สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

An Ultra-Wideband Bidirectional Antenna Using Circular Sector Ring Fed by Rectangular Monopole

T110385

ธนวิทย์ ทิพย์เสวต

THANAWIT TIPSAWATE

วพ.
ธ
2553
เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 110385
วัน,เดือน,ปี - 2 พ.ย. 2553
b. 1225Δ228
i.....................

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-010-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN ULTRA-WIDEBAND BIDIRECTIONAL ANTENNA USING CIRCULAR SECTOR RING FED BY RECTANGULAR MONOPOLE

THANAWIT TIPSAWATE

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

2010

KMITL-2010-EN-M-010-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม
นักศึกษา	นาย ธนวิทย์ ทิพย์เสวต
รหัสประจำตัว	49060954
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมซึ่งช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดจะอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ตามมาตรฐาน FCC การวิเคราะห์เริ่มจากหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO โดยพิจารณาจากค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราการขยาย จากนั้นทำการพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ของสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับในโดเมนเชิงเวลา โดเมนเชิงความถี่ และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ จากผลการจำลองที่ได้พบว่าค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางโดยมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นไปทางมุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ค่าอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงความถี่จาก 3.89 dBi ถึง 8.117 dBi ผลจากการพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ในโดเมนเชิงเวลาและโดเมนเชิงความถี่พบว่าสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆและค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 0.9808 ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบเพื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งพบว่าผลการเปรียบเทียบของค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี ผลของการวิจัยจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยมีลักษณะเป็นท่อวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่มีการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมโดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	An Ultra-Wideband Bidirectional Antenna using Circular Sector Ring Fed by Rectangular Monopole
Student	Mr. Thanawit Tipsawate
Student ID.	49060954
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Asst. Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents the ultra-wideband bidirectional antenna using circular sector ring fed by rectangular monopole along the frequency range between 3.1 GHz to 10.6 GHz according to FCC (Federal Communications Commission) standard. The analysis is started by adjusting the antenna dimension using CST MICROWAVE STUDIO program to obtain the suitable parameters with acceptable $|S_{11}|$. Then, radiation pattern, correlation factor and gain, as well as both transmitter and receiver impulse signals are considered in time domain and frequency domain. The simulated $|S_{11}|$ is lower than -10 dB covered the frequency range of 3.1 GHz to 10.6 GHz. The antenna has bidirectional pattern and directs toward θ of 0° and θ of 180°. The gain varies over the frequency range from 3.89 dBi to 8.117 dBi. The received impulse signals in time and frequency domains at $\theta = 0°$ and $\theta = 180°$ has minimum distortion compared to the other directions. The maximum correlation factor is equal to 0.9808 at $\theta = 0°$ and $\theta = 180°$. Subsequently, the parameters obtained from the simulation were used to fabricate the prototype antenna. The measured results are compared with the simulated ones to confirm the antenna performance. From the compared $|S_{11}|$, radiation pattern and gain, the results have good agreement. From the results in this thesis, it is useful to design an ultra-wideband bidirectional antenna using circular sector ring fed by rectangular monopole for ultra-wideband communication system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความสนับสนุนของ ผศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะ ให้แนวความคิดและคำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งและขอขอบพระคุณ รศ. ดร. สมผล โกศัลวิตร์ สำหรับคำแนะนำต่างๆทั้งทางด้านทฤษฎีและด้านเทคนิคในทางปฏิบัติที่ใช้ในงานวิจัยของข้าพเจ้า ขอขอบคุณ คุณกฤตยา ชวานนท์พิทักษ์ และคุณรุ่งโรจน์ บุตตะจีนผู้ซึ่งให้แนวคิดในการวิจัย คำแนะนำต่างๆในการวิเคราะห์และทดสอบ รวมทั้งคุณกิตติศักดิ์ แพบัว คุณรัฐพงษ์ สุวลักษณ์และน้องๆในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่าน ผู้ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา ในเรื่องการเรียน และงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆทุกคน ที่คอยถามไถ่ ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการเรียนและการทำวิจัยตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าได้ศึกษาในระดับปริญญาโท

สุดท้ายขอกราบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความความรักความห่วงใยตลอดจนให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาและอบรมบ่มนิสัยด้วยดีตลอดมา คุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ซึ่งเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ธนวิทย์ ทิพย์เสวต

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.1 หลักการของสายอากาศ......19

2.4.1.1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อน (VSWR and Reflected Power)......19

2.4.1.2 แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ (Antenna Bandwidth)......19

2.4.1.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยาย (Directivity and Gain)......20

2.4.2 การพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ UWB......20

2.4.2.1 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ (System Transfer Function)......21

2.4.2.2 ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Transfer Function)......23

2.4.2.3 ความชัด (Fidelity)......24

2.4.3 ปัญหาในการออกแบบสายอากาศ UWB......24

2.5 สรุป......26

บทที่ 3 องค์ประกอบและการออกแบบสายอากาศ......27

3.1 บทนำ......27

3.2 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Waveguide)......28

3.2.1 คลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric: TE^z)......30

3.2.2 การโค้งงอระนาบสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นวงกลม (The circular E-plane bend rectangular waveguide)......31

3.3 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน......32

3.3.1 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส......32

3.3.2 วิวัฒนการของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยม......34

3.3.2.1 การตัดต่อบางส่วนของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและการใช้แท่นลัดวงจร......34

3.3.2.2 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ......37

3.4 ตัวอย่างสายอากาศที่มีมาก่อน......41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5 สรุป..44
บทที่ 4 การจำลองและผลการจำลองสายอากาศ...45
4.1 บทนำ..45
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่นำมาใช้พิจารณาการออกแบบสายอากาศเบื้องต้น.................................45
4.2.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน
และขนาดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก..46
4.2.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของเซกเตอร์วงกลม...47
4.3 การจำลองของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้
วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม..................................48
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของแผ่นลัดวงจร
ของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (v)..50
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของแผ่นลัดวงจรของโมโนโพล
ชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน (g)...51
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความสูงของตำแหน่งป้อน
สัญญาณของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (d)..................................52
4.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างของก้าน
โมโนโพลแต่ละก้าน (t)...53
4.3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความกว้างของโมโนโพล
ชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน (l)...54
4.3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวของโมโนโพล
ชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน (w)..55
4.3.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดช่องเปิดสี่เหลี่ยม ($a \times b$)......................56
4.3.8 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาว
ของท่อเซกเตอร์วงกลม (β)...57
4.3.9 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาดความสูงของช่องเปิด (b).................................57
4.4 ค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง
และอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง..59
4.4.1 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ...60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ....60
4.4.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ....65
4.4.4 อัตราการขยายของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ....65
4.5 การจำลองส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ที่มุมต่างๆ....66
4.5.1 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงเวลา....67
4.5.2 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่....72
4.5.3 ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ของสัญญาณอิมพัลส์....75
4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับสายอากาศที่มีมาก่อน....77
4.6.1 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ....78
4.6.2 การเปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ....80
4.7 สรุป....82

บทที่ 5 ผลการทดสอบ....83
5.1 บทนำ....83
5.2 สายอากาศต้นแบบ....83
5.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองของสายอากาศ....84
5.3.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ($|S_{11}|$)....84
5.3.2 อัตราการขยายของสายอากาศ....85
5.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ....86
5.4 สรุป....93

บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ....94
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์....94
6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา....96

เอกสารอ้างอิง....98

ประวัติผู้เขียน....101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ประเภทของสายอากาศในเชิงมิติโครงสร้างและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น....1

2.1 ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารแบบไร้สายแบบต่างๆ....9

2.2 การเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ 16

2.3 การเปรียบเทียบของอัตราบิตของ UWB กับมาตรฐานของระบบใช้สายและไร้สายอื่น....17

2.4 การบริโภคกำลังงานของชิพเซต UWB และชิพเซตสื่อสารแบบเคลื่อนที่แบบต่างๆ....18

3.1 แบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าของ L และขอบเขตของความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า –10 dB 33

3.2 การทดสอบแบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์ของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำมุมทแยงทั้งแบบไม่สมมาตรและแบบสมมาตรเทียบกับการเปลี่ยนแปลงมุมทแยง....35

3.3 ผลการทดสอบของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นทั้งสามแบบที่ได้จากรูปที่ 3.9....39

4.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ....49

4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง....59

5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ....84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 สายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบ..............2
1.2 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบ..............2
1.3 สายอากาศที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นวงกลมวางบนวงแหวนวงรี..............3
1.4 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศสองทิศทางโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลม
ที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน..............4
2.1 ระบบความหนาแน่นกำลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูง..............10
2.2 (ก) รูปร่างสัญญาณพัลส์ UWB ที่รับได้เชิงอุดมคติ (w_{rx})..............11
(ข) สเปกตรัมเชิงอุดมคติของสัญญาณพัลส์ UWB เดี่ยวที่รับได้..............11
2.3 แบบจำลองวงจรในโปรแกรม MATLAB อย่างง่ายเพื่อจะสร้าง Gaussian Doublet..............12
2.4 รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป..............12
2.4 รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป (ต่อ)..............13
2.5 (ก) ขบวนสัญญาณพัลส์ UWB..............13
2.5 (ข) สเปกตรัมของขบวนสัญญาณพัลส์ UWB..............14
2.6 สเปกตรัมของขบวนสัญญาณได้รับการ Dither โดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ไปข้างหน้าและ
ไปข้างหลังของตำแหน่งเดิม..............14
2.7 กรอบสเปกตรัมที่กำหนดโดย FCC 15.517 (b, c) สำหรับระบบ UWB ภายในอาคาร..............15
2.8 ระบบของสายอากาศส่งและรับ..............21
2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเกี่ยวกับรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์ที่แพร่กระจาย..............24
3.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศสองทิศทางโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลม
ที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน..............27
3.2 ลักษณะของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก..............28
3.3 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่โค้งเป็นวงกลมในระนาบสนามไฟฟ้า..............32
3.4 ลักษณะทางเรขาคณิตของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส..............33
3.5 (ก) โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำมุมทแยงแบบไม่สมมาตร..............34
3.5 (ข) โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำมุมทแยงแบบสมมาตร..............34
3.6 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด
เท่ากับ 25 mm ทำมุมทแยง $\alpha = 0°$, 10°, 20° และ 30°..............35
3.7 โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแท่นลัดวงจร..............36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.8 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเท่ากับ 25 mm ที่ไม่มีแผ่นลัดวงจรและมีแผ่นลัดวงจร....36

3.9 (ก) แผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน....37

3.9 (ข) แผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสองก้าน....37

3.9 (ค) แผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบก้านเดียว....38

3.10 $|S_{11}|$ ของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นทั้งสามแบบ....39

3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน....40

3.12 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น....41

3.13 $|S_{11}|$ ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น....41

3.14 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz....42

3.14 (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5 GHz....42

3.14 (ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 7 GHz....42

3.14 (ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 GHz....43

3.14 (จ) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz....43

4.1 สายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน....45

4.2 $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน....46

4.3 โมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมด้วยแผ่นกระตุ้นแบบสามก้านที่มีแผ่นลัดวงจร....46

4.4 สายอากาศสองทิศทางโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน....47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 โมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมด้วยแผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน........48
4.6 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของ
แผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (v)........50
4.7 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ
แผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (g)........51
4.8 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความสูง
ของตำแหน่งป้อนสัญญาณของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (d)........52
4.9 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของ
ก้านโมโนโพลแต่ละก้าน (t)........53
4.10 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้าง
ของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (l)........54
4.11 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาว
ของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (w)........55
4.12 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาด
หน้าตัดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก ($a \times b$)........56
4.13 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาว
ของท่อท่อเซกเตอร์วงกลม (β)........57
4.14 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาด
ความสูงหน้าตัดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (b)........58
4.15 การเปรียบเทียบผลของค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการป้อนสัญญาณ
ด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและป้อนสัญญาณด้วยโพรบ........58
4.16 $|S_{11}|$ ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลม
ที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม........60
4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz 61
4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5 GHz 61
4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 7 GHz 62
4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 GHz 62
4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz ...63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.22 แบบรูปของสนามที่ช่องเปิดที่ความถี่ต่างๆ....64

4.23 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเทียบกับความถี่ของสายอากาศสองทิศทางโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม....65

4.24 อัตราการขยายเทียบกับความถี่ของสายอากาศสองทิศทางโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม....66

4.25 ลักษณะของสายอากาศที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์....67

4.26 สัญญาญอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงเวลา....67

4.27 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยก....68

4.27 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยก (ต่อ)....69

4.28 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด....70

4.28 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด (ต่อ)....71

4.29 สัญญาณอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงความถี่....72

4.30 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมยก....73

4.31 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมกวาด....74

4.32 ค่าสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยก....75

4.32 ค่าสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยก (ต่อ)....76

4.33 ค่าสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบกวาด....76

4.33 ค่าสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบกวาด (ต่อ)....77

4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมและวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบแบบสี่เหลี่ยม....78

4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมและวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบแบบสี่เหลี่ยม (ต่อ)....79

4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมและวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบแบบสามก้าน (ต่อ)....80

4.35 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม....81

4.36 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนเซกเตอร์วงกลม....81

5.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ....83

5.2 $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง....85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.3 อัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง 86
5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.1 GHz 87
5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5 GHz 87
5.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 7 GHz 88
5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 9 GHz 88
5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 10.6 GHz 89
5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz 89
5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5 GHz 90
5.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 7 GHz 90
5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 GHz 91
5.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz 91

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ย่านความถี่กว้างยิ่งยวด (UWB) ได้เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 และในปี ค.ศ. 2002 FCC (Federal Communication Commission) ได้ตีพิมพ์กฎของ UWB สำหรับนำไปใช้ในการสื่อสารข้อมูลและเรดาร์รวมทั้งอุปกรณ์รักษาความปลอดภัย โดยกำหนดให้มีการใช้งานอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz หรือมีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 7.5 GHz ซึ่งเป็นการกำหนดแบนด์วิดธ์ที่กว้างที่สุดสำหรับระบบการสื่อสารบนพื้นโลกเกี่ยวกับทางด้านการพาณิชย์ [1]

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณ จึงมีการพัฒนาสายอากาศให้ความสอดคล้องกับความต้องการใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและวิจัยสายอากาศประเภทต่างๆมากมายรวมทั้งสายอากาศสำหรับ UWB ด้วยเช่นกัน โดยปกติสายอากาศ UWB มีความต้องการที่จะให้ค่าอิมพีแดนซ์แมตชิ่ง (Impedance matching) อัตราขยาย (Gain) และทิศทาง (Direction) ครอบคลุมตลอดความถี่ใช้งานของ UWB ซึ่งมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

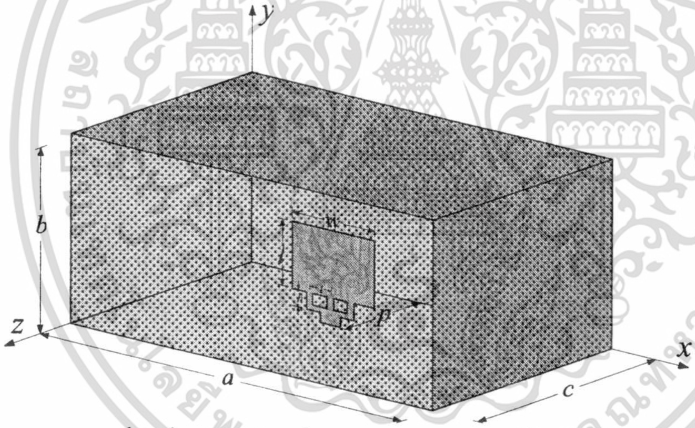
ประเภทของสายอากาศสามารถจะเน้นให้เด่นชัดได้ในรูปแบบตำแหน่งของความถี่ปฏิบัติงาน รูปทรงทางเรขาคณิตของโครงสร้างสายอากาศ วัสดุของตัวสายอากาศและอื่นๆ สายอากาศอาจจะมีการออกแบบในรูปทรงสองมิติและสามมิติ ที่มีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) หรือเจาะจงทิศทาง (Directional) ดังนั้นจึงสามารถที่จะแบ่งประเภทของสายอากาศออกอย่างคร่าวๆ ได้ 4 ประเภทตามรายการที่แสดงในตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1.1 ประเภทของสายอากาศในเชิงมิติโครงสร้างและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

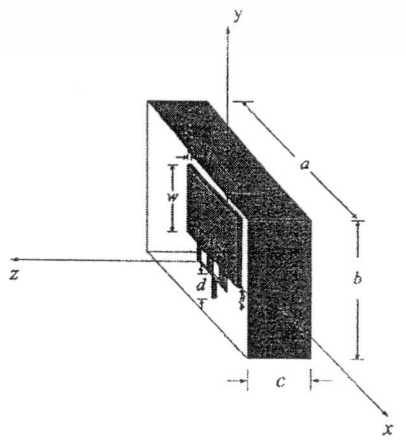
	Directional	Omni-Directional
Two-dimensional	Vivaldi Antenna Tapered Slot Antenna Log-periodic Antenna Planar Log-periodic Antenna Conical Spiral Antenna	Planar Dipole Antenna Slot Antenna Print Antenna on PCB
Three-dimensional	TEM Horn Antenna Ridge Horn Antenna Reflector Antenna	Loaded Cylindrical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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยสายอากาศที่แพร่หลายมีจุดสนใจอยู่ที่สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง (Omni-directional antenna) และเมื่อเร็วๆนี้ สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเจาะจงทิศทาง (Directional antenna) เริ่มได้รับความสนใจการการวิจัยเช่นเดียวกัน เนื่องด้วยในพื้นที่บริการที่มีลักษณะเป็นทางยาวตรงที่แคบ เช่น ทางด่วน ถนน อุโมงค์ ฯลฯ สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional antenna) หรือแบบสองทิศทาง (Bidirectional antenna) จะสามารถขยายพื้นที่ให้บริการให้ไกลกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางซึ่งเป็นสายอากาศที่นิยมติดตั้งที่สถานีฐาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาสายอากาศ UWB แบบเจาะจงทิศทางจึงมีความจำเป็นเพิ่มขึ้นสำหรับสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางที่เคยมีการวิจัยและพัฒนามาก่อนเช่นสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบ [3] ซึ่งเป็นสายอากาศแบบทิศทางเดียว สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น [4] และสายอากาศที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นวงกลมวางบนวงแหวนวงรี [5] ซึ่งเป็นสายอากาศแบบสองทิศทาง โครงสร้างของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางทั้ง 3 แบบจะแสดงไว้ในรูปที่ 1.1 ถึง 1.3 ตามลำดับ

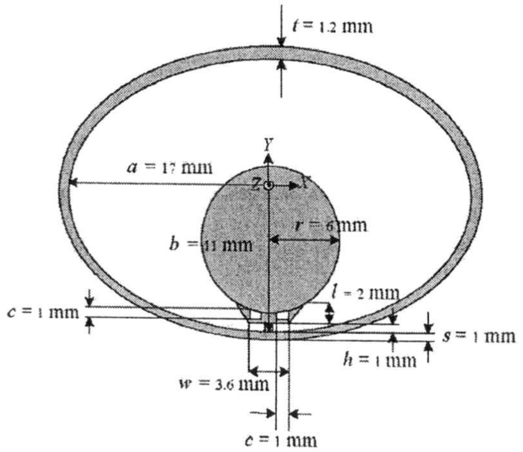


รูปที่ 1.1 สายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบ



รูปที่ 1.2 สายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



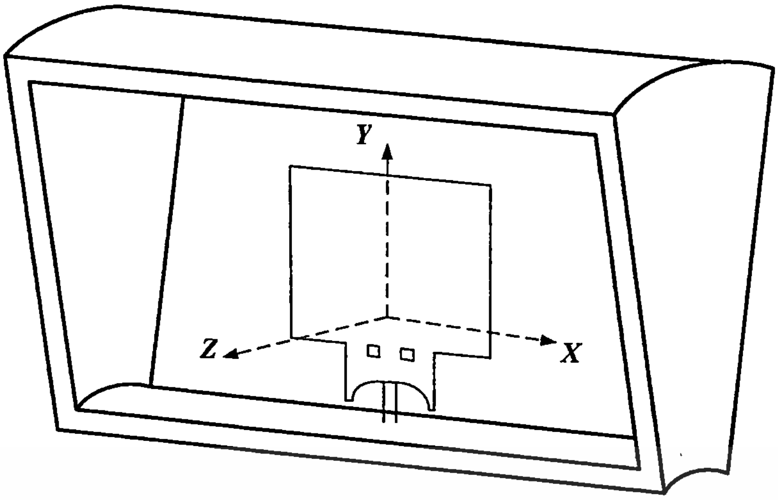
รูปที่ 1.3 สายอากาศที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นวงกลมวางบนวงแหวนวงรี

เนื่องจากสายอากาศ UWB ตอบสนองช่วงความถี่ที่กว้างมากตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ปัญหาที่พบอย่างหนึ่งในสายอากาศ UWB จากงานวิจัยที่ผ่านๆมาคือปัญหาการยกขึ้นของลำคลื่นที่ช่วงความถี่สูง อันเป็นผลมาจากขนาดของสายอากาศที่มีขนาดคงที่ในขณะที่ความถี่ตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงไป สำหรับสายอากาศ UWB ได้มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันโดยมีลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งานทั้งสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางรอบตัวและแบบเจาะจงทิศทางซึ่งมีทั้งแบบทิศทางเดียวหรือสองทิศทางและพบว่าสายอากาศ UWB มีปัญหาเรื่องการยกขึ้นของลำคลื่นเมื่อความถี่สูงขึ้นจึงทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างของสายอากาศขึ้นมาใหม่เพื่อปรับปรุงปัญหาการยกขึ้นของลำคลื่นที่ช่วงความถี่สูงซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษา การวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมโดยโครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะเป็นท่อเซกเตอร์วงกลมที่มีการตัดเปิดปลายทั้งสองด้านเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยม [6] แล้วป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน [7] ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยจะกำหนดให้มี $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวดรองรับความถี่ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางและควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นให้อยู่ทางด้านหน้าของสายอากาศตลอดช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

การจำลองสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยพิจารณาจากผลการจำลอง $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยาย จากนั้นทำการจำลองส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ของสายอากาศที่มุมต่างๆ โดยสายอากาศส่งเป็นสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และสายอากาศรับเป็นโพรบเสมือนจริง พิจารณาผลการจำลองส่งและรับของสัญญาณอิมพัลส์ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงเวลา โดเมนเชิงความถี่และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ (Correlation factor) จากนั้นเป็นการสร้างและทดสอบสายอากาศเพื่อยืนยันความถูกต้องของ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยาย ที่ได้จากผลการจำลอง วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็เพื่อศึกษาสายอากาศที่ตอบสนองช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดตามมาตรฐานของ FCC โดยมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาการยกขึ้นของลำคลื่นที่ช่วงความถี่สูงของสายอากาศด้วยการใช้โครงสร้างวงแหวนเซกเตอร์วงกลมเป็นองค์ประกอบในการแก้ไขและกำหนดขอบเขตให้สายอากาศมี $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz มีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง ทั้งทำการศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆว่ามีความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละมุมเป็นอย่างไร แล้วทำการสร้างและทดสอบสายอากาศเพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง จากการศึกษาสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบและสร้างสายอากาศที่มีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางสำหรับช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่เป็นเส้นตรงเช่นทางด่วนหรืออุโมงเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ตลอดจนแนวความคิดและวิธีการในการพิจารณาสายอากาศ

บทที่ 2 เป็นการอธิบายถึงทฤษฎีและหลักการของ UWB รวมทั้งระบบและสัญญาณของ UWB โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของ UWB

บทที่ 3 ในบทนี้อธิบายถึงวิวัฒนาการ หลักการในการออกแบบสายอากาศและตัวอย่างของสายอากาศที่เคยมีมาก่อน

บทที่ 4 แสดงการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยพิจารณาจากค่า $|S_{11}|$ แสดงผลที่ได้จากการจำลอง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราการขยาย สัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลา โดเมนเชิงความถี่ ตัวประกอบสหสัมพันธ์และแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้กับสายอากาศที่เคยมีมาก่อนโดยจะทำการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศระหว่างสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบและสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

บทที่ 5 เป็นการแสดงผลการทดสอบสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมโดยนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยพิจารณาจาก $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยาย

บทที่ 6 เป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนวิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนะนำแนวทางในการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการการสื่อสารช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีและหลักการของการสื่อสารช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดหรือที่เรียกกันว่า UWB โดยจะเริ่มที่ความเป็นมารวมทั้งระบบและสัญญาณ UWB ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดมา ซึ่งกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของ UWB ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานรวมทั้งลักษณะรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ทำให้เกิดเป็นระบบ UWB และคุณสมบัติอื่นๆที่ทำให้ระบบ UWB ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

2.2 ความเป็นมาของการสื่อสาร UWB

การสื่อสาร UWB นั้นได้เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางเมื่อประมาณปี ค.ศ. 2000 ได้รับการขนานนามจากนิตยสารต่างๆว่าเป็นหนึ่งในหลายเทคโนโลยีที่จะเปลี่ยนโฉมหน้าของโลกของเรา แต่ในความเป็นจริงแล้วต้นกำเนิดของ UWB มีมาตั้งแต่เมื่อกว่าร้อยปีมาแล้วหรือกล่าวได้ว่าการสื่อสารทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเริ่มต้นมาพร้อมกับ UWB ในปลายคริสตศตวรรษที่ 18 วิธีที่ง่ายที่สุดสำหรับการสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือการสร้างพัลส์สั้นๆ (Short pulse) ขึ้นมา โดยการใช้แหล่งกำเนิดแบบ Spark-gap ตัวอย่างเช่น ข้อมูลที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าครั้งแรกในการทดลองของ Hertz รวมทั้งการทดลองของ Marconi ในเรื่องการสื่อสารข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า [8] ด้วยเหตุนี้เองทำให้ระบบ UWB ที่นำมาใช้งานจริงครั้งแรกเกิดขึ้นเมื่อ 100 ปีมาแล้วและยังมีนักทฤษฎีที่สำคัญคนหนึ่งชื่อว่า Sommerfield ได้ทำวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของพัลส์สั้นที่เกิดจากครึ่งแผ่นระนาบ (Half-plane) ซึ่งได้มาเป็นหลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นของ UWB [9]

อย่างไรก็ตามหลังจากปี ค.ศ. 1910 เป็นต้นมา ความสนใจส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปยังการพัฒนาการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบ (Narrowband) เนื่องจากการสื่อสารช่วงความถี่กว้างจะให้ประสิทธิภาพสเปกตรัม (Spectral efficiency) ของสัญญาณที่เกิดจากตัวส่งแบบ Spark-gap นั้นต่ำและยังมีอัตราบิต (Bit rate) ที่ต่ำอีกด้วยหรืออาจจะกล่าวได้ว่าสัญญาณเหล่านี้มีตัวประกอบการแผ่กระจายออก (Spreading factor) ที่กว้าง ซึ่งในเวลานั้นยังไม่มีใครรู้วิธีที่จะนำการแผ่กระจายออกของสัญญาณมาใช้งานอย่างไรทำให้ดูเหมือนว่าจะไม่เพียงพอสำหรับการใช้งาน ในทางกลับกันการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบซึ่งได้นำมาใช้ในการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ FDM (Frequency Division Multiplex) ได้แสดงให้เห็นว่าเป็นการเรื่องที่ง่ายที่จะส่งสัญญาณหลายสัญญาณพร้อมกันในช่วงความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงทำให้การศึกษาค้นคว้า UWB ไม่มีความก้าวหน้ามากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการศึกษาวิจัย UWB อย่างจริงจังอีกครั้ง โดยได้นำมาใช้สำหรับเรดาร์ทางการทหารซึ่งในครั้งนี้ประเด็นสำคัญไม่ได้อยู่ที่ประสิทธิภาพสเปกตรัมแต่จะมุ่งเน้นพัฒนาความละเอียดทางด้านตำแหน่ง (Spatial resolution) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าต้องการเพิ่มความแม่นยำของเวลาที่ใช้งาน (Runtime) สำหรับการส่งสัญญาณจากเรดาร์ตัวส่งไปยังวัตถุที่ระบุและส่งกลับมายังตัวรับ ในการศึกษานั้นจะเริ่มจากการพิจารณาองค์ประกอบทางฟูริเยร์พบว่าต้องส่งสัญญาณเรดาร์แบบพัลส์ที่สั้นกว่าเดิม ส่วนประกอบสำคัญของระบบเรดาร์แบบ UWB คือการออกแบบกำลังงานสูง (High power) และเครื่องกำเนิดพัลส์สั้น (Short-pulse generator)

การสื่อสารแบบ UWB เริ่มได้รับความสนใจอีกครั้งในปี ค.ศ 1970 [10] เวลานั้นจะเรียกว่าการสื่อสารแบบเบสแบนด์ (Baseband) หรือแบบปราศจากคลื่นพาห์ (Carrier-free) และประมาณปี ค.ศ.1973 ได้มีการยอมรับกันว่าสัญญาณแบบพัลส์สั้นที่แผ่ขยายสัญญาณตลอดสเปกตรัมที่กว้างนั้นไม่ได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณช่วงความถี่แคบและไม่ได้แทรกสอดสัญญาณช่วงความถี่แคบเหล่านั้นด้วย แต่มีปัญหาในเรื่องการแทรกสอดแบบ Multiple-access (Multiple Access Interference : MAI) ของการไม่ซิงโครไนซ์ (Unsynchronized) ของผู้ใช้ ทำให้ในปี ค.ศ 1970 ถึง ปี ค.ศ 1980 การสื่อสาร UWB ยังคงได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องในส่วนทางด้านการทหารและในปี ค.ศ. 1990 ปัญหาเรื่อง MAI ก็ได้รับการแก้ไขโดยการริเริ่มของหลักการวิทยุอิมพัลส์แบบ Time-hopping (Time Hopping Impulse Radio: TH-IR) โดย Win และ Scholtz [11]-[13] ที่แสดงให้เห็นว่าสัญญาณวิทยุอิมพัลส์สามารถยังคงรองรับจำนวนผู้ใช้จำนวนมากไว้ได้โดยใช้การกำหนดเวลาการส่งผ่านแบบสุ่มเทียม (Pseudorandom) ไปยังพัลส์จากผู้ใช้ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาดังกล่าวบวกกับความก้าวหน้าในการออกแบบชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความสนใจที่จะนำ UWB มาใช้ในเชิงพาณิชย์

อุปสรรคที่สำคัญสำหรับการนำ UWB ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ก็คือความถี่ที่มีอยู่ในธรรมชาติที่จัดสรรให้ใช้อยู่ทั่วโลกนั้นจะกำหนดให้เป็นแบบช่วงความถี่แคบสำหรับการใช้งานอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ระบบ UWB ได้ฝ่าฝืนข้อกำหนดดังกล่าวเนื่องจากมีการแพร่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่ที่กว้างอาจจะครอบคลุมช่วงความถี่ที่มีการกำหนดใช้งานอย่างอื่นด้วย ดังนั้นจึงมีการขออนุญาตให้สามารถใช้งาน UWB ได้โดยที่การใช้งาน UWB ไม่ไปแทรกสอดกับการใช้งานอย่างอื่น จนในที่สุดในปี ค.ศ. 2002 ทาง FCC ได้อนุญาตให้การใช้ UWB สามารถใช้ได้ที่ย่านความถี่ระหว่าง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz นอกจากนี้ยังมีการกำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ของชั้นกายภาพสำหรับการสื่อสารไร้สายที่มีค่า Throughput สูงบนพื้นฐานของ UWB ขึ้นมา รวมทั้งมาตรฐาน IEEE 802.15.4a สำหรับการพัฒนาข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่ใช้ร่วมกันสำหรับอุปกรณ์ UWB

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา งานวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสาร UWB ได้มีจำนวนมากขึ้นซึ่งมีหัวข้อที่ทำการวิจัยที่แตกต่างกันออกไป เช่น การประเมินช่องสัญญาณและการซิงโครไนซ์ (Synchronization) [14]-[15] การติดตั้งเพื่อนำไปงานจริงของระบบวิทยุอิมพัลส์และการติดตั้งอื่นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวข้อง [16]-[18] การใช้งาน UWB ร่วมกับ MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [19]-[20] นอกจากนี้งานวิจัยทางด้านสายอากาศ UWB ก็ได้รับความสนใจเช่นเดียวกันเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน

2.3 ระบบและสัญญาณ UWB

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติพื้นฐานของระบบและสัญญาณ UWB อย่างแรกที่จะพูดถึงจะเป็นรูปร่างพื้นฐานของสัญญาณพัลส์ในระบบ UWB ในโดเมนทางเวลาและสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์ด้วย โดยทั่วไปแล้วสัญญาณพัลส์ที่สั้นมากๆซึ่งเวลาของสัญญาณขึ้นและลงอย่างรวดเร็วจะมีสเปกตรัมกว้างและมีพลังงานที่ต่ำมาก จะเห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์ UWB ที่สั้นมากๆจะสามารถถูกกรองไว้และยังพร้อมที่จะถูกแยกออกจากการสะท้อนของสัญญาณหลายเส้นทางที่ไม่ต้องการได้เพราะว่าความละเอียดทางเวลาที่ดี (Fine time resolution) ซึ่งจะนำไปสู่คุณลักษณะของการไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณหลายเส้นทาง ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณพัลส์ UWB ทำให้สัญญาณแพร่กระจายคลื่นผ่านวัสดุอย่างเช่น อิฐหรือปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาคส่งและภาครับของ UWB ไม่ต้องการส่วนประกอบที่ใหญ่และมีราคาแพงทำให้สามารถลดต้นทุน ขนาด น้ำหนักและการสิ้นเปลืองกำลังงานของระบบ UWB เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบโดยทั่วไป

2.3.1 The FCC Report and Order

ในปี ค.ศ. 2002 FCC ได้ตีพิมพ์กฎของ UWB สำหรับนำไปใช้ในการสื่อสารข้อมูลและเรดาร์รวมทั้งอุปกรณ์รักษาความปลอดภัย โดย The FCC Report and Order จะเป็นตัวกำหนดพื้นฐานสำหรับกฎตามมาตราฐานของทาง FCC ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ดังนี้ [1]

- แบนด์วิดธ์ของ UWB : แถบความถี่จะกำหนดขอบเขตโดยให้มีค่าเท่ากับ 10 dB ลงมาจากค่าที่มากที่สุดของกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น
- ความถี่กลางจะถูกกำหนดให้ $f_c = (f_H + f_L)/2$
- แบนด์วิดธ์จะถูกกำหนดให้ $\mathrm{BW} = 2(f_H - f_L)/(f_H + f_L)$ โดยแบนด์วิดธ์ของ UWB จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz (UWB bandwidth $\geq$ 500 MHz)
- EIRP : Equivalent Isotropically Radiated Power เป็นตัวกำเนิดกำลังงานไปยังสายอากาศและอัตราการขยายของสายอากาศที่มีทิศทางจะมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไอโซทรอปิก
- สำหรับระบบภายในอาคารและระบบเคลื่อนที่ (ตัวอย่างเช่น Laptop Computer หรือ PDA) แบนด์วิดธ์ของระบบ UWB ต้องอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และต้องมีค่า EIRP เท่ากับ –43 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน (Power Spectral Density)

โดยทั่วไปความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบ UWB จะพิจารณาให้มีค่าต่ำมากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ทางด้านการสื่อสาร ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (PSD) กำหนดให้เป็น [21]

$$\mathrm{PSD} = \frac{P}{B} \tag{2.1}$$

โดยที่ P เป็นกำลังงานส่งมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) และ B เป็นแบนด์วิดธ์ของสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ส่วนความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานจะมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเฮิรตซ์ (W/Hz)

ที่ผ่านมาพบว่าการสื่อสารไร้สายจะมีใช้เฉพาะช่วงความถี่แคบซึ่งจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่สูงหรือจะกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เนื่องจากเรารู้ว่าความถี่และเวลาจะเป็นสัดส่วนที่ตรงข้ามกัน (Inversely proportional) ระบบสัญญาณไซนูซอยด์จะมี B แคบและระยะเวลา (t) นาน สำหรับระบบ UWB แล้วสัญญาณพัลส์จะมีเวลา t สั้น และช่วงความถี่ B ที่กว้างมาก เพื่อให้เห็นความแตกต่างของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบแบบต่างๆดังนั้นตารางที่ 2.1 จะแสดงค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารไร้สายแบบต่างๆ จะเห็นได้ว่ากำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณและแบนด์วิดธ์ที่ได้รับในระบบสื่อสารไร้สายแบบต่างๆเป็นอย่างไร การเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบความหนาแน่นกำลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูงจะแสดงในรูปที่ 2.1 ปริมาณกำลังงานทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความถี่และความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน

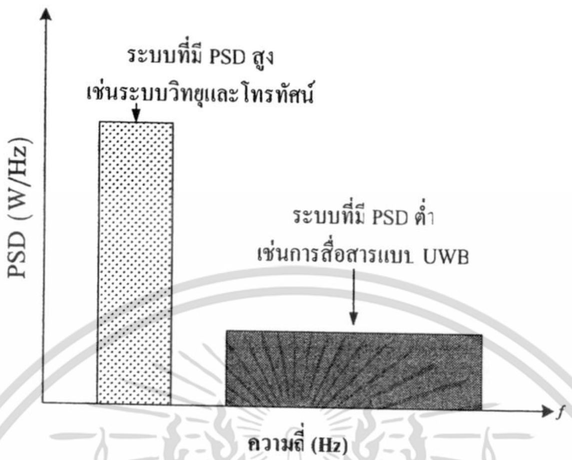
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบการสื่อสารแบบไร้สายแบบต่างๆ

ระบบ	กำลังงานส่ง (W)	แบนด์วิดธ์ (Hz)	ความหนาแน่นกำลังงาน (W/Hz)	ประเภทของช่วงความถี่
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
UWB	1 mW	7.5 GHz	0.013	ช่วงกว้างยิ่งยวด

สำหรับระบบ UWB โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำมากๆ ประโยชน์ของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานที่ต่ำคือความน่าจะเป็นในการตรวจจับสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ (Low probability of detection) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจการประยุกต์ใช้ในทางทหารยกตัวอย่างเช่น การแปลงทางด้านการสื่อสารและเรดาร์ นอกจากนี้ยังจะเกี่ยวข้องกับการประยุกต์การใช้งานในระบบไร้สายที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูลสูง



รูปที่ 2.1 ระบบความหนาแน่นกำลังงานต่ำและความหนาแน่นกำลังงานสูง

2.3.3 รูปร่างสัญญาณพัลส์ (Pulse Shape)

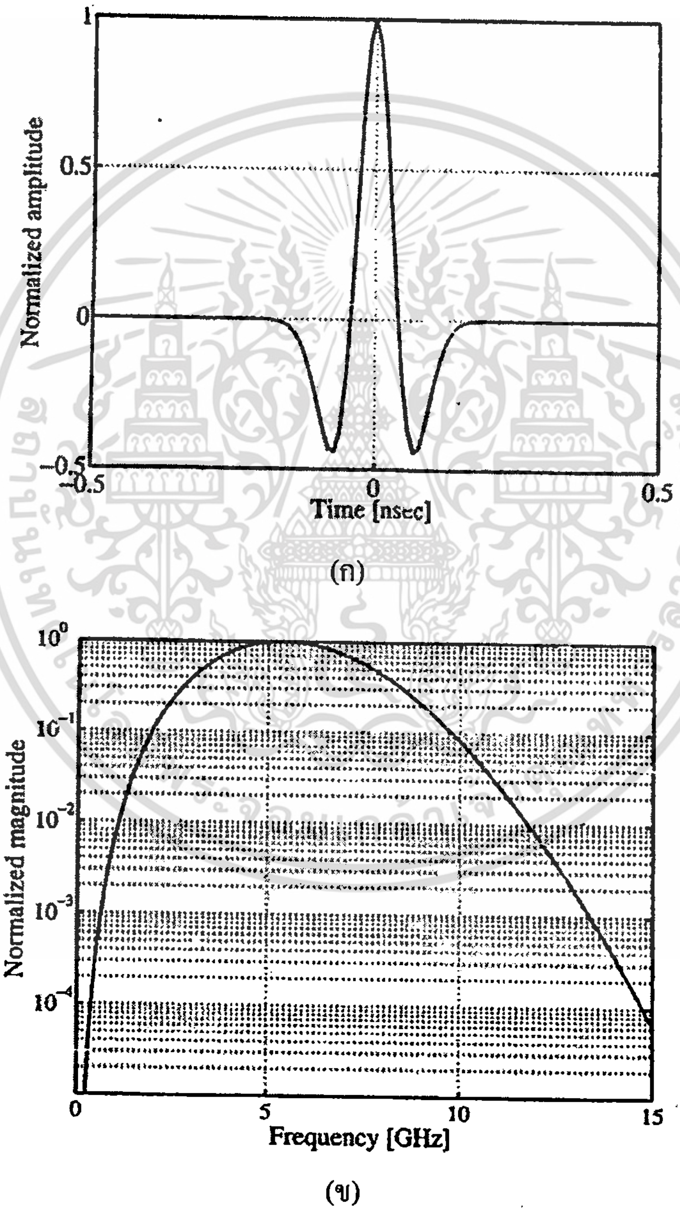
รูปร่างสัญญาณพัลส์ UWB ที่รับได้โดยทั่วไปบางทีอาจจะเรียกว่า Gaussian doublet แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 สัญญาณพัลส์ดังกล่าวมักจะนำมาใช้ในระบบ UWB เพราะว่ามีรูปร่างที่ง่ายต่อการสร้าง โดยจะสร้างเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสจากเวลาสัญญาณพัลส์ขึ้นและลงที่จำกัดและผลของการกรองสัญญาณของสายอากาศส่งและรับจึงทำให้รูปร่างสัญญาณพัลส์ UWB ที่รับได้จึงเป็นสัญญาณในรูปที่ 2.2 สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถสร้างขึ้นอย่างง่ายโดยการสวิตช์การเปิดปิดตัวทรานซิสเตอร์อย่างรวดเร็ว

รูปแบบการสร้างสัญญาณอย่างง่ายๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งทำให้เห็นถึงการเกิด Gaussian doublet ที่ภาคส่ง ผลกระทบของสายอากาศและ ภาครับ จากรูปที่ 2.4 (ก) สัญญาณพัลส์ UWB จะอยู่ในระดับนาโนวินาทีหรือพิโควินาที การสวิตช์เปิดปิดอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ไม่ได้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมๆที่ถูกทำให้ราบลง รูปร่างสัญญาณพัลส์จะมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งของฟังก์ชันแบบเกาส์ สำหรับฟังก์ชันแบบเกาส์ $G(x)$ สามารถเขียนได้ดังสมการ

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

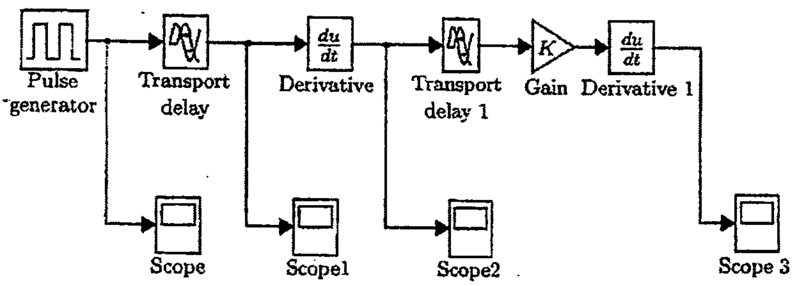
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่สมการที่ 2.2 จะสมมติให้เป็นค่าเฉลี่ยศูนย์ (Zero mean) จึงเป็นที่มาของคำว่า สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ (Gaussian pulse) วงเดี่ยว (Monocycle) หรือ Doublet วงจรอย่างง่ายสำหรับการสร้าง Gaussian doublet สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 การส่งสัญญาณพัลส์โดยตรงไปยังสายอากาศทำให้สัญญาณพัลส์ถูกกรองเนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศนั่นเอง การกรองนี้จะสามารถจำลองโดยการหาอนุพันธ์ [22] จะมีการกรองแบบเดียวกันนี้ที่สายอากาศรับด้วย ในที่นี้จะจำลองให้เวลาของสัญญาณถูกเลื่อนออกไปและสมมติให้สัญญาณพัลส์ถูกขยายที่ภาครับ



รูปที่ 2.2 (ก) รูปร่างสัญญาณพัลส์ UWB ที่รับได้เชิงอุดมคติ (w_{rx}) และ (ข) สเปกตรัมเชิงอุดมคติของสัญญาณพัลส์ UWB เดี่ยวที่รับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองวงจรในโปรแกรม MATLAB อย่างง่ายเพื่อจะสร้าง Gaussian doublet

รูปร่างสัญญาณพัลส์ที่รับได้ในเชิงอุดมคติ (p_{rx}) สามารถเขียนได้เป็น

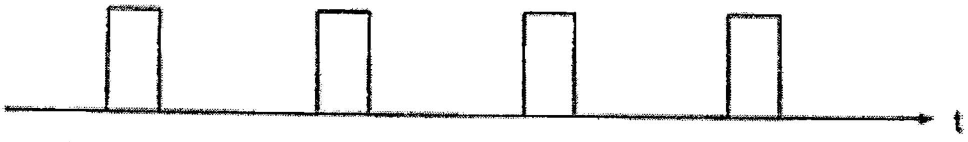
$$p_{rx} = \left[1 - 4\pi\left(\frac{t}{\tau_m}\right)^2\right] e^{-2\pi(t/\tau_m)^2} \tag{2.3}$$

ซึ่งเป็นสมการที่นำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 2.2 (ก) ในที่นี้ τ_m จะสมมติให้มีค่าเท่ากับ 0.15 น่าจะกล่าวได้ว่า τ_m เป็นพารามิเตอร์ตัวเดียวของสมการที่ 2.3 และสามารถกำหนดคุณลักษณะทางเวลาและความถี่ของ Gaussian doublet ให้มีรูปแบบไม่ซ้ำกัน

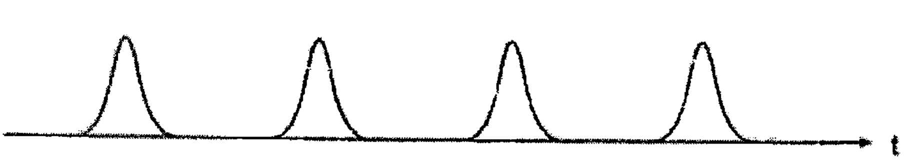
สเปกตรัมของ Gaussian doublet สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 (ข) ความถี่กลาง (Center frequency) สามารถประมาณจากรูปได้อยู่ที่ 5 GHz และมีช่วงความถี่ 3 dB (magnitude $\geq 10^{-3}$) ครอบคลุมความถี่หลาย GHz เมื่อเปรียบเทียบระบบสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบหรือแม้แต่ช่วงความถี่กว้างเองก็ตามจะเห็นได้ว่าระบบ UWB จะมีช่วงความถี่ที่กว้างมากจึงเป็นที่มาของชื่อ UWB

2.3.4 ขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse Train)

สัญญาณพัลส์อันเดียวนั้นไม่สามารถจะสื่อสารข้อมูลจำนวนมากได้ ดังนั้นข้อมูลจึงจำเป็นที่จะผ่านการมอดูเลตกับลำดับของสัญญาณพัลส์ที่เรียกว่าขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse train)

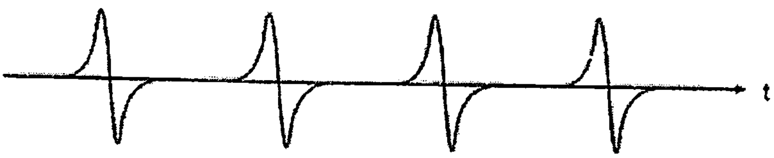


(ก)

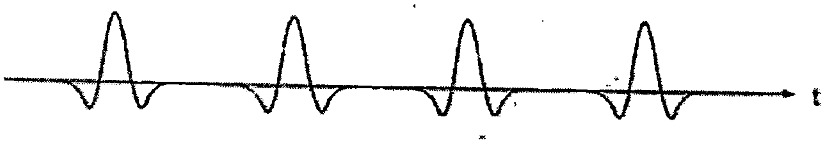


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.4 รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป

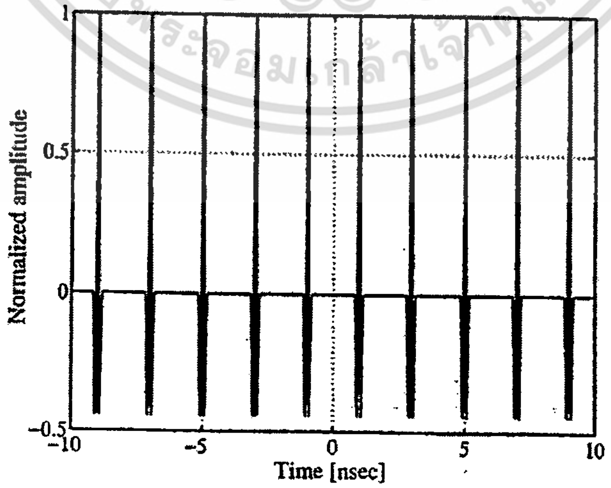
(ก) ขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse train)

(ข) สัญญาณพัลส์แบบเหมือน Gaussian (Gaussian-like pulse)

(ค) สัญญาณพัลส์อนุพันธ์ครั้งที่ 1 (First-derivative pulses)

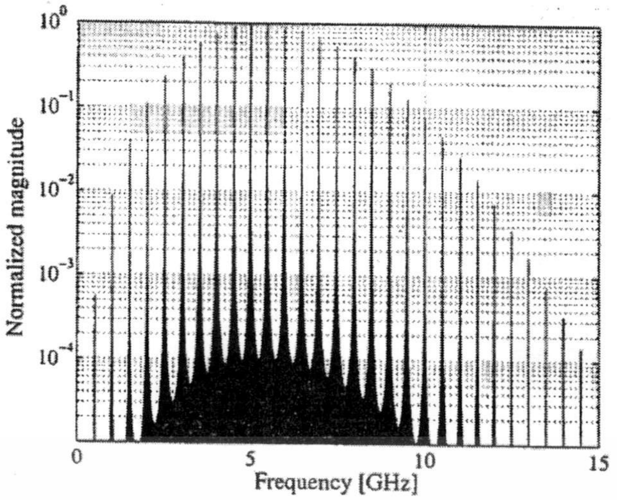
(ง) Gaussian doublet ที่รับได้

เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ไปจะมีช่องว่างเวลาระหว่างสัญญาณที่มีเป็นระยะ บางทีจะเรียกว่าอัตราการส่งสัญญาณพัลส์ซ้ำ (Pulse repetition) หรือรอบการทำงาน (Duty cycle) ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมของสัญญาณประกอบไปด้วยยอดสูงสุดของกำลังงานที่ความถี่ที่แน่นอน ความถี่เหล่านี้จะเป็นส่วนกลับของอัตราการส่งสัญญาณพัลส์ซ้ำและเส้นยอดสูงสุดของกำลังงานเหล่านี้จะเรียกว่าซี่หวี (Comb lines) เนื่องจากมีลักษณะเหมือนกับหวี ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก)



(ก)

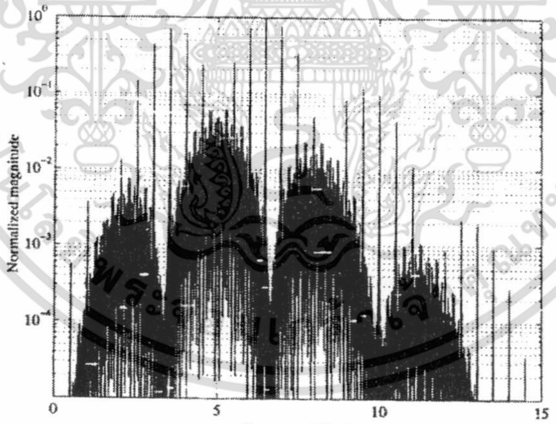
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

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

ยอดสูงสุดเหล่านี้จะจำกัดกำลังส่งรวมทั้งหมดที่ไม่ต้องการได้ วิธีหนึ่งก็คือ Dither สัญญาณ โดยการเพิ่มตำแหน่ง Offset สั้นๆแบบสุ่มไปในสัญญาณพัลส์แต่ละสัญญาณ สเปกตรัมที่เป็นผลมาจาก Offset แบบสุ่มจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของขบวนสัญญาณได้รับการ Dither โดยการเลื่อนสัญญาณพัลส์ไปข้างหน้าและไปข้างหลังของตำแหน่งเดิม

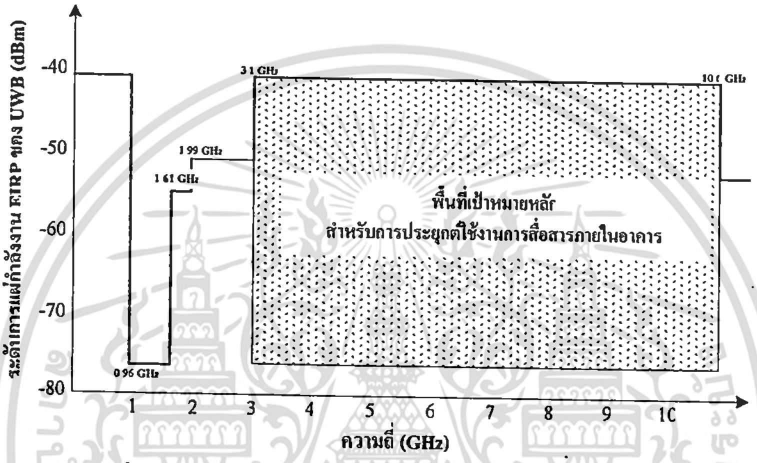
2.3.5 กรอบสเปกตรัม (Spectral Masks)

สเปกตรัมของสัญญาณ UWB เป็นหนึ่งในประเด็นหลักที่ต้องผ่านการพิจารณาทั้งทางด้านภาคอุตสาหกรรมและรัฐบาลเพื่อให้สามารถนำ UWB ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งเรื่องสเปกตรัมถือว่าเป็นหัวใจหลักของเทคโนโลยี UWB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารทางวิทยุทั้งหมดจะอยู่ภายใต้กฎหมายที่แตกต่างกันและข้อกำหนดเกี่ยวกับเอาต์พุตของกำลังงานในช่วงความถี่ใดช่วงความถี่หนึ่ง เพื่อจะป้องกันการแทรกสอดไปยังผู้ใช้อื่นที่ใช้ช่วงความถี่ใกล้ๆกันหรือความถี่เดียวกัน

ระบบ UWB จะครอบคลุมสเปกตรัมที่กว้างมากและสามารถแทรกสอดกับผู้ใช้ที่มีอยู่แล้ว เพื่อให้การแทรกสอดเหล่านั้นมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นทาง FCC และองค์กรต่างๆจึงจำเป็นต้องระบุกรอบของสเปกตรัมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆซึ่งจะแสดงเอาต์พุตกำลังงานที่อนุญาตให้ใช้สำหรับความถี่ที่ได้ระบุไว้



รูปที่ 2.7 กรอบสเปกตรัมที่กำหนดโดย FCC 15.517 (b c) สำหรับระบบ UWB ภายในอาคาร

จากรูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างของกรอบสเปกตรัมที่ FCC กำหนดไว้สำหรับระบบ UWB ภายในอาคาร ซึ่งกำหนดให้ใช้งานได้ในช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยที่จะต้องมีเอาต์พุตกำลังงานมากที่สุดเท่ากับ -41.3 dBm/MHz

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

2.3.6 ความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัม (Spatial and Spectral Capacities)

คุณสมบัติพื้นฐานของระบบ UWB อีกอย่างก็คือมีความจุทางตำแหน่งที่สูง (Spatial capacity) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อตารางเมตร (bps/m^2) [23] ความจุทางตำแหน่งสามารถคำนวณได้เป็นอัตราข้อมูลสูงที่สุด (Maximum data rate) ของระบบหารด้วยพื้นที่ที่ครอบคลุมการส่งของระบบ พื้นที่ในการส่ง (Transmission area) สามารถคำนวณจากพื้นที่วงกลมที่สมมติให้ตัวส่งอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลาง โดยความจุทางตำแหน่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุทางตำแหน่ง (bps/m^2) = อัตราข้อมูลมากที่สุด (bps) /พื้นที่ในการส่ง (m^2) (2.4)

พื้นที่ในการส่ง (m^2) = π x (ระยะทางในการส่ง (Transmission distance))^2 (2.5)

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

ความจุทางสเปกตรัม(bps/Hz) = อัตราข้อมูลมากที่สุด (bps) / แบนด์วิดธ์ (Hz) (2.6)

สำหรับระบบ UWB ที่ทำงานในสเปกตรัมของระบบอื่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกำลังงานที่ต่ำมากๆเป็นการชดเชยสำหรับการใช้งานที่มีช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด ตามปกติแล้วระบบ UWB จะมีความจุทางสเปกตรัมที่ต่ำเมื่อเทียบระบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความจุทางตำแหน่งกันแล้ว ระบบ UWB จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ที่แสดงการเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบของความจุทางตำแหน่งและสเปกตรัมของระบบไร้สายภายในอาคารแบบต่างๆ

ระบบ	อัตราส่งมากที่สุด (Mbps)	ระยะการส่ง (m)	ความจุทางตำแหน่ง (kbps/m^2)	ความจุทางสเปกตรัม (bps/Hz)
UWB	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

2.3.7 ความเร็วของการส่งข้อมูล (Data Rate)

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของการส่ง UWB สำหรับการสื่อสารก็คือ อัตราข้อมูลที่สูง การประยุกต์ใช้งานในทางการสื่อสาร UWB มีเป้าหมายความเร็วการส่งข้อมูลอยู่ในช่วง 100 Mbps ถึง 500 Mbps [24] ซึ่งจะมากกว่าความเร็วของการส่งข้อมูลในระบบ Bluetooth 100 ถึง 500 เท่า และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ประมาณ 50 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของการส่งข้อมูลของมาตรฐาน 802.11b หรือ 10 เท่าของมาตรฐาน 802.11 a WLAN (Wireless Local Area Network)

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าอัตราข้อมูลสำหรับการส่ง UWB 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 สำหรับการส่งระยะใกล้ที่ไม่เกินระยะเท่ากับ 4 m

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบของอัตราบิตของ UWB กับมาตรฐานของระบบใช้สายและไร้สายอื่น

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

2.3.8 ราคา (Cost)

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของเทคโนโลยี UWB ก็คือเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากระบบ UWB สามารถสร้างขึ้นจากส่วนประกอบที่เป็นแบบดิจิตอลเกือบทั้งหมด โดยมีส่วนประกอบทางด้านความถี่วิทยุ (RF) หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไมโครเวฟน้อยที่สุด ส่วนประกอบของระบบที่น้อยจะนำไปสู่การลดลงของต้นทุน ภาคส่ง UWB ที่ง่ายที่สุดจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดพัลส์ วงจรทางเวลาและตัวสายอากาศ อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการอัตราข้อมูลที่สูงกว่าก็จำเป็นที่จะใช้วงจรทางเวลาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้สามารถเข้าถึงได้หลายรูปแบบจึงจำเป็นที่ต้องเพิ่มในส่วนนี้เข้าไป ซึ่งก็ทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นไปด้วย ยิ่งไปกว่านั้นราคาของชิพเซตก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของการผลิตอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

110385

2.3.9 ขนาด (Size)

ขนาดที่เล็กของภาคส่ง UWB เป็นความต้องการที่จะรวมเข้าไปกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้กันในปัจจุบัน ในกลุ่มทำงานของมาตรฐาน 802.15 บริษัทอิเล็กทรอนิกส์ได้กำหนดเป้าหมายขนาดของวงจรไร้สายให้มีขนาดเล็กพอที่จะนำไปบรรจุลงในตัวเก็บข้อมูลแบบ SD

เหตุผลหลักที่ต้องการให้ภาคส่งและรับของ UWB มีขนาดเล็กเนื่องจากการลดลงของส่วนประกอบแบบพาสซีฟ (Passive) อย่างไรก็ตาม ขนาดและรูปร่างของสายอากาศ ก็เป็นตัวประกอบที่จำเป็นต้องพิจารณาเช่นเดียวกัน

2.3.10 การบริโภคกำลังงาน (Power Consumption)

ด้วยการออกแบบทางวิศวกรรมที่เหมาะสมทำให้การสูญเสียกำลังงานของชิพเซต UWB มีค่าที่ต่ำ ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีใดก็ตาม ต่างก็คาดหวังว่ามีการบริโภคกำลังงานที่ลดลงและมีวงจรที่มีประสิทธิภาพรวมทั้งสามารถประมวลผลสัญญาณได้มากขึ้นบนชิพขนาดเล็กที่ใช้แรงดันในการทำงานต่ำ

ในปัจจุบันได้ตั้งเป้าหมายสำหรับการบริโภคกำลังงานของชิพเซต UWB ให้น้อยกว่า 100 mW ส่วนตารางที่ 2.4 จะแสดงค่าการบริโภคกำลังงานของชิพเซตที่มีใช้กันในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.4 การบริโภคกำลังงานของชิพเซต UWB และชิพเซตการสื่อสารเคลื่อนที่แบบต่างๆ

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

2.4 สายอากาศแถบกว้างยิ่งยวด (UWB Antenna)

การใช้งานจริงในปัจจุบันเทคโนโลยีสัญญาณพัลส์สั้นในระบบ UWB จะถูกพิจารณาเพียงการนำไปประยุกต์ใช้งานในกำลังงานที่ต่ำและระยะที่สั้นเนื่องจากข้อจำกัดของวงจรสร้างพัลส์ (Pulse-forming) การสร้างระบบการสื่อสาร UWB ต้องการทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการคำนวณและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินพารามิเตอร์ของการออกแบบสายอากาศซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสายอากาศ โดยจะกำหนดประสิทธิภาพของความถูกต้องแม่นยำ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสายอากาศ UWB ซึ่งจะถูกออกแบบสำหรับสัญญาณพัลส์ที่มีระยะเวลาที่สั้นทั้งทางด้านส่งและรับ การออกแบบสายอากาศ UWB ยังคงเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญหลักในความก้าวหน้าของเทคโนโลยี UWB

2.4.1 หลักการของสายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการสื่อสารซึ่งใช้ในการรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานต่างๆของสายอากาศ ตัวอย่างเช่น ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ และอัตราการขยายของสายอากาศ ฯลฯ

2.4.1.1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อน (SWR and Reflected Power)

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio :SWR) เป็นตัวบ่งบอกว่าการแมตช์อิมพีแดนซ์ดีแค่ไหนและเป็นตัวบ่งบอกว่าสัญญาณจะถูกสะท้อนกลับก่อนที่จะแพร่กระจายคลื่นโดยสายอากาศมากแค่ไหน ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อนมีแนวทางในการวัดที่ต่างกัน ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่า 2:1 หรือน้อยกว่าจะถูกพิจารณาว่าดี อย่างไรก็ตามสายอากาศในทางการค้าส่วนใหญ่จะถูกกำหนดให้มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ 1.5:1 หรือน้อยกว่าในบางแบนด์วิดธ์ สมมุติว่ากำลังงาน 100 วัตต์ อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่า 2:1 จะมีกำลังงานที่ส่งผ่านได้เท่ากับ 91 วัตต์ และสะท้อนกลับเท่ากับ 9 วัตต์หรือมีกำลังงานที่ถูกสะท้อนกลับเท่ากับ 9.9% ของกำลังงานที่ส่งผ่านได้และอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่า 1.5:1 จะมีกำลังงานที่ส่งผ่านได้เท่ากับ 96 วัตต์และสะท้อนกลับเท่ากับ 4 วัตต์หรือมีกำลังงานที่ถูกสะท้อนกลับเท่ากับ 4.2% ของกำลังงานที่ส่งผ่านได้

2.4.1.2 แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ (Antenna Bandwidth)

โดยทั่วไปแบนด์วิดธ์ของสายอากาศจะถูกกำหนดอยู่ในเทอมของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและบ่อยครั้งที่แบนด์วิดธ์จะถูกแสดงอยู่ในเทอมของเปอร์เซ็นต์หรือ Fractional bandwidth (FB) ซึ่ง FB ของสัญญาณเป็นอัตราส่วนของแบนด์วิดธ์กับความถี่กลาง แสดงได้ดังนี้

$$\mathrm{FB} = \frac{f_H - f_L}{(f_H + f_L)/2} \times 100\% \qquad (2.7)$$

เมื่อ f_H และ f_L เป็นองค์ประกอบของความถี่ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดของสัญญาณ สำหรับสายอากาศ UWB แบนด์วิดธ์ของสายอากาศจะอยู่ในช่วงที่มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1 สำหรับช่วงความถี่กว้างจะถูกออกแบบให้ FB มีค่ามากกว่า 25% สำหรับ UWB จะต้องถูกออกแบบให้ FB มีค่า 25% ถึง 200%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยาย (Directivity and Gain)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นการอธิบายความสามารถของสายอากาศในทิศทางที่เจาะจง อัตราการขยายของสายอากาศมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทางกันอย่างใกล้ชิดสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Gain} = \eta \times \text{Directivity} \tag{2.8}$$

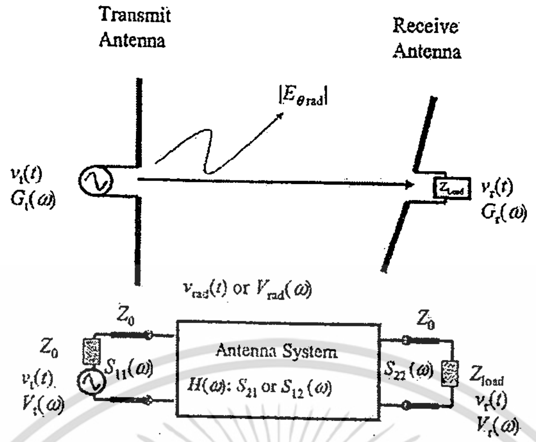
เมื่อ η เป็นค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ เราสามารถเห็นพฤติกรรมของค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เพิ่มขึ้นโดยการเปรียบเทียบแสงของหลอดไฟกับแสงสปอตไลท์ โดยแสงสปอตไลท์ 100 วัตต์ จะให้แสงในทิศทางที่เจาะจงมากกว่าแสงของหลอดไฟ 100 วัตต์ ซึ่งสามารถพูดได้ว่าแสงสปอตไลท์มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากกว่าแสงของหลอดไฟ สำหรับอัตราการขยายของสายอากาศจะถูกอ้างอิงกับสายอากาศมาตรฐาน สายอากาศที่ถูกอ้างอิงคือสายอากาศไอโซทรอปิกและสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นเรโซแนนซ์ โดยสายอากาศไอโซทรอปิกจะมีการแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทางเท่ากันหมด สายอากาศไอโซทรอปิกเป็นสายอากาศในทางอุดมคติซึ่งไม่มีอยู่จริงแต่มีประโยชน์ในการนำมาเปรียบเทียบหรืออ้างอิงกับสายอากาศที่มีอยู่จริง สมมุติว่าสายอากาศมีอัตราการขยายเป็น 2 หรือเท่ากับ 3 dB เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิกจะสามารถเขียนได้เป็น 3 dBi สำหรับสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นเรโซแนนซ์มีประโยชน์สำหรับนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศอื่นๆที่มีความถี่เดียวหรือมีแถบของความถี่ที่แคบมากๆ สมมติว่าสายอากาศมีอัตราการขยายเป็น 1 หรือเท่ากับ 0 dB เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลจะสามารถเขียนได้เป็น 0 dBd

2.4.2 การพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ UWB

โดยปกติสมรรถภาพของสายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารแถบแคบและแถบกว้าง (Broadband) สามารถจะประเมินค่าได้จากรูปแบบของการแมตช์อิมพีแดนซ์ (Impedance matching) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) อัตราขยายและการโพลาไรซ์ (Polarization) ของสายอากาศเหล่านั้น เนื่องจากระบบ UWB ปราศจากคลื่นพาห์ใดๆ จึงต้องมีการพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบสายอากาศ UWB จุดมุ่งหมายของระบบสายอากาศ UWB คือส่งและรับสัญญาณคุณภาพสูงจากอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) สูงที่ด้านรับ สำหรับสัญญาณวิทยุอิมพัลส์การบิดเบือนของรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์ที่เครื่องรับจะเสื่อมถอยลงด้วยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพราะฉะนั้นสมรรถภาพของสายอากาศ UWB ควรจะประเมินค่าในรูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ (System transfer function) ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแพร่กระจายคลื่น (Radiation transfer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

function) และความชัด (Fidelity) ในการรับส่งข้อมูลด้วยคุณลักษณะของสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับจะเท่ากับผลตอบสนองของระบบสายอากาศ [2]



รูปที่ 2.8 ระบบของสายอากาศส่งและรับ

2.4.2.1 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ (System Transfer Function)

ระบบสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 โดยสูตรการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission formula) ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตของสายอากาศรับกับกำลังงานอินพุตของสายอากาศส่งดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 2.9 โดยตั้งสมมติฐานให้สายอากาศส่งและรับตั้งอยู่ในขอบเขตสนามระยะไกลของอีกฝ่ายที่เหมาะสมกับย่านความถี่กว้างยิ่งยวดและกำหนดให้ความถี่เป็นตัวแปรเปลี่ยนแปลง

$$\frac{P_r(\omega)}{P_t(\omega)}=\left(1-\left|\Gamma_t(\omega)\right|^2\right)\left(1-\left|\Gamma_r(\omega)\right|^2\right)G_t(\omega)G_r(\omega)\left|\hat{\rho}_t(\omega)\cdot\hat{\rho}_r(\omega)\right|^2\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ

P_t และ P_r คือค่ากำลังงานเฉลี่ยด้านอินพุตของสายอากาศส่งและด้านเอาต์พุตของสายอากาศรับ

Γ_t และ Γ_r คือค่าการสูญเสียย้อนกลับด้านอินพุตของสายอากาศส่งและด้านเอาต์พุตของสายอากาศรับ

G_t และ G_r คืออัตราการขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

$\left|\hat{\rho}_t(\omega)\cdot\hat{\rho}_r(\omega)\right|^2$ คือค่าตัวคูณโพลาไรซ์แมตชิ่งระหว่างสายอากาศส่งและเอาต์พุตของสายอากาศรับ

λ คือความยาวคลื่นที่กำลังทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r คือระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

อัตราการขยายของสายอากาศส่งและรับ G_t และ G_r เหมือนกับ $\left|\hat{\rho}_t(\omega)\bullet\hat{\rho}_r(\omega)\right|^2$ ที่เป็นฟังก์ชันของการระบุตำแหน่ง θ และ ϕ เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตามฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ $H(\omega)$ เป็นการอธิบายไปสู่การบรรยายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแหล่งกำเนิด (Volt) ที่อินพุตของสายอากาศส่งและสัญญาณที่รับได้ (Volt) ที่เอาต์พุตของสายอากาศรับดังสมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.11 ตามลำดับ

$$\left[\frac{V_t(\omega)}{2}\right]^2 = 2P_t(\omega)Z_0 \tag{2.10}$$

$$\frac{V_r(\omega)^2}{2} = \mathrm{P_r}(\omega)Z_{load} \tag{2.11}$$

เมื่อ

P_t เป็นค่ากำลังงานที่ส่งไปและ Z_0 เป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่ง

P_r เป็นค่ากำลังงานที่รับได้และ Z_{load} เป็นโหลดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรับ

ดังนั้นสูตรของ $H(\omega)$ สามารถจะทำให้ง่ายขึ้นเช่นเดียวกับสมการที่ 2.12

$$H(\omega)=\frac{V_r(\omega)}{V_t(\omega)}=\left|\sqrt{\frac{\mathrm{P_r}(\omega)Z_{load}}{\mathrm{P_t}(\omega)4Z_0}}\right|e^{-j\phi(\omega)}=\left|H(\omega)\right|e^{-j\phi(\omega)}$$
$$;\phi(\omega)=\phi_t(\omega)+\phi_r(\omega)+{\omega r}/{c} \tag{2.12}$$

เมื่อ c เป็นค่าความเร็วของแสง

$\phi_t(\omega)+\phi_r(\omega)$ เป็นค่าความเปลี่ยนแปลงของเฟสจากสายอากาศส่งและรับตามลำดับ

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบบรรยายคุณลักษณะของคู่สายอากาศส่งและรับรวมทั้งยังครอบคลุมถึงการแมตช์อิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย โพลาไรซ์แมตชิ่งและระยะทาง ที่มีการระบุตำแหน่งที่เหมือนกันของสายอากาศ เพราะฉะนั้นฟังก์ชันการถ่ายโอน $H(\omega)$ สามารถจะใช้ไปสู่การบรรยายระบบสายอากาศ ซึ่งอาจจะเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่น ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบสามารถจะวัดค่าตัวแปรที่กระจัดกระจายจำนวนมากของเครือข่าย 2 พอร์ตเช่น S_{11} และ S_{21} ในโดเมนเชิงความถี่ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8 สามารถจะหาค่าได้โดยการทดสอบด้วยขอบเขตสนามระยะไกลของสายอากาศเหล่านั้นตัวอย่างเช่น อัตราขยายต่อความถี่ เป็นที่ชัดเจนว่ารูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณพัลส์ที่รับได้จะกำหนดโดยขนาดและเฟสตอบสนองของฟังก์ชั่นการถ่ายโอนของระบบ $H(\omega)$ และ $\phi(\omega)$ สายอากาศ UWB ออกแบบโดยมีจุดมุ่งหมายไปสู่การได้รับผลตอบสนองของขนาดที่คงที่และเฟสที่มั่นคงข้ามความกว้างแถบความถี่ของระบบ โดยครอบคลุมสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์แหล่งกำเนิดตรงกันข้ามรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์ที่รับได้ควรจะมีการบิดเบือนด้วยระดับที่ต่ำและไม่ต้องการความสั่นไหวกังวานของสัญญาณ [25]

2.4.2.2 ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Transfer Function)

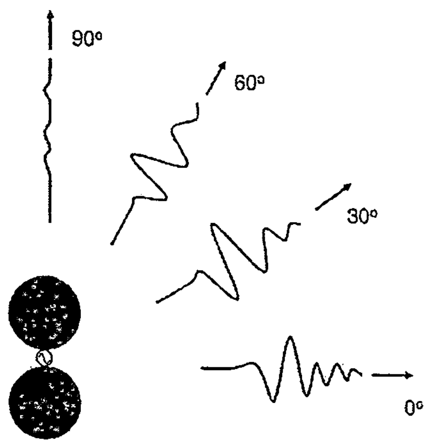
ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแพร่กระจายคลื่นจะบรรยายการแพร่กระจายสนามไฟฟ้า(พัลส์) และสัญญาณพัลส์แหล่งกำเนิดที่สายอากาศส่งสามารถจะอธิบายในสมการที่ 2.13

$$\overline{E}_{rad}(\omega)=\overline{H}_{rad}(\omega)V_t(\omega)=\hat{a}\left|H_{rad}(\omega)\right|e^{-j\phi}rad^{(\omega)}V_t(\omega) \\ ;\phi_{rad}(\omega)=\phi_r(\omega)+{\omega r}/{c} \qquad (2.13)$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแพร่กระจายคลื่น $\overline{H}_{rad}(\omega)$ เป็นเวกเตอร์ด้วยทิศทางจะถูกกำหนดโดยทิศทางโพลาไรซ์ $\hat{a}$ ของสายอากาศส่งและเช่นเดียวกันก็ได้บรรยายคุณลักษณะของสายอากาศส่งรวมไปถึงการแมตช์อิมพีแดนซ์ อัตราการขยายและการกำหนดตำแหน่งของจุดสังเกต $V_t(\omega)$ เป็นสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์แหล่งกำเนิด (Volt) ฟังก์ชันการถ่ายโอนอธิบายไปสู่การหาค่าความหนาแน่นกำลังงานของสเปกตรัมแพร่กระจายที่ปล่อยออกมาจำกัดโดยการควบคุม

จากสมการที่ 2.13 พบว่าสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์แพร่กระจายสามารถจะควบคุมโดยสายอากาศและสัญญาณพัลส์แหล่งกำเนิด สำหรับสายอากาศที่ครอบคลุมความกว้างแถบความถี่ปฏิบัติงาน สเปกตรัมของสัญญาณพัลส์แพร่กระจายสามารถควบคุมโดยทำให้สเปกตรัมของสัญญาณพัลส์แหล่งกำเนิดมีผลดีที่สุด สายอากาศส่งสามารถมีฟังก์ชันเหมือนกับตัวกรองแถบผ่านที่ทำหน้าที่ตัดต่อสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์แพร่กระจายถ้ามันปล่อยออกมาสูงกว่าขอบเขตที่จำกัด ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแพร่กระจายนั้นขึ้นอยู่กับการกำหนดตำแหน่งเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอาจจะอธิบายในเรื่องรูปคลื่นหรือสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์แพร่กระจายไม่เพียงแต่อัตราขยายหรือสนามการแพร่กระจาย รูปที่ 2.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเกี่ยวกับรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์แพร่กระจาย สายอากาศเป็นไดโพลวงกลมกระตุ้นโดยอิมพัลส์รูปเดี่ยว รูปคลื่นหลากหลายในทิศทางที่แตกต่างกันเพราะอัตราการขยายหรือขนาด เฟสตอบสนองของฟังก์ชันการถ่ายโอนจะขึ้นอยู่กับการกำหนดตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเกี่ยวกับรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์แพร่กระจาย

2.4.2.3 ความชัด (Fidelity)

ความชัดของสัญญาณพัลส์ที่รับได้ที่ด้านรับเป็นข้อเสนอไปสู่การประเมินค่าของสัญญาณพัลส์ที่รับได้ผ่านระบบสายอากาศและช่องสัญญาณ RF ในคำสั่งไปสู่การเลือกรูปแบบการตรวจจับที่เหมาะสม [25]-[27] ดังกำหนดในสมการที่ (2.14)

$$F = \max_{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} L[p_{source}(t) p_{output}(t-\tau)]dt \tag{2.14}$$

เมื่อ สัญญาณพัลส์แหล่งกำเนิด p_{source} และสัญญาณพัลส์เอาต์พุต p_{output} ได้ทำการนอร์แมลไลซ์โดยกำลังงานของตัวมันเองตามลำดับค่าความชัด F เป็นค่าการรวมกันสูงสุดโดยเวลาล่าช้ามากๆ ตัวปฏิบัติการเชิงเส้น $L[\bullet]$ ทำงานบนสัญญาณพัลส์อินพุต $p_{source}(t)$ ของสายอากาศส่งรูปแบบสำเร็จเหมาะที่สุดสำหรับค่าความถูกต้องสูงสุดที่เอาต์พุตของสายอากาศรับจะเป็น $L[p_{source}(t)]$ ไม่ใช่สัญญาณพัลส์ $p_{source}(t)$ ดั้งเดิม รูปคลื่นของสัญญาณพัลส์ด้านรับจะไม่เหมือนกันทุกอย่างกับสัญญาณด้านส่งซึ่งแพร่กระจายผ่านระบบการส่ง (รวมไปถึงสายอากาศและช่องสัญญาณ RF) นอกจากนั้นด้วยความชัด (Fidelity) สมรรถภาพของระบบเช่นอัตราความผิดพลาดบิต (BER) สามารถจะประเมินค่าโดยตรงสำหรับระบบวิทยุอิมพัลส์ ถ้าระบบใช้งานเครื่องรับที่มีความสัมพันธ์กัน [28] มีการศึกษาแสดงถึงสายอากาศแถบกว้างแบบแผ่นระนาบสามารถมี BER ต่ำเมื่อเทียบกับสายอากาศแถบแคบแบบเส้นลวด

2.4.3 ปัญหาในการออกแบบสายอากาศ UWB

ในระบบ UWB สายอากาศเป็นตัวกรองการจัดรูปพัลส์ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในโดเมนเชิงความถี่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปพัลส์ที่ส่งไป ดังนั้นจึงทำให้เพิ่มความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยุ่งยากซับซ้อนของการตรวจจับเชิงกลที่เครื่องรับ สายอากาศ UWB ต้องการจุดศูนย์กลางเฟสและอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่คงที่ครอบคลุมแบนด์วิดธ์ทั้งหมดที่ปฏิบัติการ การเปลี่ยนในจุดศูนย์กลางเฟสอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพัลส์ที่ส่งไปและสมรรถนะที่ต่ำลงที่เครื่องรับ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ UWB คือหนึ่งในความท้าทายสำหรับระบบ UWB โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องมีราคาถูก โครงสร้างกะทัดรัดและประสิทธิภาพสูงจะเป็นที่ต้องการสำหรับผู้ใช้โดยทั่วไปในเรื่องเกี่ยวกับการสื่อสาร

สายอากาศดั้งเดิมจะถูกออกแบบเพื่อนำมาใช้ในช่วงความถี่แคบๆของความถี่ที่ถูกใช้งานในระบบช่วงความถี่แคบดั้งเดิมเท่านั้นและสายอากาศเรโซแนนซ์ไม่เหมาะสำหรับระบบ UWB เนื่องจากสายอากาศมีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นที่ดีในช่วงความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ในการสร้างสายอากาศ UWB นั้น วิธีการหนึ่งคือการสร้างสายอากาศให้มีความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศครอบคลุมแถบความถี่ของ UWB หรือมากกว่า อีกวิธีการหนึ่งคือการสร้างสายอากาศโดยให้มีองค์ประกอบคุณภาพ (Quality Factor: Q) ที่ต่ำลงซึ่งจะทำให้ช่วงความถี่กว้างขึ้นแต่ประสิทธิภาพจะลดลงสมการขององค์ประกอบคุณภาพแสดงในสมการที่ 2.15

$$Q = {}^{f_o}\!/_{B} \qquad 2.15$$

เมื่อ Q คือองค์ประกอบคุณภาพ

f_o คือความถี่กึ่งกลางเรโซแนนซ์

B คือแบนด์วิดธ์

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้วิธีการสร้างสายอากาศที่มีองค์ประกอบคุณภาพต่ำเนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายสำหรับการสร้างสายอากาศที่มีแถบกว้างในระบบ UWB มากกว่า กล่าวได้ว่าในวิธีการนี้เราเลือกค่าความถี่กึ่งกลางของ UWB เท่ากับ 6.85 GHz แล้วหารด้วยแบนด์วิดธ์ของ UWB เท่ากับ 7.5 GHz ค่าองค์ประกอบคุณภาพจะเท่ากับ 0.913 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับสายอากาศเรโซแนนซ์แถบแคบทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของ UWB โดยจะเริ่มที่ประวัติความเป็นมาและถัดมาได้กล่าวถึงระบบและสัญญาณ UWB ซึ่งกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของ UWB ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน รวมทั้งลักษณะรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ทำให้เกิดเป็นระบบ UWB และคุณสมบัติอื่นๆที่ทำให้ระบบ UWB ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

การสื่อสาร UWB นั้นได้เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง เมื่อประมาณปี ค.ศ. 2000 แต่ในความเป็นจริงแล้วต้นกำเนิดของ UWB มีมาตั้งแต่เมื่อกว่าร้อยปีมาแล้ว โดยปลายคริสตศตวรรษที่ 18 วิธีที่ง่ายที่สุดสำหรับการสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือการสร้างพัลส์สั้นๆ (Short pulse) ขึ้นมา โดยการใช้แหล่งกำเนิดแบบ Spark-gap ในช่วงแรกๆการศึกษา UWB ไม่ค่อยมีความก้าวหน้ามากนัก การสื่อสารแบบ UWB เริ่มได้รับความสนใจอีกครั้งในช่วงปี ค.ศ. 1970-1973 เนื่องจากมีการยอมรับว่า สัญญาณแบบพัลส์สั้นที่แผ่ขยายสัญญาณตลอดสเปกตรัมที่กว้างนั้นไม่ได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณช่วงความถี่แคบและไม่ได้แทรกสอดสัญญาณช่วงความถี่แคบเหล่านั้นด้วย ปัจจุบันจึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการสื่อสาร UWB มากขึ้นซึ่งหัวข้อที่ทำการวิจัยที่แตกต่างกันออกไป รวมทั้งงานวิจัยทางด้านสายอากาศ UWB ก็ได้รับความสนใจเช่นกันเพื่อการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คุณสมบัติพื้นฐานของระบบและสัญญาณ UWB อย่างแรกที่ได้พูดถึงจะเป็นรูปร่างพื้นฐานของสัญญาณพัลส์ในระบบ UWB ในโดเมนทางเวลาและสเปกตรัมของสัญญาณพัลส์ โดยทั่วไปแล้วเป็นสัญญาณพัลส์ที่สั้นมากๆซึ่งเวลาของสัญญาณขึ้นและลงอย่างรวดเร็วจะมีสเปกตรัมกว้างและมีกำลังงานที่ต่ำมาก นอกจากนี้ภาคส่งและภาครับของ UWB ไม่ต้องการส่วนประกอบที่ใหญ่และมีราคาแพง ทำให้สามารถลดต้นทุน ขนาด น้ำหนักและการสิ้นเปลืองกำลังงานของระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบโดยทั่วไป

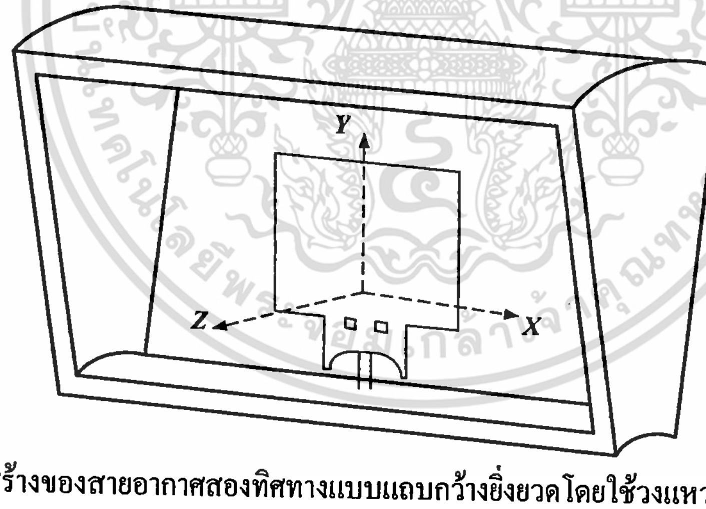
ส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานต่างๆของสายอากาศ ตัวอย่างเช่น ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ และอัตราการขยายของสายอากาศ ฯลฯ การพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ UWB โดยสายอากาศ UWB จะถูกออกแบบสำหรับสัญญาณพัลส์ที่มีระยะเวลาที่สั้นทั้งทางด้านส่งและรับ เพราะฉะนั้นสมรรถภาพของสายอากาศ UWB ควรจะประเมินค่าในรูปแบบของฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ ฟังก์ชันการถ่ายโอนการแพร่กระจายและความชัด ในการรับส่งข้อมูลเพิ่มเติมจากการพิจารณาหลักการพื้นฐานต่างๆของสายอากาศและกล่าวถึงปัญหาในการออกแบบสายอากาศ UWB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
องค์ประกอบและการออกแบบสายอากาศ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้เกี่ยวกับองค์ประกอบของสายอากาศในงานวิจัย โดยองค์ประกอบหลักของสายอากาศแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วงแหวนเซกเตอร์วงกลมและโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมด้วยแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน สำหรับวงแหวนเซกเตอร์วงกลมนั้นจะพิจารณาเริ่มต้นโดยอาศัยหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงครอบคลุมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมด้วยแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมโดยโครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะเป็นวงแหวนเซกเตอร์วงกลมป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด



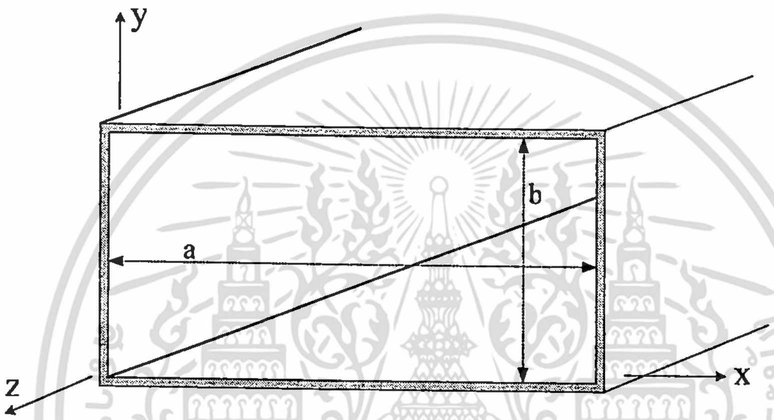
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

ในการพิจารณาสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือวงแหวนเซกเตอร์วงกลมและสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน ในหัวข้อแรกเป็นการอธิบายถึงวงแหวนเซกเตอร์วงกลมโดยอาศัยหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและในหัวข้อต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงวิวัฒนาการของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Waveguide)

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงเรื่องราวเกี่ยวกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพารามิเตอร์ที่น่าสนใจก็คือ โหมดต่างๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและความถี่ตัด ความยาวคลื่นภายในท่อนำคลื่น และองค์ประกอบอื่นๆ โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างที่เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะใช้ระบบพิกัดมุมฉากในการวิเคราะห์ ซึ่งรูปร่างของสนามจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างเหล่านั้น โดยต้องเป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์หรือสมการคลื่นและเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 3.2 ลักษณะของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการพิจารณาท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดหน้าตัด $a \times b$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยเริ่มต้นจะสมมติให้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวเป็นอนันต์และภายในท่อนำคลื่นปราศจากสิ่งใดๆ เพื่อที่จะหาโหมดต่างๆที่อยู่ภายในท่อนำคลื่น การอธิบายที่เหมาะสมสำหรับส่วนตัดขวางสี่เหลี่ยมมุมฉากสามารถจะได้รับจาก

$$
\begin{aligned}
E_x &= -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{j\omega\mu}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial y} \qquad & E_y &= -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{j\omega\mu}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial x} \\
H_x &= -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{j\omega\varepsilon}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial y} \qquad & H_y &= -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{j\omega\varepsilon}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial x}
\end{aligned} \tag{3.1}
$$

เมื่อ $h^2 = \gamma^2 + \omega^2\mu\varepsilon = A^2 + B^2$ มีความเป็นไปได้ของสนามไฟฟ้า (TE) และแม่เหล็ก (TM) ที่หลากหลาย (3.1) ซึ่งความสนใจจะอยู่ที่การจัดการได้ง่ายในทางคณิตศาสตร์ 2 รูปแบบคือรูปแบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง TE ในทิศทาง $E_z = 0$ และรูปแบบสนามแม่เหล็กตัดขวาง TM ในทิศทาง $H_z = 0$ ทุกๆความเป็นไปได้ของคำตอบสามารถจะจำแนกจากการรวมกันเป็นเชิงเส้นของสนาม TE และ TM ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาแต่ละกรณีแยกจากกันได้ ผลลัพธ์ที่สำคัญ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประการสามารถจะแสดงสำหรับแต่ละโหมดของ TE หรือ TM ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.2 คือ $A = m\pi/a$ $B = n\pi/b$ เมื่อ m และ n เป็นจำนวนเต็มและการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อ γ เป็นสิ่งสมมุติขึ้นในขั้นต้น ($\omega^2\mu\varepsilon = -\left[j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\right]^2$)

$$\omega^2\mu\varepsilon \geq \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \tag{3.2}$$

ดังนั้นมีความถี่ตัด ω_c (Radian) ที่มีความสอดคล้องกับ f_c (Hertz) จะได้รับเมื่อค่าในสมการที่ 3.2 มีความเท่ากันอย่างเหมาะสม หากค่าต่ำเกินไปท่อนำคลื่นจะไม่แพร่กระจายคลื่นซึ่งความยาวคลื่นตัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}f_c} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}} \tag{3.3}$$

ดังนั้น

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\sqrt{1-(f_c/f)^2} \tag{3.4}$$

เมื่อ c เป็นความเร็วของคลื่นในที่ว่างประกอบด้วยตัวกลางเดียวกันกับท่อนำคลื่น(μ,ε) λ_c เป็นความยาวคลื่นตัด (สัมพันธ์กับ f_c) และ λ_g เป็นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น ($\lambda_g > \lambda_c$) ที่ความถี่ปฏิบัติงาน f (เมื่อ $f > f_c$) การแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า TE ใดๆในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมอันที่อธิบายด้วยสมการของแมกซ์เวลล์อาจจะเริ่มต้นจากสองกลุ่มของความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{j\omega\mu}{h^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)C\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)e^{-i\beta z} \\ E_y &= \frac{j\omega\mu}{h^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)C\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)e^{-i\beta z} \end{aligned} \tag{3.5}$$

และ

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{j\beta}{h^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)C\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)e^{-i\beta z} \\ H_y &= \frac{j\beta}{h^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)C\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)e^{-i\beta z} \\ H_z &= C\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)e^{-i\beta z} \end{aligned} \tag{3.6}$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่อิสระ สำหรับค่าจำนวนเต็ม m และ n จะตอบสนองตำแหน่งรูปแบบความสัมพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์และคำตอบเหล่านี้จะอ้างอิงไปสู่ โหมด TE_{mn} เมื่อ m และ n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดโหมดของการแพร่กระจายคลื่น โหมดนั้นจะเรียกจำนวนมากที่สุดและน้อยที่สุดของแต่ละสนามในท่อนำคลื่น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะโหมด TE^z เท่านั้น

3.2.1 คลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric: TE^z)

ระบบพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉากในโหมด TE^z ที่ได้มาจากวิธีศักย์เวกเตอร์ [29] สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีองค์ประกอบของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial F_z}{\partial y} & H_x &= -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_z}{\partial x \partial z} \\ E_y &= \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial F_z}{\partial x} & H_y &= -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_z}{\partial y \partial z} \\ E_z &= 0 & H_z &= -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+\beta^2\right)F_z \end{aligned} \tag{3.7}$$

และค่าเป็นความถี่ตัดในโหมด TE_{mn} จะแสดงในสมการที่ 3.8

$$(f_c)_{mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \qquad \begin{aligned} m &= 0,1,2,... \\ n &= 0,1,2,... \end{aligned} \tag{3.8}$$

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

จากสมการที่ (3.8) โหมดที่เป็นใหญ่สำหรับ $a > b$ เป็นโหมด TE_{10} ดังนั้นความถี่ตัดในโหมด TE_{10} สามารถเขียนได้เป็น

$$(f_c)_{10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{3.9}$$

สำหรับโหมดที่มีความถี่ตัดสูงกว่าถัดไปเป็นโหมด TE_{20} และโหมด TE_{01} ซึ่งความถี่ตัดในโหมดดังกล่าวสามารถเขียนได้เป็น

$$(f_c)_{20} = \frac{1}{a\sqrt{\mu\varepsilon}} = 2(f_c)_{10} \tag{3.10}$$

$$(f_c)_{01} = \frac{1}{2b\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแบนด์วิดธ์ที่กว้างที่สุดของโหมด TE_{10} จะเป็น

$$(f_c)_{10} \le f \le 2(f_c)_{10} = (f_c)_{20} \le (f_c)_{01} \tag{3.12}$$

และจะเกิดเงื่อนไขว่า

$$2b \le a \Rightarrow b \le a/2 \Rightarrow 2 \le a/b \tag{3.13}$$

จากสมการที่ 3.12 เห็นได้ว่าแบนด์วิดธ์ที่กว้างที่สุดของโหมด TE_{10} จะมีขนาดหน้าตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับ $2b \le a$ ดังนั้นในการจำลองผลสายอากาศของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของขนาดช่องเปิดสี่เหลี่ยมของสายอากาศเท่ากับ $a = 2b$ เพื่อให้สายอากาศอยู่ในโหมด TE_{10} มากที่สุดและง่ายต่อการจำลองผลของสายอากาศ

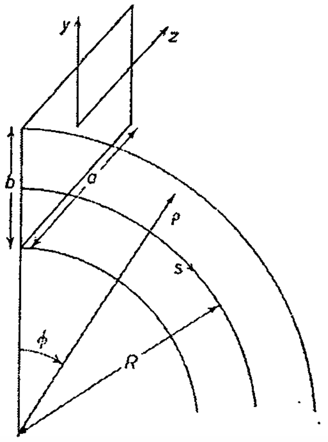
3.2.2 การโค้งงอระนาบสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นวงกลม (The circular E-plane bend rectangular waveguide)

ทิศทางท่อนำคลื่นอาจเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ส่วนของมุมหรือส่วนโค้งงอเข้ามามีส่วนประกอบในท่อนำคลื่น [30-34] อย่างไรก็ตามพื้นผิวของท่อนำคลื่นเป็นพิกัดทรงกระบอก วิธีแก้ไขปัญหาของการแพร่กระจายคลื่นหมุนรอบตามความโค้งเช่นนี้สร้างความซับซ้อนในระบบด้วยการทำงานของการขยายออกอย่างไม่สิ้นสุดของฟังก์ชันเบสเซลอันดับสูงและข้อพิสูจน์ที่เพิ่มมากขึ้นนำไปสู่การแนะนำระบบพิกัดเฉพาะที่ดีกว่าการใช้งานโดยทั่วไปซึ่งได้แนะนำแกนโค้งเข้ามาทดแทนแกนในทิศทางปกติของพิกัดดั้งเดิมดังในรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงลักษณะท่อนำคลื่นโค้งในพิกัดเชิงขั้วสำหรับองค์ประกอบ ρ และ ϕ (z ไม่เป็นที่ต้องการ) จะแทนที่โดย

$$s = R\phi,\ y = \rho - R \tag{3.14}$$

เมื่อ R เป็นแกนรัศมีของความโค้งของท่อนำคลื่นและ s เป็นระยะเกี่ยวกับแกนท่อนำคลื่นโดยวัดค่าตามแนวแกนที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อและ y เป็นระยะพิกัดวัดจากกึ่งกลางท่อและดังที่ได้กล่าวมาเป็นระบบพิกัดที่เฉพาะแสดงในส่วนที่ตัดตามขวางของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่โค้งเป็นวงกลมในระนาบสนามไฟฟ้า

เมื่อ λ_E เป็นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นที่โค้งงอในระนาบสนามไฟฟ้าจะได้

$$\frac{1}{\lambda_E^2}=\frac{1}{\lambda}\left\{1-\frac{b^2}{12R^2}\left[1-\frac{2}{5}\left(\frac{2\pi b}{\lambda}\right)^2\right]\right\} \tag{3.15}$$

ในสูตรนี้ถ้า λ มีการแทนที่โดย $\lambda_g=\lambda/\left(1-\lambda^2/4a^2\right)^{1/2}$ ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นแนวตรง โดยผลที่ได้จะอ้างอิงท่อนำคลื่นที่มีความกว้างจำกัดเท่ากับ a

3.3 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน

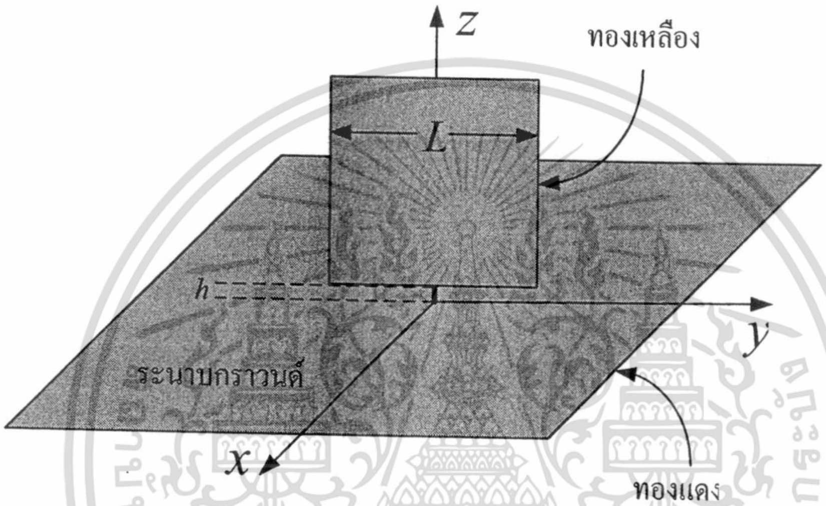
ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายถึงวิวัฒนาการของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน โดยเริ่มต้นการออกแบบจากสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แล้วทำการพัฒนาสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีแบนด์วิดธ์กว้างขึ้นโดยการตัดต่อบางส่วนของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือไม่ก็นำสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านซึ่งจะให้แบนด์วิดธ์ที่กว้างมาก

3.3.1 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในการพิจารณาสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส [29] จะทำการพิจารณาจากค่า $|S_{11}|$ ที่ได้มาจากการทดสอบ โดยเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายอากาศโมโนโพลชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (L) โดยเริ่มจากขนาดของ $L = 60$ mm ไปจน 20 mm โดยมีการเปลี่ยนแปลงทีละ 5 mm สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางอยู่บนแผ่นระนาบกราวด์ที่มีขนาดเท่ากับ 100×100 mm^2 โดยใช้วัสดุที่เป็นทองแดง ตรงส่วนของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจะใช้วัสดุที่เป็นทองเหลืองโดยมีความหนาเท่ากับ 0.5 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ขอบเขตของความถี่จะสอดคล้องกับขอบที่ต่ำกว่าและสูงกว่าของแบนด์วิดธ์ที่มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า 10 dB ความถี่ของขอบที่ต่ำกว่าและสูงกว่า แบนด์วิดธ์และช่องว่างของการกระตุ้นที่เหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ลักษณะทางเรขาคณิตของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 3.1 แบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าของ L และขอบเขตของความถี่ที่มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า 10 dB

ขนาดของแผ่นระนาบ L (mm)	ขอบเขตของความถี่ (GHz)	แบนด์วิดธ์ (MHz)	ช่องว่างของการกระตุ้นที่เหมาะสม (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

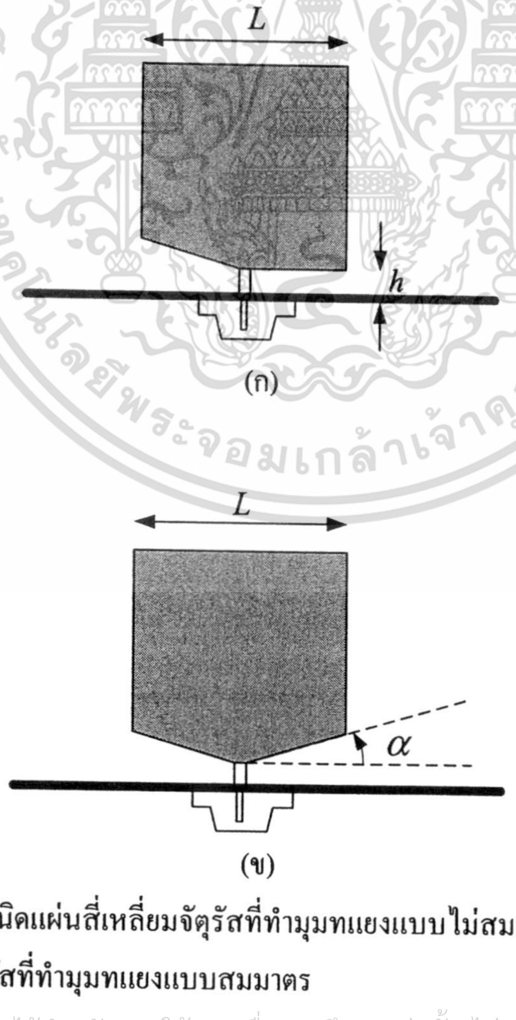
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วิวัฒนาการของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยม

ในการปรับปรุงสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีช่วงความถี่กว้างขึ้น สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีที่จะนำมาเสนอนี้ก็เป็นวิธีที่ทำให้สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีช่วงความถี่ที่กว้างขึ้นคือ การตัดต่อบางส่วนของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและการนำสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ

3.3.2.1 การตัดต่อบางส่วนของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและการใช้แท่นลัดวงจร

การทำให้ช่วงความถี่ตอบสนองกว้างขึ้นสามารถทำได้โดยการตัดตรงขอบของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสใกล้กับระนาบกราวนด์ ซึ่งส่งผลทำให้โมโนโพลมีลักษณะเป็นห้าเหลี่ยมทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร [35] แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 (ก) และ 3.5 (ข) ส่วนประกอบเหล่านี้จะถูกกำหนดรูปแบบโดยการทำมุมทแยงบนแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.5 (ก) โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำมุมทแยงแบบไม่สมมาตร (ข) โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำมุมทแยงแบบสมมาตร

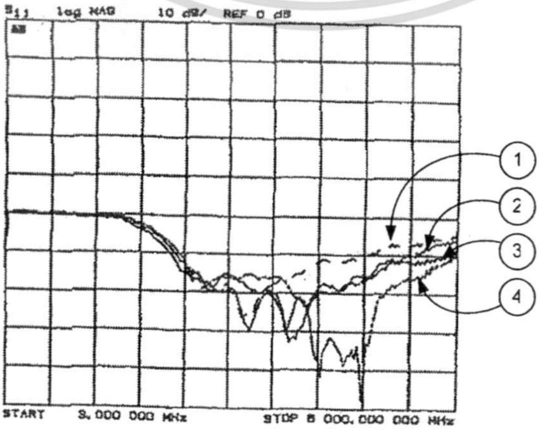
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมที่ทำการตัดขอบ อัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ต่อแบนด์วิดธ์เปลี่ยนแปลงจาก 2.4 : 1 สำหรับส่วนประกอบของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบธรรมดาไปจนถึง 6.6 : 1 สำหรับส่วนประกอบของรูปทรงทางเรขาคณิตแบบห้าเหลี่ยมที่เหมาะสม ค่าความถี่ของขอบที่ต่ำกว่าและสูงกว่าที่ได้จากการทดสอบของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำการเปลี่ยนแปลงมุมทแยง (α) ด้านหนึ่งและทั้งสองด้าน แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การทดสอบแบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์ของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำมุมทแยงทั้งแบบไม่สมมาตรและแบบสมมาตรเทียบกับการเปลี่ยนแปลงมุมทแยง

มุมการตัด α (degree)	2:1 SWR แบนด์วิดธ์ (GHz) ที่ตัดแบบไม่สมมาตร	2:1 SWR แบนด์วิดธ์ (GHz) ที่ตัดแบบสมมาตร
ไม่มีการตัด	2.35 – 4.95	2.35 – 4.95
10	2.20 – 5.30	2.12 – 5.95
20	2.19 – 5.75	2.11 – 6.75
30	2.17 – 5.97	2.10 – 7.25
40	2.17 – 6.00	2.10 – 12.50

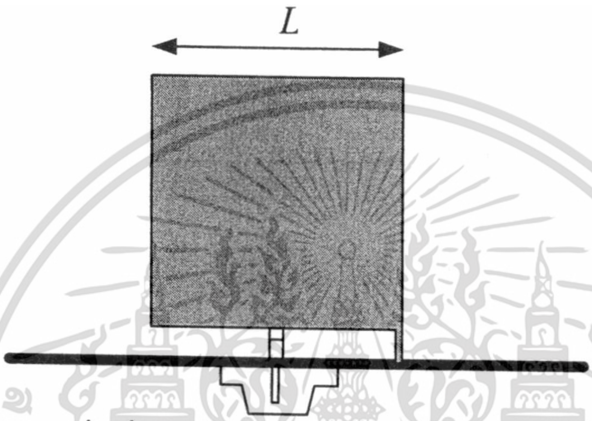
จากตารางที่ 3.2 แสดงการควบคุมที่ดีของความถี่ของขอบที่สูงกว่า กล่าวคือความถี่ของขอบที่ต่ำกว่ามีค่าคงที่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.1 GHz ถึง 2.35 GHz แต่ความถี่ของขอบที่สูงกว่าสามารถที่จะถูกเปลี่ยนแปลงจากความถี่ตั้งแต่ 4.95 GHz ถึง 12.5GHz โดยขึ้นอยู่กับค่าของมุมทแยง ผลของค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงมุมทแยงจาก 0° ถึง 30° โดยมีการเปลี่ยนแปลงทีละ 10°



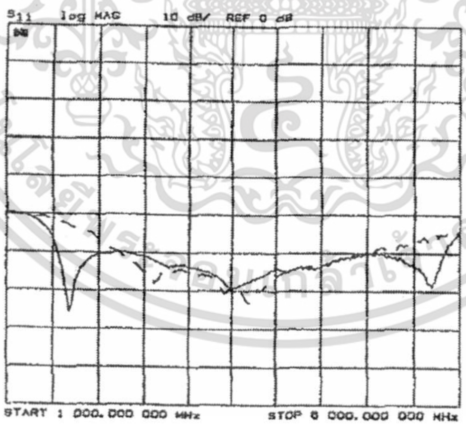
รูปที่ 3.6 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเท่ากับ 25 mm ทำมุมทแยง $\alpha = 0°$ (เส้นที่ 1), 10° (เส้นที่ 2), 20° (เส้นที่ 3) และ 30° (เส้นที่ 4) [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้แท่นลัดวงจร (Shorting Post) จะช่วยให้ความถี่ของขอบที่ต่ำกว่ามีค่าลดลงโดยการมีโหมดพิเศษขึ้นมาและทำให้สายอากาศเล็กลงในส่วนของความสูง แผ่นลัดวงจรจะถูกวางอยู่ตรงมุมหนึ่งของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยม ซึ่งแผ่นลัดวงจรมีความกว้างเท่ากับ 2 mm สายอากาศดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 การแยกช่องว่างของการกระตุ้นจำเป็นต้องลดลงเพื่อให้ได้แบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมและการโค้งงอของคุณลักษณะของค่า $|S_{11}|$ จะเห็นได้ชัดเจนที่ตรงแถบความถี่กลาง มันเป็นไปไม่ได้ที่จะรักษาค่า $|S_{11}|$ ให้ต่ำกว่า 10 dB ตลอดบริเวณของการโค้งงอและความไม่สมมาตรทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเกิดความผิดเพี้ยนโดยเฉพาะที่ช่วงความถี่สูง



รูปที่ 3.7 โมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแท่นลัดวงจร



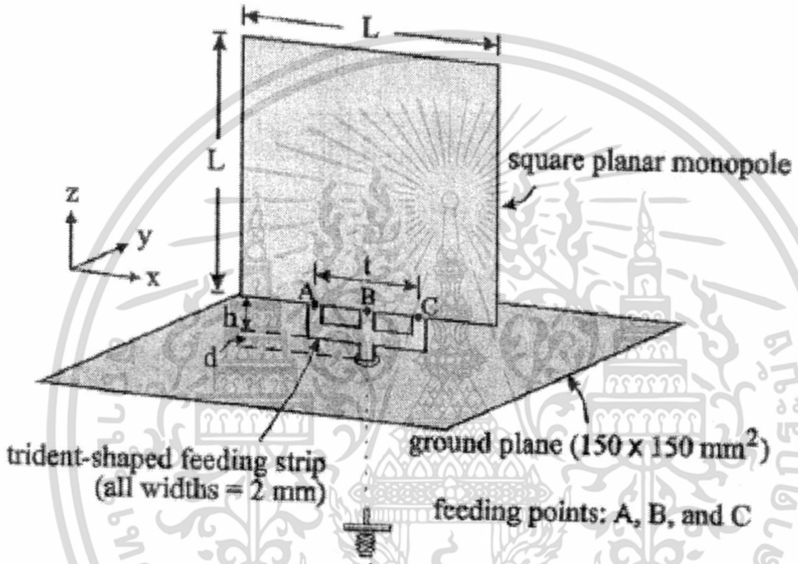
รูปที่ 3.8 การทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเท่ากับ 25 mm ที่ไม่มีแผ่นลัดวงจร (เส้นประ) และมีแผ่นลัดวงจร (เส้นทึบ) [35]

จากรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นค่า $|S_{11}|$ ของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเท่ากับ $25 \times 25\ mm^2$ ที่มีแผ่นลัดวงจรกับไม่มีแผ่นลัดวงจรส่งผลทำให้แบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์เท่ากับ 114% และ 76% ตามลำดับ

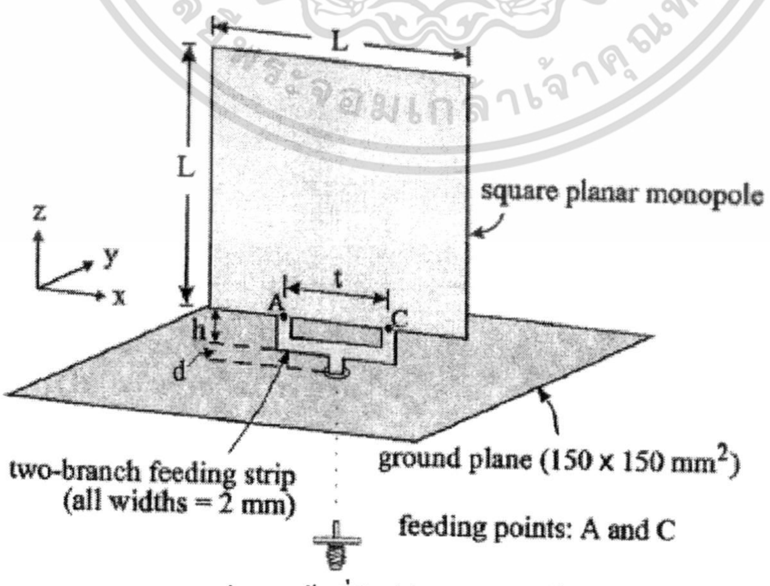
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ

นอกจากวิธีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นยังมีอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ช่วงความถี่ตอบสนองกว้างมากขึ้น คือการนำสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ โดยในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน สองก้าน และก้านเดียว [7] แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 (ก) (ข) และ (ค) สายอากาศทั้งสามแบบนี้จะให้ค่า $|S_{11}|$ ที่แตกต่างกันออกไป

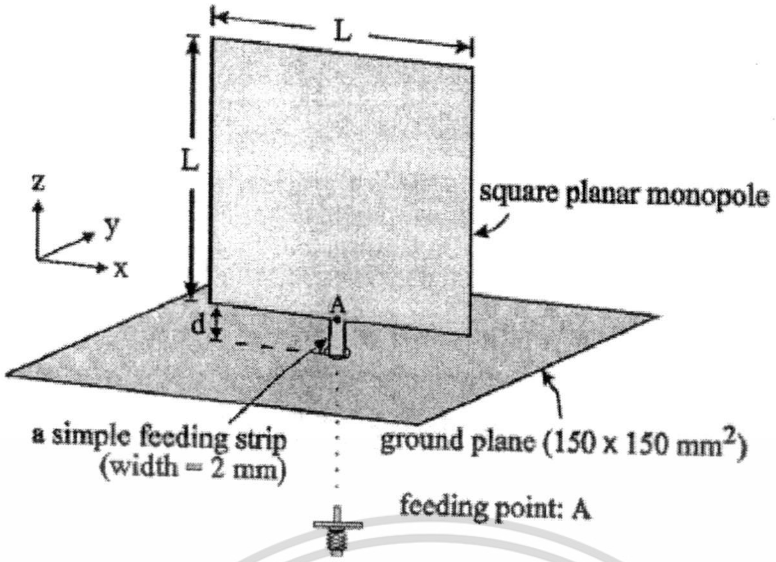


(ก) แผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน



(ข) แผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสองก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

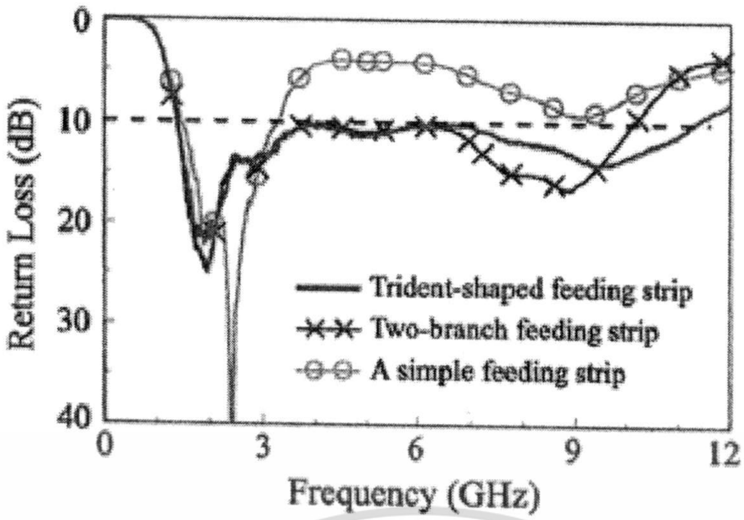


(ค) แผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบก้านเดียว

รูปที่ 3.9 สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นทั้งสามแบบ

จากรูปที่ 3.9 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน โดยวางอยู่บนระนาบกราวด์ที่มีขนาดเท่ากับ $150 \times 150\ \text{mm}^2$ ในการออกแบบโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านนี้จะถูกรวมให้เป็นชิ้นเดียวกัน โดยโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีความยาวเท่ากับ L และจะถูกกระตุ้นที่ตรงจุดป้อนสามจุดคือ A, B และ C ความกว้างของแผ่นกระตุ้นทั้งสามก้านมีขนาดเท่ากับ 2 mm ในการศึกษาสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีขนาดเท่ากับ $40 \times 40\ \text{mm}^2$ สำหรับความสูงของแผ่นกระตุ้นทั้งสามก้าน (h) มีค่าเท่ากับ 3.5 mm สำหรับการเปรียบเทียบในกรณีของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสองก้านและแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบก้านเดียวจะถูกสร้างขึ้นและทำการศึกษา จากรูปที่ 3.9 (ข) แผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสองก้านประกอบด้วยก้านสองข้างซึ่งจะถูกต่ออยู่ตรงจุด A และ C โดยมีระยะห่างระหว่างทั้งสองก้านเท่ากับ t สำหรับการกระตุ้นโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับพารามิเตอร์อื่นก็เหมือนกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน และแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบก้านเดียวแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 (ค) โดยมีความกว้างของก้านเท่ากับ 2 mm และความยาวของก้านเท่ากับ d โดยจะถูกต่ออยู่ตรงกึ่งกลางของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับใช้ในการกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



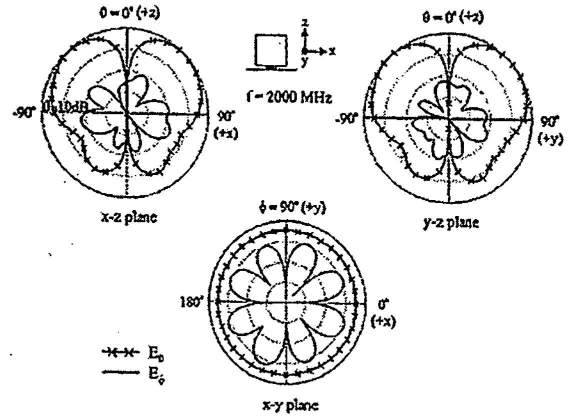
รูปที่ 3.10 $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นทั้งสามแบบ [7]

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นทั้งสามแบบที่ได้จากรูปที่ 3.9

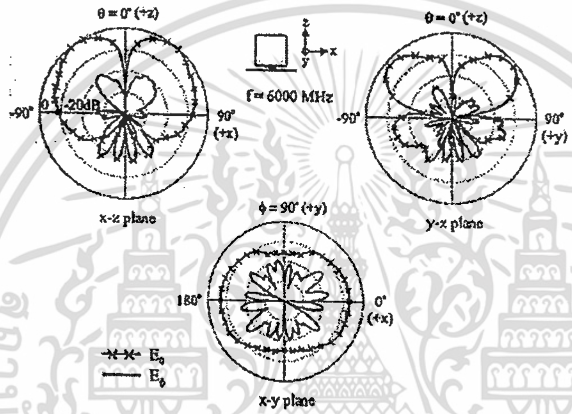
ชนิดของแผ่นกระตุ้น	t, h, d (mm)	BW, f_L, f_U (GHz)	f_U / f_L
แผ่นกระตุ้นแบบสามก้าน	15, 3.5, 1.0	10.072, 1.376 – 11.448	8.32
แผ่นกระตุ้นแบบสองก้าน	15, 3.5, 1.0	8.828, 1.354 – 10.182	7.52
แผ่นกระตุ้นแบบก้านเดียว	0, 0, 2.5	1.831, 1.455 – 3.286	2.26

รูปที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน ($t = 15$ mm, $h = 3.5$mm, $d = 1.0$mm) สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสองก้าน ($t = 15$ mm, $h = 3.5$mm, $d = 1.0$mm) และสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบก้านเดียว ($d = 2.5$ mm) ซึ่งสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 3.3 เห็นได้ว่าในกรณีของแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านมีอัตราส่วนของความถี่เท่ากับ 8.32 (f_U / f_L) สำหรับแบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์ซึ่งจะกว้างกว่าในกรณีของแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสองก้านซึ่งมีค่าอัตราส่วนของความถี่เท่ากับ 7.52 และกว้างกว่ามากเมื่อเทียบกับในกรณีของแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบก้านเดียวซึ่งมีค่าอัตราส่วนของความถี่เท่ากับ 2.26 สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านที่ความถี่ 2 GHz, 6 GHz และ10GHz จะแสดงในรูปที่ 3.11(ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ

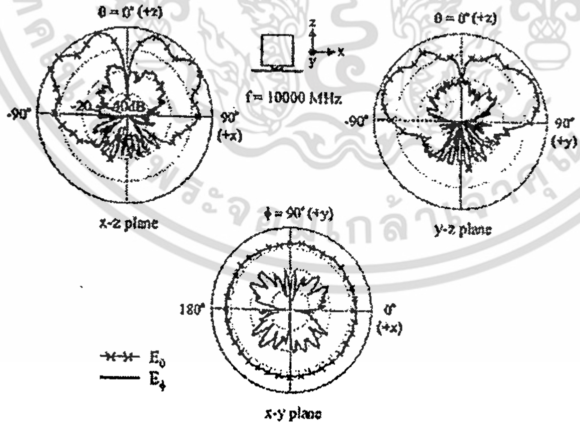
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2 GHz



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 10 GHz

รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน

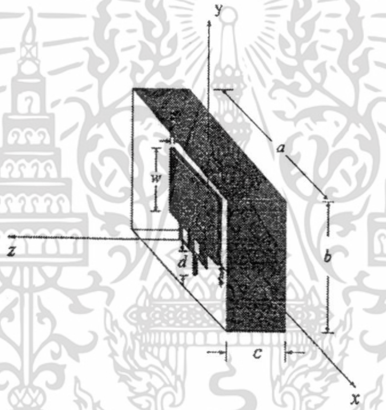
ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านรวมถึงการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยใช้แท่นลัดวงจร ในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

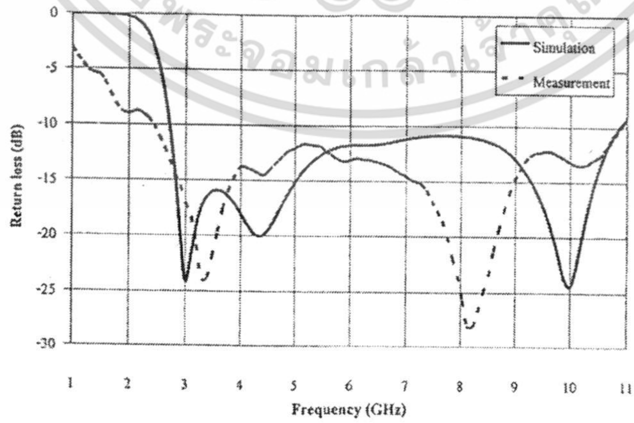
ผลเนื่องจากให้แบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์หรือช่วงความถี่ที่กว้างมากเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศที่ได้ทำการพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.4 ตัวอย่างสายอากาศที่มีมาก่อน

จากวิวัฒนาการในการปรับปรุงสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมให้มีช่วงความถี่ตอบสนองที่กว้างขึ้นพบว่าการปรับปรุงโดยนำสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมมาใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างสามก้านสามารถเพิ่มความถี่ตอบสนองเป็นช่วงกว้างได้มากที่สุดและได้มีการนำมาใช้ในการประยุกต์วิเคราะห์และสร้างสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางในลักษณะการนำท่อหรือวงแหวนล้อมรอบแผ่นโมโนโพลเพื่อให้ได้สายอากาศแถบกว้างที่มีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบเจาะทิศทางเช่นสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น [4] ซึ่งเป็นสายอากาศแบบสองทิศทาง

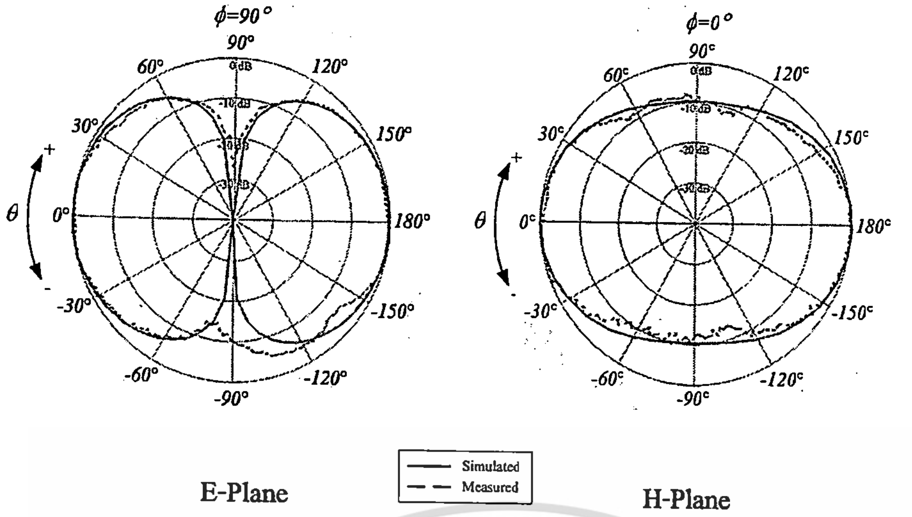


รูปที่ 3.12 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น

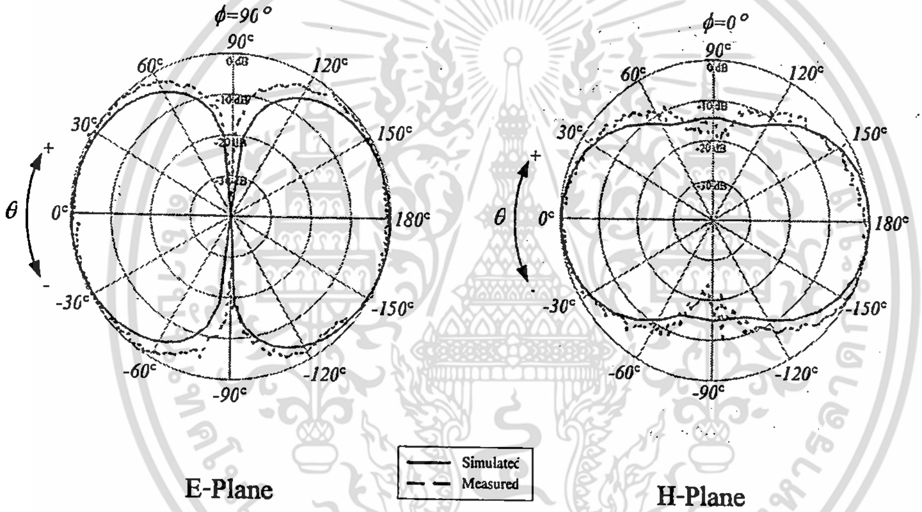


รูปที่ 3.13 $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น

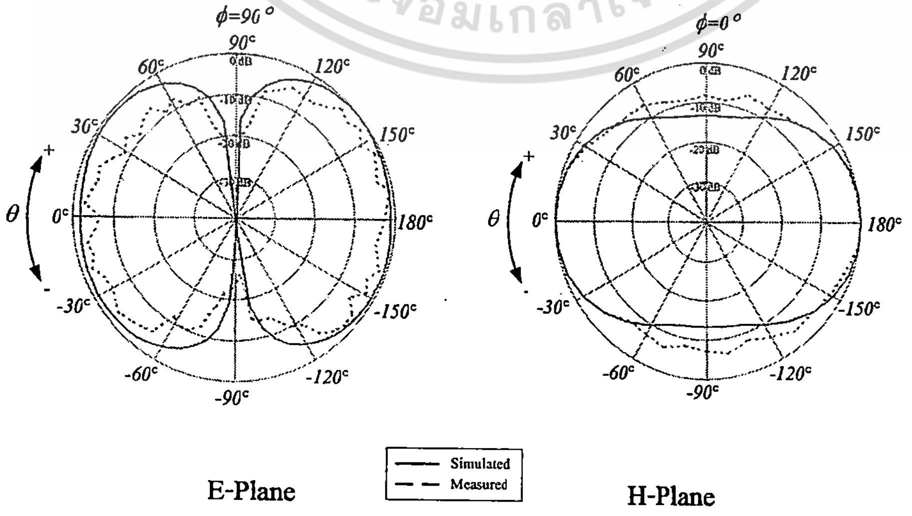
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz

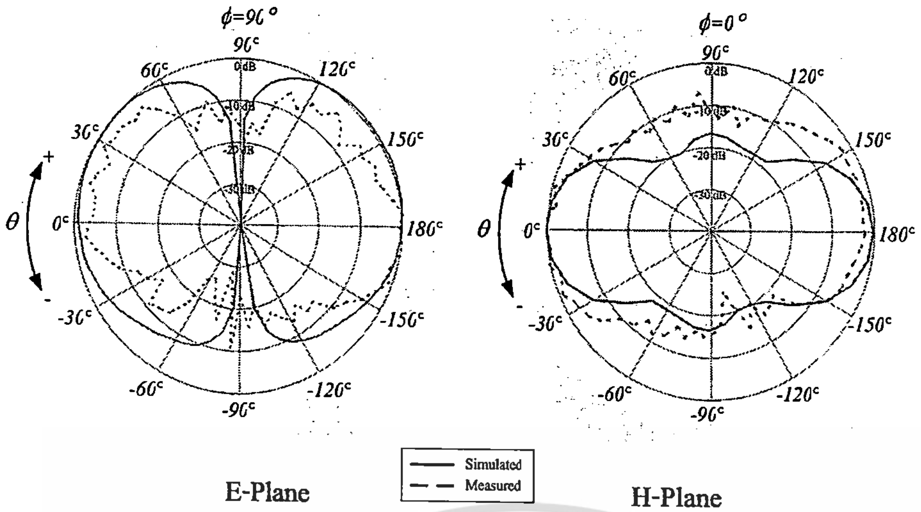


(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5 GHz

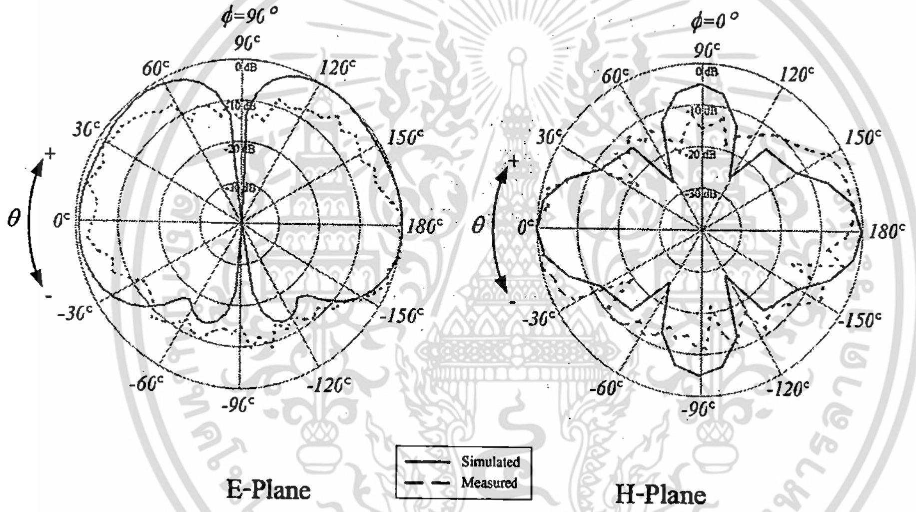


(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 GHz



(จ) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz

รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสายอากาศ UWB มีปัญหาเรื่องการควบคุมลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อความถี่ตอบสนองสูงขึ้น จากการศึกษาถึงปัญหาที่ผ่านมาจึงทำให้เกิดการพัฒนาสายอากาศที่มีโครงสร้างสายอากาศใหม่เป็นแบบวงแหวนเซกเตอร์วงกลมขึ้นซึ่งโครงสร้างใหม่นี้ได้พยายามปรับปรุงปัญหาของสายอากาศ UWB ที่ผ่านมาโดยการศึกษาและออกแบบเพื่อปรับปรุงเรื่องการควบคุมลำคลื่นเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอวิวัฒนาการและหลักการในการออกแบบสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยที่ส่วนแรกคือวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่มีการเปิดปลายเซกเตอร์ทั้งสองด้านด้วยช่องเปิดสี่เหลี่ยมซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการอ้างอิงหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและอีกส่วนเป็นการกล่าวถึงวิวัฒนาการของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน โดยเริ่มต้นจากสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แล้วทำการพัฒนาสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีแบนด์วิดธ์กว้างขึ้นโดยการตัดต่อบางส่วนของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือไม่ก็นำสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ พบว่าสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านให้แบนด์วิดธ์ของอิมพีแดนซ์หรือช่วงความถี่ที่กว้างมากและได้นำเสนอตัวอย่างของสายอากาศที่มีการประยุกต์ใช้โมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านที่เคยมีมาก่อนซึ่งสายอากาศดังกล่าวยังมีปัญหาเรื่องการยกขึ้นของลำคลื่นเมื่อความถี่สูงขึ้นดังนั้นจึงประยุกต์ใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมและสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านเป็นองค์ประกอบของสายอากาศสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

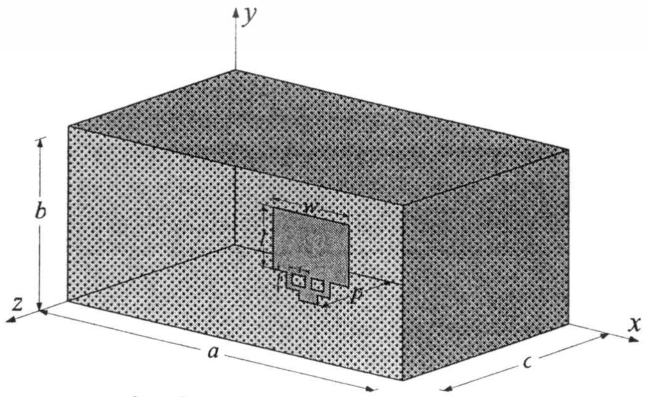
การจำลองและผลการจำลองสายอากาศ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงการจำลองและผลการจำลองของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่า $|S_{11}|$ ค่าความแรงลำคลื่น ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและค่าอัตราการขยาย เทียบกับย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการ จากนั้นทำการจำลองการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลาและโดเมนเชิงความถี่ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้ที่มุมต่างๆ ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO นั้นจะนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

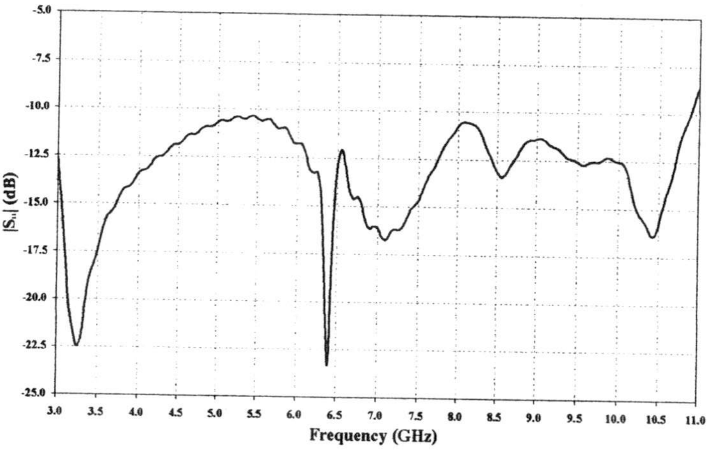
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่นำมาใช้พิจารณาการออกแบบสายอากาศเบื้องต้น

การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบนั้น เริ่มจากการศึกษาและนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศจากบทความที่มีมาก่อน โดยลักษณะโครงสร้างของสายอากาศในบทความดังกล่าวเป็นสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน [9] ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นสายอากาศที่นำไปประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz มี $|S_{11}|$ ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.2 มาใช้ในการพิจารณาเบื้องต้น เนื่องจากรูปแบบโครงสร้างของสายอากาศในบทความมีทิศทางเดียวกันกับสายอากาศที่กำลังพิจารณาออกแบบ



รูปที่ 4.1 สายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน

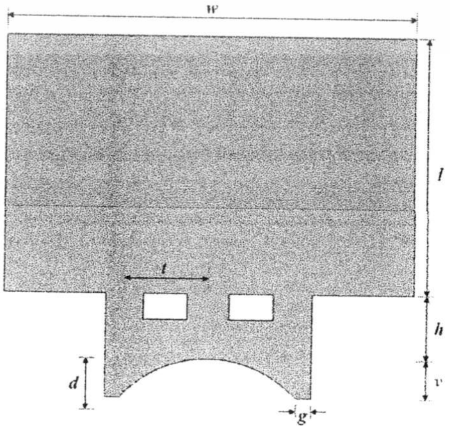
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน

4.2.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้าน

ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการจำลองสายอากาศนั้นจะมีความหนาเท่ากับ 0.2 mm ขนาดความกว้างและความสูงของโมโนโพล ($w \times l$) เท่ากับ $17 \times 13\ \text{mm}^2$ ความสูงของก้านโมโนโพลทั้งสามก้าน (h) เท่ากับ 3 mm ระยะของก้านโมโนโพลแต่ละก้าน (t) เท่ากับ 3.5 mm และได้เพิ่มเติมในส่วนของแผ่นลัดวงจรเข้าไปในองค์ประกอบของแผ่นโมโนโพลโดยมีความยาวของแผ่นลัดวงจร (v) เท่ากับ 2.5 mm ความกว้างของแผ่นลัดวงจร (g) เท่ากับ 2 mm ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3 โครงสร้างดังกล่าวมีจุดเริ่มต้นมาจากโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงด้วยการป้อนร่วมแบบสามก้าน [7] การใช้แผ่นลัดวงจรและการตัดต่อบางส่วนแบบสมมาตร [35] เพื่อขยายแบนด์วิดธ์ของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม ซึ่งวิธีการต่างๆที่ใช้ในการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างของแผ่นโมโนโพลสามารถทำให้แบนด์วิดธ์ตอบสนองของโมโนโพลกว้างขึ้น



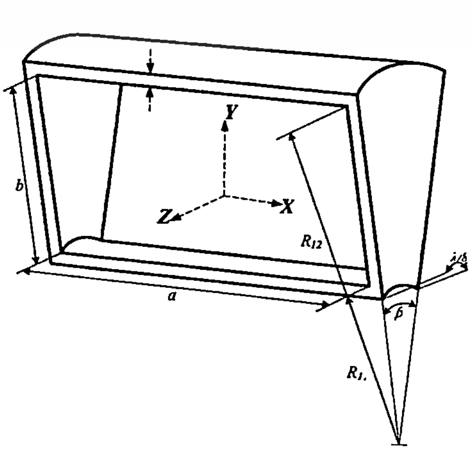
รูปที่ 4.3 โมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมด้วยแผ่นกระตุ้นแบบสามก้านที่มีแผ่นลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงแหวนเซกเตอร์วงกลม

วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่นำเสนอนั้นจะประกอบด้วยพื้นที่ 4 ส่วนคือในส่วนของพื้นที่ด้านล่างซึ่งเปรียบเสมือนแผ่นระนาบสะท้อน ส่วนของพื้นที่ด้านข้างทั้งสองด้านและส่วนของพื้นที่ด้านบน ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดที่กล่าวมารวมกันเป็นวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่นำมาล้อมรอบโมโนโพลชนิดแผ่นดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4

ค่าพารามิเตอร์ขนาดของวงแหวนเซกเตอร์วงกลม เริ่มต้นพิจารณาจากความถี่ต่ำของย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการซึ่งในงานวิจัยนี้คือความถี่ 3.1GHz ในลำดับแรกกำหนดให้ค่าความกว้างในส่วนของเซกเตอร์ชิ้นด้านล่างเท่ากับ $\lambda/8$ ของความถี่ 3.1GHz ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 12.1 mm จากนั้นจะทำการพิจารณาหารัศมีด้านใน (R_{11}) ของวงแหวนเซกเตอร์วงกลม โดยกำหนดมุมความโค้งของเซกเตอร์วงกลม (β) ค่าเท่ากับ 30° จะได้ค่าความยาวรัศมีด้านในของเซกเตอร์วงกลม (R_{11}) เท่ากับ 23.1 mm จากนั้นจึงทำการกำหนดขนาดความยาวและความสูงของวงแหวนเซกเตอร์วงกลม โดยใช้ขนาดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก $(a \times b)$ มีขนาดเท่ากับ 54×27 mm² มากำหนดเป็นความกว้างและความสูงของวงแหวนเซกเตอร์วงกลม โดยอ้างอิงหลักการของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือความถี่ตัดของท่อนำคลื่นซึ่งความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัดจะไม่สามารถแพร่กระจายในท่อนำคลื่นนั้นได้ สำหรับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง a เท่ากับ 54 mm จะมีความถี่ตัดเท่ากับ 2.77 GHz และยังกำหนดให้ช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีขนาด $a = 2b$ เพื่อให้อยู่ในโหมด TE_{10} มากที่สุดและมีความหนาของท่อเซกเตอร์วงกลมเท่ากับ 2 mm สำหรับท่อเซกเตอร์วงกลมจะมีลักษณะเหมือนกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่โค้งเป็นวงกลมในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งท่อนำคลื่นโค้งจะสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางการเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่นได้ [30]-[34] และด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงนำมาเป็นสมมุติฐานในการแก้ไขปัญหาการการยกขึ้นของลำคลื่น โดยการใช้ท่อที่มีลักษณะโค้งมาเปลี่ยนแปลงทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นให้มีมุมก้มลงเล็กน้อย ซึ่งปัญหาการยกขึ้นของลำคลื่นที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่สูงก็จะสามารถแก้ไขปรับปรุงให้อยู่ในมุมและทิศทางที่ต้องการได้



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของวงแหวนเซกเตอร์วงกลม

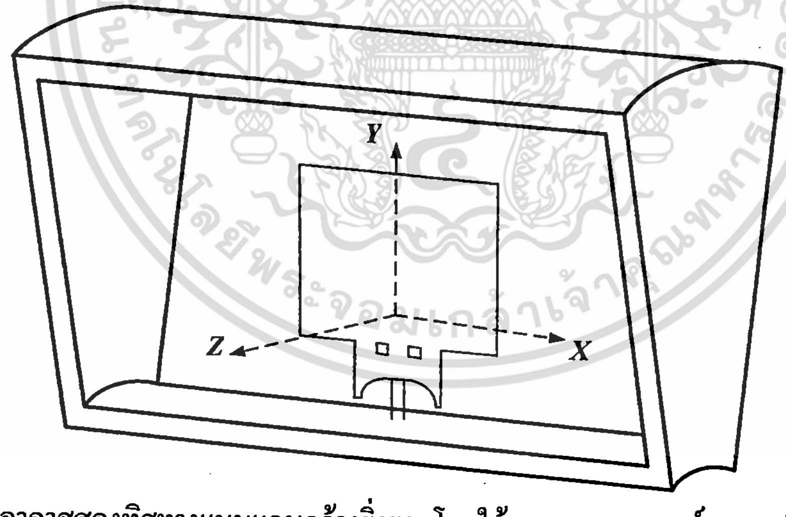
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศนั้นได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการออกแบบเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบซึ่งกำหนดเงื่อนไขดังนี้

- โครงสร้างของสายอากาศมีขนาดเล็กที่สุด
- $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ
- สายอากาศมีความแรงสูงสุดชี้ไปในทิศทาง $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ

4.3 การจำลองของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมซึ่งมีลักษณะเป็นท่อเซกเตอร์วงกลมที่มีการเปิดช่องสี่เหลี่ยมไว้บริเวณปลายท่อทั้งสองด้าน โดยมีการป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมด้วยแผ่นกระตุ้นแบบสามก้านดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นสายอากาศที่นำไปประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดมีความถี่ตอบสนองอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz



รูปที่ 4.5 สายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

สำหรับการค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมด้วยแผ่นกระตุ้นแบบสามก้านนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งขนาดทางไฟฟ้าได้จากการเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 3.1GHz ซึ่งเป็นความถี่ด้านต่ำสุดของย่านความถี่ UWB และเป็นความถี่ที่ใช้ในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ขนาดเริ่มต้นของวงแหวนเซกเตอร์วงกลม

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ

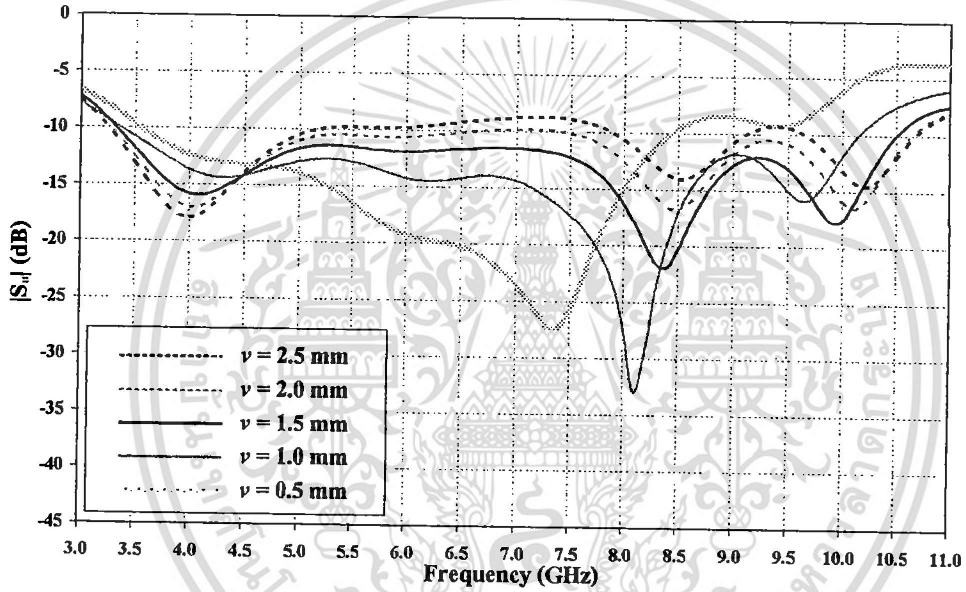
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ	ขนาดทางไฟฟ้า
w	17 mm	0.175λ
l	13 mm	0.134λ
t	3.5 mm	0.036λ
h	3 mm	0.031λ
d	3 mm	0.031λ
v	2.5 mm	0.026λ
g	2 mm	0.021λ
$a\times b$	54×27 mm^2	$0.558\lambda\times0.279\lambda$
R_{11}	23 mm	0.238λ
R_{12}	50 mm	0.517λ
β	30 deg	30 deg

โดยที่ w คือความยาวของโมโนโพล l คือความกว้างของโมโนโพล t คือระยะห่างของก้านของโมโนโพล h คือความสูงของก้านของโมโนโพล d คือความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณของโมโนโพล v คือความยาวของแผ่นลัดวงจรของโมโนโพล g คือความกว้างของแผ่นลัดวงจรของโมโนโพล $a\times b$ คือขนาดหน้าตัดของช่องเปิดสี่เหลี่ยม R_{11} คือรัศมีด้านในของเซกเตอร์วงกลม R_{12} คือรัศมีด้านนอกของเซกเตอร์วงกลมและ β คือขนาดของมุมที่ตัดเซกเตอร์วงกลมเพื่อให้ได้ความยาวของวงแหวนเซกเตอร์วงกลมจากนั้นจะเป็นการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของพารามิเตอร์ส่วนต่างๆของสายอากาศแล้วทำการพิจารณาผล $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงและเลือกค่าที่ให้ผล $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุดนำไปใช้ในการพิจาราณาพารามิเตอร์อื่นๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (v)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านโดยแผ่นลัดวงจรจะเชื่อมต่อลงมาจากด้านข้างทั้งสองของตัวป้อนแบบสามก้านโดยค่าพารามิเตอร์ความยาวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 2.5 mm มีความกว้างเท่ากับ 2 mm ความสูงของจุดป้อนสัญญาณมีค่าเท่ากับ $d = 3$ mm ซึ่งผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.6



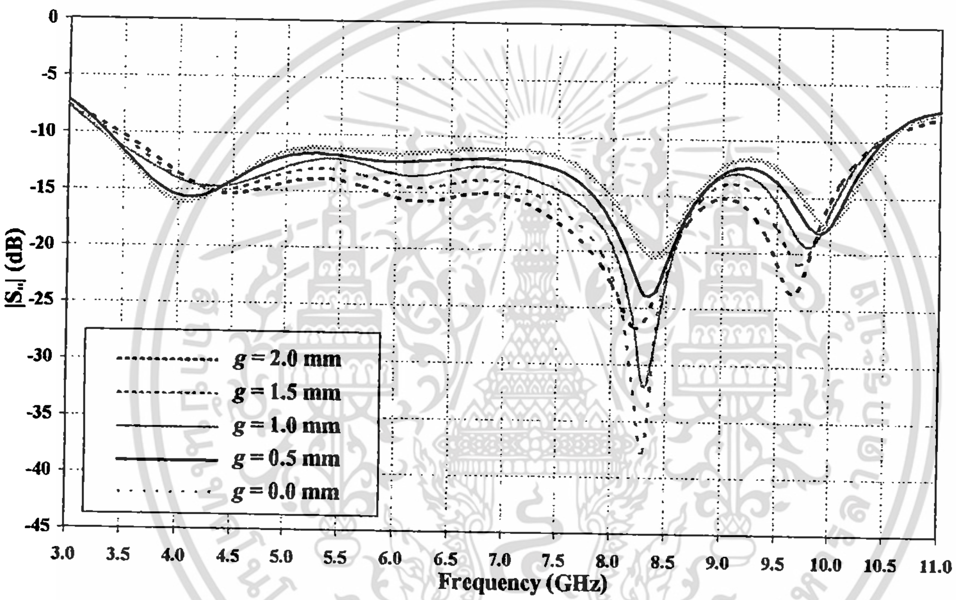
รูปที่ 4.6 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (v)

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านมีผลกระทบต่อค่า $|S_{11}|$ คือเมื่อค่าความยาวของแผ่นลัดวงจรเพิ่มขึ้นพบว่าค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB มีความกว้างแถบความถี่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาเทียบกันที่ค่า $v = 0.5$ mm ในช่วงความถี่ 8.5 GHz ถึง 10.6 GHz จะมี $|S_{11}|$ ลดต่ำกว่า -10 dB เมื่อค่า v มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ในขณะเดียวกันเมื่อ v มีค่าสูงขึ้นค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ 5.0 GHz ถึง 8.0 GHz จะมีค่าที่สูงกว่า -10 dB ผลของ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวแผ่นลัดวงจรที่ได้จากการจำลอง เราจะใช้ความยาวของแผ่นลัดวงจรที่มีค่าเท่ากับ $v = 1.5$ mm ในการจำลองต่อไป เนื่องจากมี $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.2 GHz ถึง 10.5 GHz ซึ่งมีค่าความกว้างแถบความถี่มากที่สุด เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (*g*)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 2 mm โดยมีค่าความสูงของจุดป้อนสัญญาณและความยาวของแผ่นลัดวงจรให้มีค่าเท่ากับ 3 mm และ 1.5 mm ซึ่งได้มาจากค่าเริ่มต้นของแผ่นโมโนโพลและผลการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.3.1 ตามลำดับ ผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความกว้างแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



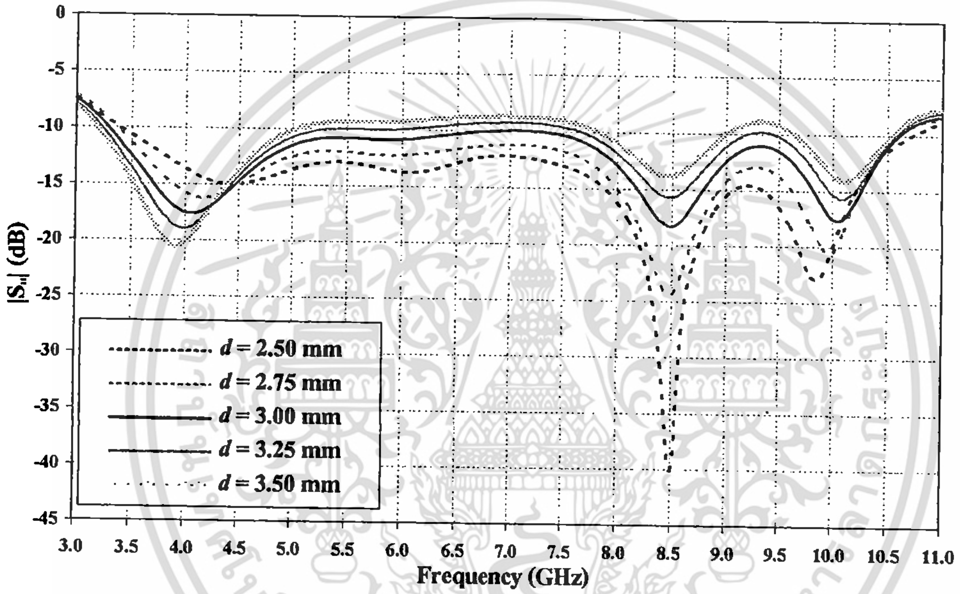
รูปที่ 4.7 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างแผ่นลัดวงจรของโมโนโพล ชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (*g*)

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมโดยการลดขนาดความกว้างลง ค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.2 GHz ถึง 4.5 GHz มีค่าต่ำลงเมื่อความกว้างแผ่นลัดวงจรลดลง และจากผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างแผ่นลัดวงจรของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลอง เราจะใช้ความกว้างของแผ่นลัดวงจรที่มีค่าเท่ากับ 0.5 mm ในการจำลองต่อไป เนื่องจากมีค่า $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุดและมีค่าที่ใกล้เคียงกันตลอดช่วงความถี่เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (d)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านโดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 3 mm โดยมีค่าความความยาวและความกว้างของแผ่นลัดวงจรให้มีค่าเท่ากับ 1.5 mm และ 0.5 mm ซึ่งได้มาจากค่าผลการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ตามลำดับผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.8



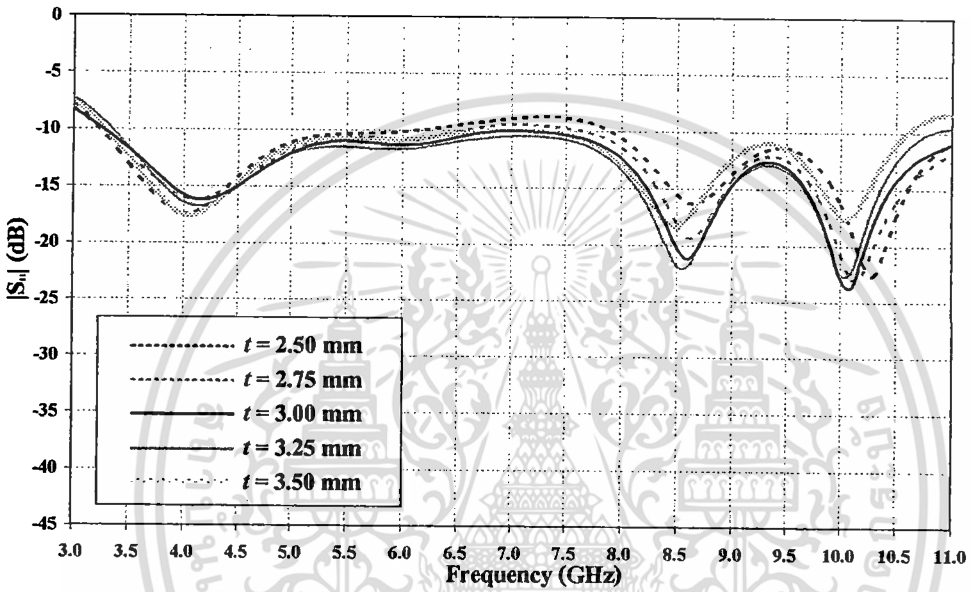
รูปที่ 4.8 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (d)

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อค่าความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น ผลตอบสนองในช่วงความถี่ต่ำมีแนวโน้มที่ดีขึ้นและในขณะเดียวกันผลตอบสนองในช่วงความถี่สูงมีแนวโน้มที่แย่ลง พิจารณาจากกราฟที่ค่าความสูงเริ่มต้น 3 mm ค่า $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB จะอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.25 GHz ถึง 10.6 GHz เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความสูงให้มีค่าสูงขึ้นค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ต่ำจะมีค่าที่ดีขึ้นเล็กน้อยแต่ในช่วงความที่สูงจะมีค่าแย่ลง เมื่อค่าความสูงเท่ากับมีค่าลดลงค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ต่ำจะมีค่าที่แย่ลงเล็กน้อยแต่ในช่วงความที่สูงจะมีค่าที่ดีขึ้นอย่างมากและจากผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณที่ได้จากการจำลอง เราจะใช้ค่าความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณที่มีค่าเท่ากับ $d = 3$ mm ในการจำลองต่อไป เนื่องจากค่า |S11| มีค่าตอบสนองต่อช่วงความถี่ต่ำดีที่สุดเมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างของก้านโมโนโพล (t)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างของก้านโมโนโพลแต่ละก้าน โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 3.5 mm โดยจะใช้ค่าความยาวของแผ่นลัดวงจร (v) ความกว้างของแผ่นลัดวงจร (g) และความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณ (d) ที่ได้จากจากหัวข้อที่ 4.3.1 4.3.2 และ 4.3.3 ผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างของก้านโมโนโพลแต่ละก้านเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



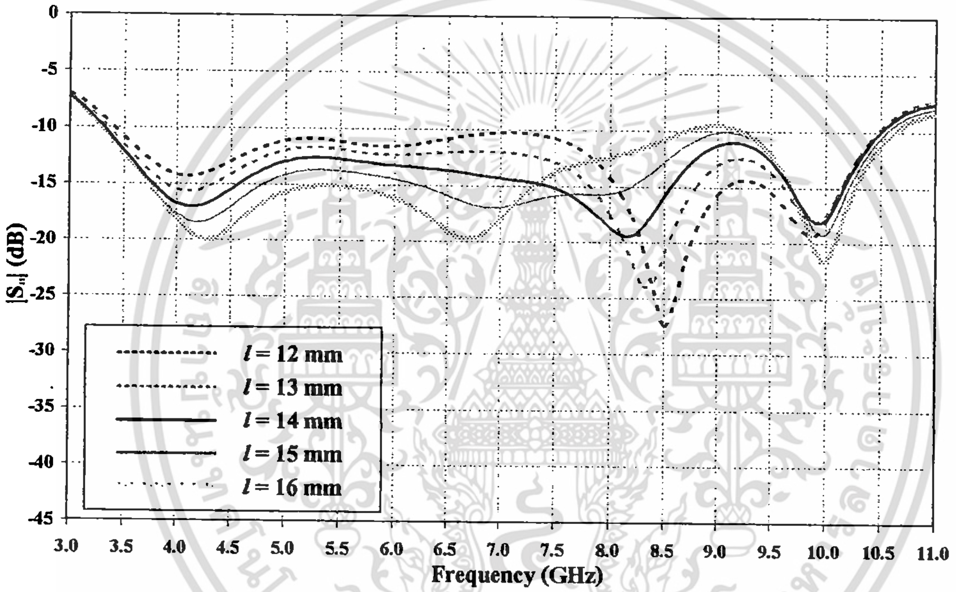
รูปที่ 4.9 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของก้าน โมโนโพล (t)

จากรูปที่ 4.9 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างของก้านโมโนโพลแต่ละก้านมีผลกระทบต่อค่า $|S_{11}|$ จากผลที่ได้แสดงให้ว่าการลดระยะห่างของก้านโมโนโพลทำให้ค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูงมีผลที่ดี ซึ่งพบว่าระยะห่างของก้านโมโนโพลแต่ละก้านที่มีค่าเท่ากับ 3 mm เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นเราจึงใช้ระยะห่างของก้านโมโนโพลแต่ละก้านที่มีค่าเท่ากับ 3 mm ในการจำลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (*l*)

จากหัวข้อผ่านมาจะได้ค่าความยาว (*v*) ความกว้าง (*g*) ของแผ่นลัดวงจร ความสูงของตำแหน่งป้อนสัญญาณ (*d*) และระยะห่างของก้านโมโนโพล (*t*) ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม (*l*) โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 13 mm ผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้านกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



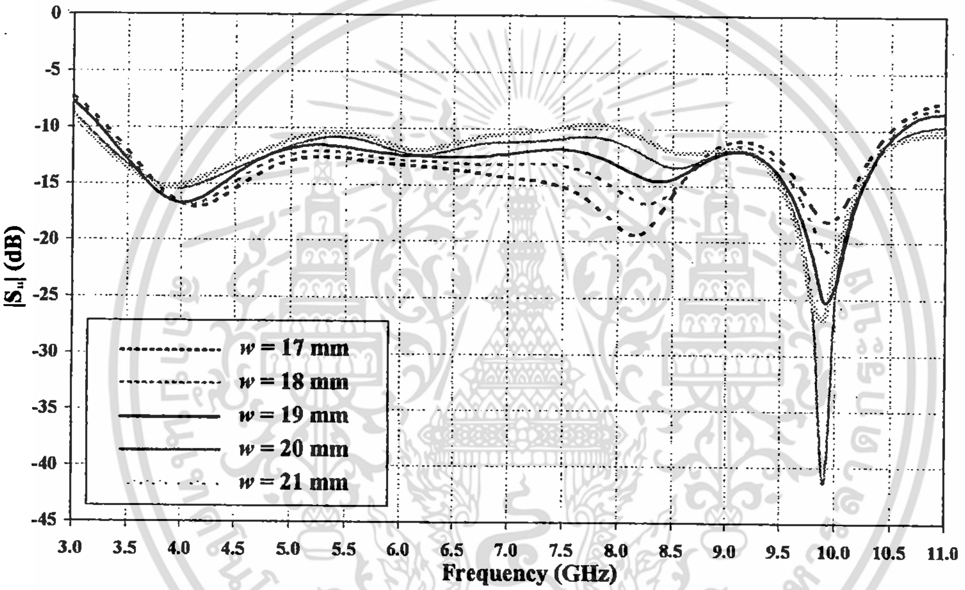
รูปที่ 4.10 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม (*l*)

จากรูปที่ 4.10 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมมีผลกระทบต่อค่า $|S_{11}|$ อย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่าความกว้างของโมโนโพลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลแนวโน้มที่ดีต่อช่วงความถี่ต่ำ คือค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 7.5 GHz มีค่าลดลงเมื่อความกว้างเพิ่มขึ้นและในช่วงความถี่ 8 GHz ถึง 10.6 GHz จะมีค่า $|S_{11}|$ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่า $|S_{11}|$ ยังมีค่าต่ำกว่า -10 dB เกือบจะตลอดช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz จากผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลอง เราจะใช้ความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่มีค่าเท่ากับ 14 mm ในการจำลองต่อไปเนื่องจากมีค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB และมีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงความถี่ที่สามารถพิจารณาได้ในหัวข้อนี้ เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (*w*)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 17 mm และทำการกำหนดความกว้างของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมให้มีค่าเท่ากับ 14 mm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.3.5 ผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



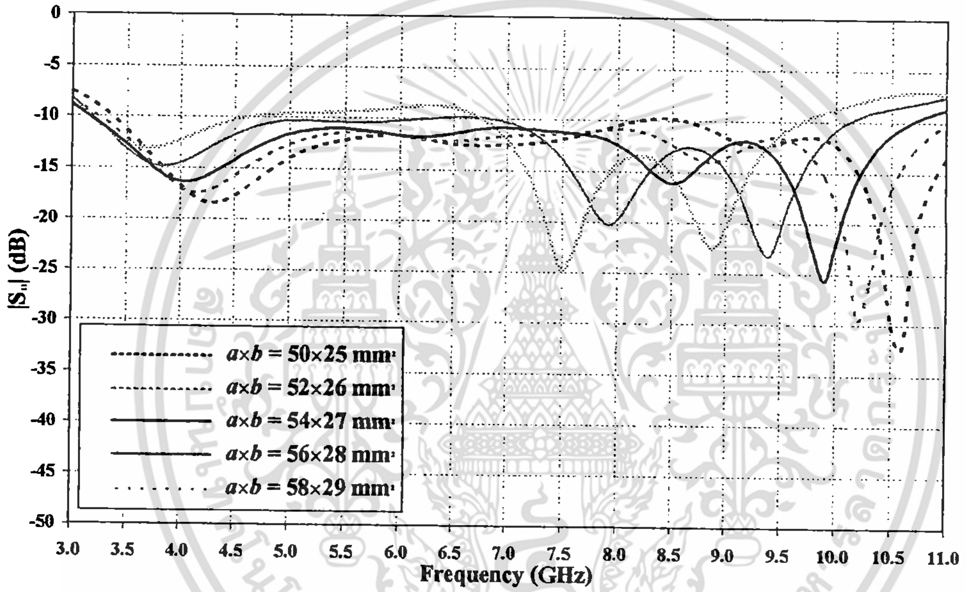
รูปที่ 4.11 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแบบสามก้าน (*w*)

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมโดยการเพิ่มขนาดความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบ เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่าความยาวของโมโนโพลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลแนวโน้มที่ดีต่อแถบความถี่ต่ำ พบว่าค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 4 GHz มีค่าลดลงเมื่อความยาวเพิ่มขึ้นและในช่วงความถี่ 4 GHz ถึง 10.6 GHz มีค่า $|S_{11}|$ เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่า $|S_{11}|$ ยังมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านที่ต้องการ และจากผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลอง เราจะใช้ความยาวของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่มีค่าเท่ากับ 19 mm ในการจำลองต่อไป เนื่องจากมีค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB และมีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงความถี่ เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดหน้าตัดช่องเปิดสี่เหลี่ยม $(a \times b)$

การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดช่องเปิดสี่เหลี่ยม ในเบื้องต้นจะกำหนดให้ $a = 2b$ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ a ให้มีค่าต่างๆ สำหรับเงื่อนไขขนาดของพารามิเตอร์ a ที่สอดคล้องกับโหมดเป็นใหญ่มากที่สุดสำหรับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีขนาด $a = Rb$ โดยที่ $R = 2$ จะสอดคล้องกับโหมดเป็นใหญ่มากที่สุด และกำหนดให้พารามิเตอร์เริ่มต้นของขนาดหน้าตัดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากมีค่าเท่ากับ 54×27 mm^2 ผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดหน้าตัดของช่องเปิดเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



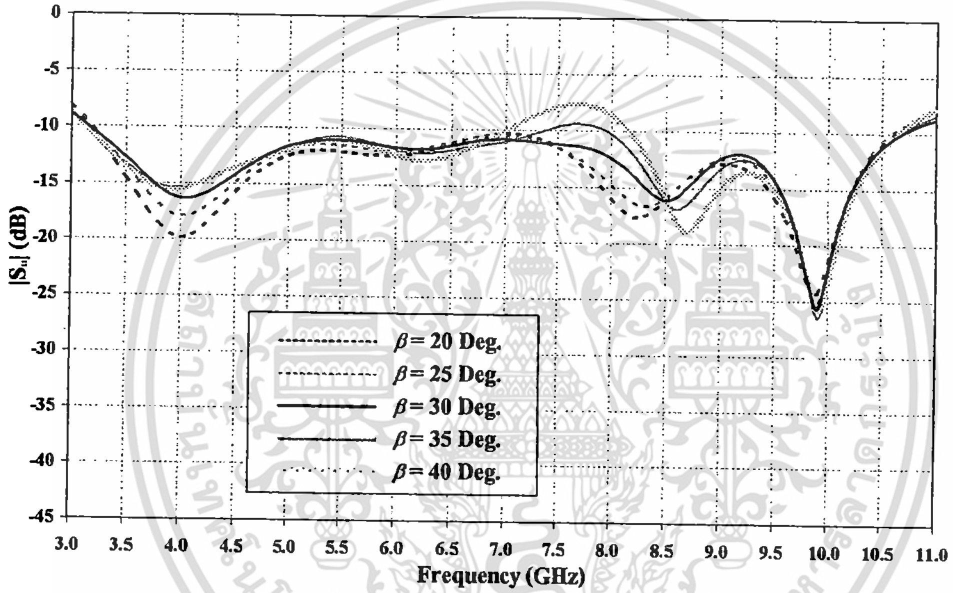
รูปที่ 4.12 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก $(a \times b)$

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีผลกระทบต่อค่า $|S_{11}|$ อย่างเห็นได้ชัด ค่า $|S_{11}|$ มีค่าต่ำกว่า -10 dB เกือบตลอดช่วงความถี่ตอบสนองยกเว้นที่ช่วงความถี่ต่ำที่มีค่าสูงกว่า -10 dB สังเกตว่าเมื่อทำการเพิ่มขนาดของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ทำให้ค่า $|S_{11}|$ ที่ช่วงความถี่ต่ำมีค่าต่ำลง แต่ก็ทำให้ความถี่บางช่วง โดยเฉพาะช่วงความถี่ตั้งแต่ 5 GHz ถึง 7 GHz มีค่า $|S_{11}|$ ที่สูงขึ้น จนทำให้มีค่าสูงกว่า -10 dB และจากผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลอง พบว่าขนาดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีค่า $a \times b = 54 \times 27$ mm^2 มีค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำตลอดช่วงความถี่ 3.2 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งจะใช้ขนาดช่องเปิดนี้ในการจำลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.8 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวของท่อเซกเตอร์วงกลม (β)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวของท่อเซกเตอร์วงกลม เนื่องจากโครงสร้างนี้ได้จากการตัดเอาส่วนหนึ่งของท่อเซกเตอร์วงกลมมาใช้งานดังนั้นความยาวของท่อที่ได้จะพิจารณากำหนดจากขนาดของมุมที่ใช้ในการตัดเซกเตอร์วงกลม (β) โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 องศา และทำการกำหนดขนาดหน้าตัดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมให้มีค่าเท่ากับ $a \times b = 54 \times 27$ mm^2 ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ผ่านมา ผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



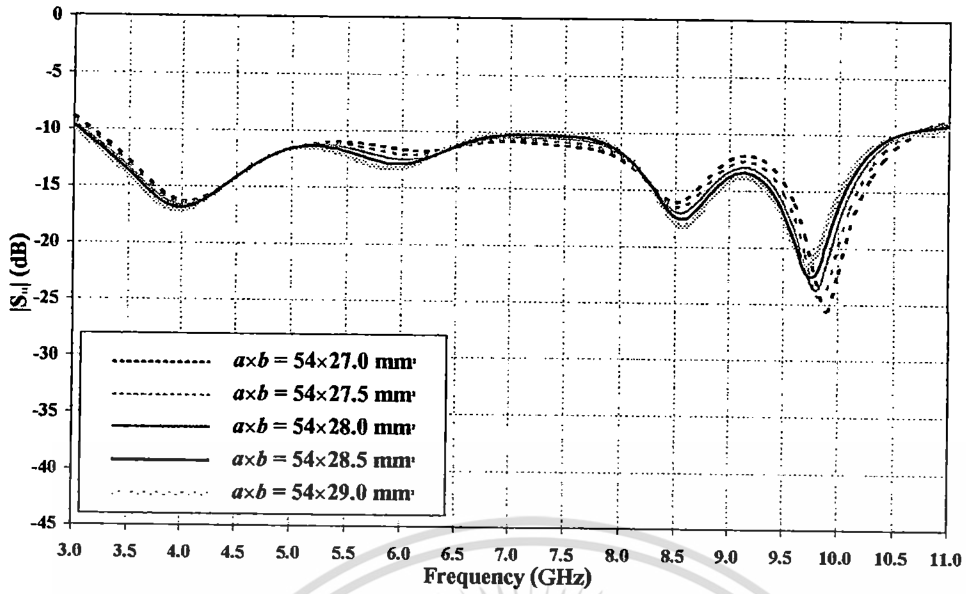
รูปที่ 4.13 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อเซกเตอร์วงกลม (β)

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อเซกเตอร์วงกลม มีผลกระทบต่อค่า $|S_{11}|$ คือเมื่อค่าความยาวเพิ่มขึ้นค่า $|S_{11}|$ จะมีค่าสูงขึ้นและแถบความถี่ตอบสนองจะกว้างขึ้นอีกด้วย จากผลการจำลองค่าความยาวที่เหมาะสมคือค่ามุมตัดเซกเตอร์วงกลม (β) เท่ากับ 30 องศา เนื่องจากมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงและมีแถบความถี่ตอบสนองที่ดีกว้างที่สุด

4.3.9 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาดความสูงหน้าตัดของช่องเปิด (b)

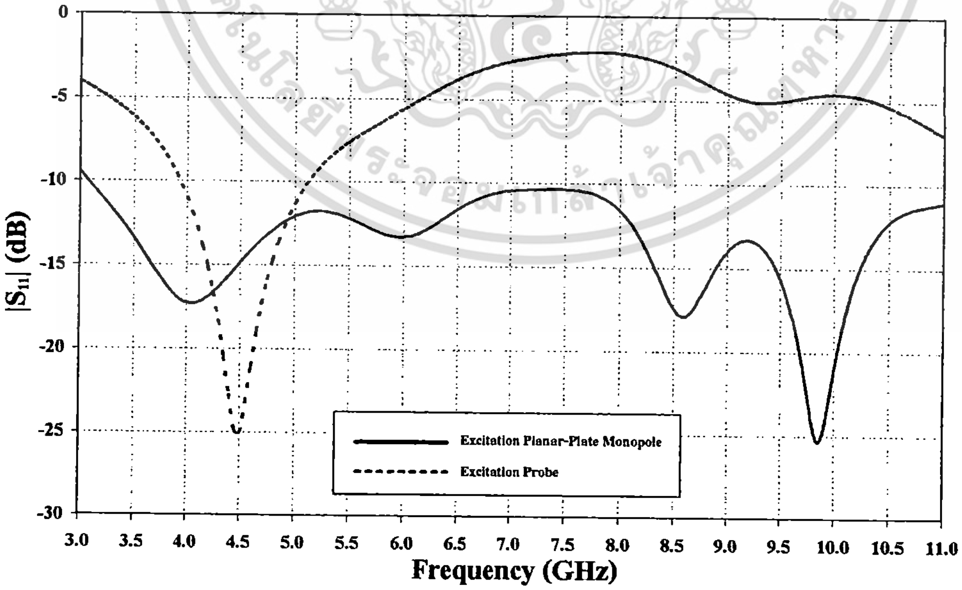
ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความสูงของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยขนาดหน้าตัดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $b = 27$ mm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ผ่านมา ผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความสูงของช่องเปิดสี่เหลี่ยมเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 $|S_{11}|$ เทียบกับความถี่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความสูงหน้าตัดของช่องเปิดของท่อเซกเตอร์วงกลม (*b*)

จากรูปที่ 4.14 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (*b*) มีผลกระทบต่อค่า $|S_{11}|$ คือเมื่อค่าความกว้างเพิ่มขึ้นค่า $|S_{11}|$ มีผลตอบสนองต่อความถี่ด้านต่ำดีขึ้นและแถบความถี่ตอบสนองจะกว้างขึ้นอีกด้วย จากการจำลองค่าความกว้างของช่องเปิด (*b*) ที่เหมาะสมเท่ากับ 28.5 mm เนื่องจากมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลของค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบผลของค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมกับสายอากาศเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ซึ่งโพรบมีความยาวเท่ากับ 17 mm พบว่าค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้านจะมีแบนด์วิดธ์ที่กว้างมากเมื่อเทียบกับการป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

จากการจำลองของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมและการนำมาปรับค่าให้ดีที่สุดอีกครั้งด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองสายอากาศจะนำไปทำการพิจารณาในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ	ขนาดทางไฟฟ้า
w	19 mm	0.196λ
l	14 mm	0.145λ
t	3.1 mm	0.032λ
h	3 mm	0.031λ
d	2.8 mm	0.029λ
v	1.8 mm	0.019λ
g	0.4 mm	0.004λ
$a\times b$	54×28.6 mm^2	$0.558\lambda\times0.295\lambda$
R_{11}	23 mm	0.238λ
R_{12}	51.6 mm	0.533λ
β	30 deg	30 deg

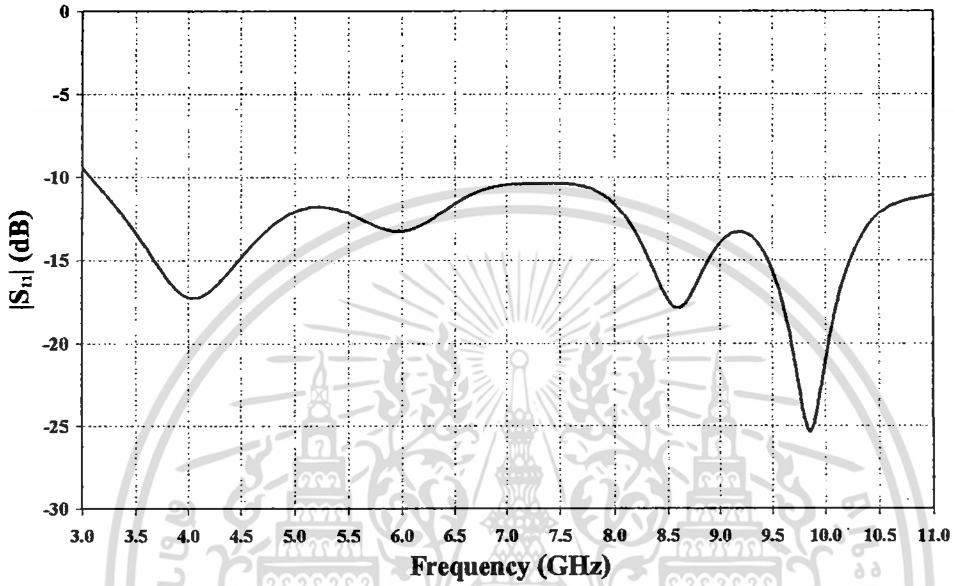
4.4 ค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

จากการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศในหัวข้อที่ผ่านมาเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมแล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทำการจำลองเพื่อทำการพิจารณาค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยายของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ

การพิจารณาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมเป็นเรื่องแรกที่ทำการพิจารณาผลที่ได้จากจำลองผลตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาว่ามีความครอบคลุมตลอดย่านความถี่ที่ต้องการหรือไม่



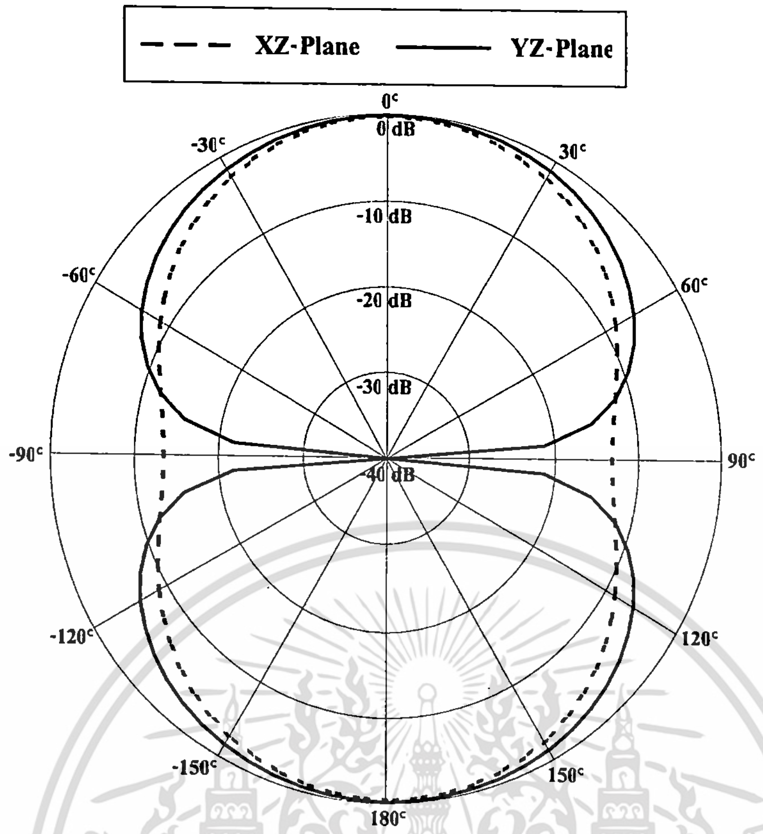
รูปที่ 4.16 $|S_{11}|$ ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.16 แสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมซึ่งจากรูปจะพบว่าค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่กว้างยิ่งยวดซึ่งมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

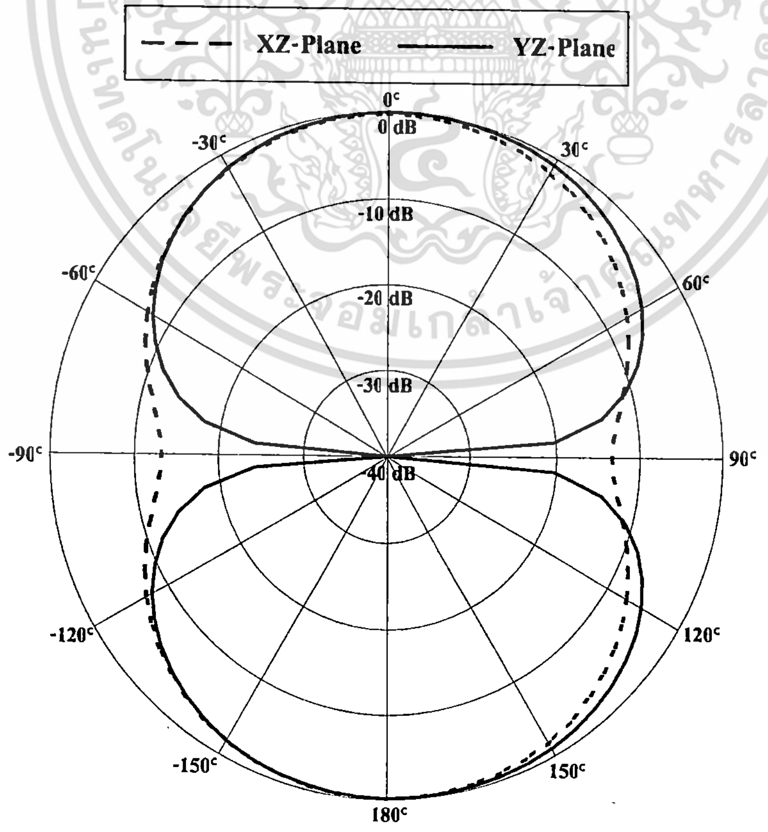
4.4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลอง โดยที่สายอากาศวางอยู่ทิศทางแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 4.4 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการพิจารณาทั้งระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ YZ และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ XZ ที่ความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

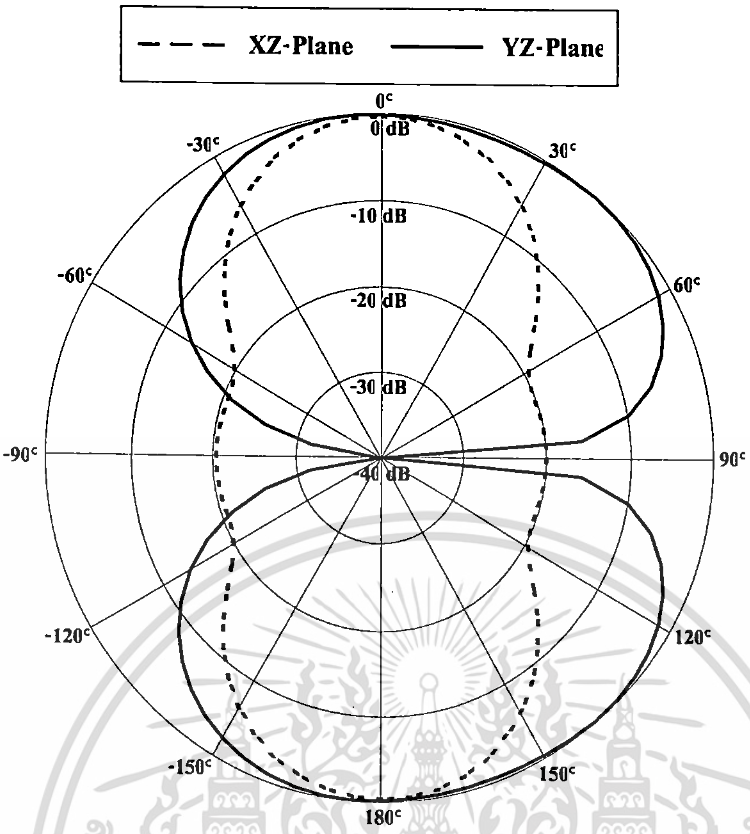


รูปที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz

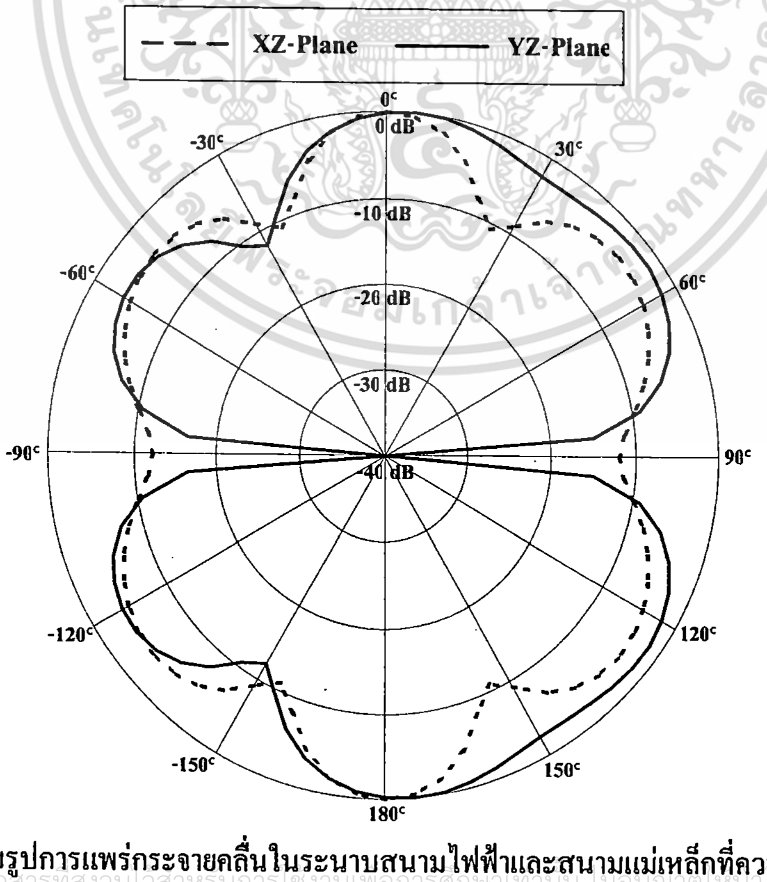


รูปที่ 4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

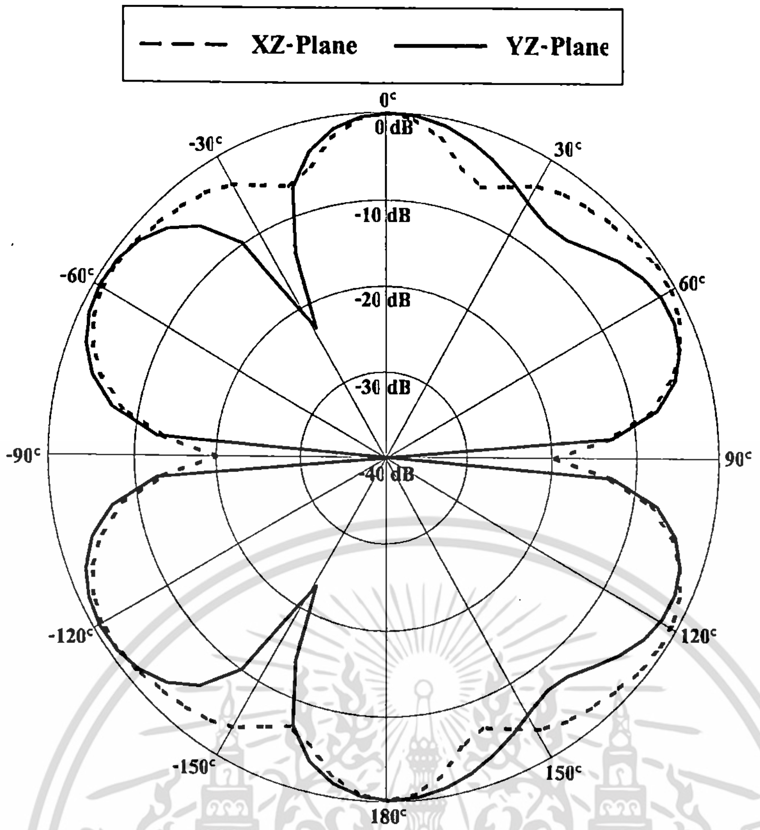


รูปที่ 4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 7 GHz



รูปที่ 4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 GHz

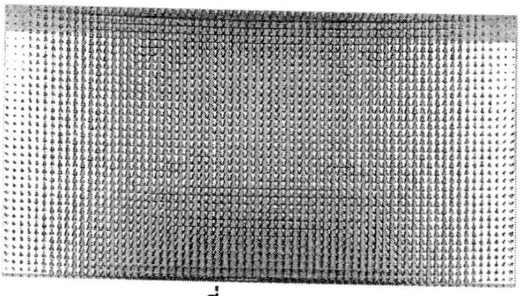
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



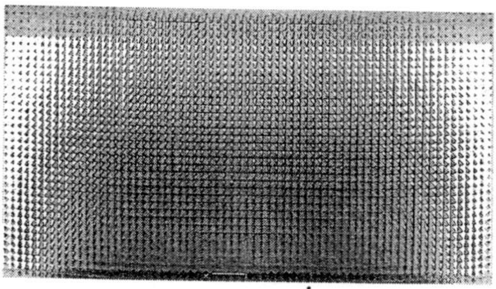
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz

จากรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.21 เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz , 5.0 GHz, 7.0 GHz, 9.0 GHz และ 10.6 GHz ในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ YZ) และระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ XZ) ของสายอากาศพบว่ามีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง เนื่องจากสายอากาศที่ทำการพิจารณามีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นที่มีการเปิดปลายไว้สองด้าน และพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีความไม่สมมาตรกัน ซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างของเซกเตอร์วงกลมและโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้านมีโครงสร้างไม่สมมาตรในระนาบ YZ โดยลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละความถี่ของสายอากาศมีลักษณะที่แตกต่างกันและความแรงสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีทิศทางอยู่ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ตลอดทุกความถี่ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กมีความสมมาตรกัน เนื่องจากโครงสร้างของเซกเตอร์วงกลมและโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้านมีโครงสร้างที่สมมาตรกันในระนาบ XZ โดยลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละความถี่ของสายอากาศมีลักษณะที่แตกต่างกันและความแรงสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กมีทิศทางอยู่ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ตลอดทุกความถี่เช่นเดียวกันกับระนามสนามแม่เหล็ก

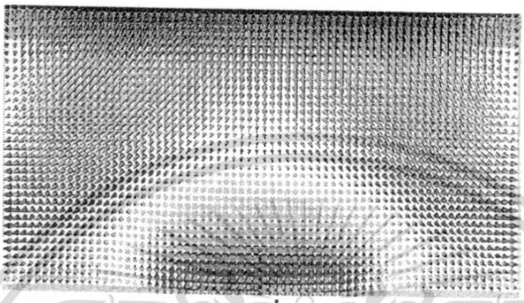
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



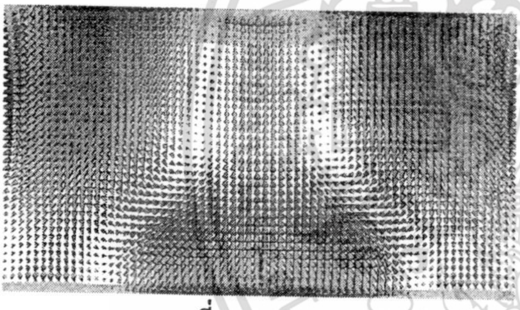
(ก) ความถี่ 3.1 GHz



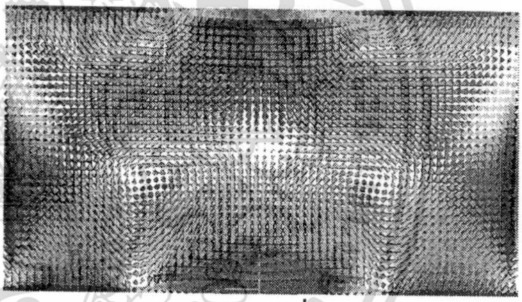
(ข) ความถี่ 5 GHz



(ค) ความถี่ 7 GHz



(ง) ความถี่ 9 GHz



(จ) ความถี่ 10.6 GHz

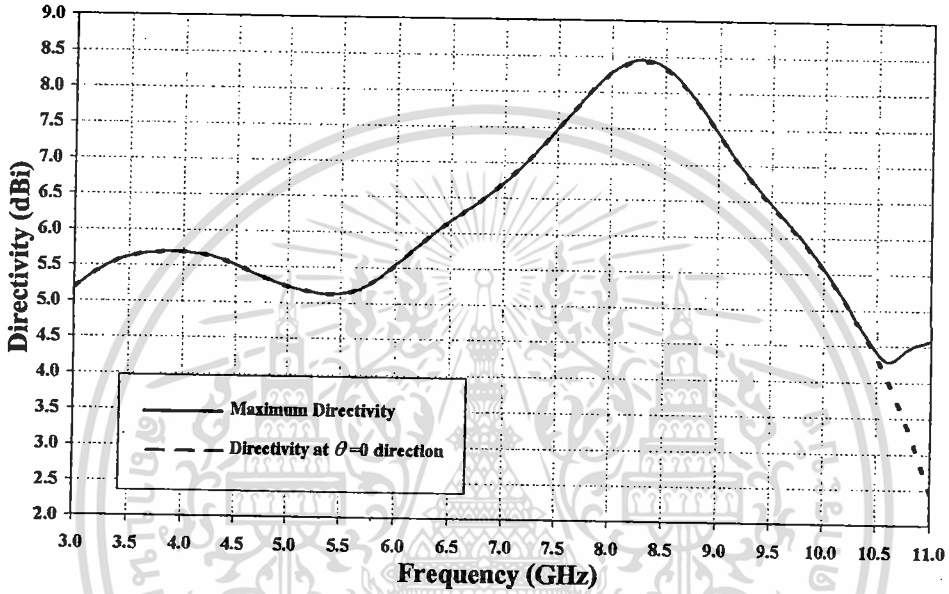
รูปที่ 4.22 แบบรูปของสนามที่ช่องเปิดที่ความถี่ต่างๆ

จากรูปที่ 4.22 แสดงแบบรูปของสนามตรงช่องเปิดของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz, 5 GHz, 7 GHz, 9 GHz และ 10.6 GHz พบว่าแบบรูปของสนามที่ความถี่ 3.1 GHz, 5 GHz, 7 GHz, 9 GHz และ 10.6 GHz มีสนามที่แรงที่สุดอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องเปิด ดังนั้นทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีสนามที่แรงที่สุดอยู่ที่มุม $\theta = 0^\circ$ แต่ที่ความถี่ 7GHz, 9GHz และ 10.6 GHz โหมดได้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจะเห็นได้ว่าแบบรูปของสนามตรงช่องเปิดมีการเลื่อนขึ้นไปด้านบนช่องเปิดซึ่งทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 7GHz, 9GHz และ 10.6 GHz มีความกว้างของการแพร่กระจายคลื่นทางด้านบนมากกว่าทางด้านล่าง แต่ยังคงมีความแรงของการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดอยู่ที่มุม $\theta = 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลอง โดยทำการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ด้านหน้าของสายอากาศหรือที่ตำแหน่ง $\theta = 0°$ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.23



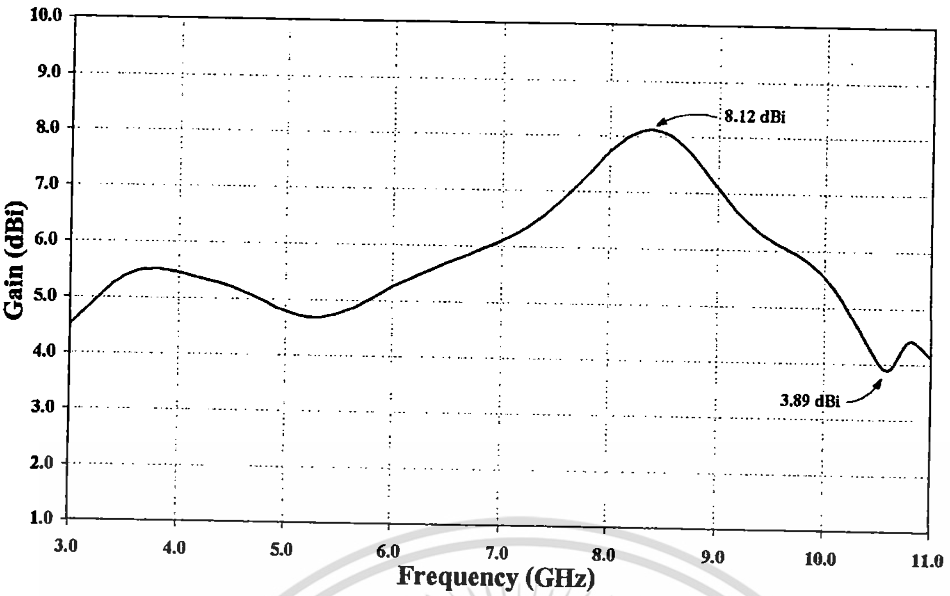
รูปที่ 4.23 สภาพเจาะจงทิศทางเทียบกับความถี่ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.23 พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่าสูงสุดและที่ตำแหน่ง $\theta = 0°$ ของสายอากาศ มีค่าเท่ากันตลอดช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีความแรงของลำคลื่นในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศทั้งสองด้านคือ $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$

4.4.4 อัตราการขยายของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาอัตราการขยายของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลอง โดยทำการพิจารณาค่าอัตราการขยายจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด ซึ่งอัตราการขยายของสายอากาศตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 อัตราการขยายเทียบกับความถี่ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.24 พบว่าอัตราการขยายมีการเปลี่ยนแปลงตลอดย่านความถี่ตอบสนอง โดยเฉพาะในช่วงความถี่ตั้งแต่ 6 GHz ถึง 10 GHz มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยายอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยาย พบว่าค่าอัตราการขยายที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.117 dBi อยู่ที่ความถี่ 8.4 GHz และค่าอัตราการขยายที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.89 dBi อยู่ที่ความถี่ 10.6 GHz แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองอยู่ในช่วง 4.22 dB ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง

4.5 การจำลองส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ที่มุมต่างๆ

ในการส่งสัญญาณอิมพัลส์จากสายอากาศทางด้านส่งไปยังสายอากาศทางด้านรับ เพื่อพิจารณาว่าสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของสายอากาศทางด้านรับมีความผิดเพี้ยนมากหรือน้อยแค่ไหน โดยที่สายอากาศทางด้านส่งเป็นสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลองและสายอากาศทางด้านรับกำหนดให้เป็นโพรบเสมือนจริง แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งมีระยะทางในการส่งสัญญาณอิมพัลส์จากสายอากาศส่งไปยังโพรบเท่ากับ 40 เซนติเมตรซึ่งอยู่ในขอบเขตสนามระยะไกลของสายอากาศทั้งสอง สำหรับการจำลองการส่งและการรับสัญญาณอิมพัลส์นั้นจะแสดงให้เห็นถึงความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ที่มุมต่างๆจากสัญญาณส่งเดียวกันว่าแต่ละมุมมีความผิดเพี้ยนไปมากน้อยแค่ไหน โดยการพิจารณาค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณส่งและสัญญาณเอาท์พุตที่รับได้จากโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

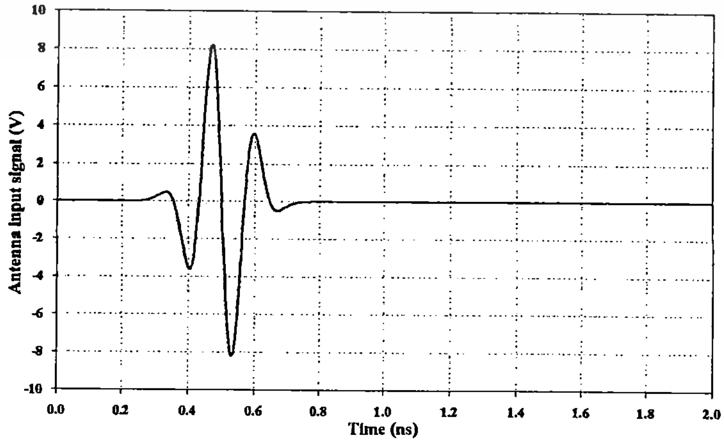
รูปที่ 4.25 ลักษณะของสายอากาศที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์

4.5.1 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงเวลา

สัญญาณอิมพัลส์ที่นำมาใช้ในการพิจารณาเป็นสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ [36]-[37] ที่ใช้ในแถบช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด เนื่องจากสัญญาณพัลส์แบบเกาส์จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง ซึ่งสัญญาณแบบเกาส์จะถูกกำหนดตามมาตรฐานของทาง FCC สำหรับระบบภายในอาคาร [38] โดยสัญญาณอิมพัลส์แบบเกาส์จะเป็นพัลส์แบบเกาส์ที่เป็นอนุพันธ์อันดับที่ 5 แสดงดังสมการที่ 4.1

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

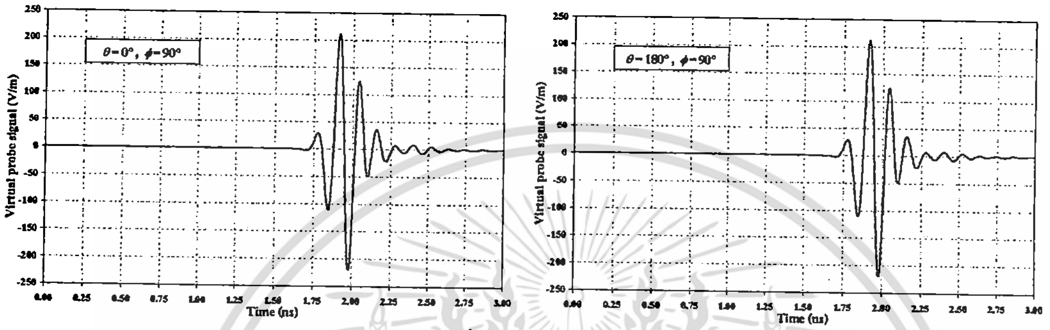
โดย c เป็นค่าคงที่ที่ทาง FCC เป็นผู้กำหนดซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-7} และ σ มีค่าเท่ากับ 51 ps เพื่อที่ทำให้รูปร่างของสเปกตรัมเป็นไปตามที่ FCC กำหนด สัญญาณอิมพัลส์ที่ทำการพิจารณาจะเป็นสัญญาณอินพุตของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.26



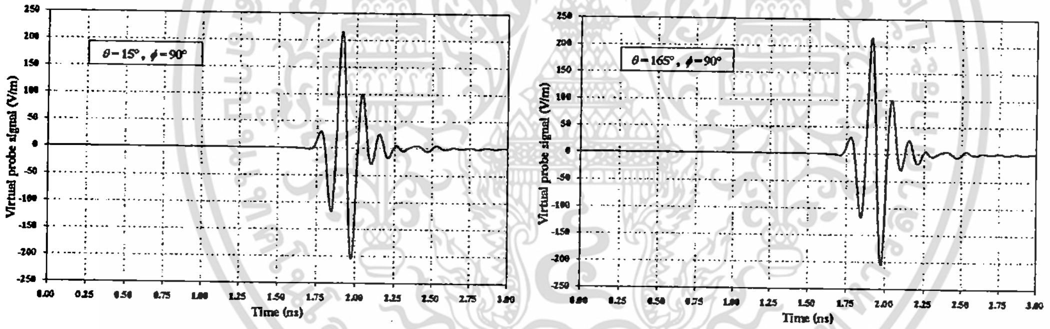
รูปที่ 4.26 สัญญาณอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

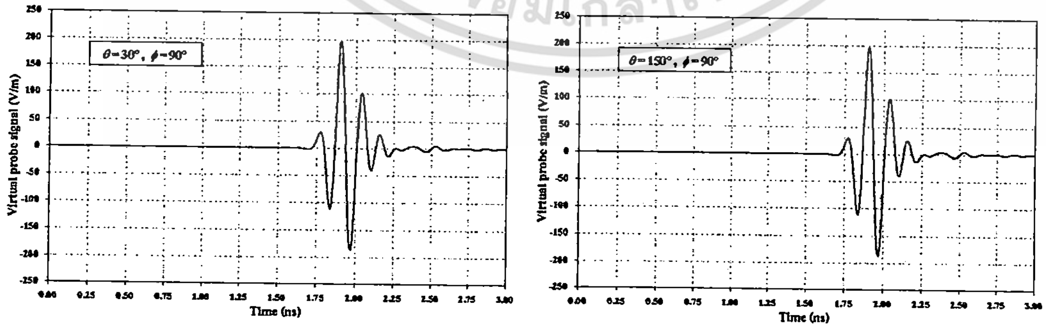
จากรูปที่ 4.26 เป็นสัญญาณอินพุตของสายอากาศที่เป็นพัลส์แบบเกาส์ที่ได้จากสมการที่ 4.1 พบว่าสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ที่ได้เป็นพัลส์สั้นซึ่งทำให้สเปกตรัมทางความถี่มีความกว้างจนครอบคลุมถึงช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดสัญญาณอินพุตที่ได้จะถูกส่งสัญญาณจากสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลองไปยังโพรบเสมือนจริง สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28



(ก) สัญญาณที่รับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ 180°

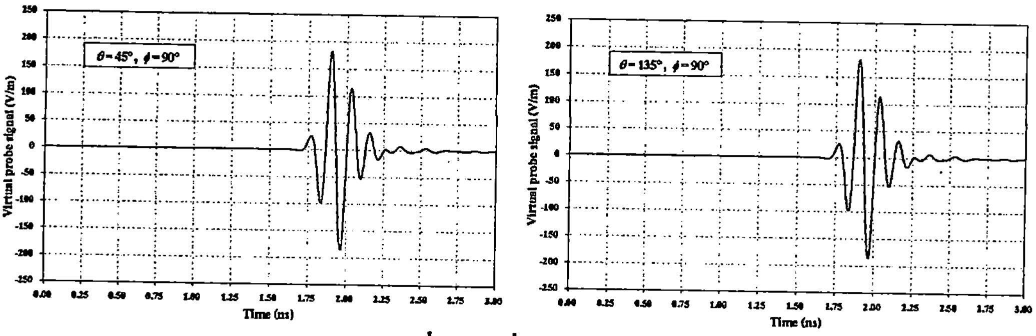


(ข) สัญญาณที่รับได้ที่มุม $\theta = 15°$ และ 165°

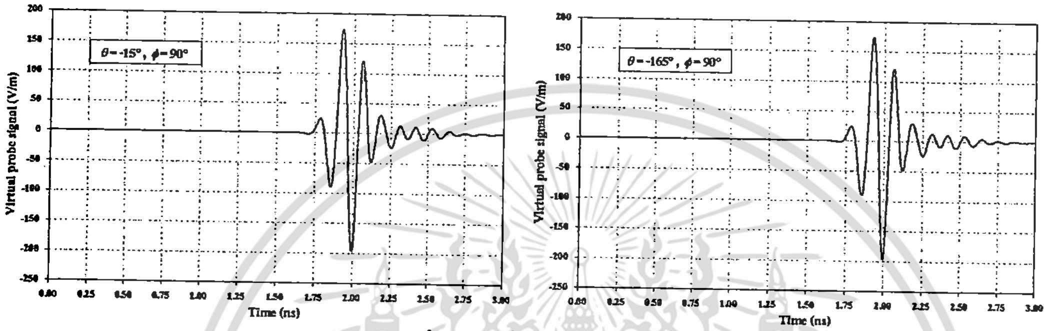


(ค) สัญญาณที่รับได้ที่มุม $\theta = 30°$ และ 150°

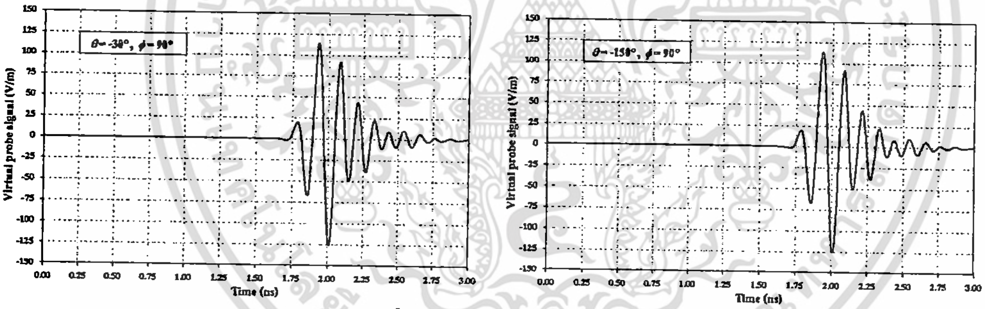
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



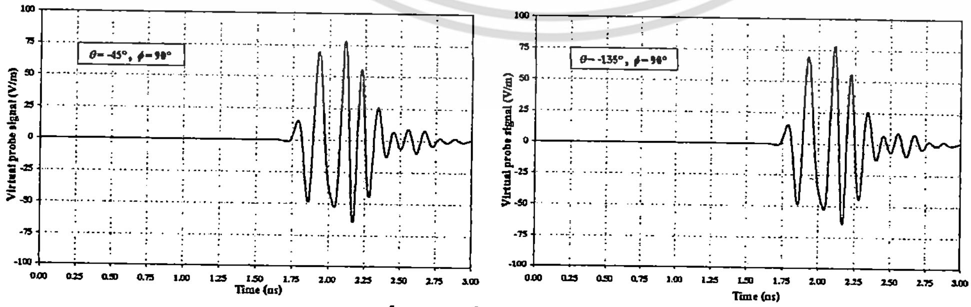
(ง) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = 45° และ 135°



(จ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = -15° และ -165°



(ฉ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = -30° และ -150°

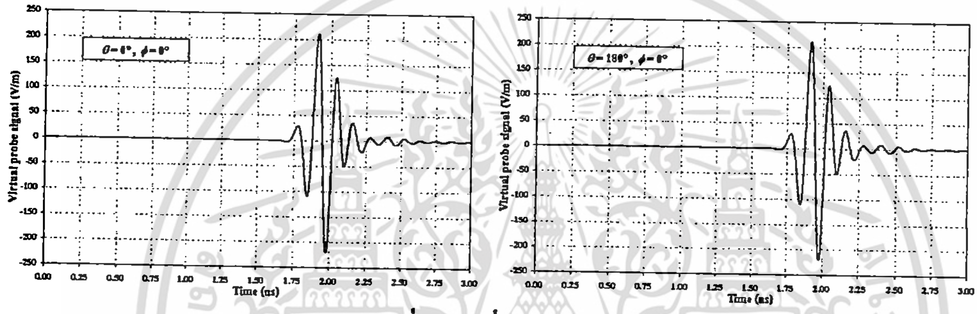


(ช) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = -45° และ -135°

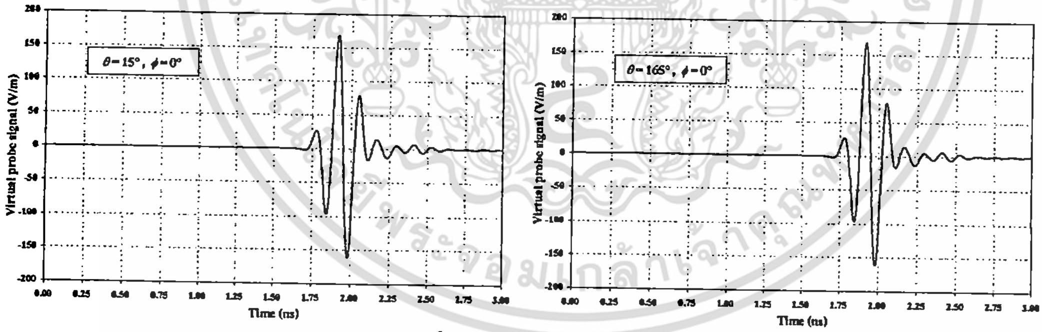
รูปที่ 4.27 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

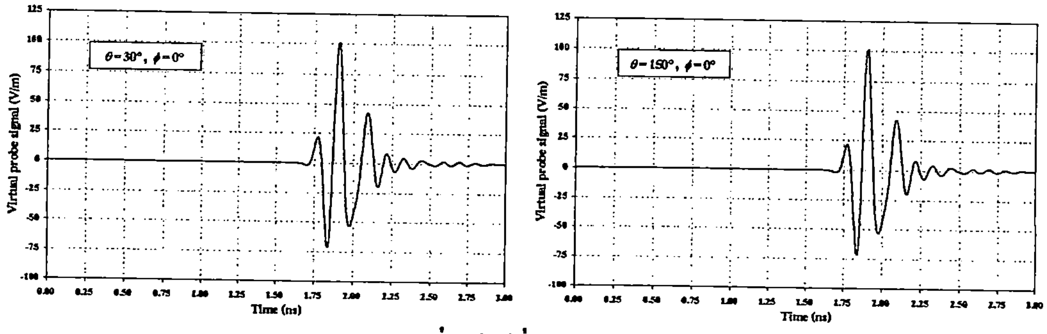
จากรูปที่ 4.27 เป็นสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมยก$\left(\phi = 90^\circ\right)$ ที่มุม $\theta = 0°, 15°, 30°, 45°, -15, -30°, -45°, 180°, 165°, 150°, 135°, -165°, -150°$ และ $-135°$ พบว่าสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีสัญญาณที่รับได้เหมือนกันและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆและยังพบอีกว่าลักษณะของสัญญาณที่ โพรบรับได้ในแต่ละมุมมีลักษณะความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่แตกต่างกันเนื่องจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมยกและขึ้นอยู่กับมุมในการรับสัญญาณที่มีองศาต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ในทิศทาง $\pm Z$ ที่มีมุมยกขึ้นในการรับสัญญาณเท่ากันจะมีลักษณะของสัญญาณที่รับได้เหมือนกันเนื่องจากโครงสร้างสายอากาศมีความสมมาตรกัน



(ก) สัญญาณที่รับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ $180°$

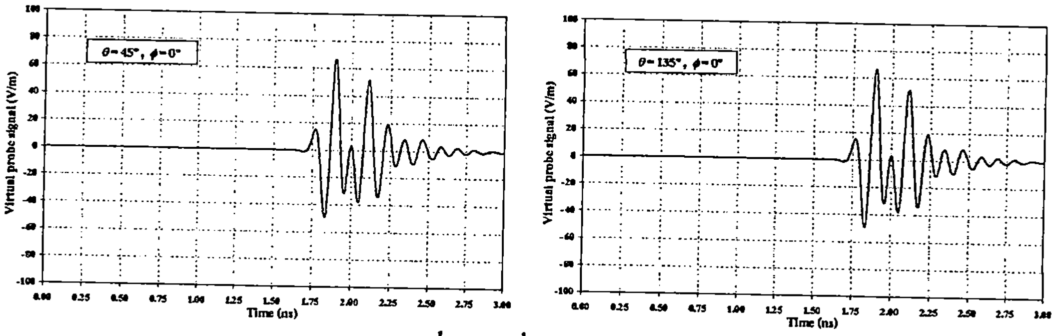


(ข) สัญญาณที่รับได้ที่มุม $\theta = 15°$ และ $165°$

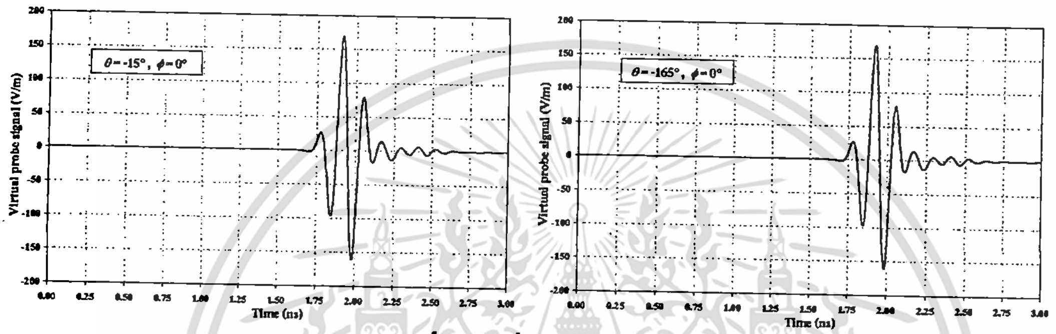


(ค) สัญญาณที่รับได้ที่มุม $\theta = 30°$ และ $150°$

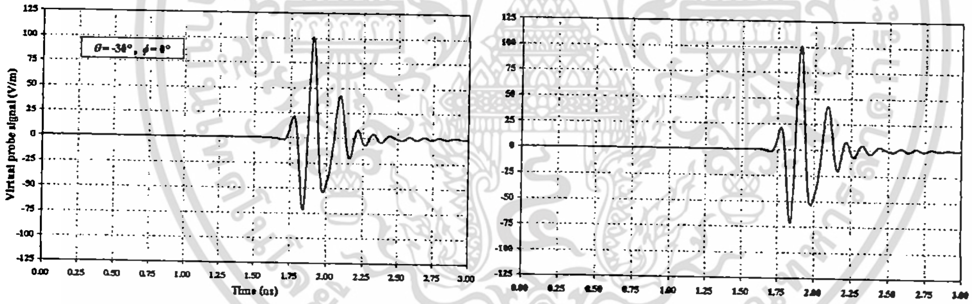
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



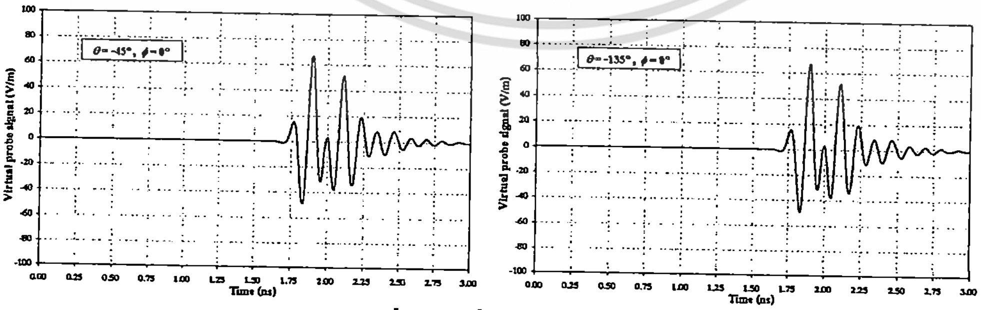
(ง) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = 45° และ 135°



(จ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = -15° และ -165°



(ฉ) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = -30° และ -150°



(ช) สัญญาณที่รับได้ที่มุม θ = -45° และ -135°

รูปที่ 4.28 สัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28 เป็นสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมกวาด $\left(\phi = 0^{\circ}\right)$ ที่มุม $\theta = 0°, 15°, 30°, 45°, -15, -30°, -45°, 180°, 165°, 150°, 135°, -165°, -150°$ และ $-135°$ พบว่าสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีสัญญาณที่รับได้เหมือนกันและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆและยังพบอีกว่าลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ที่ $\theta = \pm 15°, \pm 165°$, $\theta = \pm 30°, \pm 150°$ และมุม $\theta = \pm 45°, \pm 135°$ มีลักษณะความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เหมือนกัน เนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมกวาดและมุมในการรับสัญญาณมีองศาที่เท่ากัน

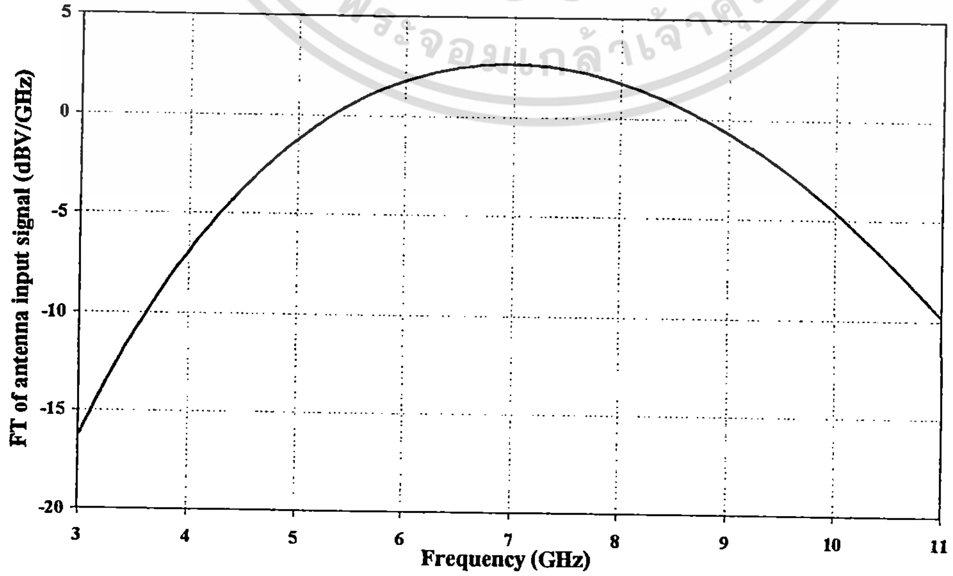
4.5.2 สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงในโดเมนเชิงความถี่ที่มุมต่างๆ โดยสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงความถี่สามารถหาได้โดยการแปลงฟูริเยร์จากสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลา สำหรับสมการการแปลงฟูริเยร์และการแปลงฟูริเยร์ผกผันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$S_K = \sum_{N=0}^{N-1} s_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \qquad k = 0,\ldots,N-1 \tag{4.2}$$

$$s_n = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{\frac{2\pi i}{N}kn} \qquad \mathrm{n} = 0,\ldots,N-1 \tag{4.3}$$

โดยที่ N เป็นจำนวนเชิงซ้อน และ i เป็นหน่วยจินตภาพ สำหรับสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงความถี่ แสดงดังรูปที่ 4.29

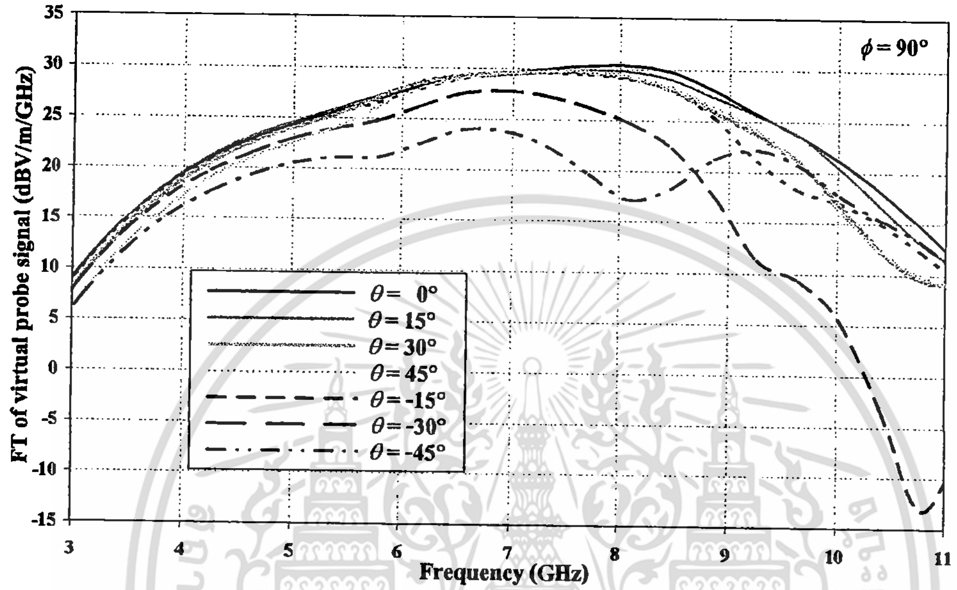


รูปที่ 4.29 สัญญาณอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงความถี่

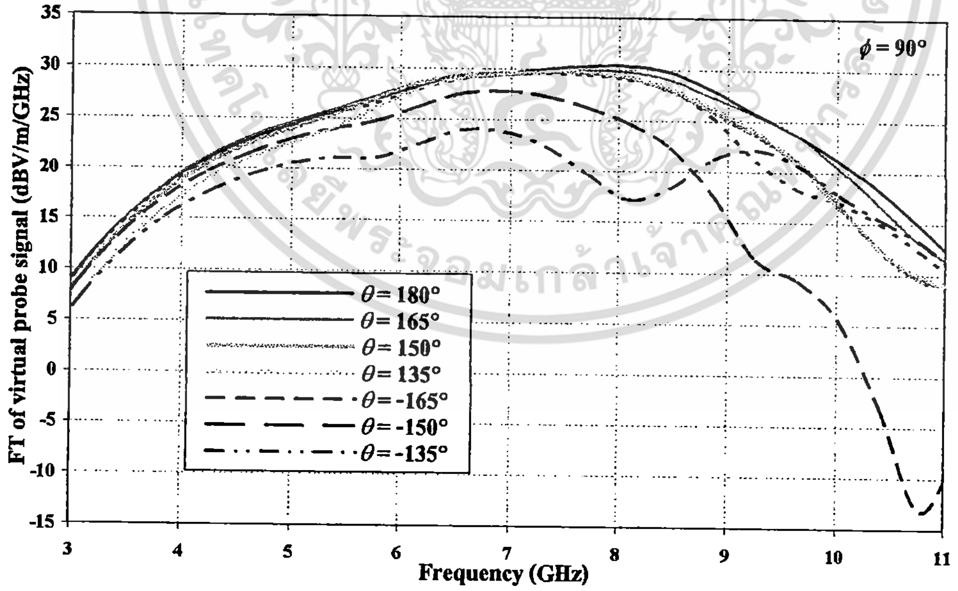
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 เป็นสัญญาณอินพุตของสายอากาศในโดเมนเชิงความถี่ ซึ่งสามารถหาได้โดยการแปลงฟูริเยร์ของสมการที่ 4.2 และ 4.3 จากสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลาที่เป็นสัญญาณอินพุตของสายอากาศที่ได้จากสมการที่ 4.1

สัญญาณอินพุตของสายอากาศจะถูกส่งไปยังโพรบเสมือนจริง สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ แสดงดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31



(ก) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในทิศทาง $+Z$



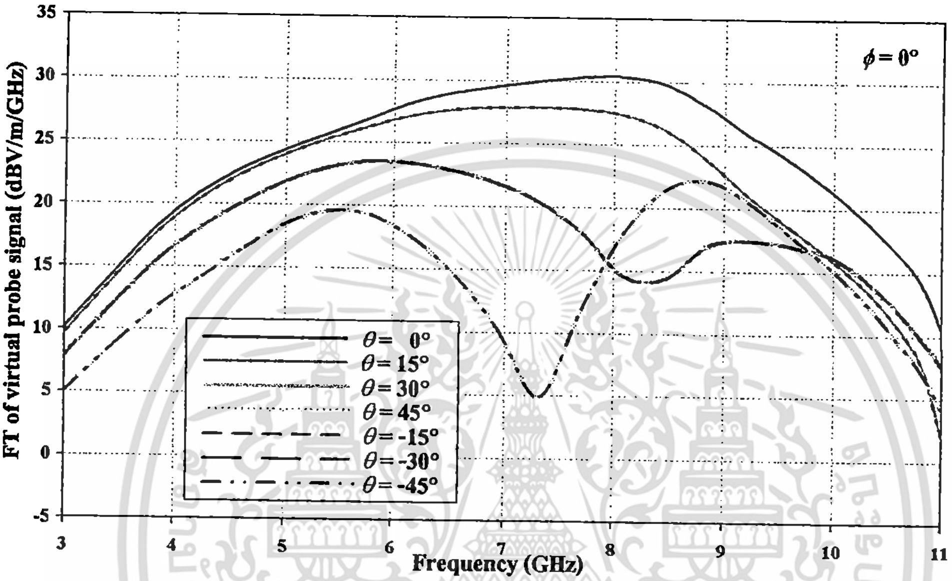
(ข) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในทิศทาง $-Z$

รูปที่ 4.30 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมยก

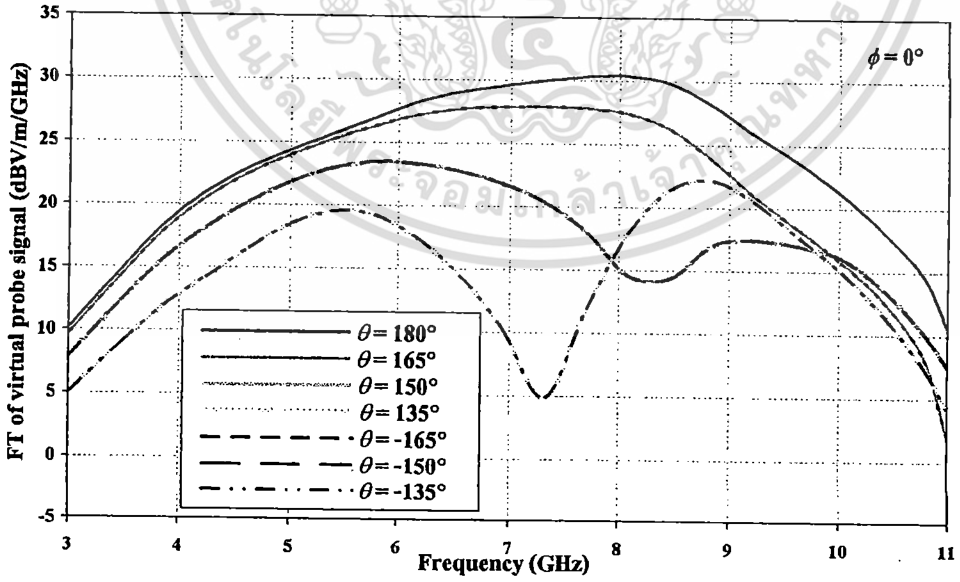
จากรูปที่ 4.30 เป็นสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมยก$\left(\phi = 90^{\circ}\right)$ ที่มุม $\theta = 0°, 15°, 30°, 45°, -15, -30°, -45°, 180°, 165°, 150°, 135°, -165°, -150°$ และ -135° ในโดเมนเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ พบว่าสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ และพบอีกว่าลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ในแต่ละมุมมีลักษณะความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่แตกต่างกันเนื่องจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมยกและขึ้นอยู่กับมุมในการรับสัญญาณที่มีองศาต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ในทิศทาง $\pm Z$ ที่มีมุมยกขึ้นเท่ากันในการรับสัญญาณเท่ากันจะมีลักษณะของสัญญาณที่รับได้เหมือนกัน



(ก) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในทิศทาง $+Z$



(ข) สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในทิศทาง $-Z$

รูปที่ 4.31 สัญญาณรับได้ที่มุมต่างๆในโดเมนเชิงความถี่ที่ระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

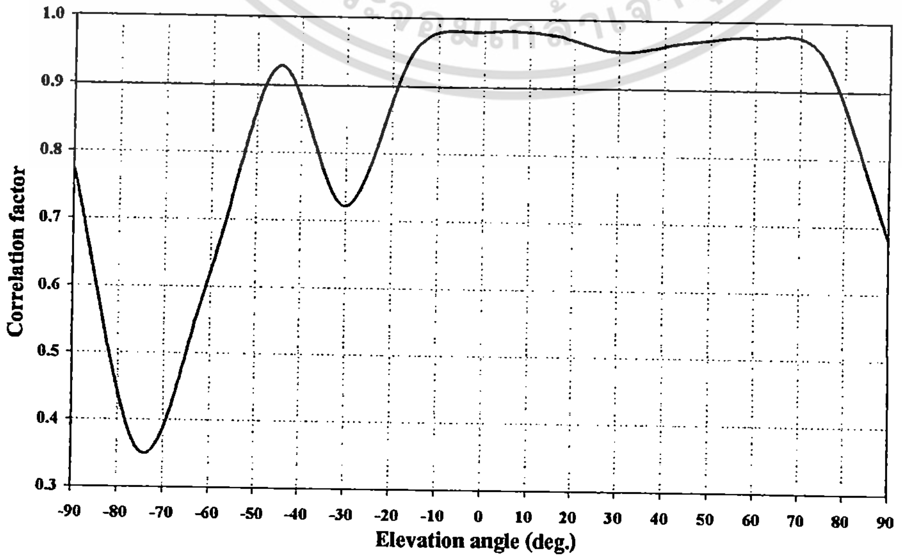
จากรูปที่ 4.31 เป็นสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ในระนาบมุมกวาด $(\phi = 0^\circ)$ ที่มุม $\theta = 0°, 15°, 30°, 45°, -15, -30°, -45°, 180°, 165°, 150°, 135°, -165°, -150°$ และ $-135°$ พบว่าสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีสัญญาณที่รับได้เหมือนกันและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ และยังพบอีกว่าลักษณะของสัญญาณที่โพรบรับได้ที่ $\theta = \pm 15°, \pm 165°$, $\theta = \pm 30°, \pm 150°$ และมุม $\theta = \pm 45°, \pm 135°$ มีลักษณะความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เหมือนกัน เนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมกวาดและมุมในการรับสัญญาณมีองศาที่เท่ากัน

4.5.3 ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ของสัญญาณอิมพัลส์

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลองกับสัญญาณที่โพรบเสมือนจริงรับได้ที่มุมต่างๆ ซึ่งมีสมการดังนี้

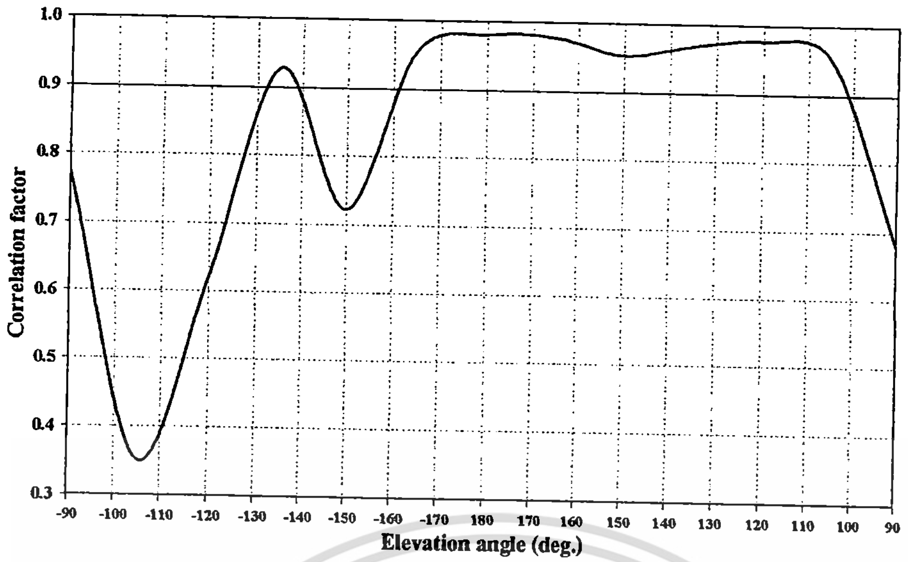
$$\rho = \max_{\tau} \left\{ \frac{\int s_1(t) s_2^*(t-\tau) dt}{\sqrt{s_1^2(t) dt} \sqrt{s_2^2(t-\tau) dt}} \right\} \tag{4.4}$$

โดยที่ $s_1(t)$ เป็นสัญญาณอินพุตของสายอากาศ $s_2(t)$ เป็นสัญญาณที่รับได้ของโพรบเสมือนจริง โดยค่าของสัญญาณที่รับได้จะได้มาจากการจำลอง และ τ เป็นเวลาที่ประวิงไป ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองสัญญาณที่มุมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.32 และ 4.33 โดยค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ดีควรที่จะมีค่ามากกว่า 0.9



(ก) ตัวประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง +Z

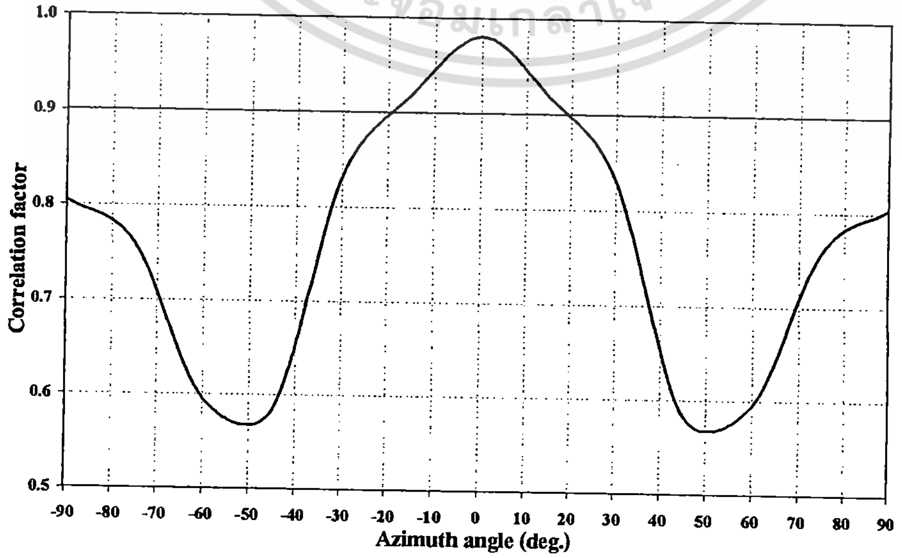
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ตัวประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง $-Z$

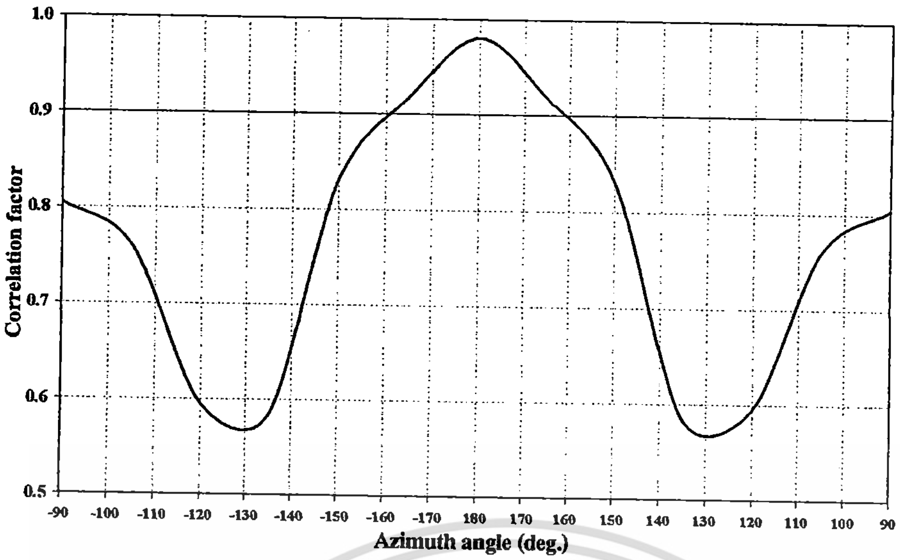
รูปที่ 4.32 ตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยก

จากรูปที่ 4.32 เป็นค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมยกพบว่าที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9808 ก็แสดงว่าสัญญาณที่ได้รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุตของสายอากาศมากที่สุด และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่า 0.9 อยู่ระหว่างมุม $\theta = 78°$ ถึง $\theta = -18°$ และ $\theta = 102°$ ถึง $\theta = -162°$ ซึ่งมีความกว้างประมาณ 60° นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ในระนาบมุมยกระหว่างมุมทางด้านบวกกับทางด้านลบมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมยก และขึ้นอยู่กับมุมในการรับสัญญาณที่มีองศาต่างกัน



(ก) ตัวประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง $+Z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ตัวประกอบสหสัมพันธ์ในทิศทาง $-Z$

รูปที่ 4.33 ตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด

จากรูปที่ 4.33 เป็นค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุมต่างๆในระนาบมุมกวาด พบว่าที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9808 ก็แสดงว่าสัญญาณที่ได้รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุตของสายอากาศมากที่สุด และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่า 0.9 อยู่ระหว่างมุม $\theta = 20°$ ถึง $\theta = -20°$ และ $\theta = 160°$ ถึง $\theta = -160°$ ซึ่งมีความกว้างประมาณ 40° และยังพบอีกว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ในระนาบมุมกวาดระหว่างมุมทางด้านบวกกับทางด้านลบที่มีองศาเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้างสายอากาศในแนวระนาบมุมกวาดและมุมในการรับสัญญาณมีองศาที่เท่ากัน

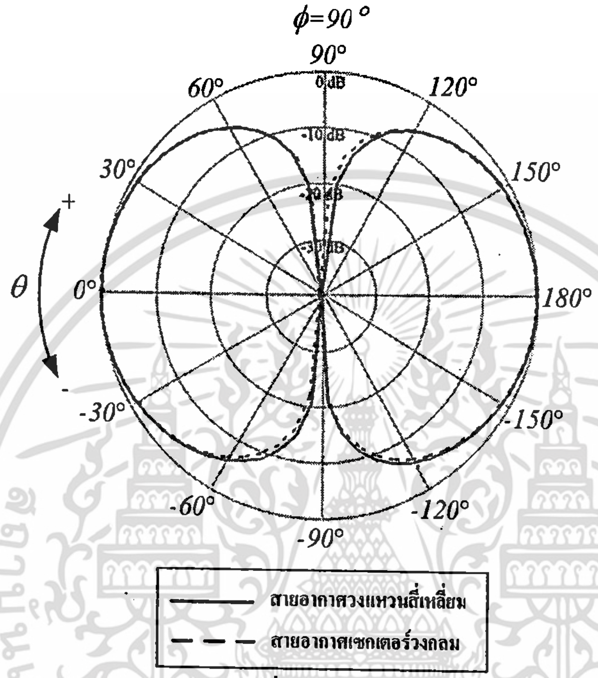
4.6 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองกับสายอากาศที่มีมาก่อน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสายอากาศ UWB มีปัญหาเรื่องการควบคุมลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อความถี่ตอบสนองสูงขึ้น ทำให้เกิดการพัฒนาสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมซึ่งพยายามที่จะปรับปรุงแก้ไขปัญหาของสายอากาศ UWB เรื่องการควบคุมลำคลื่นเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้น ซึ่งจะนำผลจากการจำลองแบบที่ได้มาเปรียบเทียบกับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยการป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นแบบสามก้าน [10] ซึ่งเป็นสายอากาศแบบสองทิศทางที่ครอบคลุมย่านความถี่กว้างยิ่งยวด รองรับความถี่ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยจะทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศทั้งสองแบบ

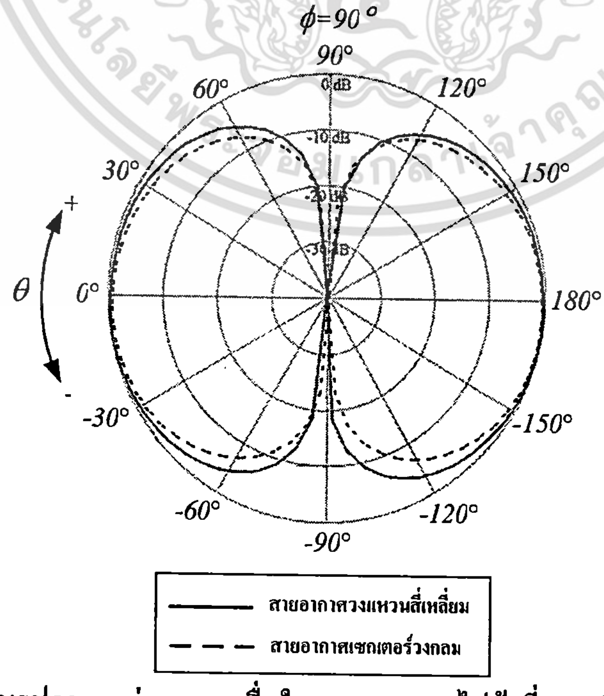
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะแสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมและวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบแบบสี่เหลี่ยมโดยทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz , 5.0 GHz , 7.0 GHz , 9.0 GHz และ 10.6 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.34 ตามลำดับ

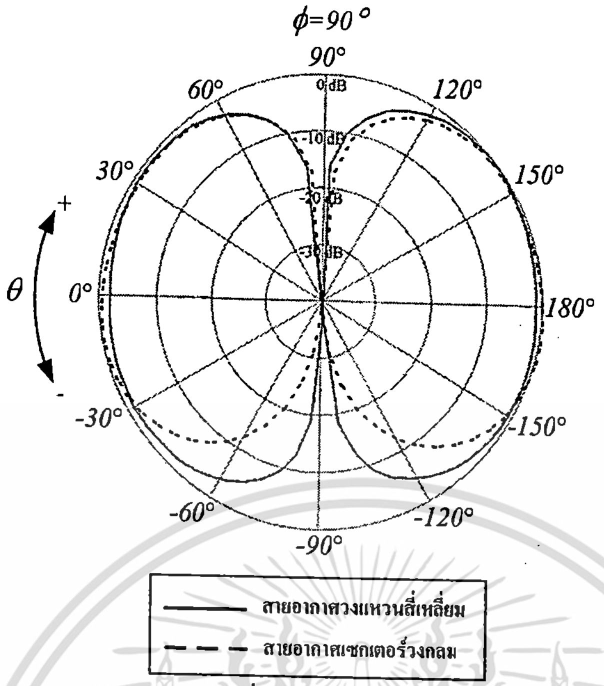


(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.1 GHz

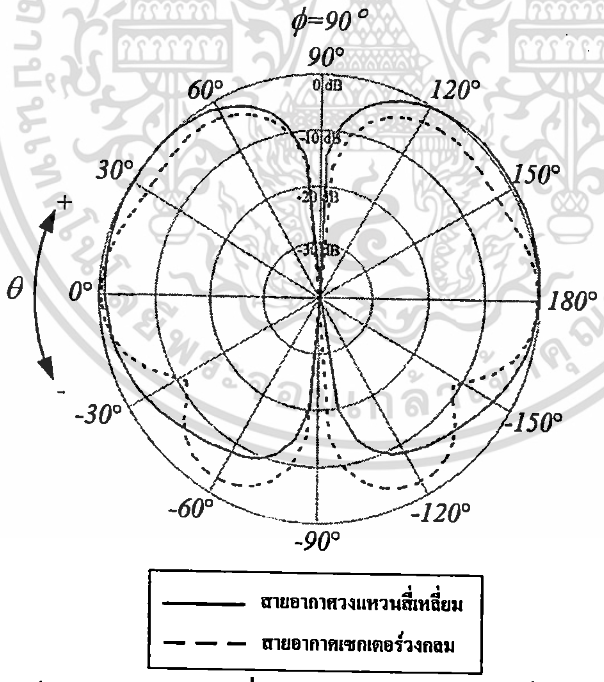


(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.0 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

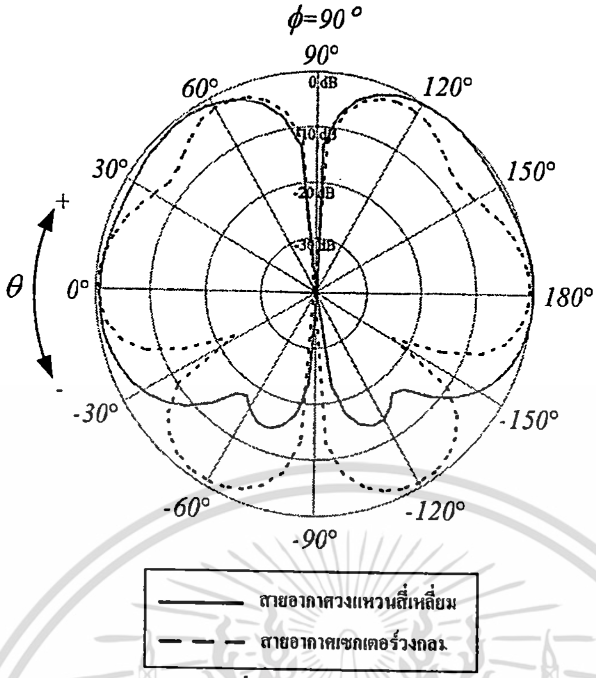


(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 7.0 GHz



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 9.0 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 10.6 GHz

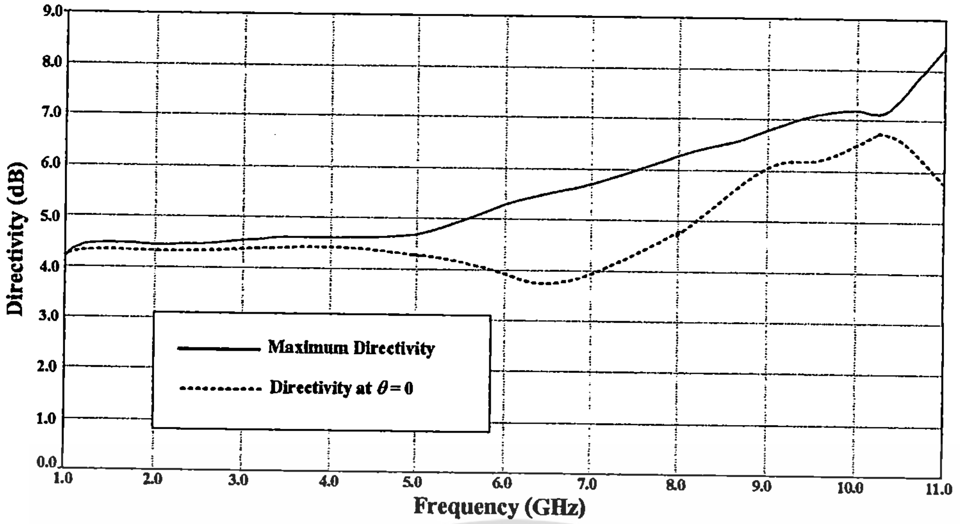
รูปที่ 4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมและวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบแบบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.34 (ก) ถึง (จ) แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบแบบสามก้านและวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลแผ่นระนาบแบบสี่เหลี่ยมพบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นค่าความแรงลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงยกขึ้นจากมุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ที่ความถี่ 7.0 GHz, 9.0 GHz และ 10.6 GHz ดังที่แสดงในรูปที่ 4.34 (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ ส่วนสายอากาศวงแหวนเซกเตอร์วงกลมยังคงมีความแรงลำคลื่นสูงสุดอยู่ที่มุม $\theta = 0°$ ตลอดทุกช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

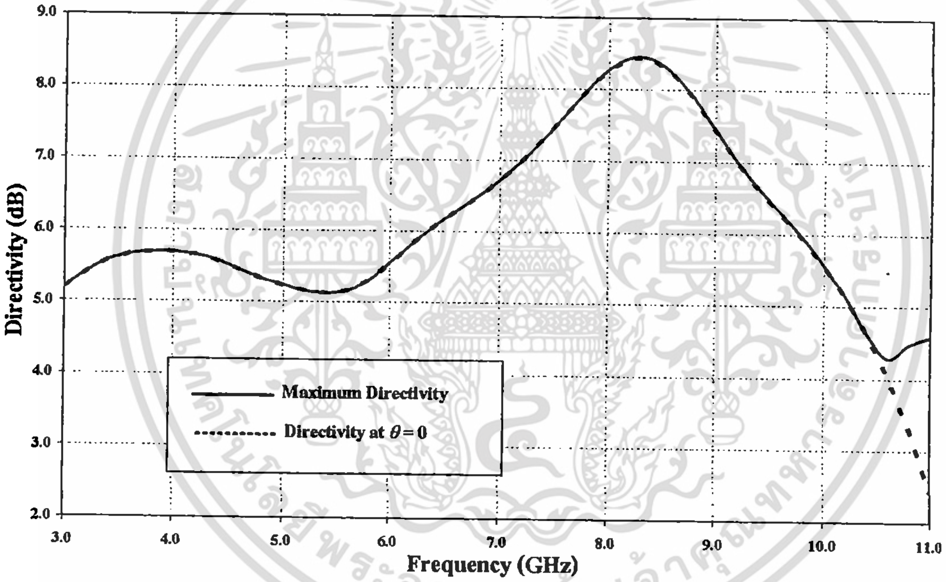
4.6.2 การเปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะแสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมและสายอากาศวงแหวนเซกเตอร์วงกลมเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกันโดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมได้แสดงในรูปที่ 4.35 และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนเซกเตอร์วงกลมได้แสดงในรูปที่ 4.36 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.36 สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนเซกเตอร์วงกลม

จากรูปที่ 4.35และ 4.36 ซึ่งแสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศทั้งสองแบบพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมมีค่าที่แตกต่างกันโดยเฉพาะที่ระหว่างความถี่ 5.0 GHz ถึง 10.6 GHz จะมีค่าความแตกต่างของสภาพเจาะจงทิศทางอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณากับค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ ของสายอากาศวงแหวนเซกเตอร์วงกลมพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและที่มุม $\theta = 0°$ มีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 สรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายถึงขั้นตอนในการจำลองและผลการจำลองของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศซึ่งพิจารณาจากค่า $|S_{11}|$ โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

- ทำให้โครงสร้างของสายอากาศมีขนาดเล็กที่สุด
- ทำให้ค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz
- ทำให้ค่าความแรงลำคลื่นของสายอากาศอยู่ในตำแหน่งทิศทางเดียวกันคือ $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมแล้วจากนั้นทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราการขยาย ของสายอากาศพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ YZ มีความไม่สมมาตรกันซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่สมมาตรในระนาบ YZ ในแต่ละความถี่จะมีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่เหมือนกัน ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ เมื่อเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดมีค่าที่เท่ากันตลอดย่านความถี่ตอบสนอง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และอัตราการขยายมีการเปลี่ยนแปลงตลอดย่านความถี่ตอบสนอง จากนั้นจะทำการพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ของโพรบเสมือนจริงที่มุมต่างๆ โดยพิจารณาผลจากการแปลงฟูริเยร์ และ ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์เทียบกับย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการ พบว่า สัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุม 0° มีค่าการผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆที่ทำการพิจารณา และทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สภาพเจาะจงทิศทางกับสายอากาศสองทิศทางที่เคยมีมาก่อนเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและสภาพเจาะจงทิศทางมีความแรงที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างวงแหวนเซกเตอร์วงกลมสามารถปรับปรุงปัญหาเรื่องการควบคุมความแรงลำคลื่นได้ ดังนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

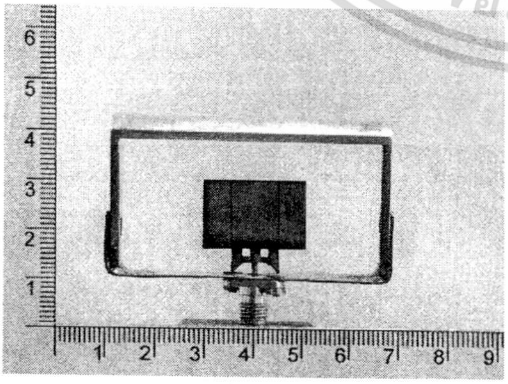
ผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

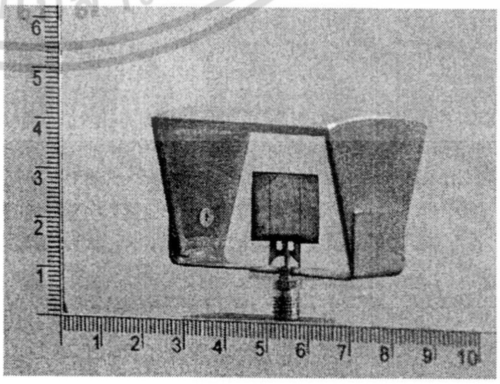
ในบทนี้จะเป็นการแสดงผลการทดสอบสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมซึ่งนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองผลในบทที่ 4 มาสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบและนำผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบมีผลของ $|S_{11}|$ อัตราการขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

5.2 สายอากาศต้นแบบ

สายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมต้นแบบสำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้ใช้งานที่ความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นความถี่ในย่าน UWB ที่ทาง FCC เป็นผู้กำหนด วัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบชิ้นส่วนของเซกเตอร์วงกลมจะใช้ทองเหลืองเป็นวัสดุ เนื่องจาก ไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรงทนทานและสำหรับชิ้นส่วนแผ่นโมโนโพลจะใช้แผ่นทองแดงเป็นวัสดุ เนื่องจากมีการนำไฟฟ้าที่ดี มีอ่อนตัวตัดแต่งรูปร่างง่ายกว่าทองเหลือง ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งได้มาจากผลการจำลองในบทที่ 4



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 5.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ	ขนาดทางไฟฟ้า
w	19 mm	0.196λ
l	14 mm	0.145λ
t	3.1 mm	0.032λ
h	3 mm	0.031λ
d	2.8 mm	0.029λ
v	1.8 mm	0.019λ
g	0.4 mm	0.004λ
$a \times b$	54×28.6 mm^2	$0.558\lambda \times 0.295\lambda$
R_{11}	23 mm	0.238λ
R_{12}	51.6 mm	0.533λ
β	30 deg	30 deg

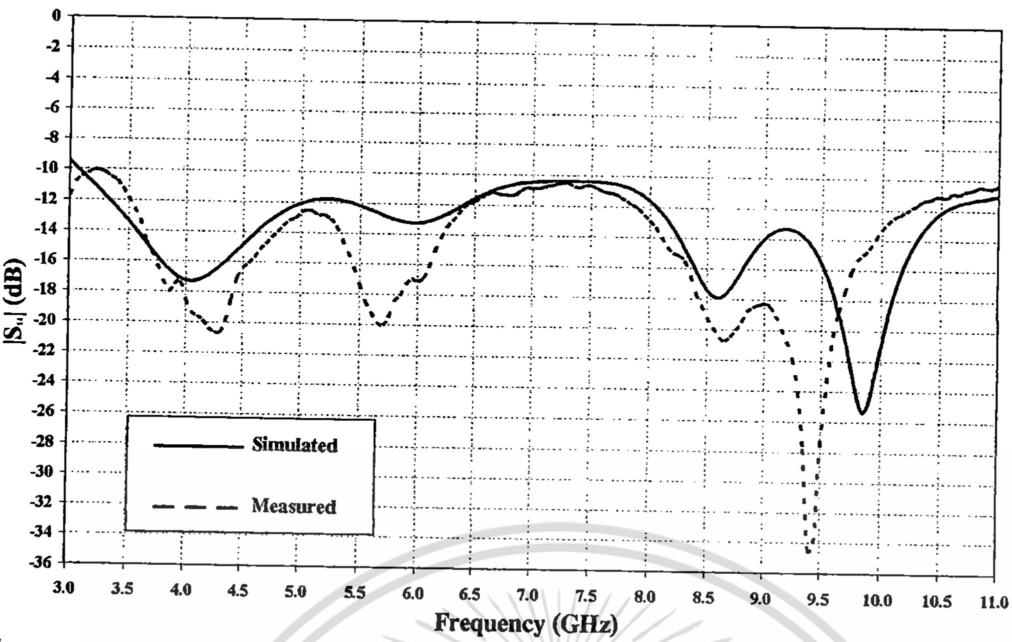
5.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองของสายอากาศ

เมื่อได้ทำการสร้างสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมต้นแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นเป็นการนำสายอากาศต้นแบบที่ได้มาทำการทดสอบแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยจะทำการเปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ อัตราการขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ

5.3.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ($|S_{11}|$)

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมระหว่างผลการทดสอบกับผลการจำลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.2 โดยผลของ $|S_{11}|$ ทั้งสองจะทำการเทียบกับย่านความถี่ตอบสนองตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



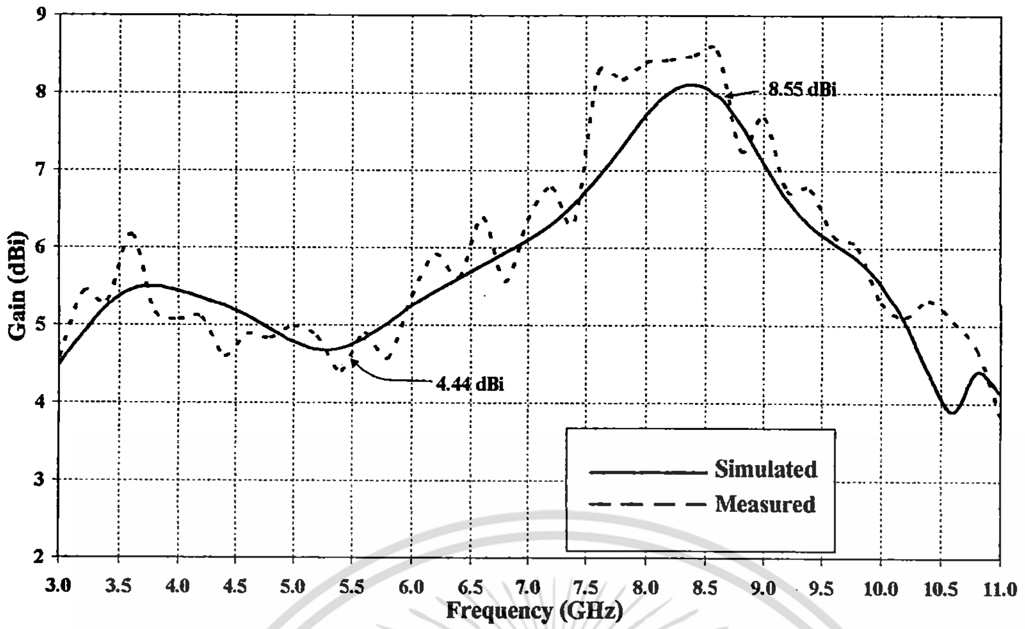
รูปที่ 5.2 $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 5.2 พบว่าผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากผลการทดสอบกับผลการจำลองมีแนวโน้มเดียวกันแต่ก็มีความผิดเพี้ยน สาเหตุเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบอาจจะมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซกเตอร์วงกลมและโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้านในการจำลองผลมีค่าค่อนข้างละเอียดและเล็กมากเช่นค่ามุมของของเซกเตอร์วงกลม ขนาดของโมโนโพล ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การสร้างสายอากาศต้นแบบมีค่าพารามิเตอร์คลาดเคลื่อนไปจากที่ได้ทำการจำลองผลไว้ และพบว่าผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่า –10 dB ตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการ

5.3.2 อัตราการขยายของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบอัตราการขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการระหว่างผลการทดสอบกับผลการจำลอง ซึ่งในการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราการขยายจะใช้สายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมทั้งทางด้านส่งและด้านรับโดยมีระยะห่างในการรับ-ส่งเท่ากับ 150 เซนติเมตรผลการเปรียบเทียบอัตราการขยายระหว่างผลการทดสอบกับการจำลองผลแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



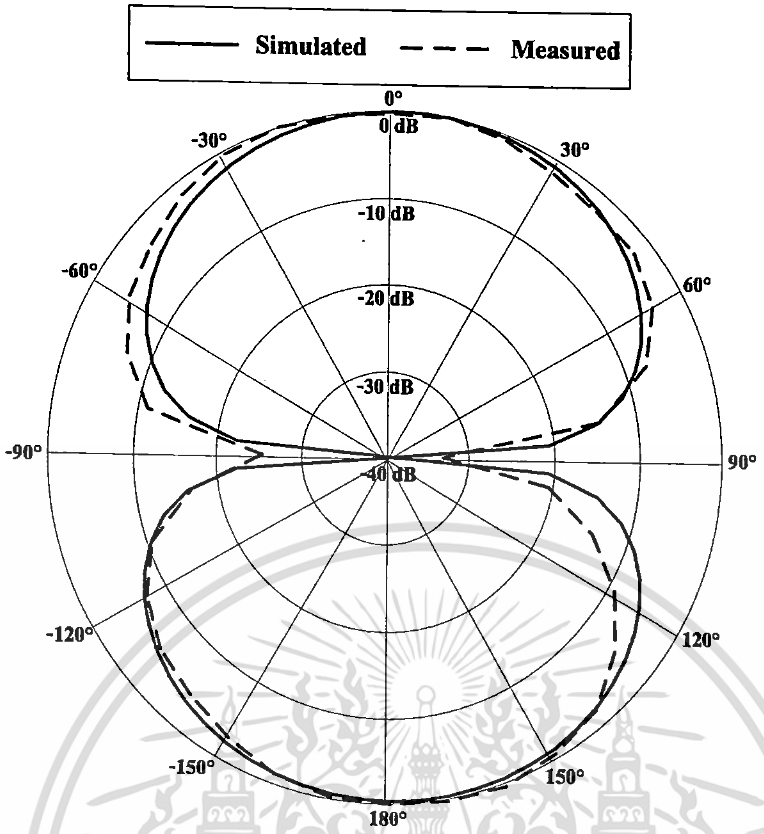
รูปที่ 5.3 อัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 5.3 พบว่าผลของอัตราการขยายที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จาการจำลองมีแนวโน้มเดียวที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีแต่ก็มีความคลาดเคลื่อน กล่าวคือในแต่ละความถี่ของอัตราการขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่เท่ากับผลที่ได้จากการจำลอง สาเหตุเนื่องมาจากในการทดสอบสายอากาศต้นแบบอาจมีผลของสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้องในขณะที่การจำลองผลของสายอากาศไม่มีผลของสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงทำให้ผลของอัตราการขยายที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไป

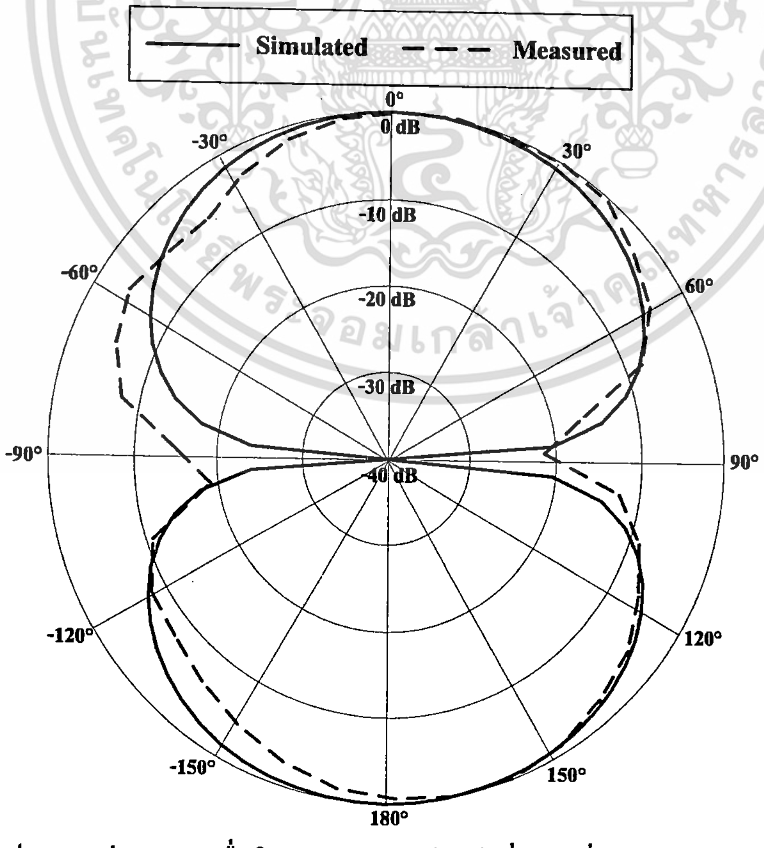
5.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมซึ่งนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz , 5 GHz , 7 GHz , 9 GHz และ 10.6 GHz ในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ YZ และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ XZ ที่ได้จากผลการทดสอบและผลการจำลองมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าในความถี่ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5.4 ถึง 5.8 ตามลำดับและระนาบสนามแม่เหล็กในความถี่ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5.9 ถึง5.13 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

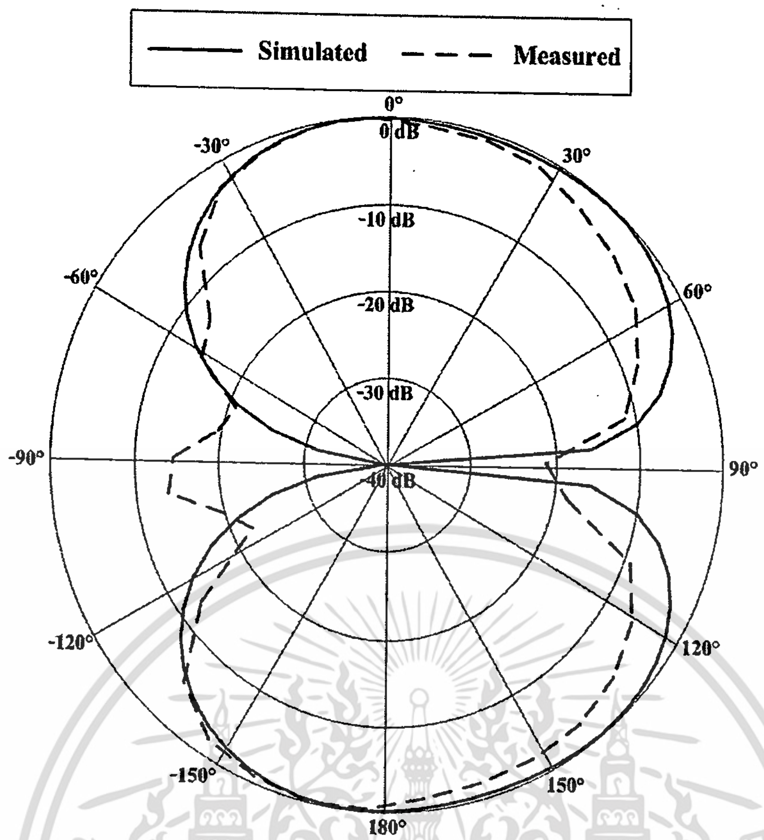


รูปที่ 5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.1 GHz ของสายอากาศ

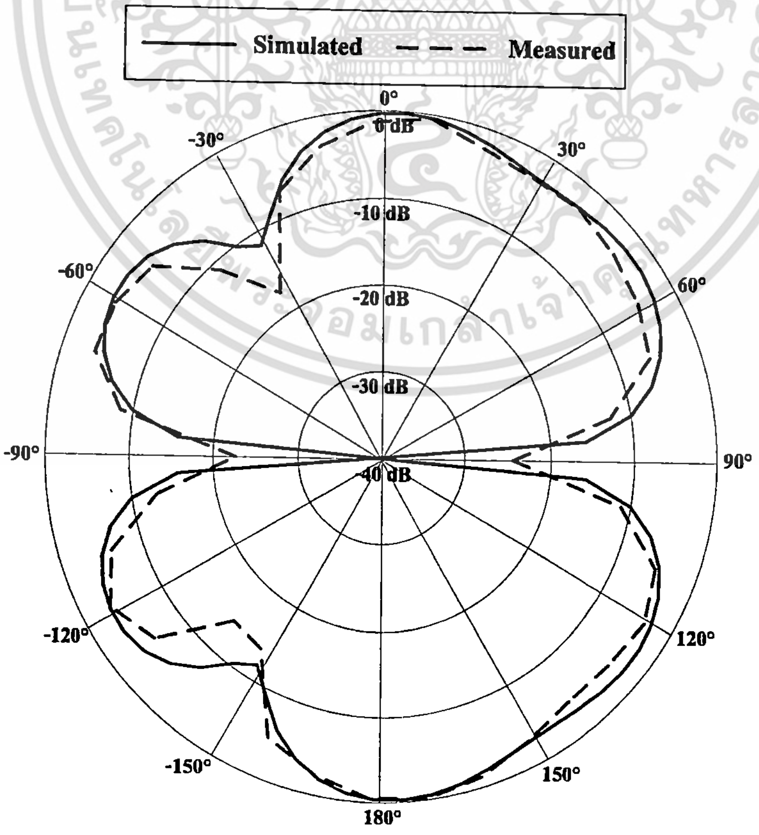


รูปที่ 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5 GHz ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

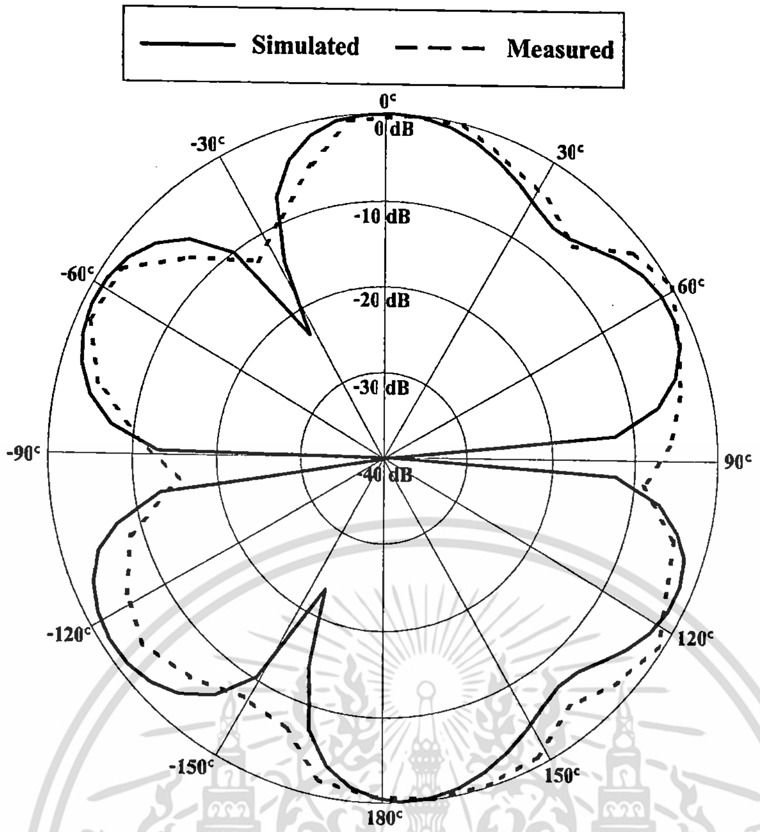


รูปที่ 5.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศ

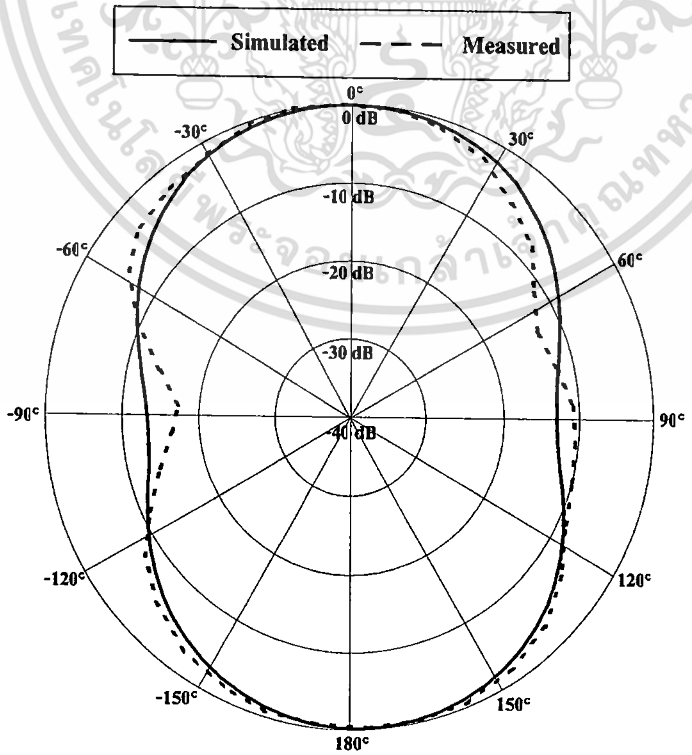


รูปที่ 5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 9 GHz ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

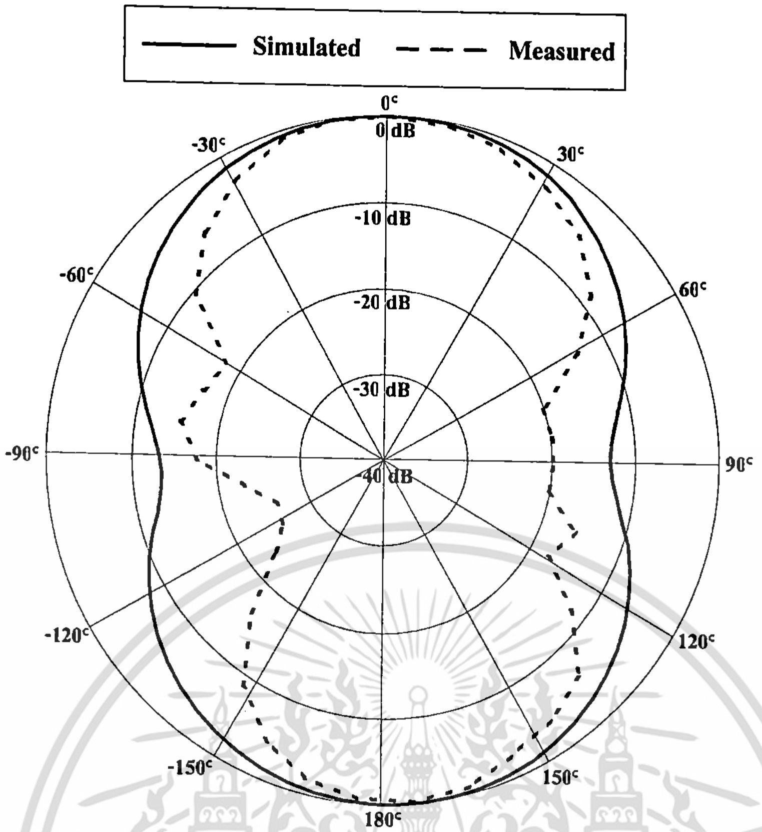


รูปที่ 5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 10.6 GHz ของสายอากาศ

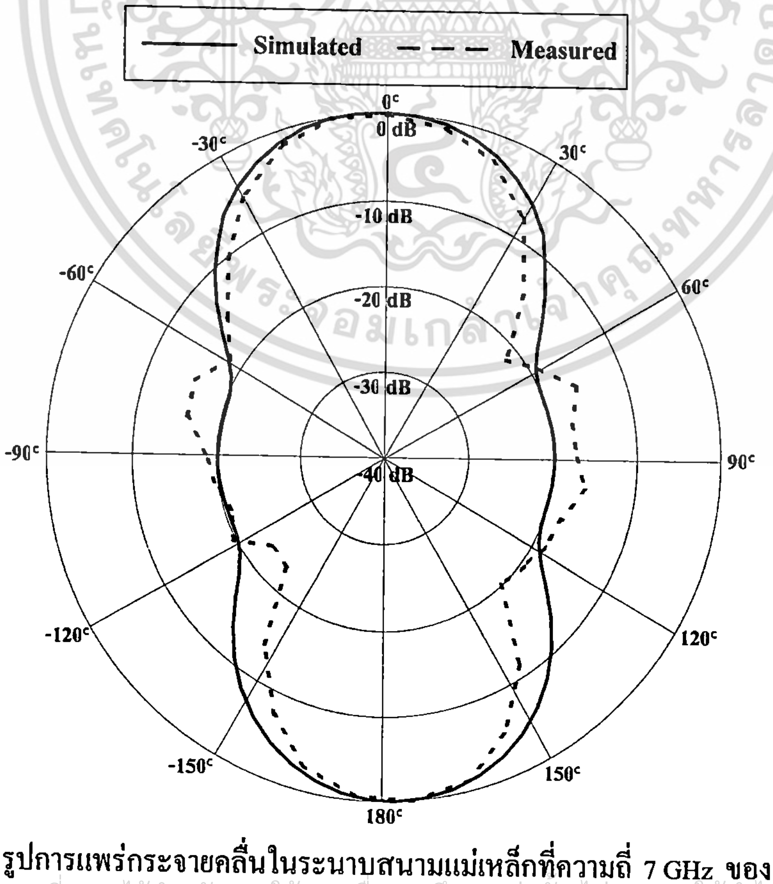


รูปที่ 5.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

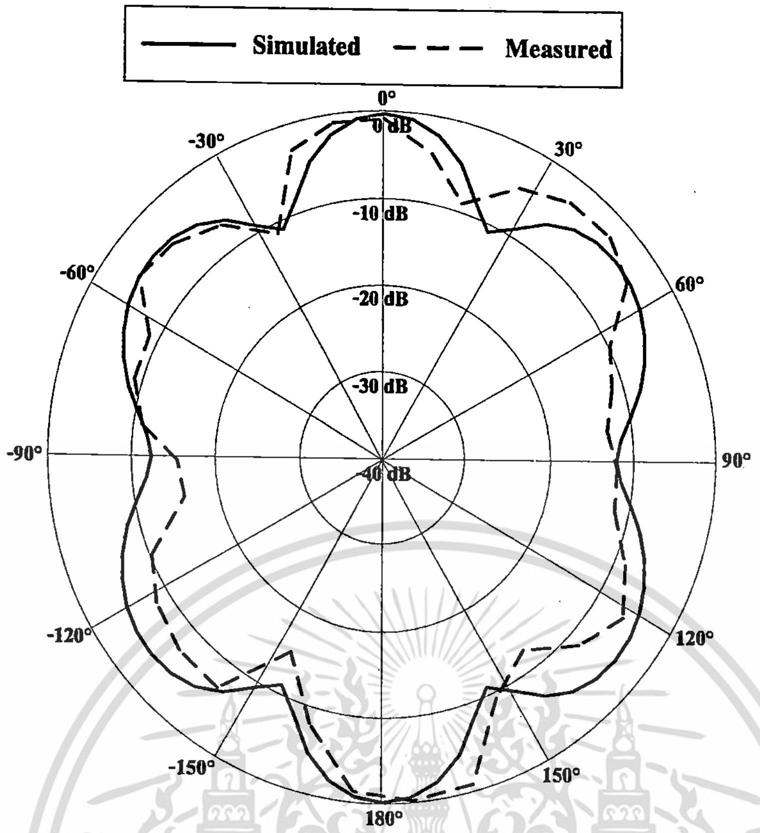


รูปที่ 5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5 GHz ของสายอากาศ

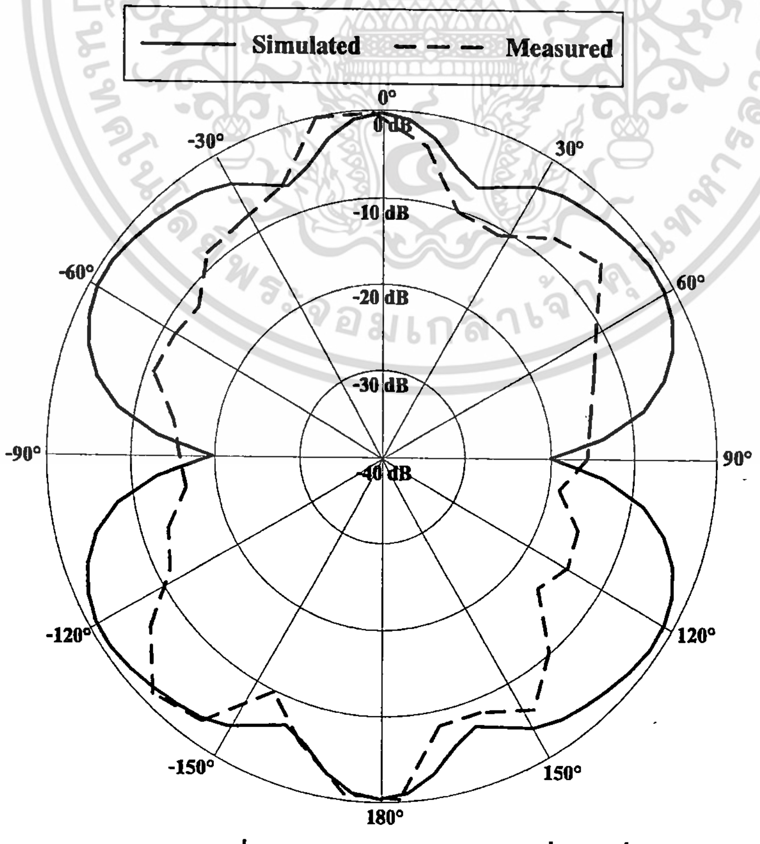


รูปที่ 5.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9 GHz ของสายอากาศ



รูปที่ 5.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.4 ถึง 5.8 เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (YZ) ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบกับการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีค่าสูงในทิศทางบริเวณด้านหน้าของสายอากาศทั้งสองด้าน จากผลการทดสอบพบว่ามีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นที่ความถี่ 5 GHz และ 7 GHz ซึ่งค่าสูงสุดได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งมุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ เล็กน้อยแต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

จากรูปที่ 5.9 ถึง 5.13 เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (XZ) ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบกับการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีค่าสูงในทิศทางบริเวณด้านหน้าของสายอากาศทั้งสองด้าน จากผลการทดสอบพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีค่าสูงสุดอยู่บริเวณตำแหน่งมุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ทุกช่วงความถี่ซึ่งตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สรุป

สำหรับบทนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการจำลอง ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่า $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันแต่ก็มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลอง ผลการเปรียบเทียบของอัตราการขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการของสายอากาศก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันและก็มีความผิดเพี้ยนเช่นเดียวกันและสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ที่ความถี่ 5 GHz และ 7 GHz ในระนาบสนามไฟฟ้า ผลที่ได้จากการทดสอบมีความผิดเพี้ยนไปเล็กน้อย โดยความค่าความแรงลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5 GHz และ 7 GHz มีความคลาดเคลื่อนไปจากมุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ เล็กน้อย แต่ก็ยังมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สอดคล้องกันกับการจำลอง ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผลการทดสอบและผลของการจำลองนั้นอาจมีผลกระทบจากขนาดของสายอากาศต้นแบบที่มีความคลาดเคลื่อนไปจากขนาดของการจำลองเนื่องจากการสร้างชิ้นส่วนมีขนาดเล็กและต้องการความละเอียดสูงจึงทำให้เกิดความผิดเพี้ยนรวมถึงมีสภาพแวดล้อมต่างในการทดสอบเข้ามาเกี่ยวข้องในขณะที่การจำลองของสายอากาศไม่มีผลกระทบของสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะต่างๆ และแนวทางในการพัฒนาต่อสำหรับวิทยานิพนธ์

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมโดยกำหนดให้อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz หรือมีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 7.5 GHz โครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะเป็นท่อวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่มีการเปิดปลายทั้งสองด้านเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมแล้วป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน ในการพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมนั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการการอธิบายถึงหลักการในการออกแบบท่อวงแหวนเซกเตอร์วงกลม โดยอาศัยพื้นฐานของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะของการแพร่กระจายคลื่น โดยพารามิเตอร์ที่น่าสนใจก็คือโหมดต่างๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและความถี่ตัดและองค์ประกอบอื่นๆ และส่วนที่สองอธิบายถึงวิวัฒนาการของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านโดยการออกแบบจะเริ่มต้นจากสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยพิจารณาจากค่า $|S_{11}|$ ที่ได้มาจากการทดสอบ ในการปรับปรุงสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีช่วงความถี่กว้างขึ้นสามารถทำได้โดยการตัดต่อบางส่วนของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและการนำสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ในการการตัดต่อบางส่วนของสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นสามารถทำได้โดยการตัดตรงขอบของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสใกล้กับระนาบกราวนด์ ซึ่งส่งผลทำให้โมโนโพลมีลักษณะเป็นห้าเหลี่ยมทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร หรือไม่ก็การใช้แท่นลัดวงจร (Shorting post) ซึ่งจะช่วยให้ความถี่ของขอบที่ต่ำกว่ามีค่าลดลงโดยการมีโหมดพิเศษขึ้นมาและทำให้สายอากาศเล็กลงในส่วนของความสูง แผ่นลัดวงจรจะถูกวางอยู่ตรงมุมหนึ่งของโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมและในการสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาใช้ร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอเพียงสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้าน สองก้าน และก้านเดียวเท่านั้น พบว่าสายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างแบบสามก้านให้แบนด์วิดท์ของอิมพีแดนซ์หรือช่วงความถี่ที่กว้างมาก ดังนั้นจึงใช้สายอากาศโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมร่วมกับแผ่นกระตุ้นที่มีรูปร่างแบบสามก้านในการจำลองผลสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สำหรับในการจำลองสายอากาศจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในการจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศ เริ่มจากการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ป้อนสัญญาณด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้านมาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการพิจารณา จากนั้นทำการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศ ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศจะพิจารณาจากผลของค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศให้มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการคือ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของสายอากาศแล้ว จากนั้นทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราการขยายพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีความไม่สมมาตรกันซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่สมมาตรในระนาบสนามไฟฟ้า ในแต่ละความถี่จะมีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่เหมือนกัน ค่าความแรงลำคลื่นสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่นในความถี่ที่ได้ทำการพิจารณาคือ 3.1 GHz , 5 GHz, 7 GHz , 9 GHz และ 10.6 GHz จะชี้ไปในทิศทาง $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ อัตราการขยายของสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดย่านความถี่ตอบสนอง โดยมีอัตราการขยายต่ำสุดเท่ากับ 3.89 dBi ที่ความถี่ 10.6 GHz และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.117 dBi ที่ความที่ 8.4 GHz จากนั้นทำการจำลองการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ โดยสายอากาศทางด้านส่งเป็นสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และสายอากาศทางด้านรับเป็นโพรบเสมือนจริง พิจารณาผลการจำลองของการส่งและรับสัญญาณอิมพัลส์ในโดเมนเชิงเวลา โดเมนเชิงความถี่ และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณด้านส่งและสัญญาณที่รับได้ที่มุมต่างๆ พบว่าสัญญาณอิมพัลส์ที่รับได้ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีค่าการผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ มีค่าเท่ากับ 0.9808 และค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่มีค่าอยู่ในระดับดีคือมีค่ามากกว่า 0.9 ในระนาบยกขึ้นอยู่ระหว่างมุม $\theta = 78°$ ถึง $\theta = -18°$ และ $\theta = 102°$ ถึง $\theta = -162°$ ซึ่งมีความกว้างประมาณ 96° และในระนาบวางราบอยู่ระหว่างมุม $\theta = 20°$ ถึง $\theta = -20°$ และ $\theta = 160°$ ถึง $\theta = -160°$ ซึ่งมีความกว้างประมาณ 40° จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมกับสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้านซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าสายอากาศแบบวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่นำเสนอสามารถที่จะควบคุมลำคลื่นให้มีความแรงอยู่ที่ทิศทางด้านหน้าของสายอากาศได้ดีขึ้นและเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองโดยจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบและนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบ $|S_{11}|$ อัตราการขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่า $|S_{11}|$ มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันแต่ก็มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการสร้างสายอากาศต้นแบบที่อาจจะมีความคลาดเคลื่อนในเรื่องของขนาดตามที่ได้จำลองผลไว้ รวมถึงวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศต้นแบบที่มีผลต่อการทดสอบ อัตราการขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันและก็มีความผิดเพี้ยนด้วยเช่นกันอาจจะเกิดจากในการทดสอบสายอากาศต้นแบบนอกจากขนาดของสายอากาศที่มีความผิดเพี้ยนไปจากการจำลองแล้วสภาพแวดล้อมของสถานที่ทดสอบมีอิทธิพลเข้ามาเกี่ยวข้องในขณะที่การจำลองผลของสายอากาศไม่มีผลของสภาพแวดล้อมใดๆเข้ามาเกี่ยวข้อง และสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันแต่ก็มีความผิดเพี้ยนไปบ้างอันเกิดจากปัญหาเรื่องขนาดของสายอากาศและสภาพแวดล้อมของสถานที่ทดสอบเช่นเดียวกัน

จากผลของการจำลองและทดสอบสายอากาศต้นแบบสรุปได้ว่าสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมสามารถใช้งานในระบบ UWB ช่วงความที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ได้และโครงสร้างของวงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่นำเสนอสามารถจะปรับปรุงแก้ไขปัญหาการยกขึ้นของลำคลื่นที่ความถี่สูงของระบบ UWB ได้เช่นเดียวกัน

6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นของสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลองพบว่าในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศให้เหมาะสมโดยพิจารณาจากขนาดของสายอากาศให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้มี $|S_{11}|$ ให้ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ที่ต้องการและควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีความแรงอยู่ที่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการมีความยุ่งยากพอประมาณ เนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของพารามิเตอร์ใดๆจะส่งผลกระทบทั้งค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เพื่อจำลองผลทุกครั้งจะต้องตรวจสอบผลให้ค่า $|S_{11}|$ และควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการเสมอ สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดสอบพบว่าในการสร้างสายอากาศต้นแบบให้ได้ขนาดตามที่จำลองผลไว้เป็นสิ่งที่ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากในส่วนของโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบแบบสามก้านมีขนาดเล็กและบาง ซึ่งพารามิเตอร์บางจุดมีขนาดเล็กมากๆเช่นช่องสี่เหลี่ยมบริเวณส่วนประกอบสามก้าน และในส่วนของวงแหวนเซกเตอร์วงกลมจะมีปัญหาในเรื่องของความโค้งบริเวณชิ้นส่วนด้านบนด้านล่างของเซกเตอร์และค่ามุมตัดเซกเตอร์ซึ่งไม่สามารถทำให้มีค่าตรงกับที่จำลองผลอย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลการจำลองผลที่ได้พบว่าสายอากาศสามารถตอบสนองได้ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีอัตราการขยายที่สูงที่สุดอยู่มุม $\theta = 0°$ และ $\theta = 180°$ ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการซึ่งตรงกับเป้าหมายที่วางไว้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาการจำลองส่งสัญญาณอิมพัลส์จากสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการจำลองผลไปยังสายอากาศทางด้านรับซึ่งจะกำหนดให้เป็น โพรบเสมือนจริง ดังนั้นในการพัฒนานั้นควรที่จะทำการพิจารณาการส่งสัญญาณอิมพัลส์แบบทั้งระบบ กล่าวคือทำการพิจารณาการส่งสัญญาณอิมพัลส์โดยที่สายอากาศทั้งทางด้านส่งและด้านรับเป็นสายอากาศสองทิศทางแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้วงแหวนเซกเตอร์วงกลมที่ป้อนด้วยโมโนโพลชนิดแผ่นระนาบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] 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

[3] R. Buttachin, "Rectangular aperture antenna fed by planar-plate monopole for ultra-wideband applications," KMITL-2007-EN-M-010-106, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, 2007

[4] P. Chumtong, "Bandwideh enhancement of a rectangular ring antenna by using planar monopole excitatian," ISBN 974-15-2803-5, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, 2006

[5] K. Chawanonphithak, C. Phongcharoenpanich, S. Kosulvit and M. Krairiksh, "An ultra wideband bidirectional antenna with modified circular disc monopole excited elliptical ring," Radio and Wireless Symposium, 2007 *IEEE Volume, Issue*, 9-11 page(s):261 – 264, Jan. 2007.

[6] S. Eardprab and C. Phongchareonpanich, "Parametric study of a rectangular aperture antenna excited by probe inside cavity," *Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation*, Seoul, Korea, pp. 1129-1132, Aug. 2005.

[7] K. L. Wong, C. H. Wu and S. W. (Stephen) Su, "Ultrawide-band square planar metal-plate monopole antenna with a trident-shaped feeding strip," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 4, pp. 1262 - 1269, April 2005.

[8] H. Schantz, *The art and science of ultrawideband antennas*, Artech House INC, 2005.

[9] R. Qiu, Propagation effects, in M. G. Di Benedetto et al., (ed.), *UWB Communications Systems: A Comprehensive Overview*, EURASIP publishing, 2005.

[10] H. F. Harmuth, *Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communication*, Academic Press, 1981.

[11] R. A. Scholtz, "Multiple access with time-hopping impulse modulation," *Proc. IEEE MILCOM*, 447-50, 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio: how it works," *IEEE Comm. Lett.*, 2, 36-8, 1998.

[13] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications," *IEEE Trans. Comm.*, 48, 679-91, 2000.

[14] V. Lottici, A. D. Andrea and U. Mengali, "Channel estimation for ultra-wideband communications," *IEEE J. Selected Areas Comm.*, 20, 1638-45, 2002.

[15] Y. G. Li, A. F. Molisch and J. Zhang, "Practical approaches to channel estimation and interference suppression for OFDM-based UWB communications," *Proc. IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies*, 21-4, 2004.

[16] C. J. Le Martret and G. B. Giannakis, "All-digital impulse radio with multiuser detection for wireless cellular systems," *IEEE Trans. Comm.*, 50, 1440-50, 2002.

[17] A. Batra, J. Balakrishnan, G. R. Aiello, J. R. Foerster and A. Dabak, "Design of a multiband OFDM system for realistic UWB channel environments," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, 52, 2123-38, 2004.

[18] R. J. Fontana, "Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, 52, 2087-104, 2004.

[19] W. P. Siriwongpairat, M. Olfat and K. J. R. Liu, "Performance analysis of time hopping and direct sequence UWB space-time systems," *IEEE Globecom 2004*, 3526-30, 2004.

[20] N. Kumar and R. M. Buehrer, "Application of layered space-time processing to ultra-wideband communication," *Proc. 45th Midwest Symp. Circuits Systems*, 597-600, 2002.

[21] M. Ghavami, L. B. Michael and R. Kohno, *Ultra wideband signals and systems in communication engineering*, John Wiley & Sons, 2004.

[22] F. Ramirez-Mireles and R. A. Scholtz. "Wireless multiple-access using SS time-hopping and block waveform pulse position modulation, part 2: Multiple-access performance." In *Proceedings ISITA Symposium*, October 1998.

[23] D. G. Leeper. Wireless data blaster. *Scientific American*, May 2002.

[24] H. Kikuchi. UWB arrives in Japan. *Nikkei Electronics*, pages 95-122, February 2003.

[25] Z.N. Chen, X.H. Wu, N. Yang and M.Y.*W.* Chia, "Consideration for source pulse and antennas in UWB radio systems," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 52(7), 1739-48, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[26] R.Q. Lee and R.N. Simons, Tapered slot antennas, Chapter 9 of *Advances in Microstrip and printed Antennas*, Edited by K.F. Lee and W. Chen, New York., 1997

[27] D. Lamensdorf and L. Susman, "Baseband-pulse-antenna techniques," *IEEE Antennas Propagat*. Magazine. 36(1), 20-30, 1994

[28] T. Wang, Z.N. Chen and K.S. Chen, "Effect of selecting antenna and template on BER performance in pulsed UWB wireless communication systems," *IEEE Intl.* Workshop on Antenna Technology, Singapore, 446-9, 7-9 ,March, 2005

[29] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, 1989.

[30] H. Takiyama, "Design of E-plane waveguide corners and their characteristics, "*JIECE. Japan*, vol. 37, pp. 411-415, 1954.

[31] H. Takiyama, "Broadband E-plane waveguide corners, "*JIECE. Japan*, vol. 37, pp. 783-787, 1954.

[32] N.P. Kerzhentseva, "Waveguide bend of variable cuvature, " *Radio tekhnika & Electronic* technology, No.5, pp. 733-7.93, 1960.

[33] D. Wray, R.A. Hastie, "Waveguide bend, " *Electronic* technology, pp. 76-83, Feb., 1960.

[34] F.C. de Ronde, "Full band matching of waveguide discontinuities, *Paper presented to G-MMT., International microwave symposium. Palo Alto,* California, 1966.

[35] Naffall Herscovici and Christos Christodouloc, "Wideband monopole antennas for multi-band wireless systems," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 45, No. 2, April 2003.

[36] 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.

[37] 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.

[38] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ธนวิทย์ ทิพย์เสวต
วัน เดือน ปีเกิด	1 ธันวาคม 2522 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2546
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด(มหาชน) ตำแหน่งวิศวกร ตั้งแต่วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ.2546

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. T. Tipsawate, C.Phongcharoenpanich and S.Kosulvit, "A Tilted Bidirectional Antenna Using Truncated Circular Sector Fed by Surface Monopole," *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Machanics* , Bangkok, pp.318-321, July 2008.
2. T. Tipsawate, C.Phongcharoenpanich and S.Kosulvit, "A Wideband Bidirectional Antenna Using Truncated Circular Sector Fed by Rectangular Monopole," *Proceedings of the 2009 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology International Conference,* Pattaya, vol.2, pp.I-782 to I-785, May 2009.
3. T. Tipsawate, C.Phongcharoenpanich and S.Kosulvit, "A Truncated Circular Sector Fed by Trident Monopole Antenna Radiating Stable Bidirectional Pattern," *APSAEM08 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics,* vol.17, S117, Supplement 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้