

การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่าง
สายอากาศโคโพลาร์ที่มีโพลาร์ไรเซชันแบบตั้งฉากและแบบขนาน

DIELECTRIC PROPERTY DETERMINATION BY MEASURING
MAGNITUDE OF MUTUAL COUPLING BETWEEN
PERPENDICULAR AND PARALLEL-IN-ECHELON DIPOLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของกรณีศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-010-247

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่าง
สายอากาศไดโพลที่มีโพลาริเซชันแบบตั้งฉากและแบบขนาน

**DIELECTRIC PROPERTY DETERMINATION BY MEASURING
MAGNITUDE OF MUTUAL COUPLING BETWEEN
PERPENDICULAR AND PARALLEL-IN-ECHELON DIPOLES**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 82736
วัน,เดือน,ปี... 2.2 .ค.ค. 2551

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายใน KMITL-2008-EN-M-010-247 กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DIELECTRIC PROPERTY DETERMINATION BY MEASURING
MAGNITUDE OF MUTUAL COUPLING BETWEEN
PERPENDICULAR AND PARALLEL-IN-ECHELON DIPOLES**



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

2008

KMITL-2008-EN-M-010-247

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่าง
สายอากาศไดโพลที่มีโพลาริเซชันแบบตั้งฉากและแบบขนาน
Dielectric Property Determination by Measuring Magnitude of Mutual Coupling
Between Perpendicular and Parallel-in echelon Dipoles

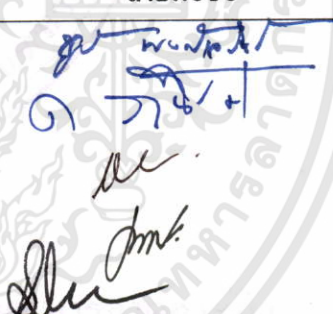
นักศึกษา นายธัญวัฒน์ ลิ้มปิติ

รหัสประจำตัว 48060939

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ชูวงศ์	พงศ์เจริญพาณิชย์	
ผศ.ดร. ทองทอด	วานิชศรี	
รศ.ดร. สมผล	โกศลวิตร์	
รศ.ดร. ประยุทธ์	อักรเอกมาลิน	
ศ.ดร. โมไนย	ไกรฤกษ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 12 พฤษภาคม 2551 เวลา 13.30-15.30 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.วิจิตร ธีระตระกูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒/.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. ๒๕๕๑.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อ ร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่มีโพลาริเซชันแบบตั้งฉากและ แบบขนาน
นักศึกษา	นายธัญวัฒน์ ลิ้มปิติ
รหัสประจำตัว	48060939
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการวัดทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ โดยใช้หลักการพิจารณาเฉพาะค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้มีข้อดีที่มากกว่าหลากหลายเทคนิคที่ได้มีการนำเสนอมาก่อนหน้า ที่ไม่ต้องวัดเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและขนาดสัญญาณสะท้อนกลับ ทำให้ระบบที่ใช้ลดความซับซ้อนลง เทคนิคนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะนำเสนอการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลในตัวกลางที่มีการสูญเสีย เพื่อที่จะนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้สำหรับการหาค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะนำเสนอในรูปของกราฟเชิงพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในช่วง $1 < \epsilon_r' < 101$ และค่าตัวประกอบสูญเสียในช่วง $0 < \epsilon_r'' < 20$ กราฟเชิงพื้นที่นี้จะนำไปใช้ร่วมกับค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการวัดทดสอบ ส่วนที่สองจะนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่มีรูปแบบการจัดวางของสายอากาศเป็นแบบตั้งฉากและแบบขนานอยู่บนแผ่นพิมพ์เดียวกัน โดยมีสวิตช์ทำหน้าที่ปรับเลือกรูปแบบการจัดวางของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศไดโพลที่ออกแบบมีอยู่สองความยาว คือ สายอากาศไดโพลที่มีความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 นำสายอากาศที่ออกแบบมาสร้างและทดสอบคุณลักษณะ แล้วทดลองวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศในตัวกลางของวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือก สารเนื้อเทียม และน้ำ ค่าที่ได้จากการวัดทดสอบจะถูกนำไปคูณกับค่าแฟกเตอร์ จากนั้นนำมาระบุตำแหน่งบนกราฟเชิงพื้นที่ที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของวัสดุที่ทดสอบ เปรียบเทียบค่าที่หาได้กับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานเพื่อยืนยันความแม่นยำของเทคนิคที่นำเสนอ

Thesis Title	Dielectric Property Determination by Measuring Magnitude of Mutual Coupling between Perpendicular and Parallel-in-echelon Dipoles
Student	Mr. Thunyawat Limpiti
Student ID.	48060939
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Prof.Dr. Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis proposes a technique which can determine the dielectric property of a material. The proposed technique utilizes mutual coupling between the dipole antennas with perpendicular and parallel-in-echelon arrangements. The main advantage of the proposed technique is that it can be accomplished without a need of information of phase in addition to magnitude of the reflected wave. It can be referred to as a compact system. Two contributions to the proposed technique are shown. First, the mutual impedance of dipole antennas in lossy medium is determined and then used to calculate the mutual coupling of the antennas. The surface graphs of variation of the dielectric constant and the loss factor are shown in the range of $1 < \epsilon_r' < 101$ and $0 < \epsilon_r'' < 20$, respectively. The surface graph is exploited along with the magnitude of the mutual coupling obtained from measurement. Second, the perpendicular and parallel-in-echelon configuration printed-dipole antennas are designed. Switching circuits are utilized to select the type of antenna arrangements. The designed antennas comprise two lengths. One is the lengths of the designed antenna element equals a half wavelength in free-space while another one is equal to a half wavelength at dielectric constant of 35. The antenna is fabricated and tested. The mutual couplings of the antenna in media, i.e. paddy, agar phantom and water are measured. The product of the measured mutual coupling value multiplied by the factor is used to indicate the dielectric constant and the loss factor of the measured material via the surface graph. Finally, the measurement results obtained from the proposed technique is compared to that obtained from the standard measurement equipment to validate the performance of the proposed technique.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ แก้ไขปัญหา และคอยดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ซึ่งแนะนำข้อบกพร่อง รวมทั้งฝึกฝนให้ข้าพเจ้ามีแนวคิดและทักษะในการนำเสนอและดำเนินงานซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อตัวข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร ศศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการตลอดจนความดูแลเอาใจใส่และความปรารถนาดีที่มีต่อข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประยูทธ อัครเอกฉาติน มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า (IE3D) ในการออกแบบสายอากาศ

ขอขอบคุณ คุณจิรัฏฐ์ เหมือนชู ดร. สุวรรณ จันทร์อินทร์ ดร. เอกรัฐ บุญญา และคุณจักรกฤษ ตรีภพพาณิชย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ดร. ดวงอาทิตย์ ศรีมูล คุณปภาณิศา แก้วสวัสดิ์ คุณทินวุฒิ แดงรัตนวงศ์ คุณไพโรจน์ วุ่นชุม คุณศัญชัย เอียดปราบ สำหรับความหวังดี คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ รวมถึงกำลังใจที่มีให้ในช่วงเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณ คุณภพสุข สุขสำราญ คุณธนวุฒิ ดันติโสภารักษ์ และสมาชิกในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Laboratory) ทุกคน สำหรับความช่วยเหลือ มิตรภาพ และความจริงใจที่มีให้แก่นักทดลองระยะเวลาที่ข้าพเจ้าปฏิบัติงานในห้องวิจัยแห่งนี้

ขอขอบคุณ คุณภักทวรรณ บุตรรักษ์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ ทั้งในด้านความคิด แรงบันดาลใจและแรงกระตุ้นในการดำเนินงาน

คุณความดีอันดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่บิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้ชีวิต โอกาสทางการศึกษา กำลังใจและความหวังไขมาโดยตลอด และญาติของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุน ช่วยเหลือและให้คำแนะนำปรึกษาที่ดี ตลอดจนครูและอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ธัญวัฒน์ ลิ้มปิติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 เทคนิคสายส่ง.....	1
1.1.2 เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์.....	2
1.1.3 เทคนิคอวกาศว่าง.....	3
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.1.1 สนามในบริเวณใกล้ของสายอากาศไดโพล.....	7
2.1.2 อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างอิลิเมนต์เชิงเส้น.....	10
2.2 การคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสีย.....	14
2.3 การคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลในตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	25
2.4 การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ.....	28
2.5 สรุป.....	29
บทที่ 3 การวิเคราะห์การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่มีโพลาริเซชันตั้งฉากและขนาน.....	30
3.1 บทนำ.....	30
3.2 เทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการวัดค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ทางวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัว IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน.....	42
3.4 สรุป.....	43
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ.....	44
4.1 บทนำ.....	44
4.2 โครงสร้างสายอากาศ.....	44
4.3 การสร้างและผลการทดสอบสายอากาศ.....	51
4.4 สรุป.....	56
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	57
5.1 บทนำ.....	57
5.2 การทดลอง.....	57
5.3 ผลการทดลอง.....	59
5.3.1 ผลการทดสอบข้าวเปลือก.....	62
5.3.2 ผลการทดสอบสารเนื้อเทียม.....	68
5.3.3 ผลการทดสอบน้ำ.....	74
5.4 สรุป.....	79
บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	80
6.1 สรุปและวิจารณ์.....	80
6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตี v อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก.....	4
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของ โครงสร้างสายอากาศไดโพลตัวเดี่ยว.....	49
5.1 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาว อิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างและครึ่งความยาวคลื่นที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35.....	59
5.2 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาว อิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างและครึ่งความยาวคลื่นที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติก.....	60
5.3 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในข้าวเปลือกของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาว อิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติก.....	63
5.4 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในข้าวเปลือกของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก เท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกหลังจากการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์.....	64
5.5 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของข้าวเปลือกที่ได้จากการวัดด้วย สายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง.....	66
5.6 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของข้าวเปลือกที่ได้จากการวัดด้วย สายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก เท่ากับ 35	67
5.7 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในสารเนื้อเทียมของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาว อิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างและครึ่งความยาวคลื่นที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติก.....	68
5.8 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในสารเนื้อเทียมของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างและครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก เท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกหลังจากการคูณค่าแฟกเตอร์.....	69
5.9 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของสารเนื้อเทียมที่ได้จากการวัดด้วย สายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง.....	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.10	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของสารเนื้อเทียมที่ได้จากการวัดด้วย สายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก เท่ากับ 3572
5.11	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในน้ำของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาว อิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในซองพลาสติก.....74
5.12	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในน้ำของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก เท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในซองพลาสติกหลังจากการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์.....75
5.13	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของน้ำที่ได้จากการวัดด้วย สายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง.....77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	เทคนิคสายส่งโดยใช้ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมและสายโคแอกเซียล [2].....2
1.2	เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ [2].....3
1.3	เทคนิคควาคว้างโดยที่พอร์ตหนึ่งและพอร์ตสองต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย [3].....3
2.1	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามในบริเวณใกล้.....8
2.2	โครงข่ายสองพอร์ตและโครงข่ายเสมือน T12
	(ก) โครงข่ายสองพอร์ต.....12
	(ข) โครงข่ายเสมือน T12
2.3	การกระจายกระแสบนสายอากาศไดโพล.....14
2.4	รูปแบบการจัดวางของสายอากาศไดโพลกรณีตั้งฉากและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....15
2.5	ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมจากการวิเคราะห์กรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก.....22
2.6	ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมกรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางตัวแบบขนาน.....23
2.7	ค่าความต้านทานร่วมจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรจาลองโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก.....23
2.8	ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรจาลองโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก.....24
2.9	ค่าความต้านทานร่วมจากการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สอง.....24
2.10	ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมจากการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สอง.....25
2.11	การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ.....29
3.1	การใช้สายอากาศที่มีการสวิตซ์โพลาริไซ์ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบ.....32
	(ก) สายอากาศไดโพลที่มีการจัดวางแบบตั้งฉาก.....32
	(ข) สายอากาศไดโพลที่มีการจัดวางแบบขนาน.....32
3.2	หลักการนำเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกไปใช้งาน.....33
3.3	กราฟเชิงพื้นที่ผิวที่ใช้หาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก.....34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่มีรูปแบบการจัดวางตั้งฉาก.....35
3.5	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่มีรูปแบบการจัดวางขนาน.....35
3.6	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน.....36
3.7	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก.....38
3.8	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนาน.....38
3.9	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน.....39
3.10	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก.....40
3.11	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนาน.....41
3.12	กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน.....41
4.1	โครงสร้างสายอากาศไดโพลตัวเดียว.....45
4.2	แบบจำลองส่วนบาลันจากโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27].....46
4.3	ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการส่งผ่านของบาลัน.....46
4.4	ผลการจำลองเฟสค่านอกของบาลัน.....47
4.5	การไหลของกระแสและระดับกำลังงานของบาลัน [27].....48
4.6	แบบจำลองสายอากาศไดโพลพิมพ์ตัวเดียวจากโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27]48
4.7	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลตัวเดียว.....49
4.8	โครงสร้างสายอากาศไดโพลคู่ที่มีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนโพลาริเซชัน.....50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	สายอากาศไดโพลคู่ที่มีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันที่ได้จากการสร้าง.....51
(ก) ด้านหน้า.....	51
(ข) ด้านหลัง.....	52
4.10	ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลจากการสร้างเมื่อสวิตช์โพลาริเซชันตั้งฉาก.....52
4.11	ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลจากการสร้างเมื่อสวิตช์โพลาริเซชันขนาน.....53
4.12	ค่าการสูญเสียย้อนกลับจากการจำลองทางโปรแกรมของสายอากาศไดโพลตัวเดี่ยวที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3554
4.13	สายอากาศไดโพลคู่ที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และมีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันที่ได้จากการสร้าง.....55
(ก) ด้านหน้า.....	55
(ข) ด้านหลัง.....	55
5.1	ระบบสำหรับการวัดหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ.....58
5.2	การทดลองวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุทดสอบ.....58
5.3	กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างสำหรับใช้ร่วมกับข้าวเปลือก.....65
5.4	กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 สำหรับใช้ร่วมกับข้าวเปลือก.....65
5.5	กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างสำหรับใช้ร่วมกับสารเนื้อเทียม.....70
5.6	กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 สำหรับใช้ร่วมกับสารเนื้อเทียม.....70
5.7	กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างสำหรับใช้ร่วมกับน้ำ.....76
5.8	กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 สำหรับใช้ร่วมกับน้ำ.....76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

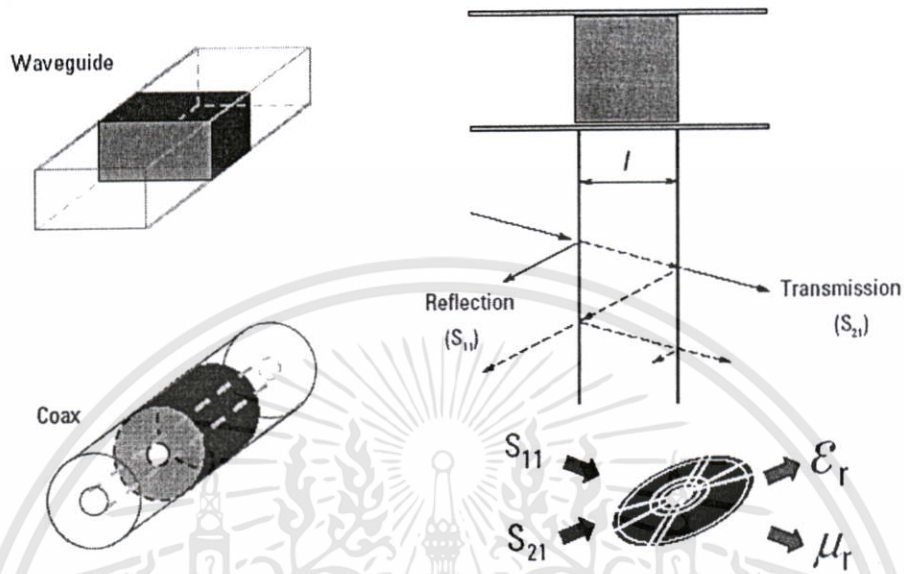
คุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ ซึ่งวัสดุต่างๆ จะมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ดังนั้นคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้เพื่อแยกแยะความแตกต่างของวัสดุ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ได้จากการวัดอย่างแม่นยำเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ค่าการสูญเสียของคลื่นในสายเคเบิล ค่าอิมพีแดนซ์ของฐานรอง (Substrate) หรือความถี่ไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ (Dielectric resonator) ซึ่งข้อมูลของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกยังมีประโยชน์สำหรับนักออกแบบบรรจุภัณฑ์ในการปรับปรุงสารประกอบแม่เหล็ก (Ferrite) หรือตัวดูดซับคลื่น (Absorber) นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ในส่วนกระบวนการใช้ไมโครเวฟเพื่ออุตสาหกรรม ได้แก่ อาหาร ผัก ผลไม้ ยาง ไม้ พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นค่าไม่คงที่ สามารถแปรผันตามความถี่ อุณหภูมิ การจัดเรียงตัวของประจุ ส่วนผสม ความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ

การศึกษาวิธีการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีมาเป็นเวลายาวนาน [1] และได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ โดยที่แต่ละเทคนิคขึ้นอยู่กับธรรมชาติของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการวัด ทางด้านกายภาพ ทางด้านไฟฟ้า ความถี่ที่สนใจ และระดับของความแม่นยำที่ต้องการ เทคนิคสำหรับการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ เทคนิคสายส่ง (Transmission line technique) เทคนิคอวกาศว่าง (Free space technique) เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ (Resonant cavity technique) โดยแต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อด้อยที่ต่างกัน เทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสามารถจำแนกออกได้เป็น เทคนิคการสะท้อนหรือการส่งผ่าน เทคนิคที่เป็นระบบเรโซแนนซ์หรือไม่เรโซแนนซ์ หรือเทคนิคที่มีโครงสร้างแบบเปิดหรือแบบปิด เช่น เทคนิคที่ใช้ท่อนำคลื่นและสายส่งโคแอกเซียลเป็นเทคนิคที่มีโครงสร้างแบบปิด ขณะที่เทคนิคอวกาศว่างและระบบสายโคแอกเซียลแบบปลายเปิด (Open-ended coaxial) เป็นเทคนิคที่มีโครงสร้างแบบเปิด เป็นต้น เทคนิคที่ใช้กันทั่วไปในย่านความถี่ไมโครเวฟมีหลักการทำงานดังนี้

1.1.1 เทคนิคสายส่ง

เทคนิคสายส่งเพื่อการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ทำได้โดยการนำวัสดุที่ต้องการทดสอบวางไว้ในสายส่งที่ปิด ซึ่งสายส่งโดยทั่วไปมักเป็นท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมหรือสายโคแอกเซียล ค่าสภาพยอม และค่าความซึมซาบได้สามารถคำนวณได้จากผลการวัดสัญญาณสะท้อน (S_{11}) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณส่งผ่าน (S_{21}) โดยที่วัสดุที่ทดสอบจะต้องบรรจุให้เต็มพื้นที่หน้าตัดของสายส่ง ไม่มีช่องอากาศระหว่างวัตถุและผนังของสายส่ง วัสดุต้องมีเป็นสารเนื้อเดียวและมีผิวหน้าเรียบ



รูปที่ 1.1 เทคนิคสายส่ง โดยใช้ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมและสายโคแอกเซียล [2]

1.1.2 เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์

โพรงเรโซแนนซ์เป็นโครงสร้างที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง (Q) จะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่แน่นอน ซึ่งวัสดุที่ต้องการทดสอบจะส่งผลกับความถี่ และค่าตัวประกอบคุณภาพของโพรง ดังนั้นค่าสภาพยอมและค่าความซึมซาบได้จึงสามารถหาได้ที่ความถี่เดียว เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ใช้ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมและแผ่นกันเชื่อมต่อกันทำงานในโหมด TE_{10n} โดยวัสดุจะถูกวางไว้ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด เมื่อใส่วัสดุผ่านช่องที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อนำคลื่น จำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่น ($n = 2k + 1$) จะให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดกับวัสดุที่ทดสอบ ดังนั้นจึงสามารถวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการทดสอบได้ โดยที่เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์เหมาะสำหรับวัสดุที่มีขนาดเล็กๆ การวัดจะวัดได้ที่ความถี่เดียว และเหมาะสำหรับการวัดวัสดุที่มีการสูญเสียน้อย

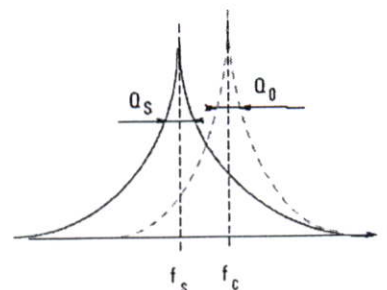
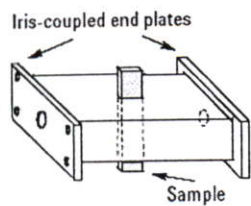
$$\epsilon_r' = \frac{V_c (f_c - f_s)}{2V_s f_s} + 1$$

$$\epsilon_r'' = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right)$$

V is the volume

index c is for the empty cavity,

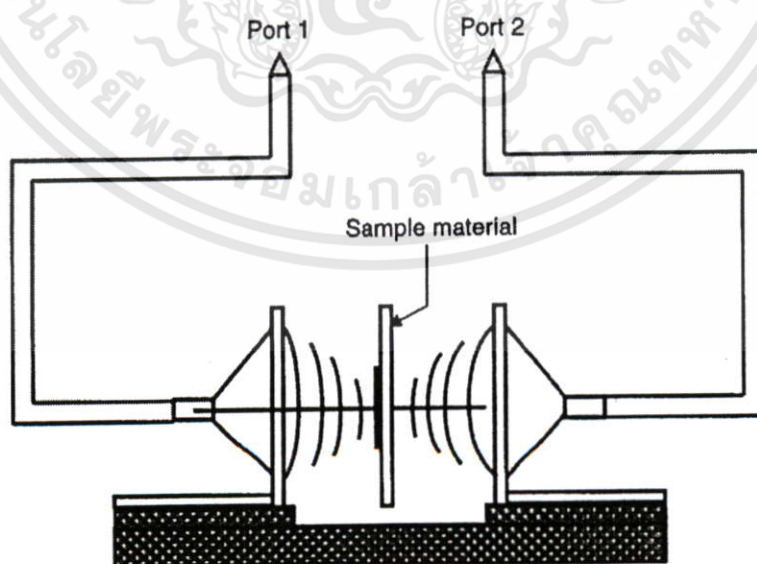
index s is for the sample loaded



รูปที่ 1.2 เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ [2]

1.1.3 เทคนิคอวกาศว่าง

เทคนิคอวกาศว่างเป็นวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยไม่สัมผัสหรือทำลายวัสดุที่ใช้ทดสอบ และเป็นวิธีการวัดที่ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างวัสดุอย่างพิเศษ เนื่องจากเป็นการวัดที่เหมาะสมกับวัสดุที่อุณหภูมิสูงและไม่เป็นสารเนื้อเดียว ดังนั้นเทคนิคอวกาศว่างจึงง่ายสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมที่ต้องการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของวัสดุ เช่นการตรวจสอบค่าความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุ โดยจะนำวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ แล้ววัดขนาดและเฟสของสัญญาณที่ส่งผ่านจากสายอากาศตัวส่งไปยังตัวรับที่ผ่านวัสดุที่ต้องการทดสอบ ซึ่งผลการวัดจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบ



รูปที่ 1.3 เทคนิคอวกาศว่างโดยที่พอร์ตหนึ่งและพอร์ตสองต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเทคนิคสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยแต่ละวิธีมีข้อจำกัดและข้อดีแตกต่างกันไปตามวัสดุที่จะนำมาใช้ทดสอบ ความถี่ที่สนใจ ขนาดของตัวอย่างวัสดุที่จะนำมาทดสอบ การเตรียมตัวอย่าง หรือแม้กระทั่งความแม่นยำของแต่ละวิธี ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

	เทคนิคสายส่ง	เทคนิคอวกาศ ว่าง	เทคนิคโพรง เรโซแนนซ์	โคแอกเซียลโพรบ
ความถี่	เป็นช่วง	เป็นช่วง	เดี่ยว	กว้าง
ขนาดของวัสดุ	ปานกลาง	ใหญ่	เล็ก	เล็ก
การควบคุม อุณหภูมิ	ยาก	ง่ายมาก	ง่ายมาก	ง่าย
ความแม่นยำเมื่อ วัสดุที่มีการ สูญเสียน้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก	น้อย
วัสดุที่มีการ สูญเสียมาก	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่เหมาะสม	มาก
การเตรียมวัสดุ	ยาก	ง่าย	ยากมาก	ง่าย
สถานะเหมาะสม ของวัสดุ	ของแข็ง	แผ่นบางใหญ่	ของแข็ง	ของแข็ง
การทดสอบวัสดุ	ทำลาย	ไม่ทำลาย	ทำลาย	ไม่ทำลาย

จะเห็นได้ว่าเทคนิคอวกาศว่างนับเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและน่าสนใจเทคนิคหนึ่ง [2] โดยที่เทคนิคนี้มีการประยุกต์ใช้ในการทดสอบกับวัสดุหลากหลาย เช่น ผลผลิตทางการเกษตรที่มีการวิจัยอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับความสูง ความชื้น และความหนาแน่น [3]-[8] เทคนิคนี้น่าสนใจเนื่องจากการทดสอบที่ไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุ และไม่ทำลายวัสดุที่ต้องการทดสอบ ด้วยการวางวัสดุที่ต้องการทดสอบระหว่างชุดสายอากาศรับส่ง แล้ววัดขนาด (magnitude) และเฟส (phase) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเพื่อคำนวณหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก [9] ต่อมาได้มีการพัฒนาต่อโดยการคำนวณหาคุณสมบัติไดอิเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตริกของวัสดุจากการพิจารณาเฉพาะขนาด (amplitude) ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงอย่างเดียวโดยไม่พิจารณาเฟส [10]-[11] แต่เทคนิคนี้ยังมีความซับซ้อนอยู่บ้าง เนื่องจากต้องวัดขนาดของทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน นอกจากนี้ตัวอย่างเทคนิคของการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่นำเสนอ ยังมีเทคนิคที่น่าสนใจที่มีการวิจัยไว้ก่อนหน้า ได้แก่ เทคนิคการใช้สายอากาศโมโนโพล (Monopole antenna) ใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบ แล้ววัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้น [12]-[15] ซึ่งเทคนิคดังกล่าวใช้หลักการที่ว่า อิมพีแดนซ์ของสายอากาศในตัวกลางใดๆ เป็นฟังก์ชันของค่าไดอิเล็กตริกในตัวกลางนั้น เทคนิคนี้มีข้อจำกัดที่ วัสดุที่ต้องการทดสอบต้องเป็นตัวกลางที่สามารถใช้สายอากาศใส่เข้าไปได้ หรือเทคนิคการใช้สายอากาศไดโพล (Dipole antenna) สองตัว เพื่อวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดิน โดยใช้หลักการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual impedance) ระหว่างสายอากาศสองตัว [16]-[19]

จึงเกิดความคิดที่จะนำเทคนิคการใช้สายอากาศไดโพล (Dipole antenna) สองตัว ใส่เข้าไปในวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้วพิจารณาเฉพาะขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงอย่างเดียว เพื่อลดความซับซ้อนของระบบการวัดเดิม แต่เนื่องจากระบบเดิมที่ต้องมีทั้งส่วนที่วัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ดังนั้นจะทำการสวิตซ์โพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศเป็นสองกรณีแทนที่การวัดขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งรูปแบบการจัดวางของสายอากาศที่จะนำมาใช้ในแต่ละโพลาริเซชันเป็นแบบตั้งฉาก (Perpendicular polarization) และแบบขนาน (Parallel-in-echelon polarization) [20]-[21]

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลในตัวกลางที่มีการสูญเสีย เพื่อใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง และนำเสนอเทคนิคใหม่ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ โดยใช้สายอากาศไดโพลใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบ แล้วพิจารณาเฉพาะค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงอย่างเดียว ซึ่งขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะถูกแทนที่ด้วยการสวิตซ์โพลาริเซชันของสายอากาศที่ใช้ทดสอบ โดยที่โพลาริเซชันของสายอากาศที่จะใช้ทดสอบแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ โพลาริเซชันร่วม (Co-polarization) มีรูปแบบการจัดวางของสายอากาศเป็นแบบขนาน และโพลาริเซชันไขว้ (Cross-polarization) มีรูปแบบการจัดวางของสายอากาศเป็นแบบตั้งฉาก

ขอบเขตของงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาและวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสีย เปรียบเทียบผลที่ได้จากสูตรวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลองโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบ

ความแม่นยำของสูตรที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ ศึกษาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศและการเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของสายอากาศ ส่วนอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนานจะนำผลที่ได้จากงานวิจัยที่มีก่อนหน้านี้ จากนั้นจะนำเสนอการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ประยุกต์สูตรการหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนานจากตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสียให้อยู่ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริก จากนั้นนำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริก และนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ (Printed dipole antennas) สำหรับใช้ในการทดสอบวัดคูณสมบัติไดอิเล็กตริก สุดท้ายจึงสร้างสายอากาศไดโพลพิมพ์และทดสอบวัดคูณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของเทคนิคที่ได้นำเสนอ

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพล ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้สำหรับการคำนวณสูตรการหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสียและตัวกลางที่มีการสูญเสีย รวมทั้งวิธีการหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์การหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีโพลาริเซชันแบบตั้งฉากและขนาน ซึ่งจะได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริก และแนะนำวิธีการนำเทคนิคไปใช้โดยการเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไดโพลจากการจำลองทางโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสายอากาศที่ออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลพิมพ์ พิจารณาผลของค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ออกแบบ แล้วนำขนาดและรูปแบบของสายอากาศไปใช้ในการสร้างชิ้นงานเพื่อนำมาทดลองวัดคูณสมบัติไดอิเล็กตริก

บทที่ 5 กล่าวถึงการนำสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้าง มาทดสอบกับวัสดุที่ต้องการหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริก เพื่อยืนยันเทคนิคใหม่ในการวัดหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้นำเสนอ

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ผลที่ได้จากการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการวัดคูณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้นำเสนอให้สามารถใช้ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

อิมพีแดนซ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการร่วมกัน ไม่ว่าจะเป็นความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ รูปร่างของสายอากาศ วิธีการป้อน หรือแม้กระทั่งวัตถุที่อยู่รอบข้างสายอากาศ ดังนั้นการวิเคราะห์สายอากาศในทางปฏิบัติจึงมีข้อจำกัดมากมาย อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ณ จุดต่างๆ ถูกนิยามด้วยอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็ก ณ จุดที่สังเกต มีวิธีการหลากหลายในการหาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ไม่ว่าจะเป็นวิธีการค่าขอบเขต (Boundary-value method) วิธีการสายส่ง (Transmission-line method) วิธีการเวกเตอร์ของพอยน์ติง (Poynting's vector method) และวิธีสมการเชิงอินทิกรัล (Integral equation) ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศ (Z_{21}) ด้วยวิธีการแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced EMF method) วิธีการนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่สำคัญสำหรับการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self impedance) และอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual impedance) ของสายอากาศ ซึ่งวิธีการนี้ใช้ได้กับสายอากาศที่มีลักษณะเส้นตรง ขนานกัน และ ขนานแบบเหลื่อมล้ำกัน นอกจากนี้วิธีการนี้ง่ายในการคำนวณเพราะไม่นำค่ารัศมีของเส้นลวด และระยะห่างของช่อง ณ ตำแหน่งจุดป้อนมาใช้ในการคำนวณ

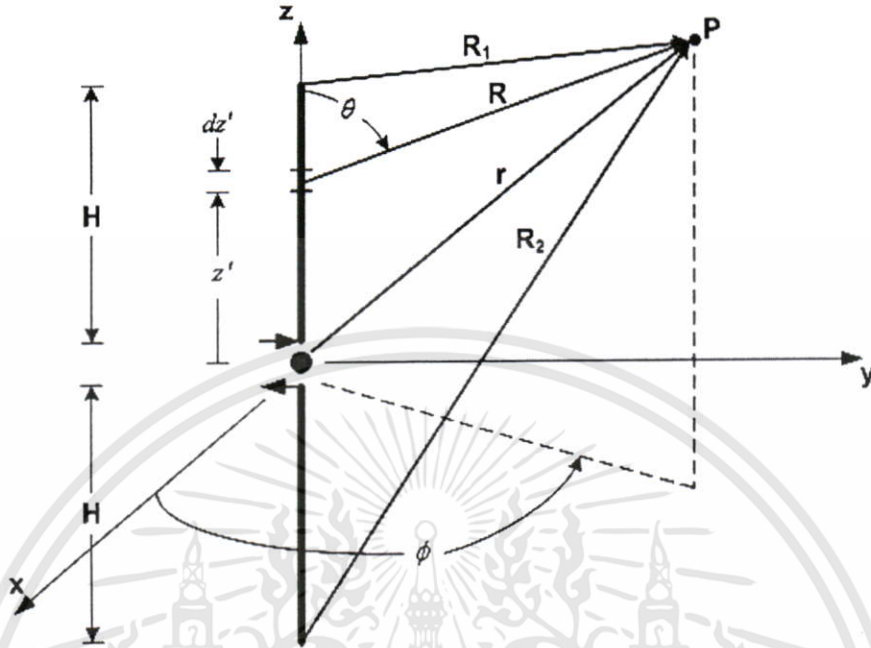
2.1.1 สนามในบริเวณใกล้ของสายอากาศไดโพล

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศจะต้องพิจารณาที่สนามในบริเวณใกล้ (Near-field region) ในที่นี้จะพิจารณาสนามในบริเวณใกล้ของสายอากาศไดโพลความยาว L มีการป้อน ณ จุดกึ่งกลาง โดยจะคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ จุดที่สนใจ P ซึ่งมีระยะห่างจากสายอากาศไดโพลไม่เจาะจง และสมมติให้สายอากาศมีขนาดผอมบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กรณีที่สายอากาศไดโพลมีขนาดผอมบางมากๆ กระแสที่กระจายบนตัวสายอากาศไดโพลจะแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\bar{I}(z') = \begin{cases} \hat{a}_z I_m \sin[k(H - z')], & 0 \leq z' \leq H \\ \hat{a}_z I_m \sin[k(H + z')], & -H \leq z' \leq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

เมื่อ I_m เป็นค่ากระแสสูงสุด และ k เป็นค่าคงที่เฟส

จากสมการที่ (2.1) กำหนดให้ H แทนครึ่งความยาวของไดโพล เมื่อสายอากาศไดโพลมีความยาวเท่ากับ L ดังนั้น $H = L/2$ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ [22]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามในบริเวณใกล้

เพื่อที่จะคำนวณหาอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่วางตัวอยู่ในแนวขนานกันได้สะดวกขึ้น จึงได้นำระบบพิกัดทรงกระบอกมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจากรูปที่ 2.1 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$R = \sqrt{(z - z')^2 + y^2} \quad (2.2ก)$$

$$R_1 = \sqrt{(z - H)^2 + y^2} \quad (2.2ข)$$

$$R_2 = \sqrt{(z + H)^2 + y^2} \quad (2.2ค)$$

$$r = \sqrt{z^2 + y^2} \quad (2.2ง)$$

ศักย์เวกเตอร์ (Vector potential) ณ ตำแหน่ง P มีค่า

$$A_z = \frac{\mu I_m}{4\pi} \left(\int_0^H \frac{\sin[k(H - z')] \exp(-jkR)}{R} dz' + \int_{-H}^0 \frac{\sin[k(H + z')] \exp(-jkR)}{R} dz' \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \frac{\mu I_m}{8\pi j} \left(\exp(jkH) \int_0^H \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R} dz' - \exp(-jkH) \int_0^H \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R} dz' \right. \\
&+ \left. \exp(jkH) \int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R} dz' - \exp(-jkH) \int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R} dz' \right) \quad (2.3)
\end{aligned}$$

ในระบบพิกัดทรงกระบอกสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่ง P มีค่า

$$\vec{H} = \hat{a}_\phi H_\phi \quad (2.4)$$

โดยที่

$$H_\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \quad (2.5)$$

ซึ่ง μ เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าสายอากาศไดโพลสมมาตรตามแนวแกน z ดังนั้นตำแหน่ง P สามารถพิจารณาได้ในระนาบ yz จะได้ว่า

$$H_\phi = -H_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.6)$$

แทนค่าจากสมการที่ (2.6) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$H_\phi = -\frac{I_m}{8\pi j} \left[\exp(jkH)Q_1 - \exp(-jkH)Q_2 + \exp(jkH)Q_3 - \exp(-jkH)Q_4 \right] \quad (2.7)$$

โดยที่

$$Q_1 = \frac{\partial}{\partial y} \int_0^H \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R} dz' \quad (2.8ก)$$

$$Q_2 = \frac{\partial}{\partial y} \int_0^H \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R} dz' \quad (2.8ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_3 = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R} dz' \quad (2.8ก)$$

$$Q_4 = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R} dz' \quad (2.8ง)$$

แทนค่าจากสมการที่ (2.8ก)-(2.8ง) ลงในสมการที่ (2.7) จะได้

$$H_\phi = -\frac{I_m}{4\pi jy} \left[\exp(-jkR_1) + \exp(-jkR_2) - 2\cos(kH)\exp(-jkr) \right] \quad (2.9)$$

สามารถหาสนามไฟฟ้าได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ดังนี้

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H} \quad (2.10)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าที่แผ่จากสายอากาศไดโพลนี้ จะมีค่า

$$\vec{E} = \hat{a}_\rho E_\rho + \hat{a}_z E_z = -\hat{a}_\rho \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial H_\phi}{\partial z} + \hat{a}_z \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho H_\phi) \quad (2.11)$$

โดยที่

$$E_z = -j \frac{\eta I_m}{4\pi} \left(\frac{\exp(-jkR_1)}{R_1} + \frac{\exp(-jkR_2)}{R_2} - 2\cos(kH) \frac{\exp(-jkr)}{r} \right) \quad (2.12)$$

$$E_y = j \frac{\eta I_m}{4\pi y} \left(\frac{z-H}{R_1} \exp(-jkR_1) + \frac{z+H}{R_2} \exp(-jkR_2) - \frac{2z\cos(kH)}{r} \exp(-jkr) \right) \quad (2.13)$$

ซึ่ง η เป็นค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์

2.1.2 อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างอิลิเมนต์เชิงเส้น

สายอากาศสองตัวที่วางอยู่ใกล้กัน แตกต่างจากสายอากาศเพียงตัวเดียวที่อยู่ในตัวกลางตรงที่การกระจายของกระแส สนามที่แผ่ และอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้าของสายอากาศ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของสายอากาศไม่เพียงขึ้นอยู่กับกระแสที่กระจายอยู่บนตัวสายอากาศเอง แต่ยังรวมถึงกระแสที่กระจายอยู่บนตัวสายอากาศที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อให้ง่ายในสำหรับการวิเคราะห์จึงสมมติให้สายอากาศสองตัวเสมือนเป็นโครงข่ายสองพอร์ต (Two-port network) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดัน ดังนี้

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ V_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยที่

$$Z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (2.14ก)$$

Z_{11} เป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้า ณ พอร์ต 1 เมื่อเปิดวงจร ณ พอร์ต 2

$$Z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad (2.14ข)$$

Z_{12} เป็นอิมพีแดนซ์ร่วม ณ พอร์ต 1 เนื่องจากกระแสจากพอร์ต 2 โดยที่มีการเปิดวงจร ณ พอร์ต 1

$$Z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (2.14ค)$$

Z_{21} เป็นอิมพีแดนซ์ร่วม ณ พอร์ต 2 เนื่องจากกระแสจากพอร์ต 1 โดยที่มีการเปิดวงจร ณ พอร์ต 2

$$Z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad (2.14ง)$$

Z_{22} เป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้า ณ พอร์ต 2 โดยที่มีการเปิดวงจร ณ พอร์ต 1

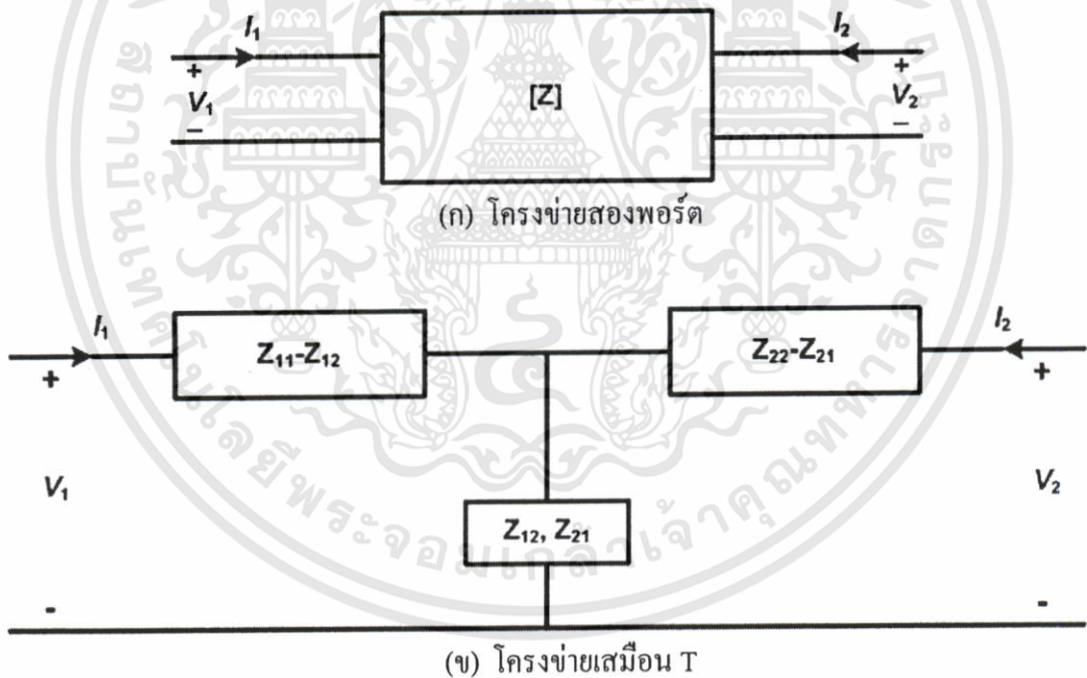
อิมพีแดนซ์ Z_{11} และ Z_{22} เป็นอิมพีแดนซ์ทางเข้าของสายอากาศตัวที่หนึ่งและสองตามลำดับ เมื่อสายอากาศแต่ละตัวแผ่คลื่นในตัวกลางที่ไม่มีขอบเขต สายอากาศที่อยู่ข้างเคียงจะส่งผลให้อิมพีแดนซ์ขาเข้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งผลกระทบนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสายอากาศ ระยะห่าง

ระหว่างสายอากาศทั้งสอง และชนิดของการป้อนสายอากาศแต่ละตัว ดังนั้นความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.14) สามารถแสดงได้ใหม่เป็น

$$Z_{1d} = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} + Z_{12} \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \tag{2.15ก}$$

$$Z_{2d} = \frac{V_2}{I_2} = Z_{22} + Z_{21} \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \tag{2.15ข}$$

Z_{1d} และ Z_{2d} คืออิมพีแดนซ์ ณ จุดขับ (driving-point impedance) ของสายอากาศตัวที่หนึ่งและสองตามลำดับ โดยที่อิมพีแดนซ์ ณ จุดขับขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของกระแส I_1 / I_2 อิมพีแดนซ์ร่วมและอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศเอง เมื่อต้องการแมตช์ (Matching) สายอากาศ จะต้องแมตช์อิมพีแดนซ์ ณ จุดขับ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ร่วมจึงมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถของสายอากาศ [22]



รูปที่ 2.2 โครงข่ายสองพอร์ตและโครงข่ายเสมือน T

เพื่อที่จะคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วม Z_{21} จำเป็นที่จะต้องหาแรงดัน V_{21} เนื่องจากการเปิดวงจรที่สายอากาศตัวที่สอง ขึ้นอยู่กับกระแส $I_1(0)$ จากสายอากาศตัวที่หนึ่ง ดังนั้นจะพิจารณาให้สายอากาศตัวที่สองอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศตัวที่หนึ่ง และพิจารณาตรงส่วนเล็กๆ ของสายอากาศที่สอง dz' ที่มีระยะห่างจากจุดป้อนตรงกลางเป็นระยะ z' ทำให้องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตกกระทบที่อยู่ในแนวขนานกับส่วนที่ทำการพิจารณา dz' เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E_{z21} ดังนั้นสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใน dz' จะเท่ากับ $E_{zi} = -E_{z21}$ เนื่องจากสนามไฟฟ้ารวมจะมีค่าสูงสุด ณ จุดป้อน และจะมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ณ จุดปลายของสายอากาศ จากรูปที่ 2.3 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{-E_{z21}dz'}{dI_{sc}} = \frac{V}{I_2(z')}$$

หรือ

$$dI_{sc} = -\frac{E_{z21}dz'}{V} I_2(z') \quad (2.16)$$

กระแสรวมจากการเปิดวงจร I_{sc} เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมกันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำตามความยาวของสายอากาศ ดังแสดงในสมการความสัมพันธ์

$$I_{sc} = -\frac{1}{V} \int E_{z21} I_2(z') dz' \quad (2.17)$$

แรงดันจากการเปิดวงจร V_{21} เท่ากับผลคูณของกระแสจากการเปิดวงจร I_{sc} กับอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ Z_2 ดังแสดงในสมการ

$$V_{21} = I_{sc} Z_2 = -\frac{Z_2}{V} \int E_{z21} I_2(z') dz' \quad (2.18)$$

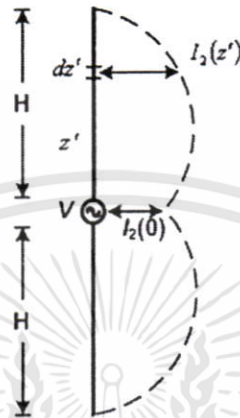
เนื่องจาก $Z_2 = V/I_2(0)$ จะได้

$$V_{21} = -\frac{1}{I_2(0)} \int E_{z21} I_2(z') dz' \quad (2.19)$$

แทนค่าจากสมการที่ (2.19) ลงในสมการที่ (2.14ค) จะได้

$$Z_{21} = -\frac{1}{I_1(0)I_2(0)} \int E_{z21} I_2(z') dz' \quad (2.20)$$

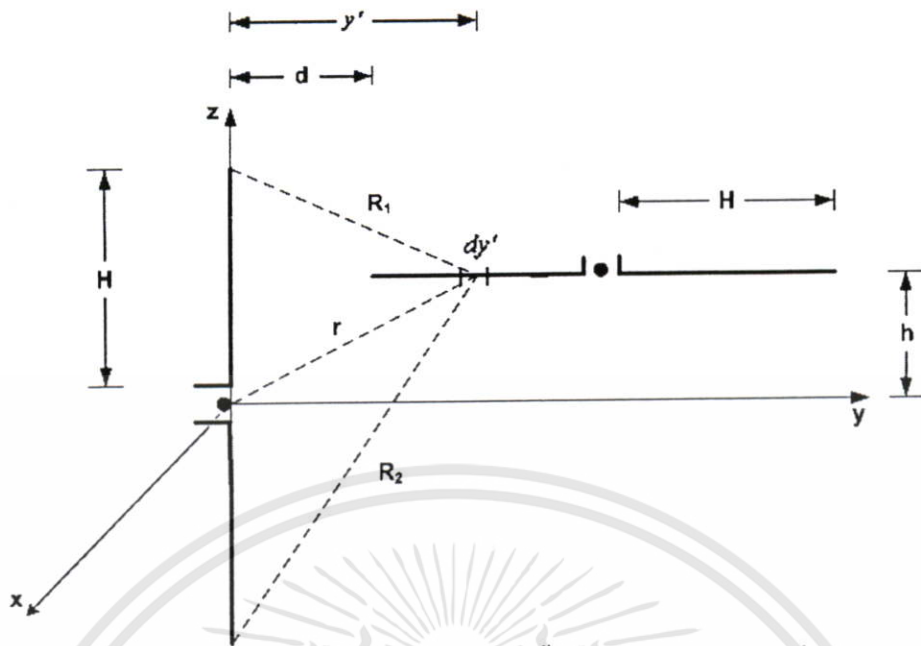
จากสมการที่ (2.20) เป็นความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ร่วมที่แสดงในเทอมของการอินทิเกรตผลคูณขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตกกระทบที่ขนานกับสายอากาศ E_{z21} และกระแสที่กระจายตามความยาวของสายอากาศ เมื่อสายอากาศถูกใช้งานเป็นตัวส่ง $I_2(z')$ โดยที่ $I_1(0)$ และ $I_2(0)$ เป็นกระแส ณ จุดป้อนของสายอากาศตัวที่หนึ่งและสองตามลำดับ [22]



รูปที่ 2.3 การกระจายกระแสบนสายอากาศไดโพล

2.2 การคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสีย

สายอากาศไดโพลที่จะวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมนั้นมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการวิเคราะห์ในรูปแบบการจัดวางแบบไซด์บายไซด์ (Side-by-side), โคลลิเนียร์ (Collinear) และพาราเลลอินเอชเชลอน (Parallel-in-echelon) [23] ต่อมา มีหลายงานวิจัยที่ได้พยายามปรับปรุงแก้ไขสมการสุดท้าย (Closed-form) เพื่อให้ง่ายสำหรับการนำไปใช้ [24]-[26] และมีงานวิจัยที่ได้วิเคราะห์อิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลสองตัวที่มีรูปแบบการจัดวางอยู่ในลักษณะที่ต่างไปจากสามแบบที่ได้มีการวิจัยไว้แล้วข้างต้น [25] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลสองตัวที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากเท่านั้น [20] ส่วนในกรณีที่สายอากาศไดโพลสองตัวมีรูปแบบการจัดวางแบบขนาน จะนำเสนอสมการสุดท้ายของรูปแบบการจัดวางแบบพาราเลลอินเอชเชลอน (Parallel-in-echelon) ที่ได้มีการศึกษาไว้แล้วมาใช้ [23]



รูปที่ 2.4 รูปแบบการจัดวางของสายอากาศไดโพลกรณีตั้งฉากและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพล จากรูปที่ 2.4 จะสมมติให้สายอากาศไดโพลทั้งสองมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากๆ โดยที่กำหนดให้ $H = L/2$ และสายอากาศไดโพลทั้งสองวางห่างกันเป็นระยะ d จากสมการที่ (2.20) จะได้ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลเป็น

$$Z_{21} = -\frac{1}{I_1(0)I_2(0)} \int E_{21}I_2(y')dy' \quad (2.21)$$

แทนค่า E_{21} และ $I_2(y')$ ลงในสมการที่ (2.21) โดยที่

$$E_{21} = E_{\parallel} = E_y = j \frac{\eta I_m}{4\pi y} \left(\frac{z-H}{R_1} \exp(-jkR_1) + \frac{z+H}{R_2} \exp(-jkR_2) - \frac{2z \cos(kH)}{r} \exp(-jkr) \right) \quad (2.22)$$

$$I_2(y') = \begin{cases} I_m \sin[k(y'-d)] & ; d < y' < H+d \\ I_m \sin[k(2H+d-y')] & ; H+d < y' < 2H+d \end{cases} \quad (2.23)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า E_{\parallel} เป็นองค์ประกอบสนามไฟฟ้าแบบขนานที่สายอากาศไดโพลตัวที่สอง ที่เกิดจากสายอากาศไดโพลตัวที่หนึ่ง ดังนั้นเมื่อแทนค่าจากสมการที่ (2.22)-(2.23) ลงในสมการที่ (2.21) จะได้

$$Z_{21} = -j \frac{\eta I_{1m} I_{2m}}{4\pi I_1(0) I_2(0)} \left[\int_d^{H+d} \left\{ \left(\frac{z-H \exp(-jkR_1)}{y R_1} + \frac{z+H \exp(-jkR_2)}{y R_2} - \frac{2z \cos(kH) \exp(-jkr)}{y r} \right) \times \sin[k(y'-d)] \right\} dy' \right. \\ \left. + \int_{H+d}^{2H+d} \left\{ \left(\frac{z-H \exp(-jkR_1)}{y R_1} + \frac{z+H \exp(-jkR_2)}{y R_2} - \frac{2z \cos(kH) \exp(-jkr)}{y r} \right) \times \sin[k(2H+d-y')] \right\} dy' \right] \quad (2.24)$$

เปลี่ยน $\sin[k(y'-d)]$ และ $\sin[k(2H+d-y')]$ ให้อยู่ในเทอมของเอ็กโปเนนเชียล จะได้

$$\sin[k(y'-d)] = \frac{1}{2j} \{ \exp[jk(y'-d)] - \exp[-jk(y'-d)] \} \quad (2.25)$$

$$\sin[k(2H+d-y')] = \frac{1}{2j} \{ \exp[jk(2H+d-y')] - \exp[-jk(2H+d-y')] \} \quad (2.26)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.24) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Z_{21} = -j \frac{\eta I_{1m} I_{2m}}{4\pi I_1(0) I_2(0)} \times \frac{1}{2j} \left[\int_d^{H+d} \left\{ \left(\frac{z-H \exp(-jkR_1)}{y R_1} + \frac{z+H \exp(-jkR_2)}{y R_2} - \frac{2z \cos(kH) \exp(-jkr)}{y r} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. (\exp[jk(y'-d)] - \exp[-jk(y'-d)]) \right\} dy' + \int_{H+d}^{2H+d} \left\{ \left(\exp[jk(2H+d-y')] - \exp[-jk(2H+d-y')] \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{z-H \exp(-jkR_1)}{y R_1} + \frac{z+H \exp(-jkR_2)}{y R_2} - \frac{2z \cos(kH) \exp(-jkr)}{y r} \right) \right\} dy' \right] \quad (2.27)$$

โดยที่ y คือระยะห่างจากสายอากาศไดโพลตัวแรกไปยังจุดสังเกตบนสายอากาศไดโพลตัวที่สอง คิดเป็นค่าคงที่ให้ $y=d$ ส่วน z เป็นความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สองเทียบกับแนวจุดป้อนของสายอากาศไดโพลตัวแรก ซึ่งจากรูป $z=h$ คิดเป็นค่าคงที่เช่นกัน และจากสมการที่ (2.27) เมื่อคูณแจกแจงเข้าไปแล้วอินทิเกรต จะได้ผลบวกของคำตอบออกมาทั้งสิ้น 12 เทอม โดยในที่นี้จะแสดงวิธีการหาคำตอบเพียงเทอมเดียว ซึ่งอีก 11 เทอมที่เหลือมีวิธีการหาเช่นเดียวกัน

กำหนดให้คำตอบเทอมแรกเท่ากับ A_1 ซึ่ง A_1 หาได้จาก

$$A_1 = \int_d^{H+d} \left\{ \left(\frac{z-H \exp(-jkR_1)}{y R_1} \right) \times (\exp[jk(y'-d)]) \right\} dy' \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) แทนค่า $H, z=h$ และ $y=d$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ลงในสมการ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_1 = \frac{h-H}{d} \int_d^{H+d} \frac{\exp[-jk(R_1 - y' + d)]}{R_1} dy' \quad (2.29)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการอินทิเกรต กำหนดให้

$$u = k(y' - R_1)$$

$$\frac{du}{dy'} = k \left(1 - \frac{dR_1}{dy'} \right)$$

ซึ่งจากรูปที่ 2.4 จะได้ว่า

$$R_1 = \sqrt{(H-h)^2 + y'^2}$$

แทนค่า R_1 ลงในสมการ จะได้

$$\frac{du}{dy'} = k \left(\frac{R_1 - y'}{R_1} \right)$$

ดังนั้น

$$dy' = \frac{-R_1}{u} du$$

แทนค่า (dy') ที่ได้ลงในสมการที่ (2.29) จะได้

$$A_1 = \frac{h-H}{d} \int_{u_1}^{u_0} \frac{\exp[-j(kd-u)]}{R_1} \times \left(\frac{-R_1}{u} \right) du \quad (2.30)$$

โดยที่

82736

$$u_0 = k \left[(H+d) - \sqrt{(H-h)^2 + (H+d)^2} \right]$$

$$u_1 = k \left[d - \sqrt{(H-h)^2 + d^2} \right]$$

จากความสัมพันธ์ $\exp(-ju) = \cos u - j \sin u$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.30) สามารถแสดงใหม่ได้ดัง

$$A_1 = - \left(\frac{h-H}{d} \right) \left[\int_{u_1}^{u_0} \frac{\cos(kd-u)}{u} du - j \int_{u_1}^{u_0} \frac{\sin(kd-u)}{u} du \right] \quad (2.31)$$

และจากความสัมพันธ์

$$\cos(A-B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$$

$$\sin(A-B) = \sin A \cos B - \cos A \sin B$$

ดังนั้นสมการที่ (2.31) สามารถแสดงใหม่ได้ดังนี้

$$A_1 = - \left(\frac{h-H}{d} \right) \left[\int_{u_1}^{u_0} \frac{\cos(kd)\cos(u)}{u} du + \int_{u_1}^{u_0} \frac{\sin(kd)\sin(u)}{u} du - j \int_{u_1}^{u_0} \frac{\sin(kd)\cos(u)}{u} du + j \int_{u_1}^{u_0} \frac{\cos(kd)\sin(u)}{u} du \right] \quad (2.32)$$

นำพจน์ที่เป็นค่าคงที่ออกมานอกอินทิเกรต จัดให้อยู่ในรูปโคซายน์อินทิกรัล (Cosine integral) และ ซายน์อินทิกรัล (Sine integral) จะได้

$$A_1 = - \left(\frac{h-H}{d} \right) \left[\cos(kd) \int_{u_1}^{u_0} \frac{\cos(u)}{u} du + \sin(kd) \int_{u_1}^{u_0} \frac{\sin(u)}{u} du - j \sin(kd) \int_{u_1}^{u_0} \frac{\cos(u)}{u} du + j \cos(kd) \int_{u_1}^{u_0} \frac{\sin(u)}{u} du \right]$$

$$A_1 = - \left(\frac{h-H}{d} \right) \left[\cos(kd) \left\{ \int_{u_1}^{\alpha} \frac{\cos(u)}{u} du - \int_{u_0}^{\alpha} \frac{\cos(u)}{u} du \right\} + \sin(kd) \left\{ \int_0^{u_0} \frac{\sin(u)}{u} du - \int_0^{u_1} \frac{\sin(u)}{u} du \right\} \right]$$

$$- j \sin(kd) \left\{ \int_{u_1}^{\alpha} \frac{\cos(u)}{u} du - \int_{u_0}^{\alpha} \frac{\cos(u)}{u} du \right\} + j \cos(kd) \left\{ \int_0^{u_0} \frac{\sin(u)}{u} du - \int_0^{u_1} \frac{\sin(u)}{u} du \right\} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -\left(\frac{h-H}{d}\right) \left[\cos(kd) \{Ci(u_0) - Ci(u_1)\} + \sin(kd) \{Si(u_0) - Si(u_1)\} - j \sin(kd) \{Ci(u_0) - Ci(u_1)\} \right. \\ \left. + j \cos(kd) \{Si(u_0) - Si(u_1)\} \right] \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) จะได้ผลการอินทิเกรตที่อยู่ในเทอมของชายนอินทิกรัลและโคชายนอินทิกรัล ซึ่งชายนอินทิกรัลและโคชายนอินทิกรัล สามารถนิยามได้จากความสัมพันธ์

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin(\tau)}{\tau} d\tau$$

$$Ci(x) = -\int_x^\alpha \frac{\cos(\tau)}{\tau} d\tau = \int_\alpha^x \frac{\cos(\tau)}{\tau} d\tau$$

ส่วนการอินทิเกรตอีก 11 เทอมที่เหลือนั้น มีขั้นตอนเหมือนกับเทอมที่ A_1 ดังนั้นจะแสดงเพียงผลลัพธ์ที่ได้จากการอินทิเกรตเท่านั้น

$$A_2 = -\left(\frac{h+H}{d}\right) \left[\cos(kd) \{Ci(u_3) - Ci(u_2)\} + \sin(kd) \{Si(u_3) - Si(u_2)\} \right. \\ \left. - j \sin(kd) \{Ci(u_3) - Ci(u_2)\} + j \cos(kd) \{Si(u_3) - Si(u_2)\} \right] \quad (2.34)$$

$$A_3 = \frac{2h}{d} \cos(kH) \left[\cos(kd) \{Ci(u_5) - Ci(u_4)\} + \sin(kd) \{Si(u_5) - Si(u_4)\} \right. \\ \left. - j \sin(kd) \{Ci(u_5) - Ci(u_4)\} + j \cos(kd) \{Si(u_5) - Si(u_4)\} \right] \quad (2.35)$$

$$A_4 = -\left(\frac{h-H}{d}\right) \left[\cos(kd) \{Ci(v_0) - Ci(v_1)\} + \sin(kd) \{Si(v_0) - Si(v_1)\} \right. \\ \left. - j \cos(kd) \{Si(v_0) - Si(v_1)\} + j \sin(kd) \{Ci(v_0) - Ci(v_1)\} \right] \quad (2.36)$$

$$A_5 = -\left(\frac{h+H}{d}\right) \left[\cos(kd) \{Ci(v_3) - Ci(v_2)\} + \sin(kd) \{Si(v_3) - Si(v_2)\} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-j \cos(kd) \{Si(v_3) - Si(v_2)\} + j \sin(kd) \{Ci(v_3) - Ci(v_2)\} \quad (2.37)$$

$$A_6 = \frac{2h}{d} \cos(kH) \left[\cos(kd) \{Ci(v_5) - Ci(v_4)\} + \sin(kd) \{Si(v_5) - Si(v_4)\} \right. \\ \left. - j \cos(kd) \{Si(v_5) - Si(v_4)\} + j \sin(kd) \{Ci(v_5) - Ci(v_4)\} \right] \quad (2.38)$$

$$A_7 = \left(\frac{h-H}{d} \right) \left[\cos[k(2H+d)] \{Ci(m_1) - Ci(v_0)\} + \sin[k(2H+d)] \{Si(m_1) - Si(v_0)\} \right. \\ \left. - j \cos[k(2H+d)] \{Si(m_1) - Si(v_0)\} + j \sin[k(2H+d)] \{Ci(m_1) - Ci(v_0)\} \right] \quad (2.39)$$

$$A_8 = \left(\frac{h+H}{d} \right) \left[\cos[k(2H+d)] \{Ci(m_2) - Ci(v_3)\} + \sin[k(2H+d)] \{Si(m_2) - Si(v_3)\} \right. \\ \left. - j \cos[k(2H+d)] \{Si(m_2) - Si(v_3)\} + j \sin[k(2H+d)] \{Ci(m_2) - Ci(v_3)\} \right] \quad (2.40)$$

$$A_9 = -\frac{2h}{d} \cos(kH) \left[\cos[k(2H+d)] \{Ci(m_3) - Ci(v_5)\} + \sin[k(2H+d)] \{Si(m_3) - Si(v_5)\} \right. \\ \left. - j \cos[k(2H+d)] \{Si(m_3) - Si(v_5)\} + j \sin[k(2H+d)] \{Ci(m_3) - Ci(v_5)\} \right] \quad (2.41)$$

$$A_{10} = \left(\frac{h-H}{d} \right) \left[\cos[k(2H+d)] \{Ci(m_4) - Ci(u_0)\} + \sin[k(2H+d)] \{Si(m_4) - Si(u_0)\} \right. \\ \left. - j \sin[k(2H+d)] \{Ci(m_4) - Ci(u_0)\} + j \cos[k(2H+d)] \{Si(m_4) - Si(u_0)\} \right] \quad (2.42)$$

$$A_{11} = \left(\frac{h+H}{d} \right) \left[\cos[k(2H+d)] \{Ci(m_5) - Ci(u_3)\} + \sin[k(2H+d)] \{Si(m_5) - Si(u_3)\} \right. \\ \left. - j \sin[k(2H+d)] \{Ci(m_5) - Ci(u_3)\} + j \cos[k(2H+d)] \{Si(m_5) - Si(u_3)\} \right] \quad (2.43)$$

$$A_{12} = -\frac{2h}{d} \cos(kH) \left[\cos[k(2H+d)] \{Ci(m_6) - Ci(u_5)\} + \sin[k(2H+d)] \{Si(m_6) - Si(u_5)\} \right. \\ \left. - j \sin[k(2H+d)] \{Ci(m_6) - Ci(u_5)\} + j \cos[k(2H+d)] \{Si(m_6) - Si(u_5)\} \right] \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

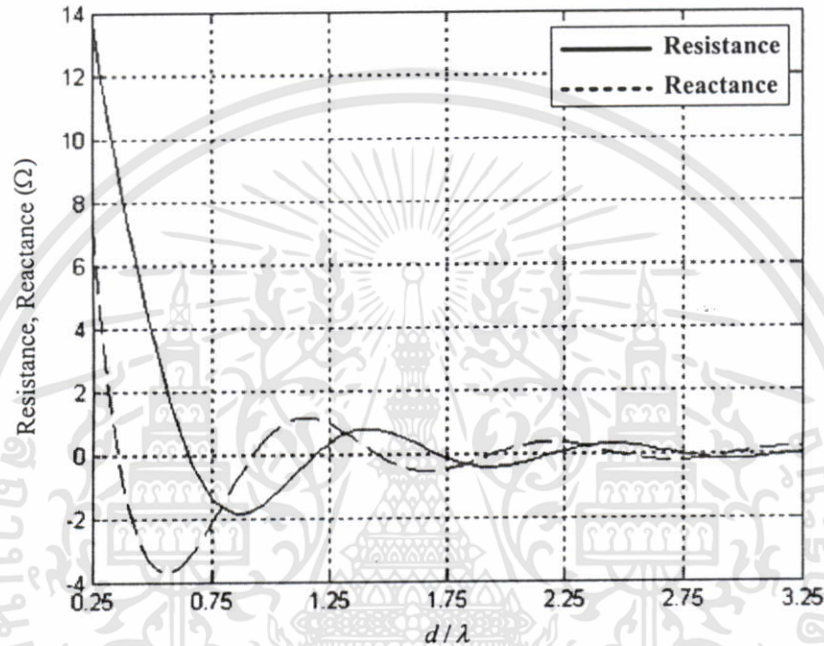
$$\begin{aligned}
 u_2 &= k \left[d - \sqrt{(H+h)^2 + d^2} \right] \\
 u_3 &= k \left[(H+d) - \sqrt{(H+h)^2 + (H+d)^2} \right] \\
 u_4 &= k \left[d - \sqrt{h^2 + d^2} \right] \\
 u_5 &= k \left[(H+d) - \sqrt{h^2 + (H+d)^2} \right] \\
 v_0 &= k \left[\sqrt{(H-h)^2 + (H+d)^2} + (H+d) \right] \\
 v_1 &= k \left[\sqrt{(H-h)^2 + d^2} + d \right] \\
 v_2 &= k \left[\sqrt{(H+h)^2 + d^2} + d \right] \\
 v_3 &= k \left[\sqrt{(H+h)^2 + (H+d)^2} + (H+d) \right] \\
 v_4 &= k \left[\sqrt{h^2 + d^2} + d \right] \\
 v_5 &= k \left[\sqrt{h^2 + (H+d)^2} + (H+d) \right] \\
 m_1 &= k \left[\sqrt{(H-h)^2 + (2H+d)^2} + (2H+d) \right] \\
 m_2 &= k \left[\sqrt{(H+h)^2 + (2H+d)^2} + (2H+d) \right] \\
 m_3 &= k \left[\sqrt{h^2 + (2H+d)^2} + (2H+d) \right] \\
 m_4 &= k \left[(2H+d) - \sqrt{(H-h)^2 + (2H+d)^2} \right] \\
 m_5 &= k \left[(2H+d) - \sqrt{(H+h)^2 + (2H+d)^2} \right]
 \end{aligned}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลสองตัวที่วางอยู่ในลักษณะตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นผลรวมของคำตอบทั้ง 12 เทอม $\left(\sum_{i=1}^N A_i ; N=12 \right)$ ที่ได้จากสมการที่ (2.27) แสดงได้ดังนี้

$$Z_{21} = -j \frac{\eta I_m I_2 m}{4\pi I_1(0) I_2(0)} \times \frac{1}{2j} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12}) \quad (2.45)$$

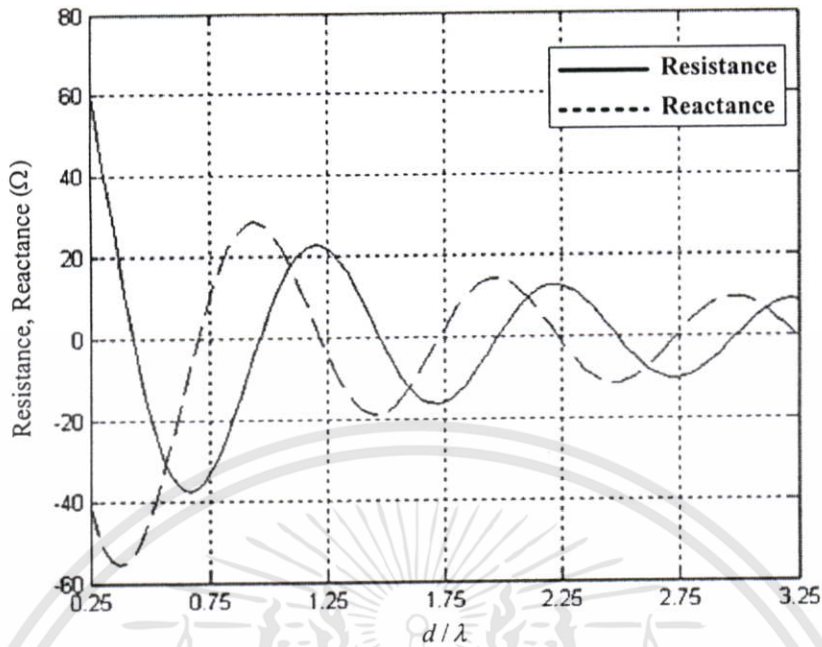
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้สายอากาศไดโพลสองตัวที่นำมาวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีความยาวครึ่งความยาวคลื่น (0.5λ) จะได้ว่า ($H=0.25\lambda$) ความสูง ($h=0.125$) และกำหนดให้สายอากาศไดโพลทั้งสองมีขนาดพอมมาก จึงไม่นำรัศมีของสายอากาศไดโพลมาคำนวณด้วย ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ d ซึ่งเป็นระยะห่างของสายอากาศทั้งสองตัวที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์ร่วม โดยระยะห่างที่ทำการเปลี่ยนแปลงจะคิดเป็นอัตราส่วนต่อความยาวคลื่น ผลที่ได้ดังแสดงต่อไปนี้



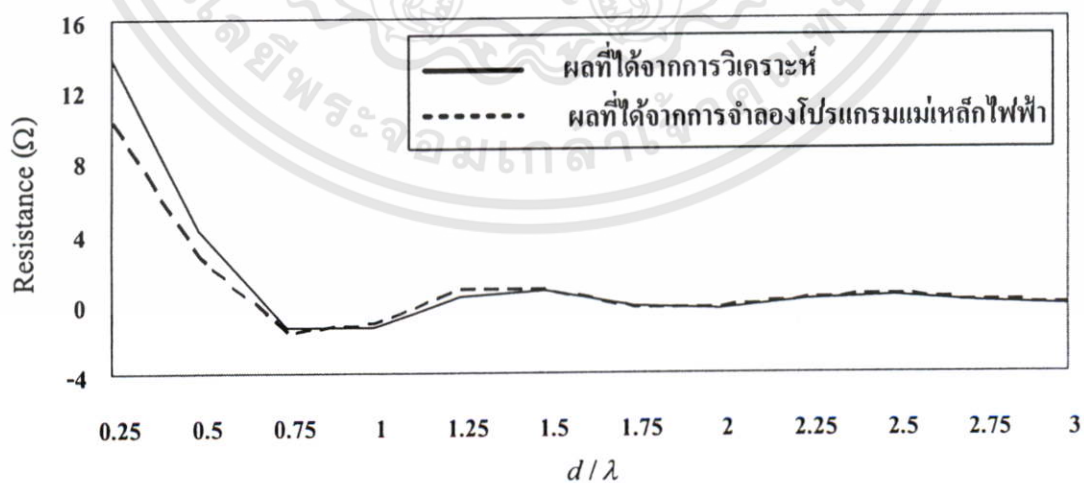
รูปที่ 2.5 ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมจากการวิเคราะห์กรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก

จากรูปที่ 2.5 เห็นได้ว่าค่าความต้านทาน (Resistance) และค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ลดลงเมื่ออัตราส่วนของระยะห่างต่อความยาวคลื่น (d/λ) เพิ่มมากขึ้น ยิ่งระยะห่างของสายอากาศไดโพลทั้งสองตัวมากขึ้นค่าจะเริ่มคงที่เข้าใกล้ศูนย์



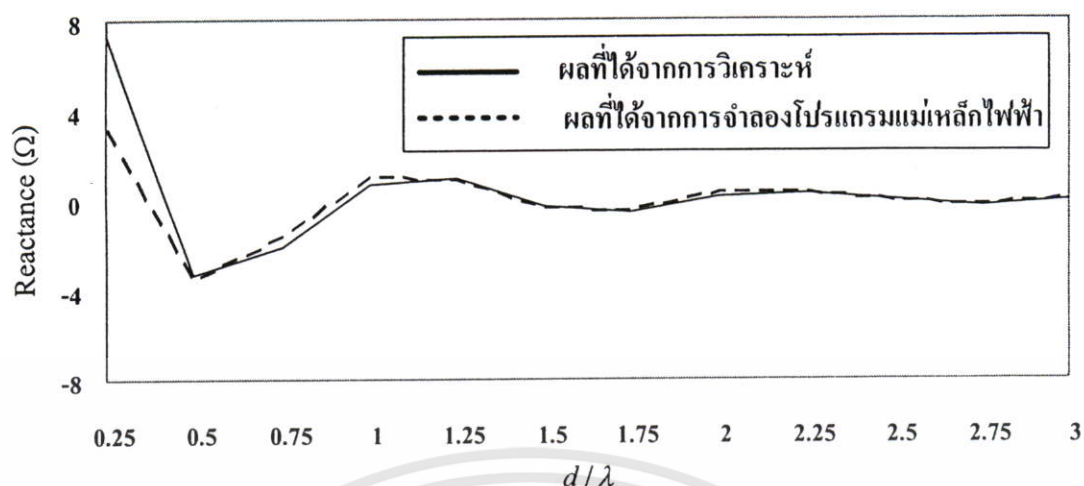
รูปที่ 2.6 ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมกรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางตัวแบบขนาน

จากรูปที่ 2.6 แสดงค่าอิมพีแดนซ์กรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางตัวแบบขนาน ซึ่งผลที่ได้มาจากสูตรกรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบพาราเลลอินเอซซิดอน ซึ่งได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้แล้ว [23] พบว่าทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ลดลงเมื่ออัตราส่วนของระยะห่างต่อความยาวคลื่น (d/λ) เพิ่มมากขึ้น ยิ่งระยะห่างของสายอากาศไดโพลทั้งสองตัวมากขึ้นค่าจะเริ่มคงที่เข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 2.7 ค่าความต้านทานร่วมจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก

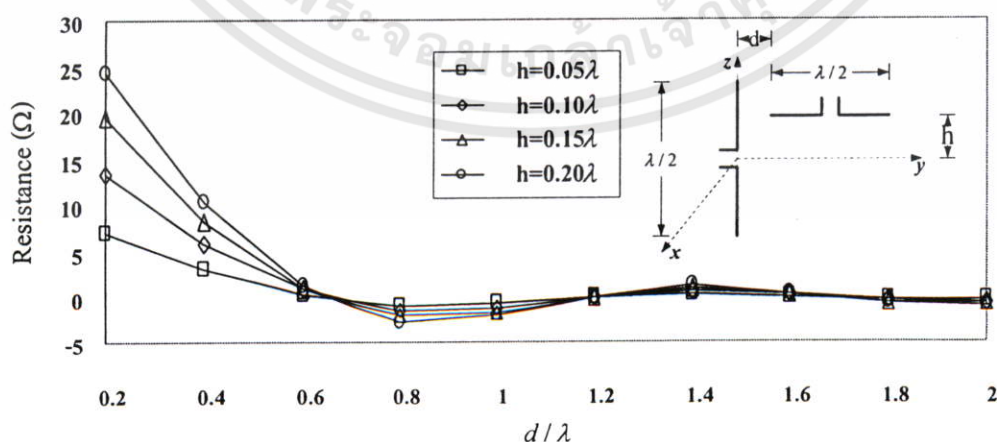
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้า กรณีที่สายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก

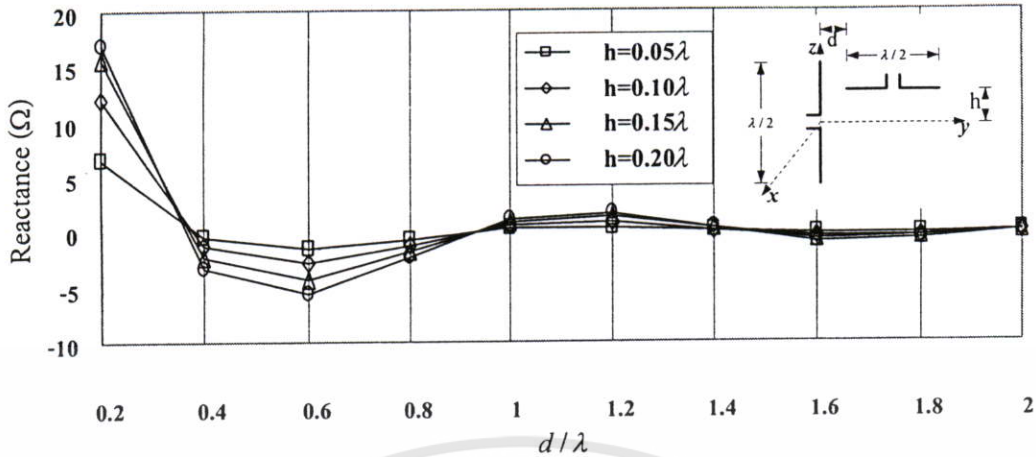
จากรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 เห็นได้ว่าค่าความต้านทานร่วมและค่ารีแอกแตนซ์ร่วมจากการวิเคราะห์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าจากการจำลองโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้า [27] แต่จะเห็นว่าค่าจากการวิเคราะห์มีค่าแตกต่างไปจากค่าจากการจำลองโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลสองตัวมีค่าน้อยๆ เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลเพิ่มขึ้นค่าจากการวิเคราะห์และค่าจากการจำลองโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันน้อยลง

จากสูตรที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลสองตัวที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก เมื่อทำการศึกษาค่าของอิมพีแดนซ์ร่วมจากผลกระทบ โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สอง ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวแกน y กำหนดให้สายอากาศไดโพลสองตัวมีความยาวครึ่งความยาวคลื่น (0.5λ)



รูปที่ 2.9 ค่าความต้านทานร่วมจากการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมจากการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สอง

จากรูปที่ 2.9 เห็นได้ว่าในช่วงระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลสองตัวเท่ากับ $(0.2\lambda - 0.6\lambda)$ ค่าความต้านทานรวมมากขึ้นเมื่อความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สองเลื่อนสูงขึ้น และลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลทั้งสองเพิ่มมากขึ้น รูปที่ 2.10 เห็นได้ว่าในช่วงระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลสองตัวเท่ากับ $(0.2\lambda - 0.4\lambda)$ ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมมากขึ้นเมื่อความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สองเลื่อนสูงขึ้น และลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลทั้งสองเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับค่าความต้านทานรวม จากการศึกษาถึงผลกระทบของการเลื่อนความสูงของสายอากาศไดโพลตัวที่สองพบว่าที่ระยะความสูง $(h=0)$ หรือเมื่อสายอากาศไดโพลตัวที่สองอยู่ในแนวจุดป้อนของสายอากาศตัวที่แรก ค่าความต้านทานรวมและค่ารีแอกแตนซ์ร่วมมีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์เช่นเดียวกันกับเมื่อระยะความสูง $(h=0.125\lambda)$

2.3 การคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

จากหลักการที่ว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในตัวกลางใดๆ เป็นฟังก์ชันของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในตัวกลางนั้น โดยทั่วไปตัวกลางของวัสดุจะเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียแทบทั้งสิ้น ตัวกลางที่มีการสูญเสียต่างจากตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสียที่ค่าคงตัวของการแพร่กระจาย (Propagation constant) ในตัวกลางที่มีการสูญเสียจะคิดรวมค่าคงตัวของการลดทอน (Attenuation constant) ซึ่งในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสียจะคิดเฉพาะค่าคงตัวเฟส (Phase constant) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกำหนดให้ k เป็นค่าคงตัวการแพร่กระจาย α เป็นค่าคงตัวของการลดทอน และ β เป็นค่าคงตัวเฟส ดังนั้นค่าคงตัวของการแพร่กระจายในตัวกลางที่มีการสูญเสียแสดงได้ดัง

$$k = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \sqrt{-\omega^2\mu\epsilon + j\omega\mu\sigma} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.46) ค่าคงตัวการลดทอนและค่าคงตัวเฟส มีค่า

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad \text{Np/m} \quad (2.47ก)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad \text{rad/m} \quad (2.47ข)$$

จากสมการที่ (2.27) และรูปที่ 2.4 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสีย ซึ่งการวิเคราะห์ในตัวกลางที่มีการสูญเสียมีวิธีการวิเคราะห์เหมือนกัน แตกต่างกันเพียงค่าคงตัวของ การแพร่กระจาย ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอเพียงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 12 เทอม ดังนี้

$$A_1 = -\left(\frac{h-H}{d} \right) \times \left[\exp(d\beta) \times \{ \cos(d\alpha) - j \sin(d\alpha) \} \times \{ \{ Ci(u_0) - Ci(u_1) \} + j \{ Si(u_0) - Si(u_1) \} \} \right] \quad (2.48)$$

$$A_2 = -\left(\frac{h+H}{d} \right) \times \left[\exp(d\beta) \times \{ \cos(d\alpha) - j \sin(d\alpha) \} \times \{ \{ Ci(u_3) - Ci(u_2) \} + j \{ Si(u_3) - Si(u_2) \} \} \right] \quad (2.49)$$

$$A_3 = \frac{2h}{d} \times \frac{1}{2} \left[\cos(H\alpha) \times \{ \exp(H\beta) + \exp(-H\beta) \} - j \sin(H\alpha) \times \{ \exp(H\beta) - \exp(-H\beta) \} \right] \times \left[\exp(d\beta) \right] \\ \times \left[\cos(d\alpha) - j \sin(d\alpha) \right] \times \left[\{ \{ Ci(u_5) - Ci(u_4) \} + j \{ Si(u_5) - Si(u_4) \} \} \right] \quad (2.50)$$

$$A_4 = -\left(\frac{h-H}{d} \right) \times \left[\exp(-d\beta) \times \{ \cos(d\alpha) + j \sin(d\alpha) \} \times \{ \{ Ci(v_0) - Ci(v_1) \} - j \{ Si(v_0) - Si(v_1) \} \} \right] \quad (2.51)$$

$$A_5 = -\left(\frac{h+H}{d} \right) \times \left[\exp(-d\beta) \times \{ \cos(d\alpha) + j \sin(d\alpha) \} \times \{ \{ Ci(v_3) - Ci(v_2) \} - j \{ Si(v_3) - Si(v_2) \} \} \right] \quad (2.52)$$

$$A_6 = \frac{2h}{d} \times \frac{1}{2} \left[\cos(H\alpha) \times \{ \exp(H\beta) + \exp(-H\beta) \} - j \sin(H\alpha) \times \{ \exp(H\beta) - \exp(-H\beta) \} \right] \times \left[\exp(-d\beta) \right] \\ \times \left[\cos(d\alpha) + j \sin(d\alpha) \right] \times \left[\{ \{ Ci(v_5) - Ci(v_4) \} - j \{ Si(v_5) - Si(v_4) \} \} \right] \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_7 = \left(\frac{h-H}{d} \right) \times [\exp(-2H\beta) \times \exp(-d\beta)] \times \{\cos(2H\alpha) + j\sin(2H\alpha)\} \times \{\cos(d\alpha) + j\sin(d\alpha)\} \\ \times \{ \{Ci(m_1) - Ci(v_0)\} - j\{Si(m_1) - Si(v_0)\} \} \quad (2.54)$$

$$A_8 = \left(\frac{h+H}{d} \right) \times [\exp(-2H\beta) \times \exp(-d\beta)] \times \{\cos(2H\alpha) + j\sin(2H\alpha)\} \times \{\cos(d\alpha) + j\sin(d\alpha)\} \\ \times \{ \{Ci(m_2) - Ci(v_3)\} - j\{Si(m_2) - Si(v_3)\} \} \quad (2.55)$$

$$A_9 = -\frac{2h}{d} \times \frac{1}{2} [\cos(H\alpha) \times [\exp(H\beta) + \exp(-H\beta)] - j\sin(H\alpha) \times [\exp(H\beta) - \exp(-H\beta)]] \times [\exp(-2H\beta)] \\ \times [\exp(-d\beta)] \times [\cos(2H\alpha) + j\sin(2H\alpha)] \times [\cos(d\alpha) + j\sin(d\alpha)] \\ \times \{ \{Ci(m_3) - Ci(v_5)\} - j\{Si(m_3) - Si(v_5)\} \} \quad (2.56)$$

$$A_{10} = \left(\frac{h-H}{d} \right) \times [\exp(2H\beta) \times \exp(d\beta)] \times \{\cos(2H\alpha) - j\sin(2H\alpha)\} \times \{\cos(d\alpha) - j\sin(d\alpha)\} \\ \times \{ \{Ci(m_4) - Ci(u_0)\} + j\{Si(m_4) - Si(u_0)\} \} \quad (2.57)$$

$$A_{11} = \left(\frac{h+H}{d} \right) \times [\exp(2H\beta) \times \exp(d\beta)] \times \{\cos(2H\alpha) - j\sin(2H\alpha)\} \times \{\cos(d\alpha) - j\sin(d\alpha)\} \\ \times \{ \{Ci(m_5) - Ci(u_3)\} + j\{Si(m_5) - Si(u_3)\} \} \quad (2.58)$$

$$A_{12} = -\frac{2h}{d} \times \frac{1}{2} [\cos(H\alpha) \times [\exp(H\beta) + \exp(-H\beta)] - j\sin(H\alpha) \times [\exp(H\beta) - \exp(-H\beta)]] \times [\exp(2H\beta)] \\ \times [\exp(d\beta)] \times [\cos(2H\alpha) - j\sin(2H\alpha)] \times [\cos(d\alpha) - j\sin(d\alpha)] \\ \times \{ \{Ci(m_6) - Ci(u_5)\} + j\{Si(m_6) - Si(u_5)\} \} \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่พารามิเตอร์ในเทอมของไซน์อินทิกรัลและโคซายน์อินทิกรัลเท่ากับที่ได้แสดงในหัวข้อการคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสียก่อนหน้านี้

2.4 การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่าง

สายอากาศ

เราสามารถจำแนกวัสดุได้โดยใช้คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้สำหรับบอกความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (ϵ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของวัสดุในสนามไฟฟ้า ค่าสภาพยอมไฟฟ้าประกอบด้วยส่วนจริง (ϵ') ที่เรียกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และส่วนจินตภาพ (ϵ'') ที่เรียกว่าตัวประกอบสูญเสีย ดังนั้นค่าสภาพยอมไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดัง

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.60)$$

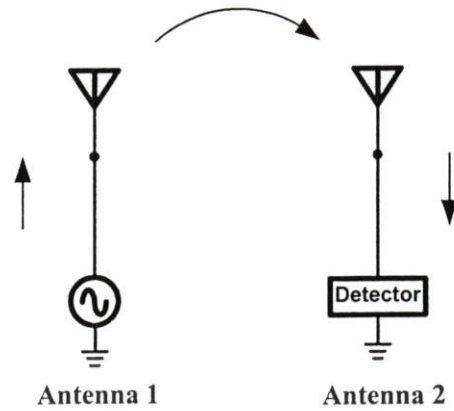
โดยที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ตัวประกอบสูญเสียบ่งบอกถึงพลังงานของสนามไฟฟ้าที่สูญเสียในตัววัสดุ นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่มักใช้อยู่บ่อยครั้งเรียกว่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบสูญเสียกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุมักถูกนอร์มัลไลซ์ (Normalized) ด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้าของสุญญากาศ และเรียกใหม่ว่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (2.61)$$

โดยที่ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m นอกจากนี้ค่าตัวประกอบสูญเสียสัมพัทธ์สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของสภาพนำ (σ) ได้ดังนี้

$$\epsilon''_r = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.62)$$

ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านได้จะทำให้รู้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในตัวกลางนั้นได้



รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ

จากรูปที่ 2.11 แสดงถึงการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ โดยที่สายอากาศตัวหนึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ สายอากาศอีกตัวต่ออยู่กับตัวตรวจจับสัญญาณ เมื่อสายอากาศตัวที่หนึ่งส่งสัญญาณผ่านตัวกลางมายังสายอากาศตัวที่สอง ขนาดของสัญญาณที่สายอากาศตัวที่สองตรวจจับได้ เรียกว่า ขนาดของการเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ซึ่งค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมมีผลกระทบโดยตรงมาจากอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศ ดังนั้นเมื่อรู้ค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม จะสามารถหาค่าไดอิเล็กตริกของตัวกลางของคลื่นที่เดินทางผ่านได้

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงหลักการและทฤษฎีสำหรับการนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพล วิธีการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากทั้งในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสีย และทดสอบความแม่นยำของสูตรที่วิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบผลกับค่าที่ได้จากการจำลอง โปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้า ศึกษาผลกระทบจากระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลทั้งสองตัว และความสูงของสายอากาศตัวที่สอง ที่ส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ร่วม จากนั้นแสดงถึงผลการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ร่วมในตัวกลางที่มีการสูญเสียของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก รวมไปถึงการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ

บทที่ 3

การวิเคราะห์การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการวัดค่า การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีโพลาริเซชัน ตั้งฉากและขนาน

3.1 บทนำ

วิธีการวัดเพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีอยู่หลากหลายเทคนิค ซึ่งได้นำเสนอโดยยกตัวอย่างบางเทคนิคที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ เทคนิคสายส่ง เทคนิคอวกาศว่าง เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ เป็นต้น และเปรียบเทียบข้อเด่น ข้อด้อย ของแต่ละเทคนิคให้เห็นในบทที่ 1 แล้วนั้น จะเห็นได้ว่าวิธีการวัดเพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคที่ต่างกัน ทำให้ผลการวัดที่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละเทคนิคมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ที่ต่างกัน เช่น บางเทคนิคเหมาะกับการทดสอบวัสดุที่เป็นของแข็งแต่ไม่เหมาะสำหรับการทดสอบกับวัสดุที่มีเป็นของเหลว บางเทคนิคเหมาะสำหรับการทดสอบที่ขณะกำลังทดสอบสามารถควบคุมอุณหภูมิของวัสดุที่ต้องการทดสอบได้ง่าย บางเทคนิคที่การเตรียมวัสดุสำหรับการทดสอบสามารถทำได้ง่ายกว่าการทดสอบด้วยอีกเทคนิค หรือเทคนิคบางเทคนิคที่เมื่อทดสอบกับวัสดุแล้วต้องสัมผัสหรือทำลายวัสดุที่ต้องการทดสอบ ดังนั้นการจะเลือกใช้เทคนิคใดเทคนิคหนึ่งสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกนั้นจะต้องพิจารณาถึงธรรมชาติของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกทั้งทางด้านกายภาพ ทางด้านไฟฟ้าของวัสดุที่ต้องการวัด ความถี่ที่ใช้วัด และระดับความแม่นยำที่ต้องการ เพื่อที่จะได้เลือกเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการนำไปทดสอบกับวัสดุที่ต้องการจะทดสอบและเพื่อที่จะได้ค่าคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกที่แม่นยำยิ่งขึ้น

ในบทนี้จะได้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการวัดเพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous material) โดยที่การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะต้องนำสายอากาศใส่เข้าไปในวัสดุที่ต้องการทดสอบ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงมีข้อจำกัดตรงที่วัสดุที่ต้องการทดสอบต้องเป็นตัวกลางที่สามารถสอดใส่สายอากาศเข้าไปได้ ซึ่งหลักการของเทคนิคใหม่ที่จะนำเสนอนี้จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

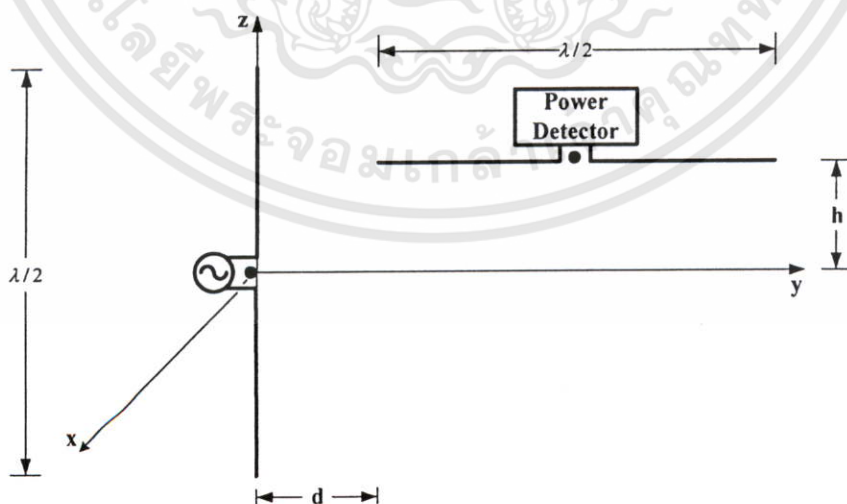
3.2 เทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการวัดค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม

เทคนิคใหม่สำหรับการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการวัดค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมที่จะนำเสนอเป็นเทคนิคที่ประยุกต์มาจากเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้มีการศึกษาก่อน

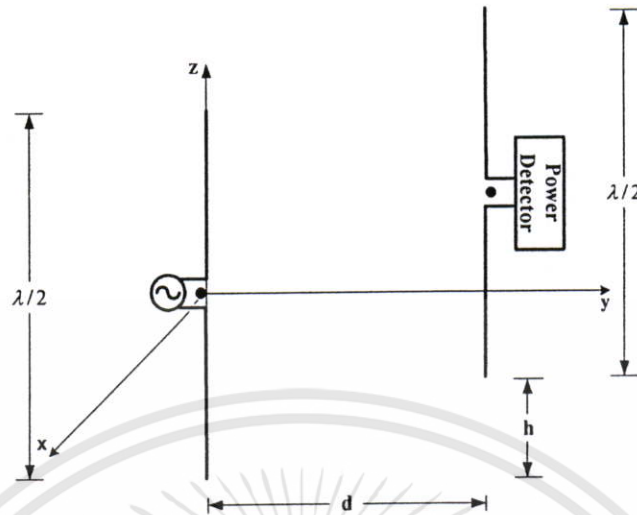
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้านี้ ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้สายอากาศไดโพลสองตัวใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบ โดยที่สายอากาศตัวหนึ่งต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณ ส่วนสายอากาศอีกตัวต่ออยู่กับเครื่องตรวจจับสัญญาณ จากนั้นวัดค่าขนาดของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศตัวส่งที่ส่งคลื่นผ่านตัวกลางของวัสดุที่ทดสอบมายังสายอากาศตัวรับ ซึ่งขนาดสัญญาณที่รับได้เรียกว่า “ขนาดของการเชื่อมต่อร่วม (S_{21})” แล้วคำนวณเพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบนั้นจากค่าขนาดของสัญญาณที่วัดได้

เทคนิคใหม่ที่นำเสนอนี้ประยุกต์มาจากเทคนิคอวกาศสว่างที่พิจารณาขนาดของการสะท้อนและขนาดของการเชื่อมต่อร่วม จากเทคนิคเดิมนั้นจะเห็นว่าในการพิจารณาขนาดของการสะท้อนต้องมีส่วนของวงจรสำหรับตรวจจับสัญญาณสะท้อน ซึ่งทำให้ระบบการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีความซับซ้อน เทคนิคที่นำเสนอใหม่นี้ช่วยลดความซับซ้อนของระบบการวัดโดยการพิจารณาเฉพาะค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมเพียงอย่างเดียว ซึ่งจากความคิดที่ว่าหากเปรียบเทียบการวัดขนาดการสะท้อนและขนาดของการเชื่อมต่อร่วมเป็นการวัดเพื่อสร้างสมการขึ้นมาสองสมการ โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือค่าสภาพยอมที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน อันประกอบด้วยส่วนจริงที่เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและส่วนจินตภาพที่เป็นค่าตัวประกอบสูญเสีย ดังนั้นเทคนิคใหม่นี้จะใช้การปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันของสายอากาศเป็นสองกรณีแล้ววัดเพียงแค่ขนาดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศจากแต่ละ โพลาริเซชันแทนที่การวัดทั้งขนาดการสะท้อนและขนาดการเชื่อมต่อร่วม โดยที่โพลาริเซชันของสายอากาศเป็นโพลาริเซชันขนานและตั้งฉาก โพลาริเซชันขนานมีรูปแบบการจัดวางของสายอากาศเป็นแบบพาราเลลอินเอชซิลอน ส่วนโพลาริเซชันตั้งฉากมีรูปแบบการจัดวางของสายอากาศเป็นแบบตั้งฉาก ดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก) สายอากาศไดโพลที่มีการจัดวางแบบตั้งฉาก

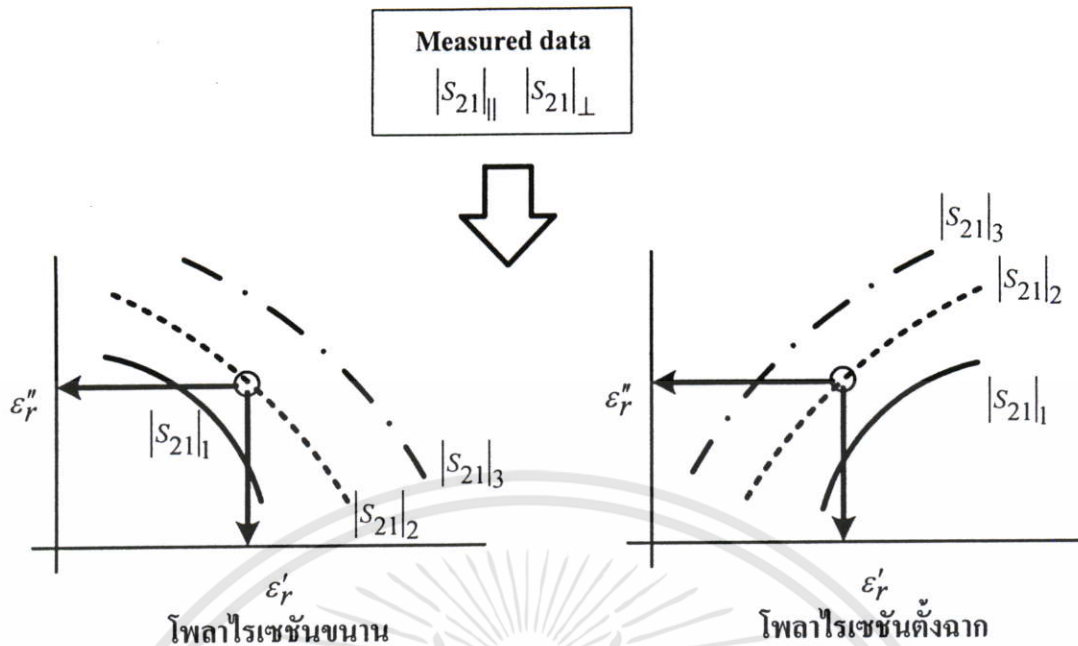


(ข) สายอากาศไดโพลที่มีการจัดวางแบบขนาน

รูปที่ 3.1 การใช้สายอากาศที่มีการสวิทช์โพลารไรซ์ในการหาคูสมบัตินิโคอิเล็คทริกในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบ

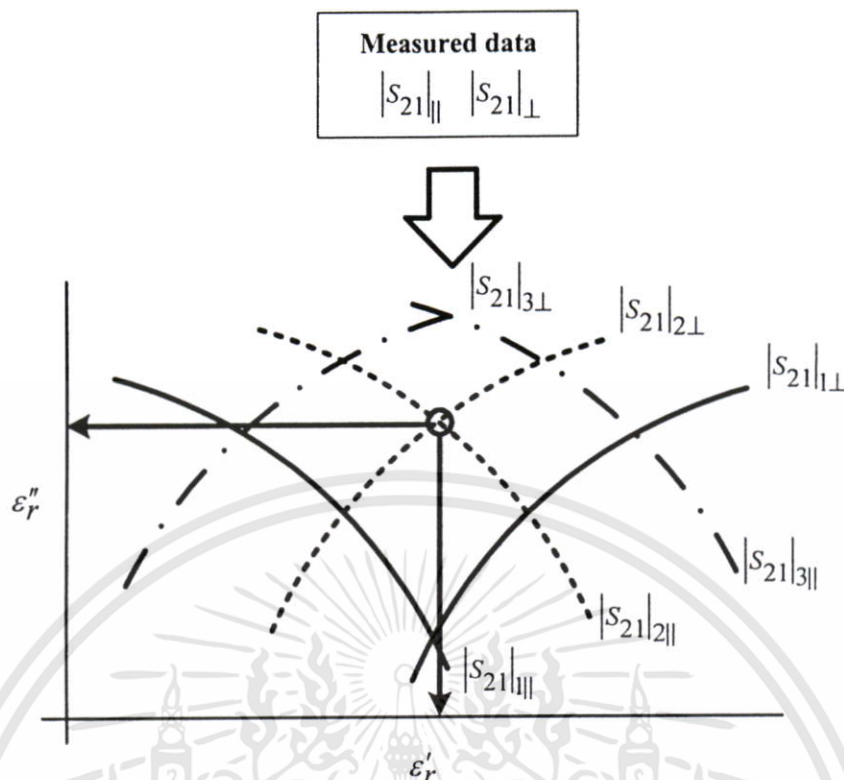
เทคนิคใหม่ที่น่าสนใจจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือในส่วนแรกเป็นการคำนวณเพื่อหาคำตอบที่ใช้ในการหาค่าไดอิเล็คทริกวัสดุที่ต้องการทดสอบ โดยส่วนของการคำนวณเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่ตั้งโพลารไรซ์ในทิศทางที่ผ่านมา ส่วนที่สองเป็นการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วม ทั้งสองส่วนนี้จะต้องนำมาใช้ร่วมกันเพื่อที่จะทำให้เทคนิคใหม่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ โดยหลังจากวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุที่ต้องการทดสอบในกรณีที่สายอากาศมีโพลารไรซ์ขนานและตั้งฉาก นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้จากแต่ละกรณีไปหาค่าไดอิเล็คทริกจากผลการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมที่แปลงจาก Z พารามิเตอร์ให้เป็นค่าการเชื่อมต่อร่วมซึ่งอยู่ในรูป S พารามิเตอร์ ซึ่งในการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ร่วมจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็คทริก และตัวประกอบการสูญเสีย เพื่อดูผลของอิมพีแดนซ์ร่วมจากค่าคงตัวไดอิเล็คทริกและตัวประกอบการสูญเสีย ซึ่งนำมาเขียนเป็นกราฟเชิงพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่

3.2



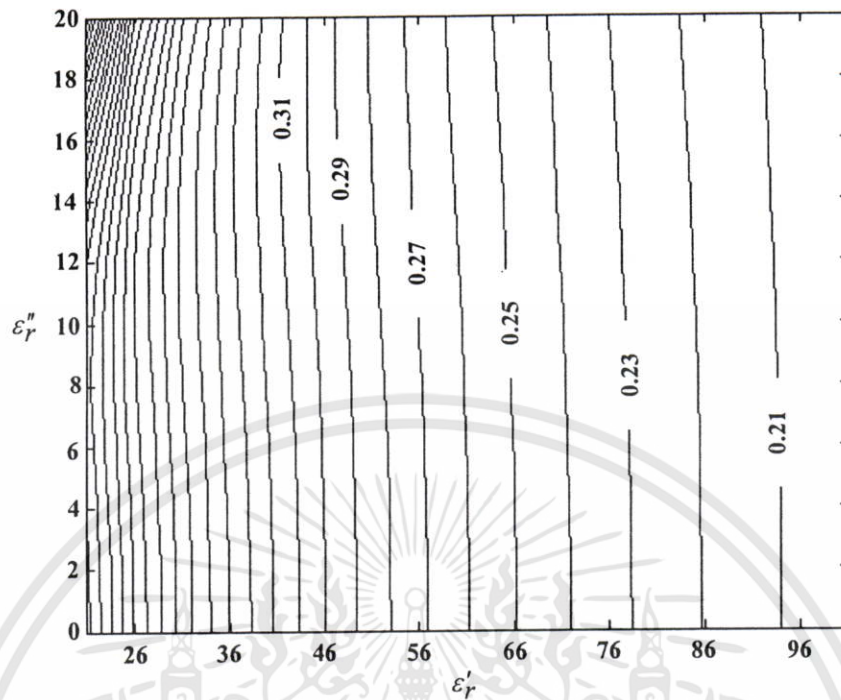
รูปที่ 3.2 หลักการนำเทคนิคการหาคณสมบัติไดอิเล็กตริก ไปใช้งาน

จากรูปที่ 3.2 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวของค่าการเชื่อมต่อร่วมที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมเชิงซ้อนทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ โดยที่กราฟแต่ละเส้นเป็นค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่มีค่าแตกต่างกันไปตามค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสีย การนำกราฟนี้ไปใช้ทำได้โดยนำค่าที่ได้จากการวัดการเชื่อมต่อร่วมแต่ละโพลาริเซชันของสายอากาศมาพิจารณาร่วมกับกราฟจากแต่ละโพลาริเซชัน กราฟเชิงเส้นจะเป็นตัวบอกค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสีย แต่จะเห็นว่ากราฟแต่ละเส้นสามารถให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่า ดังนั้นวิธีการนำกราฟนี้ไปใช้จะต้องนำกราฟจากแต่ละกรณีมาซ้อนกันเพื่อหาจุดตัดของกราฟแต่ละค่าของการเชื่อมต่อร่วม ซึ่งจุดตัดเพียงจุดเดียวเท่านั้นจากการเชื่อมต่อร่วมจากแต่ละกรณีเป็นตัวบอกค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

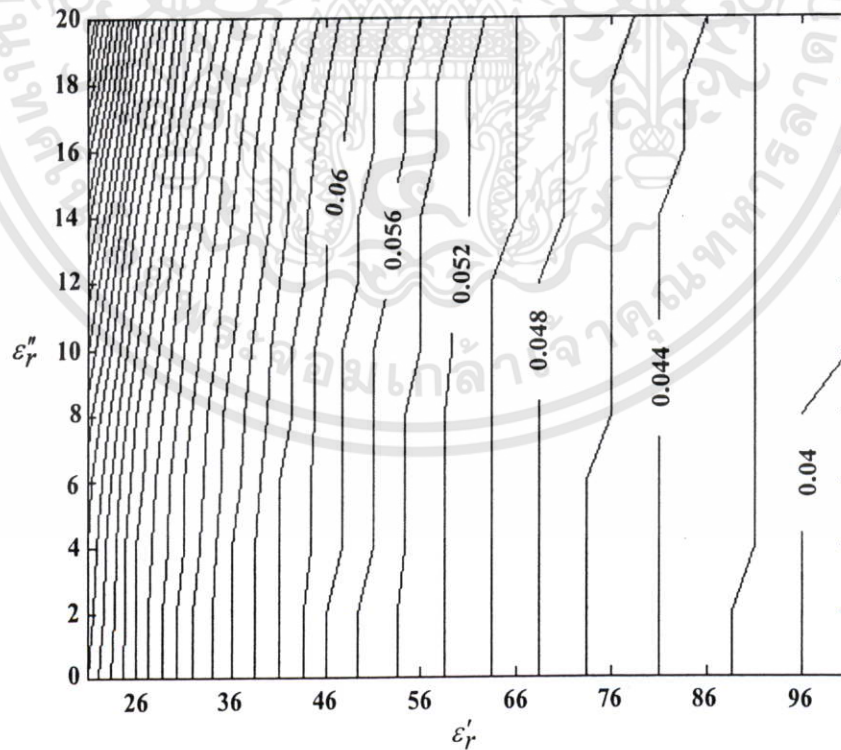


รูปที่ 3.3 กราฟเชิงพื้นผิวที่ใช้หาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

กราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อรวมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบตั้งฉาก โดยกำหนดให้สายอากาศไดโพลมีความยาวครึ่งความยาวคลื่น ($L = \lambda_0 / 2$) ระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลทั้งสองตัว d เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ความสูงของสายอากาศตัวที่สองเมื่อเทียบจากจุดป้อนของสายอากาศตัวที่หนึ่งเท่ากับความยาวคลื่นส่วนสี่ ($h = \lambda_0 / 4$) และความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งกราฟแสดงค่าขนาดของการเชื่อมต่อรวมเมื่อสายอากาศจัดวางแบบตั้งฉากสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยที่กราฟแต่ละเส้นซึ่งแทนค่าขนาดของการเชื่อมต่อรวมค่าหนึ่งที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสีย โดยที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง ($0 < \epsilon'_r < 101$) และค่าตัวประกอบสูญเสียมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง ($0 < \epsilon''_r < 20$) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมากขึ้นค่าขนาดของการเชื่อมต่อรวมมีค่าลดลง ซึ่งกราฟของค่าขนาดการเชื่อมต่อรวมหนึ่งค่าให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพียงหนึ่งค่า แต่ให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่า ดังนั้นจึงต้องนำกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากไปใช้พิจารณาร่วมกับกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบขนาน



รูปที่ 3.4 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อกันของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่มีรูปแบบการจัดวางตั้งฉาก

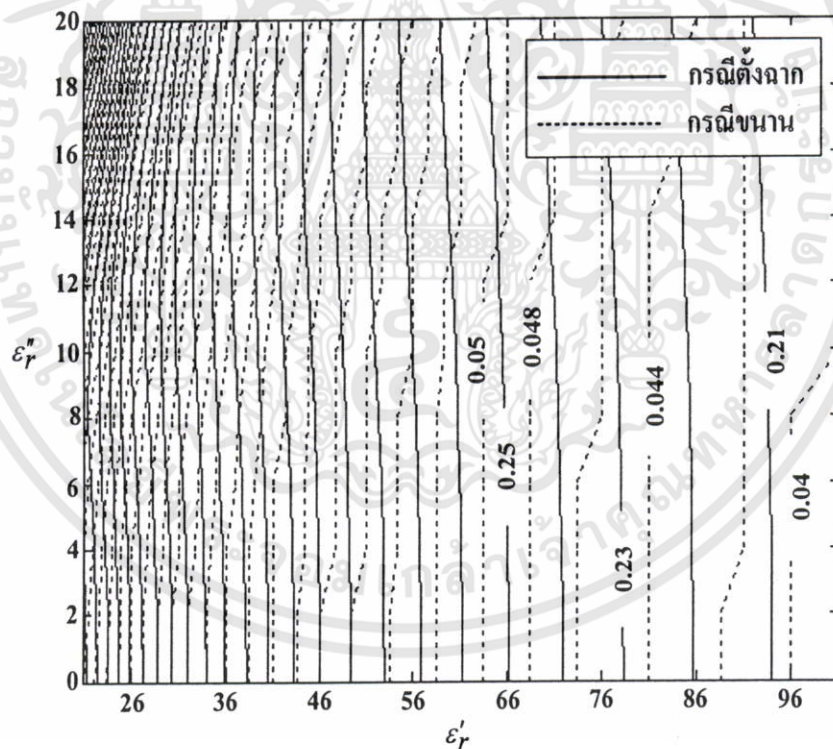


รูปที่ 3.5 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อกันของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่มีรูปแบบการจัดวางขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางขนาน โดยกำหนดให้สายอากาศไดโพลมีความยาวครึ่งความยาวคลื่น ($L = \lambda_0/2$) ระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลทั้งสองตัวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวสายอากาศไดโพลรวมกับระยะ 0.2 มิลลิเมตร ($d = 0.2 + (\lambda_0/4)$) เนื่องจากต้องการให้จุดป้อนของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนานและแบบตั้งฉากมีตำแหน่งเดียวกัน ความสูงของสายอากาศตัวที่สองเมื่อเทียบกับสายอากาศตัวที่หนึ่งเท่ากับความยาวคลื่นส่วนสี่ ($h = \lambda_0/4$) และความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมหนึ่งค่าให้ค่าคงตัวได้อิเล็กทริกเพียงหนึ่งค่า แต่ให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่าเช่นเดียวกันกับกราฟที่ได้จากกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 เพื่อที่จะนำกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมจากแต่ละกรณีของการจัดวางตัวของสายอากาศมาใช้หาค่าคุณสมบัติได้อิเล็กทริกพร้อมกับค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้วัสดุทดสอบ ต้องนำกราฟทั้งสองมาซ้อนกัน ดังจะได้แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน

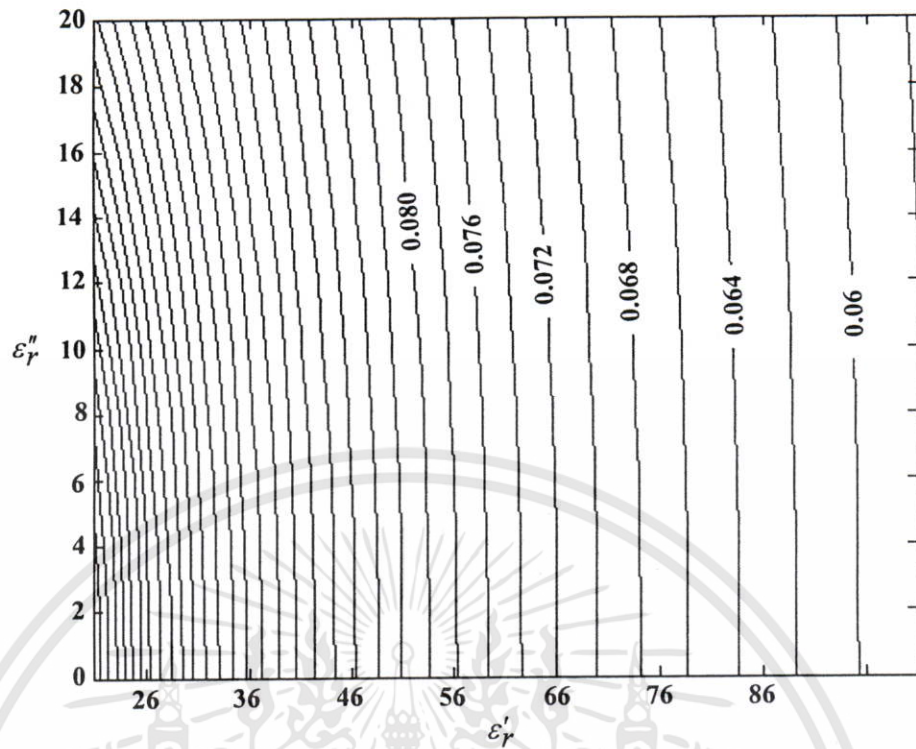
จากรูปที่ 3.6 กราฟแต่ละเส้นแทนค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่มีรูปแบบการจัดวางตั้งฉากและขนาน โดยกราฟที่แสดงด้วยเส้นทึบเป็นค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

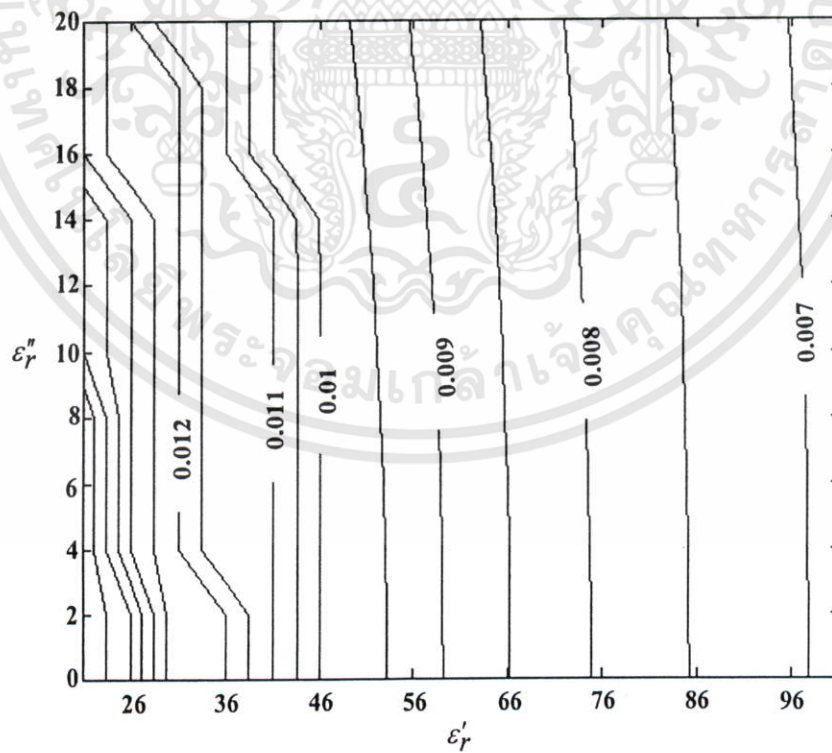
สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก ส่วนกราฟที่แสดงด้วยเส้นประใช้แทนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากกรณีขนาน จะเห็นว่ากราฟแต่ละเส้นจากแต่ละกรณีมีจุดตัดเพียงจุดเดียว ซึ่งจุดตัดนี้ทำให้ได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียเพียงค่าเดียว ยกตัวอย่างเช่น สมมติให้ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานที่ได้จากการวัดเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ นำค่าที่ได้จากการวัดไปพิจารณาเพื่อหากราฟโดยพิจารณาค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมจากกรณีตั้งฉาก 0.25 กับกราฟเส้นทึบ ส่วนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมจากกรณีขนาน 0.05 กับกราฟเส้นประ จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองเส้นมีจุดตัดเพียงจุดเดียว จากจุดตัดของกราฟทั้งสองเส้นจากแต่ละกรณีลากไปยังแกน x และแกน y จะได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียตามลำดับ ดังนั้นกราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นสามารถใช้สำหรับหาคูสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้

จากสมมติฐานที่ว่าเมื่อสายอากาศไดโพลมีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่มากขึ้นจะสามารถนำมาใช้หาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุที่มีค่าตัวไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงได้ ดังนั้นจึงได้สร้างกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่จะนำมาใช้เพื่อหาคูสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในช่วงของค่าไดอิเล็กตริกที่สูงขึ้น โดยกำหนดให้สายอากาศไดโพลมีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ($\epsilon_r = 35$) ระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลทั้งสองตัว d เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และครึ่งหนึ่งของความยาวสายอากาศไดโพลรวมกับระยะ 0.2 มิลลิเมตร ($d = 0.2 + (\lambda_d/4)$) สำหรับกรณีที่มีรูปแบบตั้งฉากและขนานตามลำดับ ความสูงของสายอากาศตัวที่สองเมื่อเทียบจากจุดป้อนของสายอากาศตัวที่หนึ่งเท่ากับความยาวคลื่นส่วนสี่ที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ($h = \lambda_d/4$) และความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีรูปแบบตั้งฉากและขนาน สามารถแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมากขึ้นค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมมีค่าลดลง ซึ่งกราฟของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมหนึ่งค่าให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพียงหนึ่งค่า แต่ให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่า เช่นเดียวกันกับกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ที่แสดงในรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5

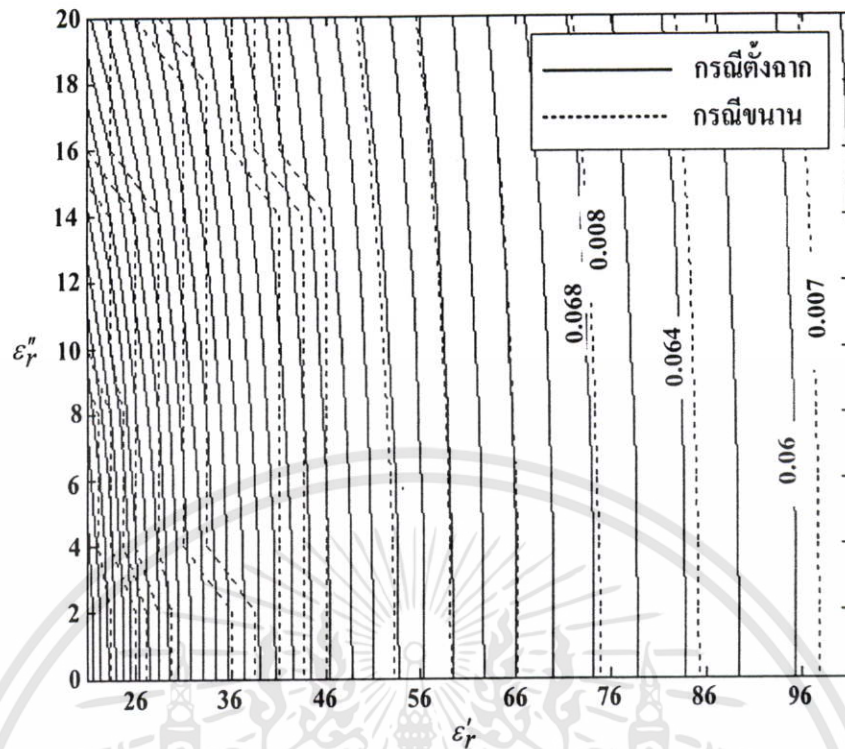


รูปที่ 3.7 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก



รูปที่ 3.8 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



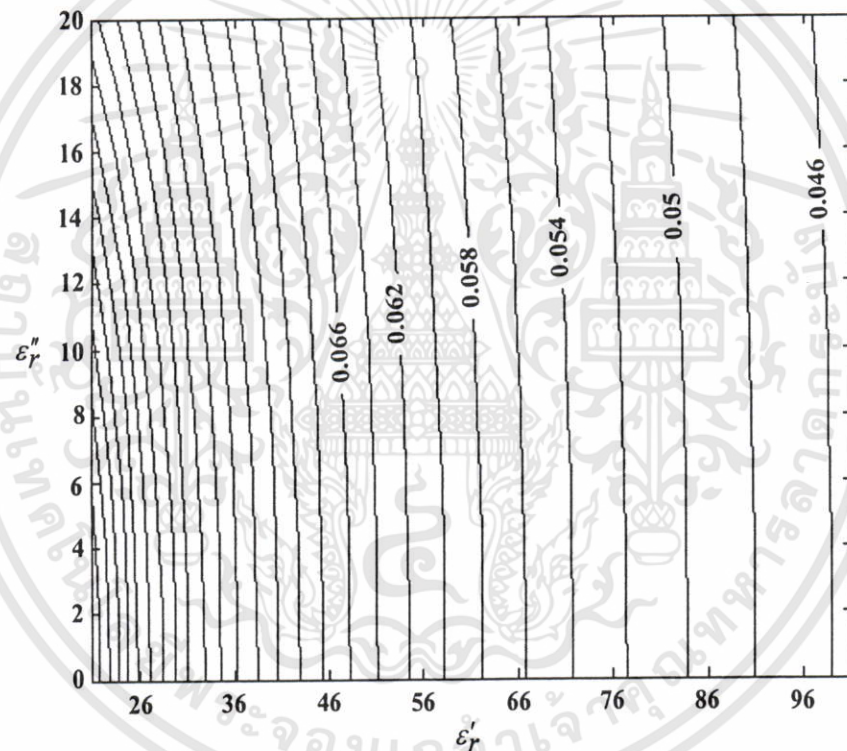
รูปที่ 3.9 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่ากราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 จากรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและขนาน โดยกราฟที่แสดงด้วยเส้นทึบเป็นค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมกรณีที่ยานอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก ส่วนกราฟที่แสดงด้วยเส้นประใช้แทนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากกรณีขนาน จะเห็นได้ว่าในช่วงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ $(0 < \epsilon_r' < 46)$ และค่าตัวประกอบสูญเสีย $(2 < \epsilon_r'' < 20)$ กราฟของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมแต่ละค่าจากกรณีตั้งฉากและขนานมีจุดตัดกันมากกว่าหนึ่งจุด ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในช่วง $(46 < \epsilon_r' < 101)$ และค่าตัวประกอบสูญเสีย $(2 < \epsilon_r'' < 20)$ จะเห็นได้ว่ากราฟจากแต่ละกรณีมีจุดตัดเพียงจุดเดียว กราฟบางเส้นซ้อนทับกัน และกราฟขนานกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากราฟนี้เพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับผลการวัดการเชื่อมต่อร่วมด้วยสายอากาศไดโพลที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 เพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้

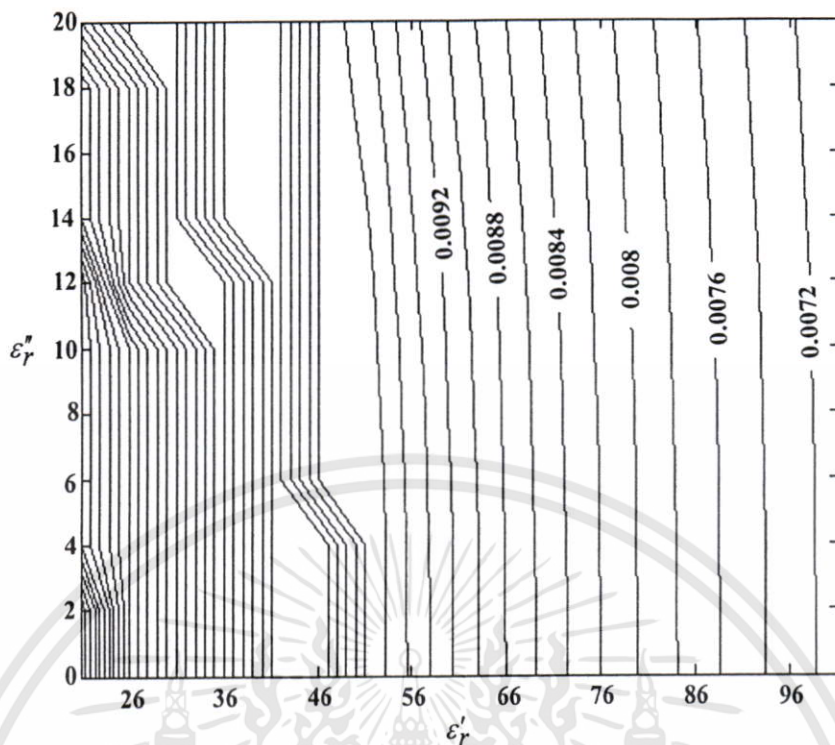
นอกจากนี้ได้ทดลองวิเคราะห์เมื่อกำหนดให้สายอากาศไดโพลมีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงขึ้นไป โดยได้ลองวิเคราะห์ที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ($\epsilon_r' = 75$) ระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลทั้งสองตัว d เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และครึ่งหนึ่งของความยาวสายอากาศไดโพลรวมกับระยะ 0.2 มิลลิเมตร ($d = 0.2 + (\lambda_d/4)$) สำหรับกรณีที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้ง

ฉากและขนานตามลำดับ ความสูงของสายอากาศตัวที่สองเมื่อเทียบจากจุดป้อนของสายอากาศตัวที่หนึ่งเท่ากับความยาวคลื่นส่วนสี่ที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ($h = \lambda_d / 4$) และความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำมาสร้างกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการตั้งฉากและขนานดังแสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 ตามลำดับ

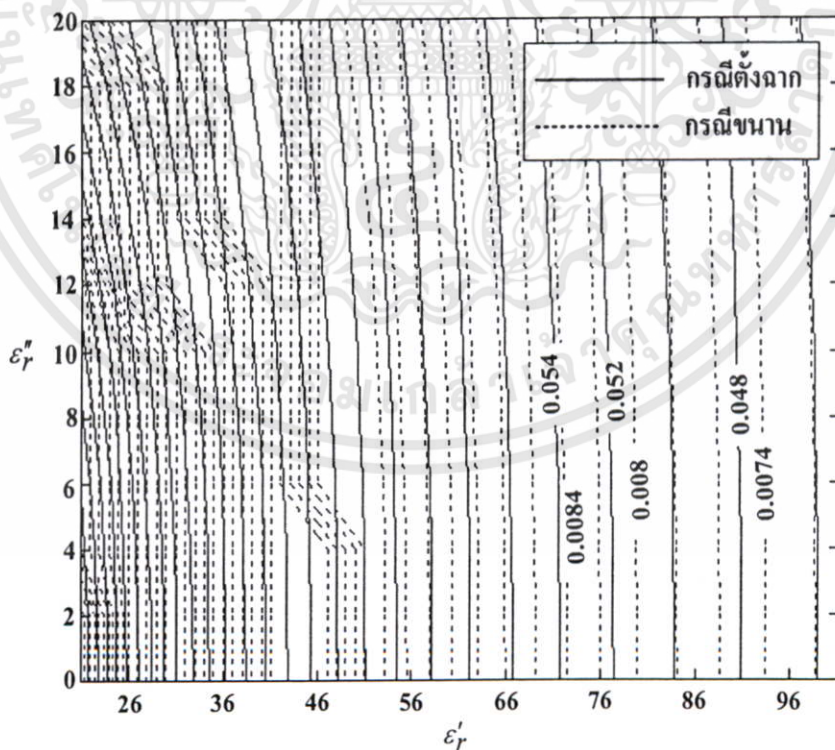
จากรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมากขึ้นค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมมีค่าลดลง ซึ่งกราฟของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมหนึ่งค่าให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพียงหนึ่งค่า แต่ให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่า เช่นเดียวกันกับกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ที่แสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.10 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก



รูปที่ 3.11 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ได้อิเล็กทริกเท่ากับ 75 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนาน



รูปที่ 3.12 กราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ได้อิเล็กทริกเท่ากับ 75 ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นว่ากราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ที่ได้จากรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและขนาน โดยกราฟที่แสดงด้วยเส้นทึบเป็นค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมกรณีทีสายอากาศไดโพลมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉาก ส่วนกราฟที่แสดงด้วยเส้นประใช้แทนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากกรณีขนาน จะเห็นได้ว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริก ($0 < \epsilon_r' < 51$) และค่าตัวประกอบสูญเสีย ($2 < \epsilon_r'' < 20$) กราฟของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมแต่ละค่าจากกรณีตั้งฉากและขนานมีจุดตัดกันมากกว่าหนึ่งจุด ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในช่วง ($46 < \epsilon_r' < 101$) และค่าตัวประกอบสูญเสีย ($2 < \epsilon_r'' < 20$) จะเห็นได้ว่ากราฟจากแต่ละกรณีมีจุดตัดเพียงจุดเดียว กราฟบางเส้นซ้อนทับกันและกราฟขนานกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากราฟนี้เพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับผลการวัดการเชื่อมต่อร่วมด้วยสายอากาศไดโพลที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 เพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้ เช่นเดียวกับกราฟเชิงพื้นผิวของขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่สายอากาศไดโพลมีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 3.6 รูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.12 ทำให้เกิดความสงสัยว่าควรจะใช้สายอากาศแบบไหน ระหว่างสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 หรือสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ซึ่งการเลือกใช้งานจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.3 การเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงถึงผลการวิเคราะห์ขนาดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและขนาน ผลจากการวิเคราะห์ให้นำมาวาดเป็นกราฟเชิงพื้นผิวแต่ละกรณีของรูปแบบการจัดวาง จากนั้นนำกราฟของแต่ละกรณีมาวางซ้อนกันเพื่อนำมาใช้ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกร่วมกับผลที่ได้จากการวัด ซึ่งจากกราฟเชิงพื้นผิวขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่น พบว่ากราฟแต่ละเส้นที่แทนค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมค่าหนึ่งจากแต่ละกรณีมีจุดตัดของกราฟเพียงจุดเดียวตลอดในช่วงของการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ($0 < \epsilon_r' < 101$) และค่าตัวประกอบสูญเสียมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง ($0 < \epsilon_r'' < 20$) ซึ่งจากหลักการนำกราฟนี้ไปใช้ กราฟแต่ละเส้นจากแต่ละกรณีจะต้องตัดกันเพียงจุดเดียวเท่านั้น มิฉะนั้นเมื่อนำค่าที่วัดได้มาใช้ร่วมกับกราฟเชิงพื้นผิว จะได้ค่าไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่า ดังนั้นกราฟเชิงพื้นผิวนี้จึงสามารถนำมาใช้ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้ ส่วนกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 พบว่ากราฟทั้งสองมีจุดตัดของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมจากแต่ละกรณีเพียงจุดตัดเพียงจุดเดียวในบางช่วงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเกิดข้อสงสัยว่าควรจะใช้สายอากาศใดโพลที่ความยาวเท่าใดในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

สายอากาศใดโพลครึ่งความยาวคลื่น สายอากาศครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และสายอากาศใดโพลครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 จะเห็นได้ว่าความยาวสายอากาศใดโพลทั้งสามความยาวนี้เทียบได้กับสามช่วงของไดอิเล็กตริก คือ ช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลายตามลำดับ การจะเลือกใช้สายอากาศใดโพลความยาวใดน่าจะเลือกใช้ตามวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นหลัก โดยการเลือกใช้สายอากาศใดโพลความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการทดสอบ เพื่อที่จะได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียจากการวัดที่แม่นยำมากขึ้น เปรียบการเลือกช่วงที่เหมาะสมได้กับการป้อนค่าเริ่มต้นเพื่อให้โปรแกรมลู่ออกหาคำตอบได้เร็วขึ้น การเลือกช่วงที่เหมาะสมนั้นจะเป็นการวัดโดยทราบค่าไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของวัสดุที่ต้องการทดสอบคร่าวๆ แต่เพื่อต้องการหาค่าที่แม่นยำมากขึ้น จึงจำเป็นต้องเลือกช่วงที่เหมาะสมของสายอากาศที่จะนำไปใช้สำหรับการวัดทดสอบ ซึ่งการเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจะแสดงผลการเปรียบเทียบให้เห็นด้วยผลการทดลองที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 5

3.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคที่น่าสนใจในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ และกล่าวถึงความจำเป็นของเทคนิคใหม่ที่จะนำเสนอ จากนั้นได้อธิบายถึงเทคนิคใหม่ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยการพิจารณาเฉพาะขนาดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศใดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและขนาน นอกจากนี้ได้แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟเชิงพื้นที่ของขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่เปลี่ยนไปตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และค่าตัวประกอบสูญเสียสุดท้ายกล่าวถึงการเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

บทที่ 4

การออกแบบและการสร้างสายอากาศ

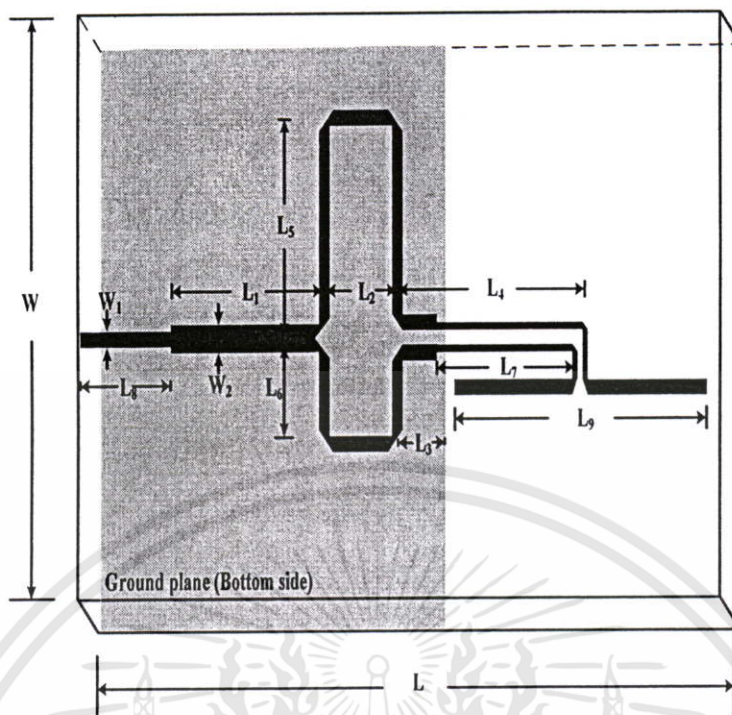
4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไดโพลสำหรับใช้ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ สายอากาศไดโพลที่ออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานอยู่บนแผ่นพิมพ์เดียวกัน โดยในการออกแบบเริ่มต้นที่การจำลองสายอากาศไดโพลตัวเดี่ยวด้วยโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27] เพื่อพิจารณาค่า $|S_{11}|$ เมื่อได้ขนาดความกว้างและความยาวของโครงสร้างที่เหมาะสมแล้ว จึงนำขนาดที่ได้มาใช้ออกแบบสายอากาศไดโพลคู่ โดยสายอากาศไดโพลที่เพิ่มเข้ามาจะประกอบด้วยอิลิเมนต์ 4 อิลิเมนต์ที่มีรูปแบบการจัดวางเป็นรูปกากบาท อิลิเมนต์ทั้ง 4 อิลิเมนต์เชื่อมต่ออยู่กับสวิตช์ 2 ตัวซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวปรับเลือกรูปแบบการจัดวางของสายอากาศระหว่างแบบตั้งฉากและแบบขนาน จุดประสงค์ของการออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่มีรูปแบบการจัดวางของสายอากาศแบบตั้งฉากและแบบขนานอยู่บนแผ่นพิมพ์แผ่นเดียวกันก็เพื่อให้สายอากาศไดโพลมีขนาดกะทัดรัด ทำให้สะดวกและง่ายสำหรับการนำสายอากาศไปใช้สำหรับการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

โครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27] ผลการจำลองเพื่อพิจารณาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลตัวเดี่ยว ผลการจำลองเพื่อพิจารณาค่า $|S_{11}|$, $|S_{22}|$ และค่าการเชื่อมต่อร่วม ($|S_{21}|$) รวมทั้งผลการทดสอบสายอากาศที่สร้างตามแบบที่ได้จำลองไว้ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

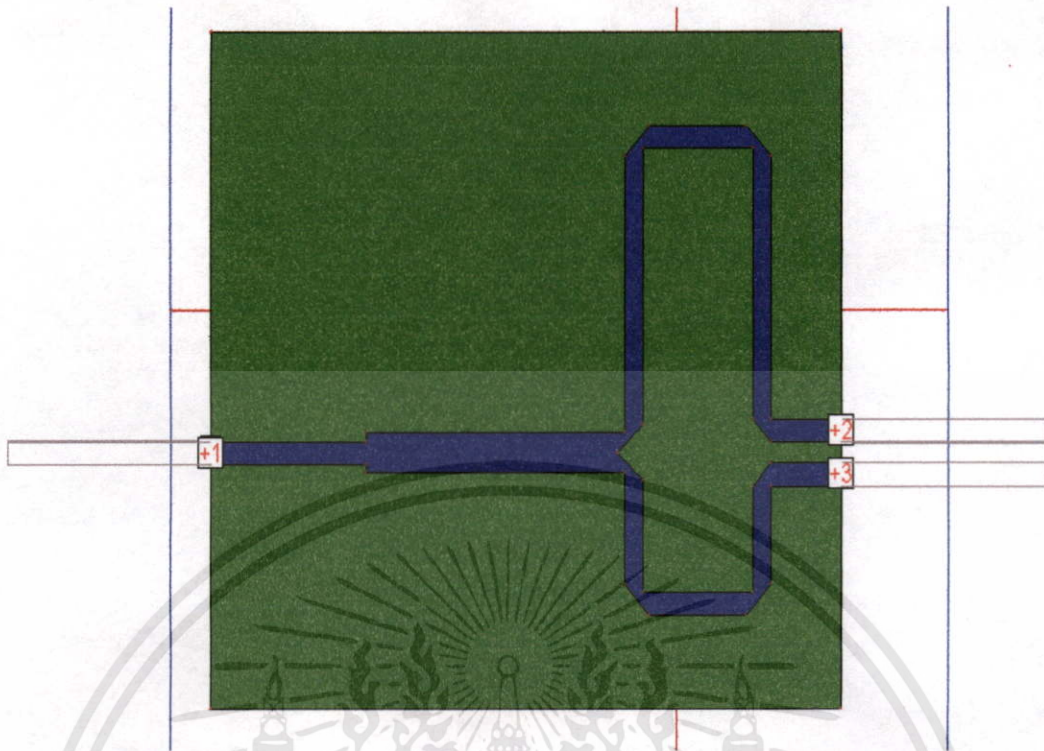
4.2 โครงสร้างสายอากาศ

สายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ออกแบบประยุกต์มาจากสายอากาศควอไซด์ยาคิแบบระนาบ (Planar quasi-yagi antenna) [28]-[30] โดยที่สายอากาศอยู่บนระนาบด้านบนของแผ่นพิมพ์ ส่วนด้านล่างของแผ่นพิมพ์เป็นระนาบกราวด์ที่โค่นตัด มีความยาวเพียงแค่จุดเริ่มสายไมโครสตริประนาบร่วม (Coplanar stripline) ที่อยู่ด้านบนของแผ่นพิมพ์ โครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบประกอบด้วยสายป้อนไมโครสตริป (Microstrip feed) ตัวแปลงหนึ่งส่วนสี่คลื่น (Quarter-wave transformer) บาลูน (Balun) สายไมโครสตริประนาบร่วม และอิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพล ดังแสดงในรูปที่ 4.1



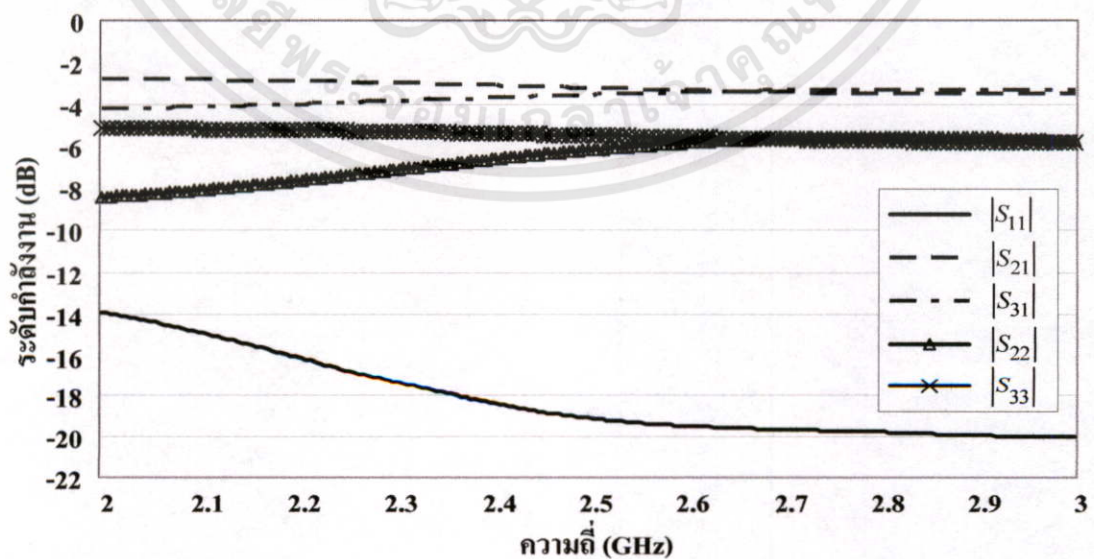
รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศไดโพลตัวเดียว

ขั้นต้นจะได้ออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ตัวเดียว โดยการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า [27] การออกแบบต้องการให้สายอากาศสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ แผ่นพิมพ์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นแผ่นพิมพ์เอพาร์โพร์ (FR-4) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.36 ค่าแทนเจนต์การสูญเสียเท่ากับ 0.01178 และแผ่นพิมพ์หนา 0.8115 มิลลิเมตร ในการออกแบบจะได้จำลองส่วนประกอบของโครงสร้างสายอากาศทีละส่วนแล้วนำมาประกอบรวมกัน เริ่มจากสายป้อนไมโครสตริปที่กำหนดให้มีความอิมพีแดนซ์ 50 Ω เชื่อมต่ออยู่กับส่วนของตัวแปลงหนึ่งส่วนสี่คลื่นมีความอิมพีแดนซ์ 35.4 Ω ส่วนถัดมาคือบาลัน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สายอากาศไดโพลได้รับกระแสจากจุดป้อนอย่างสมดุล บาลันประกอบด้วยสายไมโครสตริปสองเส้นทางที่มีความอิมพีแดนซ์ 50 Ω เท่ากัน แต่ความยาวของสายไมโครสตริปทั้งสองเส้นทางมีความยาวไม่เท่ากัน สายไมโครสตริปเส้นทางหนึ่งมีความยาวเท่ากับ $0.75 \lambda_d$ และสายไมโครสตริปอีกเส้นทางมีความยาวเท่ากับ $0.25 \lambda_d$ โดยที่ λ_d เป็นความยาวคลื่นของแผ่นพิมพ์ที่ใช้ในการออกแบบ และการที่ต้องออกแบบให้สายไมโครสตริปสองเส้นทางของบาลันมีความยาวไม่เท่ากัน เพื่อที่จะให้สนามไฟฟ้าที่ด้านนอกของปลายสายทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180° ซึ่งนับเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการกระตุ้นให้สายไมโครสตริประนาบร่วมทำงานในโหมดคี่ (Odd mode) [31]-[32] ถัดมาเป็นส่วนของสายไมโครสตริประนาบร่วมที่มีความอิมพีแดนซ์ 70 Ω และมีความยาวเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น และส่วนสุดท้ายคืออิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวเท่ากับ $0.5 \lambda_d$



รูปที่ 4.2 แบบจำลองส่วนบาลันจากโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27]

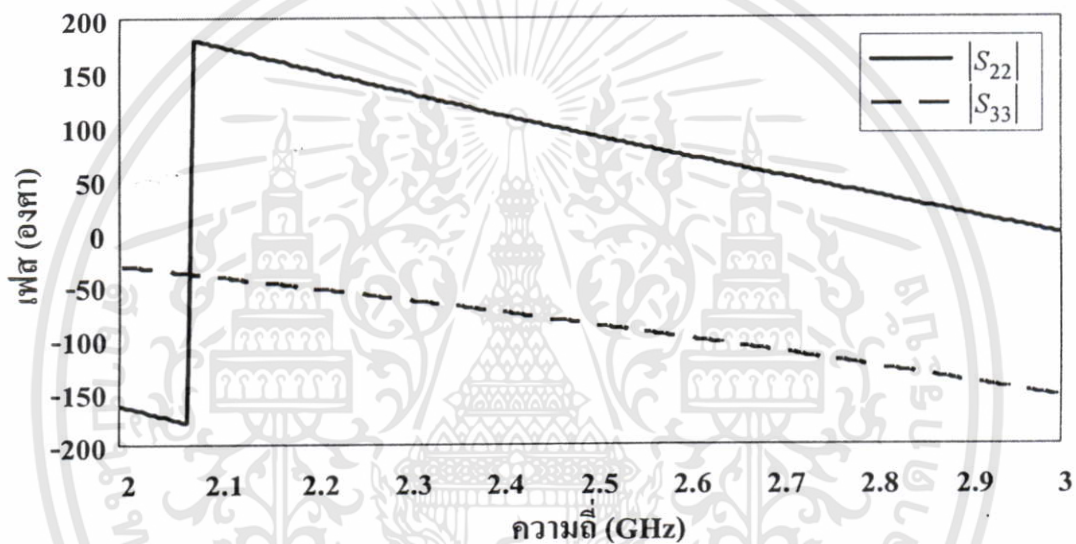
จากรูปที่ 4.2 เป็นแบบจำลองส่วนบาลันจากโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27] ซึ่งเชื่อมต่อกับตัวแปลงหนึ่งส่วนที่มีความยาวคลื่นและสายป้อนไมโครสตริปที่ต่ออยู่กับพอร์ต 1 โดยในการจำลองจะกำหนดให้พอร์ต 1 เป็นจุดป้อนสัญญาณ ส่วนพอร์ต 2 และพอร์ต 3 เป็นจุดที่ใช้สำหรับการตรวจสอบสัญญาณที่ออกจากบาลัน จะเห็นว่าพอร์ต 2 เชื่อมต่อกับเส้นทางของบาลันที่มีความยาว $0.75 \lambda_d$ และพอร์ต 3 เชื่อมต่อกับเส้นทางของบาลันที่มีความยาว $0.25 \lambda_d$



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการส่งผ่านของบาลัน

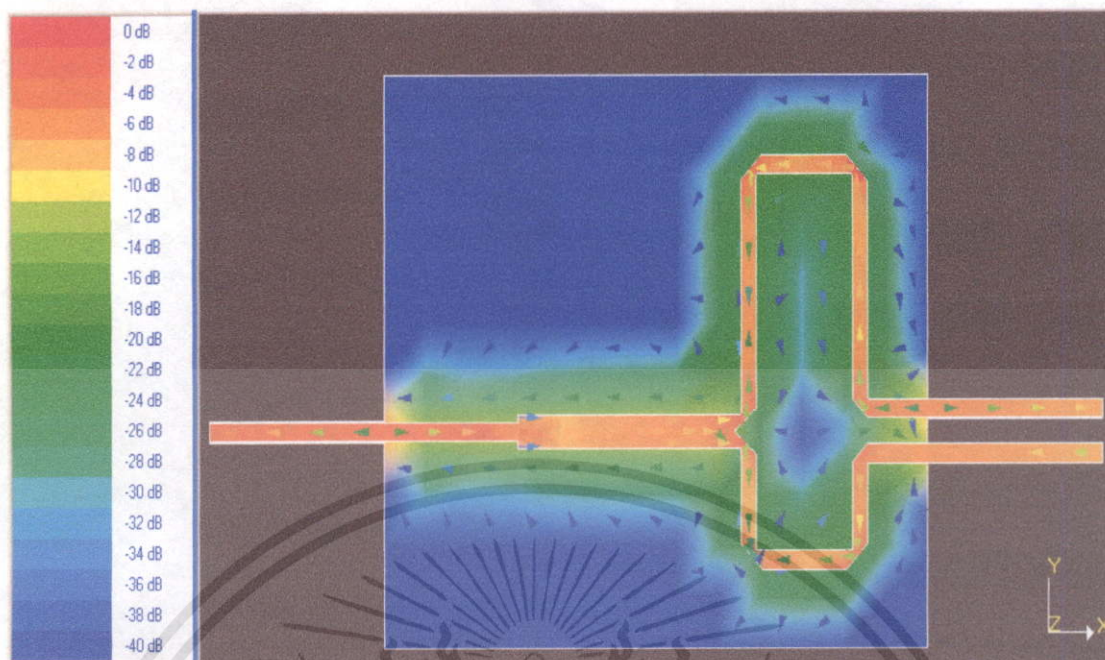
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองส่วนบาลันเพื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับที่พอร์ต 1 ($|S_{11}|$) พอร์ต 2 ($|S_{22}|$) และพอร์ต 3 ($|S_{33}|$) โดยต้องการหาว่าที่จุดป้อนสัญญาณและส่วนด้านออกของบาลันมีการแมตซ์ที่ดีหรือไม่ รวมทั้งพิจารณาค่าการส่งผ่านที่พอร์ต 2 ($|S_{21}|$) และพอร์ต 3 ($|S_{31}|$) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ณ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่จุดป้อนสัญญาณมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -18.77 dB ส่วนพอร์ต 2 และพอร์ต 3 มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -6.38 dB และ -5.41 dB ตามลำดับ และค่าการส่งผ่านที่พอร์ต 2 และพอร์ต 3 จากสัญญาณที่จุดป้อนมีค่าเท่ากับ -3.12 dB และ -3.58 dB ตามลำดับ ซึ่งระดับกำลังงานที่ส่งผ่านจากจุดป้อนสัญญาณมายังพอร์ต 2 และพอร์ต 3 แสดงให้เห็นว่าบาลันที่ได้ออกแบบมีการแบ่งกำลังงานไปยังเส้นทางทั้งสองอย่างละครึ่ง (3 dB power divider)



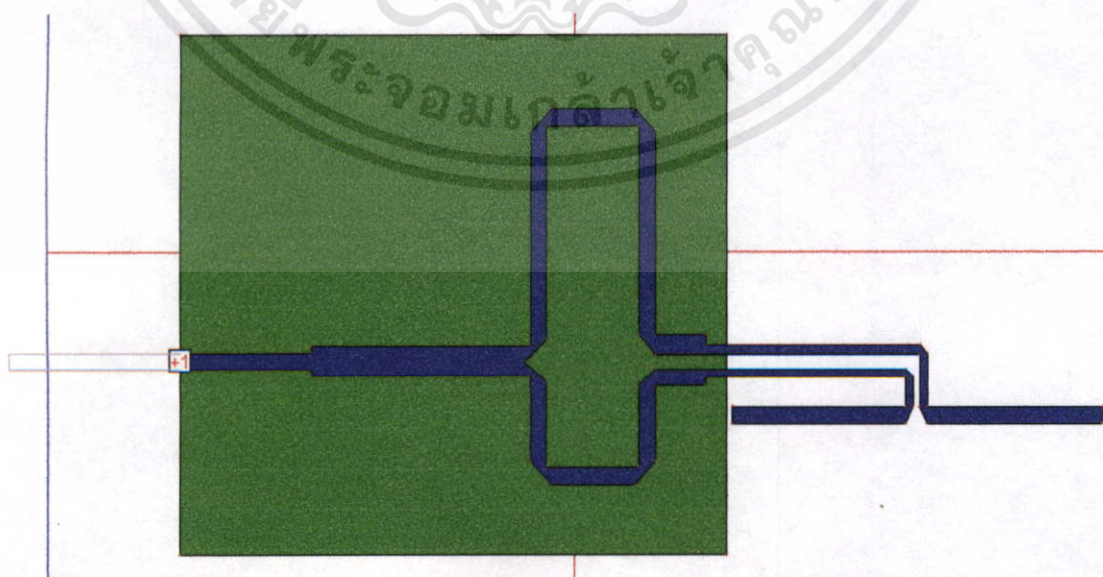
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองเฟสด้านออกของบาลัน

ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองทำให้รู้ว่าที่ด้านออกของบาลันทั้งพอร์ต 2 และพอร์ต 3 มีการแมตซ์ที่ยังไม่ค่อยดี ตรงส่วนนี้สามารถปรับการแมตซ์ให้ดีขึ้นได้โดยการปรับสายไมโครสตริปร่วมที่จะนำมาต่อกับส่วนบาลัน แต่สิ่งสำคัญในการออกแบบบาลันคือต้องการให้กระแสที่ไหลจากจุดป้อนสัญญาณมายังด้านออกของบาลันมีความสมดุล และต้องการให้ด้านออกที่พอร์ต 2 และพอร์ต 3 มีเฟสต่างกัน 180° โดยด้านออกของบาลันจะนำไปต่อกับสายไมโครสตริปร่วมเพื่อกระตุ้นให้สามารถทำงานที่โหมดคี่ ค่าเฟสที่พอร์ต 2 และพอร์ต 3 ที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 4.4 และการไหลของกระแสในส่วนบาลันดังแสดงในรูปที่ 4.5



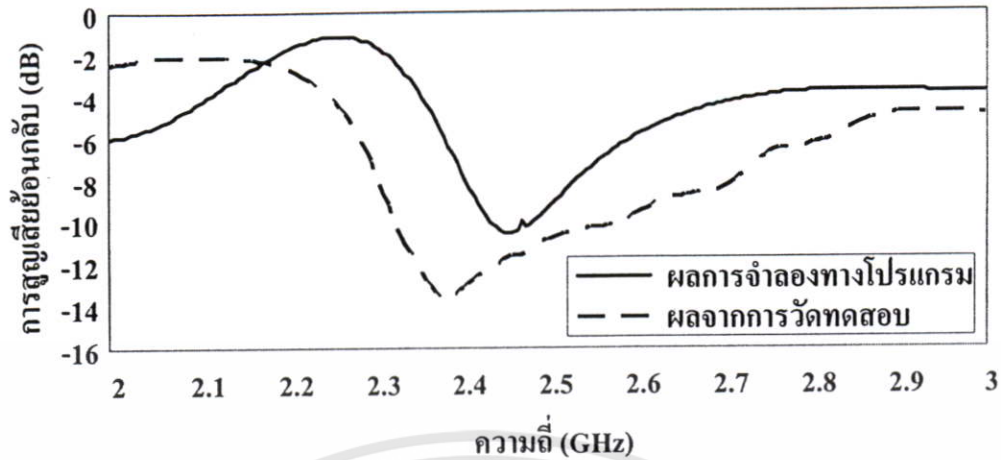
รูปที่ 4.5 การไหลของกระแสและระดับกำลังงานของบอลลูน [27]

เมื่อได้ขนาดโครงสร้างของบอลลูนที่เหมาะสมแล้ว นำโครงสร้างบอลลูนมาต่อร่วมกับส่วนของสายไมโครสตริปรีนาบร่วมในการจำลองทางโปรแกรม ซึ่งส่วนสายไมโครสตริปรีนาบร่วมทำหน้าที่เป็นสายสตรีปที่ส่งผ่านสัญญาณจากบอลลูนมายังอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล และเป็นตัวปรับการแมตช์ระหว่างบอลลูนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล สายไมโครสตริปรีนาบร่วมมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 70Ω และมีความยาวสายเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นของแผ่นพิมพ์ที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้างของบอลลูน สายไมโครสตริปรีนาบร่วม และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า [27] แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองสายอากาศไดโพลพิมพ์ตัวเดียวจากโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



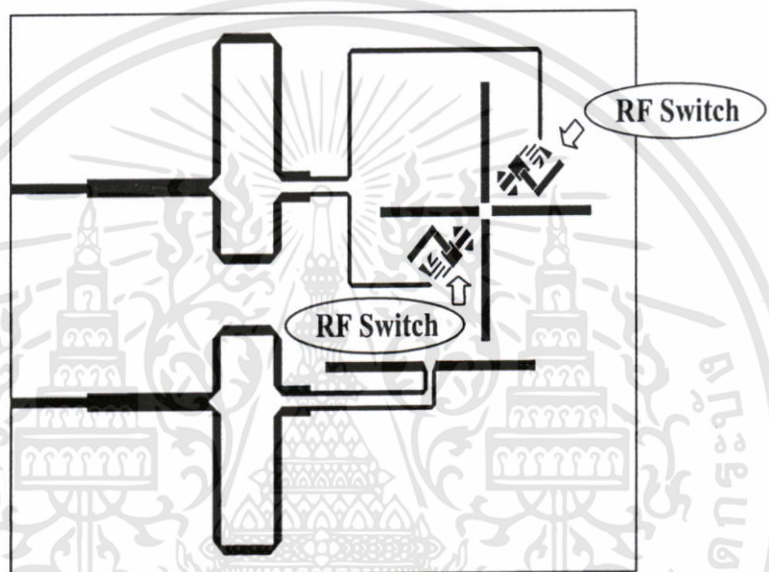
รูปที่ 4.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลตัวเดียว

จากรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลตัวเดียวที่ได้จากการจำลองโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งเท่ากับ -10.5 dB และ -11.79 dB ตามลำดับ จะเห็นว่าสายอากาศไดโพลตัวเดียวมีการแมตช์ ณ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากโครงสร้างสายอากาศตัวเดียวที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้ ณ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีขนาดความกว้างและความยาวดังแสดงในตารางที่ 4.1

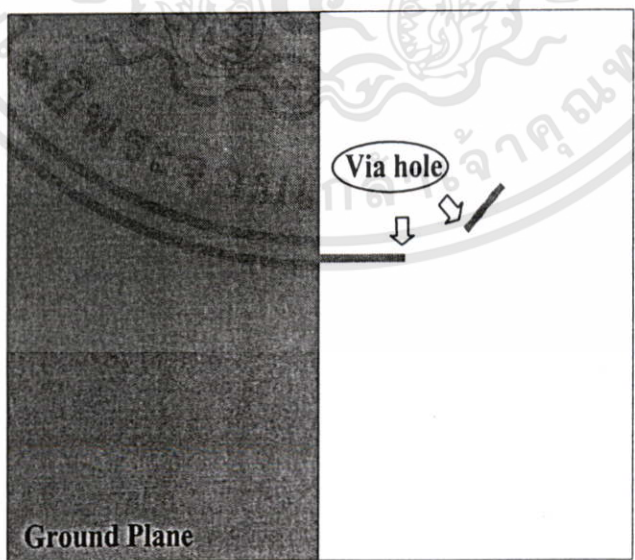
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างสายอากาศไดโพลตัวเดียว

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
W	60.91
W_1	1.18
W_2	2.06
L	83.27
L_1	16.64
L_2	7.88
L_3	6.27
L_4	21.24
L_5	16.00
L_6	7.59
L_7	15.51
L_8	10.00
L_9	28.13

นำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลตัวเดียวที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมมาใช้ในการ ออกแบบสายอากาศไดโพลคู่ที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและขนาน ซึ่งการออกแบบจะให้ สายอากาศไดโพลทั้งรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานอยู่บนแผ่นพิมพ์เดียวกัน โดย กำหนดให้สายอากาศไดโพลตัวเดียวตัวหนึ่งคงรูปแบบเดิมไว้ ส่วนสายอากาศไดโพลที่เพิ่มเข้ามา ประกอบด้วยอิลิเมนต์ 4 อิลิเมนต์ที่มีรูปแบบการจัดวางเป็นรูปกากบาทและมีจุดป้อนตำแหน่ง เดียวกัน อิลิเมนต์ทั้ง 4 อิลิเมนต์เชื่อมต่ออยู่กับสวิทช์ 2 ตัวซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวปรับเลือกรูปแบบการ จัดวางของสายอากาศระหว่างแบบตั้งฉากและแบบขนานกับสายอากาศตัวแรก ดังแสดงในรูปที่ 4.8



(ก) ด้านบน



(ข) ด้านล่าง

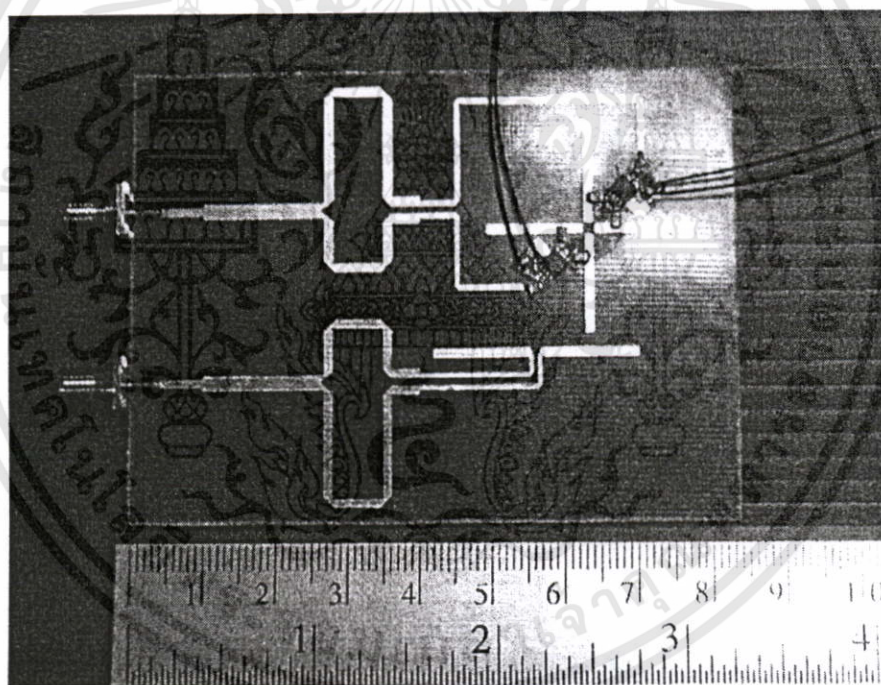
รูปที่ 4.8 โครงสร้างสายอากาศไดโพลคู่ที่มีสวิทช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

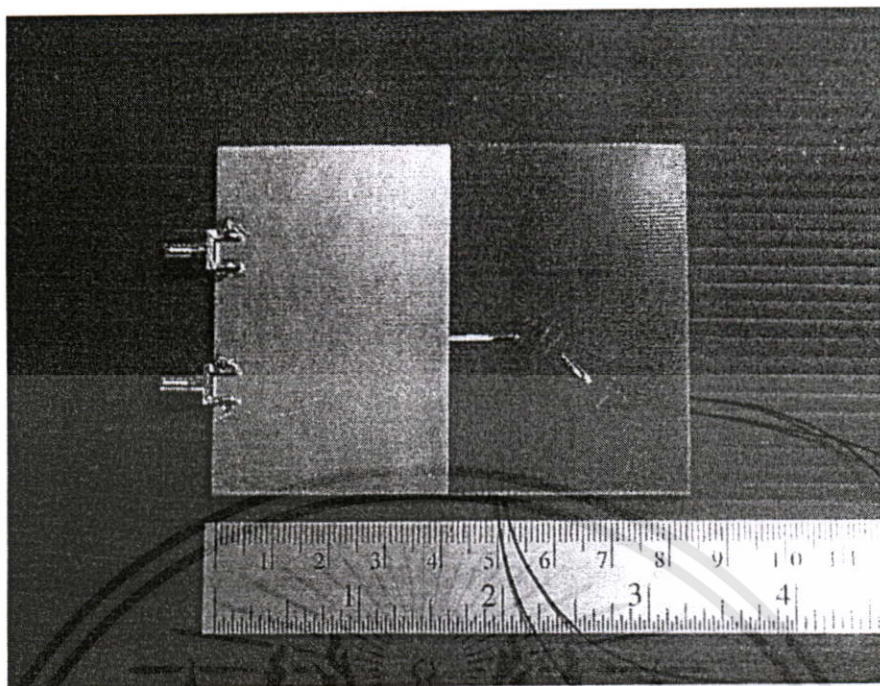
จากรูปที่ 4.8 ขนาดความกว้างและความยาวของโครงสร้างสายอากาศไดโพลคู่ที่มีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลตั้งฉากกับสายอากาศตัวเดิมมีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร

4.3 การสร้างและผลการทดสอบสายอากาศ

ขนาดความกว้างและความยาวของโครงสร้างสายอากาศไดโพลคู่ที่มีสวิตช์เป็นตัวปรับโพลาริเซชันที่ได้จากการออกแบบ นำมาสร้างบนแผ่นพิมพ์เฟออาร์โพร์ (FR-4) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.36 และค่าแทนเจนต์การสูญเสียเท่ากับ 0.01178 สายอากาศมีขนาดเท่ากับ 60.91×83.27 ตารางมิลลิเมตร โดยที่สายอากาศที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังในรูปที่ 4.9 จากนั้นนำสายอากาศที่สร้างเสร็จแล้วมาทดสอบเพื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลแต่ละตัว และค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน

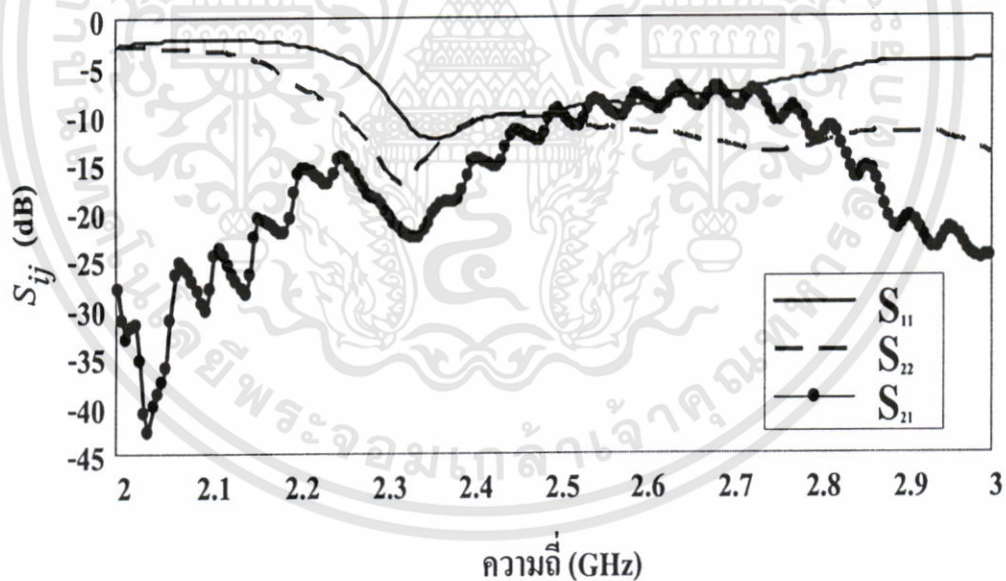


(ก) ด้านหน้า



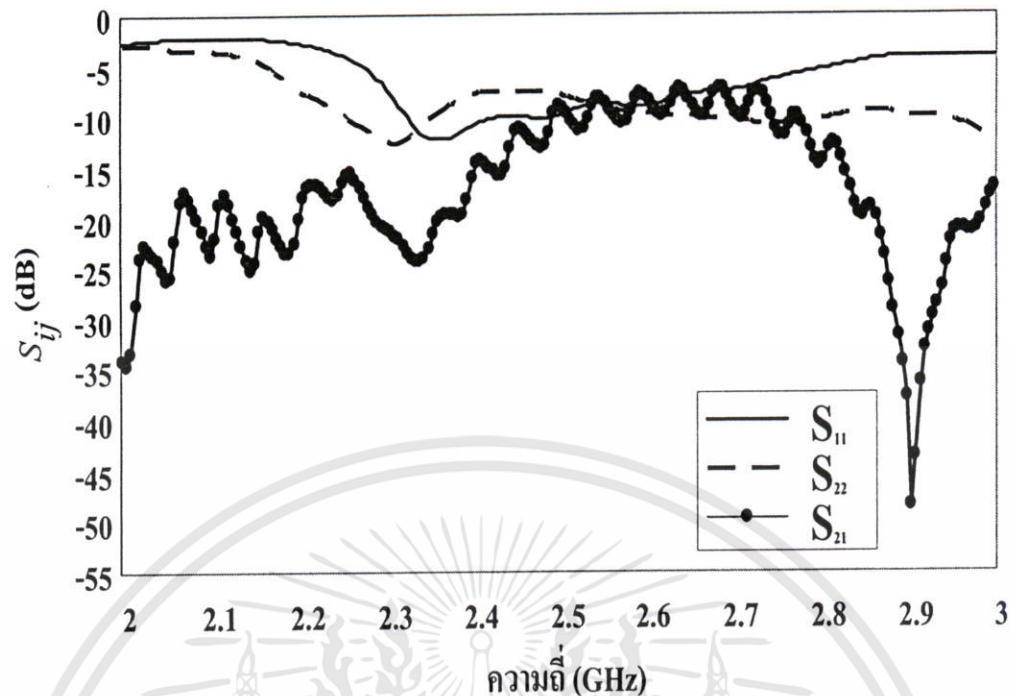
(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.9 สายอากาศไดโพลคู่ที่มีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยน โพลาริเซชันที่ได้จากการสร้าง



รูปที่ 4.10 ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลจากการสร้าง เมื่อสวิตช์โพลาริเซชันตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



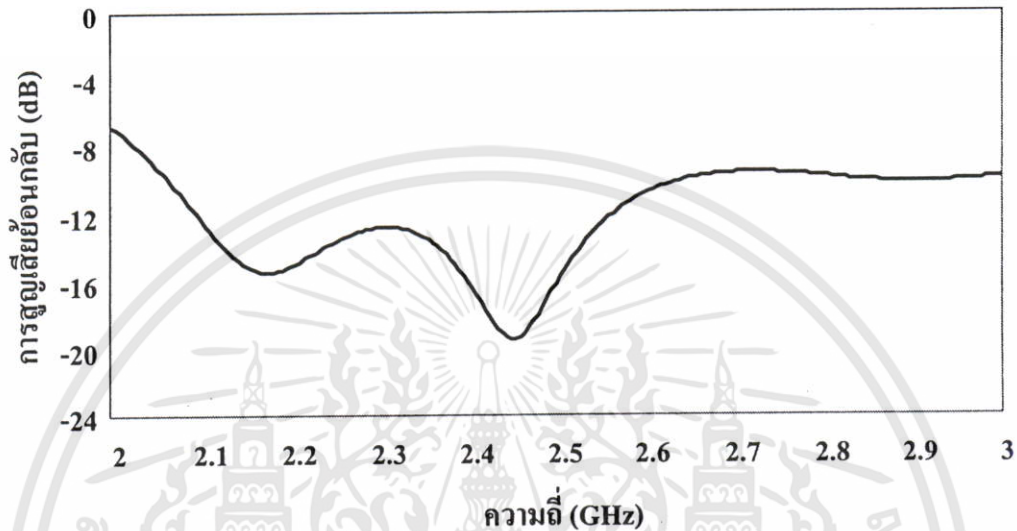
รูปที่ 4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลจากการสร้างเมื่อสวิตช์โพลาริเซชันขนาน

จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ณ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการจำลองทางโปรแกรม ซึ่งสายอากาศไดโพลตัวเดียวมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$) ในกรณีที่สายอากาศไดโพลอีกตัวมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานเท่ากับ -10.06 dB และ -9.89 dB ตามลำดับ ส่วนค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลตัวที่เชื่อมต่อกับสวิตช์ ($|S_{22}|$) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวปรับรูปแบบการจัดวางของสายอากาศแบบตั้งฉากและแบบขนานมีค่าเท่ากับ -10.03 dB และ -7.44 dB ตามลำดับ จากค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลทั้งสองตัวเมื่อสวิตช์โพลาริเซชันแบบตั้งฉากมีค่าใกล้เคียงกันแทบจะไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อสวิตช์ไปยังโพลาริเซชันแบบขนานค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลทั้งสองต่างกัน 2.45 dB ส่วนค่าการเชื่อมต่อร่วม ($|S_{21}|$) เมื่อสวิตช์โพลาริเซชันของสายอากาศแบบตั้งฉากและแบบขนานเท่ากับ -12.22 dB และ -11.50 dB ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันประมาณ $1-2$ dB

หลังจากที่ได้ออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างแล้ว จากนั้นได้ออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ซึ่งขนาดความกว้างและความยาวของโครงสร้างของจุดป้อนสัญญาณ ตัวแปลงหนึ่งส่วนสี่คลื่น บาลัน และสายไมโครสตริประนาบร่วมยังคงเท่าเดิม แต่ขนาดความยาวของอิลิเมนต์สายอากาศไดโพลมีค่าเปลี่ยนไป โดยที่มีค่าเท่ากับ 4.9 มิลลิเมตร และ 3.4 มิลลิเมตร

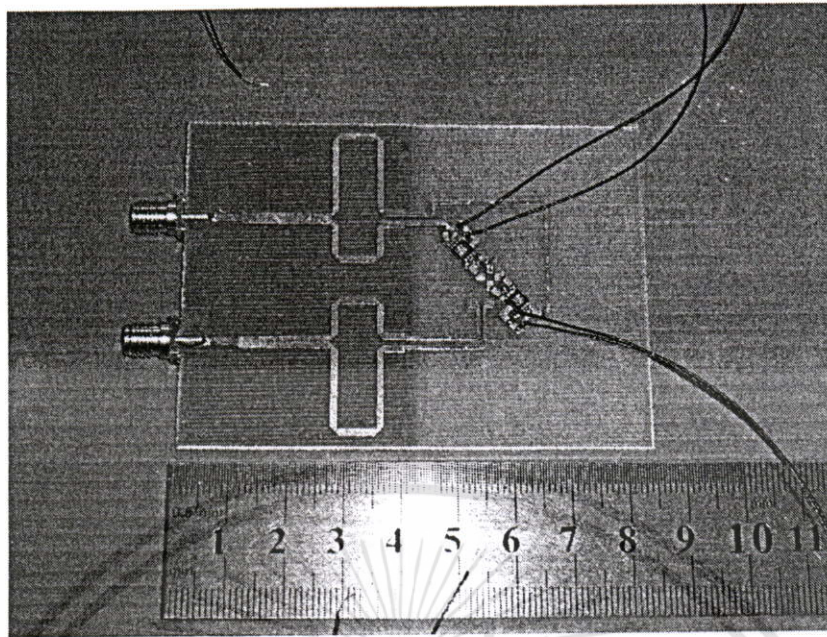
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ซึ่งในที่นี้จะนำเสนอเพียงแค่อากาศไดโพลิมพ์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 เท่านั้น เนื่องจากขนาดของสายอากาศไดโพลิมพ์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 มีขนาดเล็กมากเกินไปที่จะสามารถนำไปสร้างเพื่อนำมาใช้งานได้จริง

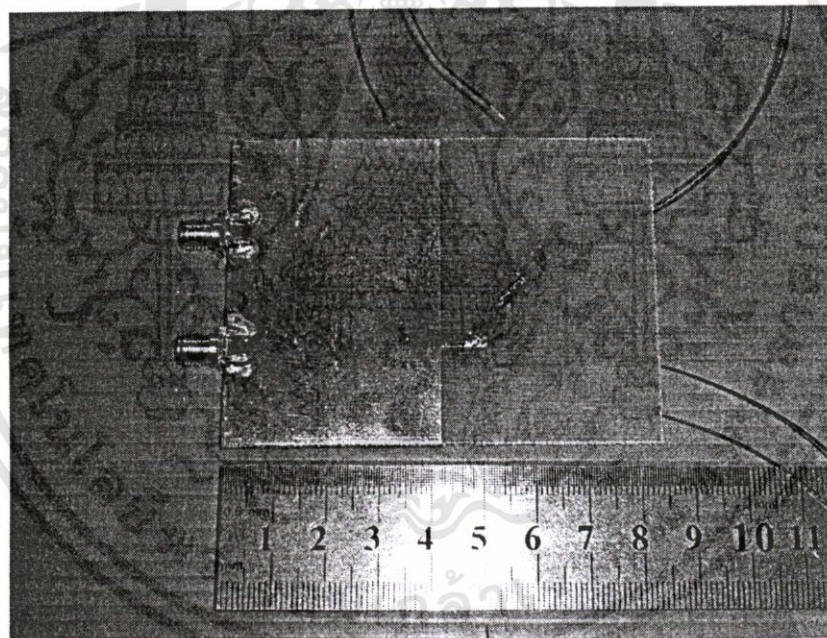


รูปที่ 4.12 ค่าการสูญเสียย้อนกลับจากการจำลองทางโปรแกรมของสายอากาศไดโพลตัวเดี่ยวที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35

จากรูปที่ 4.12 เป็นค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลเดี่ยวที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งได้จากการจำลองทางโปรแกรม มีค่าเท่ากับ -19.3 dB จะเห็นได้ว่าสายอากาศไดโพลตัวเดี่ยวมีการแมตซ์ ณ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นนำค่าขนาดความยาวของอิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลิมพ์ที่ได้จากการจำลองทางโปรแกรมมาสร้างจริงบนแผ่นพิมพ์เอพอาร์พี (FR-4) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.36 และค่าแทนเจนต์การสูญเสียเท่ากับ 0.01178 สายอากาศมีขนาดเท่ากับ 60.91x83.27 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.13



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.13 สายอากาศไดโพลคู่ที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และมีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันที่ได้จากการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่จะนำไปใช้ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก การออกแบบจะใช้การจำลองโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27] สายอากาศไดโพลถูกออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยที่เริ่มออกแบบสายอากาศไดโพลตัวเดียวเพื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศไดโพลตัวเดียวมาใช้ในการออกแบบสายอากาศไดโพลคู่ที่มีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนเพื่อเลือกโพลาริเซชัน สายอากาศที่ได้จากการออกแบบจะถูกนำมาสร้างบนแผ่นพิมพ์เฟออาร์โพร (FR-4) เพื่อทำการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ โดยพิจารณาการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศเมื่อสวิตช์โพลาริเซชันของสายอากาศเป็นแบบตั้งฉากและแบบขนาน โดยที่สายอากาศไดโพลตัวเดียวมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$) ในกรณีที่สายอากาศไดโพลอีกตัวหนึ่งมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานเท่ากับ -10.06 dB และ -9.89 dB ตามลำดับ ส่วนค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลตัวที่เชื่อมต่อกับสวิตช์ ($|S_{22}|$) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวปรับรูปแบบการจัดวางของสายอากาศแบบตั้งฉากและแบบขนานมีค่าเท่ากับ -10.03 dB และ -7.44 dB ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ได้จากการสร้างจริงเมื่อสวิตช์ไปยังโพลาริเซชันแบบขนานมีการแมตซ์ที่ยังไม่ดีเท่าที่ควร จากนั้นได้ทำการออกแบบสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และสร้างเพื่อที่จะนำไปใช้วัดหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ซึ่งการนำสายอากาศที่ออกแบบไปทดสอบวัดหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจะได้กล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

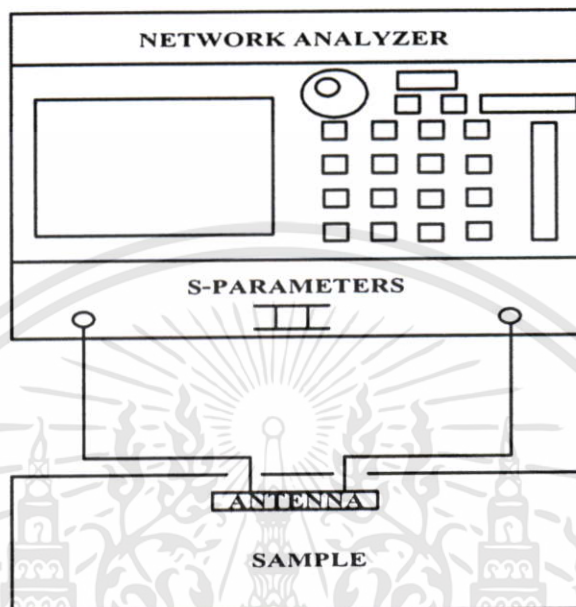
ในบทนี้เป็นการนำสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่เชื่อมต่อกับสวิตช์ ซึ่งทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันระหว่างแบบตั้งฉากและแบบขนาน ที่ได้จากการออกแบบและสร้างมาใช้ในการทดลองวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุที่ต้องการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของเทคนิคใหม่สำหรับการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ได้นำเสนอ โดยที่สายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ คือ สายอากาศที่อิมพีแดนซ์ของไดโพลมีความยาวเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และสายอากาศที่อิมพีแดนซ์ของไดโพลมีความยาวเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งแต่เดิมนั้นต้องการทดสอบหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยใช้สายอากาศที่มีความยาวของอิมพีแดนซ์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ด้วย แต่เนื่องจากขนาดของอิมพีแดนซ์ไดโพลที่เล็กจนไม่สามารถนำมาสร้างได้จริง จึงเหลือสายอากาศที่นำมาใช้ทดสอบเพียง 2 ความยาวเท่านั้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำสายอากาศไดโพลพิมพ์ไปใช้งาน วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำ ข้าวเปลือก และสารเนื้อเทียม โดยผลการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมจะนำไปใช้ร่วมกับกราฟเชิงพื้นที่ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3 เพื่อหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของวัสดุที่วัดทดสอบ นำค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้มายืนยันความถูกต้องและแม่นยำ ด้วยการเปรียบเทียบกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน ซึ่งใช้หลักการ โคเอกเซียลโพรบ (Agilent 85070E Dielectric Probe Kit)

5.2 การทดลอง

ในการทดลองหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการทดสอบด้วยสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่มีสวิตช์เป็นตัวปรับ โพลาริเซชันของสายอากาศระหว่างแบบตั้งฉากและแบบขนาน จะทดลองกับวัสดุสามชนิด คือ น้ำ ข้าวเปลือก และสารเนื้อเทียม โดยใช้สายอากาศไดโพลพิมพ์ที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และสายอากาศไดโพลพิมพ์ครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ทดลองกับวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งการจัดระบบการทดลองนั้นสายอากาศจะถูกต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ส่วนของวงจรสำหรับการสวิตช์เลือกโพลาริเซชันของสายอากาศต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟตรง 5 โวลต์ โดยที่สายอากาศจะถูกบรรจุอยู่ในช่องพลาสติกที่ปกปิดอย่างดีเพื่อป้องกันสวิตช์และจุดป้อนแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับสวิตช์ไม่ให้เกิดการลัดวงจร

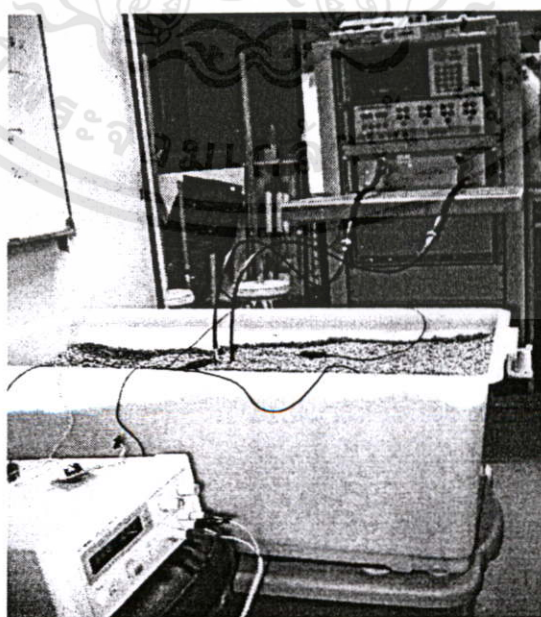
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ไปสัมผัสกับน้ำ ในการทดลองจะนำสายอากาศใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้ววัดค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปใช้ร่วมกับกราฟผลการวิเคราะห์จากบทที่ 3 ซึ่งระบบการวัดหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบสำหรับการวัดหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

วัสดุทดสอบคือ น้ำและข้าวเปลือกบรรจุในภาชนะที่มีขนาด 57x34x30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนสารเนื้อเทียมเป็นวัสดุที่ทำขึ้นมาจากผงวุ้น (Agar powder) โดยมีส่วนผสมและขั้นตอนการเตรียมสารเนื้อเทียมแสดงอยู่ในส่วนของภาคผนวก



รูปที่ 5.2 การทดลองวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นด้วยการนำสายอากาศอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 มาวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่าง โดยมีสวิตซ์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันของสายอากาศระหว่างโพลาริเซชันแบบตั้งฉากและแบบขนาน ซึ่งผลการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35

จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.07848	0.06577	0.01609	0.00565
2	0.07810	0.06712	0.01659	0.00506
3	0.07849	0.06771	0.01616	0.00515
4	0.07791	0.06623	0.01648	0.00478
5	0.07826	0.06770	0.01756	0.00447
6	0.07767	0.06753	0.01786	0.00342
7	0.07841	0.06647	0.01749	0.00382
8	0.07807	0.06752	0.01746	0.00411
9	0.07886	0.06762	0.01724	0.00417
10	0.07789	0.06786	0.01685	0.00416
เฉลี่ย	0.07821	0.06715	0.01698	0.00448

จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่ากรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากมีค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมมากกว่ากรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบขนานในทั้ง 2 กรณีที่สายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 โดยค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมเฉลี่ยกรณีที่มีสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง เมื่อสวิตซ์รูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานเท่ากับ 0.07821 และ 0.06715 ตามลำดับ ส่วนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมเฉลี่ยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้ที่สายอากาศไดโพลที่มีความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 เมื่อสวิตช์รูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานเท่ากับ 0.01698 และ 0.00448 ตามลำดับ

เนื่องจากในการนำสายอากาศไปใช้งานเพื่อวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวเปลือก สารเนื้อเทียม และน้ำตามเทคนิคการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้นำเสนอไปนั้น จะต้องนำสายอากาศใส่เข้าไปในตัวกลางวัสดุที่ต้องการทดสอบ ซึ่งตัวกลางของวัสดุที่ทดสอบอาจส่งผลให้สายอากาศทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบไว้ และเพื่อป้องกันการลัดวงจรของสวิตช์ที่เชื่อมต่ออยู่กับสายอากาศ ดังนั้นจึงนำสายอากาศที่จะใช้ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมาบรรจุภายในช่องพลาสติกที่ห่อหุ้มอย่างดีแล้ววัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่าง ผลการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติก

จำนวนครั้งที่ทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.18934	0.14671	0.10684	0.09140
2	0.18520	0.14334	0.10733	0.09095
3	0.18496	0.14262	0.10699	0.09134
4	0.18439	0.14333	0.10681	0.09138
5	0.18544	0.14394	0.10648	0.09102
6	0.18539	0.14336	0.10611	0.09081
7	0.18523	0.14324	0.10622	0.09091
8	0.18520	0.14329	0.10680	0.09091
9	0.18530	0.14397	0.10610	0.09066
10	0.18597	0.14368	0.10638	0.09078
เฉลี่ย	0.18564	0.14138	0.10661	0.09102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่ากรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากมีค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมมากกว่ากรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบขนานในทั้ง 2 กรณีที่สายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 โดยค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมเฉลี่ยกรณีที่สายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง เมื่อสวิตช์รูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานเท่ากับ 0.18564 และ 0.14138 ตามลำดับ ส่วนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมเฉลี่ยกรณีที่สายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 เมื่อสวิตช์รูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานเท่ากับ 0.10661 และ 0.09102 ตามลำดับ

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศกรณีที่เป็นรูปภายในของพลาสติก และสายอากาศกรณีที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกจะถูกนำมาใช้เป็นค่าแฟกเตอร์ร่วมกับค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการวัดวัสดุทดสอบก่อนที่จะนำมาใช้พิจารณาร่วมกับกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์จากบทที่ 3 โดยค่าแฟกเตอร์มีทั้งหมด 4 ค่า คือค่าแฟกเตอร์กรณีตั้งฉากของสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ค่าแฟกเตอร์กรณีขนานของสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ค่าแฟกเตอร์กรณีตั้งฉากของสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และค่าแฟกเตอร์กรณีขนานของสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ค่าแฟกเตอร์ทั้งสี่มีค่าดังนี้

กรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศกรณีที่เป็นรูปภายในของพลาสติก และสายอากาศกรณีที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกเท่ากับ 0.18564 และ 0.07821 ตามลำดับ แต่ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เท่ากับ 0.8535 ดังนั้นเพื่อที่จะนำค่าการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้มาใช้ร่วมกับกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงต้องนำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้คูณด้วย $\frac{0.8535}{0.18564}$

กรณีขนาน ($\lambda_0/2$)

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศกรณีที่เป็นรูปภายในของพลาสติก และสายอากาศกรณีที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกเท่ากับ 0.14138 และ 0.06715 ตามลำดับ แต่ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เท่ากับ 0.396 ดังนั้นเพื่อที่จะนำ

ค่าการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้มาใช้ร่วมกับกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงต้องนำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้คูณด้วย $\frac{0.396}{0.14138}$

กรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศกรณีที่บรรจุภายในช่องพลาสติก และสายอากาศกรณีที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกเท่ากับ 0.10661 และ 0.01698 ตามลำดับ แต่ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เท่ากับ 0.585 ดังนั้นเพื่อที่จะนำค่าการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้มาใช้ร่วมกับกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงต้องนำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้คูณด้วย $\frac{0.585}{0.10661}$

กรณีขนาน ($\lambda_d/2$)

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างของสายอากาศกรณีที่บรรจุภายในช่องพลาสติก และสายอากาศกรณีที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกเท่ากับ 0.09102 และ 0.00448 ตามลำดับ แต่ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เท่ากับ 0.069 ดังนั้นเพื่อที่จะนำค่าการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้มาใช้ร่วมกับกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงต้องนำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้คูณด้วย $\frac{0.069}{0.09102}$

5.3.1 ผลการทดสอบข้าวเปลือก

นำสายอากาศไดโพลที่มีความยาวอิมปีแดนซ์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างและครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งบรรจุอยู่ในช่องพลาสติกที่ห่อหุ้มอย่างดีมาวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วม โดยนำสายอากาศใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบ เริ่มต้นทดสอบกับข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะที่มีปริมาตร 57x34x30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือกสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในข้าวเปลือกของสายอากาศไดโพลิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติก

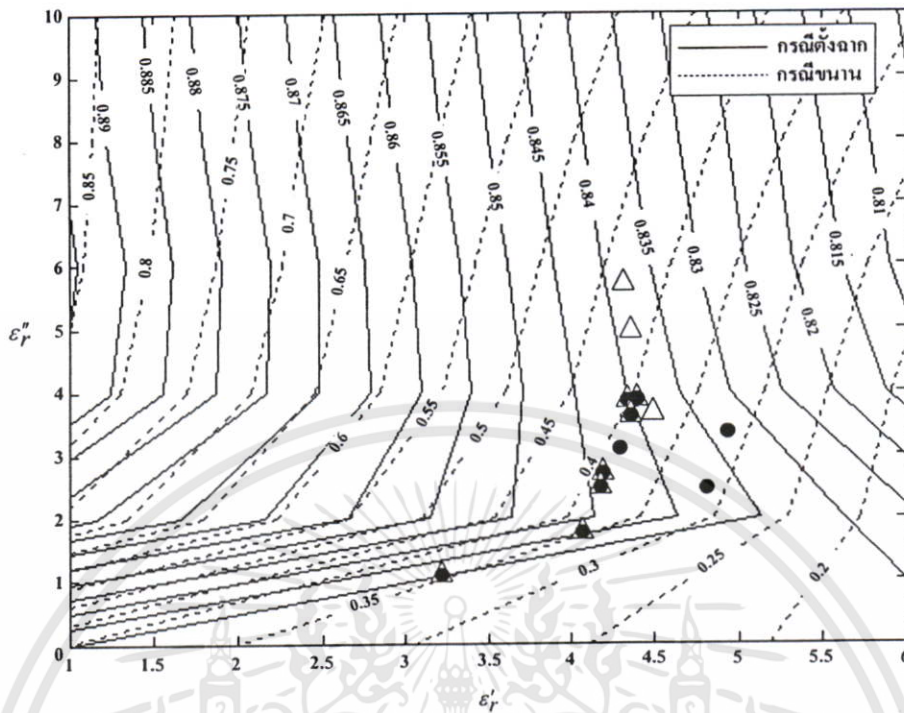
จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.18162	0.12503	0.05715	0.04822
2	0.18239	0.12315	0.05653	0.05013
3	0.18256	0.12446	0.05667	0.04779
4	0.18195	0.12459	0.05567	0.05142
5	0.18247	0.13795	0.05468	0.05284
6	0.18276	0.14284	0.05431	0.05624
7	0.18278	0.14286	0.05549	0.05403
8	0.18352	0.14163	0.05588	0.05421
9	0.18364	0.14187	0.05528	0.05387
10	0.18298	0.14094	0.05459	0.05374
เฉลี่ย	0.18267	0.13453	0.05562	0.05225

นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือกจากการวัดที่ได้แสดงในตารางที่ 5.3 คูณด้วยค่าแฟกเตอร์แต่ละกรณีของรูปแบบการจัดวางและขนาดความยาวอิลิเมนต์ของไดโพลที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้า ซึ่งค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือกที่ผ่านการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์แล้วแสดงในตารางที่ 5.4

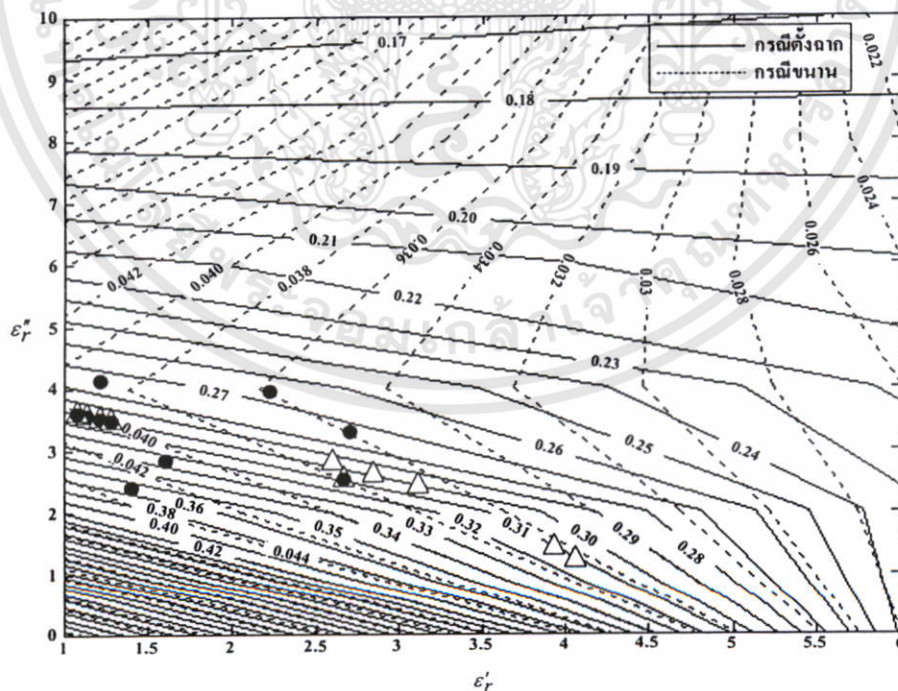
ตารางที่ 5.4 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในข้าวเปลือกของสายอากาศไดโพลิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในซองพลาสติกหลังจากการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์

จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.83502	0.35020	0.31358	0.03655
2	0.83856	0.34494	0.31021	0.03800
3	0.83934	0.34861	0.31097	0.03623
4	0.83653	0.34897	0.30548	0.03898
5	0.83893	0.38639	0.30003	0.04006
6	0.84026	0.40009	0.29801	0.04263
7	0.84035	0.40015	0.30447	0.04096
8	0.84375	0.39670	0.30665	0.04110
9	0.8443	0.39737	0.30334	0.04084
10	0.84127	0.39477	0.29956	0.04074
เฉลี่ย	0.83985	0.37681	0.30523	0.03961

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือกที่ได้จากการวัดคูณด้วยค่าแฟกเตอร์แสดงในตารางที่ 5.4 นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ผ่านการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์มาทำการระบุตำแหน่งลงบนกราฟเชิงพื้นที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 โดยกราฟเชิงพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กราฟ คือ กราฟเชิงพื้นที่ของสายอากาศที่ความยาวของอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และกราฟเชิงพื้นที่ของสายอากาศที่ความยาวของอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งกราฟทั้งสองสามารถแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 กราฟเชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นโคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ในอวกาศสำหรับใช้ร่วมกับข้าวเปลือก



รูปที่ 5.4 กราฟเชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นโคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 สำหรับใช้ร่วมกับข้าวเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อยุทธศาสตร์ของสายอากาศกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการเปลี่ยนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในช่วง $1 < \epsilon_r' < 6$ และเปลี่ยนค่าตัวประกอบสูญเสียในช่วง $0 < \epsilon_r'' < 10$ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของข้าวเปลือกที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้า [5] อยู่ในช่วงดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อยุทธศาสตร์จากการวัดเมื่อคูณด้วยค่าแฟกเตอร์แล้วทำการระบุตำแหน่งลงบนกราฟเชิงเส้น โดยที่ค่าขนาดการเชื่อมต่อยุทธศาสตร์ที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากจะระบุตำแหน่งด้วยสัญลักษณ์ที่เป็นสามเหลี่ยม (Δ) ส่วนกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบขนานจะระบุตำแหน่งด้วยสัญลักษณ์ที่เป็นวงกลม (\bullet)

นำค่าขนาดการเชื่อมต่อยุทธศาสตร์ของสายอากาศที่มีความยาวอิมพีแดนซ์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างจากตารางที่ 5.4 มาระบุตำแหน่งบนกราฟเชิงเส้นในรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อยุทธศาสตร์ที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานสามารถระบุตำแหน่งลงบนกราฟครบทั้ง 10 ตำแหน่ง แต่มีเพียงแค่ 7 ตำแหน่งเท่านั้นที่การระบุตำแหน่งจากกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานทำให้เกิดจุดตัดของกราฟเชิงพื้นผิว โดยที่จุดตัดทั้ง 7 ตำแหน่งให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ต่างกันเพียง 4 ค่า เนื่องจากมีจุดตัดกราฟเชิงพื้นผิวที่ซ้ำกัน ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากจุดตัดกราฟมีค่าดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของข้าวเปลือกที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลความยาวอิมพีแดนซ์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

จำนวนจุดตัดกราฟ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r')	ค่าตัวประกอบสูญเสีย (ϵ_r'')
1	3.2	1.0
2	4.1	1.8
3	4.2	2.5
4	4.2	2.5
5	4.4	3.8
6	4.4	3.8
7	4.4	3.8
เฉลี่ย	4.13	2.74

จากรูปที่ 5.4 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวที่ใช้สำหรับการระบุตำแหน่งค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ความยาวคลื่นไมโครเมตรเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 จะเห็นว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานสามารถระบุตำแหน่งลงบนกราฟครบทั้ง 10 ตำแหน่งเช่นกัน แต่มีเพียงแค่ 5 ตำแหน่งเท่านั้นที่เกิดจุดตัดกราฟเชิงพื้นผิว และจากจุดตัดทั้ง 5 ตำแหน่งให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ต่างกันเพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้น เนื่องจากมีจุดตัดกราฟเชิงพื้นผิวที่ซ้ำกันเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5.3 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากจุดตัดกราฟมีค่าดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของข้าวเปลือกที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลความยาวคลื่นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35

จำนวนจุดตัดกราฟ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r')	ค่าตัวประกอบสูญเสีย (ϵ_r'')
1	2.6	2.5
2	1.1	3.8
3	1.1	3.8
4	1.1	3.8
เฉลี่ย	1.475	3.48

จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ [5] ค่าไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอยู่ในช่วง 2.5-3.7 และ 0-0.5 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากการใช้สายอากาศไดโพลความยาวคลื่นไมโครเมตรเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 กับค่าที่ได้จากการศึกษาก่อนหน้านี้ โดยนำค่าเฉลี่ยของผลการวัดด้วยสายอากาศไดโพลความยาวคลื่นไมโครเมตรเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 เปรียบเทียบกับค่ากลางของผลการศึกษาก่อนหน้านี้ ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่เป็นค่ากลางที่ใช้ในการเปรียบเทียบเท่ากับ 3.1 จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลความยาวคลื่นไมโครเมตรเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 มีค่าต่างจากผลการศึกษาก่อนหน้านี้อยู่ประมาณ 33% และ 52% ตามลำดับ ส่วนค่าตัวประกอบสูญเสียที่วัดด้วยสายอากาศไดโพลทั้งสองความยาวมีค่าต่างจากผลการศึกษาก่อนหน้านี้พอสมควร จากผลการทดสอบวัดข้าวเปลือกจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากสายอากาศไดโพลความยาวคลื่นไมโครเมตรเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศ

ว่างมีค่าต่างจากผลการศึกษาก่อนหน้านี้น้อยกว่าค่าที่ได้จากสายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35

5.3.2 ผลการทดสอบด้วยสารเนื้อเทียม

หลังจากที่เตรียมสารเนื้อเทียมเสร็จแล้ว นำสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างและครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งบรรจุอยู่ในซองพลาสติกที่ห่อหุ้มอย่างดีมาวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วม โดยนำสายอากาศใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้ววัดค่าการเชื่อมต่อร่วม ผลการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นสารเนื้อเทียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในสารเนื้อเทียมของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในซองพลาสติก

จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.07161	0.02316	0.01607	0.01399
2	0.07095	0.02165	0.01575	0.01336
3	0.07125	0.02341	0.01572	0.01343
4	0.07102	0.02187	0.01589	0.01368
5	0.07180	0.02296	0.01615	0.01395
6	0.07340	0.02476	0.01593	0.01386
7	0.07295	0.02312	0.01593	0.01375
8	0.07485	0.02242	0.01627	0.01389
9	0.0745	0.02269	0.01612	0.01398
10	0.07117	0.02285	0.01575	0.01324
เฉลี่ย	0.07235	0.02289	0.01596	0.01371

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นสารเนื้อเทียมจากการวัด ดังแสดงในตารางที่ 5.3 จะถูกคูณด้วยค่าแฟกเตอร์แต่ละกรณีของรูปแบบการจัดวางและขนาดความ

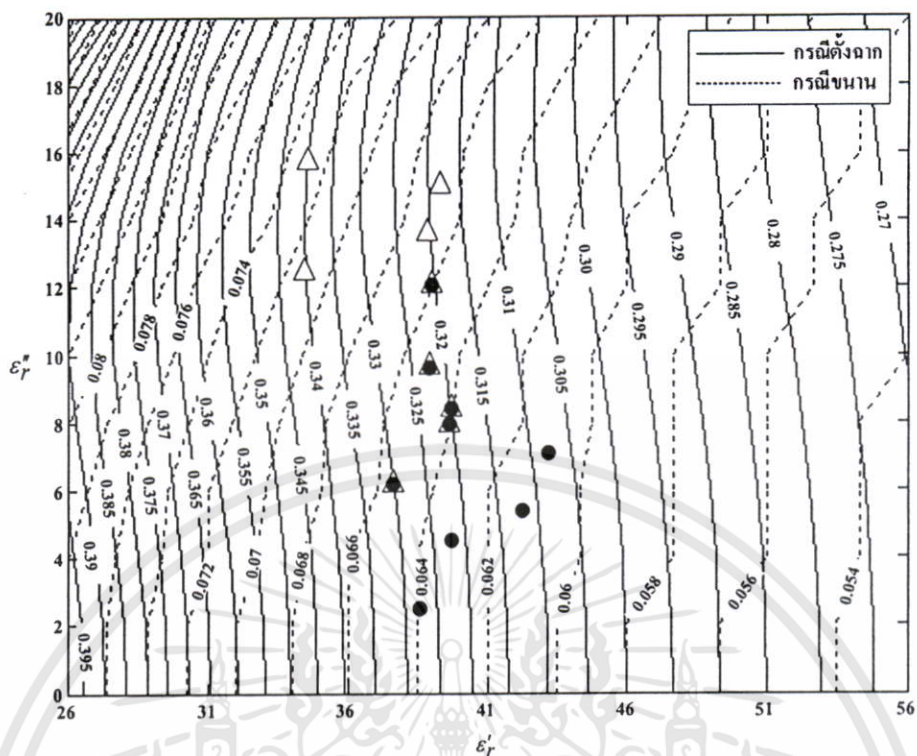
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวอิติเมนต์ของไดโพลที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้า ซึ่งค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นสารเนื้อเทียมที่ผ่านการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์แล้วแสดงในตารางที่ 5.8

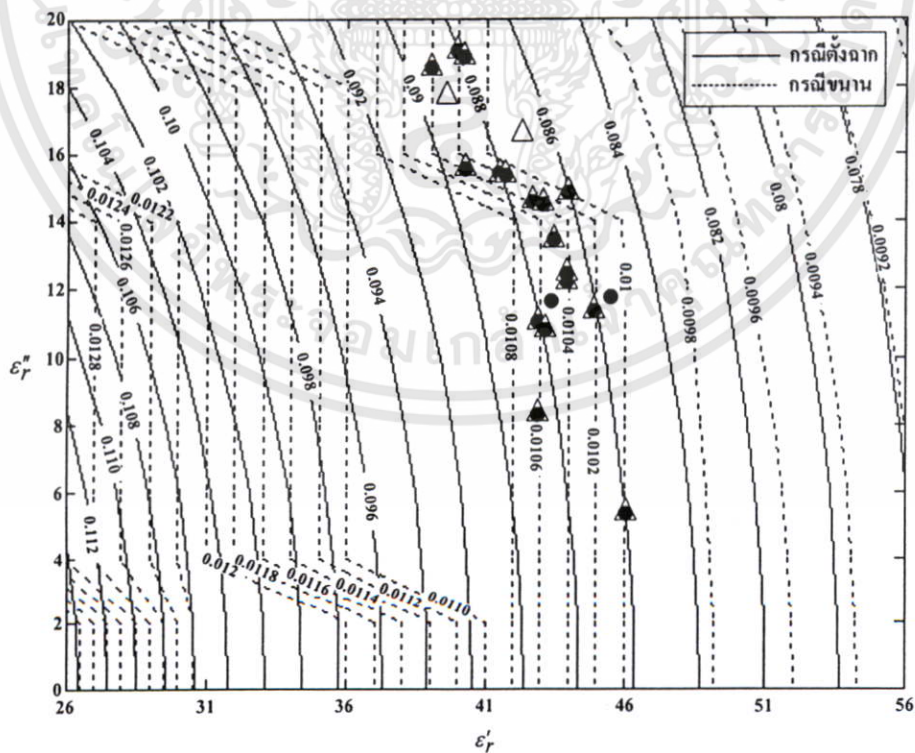
ตารางที่ 5.8 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในสารเนื้อเทียมของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิติเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกหลังจากการคูณค่าแฟกเตอร์

จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.32210	0.06487	0.08818	0.01061
2	0.31913	0.06064	0.08646	0.01013
3	0.32048	0.06557	0.08626	0.01018
4	0.31944	0.06126	0.08719	0.01037
5	0.32295	0.06431	0.08862	0.01058
6	0.33015	0.06935	0.08741	0.01051
7	0.32813	0.06476	0.08741	0.01042
8	0.33667	0.06280	0.08929	0.01053
9	0.33510	0.06355	0.08846	0.01060
10	0.32012	0.06400	0.086425	0.01004
เฉลี่ย	0.32543	0.06411	0.08758	0.01039

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นสารเนื้อเทียมจากการวัดคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 5.8 นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ผ่านการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์มาทำการระบุตำแหน่งลงบนกราฟเชิงพื้นที่ผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 โดยกราฟเชิงพื้นที่ผิวที่ใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กราฟ คือ กราฟเชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศที่ความยาวของอิติเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และกราฟเชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศที่ความยาวของอิติเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งกราฟทั้งสองสามารถแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นเมนต์โคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ในอวกาศสำหรับใช้ร่วมกับสารเนื้อเทียม



รูปที่ 5.6 กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นเมนต์โคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 สำหรับใช้ร่วมกับสารเนื้อเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการเปลี่ยนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในช่วง $26 < \epsilon'_r < 56$ และเปลี่ยนค่าตัวประกอบสูญเสียในช่วง $0 < \epsilon''_r < 20$ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของสารเนื้อเทียมจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน (Agilent 85070E Dielectric Probe Kit) อยู่ในช่วงดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการวัดเมื่อคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ แล้วทำการระบุตำแหน่งลงบนกราฟเชิงเส้น โดยที่ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากจะระบุตำแหน่งด้วยสัญลักษณ์ที่เป็นสามเหลี่ยม (Δ) ส่วนกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบขนานจะระบุตำแหน่งด้วยสัญลักษณ์ที่เป็นวงกลม (\bullet)

นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ความยาวอิมพีแดนซ์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างจากตารางที่ 5.8 มาระบุตำแหน่งบนกราฟเชิงเส้นในรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานสามารถระบุตำแหน่งลงบนกราฟเพียงแค่ 9 ตำแหน่ง ซึ่งมีเพียงแค่ 5 ตำแหน่งเท่านั้นที่การระบุตำแหน่งจากกรณีที่สายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานทำให้เกิดจุดตัดของกราฟเชิงพื้นผิว โดยที่จุดตัดทั้ง 5 ตำแหน่งให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ต่างกันเพียง 4 ค่า เนื่องจากมีจุดตัดกราฟเชิงพื้นผิวที่ซ้ำกัน ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากจุดตัดกราฟมีค่าดังแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของสารเนื้อเทียมที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลความยาวอิมพีแดนซ์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

จำนวนจุดตัดกราฟ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ'_r)	ค่าตัวประกอบสูญเสีย (ϵ''_r)
1	38.0	6.0
2	39.0	9.8
3	38.0	12.0
4	40.0	8.0
5	40.0	8.0
เฉลี่ย	39.0	8.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวที่ใช้สำหรับการระบุตำแหน่งค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ความยาวอิมพีแดนซ์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉากและขนานสามารถระบุตำแหน่งลงบนกราฟครบทั้ง 10 ตำแหน่ง แต่จากกราฟเชิงพื้นผิวจะเห็นได้ว่ากราฟแต่ละเส้นที่แทนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมหนึ่งค่ามีการตัดกันของกราฟแต่ละเส้นมากกว่า 1 ตำแหน่ง ดังนั้นจึงเกิดจุดตัดกราฟเชิงพื้นผิว 17 ตำแหน่ง ซึ่งจากจุดตัดทั้ง 17 ตำแหน่งให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ต่างกันเพียงแค่ 12 ค่าเท่านั้น เนื่องจากมีจุดตัดกราฟเชิงพื้นผิวที่ซ้ำกันเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5.5 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากจุดตัดกราฟมีค่าดังแสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของสารเนื้อเทียมที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลความยาวอิมพีแดนซ์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35

จำนวนจุดตัดกราฟ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r')	ค่าตัวประกอบสูญเสีย (ϵ_r'')
1	40.0	19.0
2	40.0	19.0
3	39.0	18.5
4	40.0	15.5
5	41.5	15.5
6	41.5	15.5
7	44.0	15.0
8	42.0	14.8
9	42.0	14.8
10	43.0	14.7
11	43.0	12.2
12	43.0	12.2
13	45.0	11.7
14	43.0	11.5
15	43.0	11.5
16	42.0	8.2
17	46.0	5.5
เฉลี่ย	42.2	13.8

ค่าไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของสารเนื้อเทียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน (Agilent 85070E Dielectric Probe Kit) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 45.04 และ 18.17 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากการใช้สายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 กับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน โดยนำค่าเฉลี่ยของผลการวัดด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของผลการวัดด้วยเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างมีค่าต่างจากผลจากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐานประมาณ 13% และ 52% ตามลำดับ ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 มีค่าต่างจากผลจากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐานประมาณ 6% และ 24% ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 มีค่าต่างจากผลจากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐานน้อยกว่าค่าที่ได้จากสายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง แต่จากเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้นำเสนอ กราฟเชิงพื้นที่ผิวหนึ่งเส้นจะแทนค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมหนึ่งค่าจากแต่ละกรณีของรูปแบบการจัดวางของสายอากาศ ซึ่งจะต้องตัดกันเพียงเส้นละจุดเท่านั้น แต่จากผลการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุทดสอบที่เป็นสารเนื้อเทียมด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่นำมาระบุตำแหน่งบนกราฟเชิงเส้นในรูปที่ 5.6 มีจุดตัดของกราฟแต่ละเส้นมากกว่าหนึ่งจุด ทำให้กราฟหนึ่งเส้นจากแต่ละกรณีของรูปแบบการจัดวางของสายอากาศให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และค่าตัวประกอบสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่า ดังนั้นจึงไม่สามารถนำสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ไปใช้งานได้ แต่เหตุผลที่ได้นำเสนอค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้โดยสายอากาศนี้ เพราะต้องการแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้มีค่าความแม่นยำมากกว่าค่าที่ได้จากสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่าหากสายอากาศมีความยาวเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกับวัสดุที่ต้องการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก จะทำให้สามารถหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของวัสดุได้แม่นยำขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลการทดสอบด้วยน้ำ

นำสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างและครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งบรรจุอยู่ในช่องพลาสติกที่ห่อหุ้มอย่างดีมาวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วม โดยนำสายอากาศใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบที่เป็นน้ำซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะที่มีปริมาตร 57x34x30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นน้ำสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในน้ำของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติก

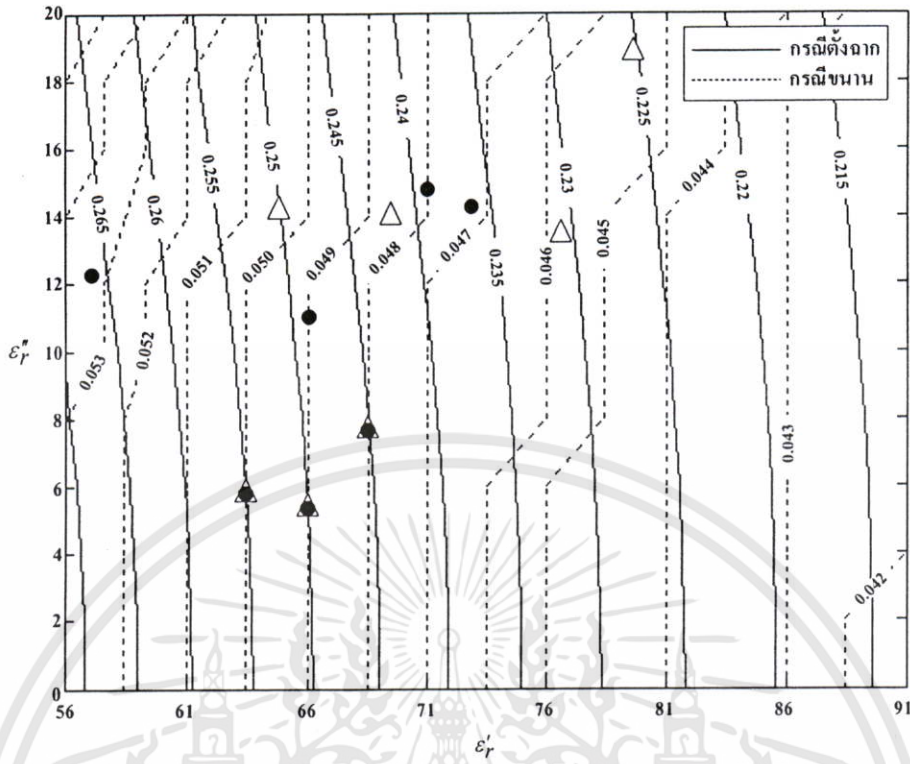
จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.05511	0.01473	0.01288	0.01049
2	0.05575	0.01713	0.01248	0.01071
3	0.05923	0.01748	0.01272	0.01102
4	0.05595	0.01794	0.01276	0.01095
5	0.05558	0.01749	0.01253	0.01078
6	0.05775	0.01982	0.01174	0.01012
7	0.05155	0.01688	0.01294	0.01108
8	0.05012	0.01905	0.01269	0.00955
9	0.05447	0.01714	0.01035	0.00946
10	0.05560	0.01751	0.01184	0.00974
เฉลี่ย	0.05511	0.01752	0.01356	0.01039

นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นน้ำจากการวัด ดังแสดงในตารางที่ 5.11 คูณด้วยค่าแฟกเตอร์แต่ละกรณีของรูปแบบการจัดวางและขนาดความยาวอิลิเมนต์ของไดโพลที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้า ซึ่งค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นน้ำที่ผ่านการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์แล้วแสดงในตารางที่ 5.12

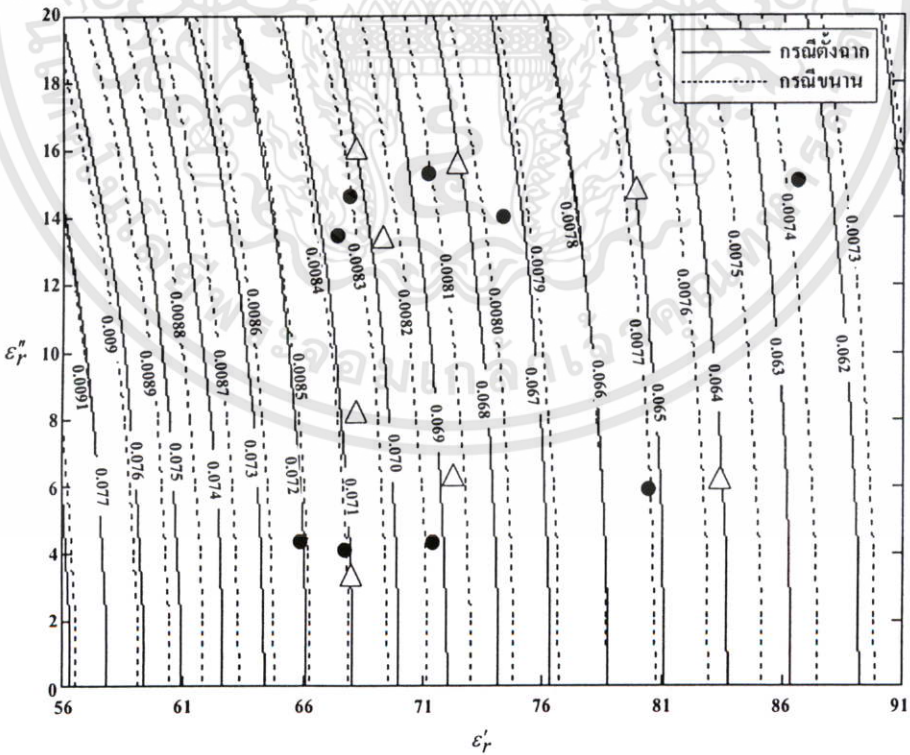
ตารางที่ 5.12 ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมในน้ำของสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพล เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก เท่ากับ 35 ที่บรรจุอยู่ในช่องพลาสติกหลังจากการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์

จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_0/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีตั้งฉาก ($\lambda_d/2$)	ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีขนาน ($\lambda_d/2$)
1	0.24788	0.04126	0.07068	0.00795
2	0.25076	0.04798	0.06848	0.00812
3	0.26641	0.04896	0.06980	0.00835
4	0.25166	0.05025	0.07002	0.00830
5	0.25000	0.04899	0.06876	0.00817
6	0.25976	0.05552	0.06442	0.00767
7	0.23187	0.04728	0.07101	0.00840
8	0.22544	0.05336	0.06963	0.00724
9	0.24500	0.04801	0.05679	0.00717
10	0.25009	0.04905	0.06497	0.00738
เฉลี่ย	0.24788	0.04907	0.07441	0.00788

ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศภายในวัสดุทดสอบที่เป็นน้ำ ซึ่งได้จากการวัดคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 5.12 นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ผ่านการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์มาทำการระบุตำแหน่งลงบนกราฟเชิงพื้นที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 โดยกราฟเชิงพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กราฟ คือ กราฟเชิงพื้นที่ของสายอากาศที่ความยาวของอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และกราฟเชิงพื้นที่ของสายอากาศที่ความยาวของอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งกราฟทั้งสองสามารถแสดงในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นเมตริโคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ในอวกาศสำหรับใช้ร่วมกับน้ำ



รูปที่ 5.8 กราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศที่ความยาวคลื่นเมตริโคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 สำหรับใช้ร่วมกับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวของค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการเปลี่ยนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในช่วง $56 < \epsilon_r' < 91$ และเปลี่ยนค่าตัวประกอบสูญเสียในช่วง $0 < \epsilon_r'' < 20$ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของน้ำที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน (Agilent 85070E Dielectric Probe Kit) อยู่ในช่วงดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการวัดเมื่อคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ แล้วทำการระบุตำแหน่งลงบนกราฟเชิงเส้น โดยที่ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากจะระบุตำแหน่งด้วยสัญลักษณ์ที่เป็นสามเหลี่ยม (Δ) ส่วนกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบขนานจะระบุตำแหน่งด้วยสัญลักษณ์ที่เป็นวงกลม (\bullet)

นำค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ความยาวอิมพีแดนซ์โคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างจากตารางที่ 5.12 มาระบุตำแหน่งบนกราฟเชิงเส้นในรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน สามารถระบุตำแหน่งลงบนกราฟเพียงแค่ 7 ตำแหน่ง ซึ่งมีเพียงแค่ 3 ตำแหน่งเท่านั้นที่การระบุตำแหน่งจากกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานทำให้เกิดจุดตัดของกราฟเชิงพื้นผิวโดยที่จุดตัดทั้ง 3 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากจุดตัดกราฟมีค่าดังแสดงในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของน้ำที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศโคโพลความยาวอิมพีแดนซ์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

จำนวนจุดตัดกราฟ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r')	ค่าตัวประกอบสูญเสีย (ϵ_r'')
1	63.5	5.8
2	66.0	5.6
3	68.5	7.8
เฉลี่ย	66.0	6.4

จากรูปที่ 5.8 เป็นกราฟเชิงพื้นผิวที่ใช้สำหรับการระบุตำแหน่งค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ความยาวอิมพีแดนซ์โคโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 จะเห็นได้ว่าค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานสามารถระบุตำแหน่งลงบนกราฟได้ 8 ตำแหน่ง และ 9 ตำแหน่ง ตามลำดับ และกราฟกรณีที่มีสายอากาศมีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานไม่มีการตัดกัน ทำให้ไม่สามารถหาค่าคง

ตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของน้ำได้ซึ่งจะสามารถ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของน้ำได้

ค่าไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน (Agilent 85070E Dielectric Probe Kit) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 69.76 และ 1.76 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากการใช้สายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน โดยนำค่าเฉลี่ยของผลการวัดด้วยเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐานเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีค่าต่างกันประมาณ 5% แต่ค่าตัวประกอบสูญเสียมักมีค่าต่างกันพอสมควร

จากการทดสอบหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือก สารเนื้อเทียม และน้ำด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบวัสดุที่ข้าวเปลือกด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างมีค่าความแม่นยำมากกว่าการทดสอบด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของข้าวเปลือกที่ทดสอบมีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับอวกาศว่างมากกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่เท่ากับ 35 ขณะที่การทดสอบวัสดุที่เป็นสารเนื้อเทียมด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างมีความแม่นยำน้อยกว่าการทดสอบด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 เนื่องจากสารเนื้อเทียมมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ใกล้เคียงกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ 35 มากกว่าที่อวกาศว่าง แต่จะเห็นได้ว่ากราฟเชิงพื้นผิวของสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 มีจุดตัดกราฟมากกว่าหนึ่งจุด จึงให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียมากกว่าหนึ่งค่า ซึ่งจากเทคนิคที่นำเสนอ นั้นจะไม่สามารถนำไปใช้เพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้ ส่วนการทดสอบวัสดุที่เป็นน้ำสามารถหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียด้วยสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่างเท่านั้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง สามารถใช้ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้ในช่วงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่น้อยไปจนถึงมาก แต่ความแม่นยำที่ได้จะมีค่าด้อยลงเมื่อนำไปใช้หาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่อยู่ในช่วงที่มาก ซึ่งในการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วงที่มากขึ้น การใช้สายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกับค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการทดสอบจะได้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่แม่นยำกว่าการใช้สายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

5.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการนำสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ที่มีสวิตช์เชื่อมต่อทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางของสายอากาศระหว่างแบบตั้งฉากและแบบขนาน ซึ่งได้ออกแบบและสร้างจากบทที่ 4 มาทดสอบวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุทดสอบที่เป็น ข้าวเปลือก สารเนื้อเทียม และน้ำ ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการวัดจะนำไปคูณกับค่าแฟกเตอร์แล้วนำมาระบุตำแหน่งบนกราฟเชิงพื้นที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 จุดตัดของกราฟเชิงเส้นจะเป็นตัวบอกค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสีย โดยค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากการวัดด้วยสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน เพื่อทดสอบความแม่นยำของเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่นำเสนอและสายอากาศไดโพลพิมพ์ที่ได้จากการออกแบบ จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอมีค่าต่างจากค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานอยู่พอสมควร เนื่องจากในกราฟเชิงเส้นที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่ได้คิดรวมส่วนสายป้อนไมโครสตริป ตัวแปลงหนึ่งส่วนสี่คลื่น บาลัน และสายไมโครสตริประนาบร่วมและการออกแบบให้สายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานอยู่บนแผ่นพิมพ์เดียวกัน โดยมีสวิตช์เป็นตัวปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางมีผลทำให้ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมจากการวัดต่างจากการวิเคราะห์

บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคใหม่ในการหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ โดยการใช้สายอากาศไดโพลพิมพ์ที่มีรูปแบบการจัดวางของสายอากาศแบบตั้งฉากและแบบขนานที่อยู่บนแผ่นพิมพ์เดียวกันและมีสวิตซ์ทำหน้าที่ปรับเลือกรูปแบบการจัดวางของสายอากาศในการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุ วัตถุประสงค์เพื่อให้สายอากาศที่จะนำไปใช้มีขนาดกะทัดรัดและเทคนิคใหม่ที่น่าเสนอจะช่วยลดความซับซ้อนในระบบการหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยการลดวงจรสำหรับการวัดค่าขนาดสัญญาณสะท้อนกลับ ดังที่ได้กล่าวถึงในวัตถุประสงค์ ประวัติความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาในบทที่ 1 ส่วนทฤษฎีและหลักการที่จำเป็นสำหรับการหาค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน ซึ่งได้นำเสนอในบทที่ 2 ประกอบด้วย การหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสียและในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ส่วนการหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบขนานในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสียจะนำผลการศึกษามีมาก่อนหน้ามาใช้ และประยุกต์สำหรับใช้งานในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ในส่วนสุดท้ายเป็นการนำเสนอผลการศึกษาดังกล่าวถึงความสูงที่เหลื่อมล้ำกันของสายอากาศ และระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์ร่วม ในบทที่ 3 ได้นำเสนอเทคนิคการหาคูณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยวิธีการวัดค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม โดยใช้สายอากาศไดโพลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนาน และนำเสนอผลการวิเคราะห์ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง สายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 และสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 75 ณ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศและความสูงที่เหลื่อมล้ำกันของสายอากาศได้นำผลที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 2 มาใช้ โดยนำเสนอผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟเชิงพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในช่วง $1 < \epsilon_r < 101$ และค่าตัวประกอบสูญเสียในช่วง $0 < \epsilon_r < 20$ กราฟเชิงพื้นที่ที่ได้จากการวิเคราะห์จะใช้เป็นส่วนของคำตอบสำหรับนำไปพิจารณาร่วมกับค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ได้จากการทดลอง ในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศได้อธิบายในบทที่ 4 ประกอบด้วย การออกแบบสายป้อนไมโครสตริปตัวแปลงหนึ่งส่วนสี่คลื่น บาลัน สายไมโครสตริปประนาบร่วม และอิลิเมนต์ไดโพล ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโพลตัวเดียวให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ เพื่อหาขนาดความกว้างและความยาวที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ออกแบบสายอากาศไดโพลคู่ ซึ่งสายอากาศที่เพิ่มเข้ามามีลักษณะการจัดวางของอิลิเมนต์ไดโพลเป็นรูปกากบาทที่มีจุดป้อนอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเชื่อมต่อกับสวิตช์ 2 ตัว ในการออกแบบได้ออกแบบสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในอวกาศว่าง และสายอากาศไดโพลที่ความยาวอิลิเมนต์ไดโพลเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 35 ด้วยโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [27] จากนั้นสร้างสายอากาศที่มีโครงสร้างเท่ากับขนาดความกว้างและความยาวที่ได้จากการออกแบบและนำมาทดสอบคุณลักษณะ แล้วนำมาทดสอบวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมกับวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือก สารเนื้อเทียม และน้ำ ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการวัดจะถูกคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ แล้วนำมาระบุตำแหน่งบนกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของวัสดุที่ทดสอบ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากเทคนิคการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่นำเสนอ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้จากเทคนิคการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่นำเสนอมีค่าต่างจากค่าจากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐานอยู่บ้าง แต่ค่าที่ได้ยังคงใกล้เคียงและเป็นไปในแนวทางเดียวกับค่าจากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน

6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา

จากเทคนิคใหม่สำหรับการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ได้นำเสนอนั้น มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่สองส่วน คือ กราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์และสายอากาศไดโพลที่ใช้ในการวัดค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของวัสดุทดสอบ ซึ่งจากผลการทดสอบหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบที่เป็นข้าวเปลือก สารเนื้อเทียม และน้ำ พบว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน มีค่าต่างกันอยู่พอสมควร โดยสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่หาได้มีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เป็นการวิเคราะห์เฉพาะส่วนของสายอากาศไดโพลอย่างเดียว ไม่ได้วิเคราะห์รวมส่วนสายป้อนไมโครสตริป ตัวแปลงหนึ่งส่วนสี่คลื่น บาลัน และสายไมโครสตริปประนาบร่วม และการออกแบบที่ต้องการให้สายอากาศที่มีรูปแบบการจัดวางแบบตั้งฉากและแบบขนานอยู่บนแผ่นพิมพ์เดียวกัน โดยมีสวิตช์ทำหน้าที่เป็นตัวปรับเลือกรูปแบบการจัดวาง ซึ่งอิลิเมนต์ของสายอากาศที่ไม่ได้ทำงานและตัวสวิตช์น่าจะมีผลต่ออิลิเมนต์ของสายอากาศที่กำลังทำงานด้วยเช่นกัน ดังนั้นค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมที่วัดได้เมื่อนำไประบุตำแหน่งบนกราฟเชิงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อน ทำให้จุดตัดกราฟเลื่อน

ตำแหน่งไป จึงส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียที่หาได้จากจุดตัดกราฟเลื่อนไปด้วย

การนำเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปใช้ประโยชน์ในการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุสามารถทำได้ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าประกอบการสูญเสียที่ได้แม้จะมีค่าความผิดพลาดอยู่บ้าง แต่ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงและเป็นไปในแนวทางเดียวกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกมาตรฐาน โดยเทคนิคที่นำเสนอนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่วัสดุที่จะใช้ทดสอบต้องเป็นวัสดุที่สามารถใช้สายอากาศใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุได้ ซึ่งแนวทางในการพัฒนาต่อไปนั้น ควรจะพัฒนาเทคนิคนี้ให้สามารถหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้หลากหลายขึ้นโดยที่ไม่จำเป็นต้องใส่สายอากาศเข้าไปในตัวกลางวัสดุทดสอบ ซึ่งการจะทำเช่นนั้นได้นั้น ในส่วนของกราฟเชิงเส้นจากเดิมที่หาได้จากการวิเคราะห์ค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศในตัวกลางที่เป็นสารเนื้อเดียวจะถูกเปลี่ยนเป็นการวิเคราะห์ในตัวกลางที่ไม่เป็นสารเนื้อเดียว ซึ่งความยุ่งยากซับซ้อนจะมากขึ้นตามไปด้วย



เอกสารอ้างอิง

- [1] A. von Hippel, **Dielectric Materials and Applications**, The Technology Press of MIT and John Wiley and Sons, New York, 1954.
- [2] Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials, Application Note, Agilent Technologies.
- [3] M. S. Venkatesh and G. S. V. Raghavan, "An overview of dielectric properties measuring techniques," **Canadian Biosystems Engineering**, vol. 47, pp. 7.15-7.30, Elsevier, 2005.
- [4] S. Seker and H. Abatay, "New frequency-dependent parametric modeling of dielectric materials," **Int. J. Electron. Commun. (AEU)**, Elsevier, Apr. 2005.
- [5] M. S. Venkatesh and G. S. V. Raghavan, "An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials," **Biosystems Engineering, Postharvest Technology**, Elsevier, Apr. 2004.
- [6] S. O. Nelson, "Agricultural Applications of Dielectric Measurements," **IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 13(4), pp. 688-702, August 2006.
- [7] S. O. Nelson, "Dielectric Spectroscopy of Fresh Fruits and Vegetables," **Proceedings of The Instrumentation and Measurement Technology Conference**, Ottawa, Ontario, Canada, vol. 1, pp. 360-364, May 2005.
- [8] A. W. Kraszewski and S. O. Nelson, "Application of Microwave Techniques in Agricultural Research," **Proceedings of The Microwave and Optoelectronics Conference**, Rio de Janeiro, Brazil, vol. 1, pp. 117-126, July 1995.
- [9] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "A Free-Space Method for Measurement of Dielectric Constants and Loss Tangents at Microwave Frequencies," **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, vol. 37, No.3, pp. 789-793, May 1989.
- [10] Z. Ma and S. Okamura, "Permittivity Determination Using Amplitudes of Transmission and Reflection Coefficients at Microwave Frequency," **IEEE Trans. Microwave Theory Techniques**, vol. 47, No. 5, pp. 546-550, May 1999.
- [11] S. N. Kharkovsky, F. Akay, U. C. Hasar and C. D. Atis, "Measurement and Monitoring of Microwave Reflection and Transmission Properties of Cement-Based Specimens," **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, vol. 51, No. 6, pp. 546-550, Dec. 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] G. S. Smith and J. D. Nordgard, "Measurement of the Electrical Constitutive Parameters of Materials Using Antennas," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP-33, pp. 783-792, July 1985.
- [13] W. R. Scott jr and G. S. Smith, "Dielectric Spectroscopy Using Monopole Antennas of General Electrical Length," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP-34, pp. 919-929, July 1986.
- [14] G. S. Smith and J. D. Nordgard, "Measurement of the Electrical Constitutive Parameters of Materials Using Antennas, Part II," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP-33, pp. 783-792, July 1985.
- [15] Y. D. He and L. C. Shen, "Measurement of Complex Permittivity of Materials Using a Monopole Antenna," **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**, vol. 30, No. 3, pp. 624-627, May 1992.
- [16] A. Shostak, V. Zagoskin, L. Ligthart and V. Iljushenko, "Analysis of a Linear Dipole Antenna System for Measurement the Complex Dielectric Permittivity," **Proceedings of the 14th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communication**, vol. 1, pp. 294-298, 2002.
- [17] V. V. Zagoskin, A. S. Shostak, B. I. Avdochenko, V. N. Iljushenko, A. P. Batsula, N. A. Antonyuk and I. S. Kruglov, "Dipole antenna sensors for measurement of complex dielectric permittivity of soils and their application under field conditions," **Proceedings of the 10th Conference on Ground Penetrating Radar**, Delft, Netherlands, pp. 731-734, June 2004.
- [18] N. A. Antonyk, I. S. Krugkov, L. P. Ligthart, V. V. Zagoskin, A. S. Shostak and V. N. Iljushenko, "Measurement of the Complex Dielectric Permittivity of Stratified Media with Dipole Antenna Sensors," **Proceedings of the 1st Conference on Radar**, Netherlands, pp. 173-176, 2004.
- [19] N. A. Antonyk, I. S. Krugkov, V. V. Zagoskin, L. P. Ligthart, A. S. Shostak, V. N. Iljushenko and B. I. Avdochenko, "Measurement of the Complex Dielectric Permittivity of Homogeneous Media with Dipole Antenna Sensors," **Proceedings of the 1st Conference on Radar**, Netherlands, pp. 169-172, 2004.

- [20] T. Limpiti and M. Krairiksh, "Closed-form Expressions of Mutual Impedance between Perpendicular Thin Dipoles," **Proceedings of ECTI-CON 2007**, Chiang Rai, Thailand, pp. 951-954, May 2007.
- [21] T. Limpiti and M. Krairiksh, "Complex Permittivity Determination by Measuring Magnitude of Mutual Coupling between Co and Cross Polarized Dipoles," **Proceedings of APMC 2007**, Bangkok, Thailand, pp. 2031-2034, Dec. 2007.
- [22] K. F. Lee, *Principles of Antenna Theory*, John Wiley & Sons, 1984.
- [23] C. A. Balanis, **Antenna Theory: Analysis and design**. New York: Wiley, 1982.
- [24] H. E. King, "Mutual impedance of unequal length antenna in echelon," **IRE Trans. Antennas Propagat.**, vol. 5, No. 3, pp. 306-313, 1957.
- [25] H. C. Baker and A. H. Lagrone, "Digital computation of the mutual impedance between thin dipoles," **IRE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP-10, No. 2, pp. 172-178, 1962.
- [26] R. C. Hansen, "Formulation of Echelon Dipole Mutual Impedance for Computer," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP-20, pp. 780-781, 1972.
- [27] *IE3D*, Zeland Software Inc.
- [28] N. Kaneda, W. R. Deal, Y. Qian, R. Waterhouse and T. Itoh, "A Broad-Band Planar Quasi-Yagi Antenna," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. 50, No. 8, pp. 1158-1160, August 2002.
- [29] Y. Qian and T. Itoh, "A Broadband Uniplanar Microstrip-To-CPS Transition," **Proceedings of APMC 1997**, pp. 609-612, Dec. 1997.
- [30] N. Kaneda, Y. Qian and T. Itoh, "A Novel Yagi-Uda Dipole Array Fed by A Microstrip-To-CPS Transition," **Proceedings of APMC 1998**, Yokohama, Japan, pp. 1413-1416, Dec. 1998.
- [31] N. I. Dib, R. N. Simons and L. P. B. Katehi, "New Uniplanar Transition for Circuit and Antenna Applications," **IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques**, vol. 43, No. 12, pp. 2868-2873, Dec. 1995.
- [32] L. Zhu and K. Wu, "Model-Based Characterization of CPS-Fed Printed Dipole for Innovative Design of Uniplanar Integrated Antenna," **IEEE Microwave and Guided Wave Letters**, vol. 9, No. 9, pp. 342-344, Sep. 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเนื้อเทียม (Agar Phantom)

ส่วนประกอบขนาด 2 ลิตร ประกอบด้วย

1. น้ำกลั่น	1913.2	ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ผงวุ้น (Agar powder)	80.0	กรัม
3. NaCl	4.8	กรัม
4. NaN_3	2.0	กรัม

ขั้นตอนการทำ

1. ต้มน้ำกลั่นจนมีอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วเติม NaCl คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 70-80 องศาเซลเซียส
2. เติม NaN_3 ลงไป คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้คงที่
3. ค่อยๆ เติมผงวุ้นลงไปทีละนิด คนให้ทั่วอย่าให้เกิดฟองอากาศ ระวังอย่าให้จับตัวเป็นก้อน คนให้ละลายตลอดเวลา
4. เติมน้ำกลั่นลงไปให้สารละลายมีปริมาตรครบ 2 ลิตร เพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึง 95 องศาเซลเซียส
5. ทำความสะอาดภาชนะที่จะใส่ด้วยน้ำกลั่น เทสารละลายที่เตรียมไว้ลงในภาชนะ เก็บไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วสามารถนำมาใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MICROWAVE CORPORATION v06.0607



HMC284MS8G / 284MS8GE

**SPDT NON-REFLECTIVE
SWITCH, DC - 3.5 GHz**

Typical Applications

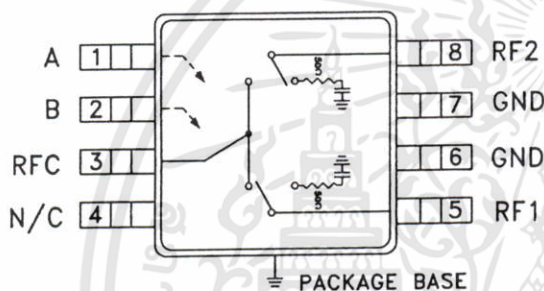
The HMC284MS8G / HMC284MS8GE is ideal for:

- Cellular/PCS Base Stations
- 2.4 GHz ISM
- 3.5 GHz Wireless Local Loop

Features

- High Isolation: >45 dB
- Positive control: 0/+5V
- Non-Reflective Design
- Ultra Small Package: MSOP8G
- Included in the HMC-DK005 Designers' Kit

Functional Diagram



General Description

The HMC284MS8G & HMC284MS8GE are low-cost SPDT switches in 8-lead grounded base MSOP packages. The design has been optimized to provide high isolation with minimal insertion loss for medium and low power applications. On-chip circuitry allows positive voltage control operation at very low DC currents with control inputs compatible with CMOS and most TTL logic families. In the "OFF" state, RF1 and RF2 are non-reflective. See reflective high isolation SPDT version, HMC194MS8.

Electrical Specifications, $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{ctl} = 0/+5\text{Vdc}$, 50 Ohm System

Parameter	Frequency	Min.	Typ.	Max.	Units
Insertion Loss	DC - 2.0 GHz		0.5	0.8	dB
	DC - 3.0 GHz		0.6	0.9	dB
	DC - 3.5 GHz		0.7	1.1	dB
Isolation	RF1 & RF2 DC - 2.0 GHz	41	45		dB
	RF1 / RF2 DC - 2.5 GHz	38/41	41/45		dB
	RF1 / RF2 DC - 3.0 GHz	34/36	37/39		dB
	RF1 & RF2 DC - 3.5 GHz	30	33		dB
Return Loss (On State)	DC - 2.0 GHz	21	25		dB
	DC - 2.5 GHz	13	17		dB
	DC - 3.5 GHz	10	12		dB
Return Loss (Off State)	0.5 - 3.5 GHz	10	13		dB
Input Power for 1 dB Compression	0.5 - 1.0 GHz	20	25		dBm
	0.5 - 3.5 GHz	18	24		dBm
Input Third Order Intercept (Two-Tone Input Power = 0 dBm Each Tone)	0.5 - 3.5 GHz	43	48		dBm
Switching Speed	DC - 3.5 GHz		40		ns
		t_{RISE}, t_{FALL} (10/90% RF) t_{ON}, t_{OFF} (50% CTL to 10/90% RF)		60	

For price, delivery, and to place orders, please contact Hittite Microwave Corporation:
20 Alpha Road, Chelmsford, MA 01824 Phone: 978-250-3343 Fax: 978-250-3373
Order On-line at www.hittite.com

10

SWITCHES - SMT

10 - 166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



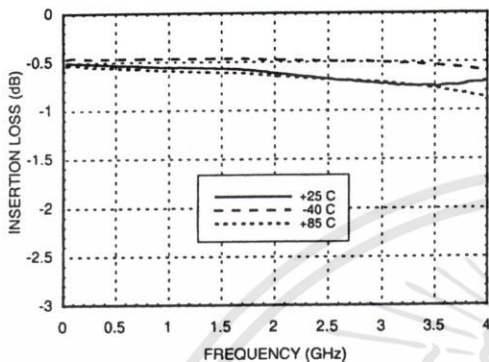
v06.0607

HMC284MS8G / 284MS8GE

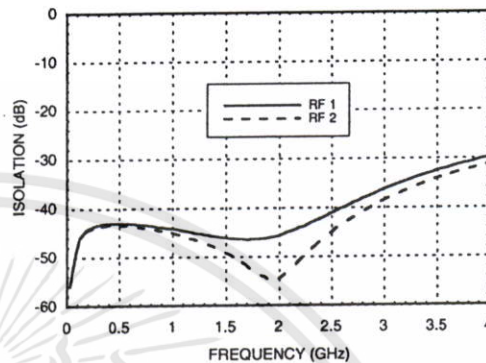
SPDT NON-REFLECTIVE SWITCH, DC - 3.5 GHz



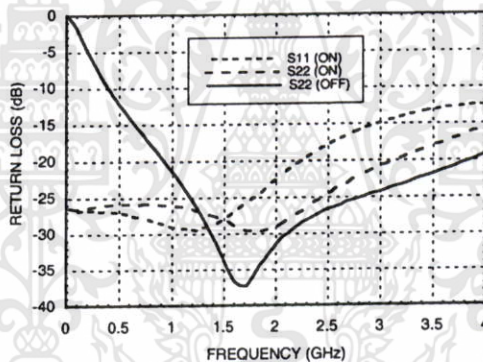
Insertion Loss



Isolation



Return Loss



10

SWITCHES - SMT

For price, delivery, and to place orders, please contact Hittite Microwave Corporation:
 20 Alpha Road, Chelmsford, MA 01824 Phone: 978-250-3343 Fax: 978-250-3373
 Order On-line at www.hittite.com

10 - 167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MICROWAVE CORPORATION v06.0607



HMC284MS8G / 284MS8GE

SPDT NON-REFLECTIVE
SWITCH, DC - 3.5 GHz

Compression vs Frequency

CTL Input	Carrier at 900 MHz		Carrier at 1900 MHz	
	Input Power for 0.1 dB Compression	Input Power for 1.0 dB Compression	Input Power for 0.1 dB Compression	Input Power for 1.0 dB Compression
(Vdc)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
+5	23	25	22	24

Caution:

Do not operate continuously at RF power input greater than 1 dB compression. (Vctl = 0/+5 Vdc).

Distortion vs Frequency

Control Input	Third Order Intercept (dBm) 0 dBm Each Tone	
	900 MHz	1900 MHz
+5	48	50

Truth Table

*Control Input Tolerances are +/-0.2 Vdc

Control Input*		Control Current		Signal Path State	
A (Vdc)	B (Vdc)	Ia (uA)	Ib (uA)	RFC to RF1	RFC to RF2
0	+5	-25	25	ON	OFF
+5	0	25	-25	OFF	ON

DC blocks are required at ports RFC, RF1, RF2.

For price, delivery, and to place orders, please contact Hittite Microwave Corporation:
20 Alpha Road, Chelmsford, MA 01824 Phone: 978-250-3343 Fax: 978-250-3373
Order On-line at www.hittite.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MICROWAVE CORPORATION v06.0607



HMC284MS8G / 284MS8GE

**SPDT NON-REFLECTIVE
SWITCH, DC - 3.5 GHz**

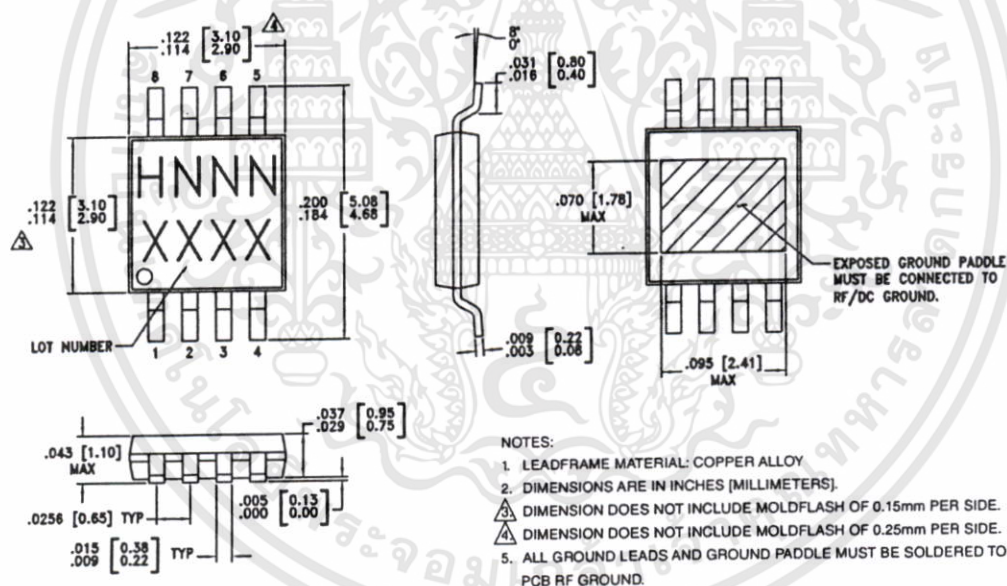
Absolute Maximum Ratings

RF Input Power (Vctl = 0/+5V)	+26 dBm
Control Voltage Range	-0.2 to +7.5 Vdc
Hot Switch Power Level (Vctl = 0/+5V)	+18 dBm
Channel Temperature	150 °C
Thermal Resistance (Insertion Loss Path)	140 °C/W
Thermal Resistance (Terminated Path)	190 °C/W
Storage Temperature	-65 to +150 °C
Operating Temperature	-40 to +85 °C
ESD Sensitivity (HBM)	Class 1A



**ELECTROSTATIC SENSITIVE DEVICE
OBSERVE HANDLING PRECAUTIONS**

Outline Drawing



Package Information

Part Number	Package Body Material	Lead Finish	MSL Rating	Package Marking ^[3]
HMC284MS8G	Low Stress Injection Molded Plastic	Sn/Pb Solder	MSL1 ^[1]	H284 XXXX
HMC284MS8GE	RoHS-compliant Low Stress Injection Molded Plastic	100% matte Sn	MSL1 ^[2]	H284 XXXX

[1] Max peak reflow temperature of 235 °C

[2] Max peak reflow temperature of 260 °C

[3] 4-Digit lot number XXXX

For price, delivery, and to place orders, please contact Hittite Microwave Corporation:
20 Alpha Road, Chelmsford, MA 01824 Phone: 978-250-3343 Fax: 978-250-3373
Order On-line at www.hittite.com

10

SWITCHES - SMT

10 - 169

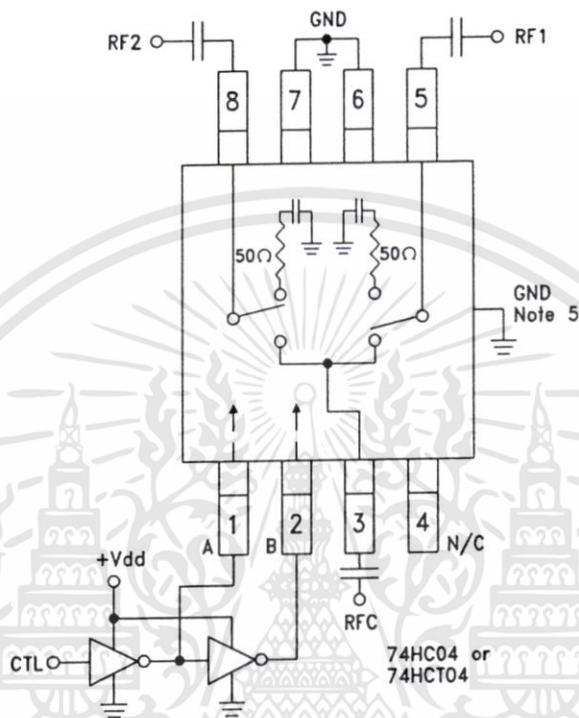
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HMC284MS8G / 284MS8GE

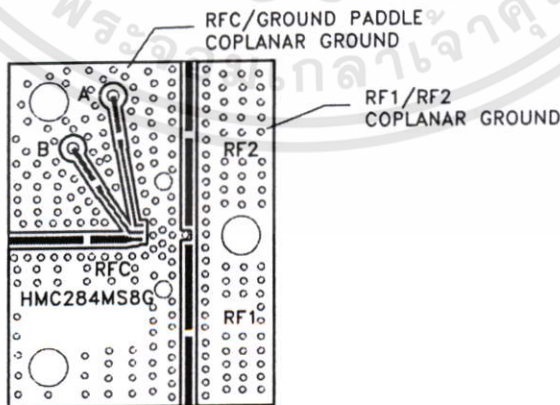
SPDT NON-REFLECTIVE SWITCH, DC - 3.5 GHz

Typical Application Circuit



Notes:

1. Set A/B control to 0/+5V, Vdd = +5V and use HCT series logic to provide a TTL driver interface.
2. Control inputs A/B can be driven directly with CMOS logic (HC) with Vdd = +5 Volts applied to the CMOS logic gates.
3. DC blocking capacitors are required for each RF port as shown. Capacitor value determines lowest frequency of operation.
4. Highest RF signal power capability is achieved with Vdd = +7V and A/B set to 0/+7V.
5. Back side paddle must be connected to RF ground.
6. A grounded coplanar waveguide PCB layout technique is recommended to achieve high isolation. The component side ground plane between RFC/grounded paddle and RF1/RF2 should be continuous, see below. There should be a continuous ground plane under component side layout.



For price, delivery, and to place orders, please contact Hittite Microwave Corporation:
20 Alpha Road, Chelmsford, MA 01824 Phone: 978-250-3343 Fax: 978-250-3373
Order On-line at www.hittite.com

10

SWITCHES - SMT

10 - 170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



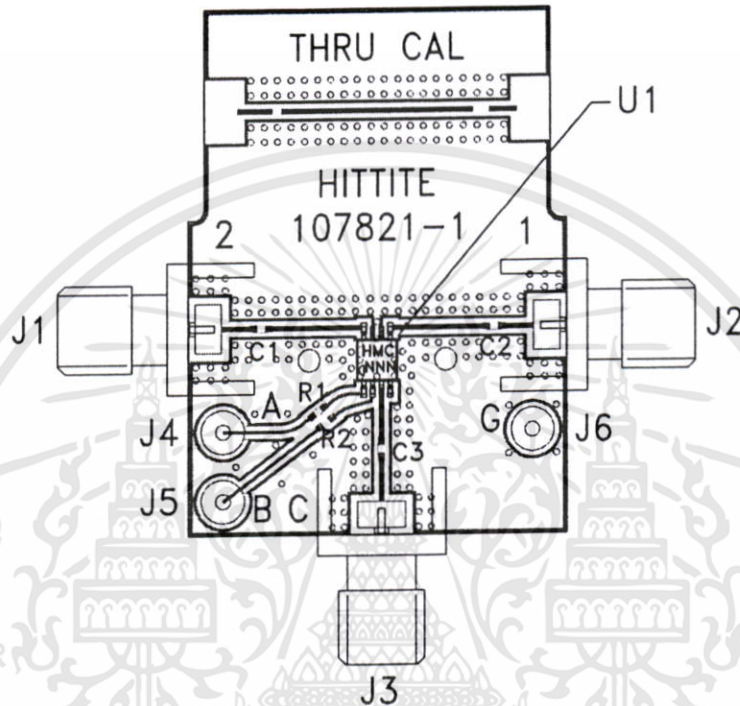
MICROWAVE CORPORATION v06.0607



HMC284MS8G / 284MS8GE

SPDT NON-REFLECTIVE
SWITCH, DC - 3.5 GHz

Evaluation PCB

List of Materials for Evaluation PCB 105143 ^[1]

Item	Description
J1 - J3	PCB Mount SMA RF Connector
J4 - J6	DC Pin
C1 - C3	100 pF capacitor, 0402 Pkg.
R1, R2	100 Ohm resistor, 0402 Pkg.
U1	HMC284MS8 / HMC284MS8GE SPDT Switch
PCB ^[2]	107821 Evaluation PCB

[1] Reference this number when ordering complete evaluation PCB

[2] Circuit Board Material: Rogers 4350

The circuit board used in the final application should be generated with proper RF circuit design techniques. Signal lines at the RF port should have 50 ohm impedance and the package ground leads and package bottom should be connected directly to the ground plane similar to that shown above. The evaluation circuit board shown above is available from Hittite Microwave Corporation upon request.

For price, delivery, and to place orders, please contact Hittite Microwave Corporation:
20 Alpha Road, Chelmsford, MA 01824 Phone: 978-250-3343 Fax: 978-250-3373
Order On-line at www.hittite.com

10

SWITCHES - SMT

10 - 171

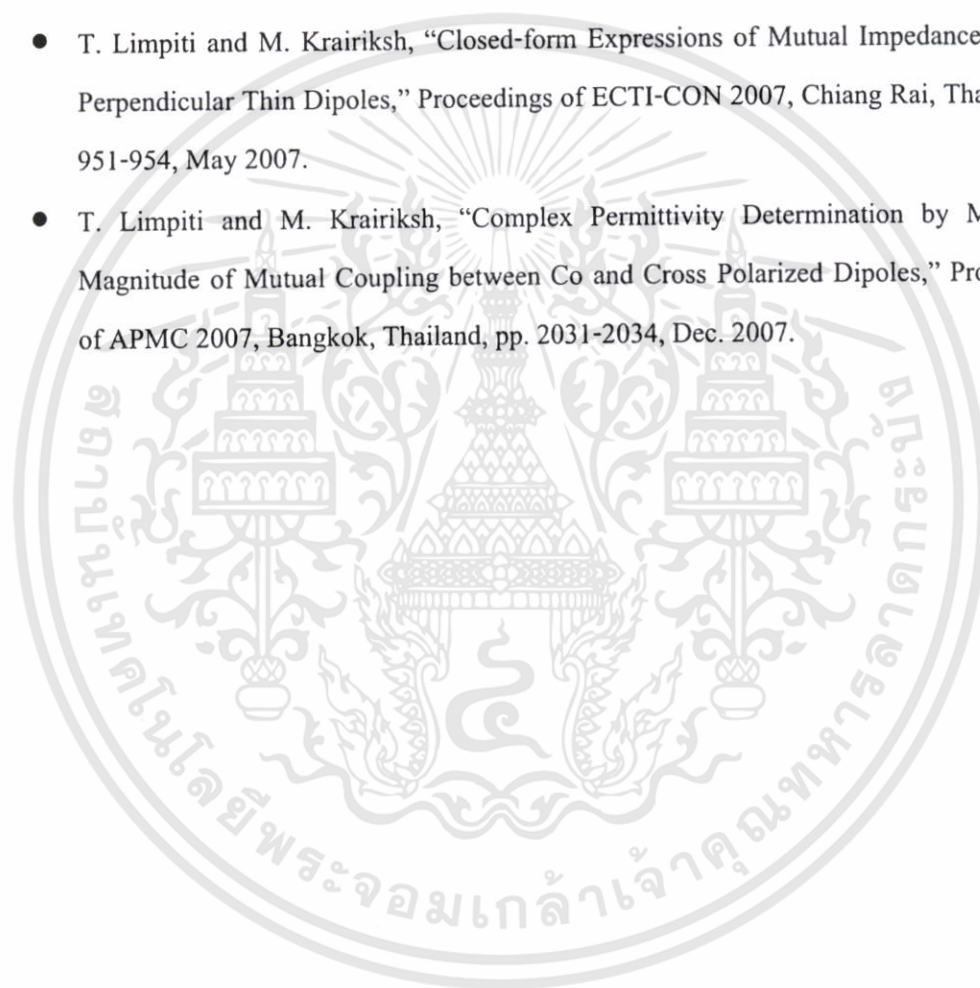
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายรัชวัฒน์ ลิ้มปิติ เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2548

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- T. Limpiti and M. Krairiksh, "Closed-form Expressions of Mutual Impedance between Perpendicular Thin Dipoles," Proceedings of ECTI-CON 2007, Chiang Rai, Thailand, pp. 951-954, May 2007.
- T. Limpiti and M. Krairiksh, "Complex Permittivity Determination by Measuring Magnitude of Mutual Coupling between Co and Cross Polarized Dipoles," Proceedings of APMC 2007, Bangkok, Thailand, pp. 2031-2034, Dec. 2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้