

สายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวร่วมกับตัวสะท้อนคลื่นสำหรับ  
วงจรกำเนิดพัลส์ของการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์

SURFACE MONOPOLE ANTENNA WITH REFLECTOR FOR  
PULSE GENERATOR CIRCUIT OF SENSOR APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-M-010-066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SURFACE MONOPOLE ANTENNA WITH REFLECTOR FOR  
PULSE GENERATOR CIRCUIT OF SENSOR APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2021

KMITL-2021-EN-M-010-066  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวร่วมกับตัวสะท้อนคลื่น สำหรับวงจรกำเนิดพัลส์ของการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์
นักศึกษา	นางสาวพลอยไพลิน พรหมพันธ์ภรณ์
รหัสนักศึกษา	61601201
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวบนตัวสะท้อนคลื่นสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ของการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ โดยใช้งานตั้งแต่ช่วงความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวด ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เพื่อง่ายสำหรับนำไปติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์หรือประยุกต์ใช้งานอื่นๆ ซึ่งมีแบนด์วิดธ์มากกว่า 500 MHz ตามข้อกำหนดของ FCC โดยส่วนที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีโครงสร้างเป็นโมโนโพลเชิงพื้นผิวบนตัวสะท้อน มีแบนด์วิดธ์ 1.3 GHz ซึ่งสามารถครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 3 GHz และมีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 460 MHz ถึง 1.3 GHz โดยพิจารณาคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว มีอัตราขยายสูงสุด ที่ 3.37 dBi ป้อนสัญญาณด้วยคอนเนคเตอร์ SMA สายอากาศถูกสร้างจากวัสดุทองแดง สามารถทนกำลังงานได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Surface Monopole Antenna with Reflector for Pulse Generator Circuit of Sensor Applications
Student	Miss. Ploypailin Phomphankorn
Student ID.	61601201
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### ABSTRACT

This thesis presents the design of a surface monopole antenna with reflector for pulse generator circuit of sensor applications, that operates from low frequency to high frequency in an extremely wide frequency band, that yields more than 500 MHz bandwidth in accordance with the FCC regulations. The radiator of the antenna is a surface monopole on reflector achieving 1.3 GHz bandwidth that cover a frequency range from 200 MHz to 3 GHz but operating frequency ranges from 460 MHz to 1.3 GHz by considering the characteristics  $|S_{11}|$  (dB) less than or equal to -10 dB. The radiation pattern is unidirectional beam. The maximum gain is 3.37 dBi. The signal is input with SMA connector. The antenna is made of copper material to handle high power.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดีด้วยคำชี้แนะ คำปรึกษา การศึกษาและวิจัย จากอาจารย์ปรึกษา รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นผู้ช่วยเหลือประสานงาน และช่วยแก้ปัญหาในโจทย์การวิจัย คุณแลในด้านการศึกษาและงานวิจัยทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ ตลอดจนการประสิทธิ์ประสาทองค์ความรู้อันทรงคุณค่าจากประสบการณ์ต่าง ๆ ทั้งในห้องเรียน ห้องปฏิบัติการ และในชีวิตประจำวัน จนนำมาสู่การพัฒนาศักยภาพเพื่อให้ผลิตรายงานวิจัยที่มีคุณค่าและนำมาสู่ความสำเร็จในชีวิตการศึกษาของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สิทธิชัย เด่นตรี ดร.อานนท์ สกลคณาพงษ์ และดร.คณศ พุกกะพันธุ์ ซึ่งเป็นผู้ที่ให้องค์ความรู้ในทางเทคนิค รวมทั้งข้อคิดอย่างเป็นระเบียบแบบแผน และให้ความร่วมมือสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ผลอย่างดีเสมอมา และกำลังใจซึ่งเป็นแรงผลักดันอย่างแรงยิ่งให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการสายอากาศและแม่เหล็กไฟฟ้าประยุกต์ Antenna and Electromagnetic Applications Research Laboratory (AERIAL) ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนร่างกาย กำลังใจ เสนอความคิดต่าง ๆ และสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พลอยไพลิน พรหมพันธ์กรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 เทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งยวด.....	5
2.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	7
2.3.1 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ.....	7
2.3.2 อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศ.....	7
2.3.3 อัตราขยายของสายอากาศ.....	8
2.4 ปัญหาในการออกแบบสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวด.....	8
2.5 เรดาร์หยั่งลึก.....	8
2.5.1 หลักการพื้นฐานของเรดาร์หยั่งลึก.....	9
2.5.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves).....	9
2.5.2.1 คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic properties).....	9
2.5.2.2 ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.5.2.3 การสะท้อนและการหักเห.....	11
2.5.2.4 การหาค่าความเร็วคลื่นและความถี่ของตัวสะท้อนคลื่น.....	11
2.6 การหาค่าปริมาณน้ำในดิน.....	12
2.7 การศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน.....	13
2.8 สรุป.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองสายอากาศ.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ.....	19
3.2.1 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศโมนโพล รูปวงกลม.....	19
3.2.2 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศโมนโพล รูปสามเหลี่ยม.....	21
3.2.3 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของการรวมกันของจุดตัด (Intersection).....	23
3.2.4 การปรับตำแหน่งของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิว.....	24
3.2.5 การปรับขนาดความกว้างของระนาบกราวนด์และตัวสะท้อนคลื่น.....	25
3.2.6 การปรับความสูงของตัวสะท้อนคลื่น.....	26
3.3 สายอากาศทึบนำเสนอ.....	27
3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	31
3.5 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศ.....	33
3.6 สรุป.....	34
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณพลัส	37
4.1 บทนำ.....	37
4.2 รูปร่างของสัญญาณพลัส (Pulse shape).....	37
4.3 สัญญาณพลัสต่อเนื่อง (Repetitive pulse).....	36
4.4 วงจรกำเนิดพลัสสำหรับการประยุกต์ใช้งานแถบความถี่กว้าง.....	37
4.5 การจำลองการประยุกต์ใช้งานร่วมกับกำเนิดสัญญาณพลัส.....	39
4.5.1 การจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางเป็นดินร่วนแห้ง.....	40
4.5.2 การจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางเป็นดินร่วนเปียก.....	43
4.5.3 การจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง.....	47
4.6 สรุป.....	47
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	48
5.1 บทนำ.....	48
5.2 สายอากาศต้นแบบ.....	48
5.3 การทดสอบสายอากาศ.....	49
5.3.1 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	49
5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 อัตราขยายของสายอากาศ.....	52
5.4 วงจรกำเนิดสัญญาณพลัส.....	53
5.5 สรุป.....	56
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	57
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละตัวกลาง.....	10
2.2	สรุปคุณสมบัติของสายอากาศของผลงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	17
3.1	ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโรโพลรูปร่างกลม.....	21
3.2	ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโรโพลรูปสามเหลี่ยม.....	23
3.3	ขนาดและพารามิเตอร์ของการปรับตำแหน่งของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิว.....	25
3.4	ขนาดและพารามิเตอร์ของการปรับขนาดความกว้างของระนาบกราวด์และ ตัวสะท้อนคลื่น.....	26
3.5	ขนาดและพารามิเตอร์ของการปรับความสูงของตัวสะท้อนคลื่น.....	27
3.6	ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ.....	28
3.7	สรุปคุณลักษณะของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิว.....	33
4.1	ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น โดยผ่านตัวกลาง.....	40
5.1	สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและ ตัวสะท้อนคลื่น.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การตรวจจับวัตถุที่อยู่ใต้ดิน.....	1
1.2	การตรวจครรรภ์.....	2
1.3	ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวบนตัวสะท้อน.....	3
2.1	เปรียบเทียบกำลังงานการสื่อสารของช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดและช่วงความถี่ของการสื่อสารรูปแบบอื่น.....	6
2.2	คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.3	การสะท้อนและการหักเหของคลื่น.....	11
2.4	ค่าความเร็วคลื่นและความถี่ของตัวสะท้อนคลื่น.....	12
2.5	องค์ประกอบของมวลดิน.....	12
2.6	สายอากาศแบบลูกรักบี้และคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.7	สายอากาศแบบหุกระต่ายและคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.8	สายอากาศโมโนโพลรูปร่างกลมและรูปดาวสามเหลี่ยมและคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง.....	16
3.1	โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปร่างกลม.....	20
3.2	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปร่างกลม.....	20
3.3	ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศที่ความถี่ 433 MHz ของสายอากาศโมโนโพลรูปร่างกลม.....	21
3.4	โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม.....	22
3.5	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม.....	22
3.6	ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศที่ความถี่ 562 MHz ของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม.....	23
3.7	โครงสร้างและขนาดของสายอากาศจากการซ้อนทับกันของวงกลม 3 วง.....	24
3.8	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อปรับพารามิเตอร์ $\alpha$ .....	25
3.9	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อปรับพารามิเตอร์ $g_1$ .....	26
3.10	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) เมื่อปรับพารามิเตอร์ $h$ .....	27
3.11	โครงสร้างและขนาดของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวบนตัวสะท้อนคลื่น.....	28
3.12	ผลการจำลอง $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอ.....	29
3.13	ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศที่นำเสนอ.....	29
3.14	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ.....	31
3.15	อัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอ.....	33
4.1	รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป.....	35
4.2	ลักษณะของพัลส์ต่อเนื่อง.....	36
4.3	ลักษณะของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม.....	37
4.4	วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....	38
4.5	การจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม AWR Microwave Office.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	สัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....	38
4.7	การจำลองการสะท้อนของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นโดยผ่านตัวกลาง.....	39
4.8	สัญญาณขาออกจากการจำลองการสะท้อนที่ผ่านดินร่วนแห้ง.....	40
4.9	เปรียบเทียบ $ S_{11} $ (dB) และ $ S_{22} $ (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอที่ผ่านดินร่วนแห้ง.....	41
4.10	สัญญาณขาออกจากการจำลองการสะท้อนที่ผ่านดินร่วนเปียก.....	44
4.11	เปรียบเทียบ $ S_{11} $ (dB) และ $ S_{22} $ (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอที่ผ่านดินร่วนเปียก.....	44
4.12	สัญญาณขาออกจากการจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง.....	47
5.1	สายอากาศที่นำเสนอ.....	48
5.2	การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศ.....	49
5.3	เปรียบเทียบ $ S_{11} $ (dB) จากการจำลองและการทดสอบ.....	49
5.4	การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	50
5.5	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	50
5.6	เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยาย.....	52
5.7	วงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ต้นแบบ.....	54
5.8	เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบของสัญญาณสี่เหลี่ยม.....	54
5.9	ผลการทดสอบของสัญญาณพัลส์ต้นแบบ.....	55
5.10	สัญญาณพัลส์จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ต้นแบบในโดเมนความถี่.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

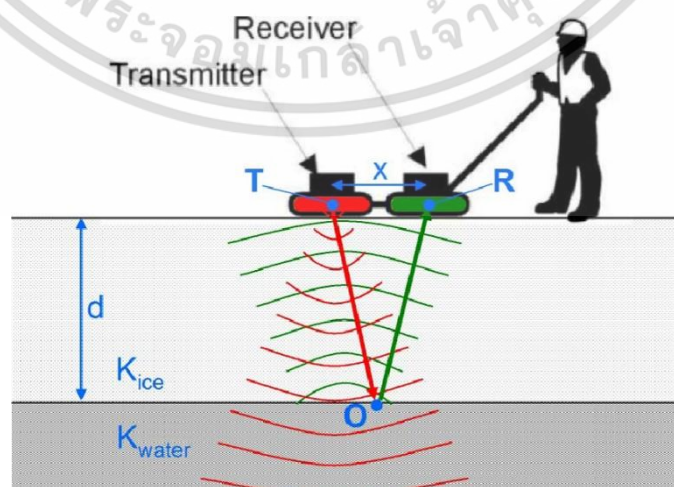
# บทที่ 1

## บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศที่โครงสร้างแบบโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นที่สามารถทำงานในช่วงความถี่ต่ำของย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยสายอากาศแบบโมนโพลเชิงพื้นผิวได้ถูกพัฒนาจากสายอากาศรูปวงกลมและรูปสามเหลี่ยม ด้วยวิธีการรวมกันของจุดตัดของสายอากาศรูปวงกลมที่มีแบนด์วิดท์แคบ และทำมุมในความสูงเอียงเท่ากับสายอากาศรูปสามเหลี่ยมที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศโมนโพลนั้นสามารถเพิ่มความกว้างของแถบความถี่ และมีลักษณะเป็นสายอากาศความถี่เดียวที่มีแบนด์วิดท์มากกว่า 500 MHz โดยส่วนที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีโครงสร้างเป็นโมนโพลเชิงพื้นผิวบนตัวสะท้อน มีแบนด์วิดท์ 1.3 GHz ซึ่งมีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 1.3 GHz จึงเหมาะกับการใช้ในงานเรดาร์ที่ยังลึก ซึ่งได้ทำการทดสอบการแยกดินร่วนแห้งและดินร่วนเปียกด้วยวิธีการสะท้อนกลับของคลื่นที่ผ่านชั้นของดินเพื่อบ่งบอกลักษณะของดินนั้น ๆ

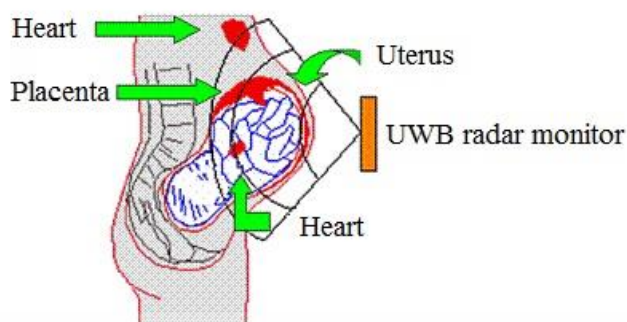
### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ย่านความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband: UWB) เป็นช่วงความถี่ที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างเป็นอย่างมาก ซึ่งการสื่อสารในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ต้นกำเนิดของ UWB นั้นมีมากกว่า 100 ปี โดยในช่วงปลายของคริสต์ศตวรรษที่ 18 ได้เริ่มการค้นหาวิธีที่ง่ายที่สุดที่จะกำเนิดสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นคือการสร้างสัญญาณที่เป็นพัลส์สั้น (Short pulse) [1] และได้เริ่มมีการศึกษาวิจัยจนไปถึงการพัฒนาให้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน โดยการประยุกต์ใช้งานดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้งานในหลายภาคส่วน เช่นทางการทหารใช้สำหรับตรวจหาวัตถุระเบิดที่อยู่ใต้ดิน [2] หรือทางการแพทย์ได้นำคลื่นความถี่ดังกล่าวมาใช้สำหรับการตรวจครรภ์ที่เรียกว่าอัลตราซาวนด์ [3] เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 การตรวจจับวัตถุที่อยู่ใต้ดิน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 การตรวจครรภ์ [3]

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมมากขึ้น ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งยวดถูกกำหนดความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดย Federal Communication Commission (FCC) [4] หรือมีช่วงความถี่ใช้งานที่ต่ำกว่า 960 MHz และมีแบนด์วิดท์มากกว่า 500 MHz นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเพื่อพัฒนาการปรับปรุงสายอากาศอย่างต่อเนื่อง [5] ให้สามารถใช้งานในช่วงความถี่ต่ำกว่า 960 MHz เช่น เรดาร์เครื่องบิน เรดาร์หยั่งลึกและอื่น ๆ [6-7] สำหรับเทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งยวดของสายอากาศขนาดเล็กได้รับการพัฒนามาตามลำดับ [8] สายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิว (Surface Monopole Antenna) ได้ถูกนำเสนอเพื่อให้สายอากาศมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและสามารถออกแบบให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการ โดยทำงานตั้งแต่ความถี่ 410 MHz ถึง 12 GHz [9]

ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนในแถบความถี่กว้างยิ่งยวดโดยมีอยู่หลายเทคนิคในการออกแบบด้วยกันยกตัวอย่างเช่น สายอากาศแถบความถี่กว้างแบบลูกกรักบี้ [10] สายอากาศแถบความถี่กว้างแบบหุกระต่าย [11] และสายอากาศแถบความถี่กว้างแบบรูปดาว [12] เทคนิคที่ได้กล่าวมานั้นถูกนำมาเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อทำให้สายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนในแถบความถี่กว้างยิ่งยวด และปรับปรุงแถบความถี่ให้กว้างขึ้นแต่ต้องแลกกับขนาดของสายอากาศที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นเช่นกัน

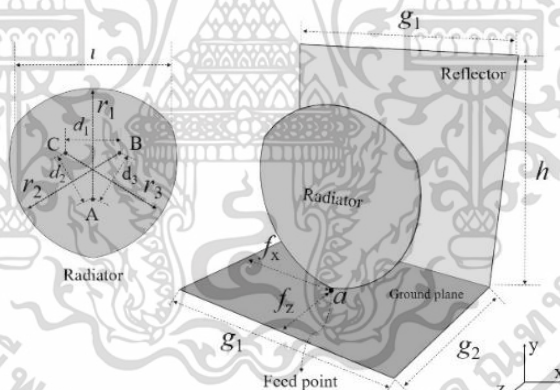
ต่อมามีการใช้วงจรถ่ายสัญญาณพัลส์ (Pulse) สำหรับประยุกต์ใช้งานแถบความถี่กว้างยิ่งยวด นั้นจะทำงานโดยการส่งผ่านข้อมูลเป็นแบบพัลส์สั้น ๆ ผ่านคลื่นแถบความถี่กว้างมาก ๆ ซึ่งจะทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลจำนวนมากได้ในระยะทางสั้น ๆ ต่างจากการส่งผ่านข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุแบบแถบความถี่แคบ สายอากาศที่ตอบสนองแถบความถี่กว้างยิ่งยวดยังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อการค้นหาวัดถุ โดยสามารถระบุตำแหน่งของวัตถุด้วยความแม่นยำในระดับเซนติเมตร ซึ่งถือว่าแม่นยำมากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีระบบระบุตำแหน่งพื้นโลก (GPS) ที่ให้ความแม่นยำเพียงแค่หน่วยเมตรเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเครื่องเรดาร์ตรวจสอบชั้นใต้ผิวดิน [13] ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรถ่ายสัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วย 3 ภาคส่วน คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave Generator) ภาคสร้างสัญญาณพัลส์ (SRD Pulse Generator) และภาคปรับรูปแบบสัญญาณพัลส์ (Forming Network) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นในแถบความถี่กว้างยิ่งยวดที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับเซนเซอร์ เช่น เรดาร์หยั่งลึกและวงจรถ่ายสัญญาณพัลส์โดยมีความถี่ตั้งแต่ 200 MHz ถึง 1.5 GHz สายอากาศนี้ประกอบด้วยตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiator) และตัวสะท้อน (Reflector) โครงสร้างของการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบพื้นผิวและมีระนาบกราวด์ด้านหลังทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน โดยโครงสร้างของสายอากาศถูกออกแบบจากการนำรูปวงกลมสามวงที่มีรัศมีเท่ากันมาวางทับซ้อนกัน แล้วใช้ส่วนที่ซ้อนกันนั้นเป็นโครงสร้างของสายอากาศ และใช้คอนเนคเตอร์ชนิด SMA เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณให้กับสายอากาศ โดยโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งจะนำสายอากาศดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งยวด

ในส่วนของการจำลองสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนในแถบความถี่กว้างยิ่งยวดจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมทั้งการหาค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่เหมาะสม โดยการพิจารณาจากผลของ  $|S_{11}|$  (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) การกระจายของกระแส (Current distribution) และอัตราขยาย (Gain) เป็นสำคัญ โดยจะทำการจำลองการทำงานของสายอากาศคู่กับการส่งสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นสัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ต่ำของเทคโนโลยีย่านความถี่กว้างยิ่งยวด โดยจะพิจารณาสัญญาณพัลส์ที่ส่งออกมาจากสายอากาศ



รูปที่ 1.3 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวบนตัวสะท้อน

ซึ่งการจำลองการส่งสัญญาณพัลส์จะใช้สายอากาศที่ได้ออกแบบเป็นสายอากาศภาคส่งและภาครับ ซึ่งเป็นสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ การพิจารณาจากผลของสัญญาณที่ส่งออกมาจากสายอากาศทั้งในทางโดเมนเชิงเวลาในตำแหน่งต่าง ๆ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ก็เพื่อทำการศึกษายานอากาศที่มีความถี่ใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดซึ่งมีช่วงความถี่การใช้งานตั้งแต่ 200 MHz ถึง 1.3 GHz ตามมาตรฐานของ FCC ที่ได้กำหนดไว้ โดยจะศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ เพื่อพัฒนาให้สายอากาศที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแอปพลิเคชันเรดาร์หยั่งลึก และปรับปรุงให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานมากที่สุด รวมทั้งโครงสร้างของสายอากาศจะต้องมีความเรียบง่ายไม่ซับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของ UWB รวมทั้งระบบและสัญญาณของ UWB ตลอดจนคุณสมบัติต่าง ๆ ของ UWB

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ สำหรับสายอากาศต้นแบบ โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวของสายอากาศเริ่มต้น เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศ ปรับโครงสร้างของระนาบกราวนด์ และปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศด้วย เพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 200 MHz ถึง 1.3 GHz และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานได้จะต้องมีลักษณะที่เหมือนหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลของการจำลองการสะท้อนของสัญญาณพัลส์ร่วมกับสายอากาศที่นำเสนอโดยผ่านดินร่วนทั้งแบบเปียกและแบบแห้งที่เป็นตัวกลาง ซึ่งจะทำการสังเกตจากตำแหน่งของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศในมุมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะวิเคราะห์ในโดเมนเชิงเวลา

บทที่ 5 กล่าวถึงผลจากการทดสอบสายอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์มาในขั้นต้น แล้วนำมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ พร้อมทั้งแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลทดสอบ ซึ่งจะพิจารณา  $|S_{11}|$  (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมไปถึงข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อแก้ปัญหาและลดข้อจำกัดที่อาจเกิดขึ้นได้ต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการสื่อสารย่านความถี่กว้างยิ่งยวด หรือเรียกว่า UWB (Ultra-wide band) โดยเริ่มตั้งแต่ความเป็นมาและคุณสมบัติต่าง ๆ ของ UWB ตลอดจนคุณลักษณะแบนด์วิดท์ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ทำให้ระบบ UWB เป็นที่น่าสนใจและได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก รวมถึงในบทนี้ยังได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของเรดาร์หยั่งลึก คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการสะท้อนของเรดาร์หยั่งลึกอีกด้วย

### 2.2 เทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งยวด

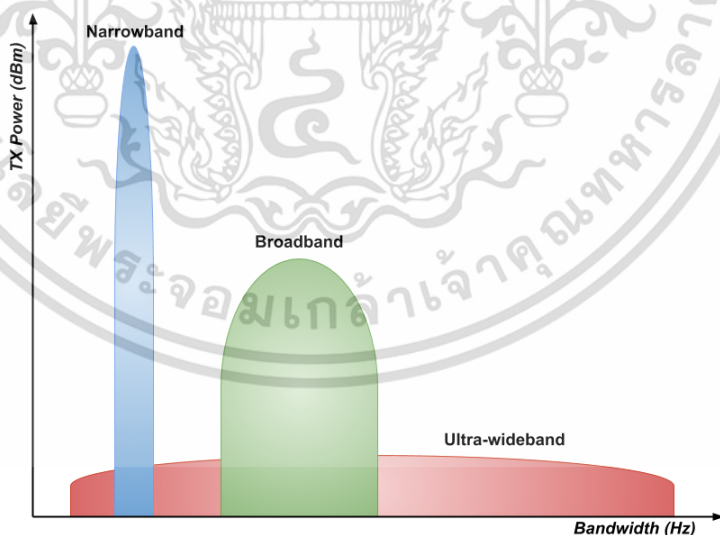
เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารโดยใช้ความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband) นั้นเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ใช้การส่งผ่านข้อมูลแบบพัลส์ (Pulse) สั้น ๆ ผ่านคลื่นแถบความถี่กว้าง ทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลจำนวนมากได้ในระยะทางสั้น ๆ ต่างจากการส่งผ่านข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุแบบแถบความถี่แคบ (Narrowband) สายอากาศแบบแถบความถี่กว้างยิ่งยวดยังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อการค้นหาวัตถุ โดยสามารถระบุตำแหน่งของวัตถุด้วยความแม่นยำในระดับเซนติเมตร ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำสูงมากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีระบบระบุตำแหน่งพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) ที่ให้ความแม่นยำเพียงแค่หน่วยเมตรเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเครื่องเรดาร์ตรวจสอบใต้ชั้นผิวดิน [13] และได้มีการทดลองขึ้นจากการสร้างพัลส์สั้น ๆ ในช่วงปลายของคริสต์ศตวรรษที่ 18 เป็นการทดลองที่มีชื่อเสียงของ Hertz และการสื่อสารด้วยข้อมูลที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าครั้งแรก ซึ่งเป็นการทดลองของ Marconi [1] ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ระบบ UWB ถูกนำมาใช้งานจริงเป็นครั้งแรก และยังมีนักทฤษฎีที่เชี่ยวชาญอีกคนที่ชื่อว่า Sommerfield ได้ทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจากครึ่งแผ่นระนาบ (Half-plane) ที่ได้มาซึ่งทฤษฎีขั้นพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น [15]

อย่างไรก็ตามหลังจากปี ค.ศ. 1910 การสื่อสารแบบ UWB อาจไม่ได้รับความสนใจมากนักเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีช่วงความถี่แคบอย่าง Narrowband แต่หลังจากนั้นการสื่อสารแบบ UWB ได้เริ่มได้รับความนิยมและสนใจในการศึกษาค้นคว้าอีกครั้งในช่วงปี ค.ศ. 1970 [16] ณ ช่วงเวลาในขณะนั้นได้ถูกเรียกกันในชื่อ การสื่อสารแบบช่วงความถี่ฐาน (Baseband) หรือการสื่อสารที่ไม่ต้องอาศัยคลื่นพาห้ (Carrier-free) ซึ่งประมาณปี ค.ศ. 1973 ได้มีการยอมรับว่าสัญญาณพัลส์แบบสั้นที่แผ่ขยายสัญญาณตลอดสเปกตรัมที่กว้างไม่ได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณช่วงความถี่แคบ แต่ยังมีปัญหาในเรื่องของการแทรกสอดแบบเข้าถึงหลายทาง (Multiple-Access Interference : MAI) ทำให้ในช่วงของปี ค.ศ. 1970 จนถึง ค.ศ. 1980 การสื่อสารแบบ UWB ได้มีแนวโน้มทำการศึกษาค้นคว้าใช้งานในส่วนของการทหารกันมาอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เรื่องของประสิทธิภาพสเปกตรัมยังเป็นเรื่องที่มีความสำคัญรองลงมาสำหรับการค้นคว้าวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การจะนำ UWB ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ก็ยังเป็นเรื่องยาก ซึ่งระบบความถี่ส่วนใหญ่ที่จัดสรรให้ใช้งานก่อนหน้านั้น ได้ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่แคบเพื่อการใช้งานอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ระบบ UWB ได้ฝ่าฝืนข้อกำหนดดังกล่าวเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่ที่กว้าง ที่อาจจะครอบคลุมการทำงานในช่วงความถี่อย่างอื่นได้ ดังนั้นทาง FCC (Federal Communications Commission) จึงได้มีการขออนุญาตให้สามารถใช้งาน UWB ได้โดยที่การใช้งาน UWB นั้นจะต้องไม่แทรกสอดกับการใช้งานหรืออุปกรณ์ที่มีการสื่อสารระบบอื่น ๆ และในปีค.ศ. 2002 ทาง FCC จึงได้ประกาศอนุญาตข้อกำหนดให้สามารถใช้ UWB ได้ที่ช่วงความถี่ระหว่าง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และความถี่ที่ต่ำกว่า 960 MHz รวมทั้งยังได้กำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15.3a สำหรับการสื่อสารไร้สายที่มีค่าวิสัยสูง บนพื้นฐานของ UWB รวมทั้งมาตรฐาน IEEE 802.15.4a สำหรับการพัฒนาข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่ใช้ร่วมกันสำหรับอุปกรณ์ UWB [4]

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร UWB ได้มีจำนวนมากขึ้น ซึ่งมีหัวข้อที่ทำการวิจัยที่แตกต่างกันออกไป เช่น การใช้งาน UWB ร่วมกับ Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) และการติดตั้งเพื่อนำไปใช้งานจริงในระบบวิทยุอิมพัลส์ และการติดตั้งอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง [17-19] นอกจากนี้งานวิจัยทางด้านสายอากาศ UWB ก็ได้รับความสนใจเช่นเดียวกันเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยการใช้การส่งสัญญาณพัลส์อย่างต่อเนื่องในโดเมนเชิงเวลาระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และเนื่องจากพัลส์มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมากส่งผลให้มีความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีกำลังงานต่ำเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารวิทยุชนิดอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งอยู่ภายใต้ข้อกำหนดและมาตรฐาน



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบกำลังงานการสื่อสารของช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด และช่วงความถี่ของการสื่อสารรูปแบบอื่น [20]

โดยช่วงความถี่การใช้งานของแถบความถี่กว้างยิ่งยวดนั้นจะพิจารณาคุณลักษณะแบนด์วิดธ์ (Bandwidth) ตามข้อกำหนดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในการพิจารณาช่วงความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนเทคโนโลยีการสื่อสารช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดนั้นสามารถคำนวณได้จากแฟรกชันแนล ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth:  $B_{\text{frac}}$ ) ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่า 0.2 ดังสมการที่ (2.1) [21] ซึ่งคำนวณจากความถี่สูง (High frequency:  $f_H$ ) และความถี่ต่ำ (Low frequency:  $f_L$ ) เมื่อพิจารณาที่ -10 dB ของกำลังงานความหนาแน่นสเปกตรัมทั้งหมด

$$B_{\text{frac}} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \quad (2.1)$$

## 2.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

### 2.3.1. อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

การออกแบบสายอากาศจำเป็นต้องพิจารณาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ (Antenna impedance:  $Z_A$ ) ให้เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (Transmission line impedance:  $Z_0$ ) เพื่อให้การส่งผ่านกำลังงานจากสายส่งไปยังสายอากาศเกิดการสะท้อนกลับที่น้อยที่สุด และเป็นที่ยอมรับว่าอิมพีแดนซ์ในอุดมคติของสายนำสัญญาณ ( $Z_0$ ) จะมีค่าเป็น  $50 \Omega$  กล่าวคือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ออกแบบจะต้องมีค่าที่เข้าใกล้  $50 \Omega$  ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน โดยอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะสามารถเชื่อมโยงเพื่อคำนวณอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศที่ออกแบบได้

### 2.3.2. อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์คือคุณลักษณะที่บ่งบอกให้ทราบว่าสายอากาศที่ออกแบบสามารถทำงานได้ดีในช่วงความถี่ใดบ้าง ด้วยพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient:  $\Gamma$ ) ซึ่งคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและสายอากาศดังสมการที่ (2.2) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นั้นเป็นจำนวนเชิงซ้อน จากสมการที่ (2.2) ทำให้ทราบว่าในกรณีที่อิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศเท่ากัน ( $Z_0 = Z_A$ ) จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นศูนย์ ( $\Gamma = 0$ ) ซึ่งหมายความว่ากำลังงานที่ส่งจากสายส่งจะไม่เกิดการสะท้อน ณ รอยต่อระหว่างสายส่งและสายอากาศ กลับกันถ้าการออกแบบสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ( $Z_0 \neq Z_A$ ) ก็จะทำให้เกิดกำลังงานสะท้อนกลับมายังสายส่ง ณ รอยต่อดังกล่าว อย่างไรก็ตามในเชิงการวิเคราะห์และเพื่อการแสดงผลการออกแบบสายอากาศที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมนอกจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแล้วนั้น การอธิบายด้วยคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) ก็เป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมในสาขาวิศวกรรมสายอากาศ (Antenna engineering) โดยคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) สามารถคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ออกแบบร่วมกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.3) นอกจากนี้ช่วงความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้ดี หรือมีการสูญเสียย้อนกลับไปยังสายส่งที่ยอมรับได้จะพิจารณาคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) ที่มีค่าตั้งแต่ -10 dB เป็นต้นไป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ณ การสูญเสียย้อนกลับดังกล่าวจะเกิดการส่งผ่านกำลังงานจากสายส่งไปยังสายอากาศได้มากกว่า 70% โดยประมาณ (มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนประมาณ 0.3 หรือ 30%)

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2.2)$$

$$|S_{11}| \text{ (dB)} = 20 \log |\Gamma| \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3. อัตราขยายของสายอากาศ

อัตราขยาย (Gain) เป็นอีกคุณลักษณะที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ โดยอัตราขยายจะมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) อย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือเมื่อกำลังงานจากสายส่งสามารถส่งผ่านไปยังสายอากาศสะท้อนกลับมาน้อยนั้นหมายความว่าสายอากาศจะสามารถแพร่กระจายคลื่นด้วยกำลังงานที่ได้รับมาจากสายส่งนั่นเอง ฉะนั้น อัตราขยายจะเป็นคุณลักษณะที่ใช้พิจารณาว่าสายอากาศที่ออกแบบจะสามารถแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ต้องการได้มากหรือน้อย โดยกำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นนั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ การแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก (มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเป็นทรงกลม) เพื่อเป็นการเทียบเคียงให้ทราบได้ว่าสายอากาศนี้สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีกว่าสายอากาศไอโซทรอปิกได้ดีกว่าในทิศทางใดบ้าง โดยหน่วยของอัตราขยายจะเป็น dBi เมื่อเทียบกับการแพร่กระจายคลื่นกับสายอากาศไอโซทรอปิก (Isotropic antenna)

สำหรับการทดสอบคุณลักษณะอัตราขยายในทางปฏิบัติจำเป็นที่จะต้องติดตั้งสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับที่มีระยะห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับสนามระยะไกล (Far-field:  $R$ ) โดยระยะนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $D$  มิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ และ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น

สำหรับกรณีที่สายอากาศภาครับและภาคส่งนั้นมีลักษณะเหมือนกันการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศ ( $G_t = G_r$ ) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) โดยพิจารณาจากกำลังงานของภาคส่ง ( $P_t$ ) และภาครับ ( $P_r$ ) [22]

$$G_t = G_r = 0.5 \left[ \left( 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \right) \right] \quad (2.5)$$

## 2.4 ปัญหาในการออกแบบสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวด

ระบบ UWB สายอากาศจะมีหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณพัลส์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ส่งออกจากสายอากาศมีความผิดเพี้ยนต่างไปจากเดิม โดยสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวดนั้นจะต้องการอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ครอบคลุมแบนด์วิดท์ทั้งหมดในช่วงความถี่ที่ใช้งานอยู่ และนั่นคือความท้าทายของการออกแบบสายอากาศที่ประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี UWB ที่มีแบนด์วิดท์กว้างเป็นอย่างมาก นอกจากการออกแบบที่ต้องการค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น โครงสร้างของสายอากาศที่ได้ออกแบบต้องสามารถทำงานในช่วงความถี่ต่ำของย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้และจะต้องสามารถซึ่ล้าคลื่นในทิศทางที่ต้องการได้อีกด้วย

## 2.5 เรดาร์หยั่งลึก

วิธีการสำรวจด้วยเรดาร์หยั่งลึก (Ground Penetrating Rader: GPR) เป็นวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้และประสบความสำเร็จอย่างกว้างขวางในงานทางด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยมีข้อดีคือสามารถเก็บข้อมูลและการจัดการข้อมูลสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ความสามารถในการจำแนกชั้นดินนั้นมีความแม่นยำสูง จึงได้มีการนำ GPR มาช่วยในการแก้ปัญหา

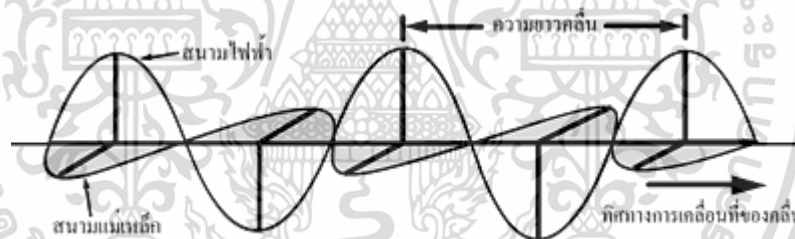
ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสำรวจหาโครงสร้างใต้ผิวดินในระดับตื้นที่ต้องการความละเอียดในการจำแนกชั้นดิน

### 2.5.1 หลักการพื้นฐานของเรดาร์หยั่งลึก

วิธีการเรดาร์หยั่งลึกนั้น มีหลักการพื้นฐานคล้ายกับการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน (Seismic surveying) ชนิดสะท้อน แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ GPR จะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (10 MHz จนถึง 1 GHz) ส่งลงไปใต้ดิน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงจะถูกสร้างและพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านลงไปในพื้นที่ดินโดยใช้สายอากาศเป็นอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Transmitting antenna) เมื่อคลื่นไปกระทบกับผิวรอยต่อในชั้นดินที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันก็จะเกิดการสะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนจากผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางนั้น คลื่นบางส่วนก็จะเดินทางกลับสู่ผิวดินซึ่งจะสามารถตรวจจับได้ด้วยสายอากาศอีกตัวที่ทำหน้าที่รับสัญญาณ (Receiving antenna) และจะถูกเก็บบันทึกไว้ในระบบเพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลต่อไป คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในตัวกลางได้น้อยกว่าคลื่นยืดหยุ่น (Elastic wave) ที่ใช้กับคลื่นไหวสะเทือน แต่สามารถให้รายละเอียดของโครงสร้างของชั้นผิวดินในระดับตื้นได้ดีกว่า [23]

### 2.5.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ EM ประกอบด้วย สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามมุมตั้งฉากกันซึ่งระยะทางระหว่างยอดคลื่นหนึ่งถึงยอดคลื่นถัดไปเรียกว่า ความยาวคลื่น (Wavelength) [24]



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [24]

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่สามารถถ่ายเทพลังงาน โดยการแพร่กระจายคลื่นออกไปรอบ ๆ จากแหล่งพลังงานสูงซึ่งคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) มีหน่วยเป็นนาโนเมตร (nanometer: nm) และไมโครเมตร (micrometer:  $\mu\text{m}$ ) และยังมีความถี่คลื่น ( $f$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็นเฮิร์ตซ์ (hertz: Hz) [25]

#### 2.5.2.1 คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic properties)

สมบัติทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในตัวกลาง ได้แก่ ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity:  $\sigma$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric permittivity:  $\epsilon$ ), และค่าสภาพขบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic permittivity:  $\mu$ ) สำหรับการสำรวจด้วยวิธี GPR จะสนใจเฉพาะ  $\epsilon$  และ  $\sigma$  เท่านั้น

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้า  $E_0$  ในสุญญากาศกับความเข้มสนามไฟฟ้าในตัวกลาง ดังแสดงในสมการที่ (2.6) ซึ่งสมการนี้สามารถใช้ในการประเมินความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในตัวกลางได้ นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลางใต้ผิวดินสามารถนำมาหาค่าความเร็วของคลื่นในตัวกลางและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad (2.6)$$

### 2.5.2.2 ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศมีค่าเท่ากับความเร็วเฟสของแสง  $c = 0.3$  m/ns ในตัวกลาง  $m$  ใด ๆ ความเร็วเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) สำหรับตัวกลางที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำและคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านมีความถี่สูงมากพอจนทำให้  $\tan \delta$  มีค่าน้อยว่าหนึ่งมาก ๆ ( $\tan \delta \ll 1$ ) และสำหรับตัวกลางทางธรณีวิทยาเกือบทั้งหมดจะมีค่า Relative magnetic permeability ( $\mu_r = 1 + K$ ) เข้าใกล้ 1 เนื่องจากค่าสภาพรับทางแม่เหล็กไฟฟ้า ( $K$ ) ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมาก ๆ ( $\ll 1$ ) นั้นดังสมการที่ (2.8)

$$v_m = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\left\{ \frac{\varepsilon_r \mu_r}{2} \left[ \sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.7)$$

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.8)$$

เนื่องจาก  $\varepsilon_r$  ที่มีค่ามากกว่า 1 เสมอ จึงทำให้ความเร็วของคลื่น GPR ในตัวกลางมีค่าน้อยกว่าความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศเสมอ และมีค่าลดลงเมื่อ  $\varepsilon_r$  เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละตัวกลาง

วัสดุ (Material)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\varepsilon_r$ )
อากาศ	1.00
ดินร่วนแห้ง	2.44
ทรายแห้ง	5.00
ดินร่วนเปียก	13.80
น้ำ	78.00

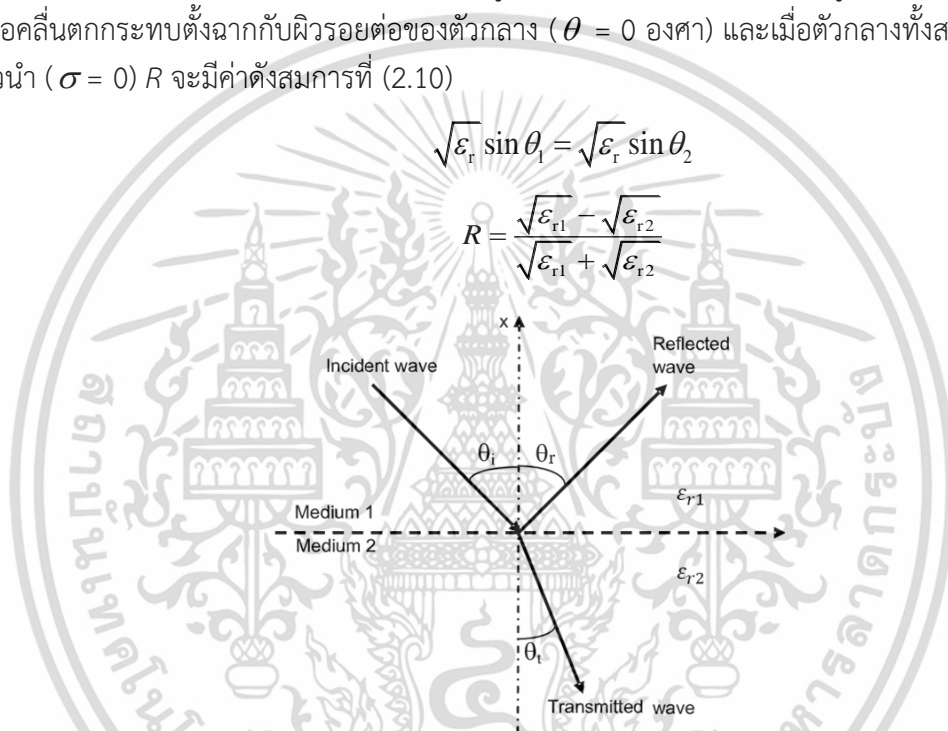
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.3 การสะท้อนและการหักเห

การสะท้อนและการหักเห (Reflection and refraction) ของคลื่น GPR จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางไปที่ตกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางสองตัวที่มีค่า  $\epsilon_r$  แตกต่างกันโดยคลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับขึ้นมายังตัวกลางเดิม คลื่นอีกส่วนหนึ่งจะเกิดการหักเหที่ผิวรอยต่อแล้วเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่อยู่ด้านล่าง คลื่นส่วนนี้อาจจะสะท้อนกลับมาอีกครั้งเมื่อเดินทางไปที่ตกระทบผิวรอยต่ออื่น ๆ ที่มีค่า  $\epsilon_r$  ต่างกัน จากทฤษฎีคลื่น มุมตกระทบของคลื่นที่ผิวรอยต่อมีค่าเท่ากับมุมสะท้อน สามารถอธิบายได้โดยใช้ Snell's law ดังสมการที่ (2.9) และความแตกต่างของ  $\epsilon_r$  จะทำให้สามารถทราบถึงปริมาณของพลังงานที่จะสะท้อนหรือหักเห สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient:  $R$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกับแอมพลิจูดของคลื่นตกระทบ เมื่อคลื่นตกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อของตัวกลาง ( $\theta = 0$  องศา) และเมื่อตัวกลางทั้งสองไม่ได้เป็นตัวนำ ( $\sigma = 0$ )  $R$  จะมีค่าดังสมการที่ (2.10)

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} \sin \theta_1 = \sqrt{\epsilon_{r2}} \sin \theta_2 \quad (2.9)$$

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.3 การสะท้อนและการหักเหของคลื่น [26]

### 2.5.2.4 การหาค่าความเร็วคลื่นและความลึกของตัวสะท้อนคลื่น

ในการสำรวจด้วยระบบ GPR เวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไป-กลับ (Two way travel times) และแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นที่สะท้อนกลับมาจะถูกบันทึกไว้โดยสายอากาศภาครับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากสายอากาศภาคส่งและสะท้อนที่ผิวรอยต่อของตัวกลาง ความลึกถึงผิวรอยต่อหรือตัวสะท้อนสามารถคำนวณได้หากทราบค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางทางด้านบนของผิวรอยต่อดังสมการที่ (2.11) ถึง (2.14) [23]

$$(s)^2 = \left(\frac{x}{2}\right)^2 + h^2 \quad (2.11)$$

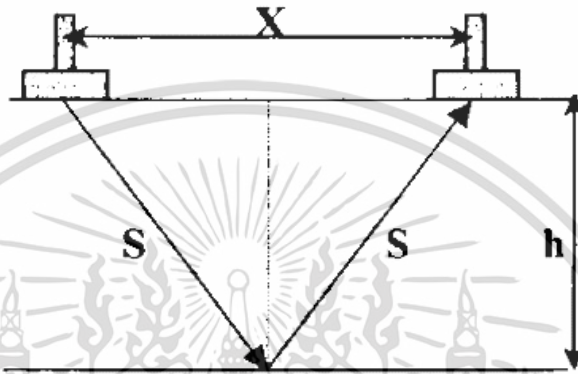
$$2s = vt \quad (2.12)$$

$$(vt)^2 = x^2 + 4h^2 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = \sqrt{\frac{(vt)^2 - x^2}{4}} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$s$	คือ ระยะทางที่คลื่นเดินทางจริงมีหน่วยเป็นเมตรหรือกิโลเมตร
	$x$	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ
	$h$	คือ ความลึกของตัวกลางมีหน่วยเป็นเมตรหรือเซนติเมตร
	$v$	คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลางหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
	$t$	คือ เวลาที่คลื่นเดินทางจริงมีหน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 2.4 แผนผังความเร็วคลื่นและความลึกของตัวสะท้อนคลื่น [23]

## 2.6 การหาค่าปริมาณน้ำในดิน

การหาค่าปริมาณน้ำในดินจำเป็นมากเมื่อต้องการทดสอบวัดค่าความแตกต่างของการสะท้อนกลับของคลื่นในตัวกลางที่แตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวกลางเป็นดินร่วนแห้งและดินร่วนเปียกในการทดสอบเมื่อทำการสะท้อนกลับของคลื่น ตามหลักการของ GPR โดยดินตามธรรมชาติ นั้นจะมีองค์ประกอบของมวลดิน 3 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นเม็ดดินหรือของแข็ง ส่วนที่สองคือส่วนที่เป็นน้ำหรือของเหลว และส่วนที่สามคือส่วนที่เป็นอากาศหรือก๊าซ แต่ก็ไม่จำเป็นเสมอไปที่ดินจะมีองค์ประกอบของมวลดินครบทั้ง 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และการหาปริมาณน้ำในดิน จะคำนวณโดยการหาเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำในดิน (Water content:  $\omega$ ) ดังสมการที่ (2.15) [27]



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของมวลดิน [28]

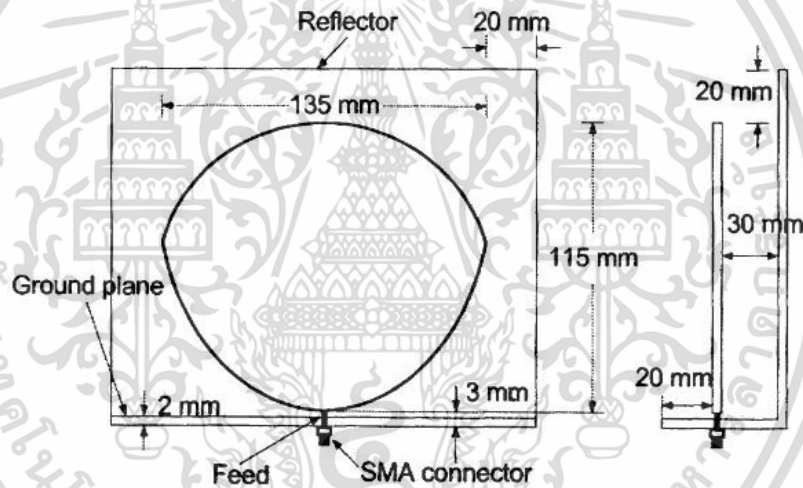
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega = \left( \frac{W_w}{W_s} \right) 100 \quad (2.15)$$

เมื่อ $\omega$	คือ ปริมาณน้ำในดินมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
$W_w$	คือ น้ำหนักของน้ำมีหน่วยเป็นกรัม
$W_s$	คือ น้ำหนักของดินแห้งมีหน่วยเป็นกรัม

## 2.7 การศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน

งานวิจัยแรกเป็นสายอากาศแถบความถี่กว้างยิ่งยวดแบบลูกรักบี้ ซึ่งเป็นผลงานของ A. Ruengwaree และคณะที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2006 ซึ่งสายอากาศมีขนาดโดยรวมคือ 50 mm × 175 mm × 140 mm (กว้าง×ยาว×สูง) โดยสายอากาศแบบลูกรักบี้เกิดจากการซ้อนทับกันของวงกลมจำนวน 2 วง โดยใช้วัสดุคือแผ่นอลูมิเนียม และสามารถทำงานที่ความถี่ 20 GHz และ  $VSWR < 2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และในรูปที่ 2.6 (ค) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบ  $VSWR$  ของสายอากาศที่ความถี่ 20 GHz โดยที่ได้  $VSWR < 2$  แบนด์วิดธ์ที่ทดสอบได้คือ 100 MHz จนถึง 20 GHz (เปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ = 198%)



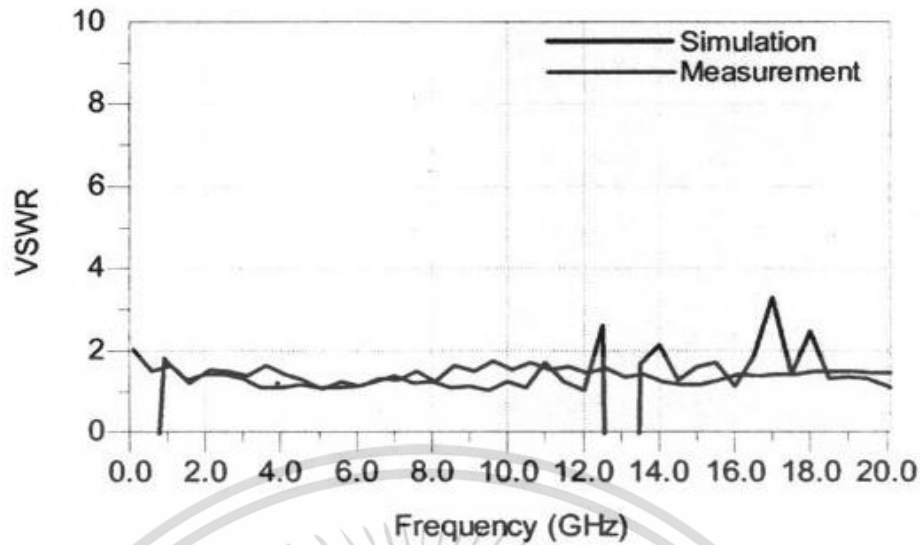
(ก) โครงสร้างของสายอากาศแบบลูกรักบี้



(ข) องค์ประกอบในสายอากาศ

รูปที่ 2.6 สายอากาศแบบลูกรักบี้และคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง [29]

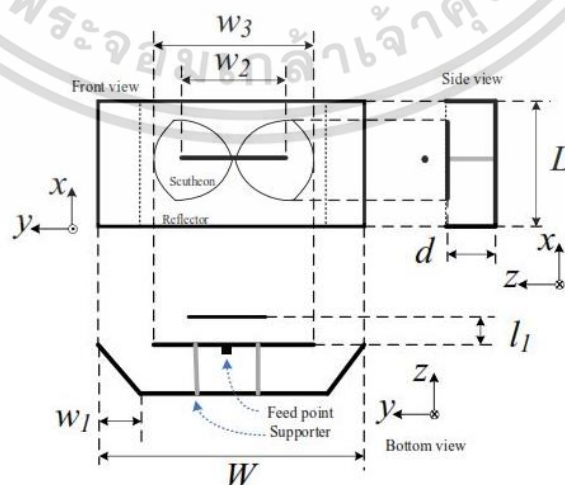
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) เปรียบเทียบ VSWR ของสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวดเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบ

รูปที่ 2.6 สายอากาศแบบลูกรักบี้และคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง [29] (ต่อ)

สายอากาศแถบความถี่กว้างแบบหุกระต่ายซึ่งเป็นผลงานของ P. Osklang และคณะที่ได้รับ การตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2019 ซึ่งสายอากาศมีขนาดโดยรวมคือ  $150 \text{ mm} \times 530 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  โดยสายอากาศแบบหุกระต่ายเกิดจากการนำสายอากาศแบบแผ่นโล่ 2 แผ่นต่อกัน โดยสายอากาศใช้ วัสดุเป็นทองแดง ระบายกราวนด์และตัวสะท้อนคลื่นใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียม ผลจากการทดสอบ  $|S_{11}|$  (dB) มีความถี่ใช้งานตั้งแต่ 470 MHz จนถึง 860 MHz และมีอัตราขยายมากที่สุดที่ 8.8 dBi ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และในรูปที่ 2.7(ค) แสดงค่า  $|S_{11}|$  (dB) จากการจำลองและการทดสอบมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ผลจากการจำลอง คือ 416 MHz จนถึง 887 MHz และผลจากการทดสอบคือ 374 MHz จนถึง 886 MHz และรูปที่ 2.7(ง) อัตราขยายจากการจำลองที่ค่าสูงสุดอยู่ที่ 7.25 dBi และจากการ ทดสอบสูงสุดอยู่ที่ 8.8 dBi ที่ความถี่ 680 MHz แต่ที่ความถี่ 530 MHz ได้ผลจากการจำลองสูงสุดอยู่ ที่ 7 dBi และจากการทดสอบสูงสุดอยู่ที่ 7.1 dBi

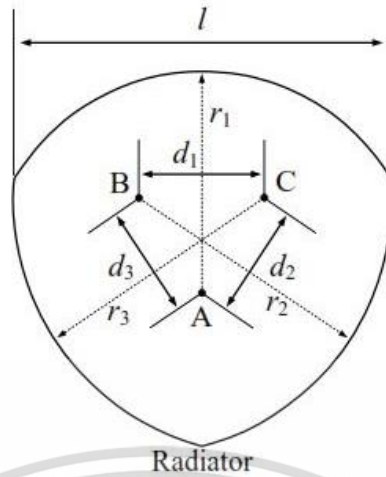


(ก) โครงสร้างของสายอากาศแถบความถี่กว้างแบบหุกระต่าย

รูปที่ 2.7 สายอากาศแบบหุกระต่ายและคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง [30]

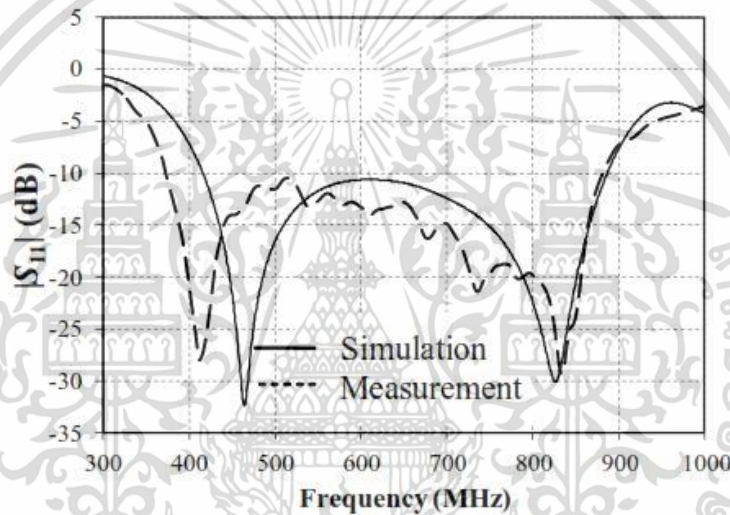
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในเพียงไม่กี่ปีเท่านั้น เมื่อผู้ใดที่เห็นประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

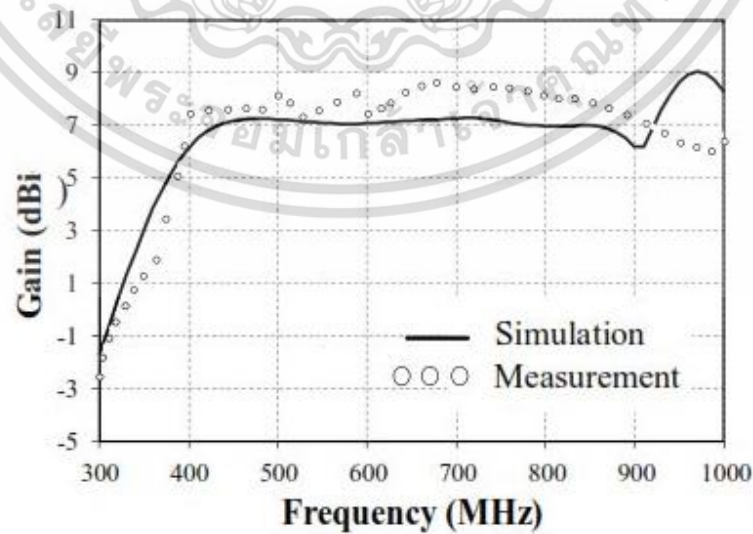


Radiator

(ข) โครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่นโล่



(ค) เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวด ระหว่างการจำลองและการทดสอบ

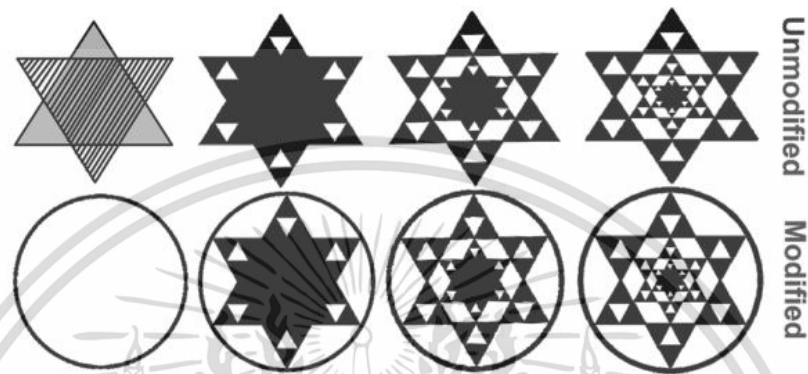


(ง) อัตราขยายของสายอากาศ

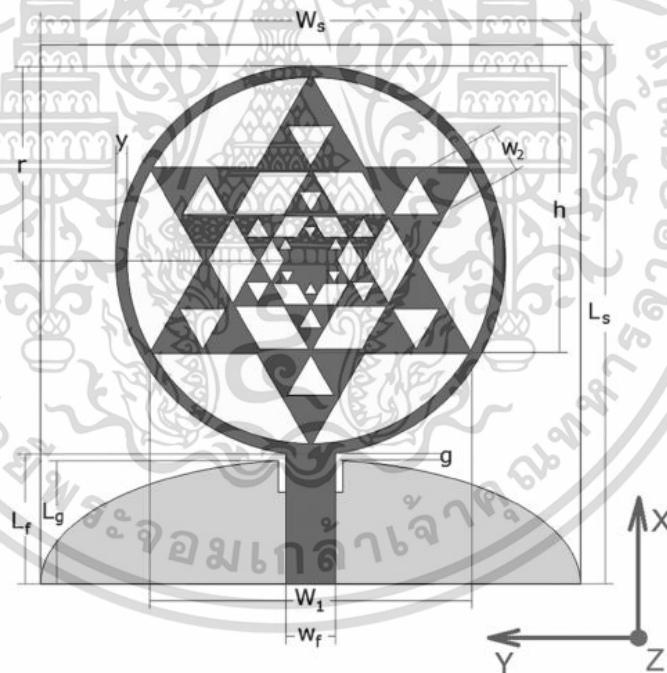
รูปที่ 2.7 สายอากาศแบบหุกระต่ายและคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง [30] (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศโมโนโพลรูปร่างกลมและรูปดาวสามเหลี่ยมที่ใช้งานกับเทคโนโลยี Super-Wideband เป็นผลงานของ V. Waladi และคณะที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2013 ซึ่งสายอากาศมีขนาดโดยรวมคือ  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  สายอากาศทำงานในช่วงความถี่ระหว่าง 1 GHz จนถึง 30 GHz และ  $VSMR < 2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และในรูปที่ 2.8 (ค) แสดง  $|S_{11}|$  (dB) จากการจำลองและการทดสอบมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ซึ่งสามารถทำงานในช่วงความถี่ต่ำของย่านความถี่กว้างที่ยืดได้ ค่าที่ได้มีความถี่ที่ต่ำถึง 2.5 GHz ซึ่งเป็นผลมาจากการเซาะร่องรูปดาวสามเหลี่ยมนั่นเอง

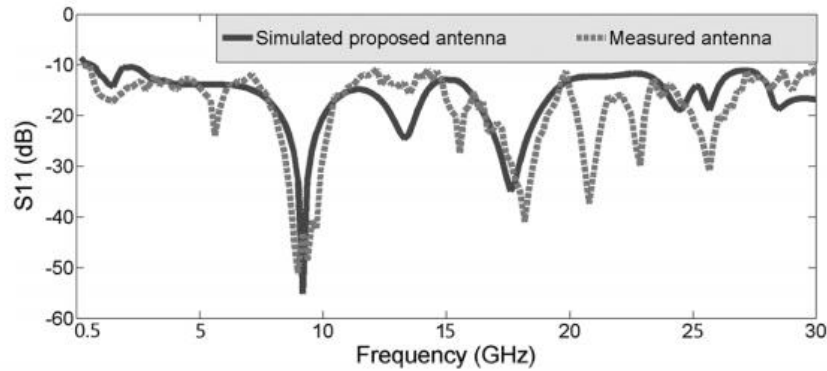


(ก) การทำซ้ำสามครั้งของเซาะร่องสายอากาศรูปดาวสามเหลี่ยม



(ข) โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปร่างกลมและรูปดาวสามเหลี่ยมรูปที่ 2.8 สายอากาศโมโนโพลรูปร่างกลมและรูปดาวสามเหลี่ยมและคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศ เปรียบเทียบ  
ระหว่างการจัดลองและการทดสอบ  
รูปที่ 2.8 สายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมและรูปดาวสามเหลี่ยม  
และคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง [31] (ต่อ)

สรุปคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศจากผลงานวิจัยที่มีมาก่อนดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น  
สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศของผลงานวิจัยที่มีมาก่อน

ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน	ขนาดของสายอากาศ	ช่วงความถี่ใช้งาน	แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่น
สายอากาศแถบความถี่ กว้างยิ่งยวดแบบลูกรักบี้	50 mm × 175 mm × 140 mm	100 MHz จนถึง 20 GHz	รอบทิศทาง
สายอากาศแถบความถี่ กว้างแบบหุกระต่าย	150 mm × 530 mm × 400 mm	470 MHz จนถึง 860 MHz	ทิศทางเดียว
สายอากาศโมโนโพลรูป วงกลมและรูปดาว สามเหลี่ยม	20 mm × 20 mm × 1 mm	1 GHz จนถึง 30 GHz	รอบทิศทาง

## 2.8 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอทฤษฎีและหลักการของ UWB โดยได้เริ่มจากประวัติความเป็นมาและ  
กล่าวถึงเปรียบเทียบกำลังงานการสื่อสารของช่วงความถี่กว้างยิ่งยวดและช่วงความถี่ของการสื่อสาร  
รูปแบบอื่น ๆ จนกระทั่งคุณสมบัติที่สำคัญอื่น ๆ ของ UWB ที่ทำให้เป็นเทคโนโลยีที่มีความได้เปรียบ  
เกี่ยวกับกำลังงานและได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก รวมถึงหลักการต่าง ๆ ของระบบเรดาร์หยั่งลึก  
ระบบสัญญาณพัลส์ และการหาปริมาณน้ำในดินเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบในขั้นต่อไป ซึ่งโดย  
ส่วนมากการสร้างสายอากาศเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับ UWB นี้มักจะมีช่วงความถี่ที่ใช้งานที่  
3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

สืบเนื่องมาจากการออกแบบสายอากาศที่จะสามารถทำงานในช่วงความถี่ต่ำของย่าน  
ความถี่กว้างยิ่งยวดนั้นจำเป็นต้องมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 MHz จนถึง 20 GHz จึงมีความท้าทายเป็น  
อย่างมากเมื่อเทียบกับสายอากาศที่ได้ออกแบบมาในย่านความถี่ปกติของ UWB ดังนั้นสายอากาศที่ได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการออกแบบสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นที่สามารถทำงานในช่วงความถี่ต่ำของย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้เป็นอย่างดีและยังสามารถชี้ลำคลื่นในทิศทางเดียว ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศโมนโพลนั้นสามารถเพิ่มความกว้างของแถบความถี่ และมีลักษณะเป็นสายอากาศความถี่เดี่ยวที่มีแบนด์วิดธ์มากกว่า 500 MHz โดยเบื้องต้นจะกล่าวถึงการออกแบบและการคำนวณหาขนาดของสายอากาศเริ่มต้น และเริ่มพัฒนารูปร่างของสายอากาศและเพิ่มแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ โดยยังคงค่าคุณสมบัติของสายอากาศเอาไว้ โดยพิจารณา  $|S_{11}|$  (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายดังที่ได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นที่สามารถทำงานในช่วงความถี่ต่ำของย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้และสามารถชี้ลำคลื่นในทิศทางเดียวที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับแอปพลิเคชันเรดาร์หยั่งลึกและวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ โดยใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และนำมาออกแบบโดยใช้โปรแกรม เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้คำนวณทางทฤษฎี โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วย  $|S_{11}|$  (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบแล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อปรับปรุงค่าคุณสมบัติของสายอากาศให้ดีขึ้น ซึ่งการเริ่มต้นของการออกแบบสายอากาศนั้นจะเริ่มต้นจากการกำหนดขนาดความยาวของสายอากาศเป็นจำนวนเท่าของ  $\lambda$  โดยใช้รูปวงกลมเป็นโครงสร้างเริ่มต้นในการออกแบบ จากนั้นทำการออกแบบตัวสะท้อนคลื่นซึ่งมีระยะห่างสายอากาศเป็น  $\lambda/4$  จากนั้นทำการลดขนาดและพัฒนาโครงสร้างของสายอากาศ โดยมุ่งเน้นพิจารณาจากคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) ที่เหมาะสมที่สุดที่สุดเป็นหลัก และจะทำการปรับเปลี่ยนสายอากาศให้มีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยม และสุดท้ายปรับให้สายอากาศมีลักษณะเป็นแผ่นโล่ โดยนำสายอากาศรูปวงกลมมาวางซ้อนกันแล้วใช้พื้นที่ซ้อนทับกันดังกล่าวมาเป็นโครงสร้างของสายอากาศ โดยผลของการศึกษาผลกระทบจะนำมาเป็นแนวทางในการพัฒนาสายอากาศ ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงความถี่ต่ำของย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้

### 3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ

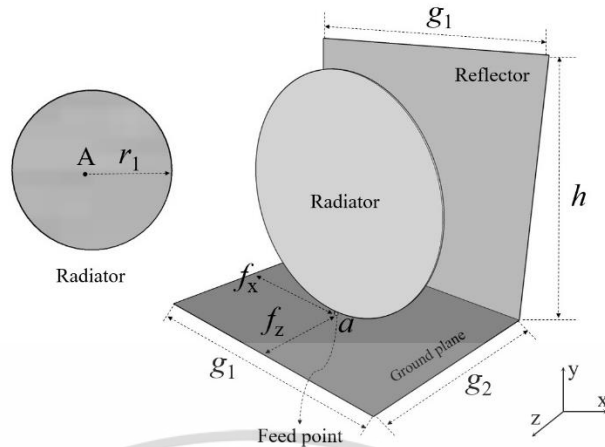
การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศในเบื้องต้นจะใช้ทฤษฎีของสายอากาศโมโนโพลมาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น สำหรับการคำนวณหาความยาวทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศนั้นได้มีการพัฒนารูปลักษณะจากรูปวงกลม รูปสามเหลี่ยม ไปจนถึงรูปแผ่นโล่ โดยการออกแบบสายอากาศในแต่ละโครงสร้างนั้นจะใช้โปรแกรมในการจำลอง และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ โดยจะพิจารณา  $|S_{11}| \leq -10$  dB จึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ โดยการจำลองศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้นจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® [32]

#### 3.2.1 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นนั้นจะออกแบบโดยให้สายอากาศวงกลมมีรัศมีของตัวแพร่กระจายคลื่นคือ  $r_1$  วางบนระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนคลื่นจะห่างกันเป็น  $\lambda/4$  ความยาวและความกว้างของระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคือ  $g_1$  และความสูงของตัวสะท้อนคือ  $g_2$  ความสูงของตัวสะท้อนคือ  $h$  ช่องว่างระหว่างจุดป้อน (Feed point) ตำแหน่งของจุดป้อนจะแสดงด้วย  $a$  ซึ่งเป็นระยะระหว่างคอนเนคเตอร์ที่เชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณที่เป็นชนิด SMA และตำแหน่งของจุดป้อนคือ  $f_x$  และ  $f_z$  ดังแสดงในตารางที่ 3.1

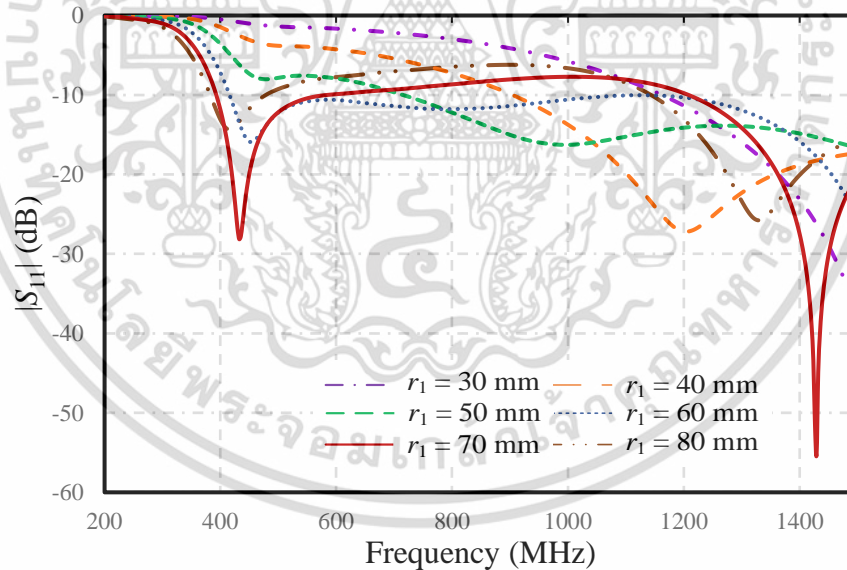
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโนโพลรูปร่างกลม

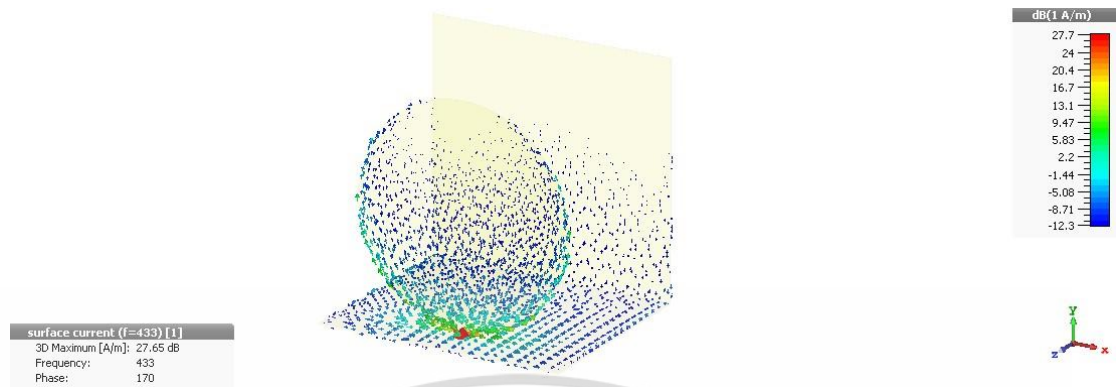
จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของรูปร่างกลมเพื่อใช้สำหรับออกแบบสายอากาศในแต่ละความถี่นั้น จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์จากการปรับรัศมีของรูปร่างกลม โดยเริ่มจากรัศมีที่ 30 mm จนถึง 80 mm โดยการปรับเพิ่มทีละ 10 mm โดยความถี่ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจะเริ่มตั้งแต่ 200 MHz ถึง 1.5 GHz ตามลำดับ ซึ่งจากผลการจำลองผลจะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำนั้นที่ ความถี่ 433.14 MHz จะได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) ต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศไมโนโพลรูปร่างกลม

จากรูปที่ 3.2 เมื่อทำการจำลองของสายอากาศไมโนโพลรูปร่างกลม โดยการปรับพารามิเตอร์  $r_1$  ซึ่งคือรัศมีของสายอากาศโดยพิจารณาที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB พบว่าที่รัศมีที่ 70 mm นั้นมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่ -24.88 dB ความถี่ที่ 433.14 MHz ที่ความถี่ต่ำ และ -56.42 dB ความถี่ 1.47 GHz ที่ความถี่สูง ซึ่งเป็นค่าที่ดีเมื่อเทียบกับค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของรัศมีอื่น ๆ แต่ผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นได้เกิดการเอียงของทิศทางการคลื่น จากการจำลองของสายอากาศรูปร่างกลมพบว่ามีแบนด์วิดท์ที่แคบ โดยสังเกตได้จากผลของกระแสที่หนาแน่นบริเวณขอบของสายอากาศไมโนโพลรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงกลมดังแสดงในรูปที่ 3.3 และให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำได้ดีเพราะมีระยะการเดินทางของกระแสได้หลากหลาย



รูปที่ 3.3 ผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงผิวของสายอากาศที่ความถี่ 433 MHz ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม

จากรูปที่ 3.3 แสดงการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมจะสังเกตได้ว่า มีการกระจายกระแสที่ผิวของสายอากาศที่หนาแน่นที่บริเวณสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมที่ใกล้กับจุดป้อนสัญญาณและกระจายโดยทั่วไปในบริเวณผิวของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นโดยมีทิศทางการไหลที่ผิวในทิศทางแกน  $\pm x$  และ  $\pm y$  ตามลำดับ อันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าวมีรากฐานมาจากสายอากาศแบบเส้นลวดที่นำมายืดและทำให้แบนราบ

จากการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวที่ได้นำเสนอไปในรูปที่ 3.3 จะมีความหนาแน่นของกระแสอยู่มากที่บริเวณสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมและตัวสะท้อนคลื่น ฉะนั้นการเปลี่ยนขนาดของสายอากาศจะเป็นการส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลจึงมีความจำเป็นเพื่อที่จะทำให้  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศสามารถครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3.1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม

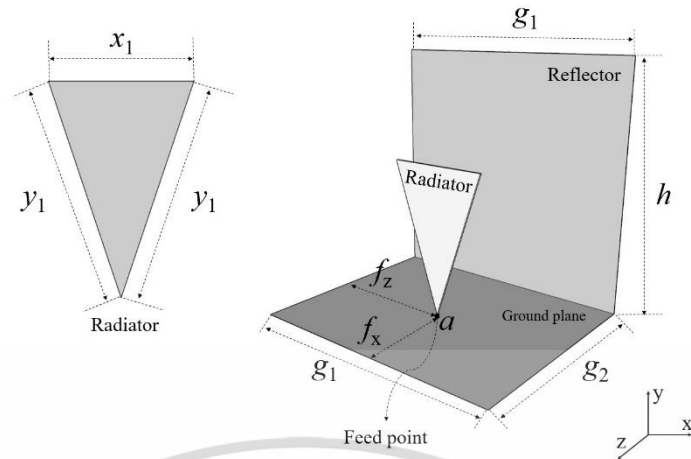
พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$g_1$	160	$f_x$	80
$g_2$	130	$f_z$	60
$r_1$	70	$a$	1
$h$	150		

### 3.2.2 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม

เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้งานในช่วงความถี่ดังกล่าวได้ แต่ยังมีบางช่วงความถี่ที่ต้องปรับปรุงเพิ่มเติม จึงได้ทำการจำลองปรับเปลี่ยนรูปแบบของสายอากาศให้มีความแตกต่างไปจากเดิมเพื่อทำการเปรียบเทียบ จึงได้เลือกการจำลองในรูปแบบของรูปสามเหลี่ยม [37] โดยโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมนั้นมีฐานยาวเป็น  $x_1$  และความสูงเอียงเป็น  $y_1$  ระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่นมีรูปแบบและขนาดเดียวกันกับสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปแบบของสายอากาศจะแสดงในรูปที่ 3.4

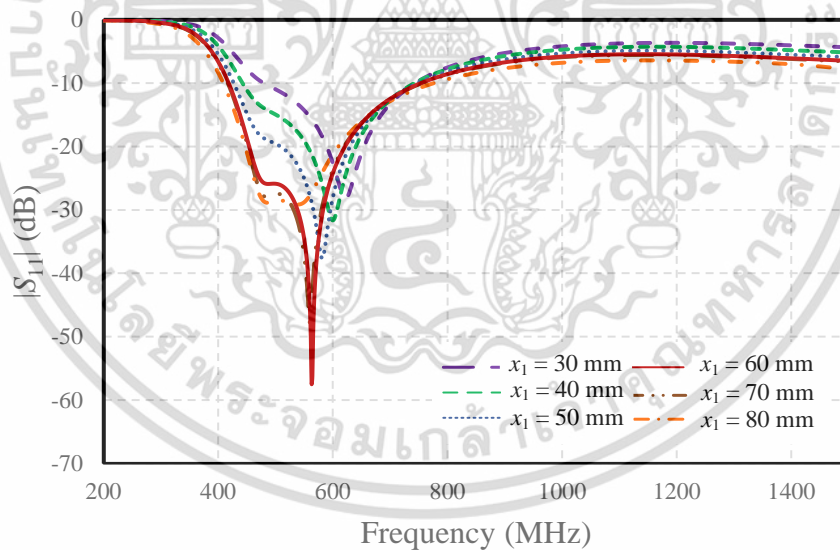
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม

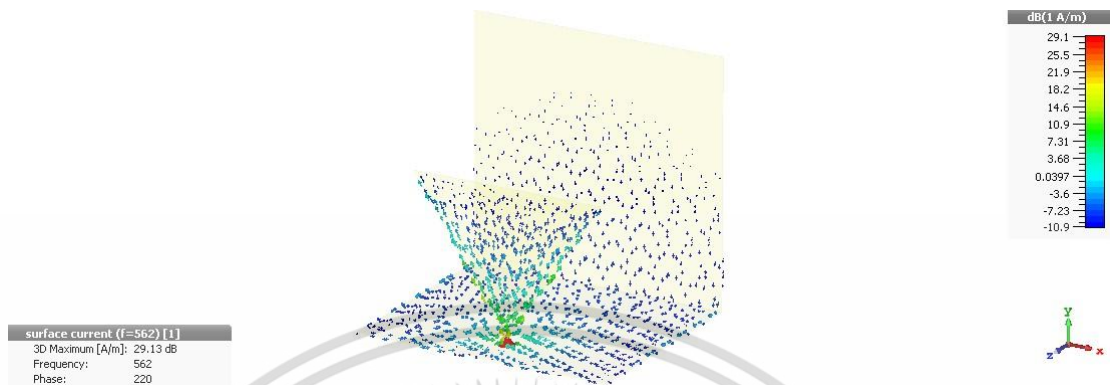
จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของรูปสามเหลี่ยมเพื่อใช้สำหรับออกแบบสายอากาศในแต่ละความถี่นั้น จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์จากการปรับขนาดฐานของรูปสามเหลี่ยม โดยเริ่มจาก 30 mm จนถึง 80 mm โดยการปรับเพิ่มทีละ 10 mm โดยในการจำลองจะใช้ความถี่เท่าการจำลองของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม ซึ่งจากผลการจำลองผลจะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำนั้นที่ความถี่ 562.17 MHz จะได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) ต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 3.5 เมื่อทำการจำลองของสายอากาศสามเหลี่ยมโดยการปรับพารามิเตอร์  $x_1$  ซึ่งเป็นฐานของสายอากาศโดยพิจารณาที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB พบว่าที่ฐานที่ขนาด 60 mm นั้น มีค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่ -57.21 dB ที่ความถี่ที่ 562.17 MHz ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่เมื่อเทียบกับค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของรัศมีอื่น ๆ แต่ผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ตั้งแต่ 1.3 GHz เกิดการเอียงของทิศทางคลื่น จึงทำให้สายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมจะได้แบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม จึงได้ทำการจำลองเพื่อลดระยะการเดินทางของกระแสบริเวณขอบด้านข้าง และในช่วงมุมของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เห็นไปขอปรึกษาขอคำแนะนำการวิจัยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามเหลี่ยมมีการกลับเฟส จึงทำให้มุมทั้งสามของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมนั้นเป็นแหล่งกำเนิดใหม่ และจากผลของกระแสที่หนาแน่นบริเวณขอบของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการกระจายของกระแสเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความถี่ 562 MHz ของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 3.6 แสดงการจำลองการกระจายของกระแสเชิงพื้นผิวของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมจะสังเกตเห็นว่า มีการกระจายกระแสที่ผิวของสายอากาศที่หนาแน่นที่บริเวณพื้นผิวของสายอากาศที่ใกล้กับจุดบ่อนสัญญาณและกระจายโดยทั่วไปในบริเวณตัวสะท้อนคลื่น โดยมีทิศทางการไหลที่ผิวในทิศทางแกน  $\pm x$  และ  $\pm y$  ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมและสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม พบว่าที่  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างกว่า และให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำได้ดีกว่าสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมซึ่งเหมาะที่สุดกับเทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งยวด

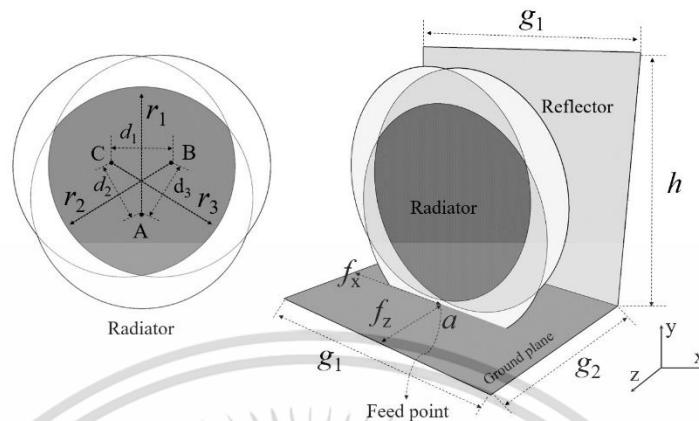
ตารางที่ 3.2 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$g_1$	160	$f_x$	80
$g_2$	130	$f_z$	60
$x_1$	60	$a$	1
$h$	150	$y_1$	107.34

### 3.2.3 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของการรวมกันของจุดตัด (Intersection)

เนื่องจาก  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมที่มีรัศมี 70 mm มีแนวโน้มที่ดีกว่า  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม จึงได้ออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมให้มีการซ้อนทับกันจำนวน 3 วง คือ A B และ C โดยมีรัศมี 70 mm ที่ วงกลม A มีจุดศูนย์กลางห่างมาจากระนาบกราวด์เป็นระยะ 50.28 mm และที่วงกลม B และ C มีจุดศูนย์กลางห่างมาจากระนาบกราวด์เป็นระยะ 70 mm แล้วจึงนำมาหาจุดตัดด้วยทฤษฎีบทพีทาโกรัส จึงทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ระยะห่างระหว่างจุด A, B และ C เป็น  $d_1$   $d_2$  และ  $d_3$  ตามลำดับ ซึ่งได้เป็นรูปแบบของโมนโพลเชิงพื้นผิว [11] และจุดป้อนแสดงด้วย  $a$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7

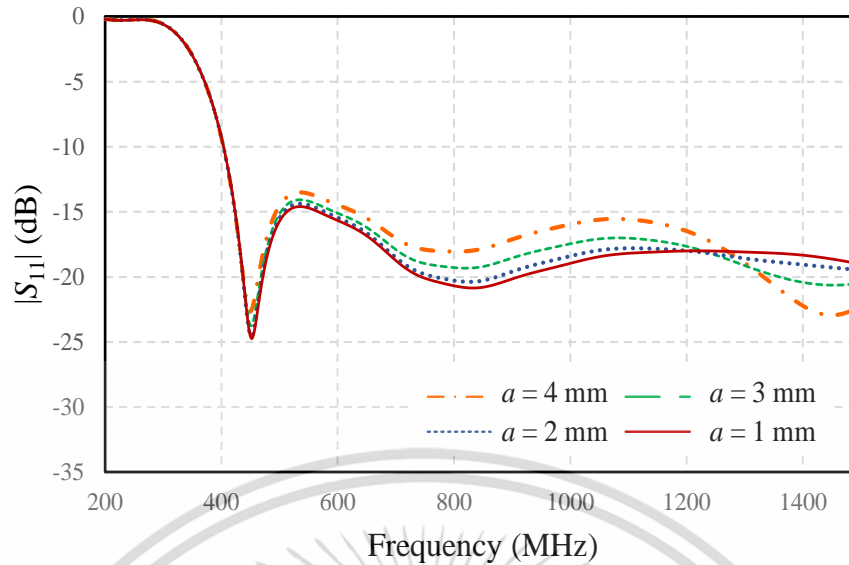


รูปที่ 3.7 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศจากการซ้อนทับกันของวงกลม 3 วง

จากรูปที่ 3.7 การรวมกันของจุดตัดเกิดจากการจำลองป้อนแผ่นแพร่กระจายคลื่นแบบวงกลมพบว่าได้แบนด์วิดท์แคบ จึงสังเกตุดผลจากกระแสที่หนาแน่นบริเวณขอบวงกลม พบว่ากระแสมีความหนาแน่นสูงจากจุดป้อนสัญญาณไปยังบริเวณขอบกลางเท่านั้น โดยขอบของวงกลมมีลักษณะกระแสที่มีความหนาแน่นน้อยมากเหมือนเป็นจุดที่มีความต้านทานสูง ดังนั้นจึงจำลองโดยใช้แผ่นแพร่กระจายคลื่นสามเหลี่ยม เพื่อลดระยะการเดินทางของกระแสบริเวณขอบด้านข้าง เพื่อต้องการให้ความต้านทานบริเวณพื้นที่ที่กระแสเดินทางลดลง พบว่าสามารถขยายแบนด์วิดท์ได้ จากนั้นจึงออกแบบให้ด้านข้างมีระยะเพิ่มขึ้น เพื่อให้กระแสมีความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำ ด้วยคงจุดมุมเดิมของสามเหลี่ยม โดยกำหนดจุดหมุนของวงกลมสามจุดในลักษณะสามเหลี่ยมขอบบนที่ 70 mm และขอบล่างที่ 50 mm โดยมีระยะห่างกับระนาบกราวด์ 1 mm พบว่าแบนด์วิดท์ที่ได้มีความกว้างมากขึ้นครอบคลุมมาตรฐานของ UWB เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง 1 mm ให้เข้าใกล้แผ่นระนาบกราวด์มากขึ้น พบว่าสามารถแมตซิ่งได้ดีที่ความถี่ต่ำ โดยระยะห่างที่ดีที่สุดคือ 0.72 mm ดังนั้นระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของวงกลมวงล่างกับระนาบกราวด์จึงมีขนาด 50.28 mm

### 3.2.4 การปรับตำแหน่งของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิว

เนื่องจากได้ปรับรูปแบบของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวให้มีลักษณะคล้ายรูปแผ่นโล่ โดยการปรับตำแหน่งของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวนั้นจะเริ่มจากการปรับความสูงระหว่างสายอากาศแบบพื้นผิวกับระนาบกราวด์ที่แสดงด้วยพารามิเตอร์  $a$  ปรับขนาดตั้งแต่ 1 mm จนถึง 4 mm ตามลำดับ แต่จะมีการปรับเปลี่ยนขนาดของระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่น  $g_1$  160 mm  $g_2$  150 mm และ  $h$  เป็น 146 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยขนาดและพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.8 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) เมื่อปรับพารามิเตอร์  $a$

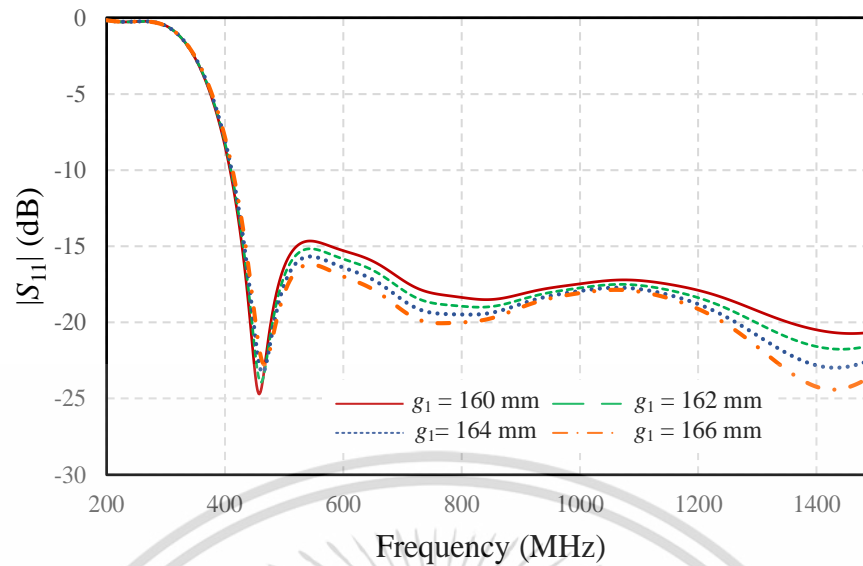
จากรูปที่ 3.8 เมื่อทำการจำลองของพารามิเตอร์  $a$  ซึ่งคือ ความสูงระหว่างสายอากาศแบบพื้นผิวกับระนาบกราวด์โดยพิจารณาที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB พบว่าที่ ระยะ 1 mm นั้นมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่  $-24.8$  dB ที่ความถี่ 453.64 MHz ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของระยะอื่น ๆ แต่ผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่สูงตั้งแต่ 1.3 GHz เกิดการเอียงของทิศทางการคลื่น

ตารางที่ 3.3 ขนาดและพารามิเตอร์ของการปรับตำแหน่งของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิว

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$g_1$	160	$h$	146
$g_2$	150	$a$	1

### 3.2.5 การปรับขนาดความกว้างของระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่น

เนื่องจากได้ทำการปรับพารามิเตอร์  $a$  ซึ่งได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่  $-24.8$  dB ที่ความถี่ 453.64 MHz จึงได้ทำการปรับขนาดความกว้างของระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่น โดยจะทำการเพิ่มขนาดความกว้างของ  $g_1$  โดยเริ่มตั้งแต่ที่ 160 mm ถึง 166 mm ตามลำดับ โดยจะทำการเพิ่มทีละ 2 mm และปรับขนาดของ  $g_2$  เป็น 130 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยขนาดและพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.9 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) เมื่อปรับพารามิเตอร์  $g_1$

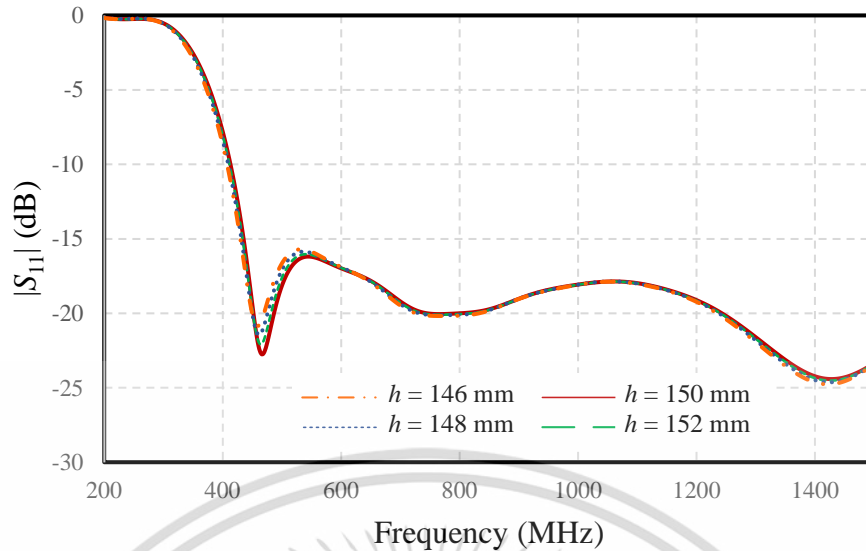
จากรูปที่ 3.9 เมื่อทำการจำลองของพารามิเตอร์  $g_1$  ซึ่งคือ ความกว้างของระนาบกราวด์ และตัวสะท้อนคลื่น โดยพิจารณาที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB พบว่าที่ ระยะ 166 mm นั้นมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่ -23.3 dB ที่ความถี่ 457.31 MHz ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของขนาดอื่น ๆ และผลการจำลองที่ความถี่สูงได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่ -24.86 dB ที่ความถี่ 1.43 GHz

ตารางที่ 3.4 ขนาดและพารามิเตอร์ของการปรับขนาดความกว้างของระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่น

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$g_1$	166	$h$	146
$g_2$	130	$a$	1

### 3.2.6 การปรับความสูงของตัวสะท้อนคลื่น

เนื่องจากได้ทำการปรับพารามิเตอร์  $a$  และ  $g_1$  แต่ที่ความถี่สูงยังคงเกิดการเอียงของทิศทางคลื่น จึงได้ทำการปรับความสูงของตัวสะท้อนคลื่น โดยจะทำการเพิ่มขนาดของ  $h$  โดยเริ่มตั้งแต่ที่ 146 mm ถึง 152 mm ตามลำดับ โดยจะทำการเพิ่มทีละ 2 mm เพื่อให้ได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดทั้งที่ความถี่ต่ำและที่ความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยขนาดและพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.10 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) เมื่อปรับพารามิเตอร์  $h$

จากรูปที่ 3.10 เมื่อทำการจำลองของพารามิเตอร์  $h$  ซึ่งคือ ความสูงของตัวสะท้อนคลื่น โดยพิจารณาที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB พบว่าที่ความสูง 150 mm นั้นมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่ -23.78 dB ที่ความถี่ 463.54 MHz ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของขนาดอื่น ๆ และผลการจำลองที่ความถี่สูงได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ดีที่สุดอยู่ที่ -24.92 dB ที่ความถี่ 1.41 GHz

ตารางที่ 3.5 ขนาดและพารามิเตอร์ของการปรับความสูงของตัวสะท้อนคลื่น

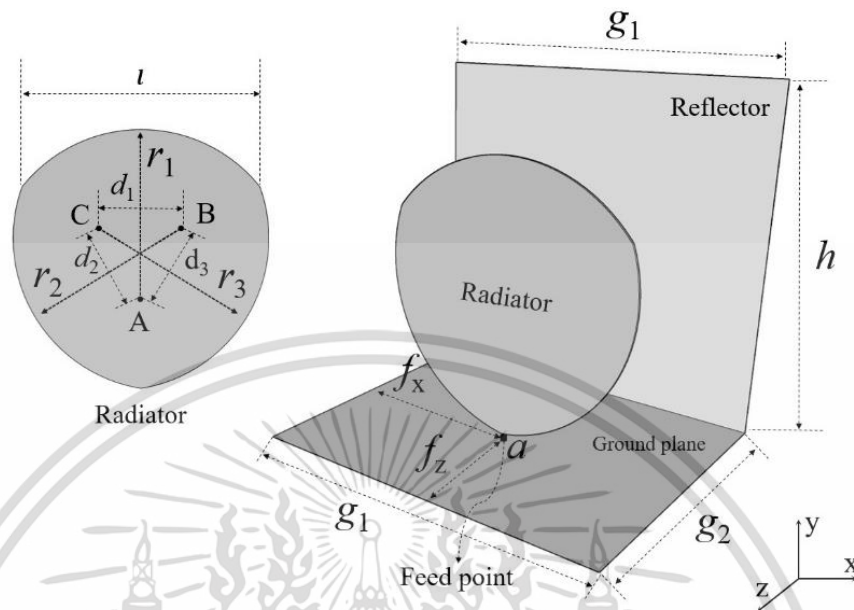
พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$g_1$	166	$h$	150
$g_2$	130	$a$	1

จากตารางที่ 3.5 แสดงขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศซึ่งได้จากการปรับตำแหน่งของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิว ความกว้างของระนาบกราวด์ ตัวสะท้อนคลื่น และความสูงของตัวสะท้อนคลื่น ที่จะนำไปใช้ในการจำลองของสายอากาศในขั้นต่อไป

### 3.3 สายอากาศที่น่าเสนอ

โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวประกอบด้วยจุดตัดของวงกลมสามส่วนโดยมีการรวมกันของรัศมีของตัวแพร่กระจายคลื่นคือ  $\Delta ABC$  คือ  $r_1$   $r_2$  และ  $r_3$  เท่ากัน ระยะห่างระหว่างจุด A B และ C คือ  $d_1$   $d_2$  และ  $d_3$  ความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่น คือ  $l$  ระนาบกราวด์และตัวสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยจะใช้แผ่นทองแดงมีความหนา 1 mm ในการสร้างองค์ประกอบของสายอากาศ ระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่น ตัวแพร่กระจายคลื่นแบบพื้นผิวเหนือระนาบกราวด์ โดยสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวอยู่ระหว่างระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่นนั้นเชื่อมต่อกันในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน ความยาวและความกว้างของระนาบกราวด์และตัวสะท้อนคลื่นคือ  $g_1$  และ  $g_2$  ความสูงของตัวสะท้อนคือ  $h$  ระยะระหว่างสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและระนาบกราวด์แสดงด้วย  $a$  ตำแหน่งของจุดป้อน คือ  $f_x$  และ  $f_y$  ระนาบอ้างอิงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบถูกตั้งไว้ที่จุดบ่อนตัวเชื่อมต่อ (SMA) ซึ่งอยู่ด้านล่างระนาบกราวด์ โดยขนาดและพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 3.6



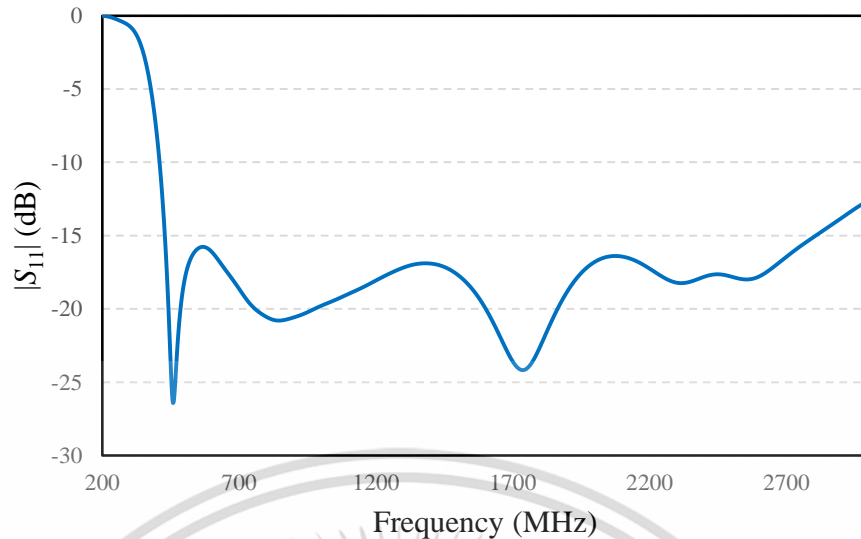
รูปที่ 3.11 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวบนตัวสะท้อนคลื่น

ตารางที่ 3.6 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$g_1$	166	$h$	150
$g_2$	130	$a$	1
$r_1, r_2, r_3$	70	$f_x$	83
$d_1$	20	$f_z$	60
$d_2, d_3$	22.36	$a$	1

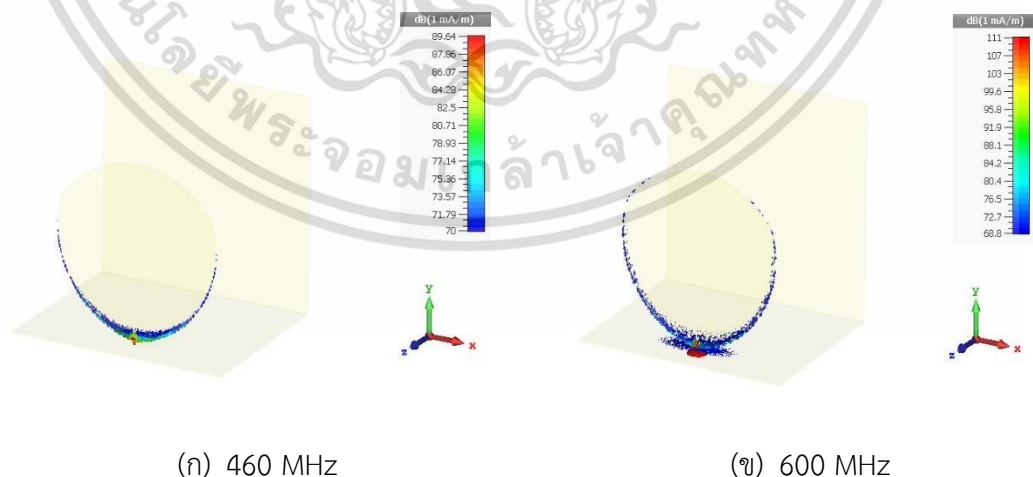
การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่นำเสนอ นั้นจะทำได้โดยการจำลองตั้งแต่ความถี่ตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 3 GHz เพื่อให้ครอบคลุมทั้งในความถี่ต่ำและความถี่สูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด โดยพิจารณาที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3) ดังแสดงในรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3.12 เมื่อทำการจำลองหาค่า  $|S_{11}|$  (dB) หรือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิว ซึ่งผลของการจำลองทำให้สามารถทราบได้ว่าสายอากาศสามารถครอบคลุมการทำงานได้ในทุกช่วงความถี่ แต่ในช่วงความถี่ใช้งานที่ดีที่สุดจะอยู่ตั้งแต่ 460 MHz จนถึง 1.7 GHz โดยสามารถสังเกตได้จากค่า  $|S_{11}|$  (dB) ซึ่งได้ค่าต่ำสุดอยู่ที่ -26.33 dB ที่ความถี่ต่ำและ -23.62 dB ที่ความถี่สูงตามลำดับ แต่เมื่อสังเกตการจำลองของกระแสเชิงพื้นผิวและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จึงเลือกใช้ช่วงความถี่ใช้งานอยู่ที่ตั้งแต่ 460 MHz จนถึง 1.5 GHz และจากผลของกระแสที่หนาแน่นบริเวณขอบของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 3.13 และให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำได้ดีเพราะมีระยะการเดินทางของกระแสได้หลากหลายแต่ที่ความถี่สูงเริ่มเกิดการแบ่งช่วงของกระแสเป็น 2 ช่วง

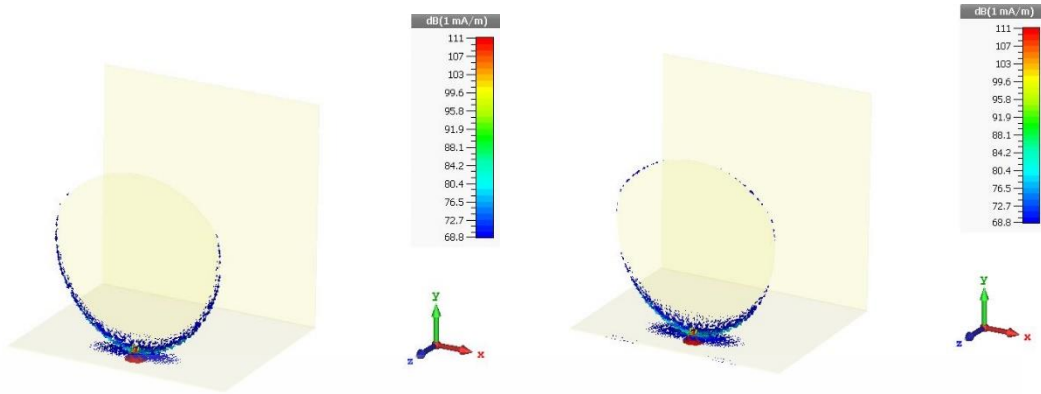


(ก) 460 MHz

(ข) 600 MHz

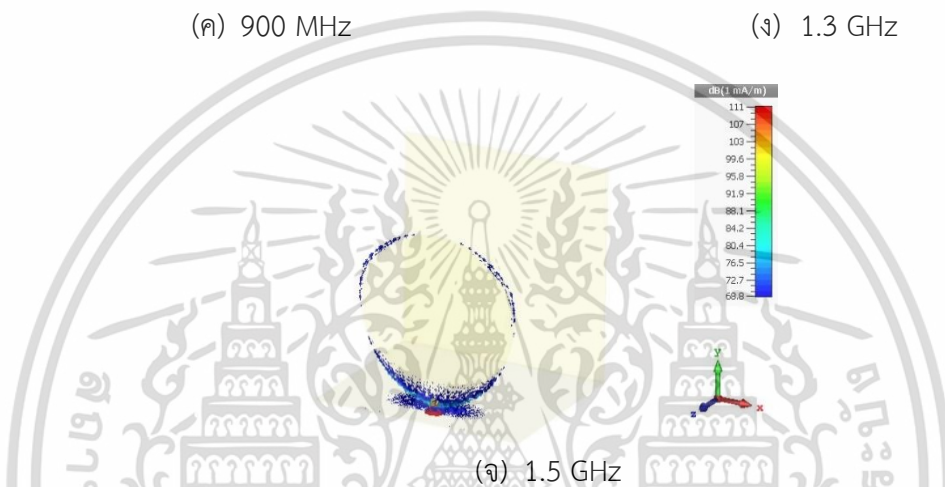
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองการกระจายของกระแสเชิงผิวสายอากาศที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) 900 MHz

(ง) 1.3 GHz



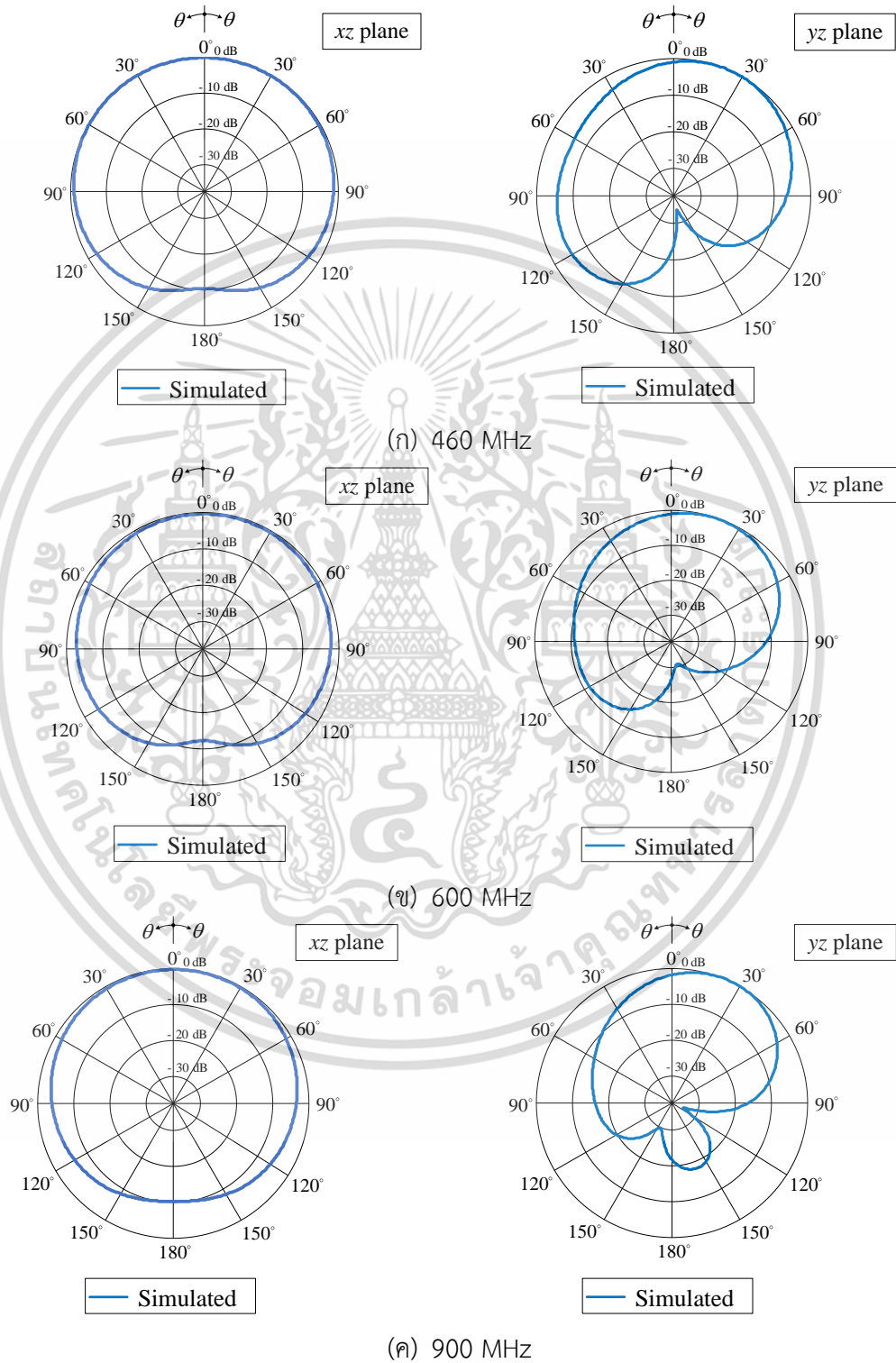
(จ) 1.5 GHz

### รูปที่ 3.13 ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศที่นำเสนอ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.13 แสดงการจำลองการกระจายของกระแสของสายอากาศที่นำเสนอ จะสังเกตเห็นว่า มีการกระจายกระแสที่ผิวของสายอากาศที่หนาแน่นที่บริเวณขอบของสายอากาศที่ใกล้กับจุดป้อนสัญญาณ แต่ที่ความถี่สูงเริ่มเกิดการแบ่งช่วงของกระแสเป็น 2 ช่วงเนื่องจากการกระจายของกระแสนั้นเกิดจากอัตราส่วนที่แปรผกผันกัน โดยใน 1 ความถี่จะมี  $1 \lambda$  และแต่ละ  $\lambda$  ก็จะไม่เท่ากันไม่ว่าจะเป็น  $\lambda$  ยาวหรือสั้นก็จะอยู่ในขอบเขตของสายอากาศโมโนโพลหรือส่วนโค้งของสายอากาศ โดยที่ขอบของสายอากาศนั้น  $\lambda$  จะไม่สามารถไปถึงได้จึงทำให้เกิดการแบ่งเป็น 2 ช่วงโดยที่ช่วงที่ 1 จะอยู่ตั้งแต่จุดป้อนไปจนถึงขอบด้านบนของสายอากาศ นั่นคือระยะที่ดีที่สุดของความถี่ต่ำ

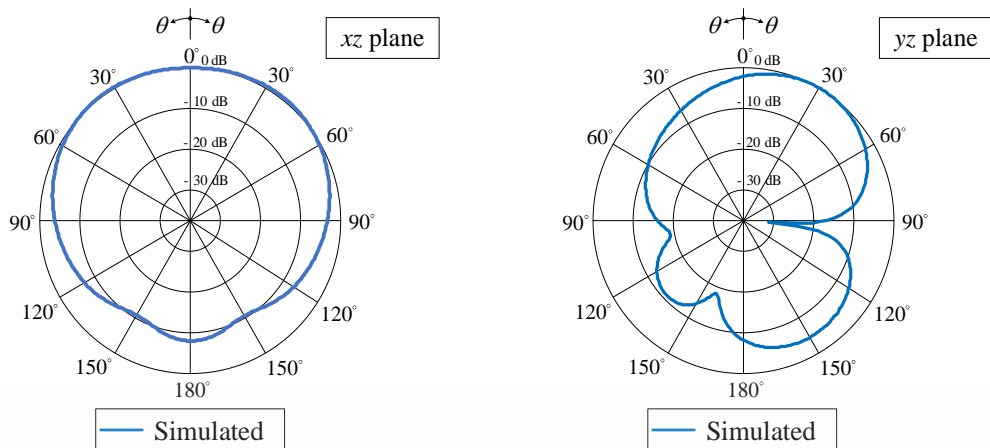
### 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ที่ความถี่ตั้งแต่ 460 MHz ถึง 1.5 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบทั้งสองเป็นแบบทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.14

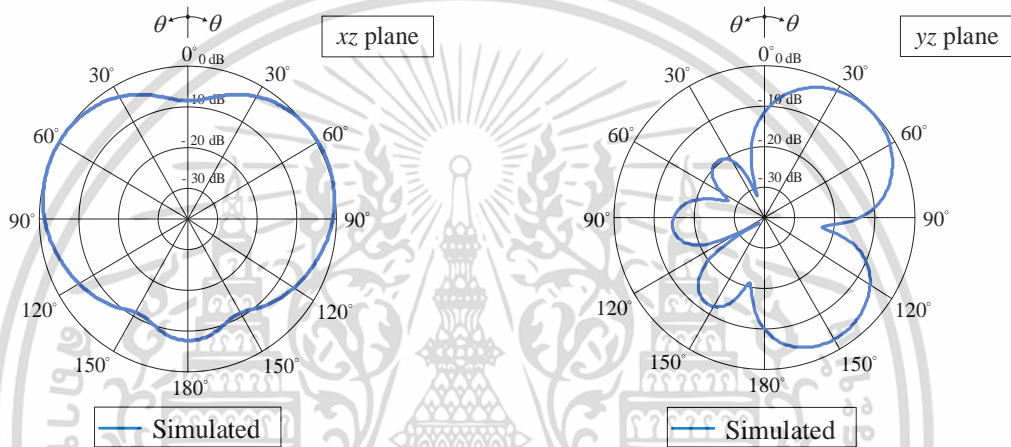


รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) 1.3 GHz



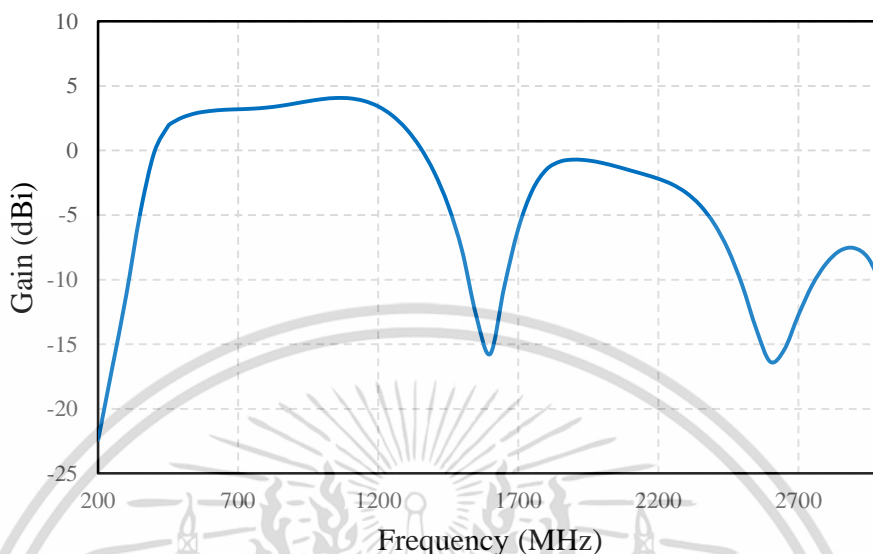
(จ) 1.5 GHz

รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.14 พิจารณาที่ระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ตามลำดับ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนั้น ทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอยู่ในทิศของแกน  $+z$  โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้ง 5 ความถี่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมดเป็นแบบทิศทางเดียว โดยที่ความถี่ต่ำที่ 460 MHz จะสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่สุด ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน โดยการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุดจะอยู่ในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ แต่ที่ความถี่สูงที่ 1.5 GHz ที่มีมุม 0 องศา ในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yx$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นไม่ได้พุ่งออกไปตรงกลางแต่เกิดการเบนของทิศทางคลื่นไปทางซ้าย 60 องศาและขวา 60 องศา ซึ่งจะเริ่มกลายเป็น Higher-mode จึงทำให้ที่มุม 0 องศาที่  $xz$  เกือบจะมีขนาดเท่ากับ -10 dB

### 3.5 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวที่พิจารณาตั้งแต่ช่วงความถี่ 200 MHz ถึง 3 GHz โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 อัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3.15 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวเทียบกับความถี่ สายอากาศมีอัตราขยายสูงในช่วงความถี่ 460 MHz 900 MHz และ 1.3 GHz อัตราขยายของสายอากาศจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ที่ความถี่ 900 MHz จะได้อัตราขยายสูงสุดคือ 3.62 dBi และที่ความถี่ 1.3 GHz จะได้อัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ 1.67 dBi ที่มุม 0 องศา

ตารางที่ 3.7 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิว

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการจำลอง				
ความถี่ที่ออกแบบ	460 MHz	600 MHz	900 MHz	1.3 GHz	1.5 GHz
$ S_{11} $ (dB)	-26.33 dB	-16.14 dB	-20.6 dB	-17.18 dB	-17.73 dB
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว				
อัตราขยายของสายอากาศ	2.08 dBi	3.05 dBi	3.62 dBi	1.67 dBi	-7.8 dBi

### 3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองของสายอากาศ โดยได้เริ่มจากการคำนวณตามทฤษฎีเพื่อหาขนาดของสายอากาศเริ่มต้น และทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมและครอบคลุมทั้งช่วงความถี่ต่ำและช่วงความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดตามข้อกำหนดของ FCC ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการจำลองประกอบไปด้วย  $|S_{11}| \leq -10$  dB ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน ที่ทำให้สายอากาศที่ออกแบบสามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปได้ โดยผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิว สามารถใช้ครอบคลุมการทำงานในความถี่ตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 3 GHz แต่ในช่วงความถี่ใช้งานที่ดีที่สุดอยู่ที่ความถี่ตั้งแต่ 460 MHz จนถึง 1.5 GHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางเดียว โดยที่ความถี่ต่ำที่ 460 MHz จะสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่สุด ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน แต่ที่ความถี่สูงที่ 1.5 GHz ที่มีมุม 0 องศา แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นไม่ได้มีทิศทางกึ่งกลางจากตัวสายอากาศแต่เกิดการเบนของทิศทางคลื่นไปทางซ้าย 60 องศาและขวา 60 องศา ซึ่งจะเริ่มกลายเป็น Higher-mode และมีการกระจายของกระแสเชิงพื้นผิวของสายอากาศโมโนโพลที่ใกล้เคียงกัน ส่วนอัตราขยายของสายอากาศถูกพิจารณา 3 ช่วงความถี่ที่มีอัตราขยายสูงได้แก่ 460 MHz 900 MHz และ 1.3 GHz โดยที่ความถี่ 900 MHz จะได้อัตราขยายสูงสุดคือ 3.62 dBi และที่ความถี่ 1.3 GHz จะได้อัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ 1.67 dBi ที่มีมุม 0 องศา ตามลำดับ

## บทที่ 4

# การประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

### 4.1 บทนำ

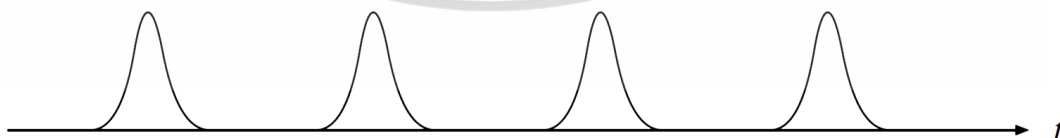
สายอากาศที่ใช้ร่วมกับเซนเซอร์ เช่น เรดาร์หยั่งลึกนั้นจำเป็นต้องมีช่วงความถี่ที่กว้างมาก เนื่องจากมีสัญญาณพัลส์ที่แคบ และการส่งสัญญาณจะเป็นการส่งด้วยการแบ่งช่วงความถี่แบบปล่อยสุ่มโดยจะแบ่งเป็นช่วง ๆ ซึ่งการทำงานร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ก็ทำให้ได้ช่วงความถี่ที่กว้างด้วยเช่นกัน โดยวงจรกำเนิดพัลส์จะส่งสัญญาณในคาบเวลาตั้งแต่ช่วงความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่กว้างมาก ๆ จึงมีผลกับวัตถุที่จะนำมาทดสอบกับในบางความถี่ทำให้สามารถตรวจสอบได้ในทุกความถี่ และวงจรกำเนิดพัลส์ยังสามารถบอกถึงระยะของวัตถุได้เพราะพัลส์เป็นช่วงเวลาที่จะส่งผ่านเข้าไปซึ่งทำให้คลื่นเดินทางช้าลงจึงทำให้ทราบว่าคุณคลื่นผ่านไปในระยะใดบ้างนั่นเอง

### 4.2 รูปร่างของสัญญาณพัลส์ (Pulse shape)

รูปร่างสัญญาณพัลส์ที่ UWB รับผิดชอบโดยทั่วไปบางทีอาจจะเรียกว่าสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ (Gaussian pulse) สัญญาณพัลส์ดังกล่าวมักจะนำมาใช้ในระบบ UWB เพราะว่ามีรูปร่างที่ง่ายต่อการสร้าง โดยสร้างมาจากสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.1(ก) ที่มีระยะความถี่ของสัญญาณในระดับนาโนวินาที หรือพิโควินาที แล้วนำไปผ่านอุปกรณ์ที่มีความเร็วในการตอบสนองช่วงระยะเวลาขอบขาขึ้นหรือขาลงของสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม และการสวิตช์เปิดปิดอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ จะทำให้เกิดรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ไม่ได้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ๆ ที่ถูกทำให้ราบเรียบลง ซึ่งรูปร่างสัญญาณพัลส์จะมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งของฟังก์ชันแบบเกาส์ (Gaussian function) ดังรูปที่ 4.1(ข) หรือ 4.1(ค) ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้ และสัญญาณภาครับในอุดมคติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ง) [35]



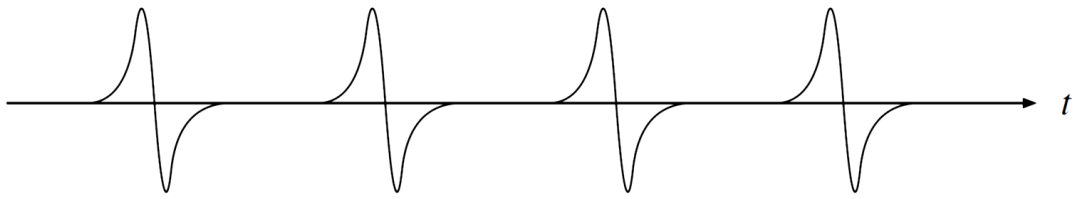
(ก) ขบวนสัญญาณพัลส์ (Pulse train)



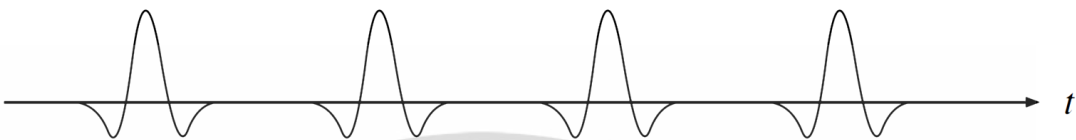
(ข) สัญญาณพัลส์แบบเหมือน Gaussian (Gaussian-like Pulse)

รูปที่ 4.1 รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สัญญาณพัลส์อนุพันธ์ครั้งที่ 1 (First-derivative pulse)



(ง) สัญญาณ Gaussian ที่รับได้

**รูปที่ 4.1** รายละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่สร้างในระบบสื่อสาร UWB โดยทั่วไป (ต่อ)

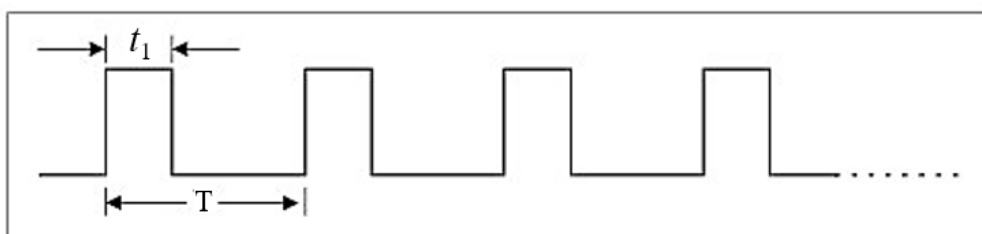
ซึ่งสัญญาณ Gaussian สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.2 และหากสมมติให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเป็นศูนย์ (Zero-mean) จะได้สมการที่เป็นที่มาของคำว่าสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ (Gaussian pulse)

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-x^2/\sqrt{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกาส์  
 $x$  คือ ตัวแปรสุ่มค่า

**4.3 สัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง (Repetitive pulse)**

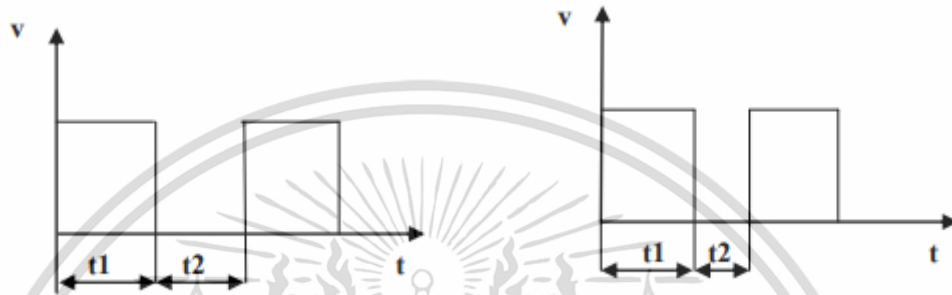
โดยปกติสัญญาณพัลส์อาจมีเพียงแค่คลื่นลูกเดียวเรียกว่า พัลส์เดี่ยว (Single pulse) แต่ถ้าหากพัลส์ที่เกิดขึ้นมีความต่อเนื่องและเกิดคาบเวลาคงที่ (Periodic) จะเรียกพัลส์ที่เกิดขึ้นว่า พัลส์ต่อเนื่อง ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular waveform) แต่จะแตกต่างกันตรงที่สัญญาณสี่เหลี่ยมจะมีค่าตัวชี้ไขเกิล (Duty cycle) หรืออัตราส่วนระหว่างความกว้างของช่วงที่มีพัลส์ต่อคาบเวลาของพัลส์ ซึ่งค่าตัวชี้ไขเกิลของสัญญาณสี่เหลี่ยมจะอยู่ที่ 50% นั่นคือสัญญาณในซีกบวกจะมีความกว้างเท่ากับสัญญาณในซีกลบ แต่ถ้าเป็นสัญญาณพัลส์ต่อเนื่องจะมีตัวชี้ไขเกิลที่อิสระดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่ง  $t_1$  คือ คาบเวลาที่ปรากฏรูปคลื่น และ  $T$  คือ คาบเวลาของรูปคลื่น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 4.2** ลักษณะของพัลส์ต่อเนื่อง [33] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Duty Cycle} = \left( \frac{t_1}{T} \right) 100\% \quad (4.2)$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Rectangular waveform) เกิดจากการรวมตัวของฟังก์ชันขั้นบันไดขึ้นและขั้นบันไดลง ถ้าช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  เท่ากัน จะเรียกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมจตุรัส (Square wave) แต่ถ้าหาก  $t_1$  ไม่เท่ากับ  $t_2$  จะเรียกว่ารูปคลื่นพัลส์ (Pulse wave) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยค่าเฉลี่ยของคลื่นสี่เหลี่ยมและค่าประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.3) และ สมการที่ (4.4) ตามลำดับ



(ก) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมจตุรัส

(ข) รูปคลื่นพัลส์

รูปที่ 4.3 ลักษณะของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม [34]

$$V_{av} = \frac{(V_p \cdot t_1)}{T} \quad (4.3)$$

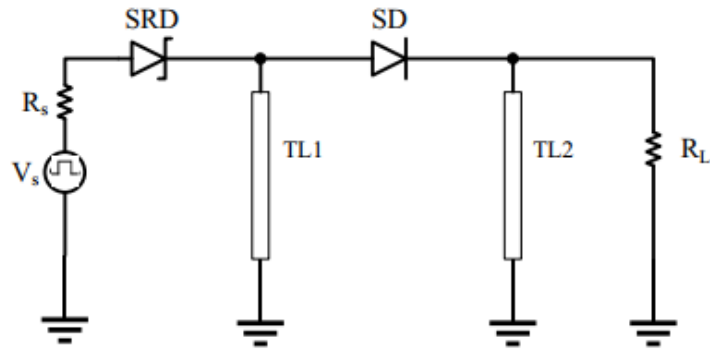
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{t_1}{T}} \cdot V_p \quad (4.4)$$

เมื่อ	$V_{av}$	คือ แรงดันเฉลี่ยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
	$V_{rms}$	คือ แรงดันประสิทธิผล ( $0.707 V_p$ )
	$V_p$	คือ แรงดันไฟฟ้า (ใน 1 ยอดคลื่น)
	$t_1$	คือ คาบเวลาที่ปรากฏรูปคลื่น
	$T$	คือ คาบเวลาของรูปคลื่น

#### 4.4 วงจรกำเนิดพัลส์สำหรับการประยุกต์ใช้งานแถบความถี่กว้างยิ่งยวด

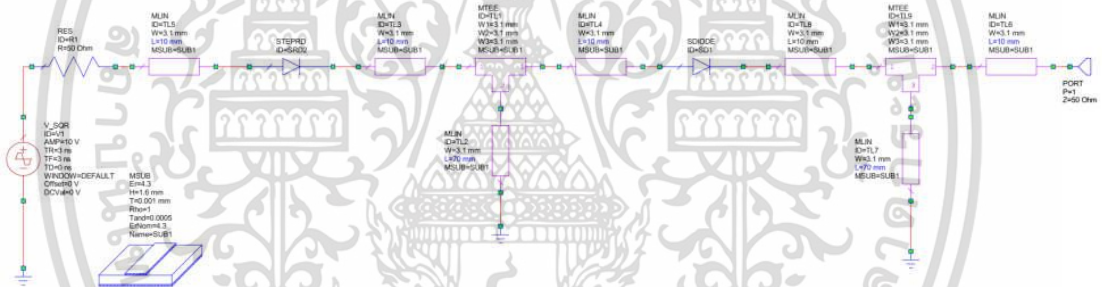
การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับแอปพลิเคชันแถบความถี่กว้างยิ่งยวดด้วยวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ แหล่งกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม ภาคสร้างสัญญาณพัลส์ และภาคปรับรูปแบบสัญญาณพัลส์ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สลับปิดแบบขนาน (Shorted Shunt-Stub)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

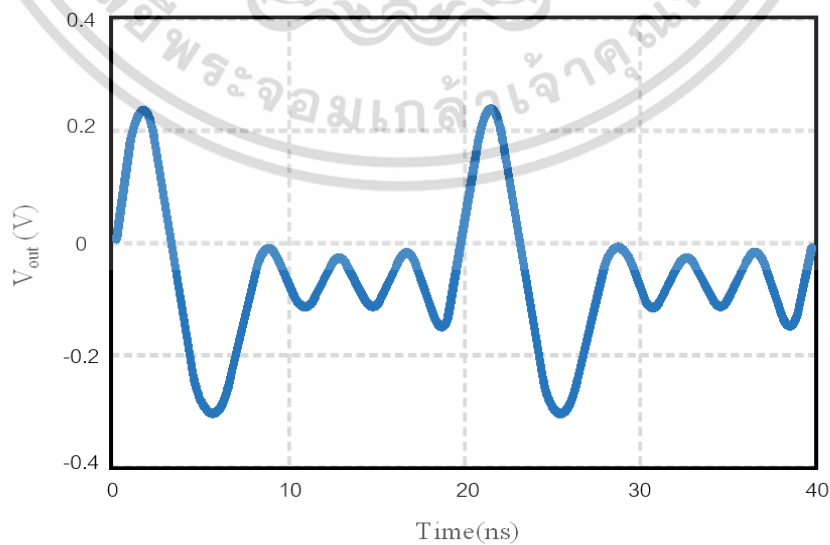


รูปที่ 4.4 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

โดยการจำลองการทำงานของวงจรมันจะใช้โปรแกรม AWR Microwave Office ในการออกแบบ โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 มีค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.6 mm ในส่วนของไดโอด SRD (Step Recovery Diode) จะใช้ที่เบอร์ MAVR-0447 และไดโอด SD (Schottky Diode) ใช้เบอร์ BAT15 เมื่อทำการบ้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีขอบขาขึ้นและขอบขาลงเท่ากับ 2.5 ns ขนาด 10 V พบว่าวงจรที่นำเสนอสามารถที่จะสร้างสัญญาณพัลส์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีขนาด 0.5 Vp-p และมีความกว้างของสัญญาณพัลส์เท่ากับ 7.89 ns



รูปที่ 4.5 การจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม AWR Microwave Office



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.6 สัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



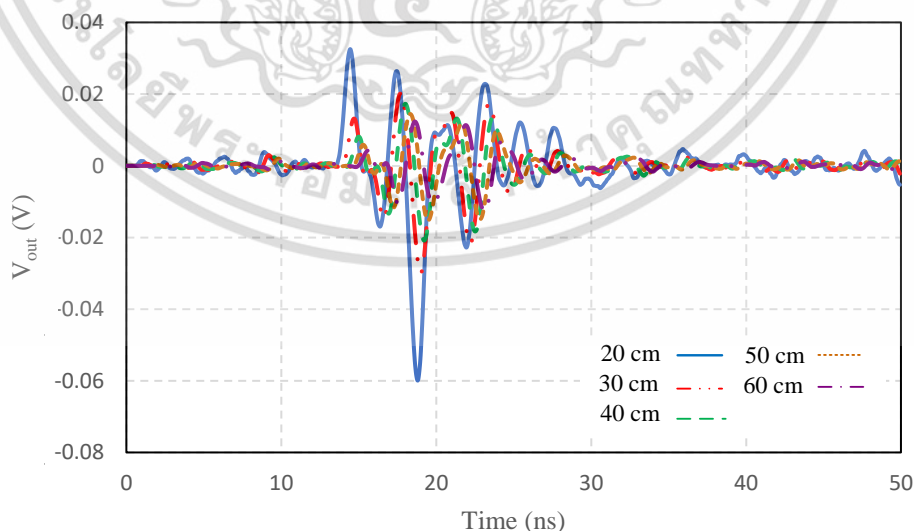
ตารางที่ 4.1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนโดยผ่านตัวกลาง

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$g_1$	166	$h$	150
$g_2$	130	$a$	1
$r_1, r_2, r_3$	70	$f_x$	83
$d_1$	20	$f_z$	60
$d_2, d_3$	22.36	$a$	1
$p$	200-600	$k$	200
$sh$	180	$sw$	700
$sd$	300		

การจำลองการสะท้อนของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนโดยผ่านตัวกลางนั้น จะเริ่มจากการป้อนค่าของสัญญาณพัลส์จากวงจรกำเนิดดังแสดงในรูปที่ 4.6 เข้าไปในโปรแกรม โดยจะจำลองด้วยความถี่ตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 4 GHz และระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้ง 2 จะเริ่มตั้งแต่ 200 mm จนถึง 600 mm ดังที่กล่าวมาข้างต้น และจะทำการเปรียบเทียบผลเพื่อหาระยะห่างที่สายอากาศภาครับและภาคส่งที่สามารถรับส่งกันได้ดีที่สุด โดยในการจำลองจะใช้ตัวกลางเป็นดินร่วนแห้งดังแสดงในรูปที่ 4.8 และดินร่วนเปียกดังแสดงในรูปที่ 4.9

#### 4.5.1 การจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางเป็นดินร่วนแห้ง

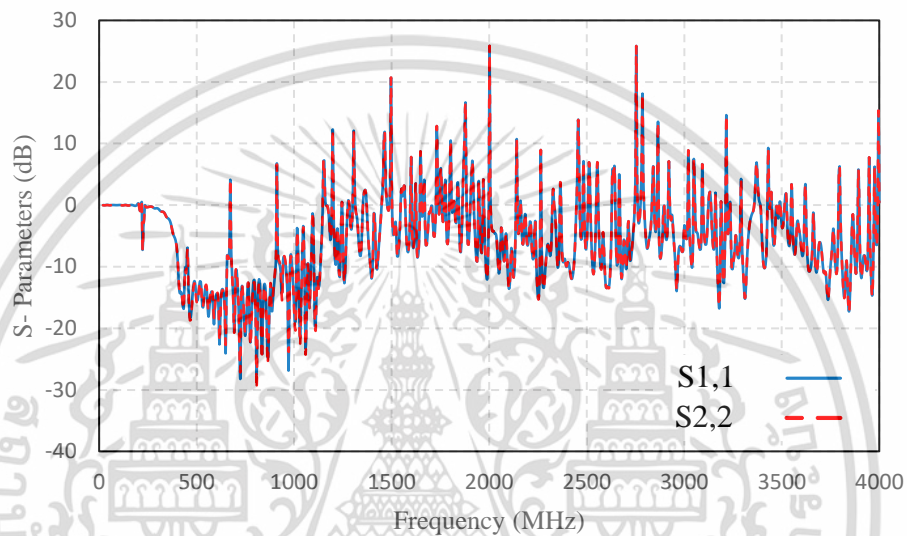
การจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางเป็นดินแห้งนั้นจะเริ่มจากการเปรียบเทียบการสะท้อนกลับของคลื่น โดยระยะห่างของสายอากาศที่จะทำการเปรียบเทียบตั้งแต่ 20 cm จนถึง 60 cm



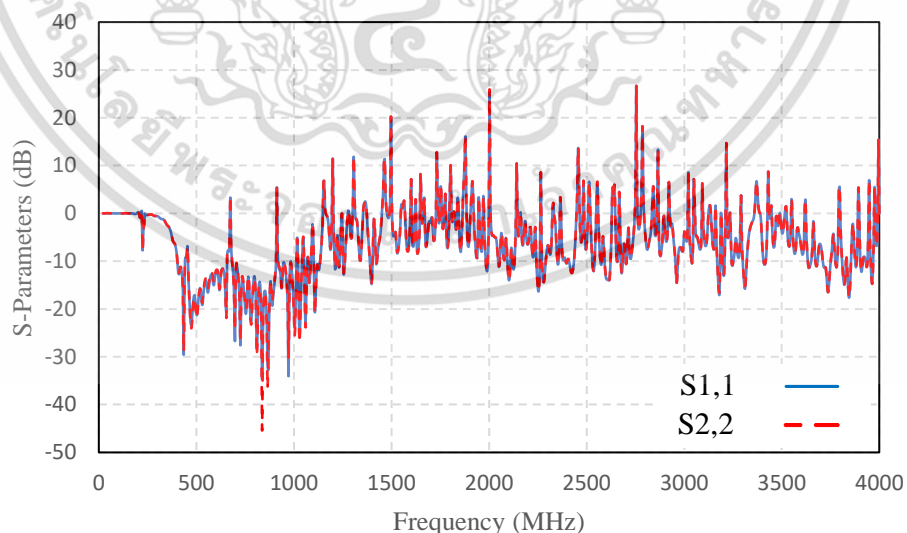
รูปที่ 4.8 สัญญาณขาออกจากการจำลองการสะท้อนที่ผ่านดินร่วนแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการผลการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งก็คือดินร่วนแห้ง โดยเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างสายอากาศตั้งแต่ 20 cm จนถึง 60 cm โดยที่ลูกคลื่นแรกจะเป็นสัญญาณพัลส์ที่ได้ป้อนให้กับสายอากาศในตอนแรก ลูกคลื่นที่สองจะเป็นการจากชั้นมวลดินข้างใน ลูกคลื่นที่สามจะเป็นชั้นมวลดินชั้นลึกสุดหรือมวลดินชั้นสุดท้าย และลูกคลื่นที่สี่จะเป็นอากาศ ซึ่งที่ระยะห่างของสายอากาศที่ 20 cm อาจจะเป็นระยะที่ใกล้กันจนเกินไปจึงทำให้ค่าที่สะท้อนกลับมามีค่าเกิดการกระจัดกระจายของคลื่นจึงทำให้ผลที่ได้ไม่แน่นอนมากนัก แต่ระยะห่างที่แม่นยำมากที่สุดเป็นระยะที่ 50 cm ซึ่งได้ขนาด 0.03 Vp-p และได้สัญญาณที่มีคว้างอยู่ที่ 1.32 ns สังเกตได้จากรูปการซ้อนทับการพอดิของ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ดังแสดงในรูปที่ 4.9(ง)



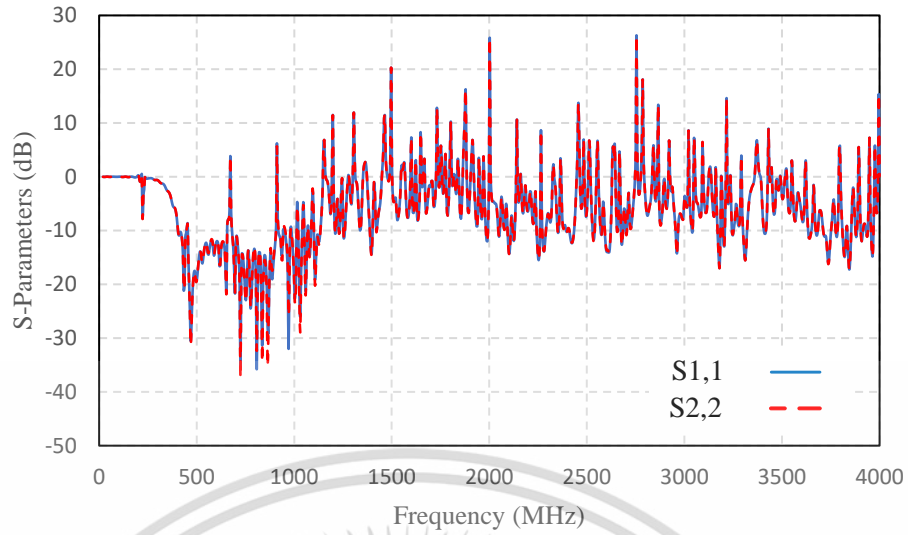
(ก) ระยะห่างของสายอากาศที่ 20 cm



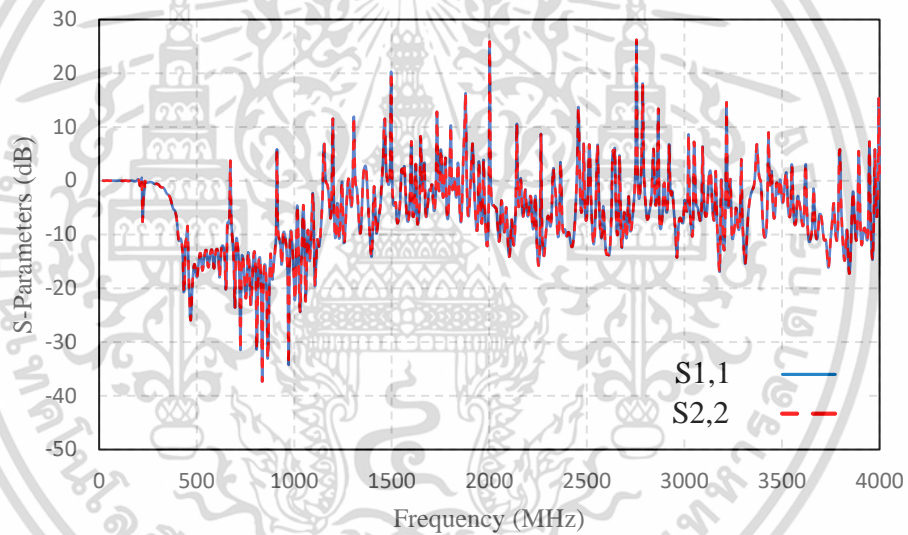
(ข) ระยะห่างของสายอากาศที่ 30 cm

**รูปที่ 4.9** เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอที่ผ่านดินร่วนแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



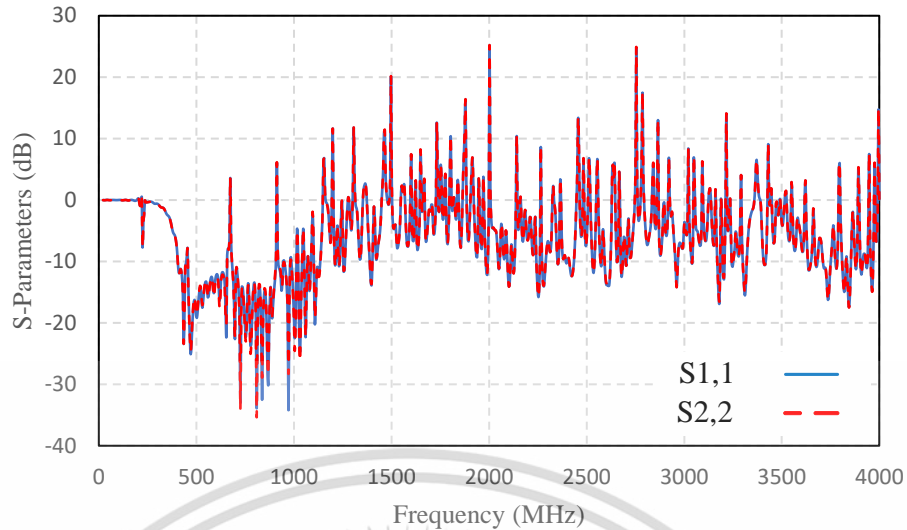
(ค) ระยะห่างของสายอากาศที่ 40 cm



(ง) ระยะห่างของสายอากาศที่ 50 cm

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอ  
ที่ผ่านดินร่วนแห้ง (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

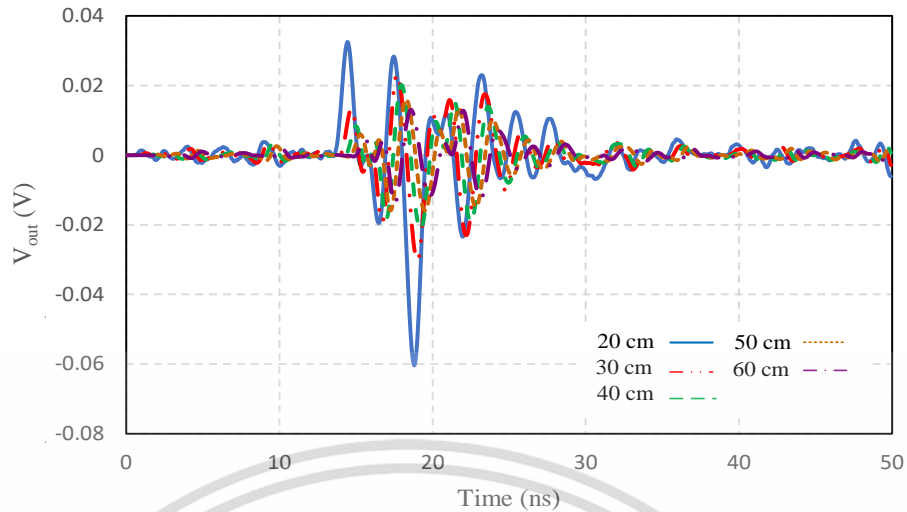


(จ) ระยะห่างของสายอากาศที่ 60 cm  
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอ  
ที่ผ่านดินร่วนแห้ง (ต่อ)

จากรูปที่ 4.9 นั้นคือการเปรียบเทียบของ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ที่เกิดจากการใส่ค่าสัญญาณพัลส์ที่ 20 ns จนถึง 50 ns สายอากาศสามารถรองรับการทำงานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวด และจากรูปที่ 4.9(ง) ที่ระยะห่างของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นอยู่ที่ 50 cm นั้นได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ที่ซ้อนทับกันพอดีเมื่อเทียบกับค่า  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของระยะอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้คำนวณเรื่องระยะห่างของสายอากาศและความเร็วในการสะท้อนกลับของคลื่นนั่นเอง และยังได้ค่าที่แม่นยำมากเท่าไรก็ยิ่งทำให้มั่นใจในประสิทธิภาพของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น แต่ในตัวกลางต่างชนิดกันนั้นก็จะมีความเร็วของคลื่นในตัวกลางที่แตกต่างกันจึงอาจจะส่งผลกระทบต่อระยะต่าง ๆ ของสายอากาศในการส่งและรับสัญญาณได้จึงจำเป็นต้องจำลองกับตัวกลางอื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลอีกครั้งนั่นเอง

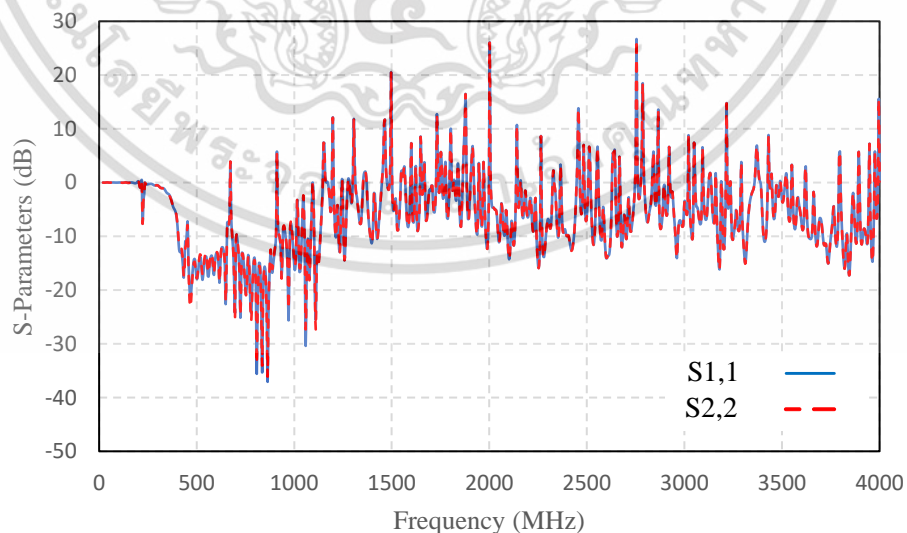
#### 4.5.2 การจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางเป็นดินร่วนเปียก

เนื่องจากได้ทำการจำลองผลของการสะท้อนระหว่างสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นโดยผ่านตัวกลางที่เป็นดินร่วนแห้ง ซึ่งผลที่ได้ไปในแนวทางที่ดีและมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้ทำการจำลองโดยผ่านตัวกลางที่เปลี่ยนไปอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบผลและบ่งชี้ถึงการแยกแยะวัตถุในการทำงานของสายอากาศ โดยจะทำการจำลองด้วยการผ่านตัวกลางที่เป็นดินร่วนเปียกที่มีค่า  $\epsilon_r$  มีค่าที่เปลี่ยนไปนั่นเอง



รูปที่ 4.10 สัญญาณขาออกจากการจำลองการสะท้อนที่ผ่านดินร่วนเปียก

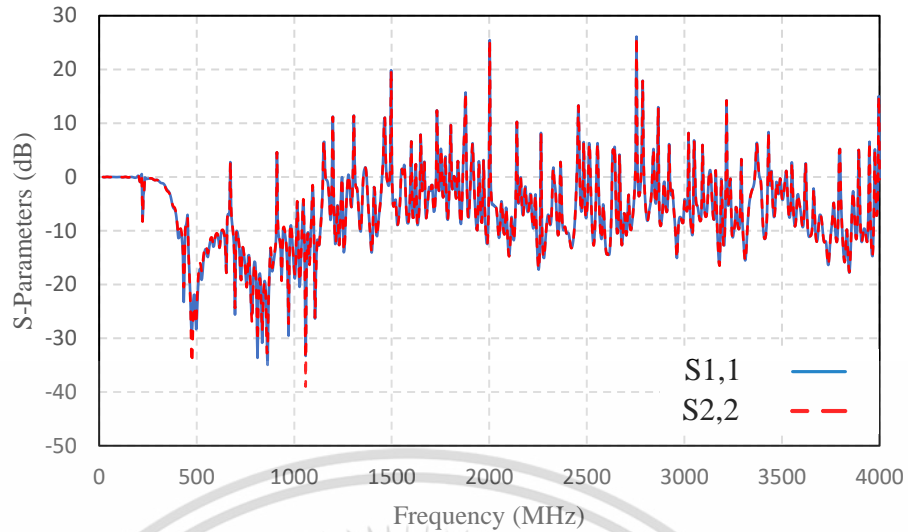
จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการผลการสะท้อนที่ผ่านดินร่วนเปียก โดยเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างสายอากาศตั้งแต่ 20 cm จนถึง 60 cm ซึ่งเหมือนกับการจำลองของดินร่วนแห้ง แต่ที่แตกต่างกับดินร่วนแห้งคือลูกคลื่นที่สองลูกคลื่นที่สามที่ค่าข้างบวก ซึ่งที่ลูกคลื่นที่สองของดินร่วนเปียกค่าข้างบวกจะมีค่าที่สูงกว่าดินร่วนแห้ง และที่ลูกคลื่นที่สามค่าข้างบวกจะลดลงมากกว่าดินร่วนแห้งนั้นเพราะว่าในดินร่วนเปียกมีค่ามวลของน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยซึ่งทำให้ค่า  $\epsilon_r$  มีค่าที่เปลี่ยนไปซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากตารางที่ 2.1 แต่ระยะห่างที่แม่นยำมากที่สุดยังคงเป็นระยะที่ 50 cm ซึ่งได้ขนาด 0.052 Vp-p และได้สัญญาณที่มีความกว้างอยู่ที่ 1.18 ns และสามารถสังเกตได้จากรูปการซ้อนทับการพอดิของ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ง)



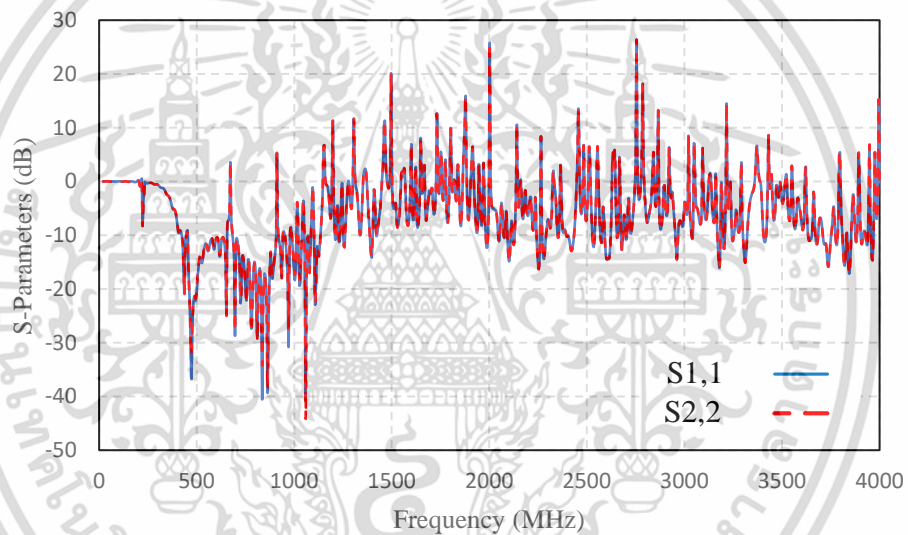
(ก) ระยะห่างของสายอากาศที่ 20 cm

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอที่ผ่านดินร่วนเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



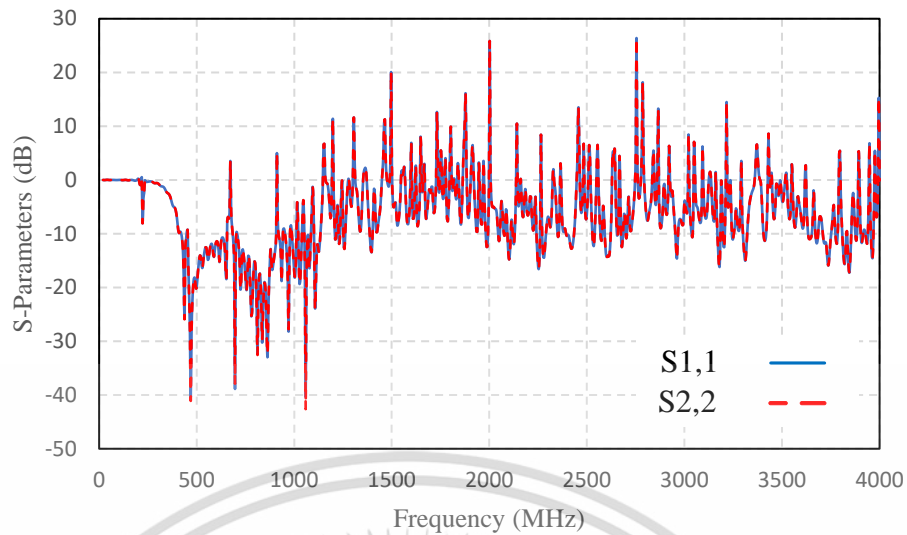
(ข) ระยะห่างของสายอากาศที่ 30 cm



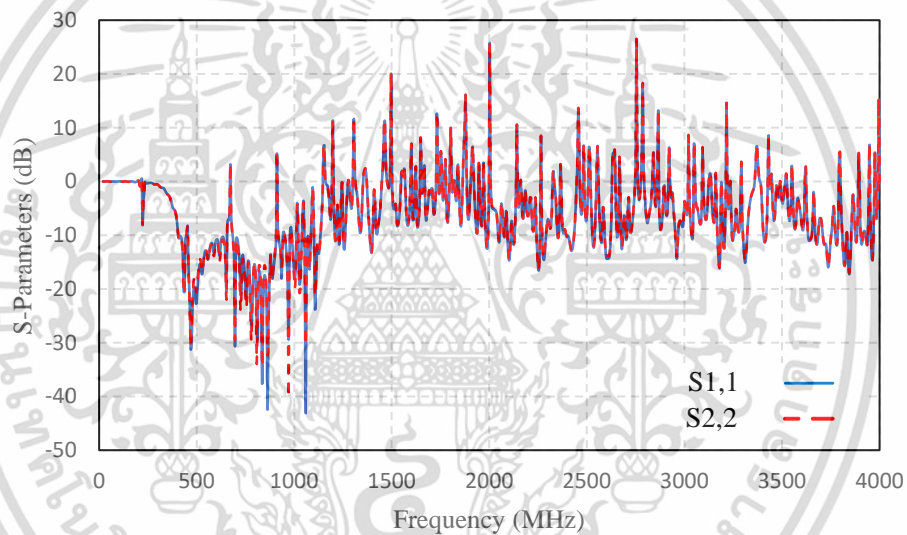
(ค) ระยะห่างของสายอากาศที่ 40 cm

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอนี้  
ที่ผ่านดินร่วนเปียก (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ระยะห่างของสายอากาศที่ 50 cm



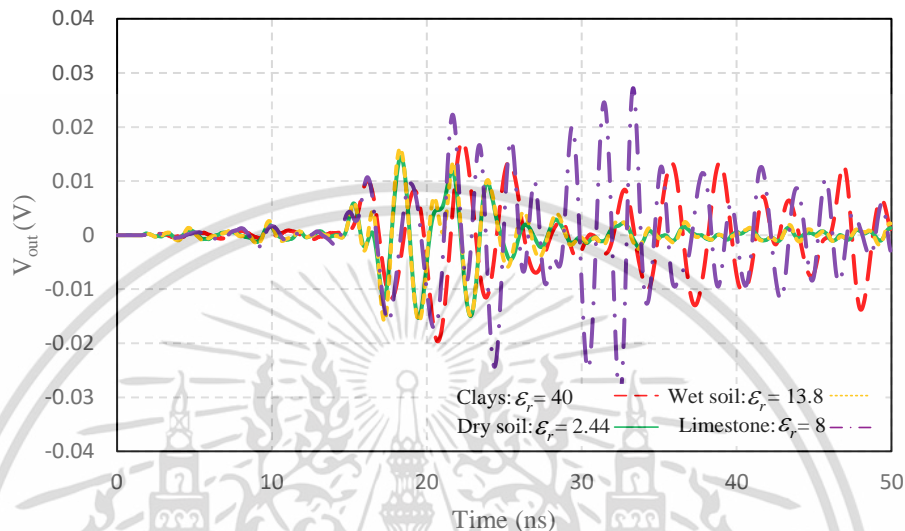
(จ) ระยะห่างของสายอากาศที่ 60 cm

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของสายอากาศที่นำเสนอนี้  
ที่ผ่านดินร่วนเปียก (ต่อ)

จากรูปที่ 4.11 นั้นคือการเปรียบเทียบของ  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ที่คล้ายกับการจำลองของดินร่วนแห้ง ซึ่งผลจากการจำลองที่ดินร่วนเปียกนั้นสอดคล้องกับการจำลองของดินร่วนแห้งเป็นอย่างมาก เนื่องจากที่ระยะห่างของสายอากาศที่ 50 cm ยังคงเป็นระยะห่างที่ดีที่สุดสำหรับการสะท้อนกลับของคลื่นสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.11(ง) ที่ระยะห่างของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นอยู่ที่ 50 cm นั้นได้ค่า  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ที่ค่อนข้างพอเหมาะเมื่อเทียบกับค่า  $|S_{11}|$  (dB) และ  $|S_{22}|$  (dB) ของระยะอื่น ๆ จากผลการจำลองจึงจะนำไปสู่การทดสอบในขั้นต่อไปซึ่งจะใช้ระยะห่างของสายอากาศที่ 50 cm ในการทดสอบเนื่องจากเป็นระยะที่สามารถรับการสะท้อนกลับได้ดีที่สุด และจากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 ทำให้ทราบว่าสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นที่ทำงานร่วมกับวงจรกำเนิดพัลส์สามารถแยกแยะวัตถุตัวกลางต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากผลการสะท้อนที่มีค่าแตกต่างกันนั่นเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.3 การจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวหลายตัวกลาง

เนื่องจากได้ทำการจำลองผลของการสะท้อนระหว่างสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นโดยผ่านตัวกลางทั้งดินร่วนแห้งและดินร่วนเปียก ซึ่งผลที่ได้ไปในแนวทางที่ติดตั้งที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้ทำการจำลองโดยผ่านตัวกลางที่มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลซึ่งในแต่ละตัวกลางจะมีค่า  $\epsilon_r$  ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.12 สัญญาณขาออกจากการจำลองการสะท้อนที่ผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง

จากรูปที่ 4.12 เปรียบเทียบสัญญาณขาออกจากการจำลองการสะท้อนของตัวกลางหลากหลายตัวกลาง สังเกตได้ว่าสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นสามารถทำการแยกแยะตัวกลางต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี โดยการจำลองนี้ได้ใช้ระยะห่างของสายอากาศที่ระยะ 50 cm ในการจำลอง ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถบ่งชี้ถึงความแตกต่างของแต่ละตัวกลางได้นั่นเอง

#### 4.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และการสะท้อนของคลื่นที่ผ่านตัวกลางซึ่งก็คือดินร่วนแห้งและดินร่วนเปียกที่มีค่า  $\epsilon_r$  ที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบผลในระยะห่างของสายอากาศที่ต่างกันออกไปตั้งแต่ 20 cm จนถึง 60 cm เพื่อหาระยะที่สามารถรับส่งคลื่นสะท้อนได้ดีที่สุด ซึ่งก็คือระยะที่ 50 cm และจำลองการแยกแยะวัตถุตัวกลางต่าง ๆ ของสายอากาศอีกด้วยโดยที่ระยะที่ 50 cm สามารถแยกแยะตัวกลางออกมาได้ที่ขนาด 0.03 Vp-p และได้สัญญาณที่มีความกว้างอยู่ที่ 1.32 ns ที่ดินร่วนแห้ง และได้ขนาดที่ 0.052 Vp-p และได้สัญญาณที่มีความกว้างอยู่ที่ 1.18 ns ที่ดินร่วนเปียก ซึ่งผลที่ได้นั้นไปในแนวทางที่ดีและสอดคล้องกับทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 แล้วนั้น และการเพิ่มวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ 20 ns จนถึง 50 ns เข้าไปนั้นทำให้สายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมทั้งช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสัญญาณพัลส์จะใช้การส่งสัญญาณเป็นช่วง ๆ ในคาบเวลาดั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูง วัตถุที่นำมาจำลองจะมีผลกับในบางความถี่จึงทำให้ได้ช่วงความถี่กว้าง ๆ จะสามารถตรวจสอบได้ทุกความถี่นั่นเอง และจากผลการจำลองในครั้งนี้เป็นที่น่าพอใจเป็นอย่างมาก จึงจะนำไปทดสอบกับวัตถุจริงในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งจะพิจารณาคุณลักษณะของ  $|S_{11}|$  (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  และอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการสร้างสายอากาศสำหรับนำมาทดสอบได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 3 และนำผลจากการศึกษาพารามิเตอร์นั้นมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง และยังทำการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อใช้ในการเพิ่มความถี่ให้สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงและทดสอบการสะท้อนกลับของคลื่นโดยผ่านตัวกลางต่าง ๆ

#### 5.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานร่วมกับและวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เพื่อยืนยันความถูกต้องจากผลการจำลอง โดยสายอากาศดังกล่าวมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 460 MHz จนถึง 1.5 GHz ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด และมีแบนด์วิดธ์อย่างน้อย 500 MHz ตามข้อกำหนดของ FCC โดยสายอากาศชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นทองแดงมีความหนา 1 mm โดยมีส่วนประกอบเป็นสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิว ระบายกราวนด์ และตัวสะท้อนคลื่น ขนาดของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวเกิดจากการซ้อนกันของวงกลม 3 วง โดยมีรัศมีวงละ 70 mm ขนาดโดยรวมของระบายกราวนด์คือ 130 mm x 166 mm และขนาดตัวสะท้อนคือ 150 mm x 166 mm ใช้คอนเนคเตอร์ n-type ในการเชื่อมต่อสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



(ก) รูปด้านหน้าของสายอากาศ

(ข) รูปด้านข้างของสายอากาศ

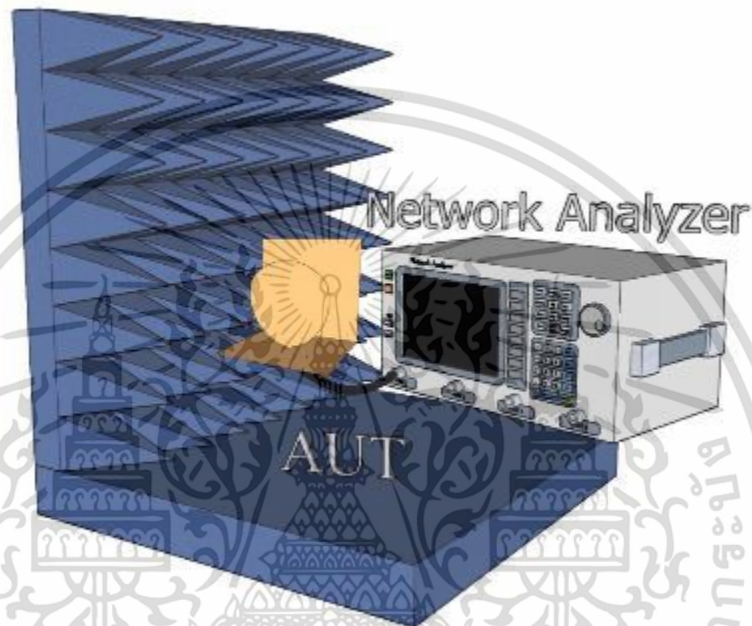
รูปที่ 5.1 สายอากาศที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

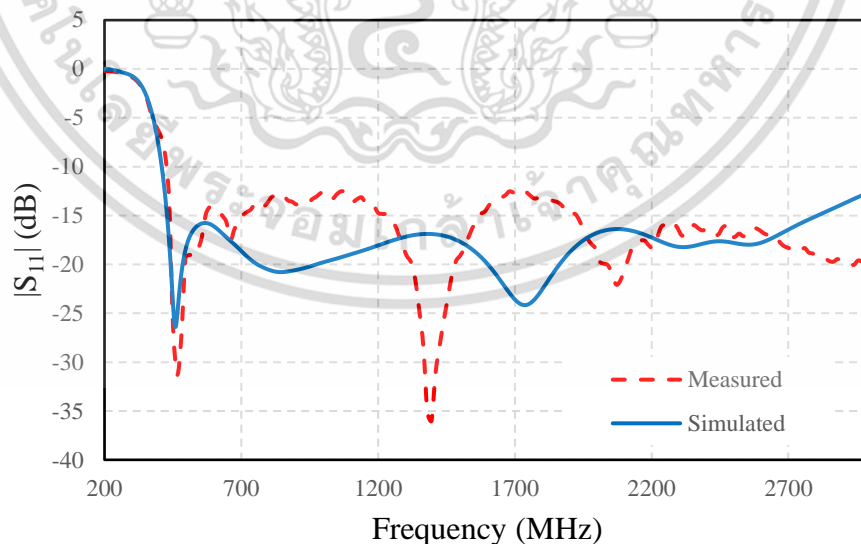
### 5.3 การทดสอบสายอากาศ

#### 5.3.1 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่นำเสนอโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) Agilent รุ่น 8720C และทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อนคลื่น โดยการทดสอบเริ่มต้นจากการนำสายอากาศที่นำเสนอเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (Scattering parameters) ทดสอบที่ความถี่ตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 3 GHz ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศ



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  (dB) จากการจำลองและการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 ความถี่ที่ใช้ได้จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 460 MHz จนถึง 1.5 GHz และ  $|S_{11}|$  (dB) ต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 467.6 MHz คือ -32.14 dB โดยผลจากการทดสอบคำนวณได้จากสมการที่ 2 ซึ่งค่า  $|S_{11}|$  (dB) มีแนวโน้มที่คล้ายกันแต่ผลการทดสอบมีการเกิดความถี่ที่สูงขึ้นเป็นลำดับถัดมาจากความถี่ฮาร์โมนิกที่ 1 (Second harmonic) [36]

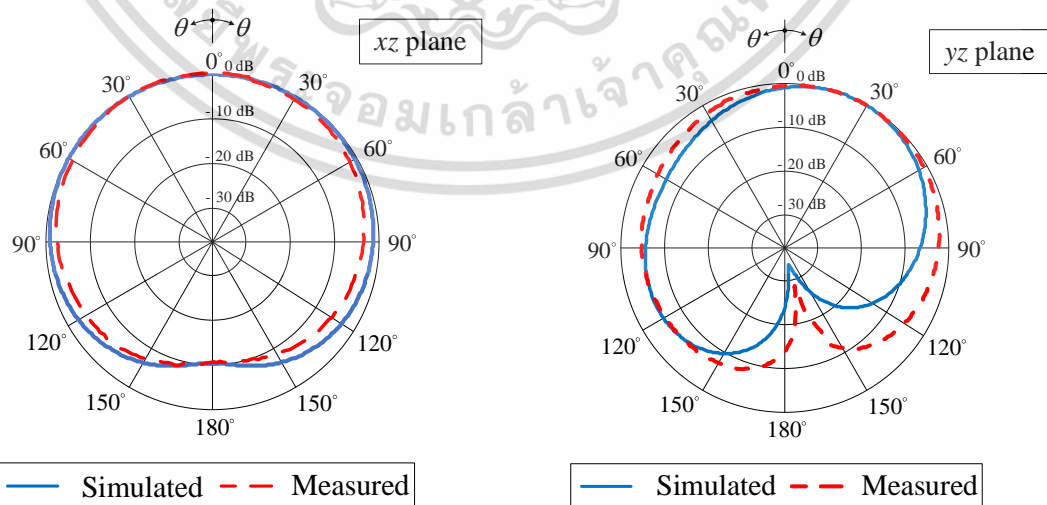
### 5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งมีค่าเท่ากับ 1.5 m ซึ่งอยู่ในระยะของสนามระยะไกล โดยมีทิศทางสายอากาศหันหน้าเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

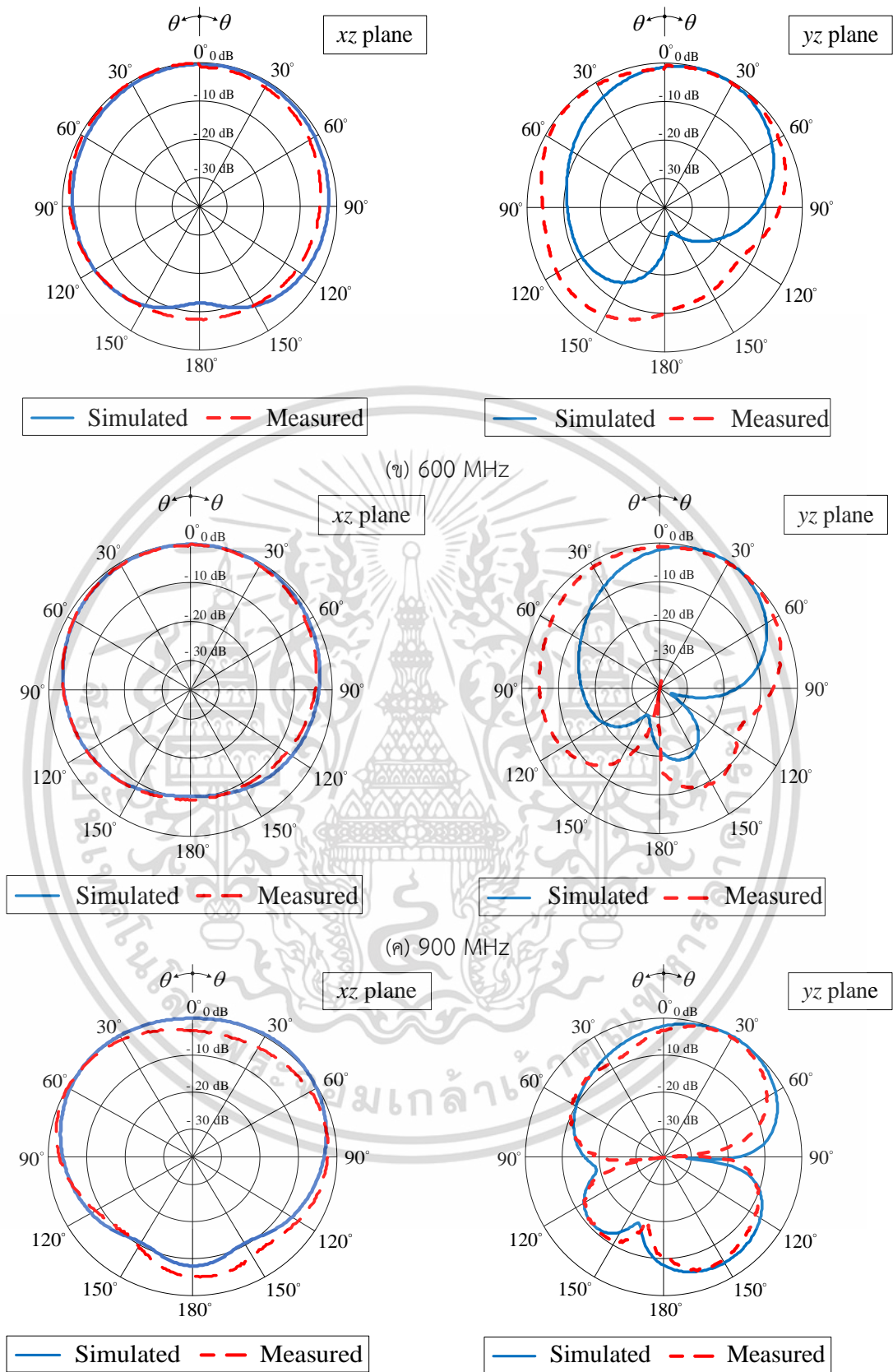
ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ที่ความถี่ตั้งแต่ 460 MHz ถึง 1.5 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบทั้งสองเป็นแบบทิศทางเดียวที่ความถี่ 460 MHz ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน การแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.5



(ก) 460 MHz

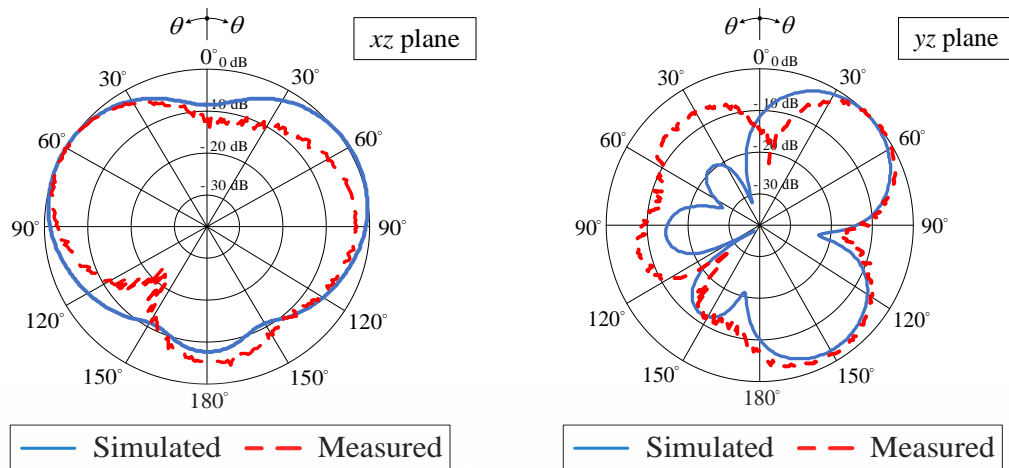
### รูปที่ 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



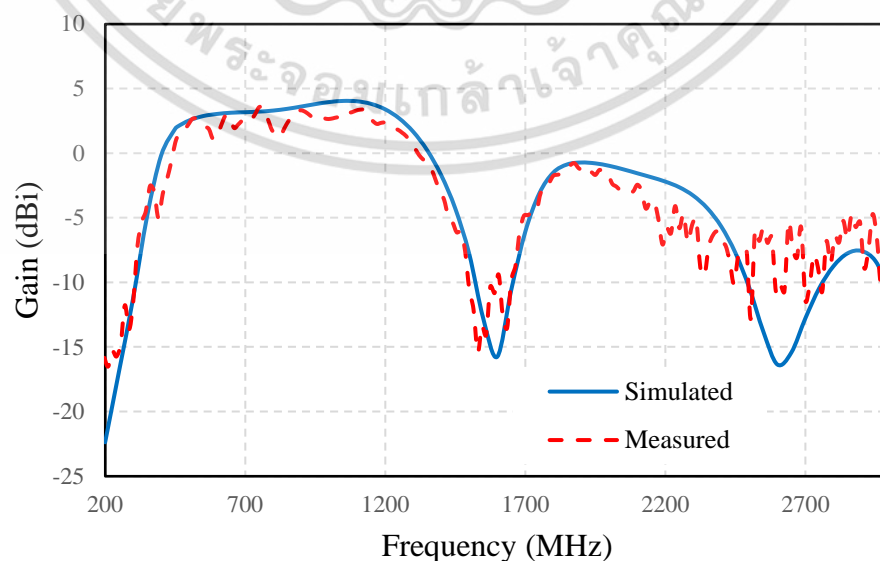
(จ) 1.5 GHz

### รูปที่ 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (ต่อ)

จากรูปที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการจำลองและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยทำการทดสอบพิจารณาที่ระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบไปในทางเดียวกันกับการจำลอง ซึ่งการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอยู่ในทิศของแกน  $+z$  ซึ่งได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมดเป็นแบบทิศทางเดียว โดยที่ความถี่ต่ำสุดที่ 460 MHz จะสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่สุด ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน แต่ที่ความถี่สูงที่ 15 GHz ที่มุม 0 องศา ในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นไม่ได้มีทิศทางแพร่กระจายออกจากตรงกลางของสายอากาศแต่เกิดการเบนของทิศทางคลื่นไปทางซ้ายที่ 60 องศาและขวา 60 องศา ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง

#### 5.3.3 อัตราขยายของสายอากาศ

ในการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่แสดงดังรูปที่ 5.6 ซึ่งสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นจะมีอัตราขยายสูงในช่วงความถี่ 460 MHz 900 MHz และ 1.3 GHz ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น โดยผลการจำลองและการทดสอบมีผลที่สอดคล้องกัน ซึ่งผลการจำลองมีอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 900 MHz จะได้อัตราขยายคือ 3.62 dBi และจากการทดสอบคือ 3.37 dBi และผลจากการจำลองที่อัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 1.5 GHz จะได้อัตราขยายคือ -17.8 dBi และจากการทดสอบคือ -10.57 dBi ที่มุม 0 องศา

จากผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น ผลปรากฏว่ามีความคล้ายคลึงกันเป็นอย่างมากและสามารถครอบคลุมการทำงานได้ทั้งในช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดจึงมีความเหมาะสมจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานกับระบบเซนเซอร์ เช่น เรดาร์หยั่งลึก ที่ต้องการสายอากาศที่มีความถี่กว้างมาก ๆ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจเป็นอย่างมาก

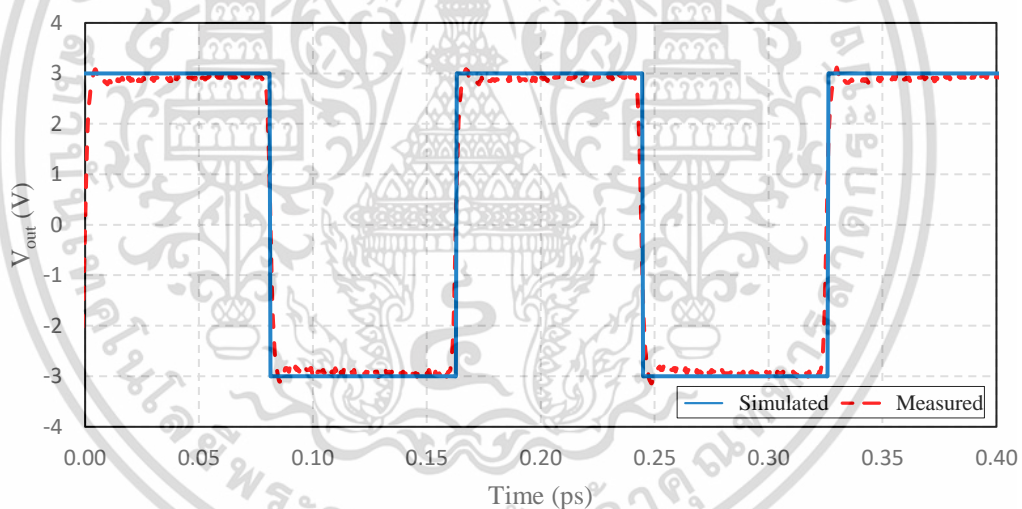
#### 5.4 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เนื่องจากแอปพลิเคชันเรดาร์หยั่งลึกต้องการช่วงความถี่กว้างมาก ๆ จึงได้นำเอาวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์มาใช้ในการช่วยขยายช่วงสัญญาณและยังสามารถตรวจสอบได้ในทุกความถี่ ซึ่งจากการจำลองวงจรต้นแบบในโปรแกรมดังที่กล่าวมาในบทที่ 4 จึงได้ทำการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 และมีขนาด 10.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยเริ่มแรกนั้นจะใช้ SRD ซึ่งเป็นไดโอดที่สามารถสร้างพัลส์สั้นมาก ๆ ที่จะรับการป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมสำหรับการเปิดปิดกระแส คือนำกระแสไบอัสตรงและไบอัสกลับซึ่งถ้าจะให้เกิดการเปิดปิดได้นั้น SRD ต้องสามารถทำงานได้รวดเร็วมากพอที่จะทำให้สวิทช์เปิดปิดได้ และทำให้ช่วงของสัญญาณพัลส์ขึ้นและลงหรือคือช่วงที่ไดโอดนำกระแสกับไม่นำกระแส จึงต้องป้อนพัลส์สี่เหลี่ยมที่เป็นช่วงด้านบวกเข้าไป แต่ในช่วงที่เปลี่ยนเป็นด้านลบไดโอดจะต้องสามารถเปลี่ยนกลับได้ทัน ซึ่งช่วงความถี่ของเกาส์เซียนพัลส์จะขึ้นอยู่กับช่วงความแคบของสัญญาณพัลส์ และยังมี SD ที่ต่อแบบอนุกรม ซึ่ง SD จะทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นโดยส่งเฉพาะช่วงครึ่งด้านบวกและจะลบช่วงครึ่งด้านลบออก และสามารถป้องกันกรย้อนกลับได้รวดเร็ว ซึ่งจะควบคุมสัญญาณที่มีแอมพลิจูดที่มากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสกระแสตรง เพราะ SD สามารถลบในช่วงครึ่งด้านลบออกไปได้และไม่ทำให้เกิดการสูญเสียแอมพลิจูดของพัลส์ไป จึงทำให้มีช่วงพัลส์ที่แคบ ซึ่งวงจรพัลส์นี้จะทำงานใน time domain และเมื่อนำไปวัดใน frequency domain จะทำให้เป็นเกาส์เซียนพัลส์มีช่วงความถี่กว้างมาก ๆ นั้นเอง



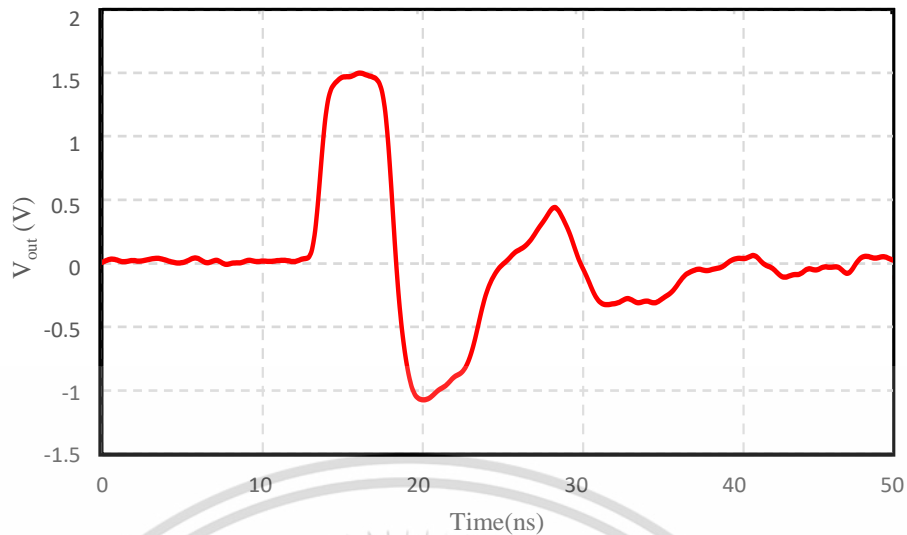
รูปที่ 5.7 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ต้นแบบ

จากรูปที่ 5.7 ได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ร่วมกับเครื่องกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นตัวสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมนั้น เพื่อเป็นสัญญาณขาเข้าก่อนที่จะทำการแปลงค่าเพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8



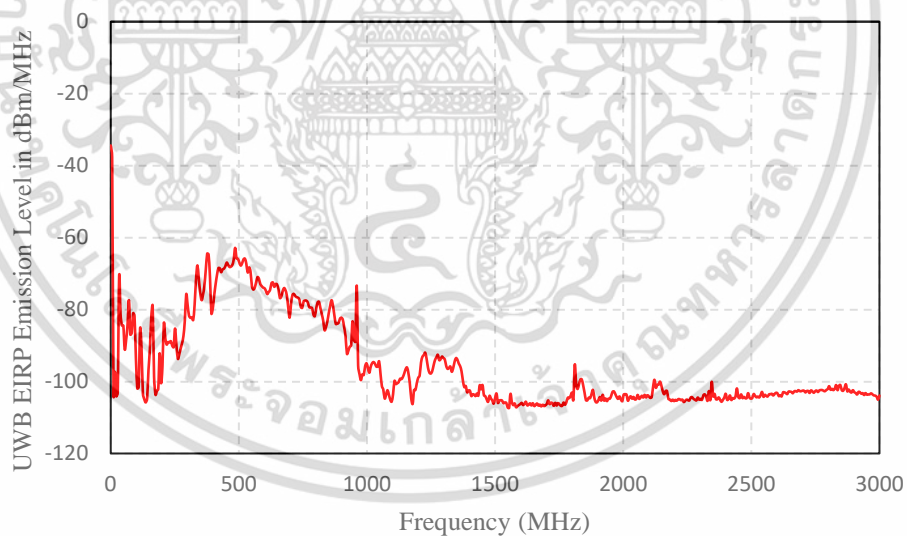
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบของสัญญาณสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบของสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม เมื่อทำการป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 1 MHz เป็นขนาด 23.3 V<sub>p-p</sub> ซึ่งเป็นแรงดันที่ต่างกับแบบทดสอบ จึงทำให้ช่วงของสัญญาณพัลส์ของผลการทดสอบสูงขึ้น และทำการปรับสัญญาณให้เป็นรูปสัญญาณแบบเกาส์เซียนพัลส์ซึ่งในลูกคลื่นที่สองจะเรียกว่า สัญญาณพัลส์อนุพันธ์ครั้งที่ 1 (First-derivative pulse) ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบของสัญญาณพัลส์ต้นแบบ

จากรูปที่ 5.9 พบว่าวงจรสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 2.9 ns ขนาด 7.7 Vp-p ซึ่งที่ทำการเพิ่มแรงดันเพื่อให้การวัดค่าการสะท้อนมีความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และได้แมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์ม และเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่พบว่าสัญญาณพัลส์ที่ได้นี้ให้ความถี่ได้ตั้งแต่ 0 Hz จนถึง 1.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งแสดงผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในโดเมนความถี่พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน



รูปที่ 5.10 สัญญาณพัลส์จากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ต้นแบบในโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการทดสอบ				
ความถี่ที่ออกแบบ	460 MHz	600 MHz	900 MHz	1.3 GHz	1.5 GHz
$ S_{11} $ (dB)	-32.07 dB	-16.38 dB	-14.2 dB	-25.18 dB	-30.29 dB
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว				
อัตราขยายของสายอากาศ	-3.19 dBi	1.57 dBi	3.37 dBi	-5.23 dBi	15.8 dBi

### 5.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งผลทดสอบที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับผลการจำลองเป็นอย่างมาก โดยจะพิจารณาคูณลักษณะของ  $|S_{11}|$  (dB) ซึ่งได้ค่าต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 467.6 MHz และ  $|S_{11}|$  (dB) มีแนวโน้มที่คล้ายกันแต่ผลการทดสอบมีการเกิดความถี่ที่สูงขึ้นเป็นลำดับถัดมาจากความถี่ฮาร์โมนิกที่ 1 (Second harmonic) และในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ซึ่งผลการทดสอบไปในทางเดียวกันกับการจำลอง แต่ที่ความถี่สูงที่ 15 GHz ที่มีมุม 0 องศา ในระนาบ xz และระนาบ yz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นไม่ได้แพร่กระจายคลื่นออกจากตรงกลางของสายอากาศแต่เกิดการเบนของทิศทางคลื่นไปทางซ้ายที่ 60 องศาและขวา 60 องศา อัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 900 MHz จะได้อัตราขยายคือ 3.62 dBi และจากการทดสอบคือ 3.37 dBi และผลจากการจำลองที่อัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 1.3 GHz จะได้อัตราขยายคือ 1.67 dBi และจากการทดสอบคือ 0.23 dBi และยังได้ทำการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ซึ่งพบว่าวงจรสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 2.9 ns ขนาด 7.7 Vp-p แต่เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่พบว่าสัญญาณพัลส์ที่ได้นี้ให้ความถี่ได้ตั้งแต่ 0 Hz จนถึง 1.5 GHz ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ในการเพิ่มความกว้างของช่วงความถี่ให้สามารถครอบคลุมทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะในการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแอปพลิเคชันเรดาร์หยั่งลึก แต่เนื่องจากสถานการณ์ไวรัสโคโรน่า (COVID-19) จึงทำให้ไม่สามารถนำสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นออกไปทำการทดสอบการสะท้อนในสภาพแวดล้อมจริงได้ จึงทำให้ไม่มีผลการทดสอบเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองนั่นเอง

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นสำหรับประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ ที่สามารถรองรับการทำงานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูงของย่านความถี่กว้างยิ่งยวด โครงสร้างเรียบง่ายไม่ซับซ้อน และเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งเริ่มจากการหาขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศเพื่อให้คุณลักษณะของสายอากาศนั้นสอดคล้องกับมาตรฐาน UWB ตามข้อกำหนดของ FCC เพื่อนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับใช้งานจริงต่อไป

ในบทนี้จะแบ่งหัวข้อหลักออกเป็น 2 หัวข้อ โดยในหัวข้อแรกจะกล่าวถึง พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น รวมไปถึงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ และการจำลองการทดสอบของวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ และในส่วนที่สองนั้นจะเป็นการเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานสายอากาศในช่วงความถี่กว้างยิ่งยวด (UWB) รวมไปถึงวิธีการออกแบบสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® ในการจำลองผลเพื่อหาขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม เพื่อนำค่าพารามิเตอร์เพื่อนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ และนำไปทดสอบคุณสมบัติต่อไป

มาตรฐานของเทคโนโลยี UWB นั้นถูกแบ่งย่านการใช้งานออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ UWB ช่วงความถี่สูง (3.1 GHz ถึง 10.6 GHz) และ UWB ย่านความถี่ต่ำ (460 MHz ถึง 960 MHz) ที่จะต้องมีแบนด์วิดท์ไม่น้อยกว่า 500 MHz ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการออกแบบสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งมีคุณลักษณะของสายอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งานในช่วงความถี่ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวด โดยมุ่งเน้นไปที่มีการออกไปไม่ซับซ้อน และสามารถครอบคลุมการทำงานได้ในทุกความถี่ เพื่อง่ายต่อการทำไปประยุกต์ใช้งาน

การออกแบบสายอากาศเพื่อนำไปจำลองเริ่มจากการคำนวณขนาดเริ่มต้นตามทฤษฎีของสายอากาศไดโพล ตามด้วยการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศจนทำให้สายอากาศดังกล่าวมีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้บนเทคโนโลยี UWB ตามข้อกำหนดของ FCC โดยสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.6 ซึ่งมีช่วงความถี่ที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB ตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 3 GHz แต่มีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 460 MHz จนถึง 1.5 GHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง อันเป็นผลมาจากการกระจายของกระแสเชิงพื้นผิวของสายอากาศโมโนโพลบนตัวสะท้อนคลื่นทั้งด้านล่างและด้านหลังดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.13 โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางเดียว และที่ความถี่ต่ำที่ 460 MHz จะสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่สุด ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน แต่ที่ความถี่สูงที่ 1.5 GHz ที่มีมุม 0 องศา แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นไม่ได้แพร่กระจายออกจากตรง

กลางของสายอากาศแต่เกิดการเบนของทิศทางคลื่นไปทางซ้าย 60 องศาและขวา 60 องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเริ่มกลายเป็น Higher-mode และมีอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 900 MHz จะได้อัตราขยายคือ 3.62 dBi และผลจากการจำลองที่อัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 1.5 GHz จะได้อัตราขยายคือ -17.8 dBi ตามลำดับ

การออกแบบและการจำลองของวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์และการสะท้อนของคลื่นที่ผ่านตัวกลางซึ่งก็คือดินร่วนแห้งและดินร่วนเปียกที่มีค่า  $\epsilon_r$  ที่แตกต่างกัน โดยใช้สายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่น 2 ชั้น ที่เหมือนกันวางคู่กันในแนวราบเพื่อทำหน้าที่รับและส่ง เพื่อเปรียบเทียบผลในระยะห่างของสายอากาศที่ต่างกันออกไปตั้งแต่ 20 cm จนถึง 60 cm เพื่อหาระยะที่สามารถรับส่งคลื่นสะท้อนได้ดีที่สุด ซึ่งก็คือระยะที่ 50 cm และจำลองการแยกแยะวัตถุตัวกลางต่าง ๆ ของสายอากาศโดยที่ระยะที่ 50 cm สามารถแยกแยะตัวกลางออกมาได้ที่ขนาด 0.03 Vp-p และได้สัญญาณที่มีความกว้างอยู่ที่ 1.32 ns ที่ดินร่วนแห้ง และได้ขนาดที่ 0.052 Vp-p และได้สัญญาณที่มีความกว้างอยู่ที่ 1.18 ns ที่ดินร่วนเปียก ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ขึ้นไปในแนวทางที่ดีและสอดคล้องกับทฤษฎี และการเพิ่มวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ที่ 20 ns จนถึง 50 ns ทำให้สายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมทั้งช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสัญญาณพัลส์จะใช้การส่งสัญญาณเป็นช่วง ๆ ในคาบเวลาตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูง วัตถุที่นำมาจำลองจะมีผลกับในบางความถี่จึงทำให้ได้ช่วงความถี่กว้าง ๆ จะสามารถตรวจสอบได้ทุกความถี่

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.6 มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่  $|S_{11}|$  (dB) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ พบว่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง ถึงแม้ว่าลักษณะของกราฟ  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศต้นแบบจะคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการจำลอง อันเป็นผลเนื่องมาจากความความคลาดเคลื่อนระหว่างขั้นตอนการสร้างสายอากาศ รวมไปถึงผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศนั้นยังไม่ได้คำนวณผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการอุปกรณคอนเนคเตอร์ อย่างไรก็ตามสายอากาศต้นแบบก็ยังมีแบนด์วิดธ์ไม่น้อยกว่า 500 MHz โดยครอบคลุมช่วงความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 200 MHz ถึง 3 GHz ที่มากเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเซนเซอร์ เช่น เรดาร์หยั่งลึก

นอกจากนี้คุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 460 MHz 600 MHz 900 MHz 1.3 GHz และ 1.5 GHz ก็สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองดังที่กล่าวมาข้างต้นและมีอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 900 MHz จะได้อัตราขยายคือ 3.37 dBi และผลจากการทดสอบ ที่อัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 1.5 GHz จะได้อัตราขยายคือ -10.57 dBi ตามลำดับ ในช่วงความถี่พิจารณา และวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 2.9 ns ขนาด 7.7 Vp-p โดยเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่พบว่าสัญญาณพัลส์ที่ได้นี้ให้ความถี่ได้ตั้งแต่ 0 Hz จนถึง 1.5 GHz ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้วงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ในการเพิ่มความกว้างของช่วงความถี่ให้สามารถครอบคลุมทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูงในย่านความถี่กว้างยิ่งยวดได้ แต่เนื่องจากสถานการณ์ไวรัสโคโรนา (COVID-19) จึงทำให้ไม่สามารถนำสายอากาศโมโนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นออกไปทำการทดสอบการสะท้อนในสภาพแวดล้อมจริงได้ จึงทำให้ไม่มีผลการทดสอบเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการศึกษาของผลกระทบของพารามิเตอร์พบว่าสายอากาศโครงสร้างดังกล่าวความสามารถที่จะออกแบบเพื่อเพิ่มแบนด์วิธของสายอากาศ ให้มีช่วงความถี่ที่ใช้งานได้มากถึง 10 GHz แต่เนื่องจากรูปแบบของโครงสร้างในส่วนของสายอากาศโมนโพลที่สามารถขยับได้ง่ายจึงทำให้ช่วงความถี่สูงเกิดการเบนของสัญญาณ ซึ่งอาจจะมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้างให้มีความคงทนและสามารถทำงานได้จนถึงช่วงความถี่สูงมาก ๆ ได้

สำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์นั้นการนำสายอากาศโมนโพลไปประยุกต์ใช้งานในที่เป็ระบบทะเลทุทะเลวง เช่น การสำรวจพื้นดิน การสำรวจถนน มักจะใช้กำลังส่งของสัญญาณที่ต่ำอยู่แล้วเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของ UWB โดยกำลังส่งของสัญญาณมากหรือน้อยนั้นจะแปรผันตรงกับความสามารถในการทะเลทุทะเลวงของหรือการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน โดยจะใช้กำลังส่งของสัญญาณที่มากที่สุดมักจะเป็นการใช้งานในการสำรวจพื้นถนนหรือสะพาน ซึ่งมีช่วงความถี่การใช้งานสูง และเมื่อสถานการณ์ของไวรัสโคโรนา (COVID-19) ดีขึ้นอาจจะมีการนำสายอากาศโมนโพลเชิงพื้นผิวและตัวสะท้อนคลื่นไปทำการทดสอบกับพื้นผิวจริง

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจ เพื่อที่จะนำไปพัฒนาปรับเปลี่ยนให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Weightman, “Signor Marconi’s Magic Box: The Most Remarkable of the 19th Century and the Amateur Inventor Whose Genius Sparked a Revolution,” Capo Press, 2003.
- [2] Ground Penetrating Radar [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/GPR-Application-Schematic\\_fig1\\_228894967](https://www.researchgate.net/figure/GPR-Application-Schematic_fig1_228894967).
- [3] UWB Medical Applications [Online]. Available: <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/uwb/>.
- [4] “Federal Communications Commission, First Order and Report: Revision of Part 15 of The Commission’s Rules Regarding UWBTransmission Systems,” Apr. 22, 2002.
- [5] A. Ruengwaree, A. Ghose, and G. Kompas, “A Novel UWB Rugby-Ball Antenna for Near Range Microwave Radar System,” *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 6, June 2006.
- [6] S. Tourette, N. Fortino, J. Y. Dauvignac, and G. Kossiavas, “Compact UWB Printed Antennas for Low Frequency Applications Matched to Different Transmission Lines,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, No. 6, pp. 1282-1287, June 2007.
- [7] J. C. Diot, P. Delmote, J. Andrieu, M. Lalande, V. Bertrand, B. Jecko, S. Colson, R. Huillerey, and M. Brishoual, “A Novel Antenna FOE Transient Application the Frequency Band 300 MHz-3 GHz: The Valentine Antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 3, pp. 987-990, March 2007.
- [8] I. Hertl, and M. Strycek, “UWB Antennas for Ground Penetrating Radar Application,” *Applied Electromagnetics and Communications*, 2007, pp. 1-4, Sept. 2007.
- [9] S. Dentre, C. Phongcharoenpanich, and K. Kaemarungsi “Scutcheon Antenna for UWB-GPR Applications” *Thailand-Japan Microwave*, 2012.
- [10] A. Ruengwaree, R. Yowuno, and G. Kompas, “Novel Rugby-Ball UWB Antenna for Base Band Transmission,” *TELSIKS 2005*, September 28-30, 2005.
- [11] P. Osklang, A. Sakonkanapong, S. Dentre, K. Lertsakwimarn, C. Phongcharoenpanich, and B. Luadang, “Wideband UHF Reflector Antenna for DVB Applications,” *Research, Invention, and Innovation Congress*, 2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] V. Waladi, N. Mohammadi, Y. Zehforoosh, A. Habashi, and J. Nourinia, "A Novel Modified Star-Triangular Fractal (MSTF) Monopole Antenna for Super-Wideband Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol.3, 12, May 2013.
- [13] Ultra-Wideband (UWB) [Online] Available: <https://sites.google.com/site/322462wirelesspan/wireless-personal-area-network/thekhnoiy-thi-keiywkhng-kab-wireless-pan/ultra-wide-band-uwbtmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplatesu%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>.
- [14] ชิตเชื้อ กนกเพชรรัตน์ 2548 "หนังสือเครื่องมือวัดไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ รหัส 2104-2204" ปทุมธานี : สกายบุ๊กส์.
- [15] R. Qiu, "Propagation effects, UWB Communications Systems: A Comprehensive Overview," *EURASIP publishing*, 2005.
- [16] H. F. Harmuth and Nonsinusoidal "Waves for Radar and Radio Communication," *Academic Press*, 1981.
- [17] C. J. Le Martret and G. B. Giannakis, "All-digital Impulse Radio with Multiuser Detection for Wireless Cellular Systems," *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 50, No. 9, pp. 1440-1450, 2002.
- [18] 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.*, Vol. 52, No. 9, pp. 2123-2138, Sep. 2004.
- [19] R. J. Fontana, "Recent System Applications of Short-pulse Ultra-Wideband (UWB) technology," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, Vol 52, No. 9, pp. 2087-2104, Sep. 2004.
- [20] Ultra-Wideband (UWB) [Online] Available: <https://freedom-to-tinker.com/2019/12/21/every-move-you-make-ill-be-watching-you-privacy-implications-of-the-apple-u1-chip-and-ultra-wideband/>.
- [21] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Guvenc, "Ultra-wideband Positioning Systems," Cambridge, Dec. 2008.
- [22] A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", Wiley-Interscience, 2005.
- [23] Ground Penetrating Radar (GPR) [Online]. Available: [https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/3991/17/ch3\\_3.pdf](https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/3991/17/ch3_3.pdf).
- [24] Electromagnetic waves [Online]. Available: <http://www.lesa.biz/astronomy/light/em-waves>.
- [25] Electromagnetic waves [Online]. Available: <https://emradiationblog.wordpress.com/คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] Reflection and refraction wave [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Reflection-and-refraction-of-a-plane-wave-at-the-boundary-of-two-homogeneous-semi-infinite\\_fig3\\_242451431](https://www.researchgate.net/figure/Reflection-and-refraction-of-a-plane-wave-at-the-boundary-of-two-homogeneous-semi-infinite_fig3_242451431).
- [27] Water Content [Online]. Available: <http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/1.pdf>.
- [28] Soil composition [Online]. Available: [http://grad.tsu.ac.th/UserFiles/1576661413\\_วิทยานิพนธ์สุเจนต์.pdf](http://grad.tsu.ac.th/UserFiles/1576661413_วิทยานิพนธ์สุเจนต์.pdf).
- [29] A. Ruengwaree, R. Yowuno, and G. Kompa, "Novel Rugby-Ball UWB Antenna for Base Band Transmission," *TELSIKS 2005*, September 28-30, 2005.
- [30] P. Osklang, A. Sakonkanapong, S. Dentre, K. Lertsakwimarn, B. Luadang and C. Phongcharoenpanich, "Wideband UHF Reflector Antenna for DVB Applications," *Research, Invention, and Innovation Congress*, 2019.
- [31] V. Waladi, N. Mohammadi, Y. Zehforoosh, A. Habashi, and J. Nourinia, "A Novel Modified Star-Triangular Fractal (MSTF) Monopole Antenna for Super-Wideband Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 12, pp. 651–654, 2013.
- [32] CST-Microwave Studio, User's Manual, 2019.
- [33] ความรู้เบื้องต้นของสัญญาณพัลส์ (Pulse Circuits) [Online]. Available: <https://www.inventor.in.th/home/ความรู้เบื้องต้นของสัญญาณพัลส์>.
- [34] วงจรพัลส์ [Online]. Available: <http://dspace.spu.ac.th/bitstream/123456789/4741/4/6เล่มโปรเจค>.
- [35] รูปร่างสัญญาณพัลส์ (Pulse shape) [Online]. Available: <https://www.omi.co.th/th/article/pulse>.
- [36] Second-harmonic generation [Online] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Second-harmonic\\_generation](https://en.wikipedia.org/wiki/Second-harmonic_generation).
- [37] S. Lin, J. Qiu, X. Gu, H. Ren, B. Zhao, "The simulation research of a novel uwb triangle monopole antenna," *International Conference on Antenna Theory and Techniques*, 17-21 September, 2007, Sevastopol, Ukraine pp. 256-258



ต้นฉบับไม่มีภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล                      นางสาวพลอยไพลิน พรหมพันธ์กรณ์  
 วัน เดือน ปีเกิด                     29 ธันวาคม 2538  
 ที่อยู่                                     63/1845 ถนนราษฎร์พัฒนา เขตสะพานสูง แขวงราษฎร์พัฒนา  
   จังหวัดกรุงเทพฯ 10240  
 ประวัติการศึกษา                    พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
   สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] P. Phomphankorn, S. Dentre, and C. Phongcharoenpanich, “Surface Monopole Antenna on Reflector for Ultra-Wideband Applications,” *Ladkrabang Engr J*, vol. 37, no. 4, pp. 18-25, Dec. 2020.