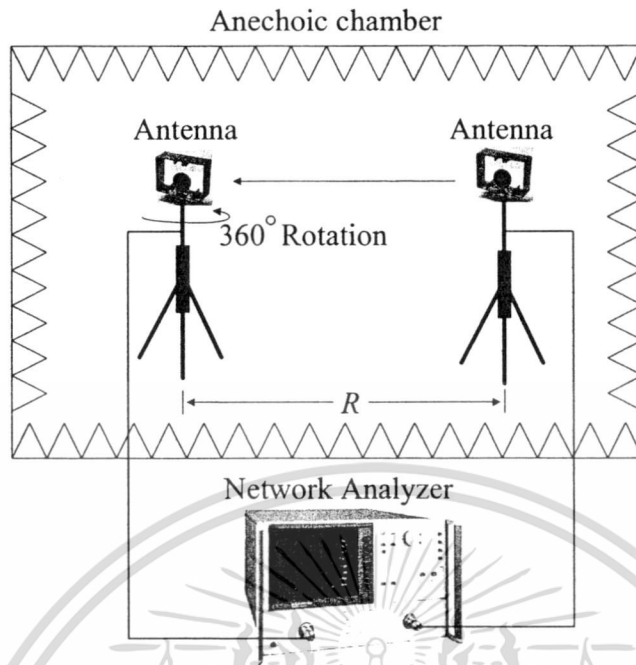
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง สำหรับการทดสอบได้ทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีการสะท้อน (Anechoic Chamber) ดังแสดงการจัดเตรียมการทดสอบในรูปที่ 5.4 ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ  $yz$  และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ  $xz$  ที่สนามระยะไกล (Far field) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับเท่ากับ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

โดยที่  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ

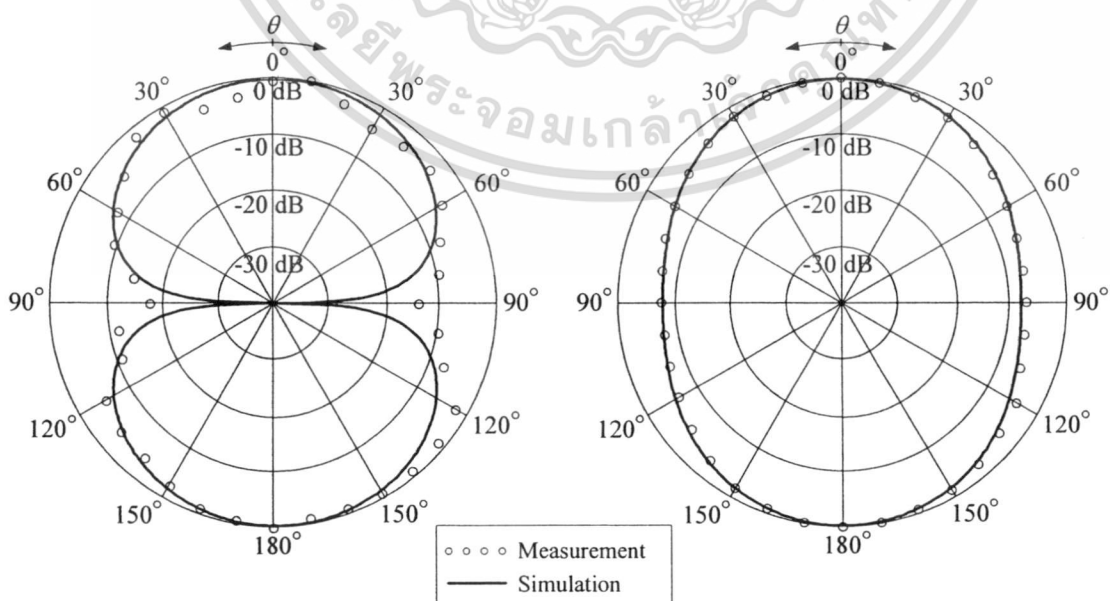
$D$  คือมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

ซึ่งที่สนามระยะไกลนี้การเปลี่ยนแปลงของสนามจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ซึ่งดังนั้นในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่าง  $R \geq 0.168\text{m}$  ซึ่งในการทดสอบได้วางสายอากาศตัวส่งและตัวรับ มีระยะห่างเท่ากับ 30 cm โดยสายอากาศที่ทำการทดสอบนั้น สายอากาศด้านรับจำเป็นต้องหมุนรอบตัวเอง  $360^\circ$  และตั้งระดับความสูงของสายอากาศด้านรับและด้านส่ง จำเป็นต้องมีความสูงที่เท่ากัน ส่วนสายอากาศทางด้านส่งต้องเป็นสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศทางด้านรับและต้องมีการโพลาไรซ์ที่เหมือนกัน จึงได้เลือกสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางโดยใช้โครงสร้างปรสิติกเป็นสายอากาศด้านส่งที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในหัวข้อนี้จะได้เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆของสายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปรสิตและลวดทองแดง โดยนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกัน ที่ความถี่ 3.1GHz 5GHz 6.8GHz 9GHz และ 10.6GHz ดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ก) ถึง (จ) ตามลำดับ

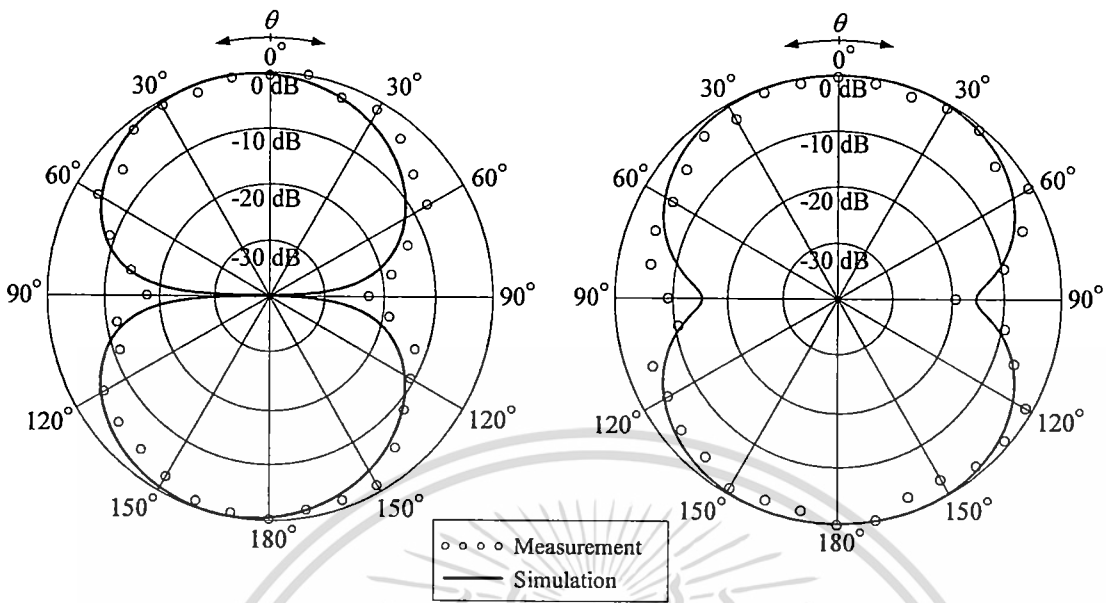


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(ก) ความถี่ 3.1 GHz

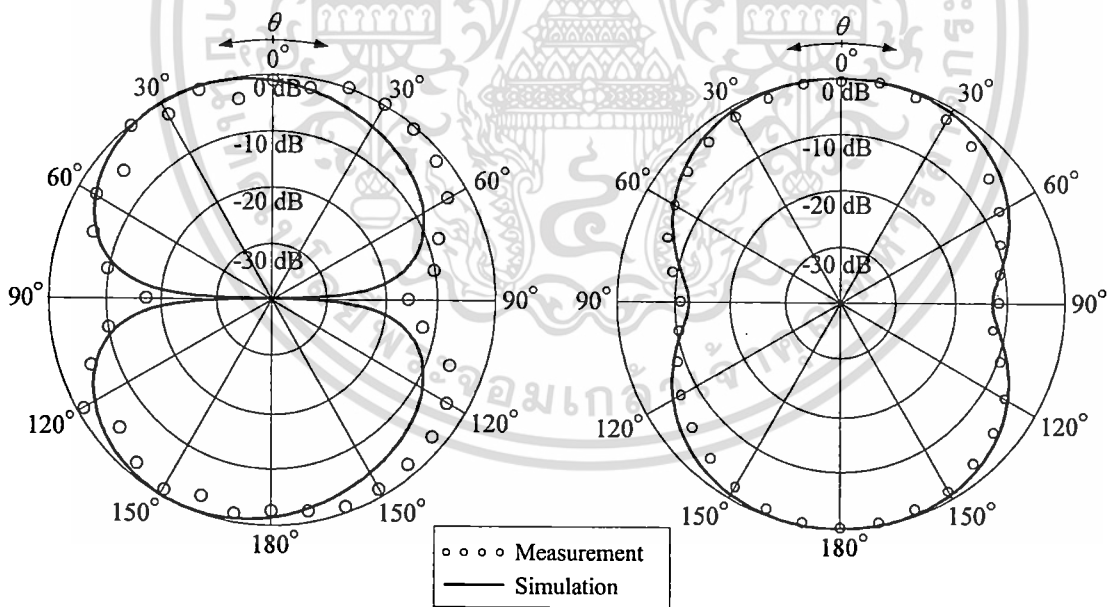
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ข) ความถี่ 5 GHz

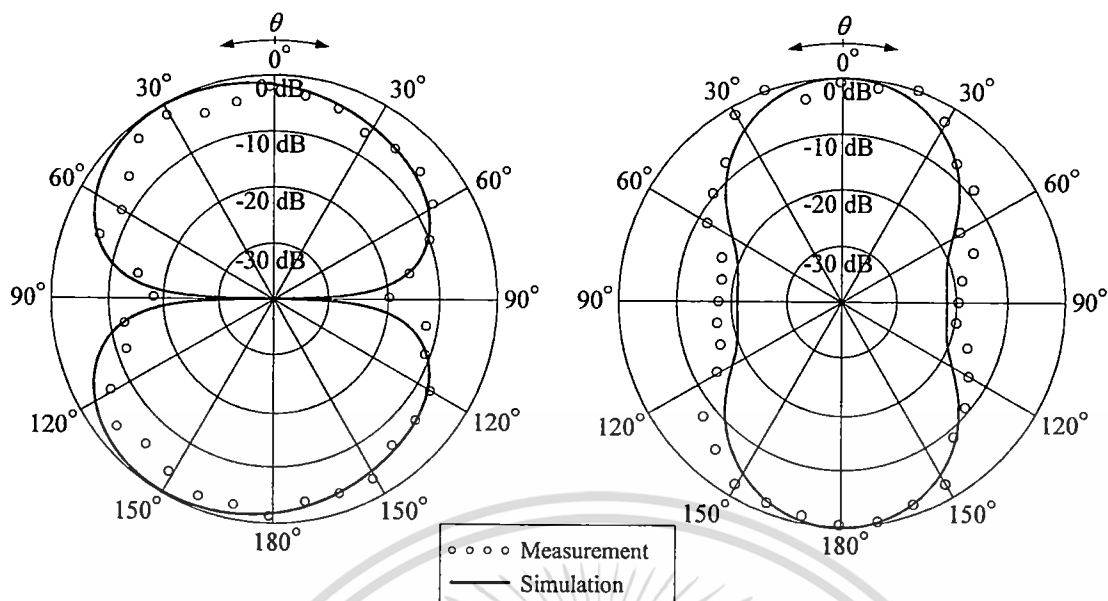


ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ความถี่ 6.8GHz

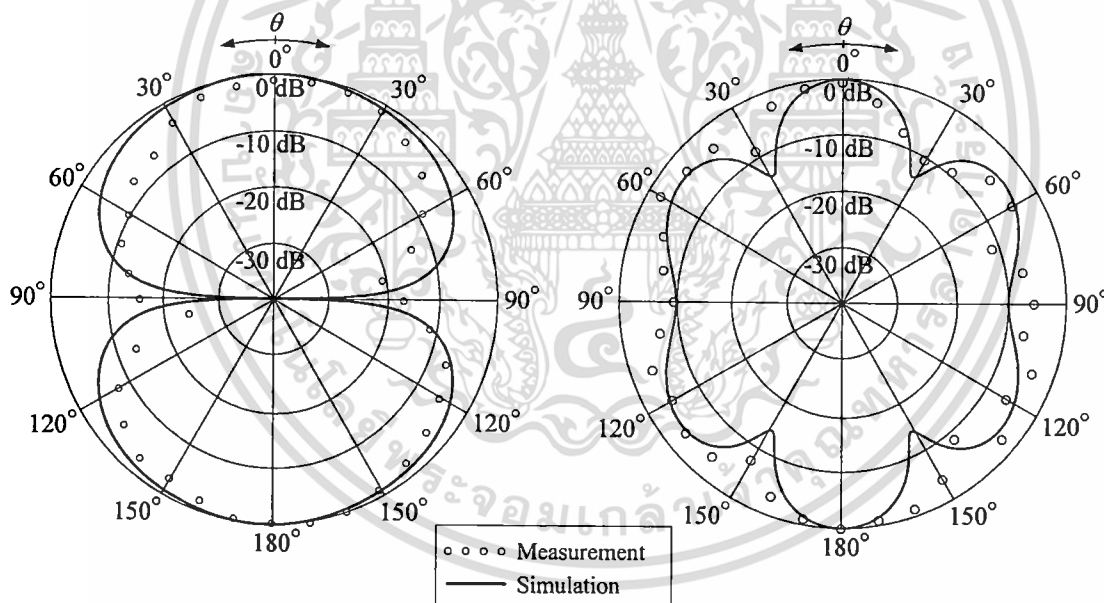
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ง) ความถี่ 9GHz



ระนาบสนามไฟฟ้า

ระนาบสนามแม่เหล็ก

(จ) ความถี่ 10.6GHz

**รูปที่ 5.5** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบแม่เหล็ก ที่ความถี่ต่างๆ

จากรูปที่ 5.5 (ก) ถึง (จ) แสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ  $yz$ ) และระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ  $xz$ ) ที่ได้จากการทดสอบและจากการจำลอง ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้จากการทดสอบกับการจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และมีค่าสูงในทิศทางบริเวณด้านหน้าของสายอากาศทั้งสองด้าน แต่ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าก็ยังมีควม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดเพี้ยนเกิดขึ้นอยู่ ซึ่งถ้าคลื่นจะมีทิศทางการเคลื่อนไปจากตำแหน่งมุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับผลการจำลองที่ได้

### 5.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและผลการจำลองของสายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปรสิตและลวดทองแดง ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ที่ผ่านมา เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  ค่าอัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยผลการเปรียบเทียบค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้ นั้นมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนของผลการเปรียบเทียบของอัตราการขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการ ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวมา ต่างก็มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองอยู่ และสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ต่างๆ โดยผลที่ได้นั้นมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันเป็นไปในทางเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าก็ยังมีผิดเพี้ยนเกิดขึ้นอยู่ ซึ่งถ้าคลื่นจะมีทิศทางการเคลื่อนไปจากตำแหน่งมุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับผลการจำลองที่ได้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้การจำลองนั้น อาจมีผลมาจากความคลาดเคลื่อนของขนาดในการสร้างสายอากาศต้นแบบที่มีขนาดขนาดเล็ก ซึ่งต้องการความละเอียดสูง เช่น ขนาดตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม ขนาดแท่งปรสิต รวมถึงปัจจัยอื่นที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น สภาพแวดล้อมต่างๆ และอุปกรณ์ในขณะทดสอบ ในขณะที่การจำลองของสายอากาศจะไม่มีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทาบในส่วนของสภาพแวดล้อม ตลอดจนความสูญเสียต่างๆ ที่เป็นอุปสรรคเข้ามาเกี่ยวข้อง

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปรายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ โดยในหัวข้อ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศที่นำเสนอและในหัวข้อ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

#### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศสองทิศทางตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่งยวดวงแหวนสี่เหลี่ยมกระตุ้นด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมที่มีแท่งปรสิติและลวดทองแดง ซึ่งตอบสนองในย่านความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6GHz หรือมีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 7.5GHz ตามมาตรฐาน FCC โดยมีโครงสร้างของสายอากาศเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยมช่องเปิดสองด้าน ซึ่งมีตัวกระตุ้นโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลม ที่มีจุดป้อนโดยเจาะทะลุผ่านตรงกึ่งกลางบริเวณด้านล่างของวงแหวนสี่เหลี่ยมเชื่อมต่อเข้ากับ SMA คอนเน็คเตอร์ ซึ่งในการพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอนี้ ได้ใช้หลักการในการออกแบบที่นำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการออกแบบจะเริ่มต้นจากสายอากาศที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม โดยพิจารณาจากค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10dB เพื่อหาขนาดวงแหวนสี่เหลี่ยมที่เหมาะสม ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio และจากนั้นเพื่อให้สายอากาศตอบสนองครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด 3.1 ถึง 10.6GHz จึงได้พิจารณาตัวกระตุ้นชนิดแผ่นระนาบที่มีรูปร่างแบบต่างๆ โดยเริ่มต้นจากสายอากาศโมโนโพลแผ่นระนาบวงกลมบนแผ่นสะท้อน ซึ่งให้ผลตอบสนองช่วงความถี่ที่กว้าง และเพื่อเป็นการปรับปรุงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ด้านสูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด จึงได้นำลวดทองแดงพร้อมทั้งแท่งปรสิติคูลูมาวางบริเวณด้านบนและวางแท่งปรสิติคูลูบริเวณด้านล่างของผนังภายในวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยได้ปรับหาขนาดความยาวของลวดทองแดงและระยะแท่งปรสิติที่เหมาะสม ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น ได้พิจารณาจากค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10dB และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตร ซึ่งมีความแรงของลำคลื่นที่ทิศทางไปยังมุม  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเลือกมาใช้งาน เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศแล้ว จากนั้นทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีความไม่สมมาตรกันซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่สมมาตรในระนาบสนามไฟฟ้า ในแต่ละความถี่จะมีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่เหมือนกัน ค่าความแรงลำคลื่นสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่นใน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่ได้ทำการพิจารณาคือ 3.1 GHz, 5GHz, 6.8GHz, 9GHz และ 10.6GHz จะชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $\theta = 180^\circ$  ซึ่งผลการจำลองที่ได้เป็นที่น่าพอใจ และจะเห็นได้ว่าการนำหลอดแดง และแท่งปรสิติเข้ามาวางบนผนังภายในวงแหวนที่เหล็ยม จะช่วยให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เกิดความสมมาตรมากขึ้น และอัตราการขยายของสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดย่าน ความถี่ตอบสนอง โดยมีอัตราการขยายต่ำสุดเท่ากับ 3.5dBi และสูงสุดเท่ากับ 6.8dBi และหลังจาก นั้นได้ทำการพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ของสายอากาศทางด้านส่งและสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของ สายอากาศทางด้านรับ โดยสายอากาศทางด้านส่งเป็นสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และสายอากาศทางด้านรับเป็นโพรบเสมือนจริง โดยพิจารณาจากผลของสัญญาณอิมพัลส์ใน โดเมน เริงเวลา สัญญาณอิมพัลส์ใน โดเมนเชิงความถี่ และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์เทียบกับย่านความถี่ ตอบสนองที่ต้องการ ซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยก ที่มีค่าตัว ประกอบสหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ อยู่ระหว่างมุม  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.973 ซึ่งแสดงถึงสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงที่รับได้ อยู่ ระหว่างมุม  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุตของ สายอากาศมากที่สุด และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่า 0.9 อยู่ระหว่างมุม  $\theta = 48^\circ$  ถึง  $\theta = -45^\circ$  และ  $\theta = 132^\circ$  ถึง  $\theta = -135^\circ$  ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ  $93^\circ$  และ สำหรับค่าตัวประกอบ สหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด ซึ่งพบว่ามุมที่อยู่ในช่วง  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.973 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในช่วงมุม  $\theta = 10^\circ$  ถึง  $-10^\circ$  และ  $\theta = 170^\circ$  ถึง  $-170^\circ$  มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุตของสายอากาศมากที่สุด และค่าตัวประกอบ สหสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่า 0.9 อยู่ระหว่างมุม  $\theta = 46^\circ$  ถึง  $\theta = -46^\circ$  และ  $\theta = 134^\circ$  ถึง  $\theta = -134^\circ$  ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ  $92^\circ$  จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง ของผลที่ได้จากการจำลอง จึงได้สร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำผลทดสอบที่ได้มาทำการ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ค่า  $|S_{11}|$  อัตราการขยายและ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่าผลการเปรียบเทียบของค่า  $|S_{11}|$  มีแนวโน้มที่ สอดคล้องกันแต่ก็มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการสร้างสายอากาศต้นแบบ มีขนาดที่ คลาดเคลื่อนกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองไว้ รวมถึงวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศต้นแบบที่มีผล ต่อการทดสอบและสภาพแวดล้อมที่อาจจะส่งต่อการทดสอบจริง ซึ่งในการจำลองไม่มี สภาพแวดล้อมดังกล่าวมาเกี่ยวข้อง และจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า โครงสร้าง ปรสิติที่นำมาใช้ร่วมกับสายอากาศช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสองทิศทางสองทิศทางสามารถช่วย ปรับปรุงแบบรูปแบบการแพร่กระจายให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา

สำหรับอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นในการใช้โครงสร้างปรสิตสำหรับปรับปรุงสายอากาศสองทิศทางช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด คือการจำลองสำหรับหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จำนวนค่อนข้างมาก และในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์บางตัวจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ อันได้แก่  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราการขยาย ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จะต้องตรวจสอบค่า  $|S_{11}|$  ให้ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุง ควรจะลดจำนวนปรสิตลงให้น้อยเท่าที่สามารถจะทำได้เพื่อเป็นการลดจำนวนของพารามิเตอร์ลงไปด้วย แต่ในการลดจำนวนปรสิตหรือพารามิเตอร์ลงนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือสายอากาศจะต้องยังคงให้คุณลักษณะที่ดีและเพียงพอและเหมาะสมต่อการใช้งานเช่นเดิมหรือดีกว่าเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Schantz, *The art and science of ultrawideband antennas*, Artech House INC, 2005.
- [2] O. Lodge, "Electric Telegraphy," U.S. Patent 609, 154, August 16, 1898.
- [3] P. S. Carter, "Short Wave Antenna," U.S. Patent 2,175, 252, October 10, 1939.
- [4] N. E. Lindenblad, "Wave Band Antenna," U.S. Patent 2,239,724, April 29, 1941.
- [5] R. W. Masters, "Antenna," U.S. Patent 2,430,353, November 4, 1947.
- [6] W. Stohr, "Broadband Ellipsoidal Dipole Antenna," U.S. Patent 3,364,491, (January 16,1968).
- [7] F. Lalezari et al, "Broadband Notch Antenna," U.S. Patent 4,843,403, June 27, 1989.
- [8] M. Thomas et al, "Wideband Arrayable Planar Radiator," U.S. Patent 5,319,377, June7, 1994.
- [9] First Report and Order, "Revision of Part 15 of Commission's Rule Regarding Ultra wide band Transmission System," Fed Commun. FCC 02-48. Apr. 22, 2002.
- [10] F. Ramirez-Mireles, "Performance of ultra-wideband SSMA using time hopping and M-ary PPM," IEEE J.Selected Areas Comm., 19(6), 1186-96, 2001.
- [11] X. Chu and R. D. Murch, "The effect of nbi on UWB time-hopping systems," IEEE Trans. Wireless Comm., 3, 1431-6, 2004.
- [12] Edited by B. Allen, M. Dohler, E.E. Okon, W.Q. Malik, A.K. Brown and D.J. Edwards, Antenna element for impulse radio, Chapter 8 of *Ultra-wideband antenna and propagation for communications, radar and imaging*, John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- [13] M. J. Ammann and Z. N. Chen, "Wideband monopole antennas for multi-band wireless systems," IEEE Antennas and Propag. Mag., vol. 45, no. 2, pp. 146-150, April 2003.
- [14] S.Honda, M.Ito, H.Seki, and Y.Jingo, "A disk monopole antenna with 1:8 impedance bandwidth and omnidirectional radiation pattern," Proc. ISAP'92, pp.1145-1148, Sapporo, Japan, 1992.
- [15] M. Hammound, P. Poey and F. Colombel, "Matching the Input Impedance of a Broadband Disc Mnpole," Electronics Letter, pp. 406-407, Feb, 1993.
- [16] S.Kosulvit, C.Phongcharoenpanich, M.Krairiksh and T.Wakabayashi, "Radiation characteristics of a bidirectional antenna using a linear probe in rectangular ring," *Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology 1998*, pp.337-340, Beijing, Aug, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] M. Ghavami, L. B. Michael and R. Kohno, *Ultra wideband signals and systems in communication engineering*, John Wiley & Sons, 2004.
- [18] D. G. Leeper. Wireless data blaster. *Scientific American*, May 2002.
- [19] H. Kikuchi. UWB arrives in Japan. *Nikkei Electronics*, pages 95-122, February 2003.
- [20] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, 1989.
- [21] S. M. Rao, D. R. Wilton and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Trans Antennas and Propagation*, AP-30,(3) pp. 409-418, 1982.
- [22] H. Sheng, P. Orlik, A. M. Haimovich, L. J. Cimini, and J. Zhang, "On the spectral and power requirements for ultra-wideband transmission," in *Proc IEEE Int. Conf. on Communications*, Anchorage, AL, Mar. 2003, vol. 1, pp. 738-742.
- [23] H. Kim, D. Park, and Y. Joo, "All-digital low-power CMOS pulse generator for UWB system," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 24, pp. 1534-1535, Nov. 25, 2004.
- [24] New Public Safety Applications and Broadband internet access among uses envisioned by FCC authorization of Ultra-wideband Technology First Report Order (FCC 02-48), Feb. 14, 2002, Action by the Commission.