

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องในตัวกลางต่างๆ

STUDY OF MUTUAL COUPLING BETWEEN SLOT ANTENNAS IN
VARIOUS MEDIUMS



T110546



ไพบูรณ์ ย้อยหยด
PAIBOON YOIYOD

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 110546
วัน,เดือน,ปี..... - 4 พ.ย. 2553

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-010-053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF MUTUAL COUPLING BETWEEN SLOT ANTENNAS IN
VARIOUS MEDIUMS**



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

2010

KMITL-2010-EN-M-010-053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

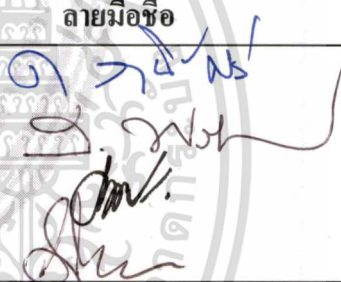
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องในตัวกลางต่าง ๆ
Thesis Title Study of Mutual Coupling Between Slot Antennas in Various Mediums
นักศึกษา นายไพบูรณ์ ย้อยหยด
รหัสประจำตัว 51060909
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-010-053

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ทองทศ	วานิชศรี	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
รศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกฉालิน	
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2553 เวลา 15.00-17.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

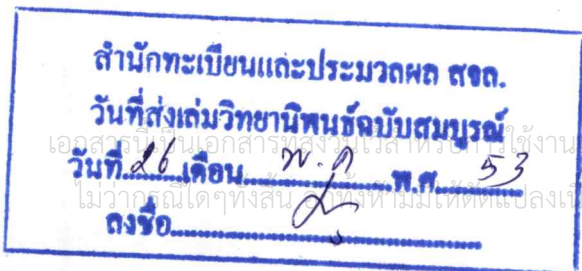
คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น หากท่านมีเหตุสงสัยประการใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องในตัวกลาง
ต่างๆ

นักศึกษา

นายไพบูรณ์ ย้อยหยด

รหัสประจำตัว

51060909

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโทรคมนาคม

พ.ศ.

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้นและทรงกลม โดยได้เริ่มศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางใดๆ พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตระหว่างตัวกลางที่ต่างชนิดกัน การหาสนามในระยะที่วัดอยู่ใกล้สายอากาศได้ใช้วิธีโคเมนเชิงสเปกตรัมซึ่งเป็นการแปลงฟูรีเยร์ การหาค่าสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กโดยการแก้อินทิเกรตด้วยวิธีการเฟสคงที่ แล้วหาค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมและค่าแอดมิตแดนซ์ตัวเองซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการหาค่าการเชื่อมต่อร่วม ในส่วนการหาสนามของตัวกลางทรงกลมนั้นจะมีความซับซ้อนกว่าตัวกลางที่เป็นชั้น โดยใช้ฟังก์ชันเลอจองและฟังก์ชันเบสเซลทรงกลมในการวิเคราะห์หาค่าสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก จากผลการคำนวณทางทฤษฎีได้มีการพิสูจน์ความแม่นยำโดยการเทียบกับค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมในอวกาศว่างสำหรับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลทางการคำนวณในกรณีตัวกลางที่เป็นชั้น ได้ทดสอบข้าวเปลือกและสำหรับตัวกลางที่เป็นทรงกลมได้ทดสอบ น้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลาและน้ำหวานบรรจุในพลาสติกทรงกลม จากผลการทดลองพบว่าอิทธิพลที่ทำให้ค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องมีการเปลี่ยนแปลงคือ ระยะระหว่างสายอากาศร่อง ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับวัตถุและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study of mutual coupling between slot antennas in various mediums
Student	Mr. Paiboon Yoiod
Student ID.	51060909
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunication Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Prof.Dr. Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis presents the study of mutual coupling between slot antennas near stratified and spherical mediums. Firstly, the electromagnetic propagation in a material was studied by considering boundary conditions of two different mediums. Electric field and magnetic field of the object near the antennas were calculated by spectral domain approach by taking Fourier transform. This method utilized the stationary phase integration to solve self admittance and mutual admittance for mutual coupling. The electromagnetic calculation of a spherical medium is complicated and Legendre function and spherical Bessel function were used to analyze. The calculated results were validated by comparing the mutual admittance in case of free space. Moreover, the experiments were set up to compare the calculated mutual coupling with the measured results. Paddy was the material under test in the case of stratified medium. In the case of spherical medium, materials under test were water, vinegar, fish sauce and syrup contained in plastic spheres. The results showed that the mutual coupling of slot antennas were affected by the distance between antennas, the distance between the materials and the antennas and the dielectric property of the materials.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คอยเอาใจใส่ดูแลติดตามงานและแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมถึงการฝึกฝนทักษะ การฟัง พูด อ่าน เขียน การนำเสนอผลงาน ทางด้านวิชาการอันมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อตัวข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมพล โกศลวิตร และ ผศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์ ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการและเครื่องมือรวมถึงวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. โอภาส จุฑาทเทพ อาจารย์วัยเลิศกษณ์ ประสงค์สุข และอาจารย์วิวัฒน์ เหลี่ยมมณี มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือทางด้านการวิเคราะห์ โจทย์คณิตศาสตร์ ไฟฟ้า

ขอขอบคุณ ดร.จิรัฏฐ์ เหมือนชู และคุณจักรกฤษ ตรรกพานิชย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในข้อสงสัยต่างๆ จนเกิดความกระจ่างชัดเจน

ขอขอบคุณ คุณภพสุข สุขสำราญ คุณประพันธ์ ลีกุล คุณธัญวัฒน์ ลิ้มปิติ คุณธนวุฒิ ตันติโสภารักษ์ และสมาชิกในห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ช่วยไขข้อสงสัยต่างๆ รวมถึง มิตรภาพ ความจริงใจ การให้ความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมาตลอดที่ข้าพเจ้าปฏิบัติงานในห้องวิจัยแห่งนี้

คุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่บิดามารดา บรรพบุรุษ ครูอุปัชฌาย์ อาจารย์ ญาติสนิทมิตรสหาย และเจ้ากรรมนายเวรของข้าพเจ้า

ไพบุลล์ ย้อยหยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้น.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 รูปแบบของปัญหาสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้น.....	4
2.3 เงื่อนไขขอบเขตของตัวกลางสองชั้น.....	7
2.4 วิธีการเฟสคงที่.....	11
2.4.1 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณ สายอากาศร่องที่ 1.....	11
2.4.2 ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2.....	20
2.4.3 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นสะท้อนบริเวณ สายอากาศร่องที่ 1.....	23
2.4.4 ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศร่องที่ 2.....	31
2.5 การหาค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมและแอดมิตแดนซ์ตัวเอง.....	37
2.6 การพิสูจน์สูตรคำนวณแอดมิตแดนซ์ร่วมในอวกาศว่าง.....	40
2.7 สรุป.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลม.....	43
3.1 กล่าวนำ.....	43
3.2 รูปแบบของปัญหาที่มีวัสดุทรงกลมวางอยู่ใกล้สายอากาศร่อง.....	43
3.3 การหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่บริเวณสายอากาศร่องที่ 1 และ 2.....	47
3.3.1 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณ สายอากาศร่องที่ 1.....	47
3.3.2 ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2.....	49
3.3.3 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นของคลื่นสะท้อนที่บริเวณ สายอากาศร่องที่ 1 และ 2.....	50
3.4 การหาค่าแอมพลิจูดร่วมและ แอมพลิจูดตัวเอง.....	66
3.5 การพิสูจน์สูตรคำนวณแอมพลิจูดร่วมในอวกาศว่าง.....	68
3.6 สรุป.....	69
บทที่ 4 ผลการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้น และทรงกลม.....	71
4.1 กล่าวนำ.....	71
4.2 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้น.....	71
4.2.1 ขั้วเปลือกความขึ้น 21.22 % ($\epsilon'_r = 3.474, \epsilon''_r = 0.537$).....	72
4.2.2 ขั้วเปลือกความขึ้น 12.19 % ($\epsilon'_r = 2.395, \epsilon''_r = 0.284$).....	74
4.3 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลม.....	76
4.3.1 การวิเคราะห์รูปแบบปัญหาการวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลม ในอวกาศว่าง.....	76
4.3.2 การวิเคราะห์รูปแบบปัญหาการวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลม ในขั้วเปลือก.....	80
4.4 สรุป.....	84
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	86
5.1 กล่าวนำ.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 อุปกรณ์และการเตรียมการทดลอง.....	86
5.2.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศร่อง.....	86
5.2.2 วัสดุทดสอบ.....	89
5.3 วิธีการทดลอง.....	90
5.3.1 การวัดค่าแวลูการขึ้น 21.22% และ 12.19%.....	90
5.3.2 การวัดวัตตตรงกลมในอวกาศว่าง.....	91
5.3.3 การวัดวัตตตรงกลมที่ฝังอยู่ในขั้วเปลือก.....	92
5.4 ผลการทดลอง.....	92
5.4.1 การทดสอบวัดความขึ้นขั้วเปลือก.....	92
5.4.2 การทดสอบวัดตรงกลมในอวกาศว่าง.....	96
5.4.3 การทดสอบวัดตรงกลมในขั้วเปลือก.....	100
5.5 วิจารณ์การทดลอง.....	103
5.6 สรุป.....	103
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	104
6.2 วิจารณ์การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลอง.....	104
6.3 แนวทางการพัฒนา.....	105
บรรณานุกรม.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางทรงกลมในอวกาศว่าง.....	78
4.2 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนรัศมีของทรงกลมในอวกาศว่าง.....	78
4.3 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางทรงกลมในข้าวเปลือก.....	82
4.4 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนรัศมีของทรงกลมในข้าวเปลือก.....	82
5.1 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	5
2.2 เงื่อนไขขอบเขตตัวกลางสองชั้น.....	8
2.3 แอดมิตแตนซ์ร่วมของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง.....	41
2.4 การเฉลี่ยค่าผิดพลาดของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง.....	42
3.1 การวางตัวกลางทรงกลมใกล้สายอากาศร่อง.....	43
3.2 แอดมิตแตนซ์ร่วมของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง.....	68
3.3 การเฉลี่ยค่าผิดพลาดของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง.....	69
4.1 การวางสายอากาศอยู่ใกล้ตัวกลางสองชั้น.....	71
4.2 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือกความถี่ 21.22%.....	72
4.3 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องกับขั้วเปลือกความถี่ 21.22%.....	73
4.4 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือกความถี่ 12.19%.....	74
4.5 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องกับขั้วเปลือกความถี่ 12.19%.....	75
4.6 การวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลมในอวกาศว่าง.....	76
4.7 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องเมื่อเปลี่ยนระยะห่างของทรงกลมในอวกาศว่าง.....	77
4.8 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องที่มีทรงกลมในอวกาศว่าง.....	79
4.9 การวางสายอากาศร่องบนขั้วเปลือกที่มีวัตถุทรงกลมฝังอยู่.....	80
4.10 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องเมื่อเปลี่ยนระยะห่างของทรงกลมในขั้วเปลือก.....	81
4.11 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องที่มีทรงกลมในขั้วเปลือก.....	83
5.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมจากการจำลอง โดยโปรแกรมจำลอง ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	87
5.2 สายอากาศร่องที่สร้างขึ้น.....	88
5.3 สายป้อนไมโครสตริป.....	88
5.4 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องที่สร้างขึ้น.....	89
5.5 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก.....	90
5.6 ผังภูมิการวัดขั้วเปลือกความถี่ 21.22% และ 12.19%.....	91
5.7 ผังภูมิการวัดวัตถุทรงกลมในอวกาศว่าง.....	91
5.8 ผังภูมิการวัดวัตถุทรงกลมในขั้วเปลือก.....	92
5.9 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดในขั้วเปลือกความถี่ 21.22%	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
เมื่อเปลี่ยนระยะห่าง (z_1) และระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2).....	94
5.10 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดในข้าวเปลือกความชื้น 12.19% เมื่อเปลี่ยนระยะห่าง (z_1) และระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2).....	96
5.11 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัตถุทรงกลมในอวกาศว่างเมื่อเปลี่ยน ระยะห่างทรงกลม (z_2) และคุณสมบัติตัวกลางทรงกลม.....	98
5.12 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัตถุทรงกลมในอวกาศว่างเมื่อเปลี่ยน ขนาดทรงกลม (a) และระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2).....	99
5.13 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัตถุทรงกลมในข้าวเปลือกเมื่อเปลี่ยน คุณสมบัติตัวกลางและรัศมีทรงกลม (a).....	101
5.14 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัตถุทรงกลมในข้าวเปลือกเมื่อเปลี่ยน ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2).....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งส่งออกสินค้าทางการเกษตรไปยังตลาดโลกและมีการควบคุมคุณภาพสินค้าเป็นสำคัญ ซึ่งต้องควบคุมรายการสินค้าทางการเกษตรให้เป็นไปตามมาตรฐานการค้าระหว่างประเทศ ปัญหาหนึ่งที่พบก็คือไม่สามารถควบคุมคุณภาพสินค้านำเข้าได้ทั้งหมด ทั้งนี้ยังขาดเครื่องมือในการตรวจสอบเพื่อให้เกิดความแม่นยำในภาคการเกษตร ที่ผ่านมาในช่วงฤดูการเก็บเกี่ยว เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ทูเรียน มังคุด เงาะ เป็นต้น จะมีผลผลิตทางการเกษตรออกสู่ตลาดมากทำให้ราคาพืชผลทางการเกษตรตกต่ำ รัฐบาลต้องเข้าแทรกแซงราคาตลาดเพื่อให้เกษตรกรอยู่ได้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ระดับหนึ่งแต่ไม่ทั้งหมด ต่างกับช่วงนอกฤดูการเก็บเกี่ยวที่ราคาจะสูง ด้วยเหตุนี้ทำให้เกษตรกรต้องเก็บเกี่ยวผลผลิตก่อนกำหนดเพื่อให้ได้ราคาที่ดีกว่าฤดูการเก็บเกี่ยว ทำให้ไม่ได้มาตรฐานสำหรับสินค้าส่งออก หรือแม้แต่ผู้บริโภคภายในประเทศเองก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือตรวจสอบที่ได้มาตรฐานเพื่อควบคุมสินค้า

การพัฒนาเซนเซอร์ไมโครเวฟสำหรับควบคุมคุณภาพสินค้าทางการเกษตรเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพผลผลิตทางการเกษตร โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของพืชผลการเกษตร [1]-[2] แต่ละประเภทที่ความถี่ต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก การพัฒนาเซนเซอร์โคโพลเชื่อมร่วมเพื่อใช้วัดความชื้นในข้าวเปลือก [3] โดยวัดสัญญาณเชื่อมต่อและสัญญาณสะท้อนกลับจากวัตถุ รวมถึงเซนเซอร์โคโพลเชื่อมร่วมที่สามารถสวิตช์โพลาริซได้ [4] โดยวัดเพียงสัญญาณเชื่อมต่อ สำหรับผลไม้เราได้มีการนำเสนอเซนเซอร์แพดซ์เชื่อมร่วมเพื่อนำไปใช้วัดความอ่อนแก่ของทุเรียน [5] และ ความเปรี้ยวหวานของส้ม จากตัวอย่างงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้โปรแกรมแบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [6] ในการวิเคราะห์สร้างเครื่องมือซึ่งยังขาดหลักฐานทางวิชาการในด้านการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าแอดมิแตนซ์เชื่อมร่วม ค่าแอดมิแตนซ์ตัวเอง และค่าพารามิเตอร์การกระจาย ซึ่งช่วยทำให้เข้าใจได้อย่างถ่องแท้ในงานที่ทำวิจัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาทฤษฎีการคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศร่องพร้อมการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบความสัมพันธ์ค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องที่วางใกล้ตัวกลางที่เป็นชั้นและทรงกลม โดยการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตำแหน่งสายอากาศที่ใช้ส่งคลื่นกับรับคลื่น ตำแหน่งระยะจากวัตถุตัวกลางมายังสายอากาศ และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง เพื่อสามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายการทำงานของเซนเซอร์วัดผลไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้หรือแม้แต่การนำเซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้ด้านอื่นๆ ซึ่งได้นำทฤษฎีที่เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มาอธิบายให้สอดคล้องกับโจทย์ที่กล่าวมาเมื่อมีสายอากาศร่องวงใกล้ตัวกลางที่เป็นชั้นหรือทรงกลม โดยกำหนดตัวกลางนั้นให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ซึ่งหมายถึงความสามารถในการตรวจสอบของเซนเซอร์นั่นเอง ในอนาคตจะได้นำผลของการศึกษานี้ไปพัฒนาเซนเซอร์วัดผลไม้ เช่น การวัดรสชาติของส้ม การวัดตำหนักที่เป็นเนื้อแก้วในมังคุด เป็นต้น ในการนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้อีกด้านหนึ่งก็คือการพัฒนาาระบบเทคนิคการวัดย้อนกลับเพื่อทำให้ทราบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสามารถระบุวัตถุได้แม่นยำขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาทฤษฎีการคำนวณสายอากาศร่องได้แบ่งเป็นสองรูปแบบ โดยรูปแบบแรกได้ศึกษาความสัมพันธ์สายอากาศร่องใกล้ตัวกลางที่เป็นชั้นเริ่มจากสายอากาศที่วางอยู่ในอวกาศว่าง หาสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศที่ส่งคลื่นและสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับคลื่นโดยใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม [7] แล้วนำค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวมาหาค่าการเชื่อมต่อร่วมต่อจากนั้นจึงนำวัตถุตัวกลางที่เป็นชั้นเข้ามาวางใกล้สายอากาศโดยใช้หลักการเงื่อนไขขอบเขต [8] ในการพิจารณาหาค่าคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านไปยังวัตถุ คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ารวมถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งสายอากาศ ระยะวัตถุและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อค่าการเชื่อมต่อร่วม

รูปแบบที่สองคือการนำทรงกลมวางใกล้สายอากาศร่องในอวกาศว่าง โดยลักษณะคลื่นที่ปล่อยออกจากร่องส่งเป็นคลื่นระนาบ พิจารณาหาเงื่อนไขขอบเขตและการหาค่าสนามแม่เหล็ก ค่าสนามไฟฟ้าจะอยู่ในรูปแบบกระจายคลื่นบนตัวกลางทรงกลม [9] แล้วจึงนำค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมาคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อร่วม จากทั้งสองรูปแบบในทางการคำนวณจะได้นำไปสู่ขั้นการทดลองโดยเทียบวัดสายอากาศร่องในอวกาศว่างก่อนแล้วจึงค่อยเพิ่มวัตถุตัวกลางที่เป็นชั้นหรือทรงกลมเข้าไปในระบบการทดลองเปรียบเทียบผลที่ได้แต่ละกรณีว่ามีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีมากน้อยเพียงใด

1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งออกเป็น 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมา ความน่าสนใจของปัญหา การนำเสนอหลักการ และกล่าวถึงภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อร่วม การกระจายตัวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางที่เป็นชั้น โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตและวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณค่าการเชื่อมต่อร่วม การกระจายตัวคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลม โดยใช้หลักการกระจายคลื่นสู่ทรงกลม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของผลการคำนวณค่าการเชื่อมต่อร่วม รูปแบบการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากสายอากาศร่องบนระนาบกราวด์ที่อยู่ใกล้ตัวกลางที่เป็นชั้นและทรงกลมตามบทที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาสายอากาศที่มีจำนวนสองร่องขึ้นไปสามารถปรับเปลี่ยนค่าการเชื่อมต่อร่วมได้หรือไม่ โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง ระยะวัตถุ และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางต่างๆ

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณซึ่งขั้นตอนการทดลองนั้นจะเริ่มจากการสร้างสายอากาศร่องขึ้นมาแล้วหาค่าการเชื่อมต่อร่วมในอวกาศว่าง โดยไม่มีวัตถุอยู่ใกล้ หลังจากนั้นนำวัตถุเข้ามาทดลองแบ่งเป็นกรณีตัวกลางที่เป็นชั้นและทรงกลมตามลำดับ เปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองกับผลทางการคำนวณ

บทที่ 6 กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและผลจากการทดลอง ประเมินผลความสอดคล้องกับรูปแบบของปัญหาที่กำหนด ข้อผิดพลาด แนวทางสำหรับการพัฒนาเพิ่มความซับซ้อนเพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น

บทที่ 2

การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้น

2.1 กล่าวนำ

การพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ (Near field) ของสายอากาศร่องบนระนาบกราวด์ใกล้ตัวกลาง ซึ่งเป็นคลื่นทรงกลมไม่สามารถนำมาใช้กับทฤษฎีของคลื่นระนาบได้โดยตรงจึงได้นำวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมมาใช้พิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ เพราะมีลักษณะเป็นคลื่นระนาบวิธีการที่สามารถแปลงระบบสมการจากโดเมนเชิงพิกัดให้เป็นโดเมนเชิงสเปกตรัมทำได้โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) [10] เนื่องจากโครงสร้างของปัญหาประกอบด้วยการเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางที่ต่างชนิดกันจึงได้ศึกษาการเดินทางของคลื่นเป็นอันดับแรก และจากคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางต่างชนิดกันตรงบริเวณรอยต่อของทั้งสองตัวกลางนั้นจะเกิดปรากฏการณ์คลื่นส่งผ่านและคลื่นสะท้อนกลับขึ้นในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีของการตกกระทบแบบตั้งฉาก (Normal incident) ของทั้งสองตัวกลางเท่านั้น

2.2 รูปแบบของปัญหาสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้น

สิ่งที่ต้องการทราบในรูปแบบปัญหาการนำสายอากาศร่องมาวางอยู่ใกล้ตัวกลางสองชั้น คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ร่วม (Mutual admittance) และ ค่าแอดมิตแตนซ์ตัวเอง (Self admittance) ระหว่างสายอากาศร่องที่วางอยู่ใกล้ตัวกลางสองชั้นที่มีการสูญเสีย ซึ่งก่อนที่จะหาค่าแอดมิตแตนซ์ทั้งสองเพื่อนำไปหาค่าการเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ได้นั้นจำเป็นต้องหาค่าสนามที่เกิดบริเวณสายอากาศร่องที่ 1 และ 2 ให้ได้เสียก่อน ดังสูตรการหาแอดมิตแตนซ์ร่วมต่อไปนี้

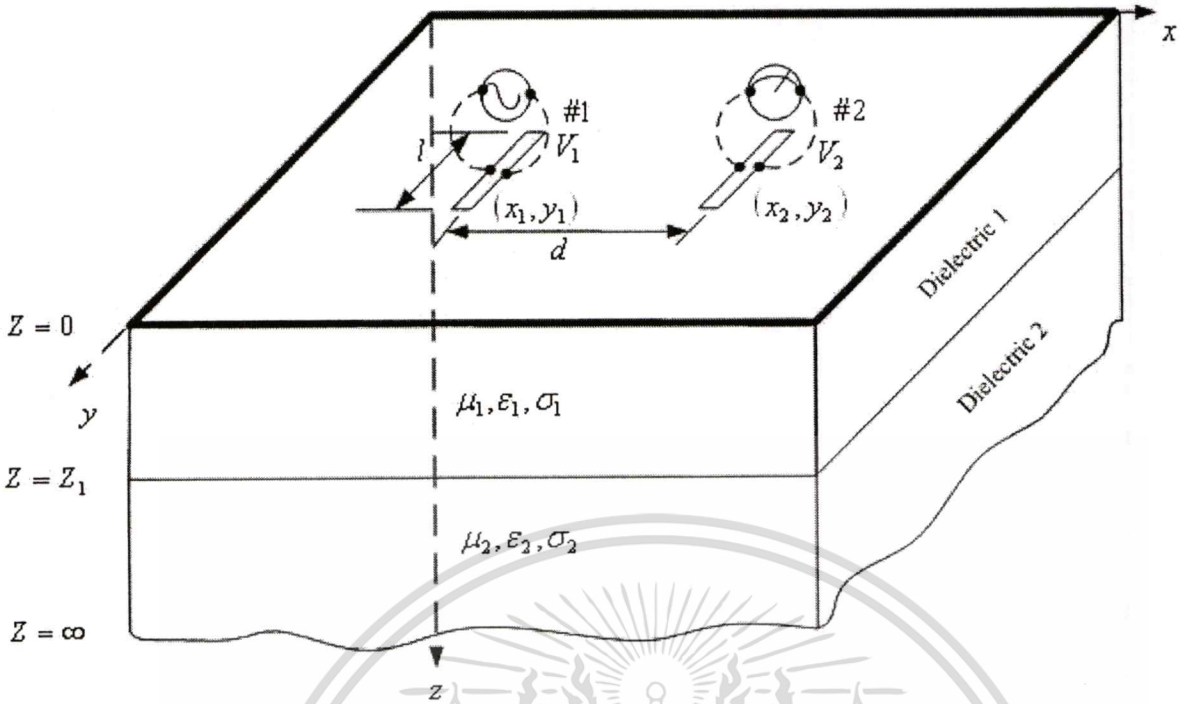
$$Y_{ij} = \frac{1}{V_i V_j} \iint_a (\vec{E}_j \times \vec{H}_i) \cdot \hat{a}_n ds' \quad (2.1)$$

เมื่อ \vec{E}_j เป็นสนามไฟฟ้าที่ร่องเปิด j เมื่อลัดวงจรที่ร่องเปิด i

\vec{H}_i เป็นสนามแม่เหล็กที่ร่องเปิด i ซึ่งลัดวงจรที่เกิดจากการกระตุ้นที่ร่องเปิด j

$V_{i(j)}$ เป็นขนาดศักดาไฟฟ้าที่แต่ละร่องเปิดเมื่อไม่มีอีกช่องเปิดหนึ่ง

โดยที่ ร่อง i และ j คือ ร่องที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 การวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางที่มีการสูญเสีย

พิจารณาสายอากาศร่องวางใกล้ตัวกลางสองชั้นที่มีการสูญเสียตามรูปที่ 2.1 สายอากาศร่องแต่ละตัวมีความยาว l วางตัวตามแนวแกน y บนพื้นตัวนำขนาดอนันต์อยู่บนระนาบ xy ในตัวกลางชั้นที่ 1 $(\mu_1, \epsilon_1, \sigma_1)$ เป็นระยะ Z_1 และตัวกลางชั้นที่ 2 มีความหนาอนันต์ $(\mu_2, \epsilon_2, \sigma_2)$ และป้อนสัญญาณจากตัวกำเนิดสัญญาณเข้าไปยังตำแหน่ง (x_1, y_1) ตรงกลางของสายอากาศแบบร่องตัวที่ 1 เพื่อใช้ส่งคลื่น แล้วรับสัญญาณคลื่นที่ตำแหน่ง (x_2, y_2) ตรงกลางร่องที่เป็นสายอากาศตัวที่ 2 กำหนดให้ความกว้างของร่องสายอากาศแคบมากๆ เข้าใกล้ศูนย์ มีผลให้แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก (Magnetic Current Source) ที่ปากของสายอากาศร่องมีการกระจายตัวแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก $(\vec{M}(x, y))$ บนปากของสายอากาศเป็นฟังก์ชันโคไซน์

ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กบริเวณปากของสายอากาศร่องที่ 1 เป็นฟังก์ชัน โคไซน์ ดังนี้

$$\vec{M}(x, y) = \hat{a}_y \begin{cases} \frac{M_0 \cos(k_1(l - |y - y_1|))\delta(x - x_1)}{\cos(k_1 l)}, & |y - y_1| \leq \frac{l}{2} \\ 0, & |y - y_1| > \frac{l}{2} \end{cases} \quad (2.2)$$

โดย M_0 เป็นขนาดของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

k_1 เป็นค่าคงตัวเฟส

เอกสาร $\delta(x - x_1)$ เป็นฟังก์ชันไดเรคต์เดลต้า งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสนามใกล้ปากสายอากาศส่องไม่ได้เป็นคลื่นระนาบ ดังนั้นจะใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมแปลงรูปแบบสมการคลื่นที่อยู่ใกล้นี้ให้เป็นคลื่นระนาบ ซึ่งทำได้โดยการแปลงความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กบนปากสายอากาศส่องให้เป็นแผ่นกระแสแม่เหล็ก โดยการใส่รูปแบบฟูรีเยร์สองมิติ

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{M}(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.3)$$

โดย k_x, k_y คือ เวกเตอร์ของการแพร่กระจายในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ส่วน $\bar{M}(x, y)$ เป็นฟังก์ชัน x และ y คือ

$$\bar{M}(x, y) = M(y) \delta(x) \hat{a}_y \quad (2.4)$$

เมื่อแทนสมการ (2.4) ลงในสมการ (2.3) จะได้

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{-jk_x x} dx \int_{-\infty}^{\infty} M(y) e^{-jk_y y} dy \quad (2.5)$$

จากคุณสมบัติของฟังก์ชันเดลต้า กำหนดให้ $f(x) = e^{-jk_x x}$ จะได้ว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_1) f(x) dx = e^{-jk_x x_1} \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) สามารถจัดรูปสมการ (2.5) ได้ใหม่เป็น

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = e^{-jk_x x_1} \hat{a}_y \int_{-\infty}^{\infty} M(y) e^{-jk_y y} dy \quad (2.7)$$

จากเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการ (2.2) ถ้ากำหนด $M_0 = 1$ จะเปลี่ยนสมการ (2.7) ได้เป็น

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = e^{-jk_x x_1} \hat{a}_y \int_{y_1 - \frac{l}{2}}^{y_1 + \frac{l}{2}} \frac{\cos(k_1(l - |y - y_1|))}{\cos(k_1 l)} e^{-jk_y y} dy \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการอินทิเกรตจะได้

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \frac{2e^{-j(k_x x_1 + k_y y_1)}}{\cos(k_1 l)} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right] \quad (2.8ก)$$

ใช้หลักการสมมูลย์ของฮอยเกน เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่อยู่ในรูปโดเมนเชิงสเปกตรัม

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = -2\hat{n} \times \tilde{E}(k_x, k_y) \quad (2.9)$$

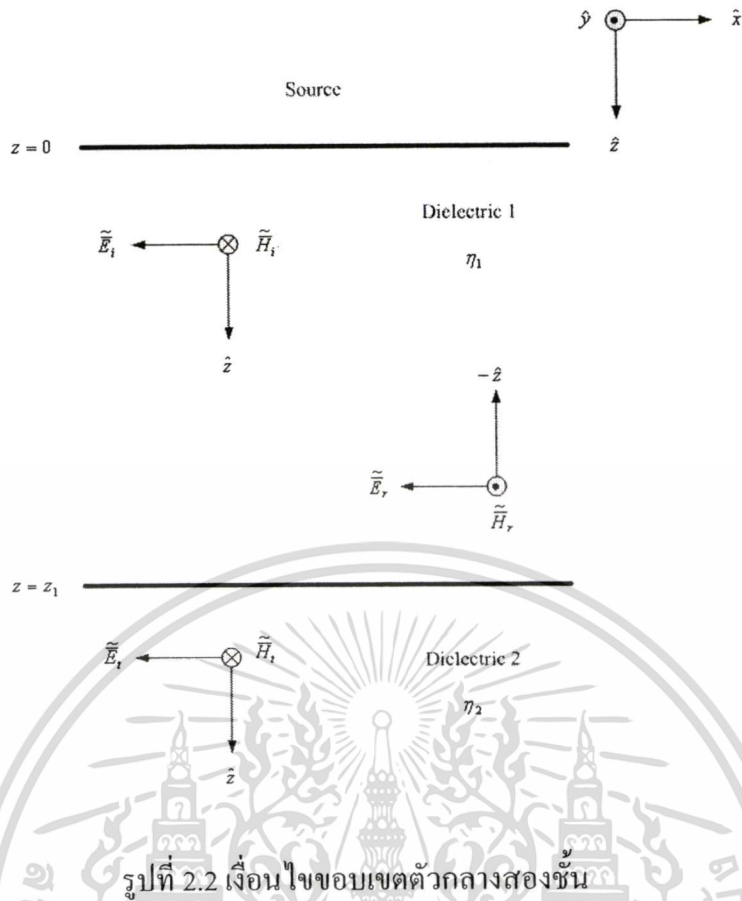
โดย \hat{n} คือ เวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วยในทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกับแนวแกน z จากสมการ (2.9) สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าทางโดเมนเชิงสเปกตรัมได้เป็น

$$\tilde{E}(k_x, k_y) = -\hat{a}_x \frac{e^{-j(k_x x_1 + k_y y_1)}}{\cos(k_1 l)} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right] \quad (2.10)$$

สมการ (2.10) นี้เป็นสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในโดเมนเชิงสเปกตรัมของสายอากาศร่องทั้งสอง

2.3 เงื่อนไขขอบเขตของตัวกลางสองชั้น

ต่อไปพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตของตัวกลางสองชั้น ตามรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ที่ตำแหน่ง $Z = 0$ ในอวกาศว่าง แพร่กระจายคลื่นตกกระทบบนรอยต่อของอวกาศว่างกับตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดอนันต์ กำหนดระยะห่างเป็น Z_1 โดยมีคลื่นที่ส่งผ่านและสะท้อนกลับตรงบริเวณรอยต่อทำการพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวเพื่อหาสัมประสิทธิ์การตกกระทบบ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน



รูปที่ 2.2 เส้นใยขอบเขตตัวกลางสองชั้น

\vec{E}_i, \vec{H}_i คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบ

\vec{E}_r, \vec{H}_r คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สะท้อน

\vec{E}_t, \vec{H}_t คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ส่งผ่าน

โดยที่

$$\vec{E}_i = -Ie^{-\gamma z} \hat{a}_x \quad (2.11ก)$$

$$\vec{E}_r = -Re^{\gamma z} \hat{a}_x \quad (2.11ข)$$

$$\vec{E}_t = -Te^{-\gamma z} \hat{a}_x \quad (2.11ค)$$

$$\vec{H}_i = -\frac{I}{\eta_1} e^{-\gamma z} \hat{a}_y \quad (2.12ก)$$

$$\vec{H}_r = \frac{R}{\eta_1} e^{\gamma z} \hat{a}_y \quad (2.12ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{H}_i = -\frac{T}{\eta_2} e^{-\gamma z} \hat{a}_y \quad (2.12ค)$$

โดย I คือสัมประสิทธิ์การตกกระทบ

R คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน

T คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

เมื่อ γ เป็นค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ $\alpha + j\beta$ ซึ่ง α คือค่าคงตัวการลดทอน และ β คือค่าคงตัวเฟส โดยหาได้จาก

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_1 \omega} \right)^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_1 \omega} \right)^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

จากหลักการความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อแนวสัมผัสขอบเขตในโดเมนเชิงสเปกตรัมที่ $Z = 0$ จะเท่ากับสนามไฟฟ้าจากความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก ดังนั้นจึงทำให้เกิดความสัมพันธ์

$$\tilde{E}_i + \tilde{E}_r = \tilde{E} \quad (2.13)$$

แทนสมการ (2.11ก) และ (2.11ข) ลงในสมการ (2.13) จะได้

$$-I - Re^{-\gamma z_1} = \tilde{E} \quad (2.13ก)$$

เงื่อนไขขอบเขตของสนามที่ต่อเนื่องตรงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองที่ระยะ $Z = Z_1$ จะได้ว่า

$$\tilde{E}_i + \tilde{E}_r = \tilde{E} \quad (2.14)$$

แทนสมการ (2.11ก), (2.11ข) และ (2.11ค) ลงในสมการ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-Ie^{-\gamma z_1} - R = -Te^{-\gamma z_1} \quad (2.14ก)$$

และสุดท้ายจะได้พิจารณาสมการแม่เหล็กที่ต่อเนื่องบริเวณรอยต่อ

$$\tilde{H}_i + \tilde{H}_r = \tilde{H}_t \quad (2.15)$$

แทนสมการ (2.12ก), (2.12ข) และ (2.13ค) ลงในสมการ (2.15) จะได้

$$-\frac{I}{\eta_1} e^{-\gamma z_1} + \frac{R}{\eta_1} = -\frac{T}{\eta_2} e^{-\gamma z_1} \quad (2.15ก)$$

ดังนั้นเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการดังนี้
สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $Z = 0$

$$-I - R e^{-\gamma z_1} = \tilde{E} \quad (2.16)$$

สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $Z = Z_1$

$$-I e^{-\gamma z_1} - R + T e^{-\gamma z_1} = 0 \quad (2.17)$$

สนามแม่เหล็กที่ต่อเนื่อง ณ ขอบเขตรอยต่อ

$$-\frac{I}{\eta_1} e^{-\gamma z_1} + \frac{R}{\eta_1} + \frac{T}{\eta_2} e^{-\gamma z_1} = 0 \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.16), (2.17) และ (2.18) สามารถจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} -1 & -e^{-\gamma z_1} & 0 \\ -e^{-\gamma z_1} & -1 & e^{-\gamma z_1} \\ -e^{-\gamma z_1} & \frac{1}{\eta_1} & \frac{e^{-\gamma z_1}}{\eta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ R \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{E} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

ดังนั้นจะได้ สัมประสิทธิ์การตกกระทบ (I) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (R) สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T)

เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{-(\eta_1 + \eta_2)e^{2\gamma_1} \tilde{\tilde{E}}}{(\eta_1 + \eta_2)e^{2\gamma_1} - (\eta_1 - \eta_2)} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{(\eta_1 - \eta_2)e^{\gamma_1} \tilde{\tilde{E}}}{(\eta_1 + \eta_2)e^{2\gamma_1} - (\eta_1 - \eta_2)} \quad (2.21)$$

$$T = \frac{-2\eta_1 e^{2\gamma_1} \tilde{\tilde{E}}}{(\eta_1 + \eta_2)e^{2\gamma_1} - (\eta_1 - \eta_2)} \quad (2.22)$$

2.4 วิธีการเฟสคงที่

จากการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตกกระทบ การสะท้อน และการส่งผ่านหลังจากนั้นทำการเปลี่ยนค่าสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงสเปกตรัมให้เป็นค่าสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงพิกัดได้โดยการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบสองมิติ จึงจะสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าและค่าสนามแม่เหล็กในโดเมนเชิงพิกัด ณ ตำแหน่งใดๆ ได้ ดังต่อไปนี้

2.4.1 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1

การหาค่าสนามไฟฟ้าทำได้โดยนำสมการ (2.10), (2.11ก) และ (2.20) แทนลงในสมการ (2.23)

$$\bar{E}_i(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\tilde{E}}_i(k_x, k_y, z) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2.23)$$

จัดรูปเพื่อแปลงโดเมนเชิงสเปกตรัม ไปเป็น โดเมนเชิงพิกัด โดยวิธีการแปลงฟูริเยร์ผกผัน

$$\bar{E}_i(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\tilde{E}}_i(k_x, k_y) e^{j(k_x(x-x_1) + k_y(y-y_1) - k_z z)} dk_x dk_y \quad (2.24)$$

โดยที่

$$\tilde{\tilde{E}}_i(k_x, k_y) = \frac{(\eta_1 + \eta_2)e^{2\gamma_1}}{\cos(k_1 l) ((\eta_1 + \eta_2)e^{2\gamma_1} - (\eta_1 - \eta_2))} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -\frac{1}{(\eta_1^2 - \eta_2^2) \cos(k_1 l)} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right]$$

จากสมการ (2.24) การแก้อินทิเกรตโดยตรงในการแปลงฟูรีเยร์ผกผันทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้นำวิธีการเฟสคงที่ (Stationary phase) [10]-[11] ที่เป็นวิธีการของการหาค่าเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic evaluation) ของสนามที่แผ่ออกจากปีกทรงสายอากาศเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา ซึ่งเงื่อนไขของวิธีนี้ต้องคำนวณในบริเวณที่ r ของคลื่นตกกระทบที่สายอากาศร่องที่ 1 มีค่ามากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น นั่นคือ $k \cdot r$ มีค่ามากเข้าใกล้อนันต์จึงจะมีความแม่นยำ แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ ดังนั้นจึงต้องหาจุดที่มีค่าคงที่ (Stationary point) ที่คำตอบค่าสนามไม่มีการเปลี่ยนแปลงและมีระยะไกลพอที่ยอมรับได้ ซึ่งคำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปแบบประมาณค่า ด้วยเหตุนี้รูปแบบการพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นจึงอยู่ที่บริเวณสนามระยะไกลซึ่งก็คือคลื่นระนาบที่เป็นหลักการเดียวกับการหาสนามด้วยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม จากสมการ (2.24) จัดให้อยู่ในรูป

$$\bar{E}_{I_1}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\tilde{E}}_i(k_x, k_y) e^{jk \cdot \bar{r}_{I_1}} dk_x dk_y \quad (2.25)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \bar{\tilde{E}}_i(k_x, k_y) &= E_{xi}(k_x, k_y) \hat{a}_x + E_{yi}(k_x, k_y) \hat{a}_y + E_{zi}(k_x, k_y) \hat{a}_z \\ \bar{k} &= k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z \text{ และ } \bar{r}_{I_1} = (x - x_1) \hat{a}_x + (y - y_1) \hat{a}_y - z \hat{a}_z \\ \bar{k} \cdot \bar{r}_{I_1} &= k_x(x - x_1) + k_y(y - y_1) - k_z z \end{aligned}$$

จากสมการ (2.25) หาจุดคงที่ของ $k \cdot r_{I_1}$

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{I_1} = (k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y - k_z \hat{a}_z) \cdot r_{I_1} \hat{a}_r \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.26) เมื่อแปลงพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากไปเป็นพิกัดทรงกลมจะได้

$$\begin{aligned} \bar{k} \cdot \bar{r}_{I_1} &= (k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y - k_z \hat{a}_z) \cdot r_{I_1} \hat{a}_r \\ &= k_x r_{I_1} \sin \theta \cos \phi + k_y r_{I_1} \sin \theta \sin \phi - k_z r_{I_1} \cos \theta \\ &= r_{I_1} (k_x \sin \theta \cos \phi + k_y \sin \theta \sin \phi - k_z \cos \theta) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับหน่วยงานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= r_{l_1} \left(k_x \sin \theta \cos \phi + k_y \sin \theta \sin \phi - \sqrt{k_1^2 - k_x^2 - k_y^2} \cos \theta \right) \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} r_{l_1} &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2} \\ (x - x_1) &= r_{l_1} \sin \theta \cos \phi \\ (y - y_1) &= r_{l_1} \sin \theta \sin \phi \\ z &= r_{l_1} \cos \theta \end{aligned}$$

จุดคงที่สามารถหาได้โดย

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{l_1})}{\partial k_x} = 0 \quad (2.28ก)$$

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{l_1})}{\partial k_y} = 0 \quad (2.28ข)$$

ใช้สมการ (2.27) และค่าคงตัวการแพร่กระจาย ($k_z^2 = k_1^2 - (k_x^2 + k_y^2)$) ซึ่ง $k_1 = (\omega \sqrt{\mu_1 \epsilon_1})$ กับสมการ (2.28ก) และ (2.28ข) จัดรูปจะได้

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{l_1})}{\partial k_x} = r_{l_1} \left(\sin \theta \cos \phi + \frac{k_x}{k_z} \cos \theta \right) = 0 \quad (2.29ก)$$

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{l_1})}{\partial k_y} = r_{l_1} \left(\sin \theta \sin \phi + \frac{k_y}{k_z} \cos \theta \right) = 0 \quad (2.29ข)$$

ทำให้ได้

$$k_x = -k_z \frac{\sin \theta \cos \phi}{\cos \theta} \quad (2.30ก)$$

$$k_y = -k_z \frac{\sin \theta \sin \phi}{\cos \theta} \quad (2.30ข)$$

ใช้สมการ (2.30ก) และ (2.30ข) จัดรูปกับค่าคงตัวการแพร่กระจายจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_1^2 = k_z^2 + k_x^2 + k_y^2 = k_z^2 \left(1 + \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} \right) \quad (2.31)$$

ทำให้ k_z ลดรูปได้เป็น

$$k_z = k_1 \cos \theta \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.32) ทำให้สามารถจัดรูปสมการ (2.30ก) และ (2.30ข) ให้ง่ายขึ้นได้ดังนี้

$$k_x = -k_1 \sin \theta \cos \phi = k_{01} \quad (2.33ก)$$

$$k_y = -k_1 \sin \theta \sin \phi = k_{02} \quad (2.33ข)$$

ฟังก์ชัน $\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1}$ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปอนุกรมเทเลอร์ ซึ่งจุดคงที่มีค่า k_{01} และ k_{02} จะถูกจัดให้อยู่ในเทอมลำดับศูนย์ หนึ่ง และสอง ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1} &\cong \bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1} \Big|_{k_{01}, k_{02}} + \frac{\partial(\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_x} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_x - k_{01}) + \frac{\partial(\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_y} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_y - k_{02}) \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_x^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_x - k_{01})^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_y^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_y - k_{02})^2 \\ &+ \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_x \partial k_y} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_x - k_{01})(k_y - k_{02}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

ดังนั้นเทอมที่ 2 และ 3 จะหายไป โดยที่จุดคงที่ คือ $k_x = k_{01}$ และ $k_y = k_{02}$ จากสมการ (2.34) สามารถจัดใหม่ให้อยู่ในรูป

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1} = \bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1} \Big|_{k_{01}, k_{02}} + Au^2 + Bv^2 + Cuv \quad (2.35)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_x^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}}$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_y^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}}$$

$$C = \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_x \partial k_y} \Big|_{k_{01}, k_{02}}$$

$$u = (k_x - k_{01})$$

$$v = (k_y - k_{02})$$

ใช้สมการ (2.32) – (2.33) จัดรูปสมการ (2.26) จะได้

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = -k_1 r_{l_1} \quad (2.36)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถทำการหาค่า A , B และ C ได้โดยการใช้สมการ (2.27)

$$A = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_x^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = \frac{r_{l_1}}{2k_1} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{\cos^2 \theta} \right) \quad (2.37ก)$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_y^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = \frac{r_{l_1}}{2k_1} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{\cos^2 \theta} \right) \quad (2.37ข)$$

$$C = \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_1})}{\partial k_x \partial k_y} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = \frac{r_{l_1}}{k_1} \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} \cos \phi \sin \phi \quad (2.37ค)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.25) สามารถประมาณค่าคำตอบรอบจุดคงที่ $k_x = k_{01}$ และ $k_y = k_{02}$ ภายในเครื่องหมายอินทิเกรตได้เป็น

$$\bar{E}_{l_1}(x, y, z) \cong \frac{1}{4\pi^2} \iint_{S_{1,2}} \bar{E}_i(k_x = k_{01}, k_y = k_{02}) e^{j(-k_1 r_{l_1} + Au^2 + Bv^2 + Cuv)} dudv \quad (2.38)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}_{i_1}(x, y, z) \cong \frac{1}{4\pi^2} \tilde{\bar{E}}_i(k_{01}, k_{02}) e^{-jk_1 r_{i_1}} \iint_{S_{1,2}} e^{j(Au^2 + Bv^2 + Cuv)} dudv \quad (2.38ก)$$

ที่ $S_{1,2}$ คือ พื้นผิวที่อยู่บริเวณใกล้จุดคงที่

สมการอินทิเกรต (2.38ก) นี้สามารถหาค่าได้โดยการใช้วิธีการเฟสคงที่ ซึ่งมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\iint_{S_{1,2}} e^{j(Au^2 + Bv^2 + Cuv)} dudv = j \frac{2\pi\delta}{\sqrt{|4AB - C^2|}} \quad (2.39)$$

$$\delta = \begin{cases} +1 & \text{if } 4AB > C^2 \text{ and } A > 0 \\ -1 & \text{if } 4AB > C^2 \text{ and } A < 0 \\ -j & \text{if } 4AB < C^2 \end{cases} \quad (2.39ก)$$

ใช้สมการ (2.37ก) – (2.37ค) ช่วยในการพิจารณาหาแฟกเตอร์ $4AB - C^2$ จะได้

$$4AB - C^2 = \left(\frac{r_{i_1}}{k_1 \cos \theta} \right)^2 \quad (2.40)$$

เนื่องจาก $4AB > C^2$ และ $A > 0$ จากสมการ (2.38) ทำให้ได้สมการใหม่เป็น

$$\iint_{S_{1,2}} e^{j(Au^2 + Bv^2 + Cuv)} dudv = j \frac{2\pi k_1}{r_{i_1}} \cos \theta \quad (2.41)$$

และ จากสมการ (2.38ก) ทำให้ได้

$$\bar{E}_{i_1}(r, \theta, \phi) \cong j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{i_1}}}{2\pi r_{i_1}} \left[\cos \theta \tilde{\bar{E}}_i(k_{01} = -k_1 \sin \theta \cos \phi, k_{02} = -k_1 \sin \theta \sin \phi) \right] \quad (2.42)$$

ที่บริเวณสนามระยะไกลจะมีเฉพาะองค์ประกอบ θ และ ϕ ของสนามเท่านั้น เมื่อ r มีค่ามากๆ (ลักษณะเป็นระนาบ) ดังนั้นจากสมการ (2.42) องค์ประกอบ E_θ และ E_ϕ สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของ E_{x_i} และ E_{y_i} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของคลื่นตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{E}_i = E_{x_{i_1}} \hat{a}_x + E_{y_{i_1}} \hat{a}_y + E_{z_{i_1}} \hat{a}_z \quad (2.43)$$

ซึ่ง $E_{z_{i_1}}$ มีที่มาจากสมการคลื่นเวกเตอร์

$$\nabla \cdot \vec{E}_i(x, y, z) = \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \vec{E}_i(k_x, k_y) e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{i_1}} dk_x dk_y \right\} = 0 \quad (2.44)$$

จากคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่ว่า $\nabla \cdot (\alpha \vec{A}) = \alpha \nabla \cdot \vec{A} + \vec{A} \cdot \nabla \alpha$ ทำให้ลดรูปสมการ (2.44) ได้เป็น

$$\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \left[\vec{E}_i \cdot \nabla (e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{i_1}}) \right] dk_x dk_y = 0 \quad (2.45)$$

เนื่องจาก $\nabla \cdot \vec{E}_i(k_x, k_y) = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\vec{E}_i \cdot \nabla e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{i_1}} = j \vec{E}_i \cdot \vec{k} e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{i_1}} = 0 \quad (2.46)$$

หรือ

$$\vec{E}_i \cdot \vec{k} = (E_{x_{i_1}} \hat{a}_x + E_{y_{i_1}} \hat{a}_y + E_{z_{i_1}} \hat{a}_z) \cdot (k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z) = 0 \quad (2.46ก)$$

$$k_x E_{x_{i_1}} + k_y E_{y_{i_1}} + k_z E_{z_{i_1}} = 0 \quad (2.46ข)$$

$$E_{z_{i_1}} = - \frac{(E_{x_{i_1}} k_x + E_{y_{i_1}} k_y)}{k_z} \quad (2.46ค)$$

จากสมการ (2.46ค) จะได้ \vec{E}_i ที่เป็นองค์ประกอบของคลื่นตกกระทบคือ

$$\vec{E}_i = E_{x_{i_1}} \hat{a}_x + E_{y_{i_1}} \hat{a}_y + E_{z_{i_1}} \hat{a}_z = \left[E_{x_{i_1}} \hat{a}_x + E_{y_{i_1}} \hat{a}_y - \frac{(E_{x_{i_1}} k_x + E_{y_{i_1}} k_y)}{k_z} \hat{a}_z \right] \quad (2.47)$$

ที่จุดคงที่ $(k_x = k_{01} = -k_1 \sin \theta \cos \phi, k_y = k_{02} = -k_1 \sin \theta \sin \phi, k_z = k_1 \cos \theta)$ ทำให้เขียนสมการ (2.47) ได้ใหม่เป็น

$$\vec{E}_i(k_1, k_2) = \left[E_{x_{i_1}} \hat{a}_x + E_{y_{i_1}} \hat{a}_y + \frac{\sin \theta}{\cos \theta} (E_{x_{i_1}} \cos \phi + E_{y_{i_1}} \sin \phi) \hat{a}_z \right] \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของสนามไฟฟ้าคลื่นตกกระทบไปเป็นพิกัดทรงกลมของสนามไฟฟ้าคลื่นตกกระทบจะต้องประกอบ θ และ ϕ ดังนี้

$$\begin{aligned} E_\theta &= E_{x_i} \cos \theta \cos \phi + E_{y_i} \cos \theta \sin \phi - E_{z_i} \sin \theta \\ &= \frac{E_{x_i} \cos \phi (1 - 2 \sin^2 \theta) + E_{y_i} \sin \phi (1 - 2 \sin^2 \theta)}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (2.49ก)$$

$$E_\phi = -E_{x_i} \sin \phi + E_{y_i} \cos \phi \quad (2.49ข)$$

สนามไฟฟ้าของสมการ (2.42) สามารถลดรูปลงโดยมีองค์ประกอบ θ และ ϕ ดังนี้

$$\bar{E}_{I_1}(r, \theta, \phi) = j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_1}}{2\pi r_1} [E_\theta \hat{a}_\theta + E_\phi \hat{a}_\phi] \cos \theta \quad (2.50)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 คือ

$$\bar{E}_{I_1}(r, \theta, \phi) = j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_1}}{2\pi r_1} [(E_{x_i} \cos \phi (1 - 2 \sin^2 \theta) + E_{y_i} \sin \phi (1 - 2 \sin^2 \theta)) \hat{a}_\theta + \cos \theta (E_{y_i} \cos \phi - E_{x_i} \sin \phi) \hat{a}_\phi] \quad (2.51)$$

ต่อไปเป็นการหาค่าสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 ตามสมการ (2.52)

$$\bar{H}_{I_1}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} [\hat{a}_r \times \bar{E}_{I_1}(r, \theta, \phi)] \quad (2.52)$$

จากสมการ (2.52) จัดรูปใหม่จะได้

$$\bar{H}_{I_1}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_1}}{2\pi r_1} [(E_{x_i} \cos \phi (1 - 2 \sin^2 \theta) + E_{y_i} \sin \phi (1 - 2 \sin^2 \theta)) \hat{a}_\phi - \cos \theta (E_{y_i} \cos \phi - E_{x_i} \sin \phi) \hat{a}_\theta] \right] \quad (2.53)$$

จาก $\bar{E}_i(k_x, k_y) = E_{x_i}(k_x, k_y) \hat{a}_x + E_{y_i}(k_x, k_y) \hat{a}_y + E_{z_i}(k_x, k_y) \hat{a}_z$ พิจารณาการแปลงฟูริเยร์ทำให้ได้
องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงสเปกตรัมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{x_i}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}_{x_i}(x, y, z=0) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.54ก)$$

$$E_{x_i}(k_x = k_{01}, k_y = k_{02}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}_{x_i}(x, y, z=0) e^{-jk(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dx dy \quad (2.54ข)$$

$$E_{x_i}(k_x = k_{01}, k_y = k_{02}) = -\frac{1}{(\eta_1^2 - \eta_2^2) \cos(k_1 l)}$$

$$\times \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_1 \sin \theta \sin \phi \left(\frac{l}{2}\right)\right) - (k_1 \sin \theta \sin \phi) \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_1 \sin \theta \sin \phi \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_1^2 - k_1^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi} \right] \quad (2.54ค)$$

$$E_{y_i}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}_{y_i}(x, y, z=0) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.55ก)$$

$$E_{y_i}(k_x = k_{01}, k_y = k_{02}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}_{y_i}(x, y, z=0) e^{-jk(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dx dy = 0 \quad (2.55ข)$$

ดังนั้นจะได้ค่าสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 ดังนี้

$$\bar{H}_{I_1}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_1}}{2\pi r_1} \left[(E_{x_i} \cos \theta \sin \phi) \hat{a}_\theta + (E_{x_i} \cos \phi (1 - 2 \sin^2 \theta)) \hat{a}_\phi \right] \right] \quad (2.56)$$

เมื่อแปลงพิกัดทรงกลมของสนามแม่เหล็กคลื่นตกกระทบไปเป็นพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของสนามแม่เหล็กคลื่นตกกระทบ

$$\bar{H}_{I_1}(x, y, z) = H_{x_{I_1}} \hat{a}_x + H_{y_{I_1}} \hat{a}_y + H_{z_{I_1}} \hat{a}_z \quad (2.57)$$

ซึ่งแต่ละองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่คลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{x_1} = H_{r_1} \sin \theta \cos \phi + H_{\theta_1} \cos \theta \cos \phi - H_{\phi_1} \sin \phi = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_1}}{2\pi r_1} E_{x_1} \sin^2 \theta \sin \phi \cos \phi \quad (2.58ก)$$

$$H_{y_1} = H_{r_1} \sin \theta \sin \phi + H_{\theta_1} \cos \theta \sin \phi + H_{\phi_1} \cos \phi = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_1}}{2\pi r_1} E_{x_1} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta \cos^2 \phi) \quad (2.58ข)$$

$$H_{z_1} = H_{r_1} \cos \theta - H_{\theta_1} \sin \theta = -\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_1}}{2\pi r_1} E_{x_1} \sin \theta \sin \phi \cos \theta \quad (2.58ค)$$

โดยที่

$$E_{x_1} = -\frac{1}{(\eta_1^2 - \eta_2^2) \cos(k_1 l)} \times \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_1 \sin \theta_i \sin \phi_i \left(\frac{l}{2}\right)\right) - \left(k_1 \sin \theta_i \sin \phi_i\right) \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_1 \sin \theta_i \sin \phi_i \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_1^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_i \sin^2 \phi_i} \right]$$

$$r_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + z^2}$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + z^2}} \right)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{y-y_1}{x-x_1} \right)$$

2.4.2 ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 2

การหาค่าสนามไฟฟ้าสำหรับคลื่นตกกระทบบริเวณปากช่องสายอากาศที่ใช้รับคลื่นทำได้โดยนำสมการ (2.10), (2.11ก) และ (2.20) แทนลงในสมการ (2.59)

$$\bar{E}_{I_2}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\tilde{E}}_i(k_x, k_y, z) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.59) จัดรูปเพื่อแปลงโดเมนเชิงสเปกตรัมไปเป็นโดเมนเชิงพิกัดโดยวิธีการแปลงฟูรีเยร์ผกผัน

$$\bar{E}_{I_2}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\bar{E}}_i(k_x, k_y) e^{j(k_x(x-(x_2+x_1))+k_y(y-(y_2+y_1))-k_z z)} dk_x dk_y \quad (2.60)$$

โดยที่

$$\tilde{\bar{E}}_i(k_x, k_y) = \frac{(\eta_1 + \eta_2)e^{2z\eta_1}}{\cos(k_1 l)((\eta_1 + \eta_2)e^{2z\eta_1} - (\eta_1 - \eta_2))} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right]$$

$$= -\frac{1}{(\eta_1^2 - \eta_2^2) \cos(k_1 l)} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right]$$

จากสมการ (2.60) อินทิเกรตโดยตรงทำได้ยาก ดังนั้นจึงใช้วิธีการฉายภาพกระจายคลื่นที่สนามระยะไกลโดยที่ $k \cdot r$ มีค่าเข้าใกล้อนันต์ ความหมายคือที่ r ของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2 ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้สนามที่หาได้ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูป

$$\bar{E}_{I_2}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\bar{E}}_i(k_x, k_y) e^{jk \cdot \bar{r}_{I_2}} dk_x dk_y \quad (2.61)$$

โดยที่

$$\tilde{\bar{E}}_i(k_x, k_y) = E_{x_{I_2}}(k_x, k_y) \hat{a}_x + E_{y_{I_2}}(k_x, k_y) \hat{a}_y + E_{z_{I_2}}(k_x, k_y) \hat{a}_z$$

$$\bar{k} = k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z \text{ และ } \bar{r}_{I_2} = (x - (x_2 + x_1)) \hat{a}_x + (y - (y_2 + y_1)) \hat{a}_y - z \hat{a}_z$$

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{I_2} = k_x(x - (x_2 + x_1)) + k_y(y - (y_2 + y_1)) - k_z z$$

ทำการหาจุดค่าคงที่ จากสมการ (2.62)

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{I_2} = (k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y - k_z \hat{a}_z) \cdot r_{I_2} \hat{a}_r \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วแปลงพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากไปเป็นพิกัดทรงกลมจะได้

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{l_2} = r_{l_2} \left(k_x \sin \theta \cos \phi + k_y \sin \theta \sin \phi - \sqrt{k_1^2 - k_x^2 - k_y^2} \cos \theta \right) \quad (2.63)$$

เมื่อ

$$r_{l_2} = \sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + z^2}$$

$$(x - (x_2 + x_1)) = r_{l_2} \sin \theta \cos \phi$$

$$(y - (y_2 + y_1)) = r_{l_2} \sin \theta \sin \phi$$

$$z = r_{l_2} \cos \theta$$

ใช้หลักการหาจุดค่าคงที่และใช้วิธีเฟสคงที่หาค่าสนาม ซึ่งมีวิธีการเหมือนกับการหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหัวข้อ 2.4.1 เพียงแต่เปลี่ยนตำแหน่งจากร่องที่ 1 มาเป็นร่องที่ 2 ดังนั้นจะได้ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2 คือ

$$\bar{E}_{l_2}(r, \theta, \phi) = j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} \left[(E_{x_{l_2}} \cos \phi (1 - 2 \sin^2 \theta)) \hat{a}_\theta + (E_{x_{l_2}} \cos \theta \sin \phi) \hat{a}_\phi \right] \quad (2.64)$$

ทำการแปลงสนามไฟฟ้าในพิกัดทรงกลมไปเป็นพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$\bar{E}_{l_2}(x, y, z) = E_{x_{l_2}} \hat{a}_x + E_{y_{l_2}} \hat{a}_y + E_{z_{l_2}} \hat{a}_z \quad (2.65)$$

ซึ่งแต่ละองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่คลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2 คือ

$$\begin{aligned} E_{x_{l_2}} &= E_{r_{l_2}} \sin \theta \cos \phi + E_{\theta_{l_2}} \cos \theta \cos \phi - E_{\phi_{l_2}} \sin \phi \\ &= j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \cos \theta (\cos^2 \theta \cos^2 \phi - \sin^2 \theta \cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \end{aligned} \quad (2.66ก)$$

$$\begin{aligned} E_{y_{l_2}} &= E_{r_{l_2}} \sin \theta \sin \phi + E_{\theta_{l_2}} \cos \theta \sin \phi + E_{\phi_{l_2}} \cos \phi \\ &= j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \cos \theta \sin \phi \cos \phi (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta + 1) \end{aligned} \quad (2.66ข)$$

$$E_{z_{l_2}} = E_{r_{l_2}} \cos \theta - E_{\theta_{l_2}} \sin \theta = -j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \sin \theta \cos \phi (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2.66ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$E_{x_{i_2}} = -\frac{1}{(\eta_1^2 - \eta_2^2) \cos(k_1 l)}$$

$$\times \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_1 \sin \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2} \left(\frac{l}{2}\right)\right) - (k_1 \sin \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2}) \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_1 \sin \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2} \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_1^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_{i_2} \sin^2 \phi_{i_2}} \right]$$

$$r_{i_2} = \sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + z^2}$$

$$\theta_{i_2} = \cos^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + z^2}} \right)$$

$$\phi_{i_2} = \tan^{-1} \left(\frac{y - (y_2 + y_1)}{x - (x_2 + x_1)} \right)$$

2.4.3 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศทรงที่ 1

การหาค่าสนามไฟฟ้าทำได้โดยนำสมการ (2.10), (2.11ข) และ (2.21) แทนลงในสมการ (2.67)

$$\vec{E}_{R_1}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_r(k_x, k_y, z) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2.67)$$

แล้วจัดรูปเพื่อแปลง โดเมนเชิงสเปกตรัมไปเป็นโดเมนเชิงพิกัด โดยวิธีการแปลงฟูรีเยร์ผกผัน

$$\vec{E}_{R_1}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_r(k_x, k_y) e^{j(k_x(x-x_1) + k_y(y-y_1) + k_z(z-z_1))} dk_x dk_y \quad (2.68)$$

โดยที่

$$\vec{E}_r(k_x, k_y) = -\frac{(\eta_1 - \eta_2) e^{-jk_z z_1}}{\cos(k_1 l) ((\eta_1 + \eta_2) e^{jk_z 2z_1} - (\eta_1 - \eta_2))} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{(\eta_1 + \eta_2)^2 \cos(k_1 l)} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right]$$

จากสมการ (2.68) อินทิเกรตโดยตรงทำได้ยาก ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับกรณีหาสนามในคลื่นตกกระทบ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นที่สนามระยะไกลโดยที่ r ของคลื่นสะท้อนที่สายอากาศร่องที่ 1 ต้องมีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้สนามที่หาได้เปลี่ยนแปลงหรือก็คือ $k \cdot r$ เข้าใกล้อนันต์ ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูป

$$\bar{E}_{R_1}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}_r(k_x, k_y) e^{j\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1}} dk_x dk_y \quad (2.69)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \bar{E}_r(k_x, k_y) &= E_{x\eta_1}(k_x, k_y) \hat{a}_x + E_{y\eta_1}(k_x, k_y) \hat{a}_y + E_{z\eta_1}(k_x, k_y) \hat{a}_z \\ \bar{k} &= k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z \text{ และ } \bar{r}_{R_1} = (x - x_1) \hat{a}_x + (y - y_1) \hat{a}_y + (z - z_1) \hat{a}_z \\ \bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} &= k_x(x - x_1) + k_y(y - y_1) + k_z(z - z_1) \end{aligned}$$

จากสมการ (2.69) หาจุดค่าคงที่ ของ $k \cdot r_{R_1}$

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} = (k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z) \cdot r_{R_1} \hat{a}_r \quad (2.70)$$

จากสมการ (2.70) ทำการแปลงพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากไปเป็นพิกัดทรงกลมจะได้

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} = r_{R_1} \left(k_x \sin \theta \cos \phi + k_y \sin \theta \sin \phi + \sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2} \cos \theta \right) \quad (2.71)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} r_{R_1} &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ (x - x_1) &= r_{R_1} \sin \theta \cos \phi \\ (y - y_1) &= r_{R_1} \sin \theta \sin \phi \\ (z - z_1) &= r_{R_1} \cos \theta \end{aligned}$$

จุดคงที่ หาได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1})}{\partial k_x} = 0 \quad (2.72ก)$$

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1})}{\partial k_y} = 0 \quad (2.72ข)$$

ใช้สมการ (2.71) และค่าคงตัวการแพร่กระจาย ($k_z^2 = k_1^2 - (k_x^2 + k_y^2)$) ซึ่ง $k_1 = (\omega\sqrt{\mu_1\epsilon_1})$ กับสมการ(2.72ก) และ (2.72ข) จัดรูปจะได้

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1})}{\partial k_x} = r_{R_1} \left(\sin \theta \cos \phi - \frac{k_x}{k_z} \cos \theta \right) = 0 \quad (2.73ก)$$

$$\frac{\partial(\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1})}{\partial k_y} = r_{R_1} \left(\sin \theta \sin \phi - \frac{k_y}{k_z} \cos \theta \right) = 0 \quad (2.73ข)$$

ทำให้ได้

$$k_x = k_z \frac{\sin \theta \cos \phi}{\cos \theta} \quad (2.74ก)$$

$$k_y = k_z \frac{\sin \theta \sin \phi}{\cos \theta} \quad (2.74ข)$$

ใช้สมการ (2.74ก) และ (2.74ข) จัดรูปกับค่าคงตัวการแพร่กระจายจะได้

$$k_1^2 = k_z^2 + k_x^2 + k_y^2 = k_z^2 \left(1 + \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} \right)$$

นั่นคือ $k_z = k_1 \cos \theta$ จัดรูปให้ง่ายขึ้นจะได้

$$k_x = k_1 \sin \theta \cos \phi = k_{01} \quad (2.75ก)$$

$$k_y = k_1 \sin \theta \sin \phi = k_{02} \quad (2.75ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชัน $\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1}$ สามารถกระจายได้โดยใช้ อนุกรมเทเลอร์

$$\begin{aligned} \bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} &\cong \bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} \Big|_{k_{01}, k_{02}} + \frac{\partial(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_x} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_x - k_{01}) + \frac{\partial(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_y} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_y - k_{02}) \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_x^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_x - k_{01})^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_y^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} (k_y - k_{02})^2 \\ &+ \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_x \partial k_y} \Big|_{k_1, k_2} (k_x - k_{01})(k_y - k_{02}) \end{aligned} \quad (2.76)$$

ดังนั้นเทอมที่ 2 และ 3 จะหายไป โดยที่จุดคงที่ คือ $k_x = k_{01}$ และ $k_y = k_{02}$ จากสมการ (2.76) จัดรูปใหม่ จะได้

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} = \bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} \Big|_{k_1, k_2} + Au^2 + Bv^2 + Cuv \quad (2.77)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_x^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} \\ B &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_y^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} \\ C &= \frac{\partial^2(\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_x \partial k_y} \Big|_{k_{01}, k_{02}} \\ u &= (k_x - k_{01}) \\ v &= (k_y - k_{02}) \end{aligned}$$

ใช้สมการ (2.75ก) และ (2.75ข) จัดรูปสมการ (2.70) ทำให้ได้

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = k_1 r_{R_1} \quad (2.78)$$

สามารถทำการหาค่า A , B และ C ได้โดยการใช้สมการ (2.71)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_x^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = -\frac{r_{R_1}}{2k_1} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{\cos^2 \theta} \right) \quad (2.79ก)$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_y^2} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = -\frac{r_{R_1}}{2k_1} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{\cos^2 \theta} \right) \quad (2.79ข)$$

$$C = \frac{\partial^2 (\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_1})}{\partial k_x \partial k_y} \Big|_{k_{01}, k_{02}} = -\frac{r_{R_1}}{k_1} \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} \cos \phi \sin \phi \quad (2.79ค)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.69) สามารถประมาณคำตอบบริเวณรอบจุดคงที่ $k_x = k_{01}$ และ $k_y = k_{02}$ ภายในเครื่องหมายอินทิเกรตได้เป็น

$$\bar{E}_{R_1}(x, y, z) \cong \frac{1}{4\pi^2} \iint_{S_{1,2}} \bar{E}_r(k_x = k_{01}, k_y = k_{02}) e^{j(k_x r_{R_1} + Au^2 + Bv^2 + Cuv)} dudv \quad (2.80)$$

หรือ

$$\bar{E}_{R_1}(x, y, z) \cong \frac{1}{4\pi^2} \bar{E}_r(k_{01}, k_{02}) e^{jk_x r_{R_1}} \iint_{S_{1,2}} e^{j(Au^2 + Bv^2 + Cuv)} dudv \quad (2.80ก)$$

ที่ $S_{1,2}$ คือ บริเวณพื้นผิวที่อยู่ใกล้จุดคงที่

ใช้วิธีการของเฟสคงที่หาค่าสนามไฟฟ้าตามเงื่อนไขสมการ (2.39)-(2.40) ซึ่งตรงกับเงื่อนไข $4AB > C^2$ และ $A < 0$ นั่นคือ $\delta = -1$ จากสมการ (2.80) ทำให้ได้คำตอบสมการเป็น

$$\iint_{S_{1,2}} e^{j(Au^2 + Bv^2 + Cuv)} dudv = -j \frac{2\pi k_1}{r_{R_1}} \cos \theta \quad (2.81)$$

และจากสมการ (2.80ก) ทำให้ได้

$$\bar{E}_{R_1}(r, \theta, \phi) = -j \frac{k_0 e^{jk_x r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} \left[\cos \theta \bar{E}_r(k_{01} = k_1 \sin \theta \cos \phi, k_{02} = k_1 \sin \theta \sin \phi) \right] \quad (2.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บริเวณสนามระยะไกลจะมีเฉพาะองค์ประกอบ θ และ ϕ ของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เมื่อ r มีค่ามากๆ (ลักษณะเป็นระนาบ) ดังนั้นสามารถหาค่าองค์ประกอบสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนได้ดังนี้

$$\vec{E}_r = E_{x_{r1}} \hat{a}_x + E_{y_{r1}} \hat{a}_y + E_{z_{r1}} \hat{a}_z \quad (2.83)$$

ซึ่ง $E_{z_{r1}}$ หาได้จากสมการคลื่นเวกเตอร์

$$\nabla \cdot \vec{E}_{R_1}(x, y, z) = \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \vec{E}_r(k_x, k_y) e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1}} dk_x dk_y \right\} = 0 \quad (2.84)$$

จากคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่ $\nabla \cdot (\alpha \vec{A}) = \alpha \nabla \cdot \vec{A} + \vec{A} \cdot \nabla \alpha$ ทำให้จัดรูปสมการ (2.84) ได้ดังนี้

$$\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \left[\vec{E}_r \cdot \nabla (e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1}}) \right] dk_x dk_y = 0 \quad (2.85)$$

เนื่องจาก $\nabla \cdot \vec{E}_r(k_x, k_y) = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\vec{E}_r \cdot \nabla e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1}} = j \vec{E}_r \cdot \vec{k} e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_1}} = 0 \quad (2.86)$$

หรือ

$$\vec{E}_r \cdot \vec{k} = (E_{x_{r1}} \hat{a}_x + E_{y_{r1}} \hat{a}_y + E_{z_{r1}} \hat{a}_z) \cdot (k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z) = 0 \quad (2.86ก)$$

$$k_x E_{x_{r1}} + k_y E_{y_{r1}} + k_z E_{z_{r1}} = 0 \quad (2.86ข)$$

$$E_{z_{r1}} = - \frac{(E_{x_{r1}} k_x + E_{y_{r1}} k_y)}{k_z} \quad (2.86ค)$$

จากสมการ (2.86ค) จะได้ \vec{E}_r ที่เป็นองค์ประกอบของคลื่นสะท้อน คือ

$$\vec{E}_r = E_{x_{r1}} \hat{a}_x + E_{y_{r1}} \hat{a}_y + E_{z_{r1}} \hat{a}_z = \left[E_{x_{r1}} \hat{a}_x + E_{y_{r1}} \hat{a}_y - \frac{(E_{x_{r1}} k_x + E_{y_{r1}} k_y)}{k_z} \hat{a}_z \right] \quad (2.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดคงที่ ($k_x = k_{01} = k_1 \sin \theta \cos \phi, k_y = k_{02} = k_1 \sin \theta \sin \phi, k_z = k_1 \cos \theta$) สามารถเขียนสมการ (2.87) ได้ใหม่เป็น

$$\vec{E}_r(k_1, k_2) = \left[E_{x_{r_1}} \hat{a}_x + E_{y_{r_1}} \hat{a}_y - \frac{\sin \theta}{\cos \theta} (E_{x_{r_1}} \cos \phi + E_{y_{r_1}} \sin \phi) \hat{a}_z \right] \quad (2.88)$$

แปลงพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของสนามไฟฟ้าคลื่นระนาบไปเป็นพิกัดทรงกลมจะได้องค์ประกอบ θ และ ϕ ดังนี้

$$E_\theta = E_{x_{r_1}} \cos \theta \cos \phi + E_{y_{r_1}} \cos \theta \sin \phi - E_{z_{r_1}} \sin \theta = \frac{E_{x_{r_1}} \cos \phi + E_{y_{r_1}} \sin \phi}{\cos \theta} \quad (2.89ก)$$

$$E_\phi = -E_{x_{r_1}} \sin \phi + E_{y_{r_1}} \cos \phi \quad (2.89ข)$$

สนามไฟฟ้าของสมการ (2.81) สามารถลดรูปลงโดยมีองค์ประกอบ θ และ ϕ ดังนี้

$$\vec{E}_{R_1}(r, \theta, \phi) = -j \frac{k_0 e^{jk_0 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} [E_\theta \hat{a}_\theta + E_\phi \hat{a}_\phi] \cos \theta \quad (2.90)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบบริเวณสายอากาศทรงที่ 1 คือ

$$\vec{E}_{R_1}(r, \theta, \phi) = -j \frac{k_0 e^{jk_0 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} [(E_{x_{r_1}} \cos \phi + E_{y_{r_1}} \sin \phi) \hat{a}_\theta + \cos \theta (E_{y_{r_1}} \cos \phi - E_{x_{r_1}} \sin \phi) \hat{a}_\phi] \quad (2.91)$$

ต่อไปจะทำการหาค่าสนามแม่เหล็กของคลื่นระนาบบริเวณสายอากาศทรงที่ 1

$$\vec{H}_{R_1}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} [\hat{a}_r \times \vec{E}_{R_1}(r, \theta, \phi)] \quad (2.92)$$

จากสมการ (2.92) จัดรูปใหม่จะได้

$$\vec{H}_{R_1}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \left[-j \frac{k_0 e^{jk_0 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} [(E_{x_{r_1}} \cos \phi + E_{y_{r_1}} \sin \phi) \hat{a}_\phi - \cos \theta (E_{y_{r_1}} \cos \phi - E_{x_{r_1}} \sin \phi) \hat{a}_\theta] \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ปร. (2.93) ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $\vec{E}_r(k_x, k_y) = E_{x_{r_1}}(k_x, k_y)\hat{a}_x + E_{y_{r_1}}(k_x, k_y)\hat{a}_y + E_{z_{r_1}}(k_x, k_y)\hat{a}_z$ พิจารณาการแปลงฟูรีเยร์ทำให้หาองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงสเปกตรัมได้ดังนี้

$$E_{x_{r_1}}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_{x_{l_1}}(x, y, z=0) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.94ก)$$

$$E_{x_{r_1}}(k_x = k_{01}, k_y = k_{02}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_{x_{l_1}}(x, y, z=0) e^{-jk(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dx dy \quad (2.94ข)$$

$$= \frac{1}{(\eta_1 + \eta_2)^2 \cos(k_1 l)} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_1 \sin \theta \sin \phi \left(\frac{l}{2}\right)\right) - (k_1 \sin \theta \sin \phi) \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_1 \sin \theta \sin \phi \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_1^2 - k_1^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi} \right] \quad (2.94ค)$$

และ

$$E_{y_{r_1}}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_{y_{l_1}}(x, y, z=0) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.95ก)$$

$$E_{y_{r_1}}(k_x = k_1, k_y = k_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_{y_{l_1}}(x, y, z=0) e^{-jk(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dx dy = 0 \quad (2.95ข)$$

ดังนั้นจะได้ค่าสนามแม่เหล็กของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 ดังนี้

$$\vec{H}_{R_1}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[-j \frac{k_1 e^{jk_0 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} \left[(E_{x_{r_1}} \cos \theta \sin \phi) \hat{a}_\theta + (E_{x_{r_1}} \cos \phi) \hat{a}_\phi \right] \right] \quad (2.96)$$

แปลงพิกัดทรงกลมของสนามแม่เหล็กไปเป็นพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของสนามแม่เหล็กที่คลื่นสะท้อน

$$\vec{H}_{R_1}(x, y, z) = H_{x_{R_1}} \hat{a}_x + H_{y_{R_1}} \hat{a}_y + H_{z_{R_1}} \hat{a}_z \quad (2.97)$$

ซึ่งแต่ละองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่คลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{xR_1} = H_{rR_1} \sin \theta \cos \phi + H_{\theta R_1} \cos \theta \cos \phi - H_{\phi R_1} \sin \phi = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{x\tau_1} (1 - \cos^2 \theta) \sin \phi \cos \phi \quad (2.98ก)$$

$$H_{yR_1} = H_{rR_1} \sin \theta \sin \phi + H_{\theta R_1} \cos \theta \sin \phi + H_{\phi R_1} \cos \phi = -\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{x\tau_1} (\cos^2 \phi + \cos^2 \theta \sin^2 \phi) \quad (2.98ข)$$

$$H_{zR_1} = H_{rR_1} \cos \theta - H_{\theta R_1} \sin \theta = -\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{x\tau_1} \sin \theta \cos \theta \sin \phi \quad (2.98ค)$$

โดยที่

$$E_{x\tau_1} = \frac{1}{(\eta_1 + \eta_2)^2 \cos(k_1 l)}$$

$$\times \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_1 \sin \theta_\tau \sin \phi_\tau \left(\frac{l}{2}\right)\right) - (k_1 \sin \theta_\tau \sin \phi_\tau) \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_1 \sin \theta_\tau \sin \phi_\tau \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_1^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_\tau \sin^2 \phi_\tau} \right]$$

$$r_{R_1} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}$$

$$\theta_\tau = \cos^{-1} \left(\frac{(z - z_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}} \right)$$

$$\phi_\tau = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_1}{x - x_1} \right)$$

2.4.4 ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศครั้งที่ 2

การหาค่าสนามไฟฟ้าสำหรับคลื่นสะท้อนบริเวณปากกร่องสายอากาศที่ไว้รับคลื่นทำได้โดยนำสมการ (2.10), (2.11ข) และ (2.21) แทนลงในสมการ (2.99)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}_{R_2}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_r(k_x, k_y, z) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2.99)$$

แล้วจึงรูปเพื่อแปลงโดเมนเชิงสเปกตรัมไปเป็นโดเมนเชิงพิกัดด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์ผกผัน

$$\bar{E}_{R_2}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_r(k_x, k_y) e^{j(k_x(x-(x_2+x_1))+k_y(y-(y_2+y_1))+k_z(z-z_1))} dk_x dk_y \quad (2.100)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \tilde{E}_r(k_x, k_y) &= -\frac{(\eta_1 - \eta_2)e^{-jk_z z_1}}{\cos(k_1 l)((\eta_1 + \eta_2)e^{jk_z 2z_1} - (\eta_1 - \eta_2))} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right] \\ &= \frac{1}{(\eta_1 + \eta_2)^2 \cos(k_1 l)} \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_1^2 - k_y^2} \right] \end{aligned}$$

จากสมการ (2.100) อินทิเกรตโดยตรงทำได้ยาก ดังนั้นจึงใช้วิธีพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นที่สามารถระยะไกลโดยที่ $k \cdot r$ มีค่าเข้าใกล้อนันต์ ความหมายคือที่ r ของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศช่องที่ 2 ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้สนามที่หาได้ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูป

$$\bar{E}_{R_2}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_r(k_x, k_y) e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_2}} dk_x dk_y \quad (2.101)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \tilde{E}_r(k_x, k_y) &= E_{x_2}(k_x, k_y) \hat{a}_x + E_{y_2}(k_x, k_y) \hat{a}_y + E_{z_2}(k_x, k_y) \hat{a}_z \\ \vec{k} &= k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z \quad \text{และ} \quad \vec{r}_{R_2} = (x - (x_2 + x_1)) \hat{a}_x + (y - (y_2 + y_1)) \hat{a}_y + (z - z_1) \hat{a}_z \\ \vec{k} \cdot \vec{r}_{R_2} &= k_x(x - (x_2 + x_1)) + k_y(y - (y_2 + y_1)) + k_z(z - z_1) \end{aligned}$$

ทำการหาจุดค่าคงที่จากสมการ (2.62)

$$\vec{k} \cdot \vec{r}_{R_2} = (k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z) \cdot r_{R_2} \hat{a}_r \quad (2.102)$$

แปลงพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากไปเป็นพิกัดทรงกลมจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{k} \cdot \bar{r}_{R_2} = r_{R_2} \left(k_x \sin \theta \cos \phi + k_y \sin \theta \sin \phi + \sqrt{k_1^2 - k_x^2 - k_y^2} \cos \theta \right) \quad (2.103)$$

เมื่อ

$$r_{R_2} = \sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + (z - z_1)^2}$$

$$(x - (x_2 + x_1)) = r_{R_2} \sin \theta \cos \phi$$

$$(y - (y_2 + y_1)) = r_{R_2} \sin \theta \sin \phi$$

$$(z - z_1) = r_{R_2} \cos \theta$$

ใช้หลักการหาจุดค่าคงที่และใช้วิธีเฟสคงที่หาค่าสนาม ซึ่งมีวิธีการเหมือนกับการหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหัวข้อ 2.4.3 เพียงแต่เปลี่ยนตำแหน่งจากร่องที่ 1 มาเป็นร่องที่ 2 ดังนั้นจะได้ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศร่องที่ 2 คือ

$$\bar{E}_{R_2}(r, \theta, \phi) = -j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} \left[(E_{xr_2} \cos \phi) \hat{a}_\theta - (E_{xr_2} \cos \theta \sin \phi) \hat{a}_\phi \right] \quad (2.104)$$

แปลงพิกัดทรงกลมไปเป็นพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$\bar{E}_{R_2}(x, y, z) = E_{xR_2} \hat{a}_x + E_{yR_2} \hat{a}_y + E_{zR_2} \hat{a}_z \quad (2.105)$$

ซึ่งแต่ละองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่คลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศร่องที่ 2 คือ

$$E_{xR_2} = E_{rR_2} \sin \theta \cos \phi + E_{\theta R_2} \cos \theta \cos \phi - E_{\phi R_2} \sin \phi = -j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} E_{xr_2} \cos \theta \quad (2.105ก)$$

$$E_{yR_2} = E_{rR_2} \sin \theta \sin \phi + E_{\theta R_2} \cos \theta \sin \phi + E_{\phi R_2} \cos \phi = -j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} E_{xr_2} (0) = 0 \quad (2.105ข)$$

$$E_{zR_2} = E_{rR_2} \cos \theta - E_{\theta R_2} \sin \theta = j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} E_{xr_2} \sin \theta \cos \phi \quad (2.105ค)$$

โดยที่

$$E_{xr_2} = \frac{1}{(\eta_1 + \eta_2)^2 \cos(k_1 l)}$$

นี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\times \left[\frac{k_1 \sin(k_1 l) - k_1 \sin\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_1 \sin \theta_{r_2} \sin \phi_{r_2} \left(\frac{l}{2}\right)\right) - (k_1 \sin \theta_{r_2} \sin \phi_{r_2}) \cos\left(k_1 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_1 \sin \theta_{r_2} \sin \phi_{r_2} \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_1^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_{r_2} \sin^2 \phi_{r_2}} \right]$$

$$r_{R_2} = \sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + (z - z_1)^2}$$

$$\theta_{r_2} = \cos^{-1} \left(\frac{(z - z_1)}{\sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + (z - z_1)^2}} \right)$$

$$\phi_{r_2} = \tan^{-1} \left(\frac{y - (y_2 + y_1)}{x - (x_2 + x_1)} \right)$$

เมื่อทราบค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแต่ละร่องแล้วให้นำองค์ประกอบสนามของคลื่นตกกระทบรวมกับคลื่นสะท้อน นั่นคือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรวม ณ ตำแหน่งสายอากาศร่องที่ 1 และ 2 ซึ่งหาได้ดังนี้

ค่าสนามไฟฟ้ารวมบริเวณสายอากาศร่องที่ 1

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{I_1} + \vec{E}_{R_1} = (E_{xI_1} + E_{xR_1}) \hat{a}_x + (E_{yI_1} + E_{yR_1}) \hat{a}_y + (E_{zI_1} + E_{zR_1}) \hat{a}_z \quad (2.106)$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ ทั้งคลื่นตกกระทบ (I) และคลื่นสะท้อน (R) มีค่า

$$E_{xI_1} + E_{xR_1} = j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{I_1}}}{2\pi r_{I_1}} E_{xi} \cos \theta_{i_1} (1 - 2 \sin^2 \theta_{i_1} \cos^2 \phi_{i_1}) - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{xR_1} \cos \theta_{r_1} \quad (2.107ก)$$

$$E_{yI_1} + E_{yR_1} = -j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{I_1}}}{2\pi r_{I_1}} E_{xi} 2 \sin^2 \theta_{i_1} \cos \theta_{i_1} \cos \phi_{i_1} \sin \phi_{i_1} \quad (2.107ข)$$

$$E_{zI_1} + E_{zR_1} = -j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{I_1}}}{2\pi r_{I_1}} E_{xi} \sin \theta_{i_1} \cos \phi_{i_1} (1 - 2 \sin^2 \theta_{i_1}) + j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{xR_1} \sin \theta_{r_1} \cos \phi_{r_1} \quad (2.107ค)$$

ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้ารวมบริเวณสายอากาศร่องที่ 1 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\bar{E}_1(x, y, z) = & \left(j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{1i}}}{2\pi r_{1i}} E_{x_{1i}} \cos \theta_{1i} (1 - 2 \sin^2 \theta_{1i} \cos^2 \phi_{1i}) - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R1}}}{2\pi r_{R1}} E_{x_{R1}} \cos \theta_{R1} \right) \hat{a}_x \\
& + \left(-j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{1i}}}{2\pi r_{1i}} E_{x_{1i}} 2 \sin^2 \theta_{1i} \cos \theta_{1i} \cos \phi_{1i} \sin \phi_{1i} \right) \hat{a}_y \\
& + \left(-j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{1i}}}{2\pi r_{1i}} E_{x_{1i}} \sin \theta_{1i} \cos \phi_{1i} (1 - 2 \sin^2 \theta_{1i}) + j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R1}}}{2\pi r_{R1}} E_{x_{R1}} \sin \theta_{R1} \cos \phi_{R1} \right) \hat{a}_z
\end{aligned} \tag{2.108}$$

ค่าสนามแม่เหล็กรวมบริเวณสายอากาศช่องที่ 1

$$\bar{H}_1 = \bar{H}_{1i} + \bar{H}_{R1} = (H_{x_{1i}} + H_{x_{R1}}) \hat{a}_x + (H_{y_{1i}} + H_{y_{R1}}) \hat{a}_y + (H_{z_{1i}} + H_{z_{R1}}) \hat{a}_z \tag{2.109}$$

องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ ทั้งคลื่นตกกระทบ (I) และคลื่นสะท้อน (R) มีค่า

$$\bar{H}_{x_{1i}} + \bar{H}_{x_{R1}} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{1i}}}{2\pi r_{1i}} E_{x_{1i}} \sin^2 \theta_{1i} \sin \phi_{1i} \cos \phi_{1i} + j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R1}}}{2\pi r_{R1}} E_{x_{R1}} \sin^2 \theta_{R1} \sin \phi_{R1} \cos \phi_{R1} \right] \tag{2.110ก)$$

$$\bar{H}_{y_{1i}} + \bar{H}_{y_{R1}} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{1i}}}{2\pi r_{1i}} E_{x_{1i}} (\cos^2 \theta_{1i} - \sin^2 \theta_{1i} \cos^2 \phi_{1i}) - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R1}}}{2\pi r_{R1}} E_{x_{R1}} (\cos^2 \theta_{R1} \sin^2 \phi_{R1} + \cos^2 \phi_{R1}) \right] \tag{2.110ข)$$

$$H_{z_{1i}} + H_{z_{R1}} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[-j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{1i}}}{2\pi r_{1i}} E_{x_{1i}} (\sin \theta_{1i} \cos \theta_{1i} \sin \phi_{1i}) - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R1}}}{2\pi r_{R1}} E_{x_{R1}} (\sin \theta_{R1} \cos \theta_{R1} \sin \phi_{R1}) \right] \tag{2.110ค)$$

ดังนั้นจะได้สนามแม่เหล็กรวมบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\vec{H}_1(x, y, z) = & \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_1}}}{2\pi r_{l_1}} E_{x_{l_1}} \sin^2 \theta_{l_1} \sin \phi_{l_1} \cos \phi_{l_1} \right] \hat{a}_x \\
& + j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{x_{R_1}} \sin^2 \theta_{R_1} \sin \phi_{R_1} \cos \phi_{R_1} \\
& + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_1}}}{2\pi r_{l_1}} E_{x_{l_1}} (\cos^2 \theta_{l_1} - \sin^2 \theta_{l_1} \cos^2 \phi_{l_1}) \right] \hat{a}_y \\
& - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{x_{R_1}} (\cos^2 \theta_{R_1} \sin^2 \phi_{R_1} + \cos^2 \phi_{R_1}) \\
& + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left[-j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_1}}}{2\pi r_{l_1}} E_{x_{l_1}} (\sin \theta_{l_1} \cos \theta_{l_1} \sin \phi_{l_1}) \right] \hat{a}_z \\
& - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_1}}}{2\pi r_{R_1}} E_{x_{R_1}} (\sin \theta_{R_1} \cos \theta_{R_1} \sin \phi_{R_1})
\end{aligned} \tag{2.111}$$

และค่าสนามไฟฟ้ารวม ณ ตำแหน่งสายอากาศครั้งที่ 2 คือ

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{l_2} + \vec{E}_{R_2} = (E_{x_{l_2}} + E_{x_{R_2}}) \hat{a}_x + (E_{y_{l_2}} + E_{y_{R_2}}) \hat{a}_y + (E_{z_{l_2}} + E_{z_{R_2}}) \hat{a}_z \tag{2.112}$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ ทั้งคลื่นตกกระทบ (l) และคลื่นสะท้อน (R) มีค่า

$$\begin{aligned}
\vec{E}_{x_{l_2}} + E_{x_{R_2}} = & j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \cos \theta (\cos^2 \theta_{l_2} \cos^2 \phi_{l_2} - \sin^2 \theta_{l_2} \cos^2 \phi_{l_2} - \sin^2 \phi_{l_2}) \\
& - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} E_{x_{R_2}} \cos \theta_{R_2}
\end{aligned} \tag{2.113ก}$$

$$\vec{E}_{y_{l_2}} + E_{y_{R_2}} = j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \cos \theta_{l_2} \sin \phi_{l_2} \cos \phi_{l_2} (\cos^2 \theta_{l_2} - \sin^2 \theta_{l_2} + 1) \tag{2.113ข}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}_{z_{l_2}} + E_{z_{R_2}} = -j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \sin \theta_{l_2} \cos \phi_{l_2} (\cos^2 \theta_{l_2} - \sin^2 \theta_{l_2}) + j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} E_{x_{R_2}} \cos \phi_{R_2} \sin \theta_{R_2} \quad (2.113ก)$$

ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้ารวมบริเวณสายอากาศรองที่ 2 เป็น

$$\begin{aligned} \bar{E}_2(x, y, z) = & \left(j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \cos \theta (\cos^2 \theta_{l_2} \cos^2 \phi_{l_2} - \sin^2 \theta_{l_2} \cos^2 \phi_{l_2} - \sin^2 \phi_{l_2}) \right. \\ & \left. - j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} E_{x_{R_2}} \cos \theta_{R_2} \right) \hat{a}_x \\ & + \left(j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \cos \theta_{l_2} \sin \phi_{l_2} \cos \phi_{l_2} (\cos^2 \theta_{l_2} - \sin^2 \theta_{l_2} + 1) \right) \hat{a}_y \\ & + \left(-j \frac{k_1 e^{-jk_1 r_{l_2}}}{2\pi r_{l_2}} E_{x_{l_2}} \sin \theta_{l_2} \cos \phi_{l_2} (\cos^2 \theta_{l_2} - \sin^2 \theta_{l_2}) \right. \\ & \left. + j \frac{k_1 e^{jk_1 r_{R_2}}}{2\pi r_{R_2}} E_{x_{R_2}} \cos \phi_{R_2} \sin \theta_{R_2} \right) \hat{a}_z \end{aligned} \quad (2.114)$$

2.5 การหาค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมและแอดมิตแตนซ์ตัวเอง

สำหรับการหาค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมและแอดมิตแตนซ์ตัวเอง [12]-[14] ให้นำค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรวมมาหาค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมและแอดมิตแตนซ์ตัวเองซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.1) การหาค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมหรือ Y_{12} ทำได้ดังนี้

$$Y_{12} = \frac{1}{V_1 V_2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} (\bar{E}_2 \times \bar{H}_1) \cdot \hat{a}_z dy \quad (2.115)$$

โดยที่

$$\bar{E}_j \times \bar{H}_i = \bar{E}_2 \times \bar{H}_1 = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ (E_{x_{l_2}} + E_{x_{R_2}}) & (E_{y_{l_2}} + E_{y_{R_2}}) & (E_{z_{l_2}} + E_{z_{R_2}}) \\ (H_{x_{l_1}} + H_{x_{R_1}}) & (H_{y_{l_1}} + H_{y_{R_1}}) & (H_{z_{l_1}} + H_{z_{R_1}}) \end{vmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= [(E_{y_{l_2}} + E_{y_{R_2}})(H_{z_{l_1}} + H_{z_{R_1}}) - (E_{z_{l_2}} + E_{z_{R_2}})(H_{y_{l_1}} + H_{y_{R_1}})]\hat{a}_x \\
&+ [(E_{z_{l_2}} + E_{z_{R_2}})(H_{x_{l_1}} + H_{x_{R_1}}) - (E_{x_{l_2}} + E_{x_{R_2}})(H_{z_{l_1}} + H_{z_{R_1}})]\hat{a}_y \\
&+ [(E_{x_{l_2}} + E_{x_{R_2}})(H_{y_{l_1}} + H_{y_{R_1}}) - (E_{y_{l_2}} + E_{y_{R_2}})(H_{x_{l_1}} + H_{x_{R_1}})]\hat{a}_z
\end{aligned}$$

จากสมการ (2.115) สามารถหาค่าแอมพลิจูดรวมได้ดังสมการ (2.116) ซึ่งหาคำตอบโดยใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Integration) [16]

$$\begin{aligned}
Y_{12} &= \frac{1}{V_1 V_2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} [(E_{x_{l_2}} + E_{x_{R_2}})(H_{y_{l_1}} + H_{y_{R_1}}) - (E_{y_{l_2}} + E_{y_{R_2}})(H_{x_{l_1}} + H_{x_{R_1}})] dy \\
&= \frac{1}{V_1 V_2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{-jk_1(r_{l_2} + r_{l_1})}}{r_{l_2} r_{l_1}} E_{x_{l_2}} E_{x_{l_1}} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{-jk_1(r_{l_2} - r_{R_1})}}{r_{l_2} r_{R_1}} E_{x_{l_2}} E_{x_{R_1}} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{jk_1(r_{R_2} - r_{l_1})}}{r_{R_2} r_{l_1}} E_{x_{R_2}} E_{x_{l_1}} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{jk_1(r_{R_2} + r_{R_1})}}{r_{R_2} r_{R_1}} E_{x_{R_2}} E_{x_{R_1}} \right] \\
&\quad \left[\begin{aligned}
&-\cos^3 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \cos^2 \theta_{i_1} \\
&+ \cos^3 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \sin^2 \theta_{i_1} \cos^2 \phi_{i_1} \\
&+ \cos \theta_{i_2} \sin^2 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \cos^2 \theta_{i_1} \\
&- \cos \theta_{i_2} \sin^2 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \sin^2 \theta_{i_1} \cos^2 \phi_{i_1} \\
&+ \cos \theta_{i_2} \sin^2 \phi_{i_2} \cos^2 \theta_{i_1} \\
&- \cos \theta_{i_2} \sin^2 \phi_{i_2} \sin \theta_{i_1} \cos^2 \phi_{i_1} \\
&+ \cos^3 \theta_{i_2} \cos \phi_{i_2} \sin \phi_{i_2} \sin^2 \theta_{i_1} \sin \phi_{i_1} \cos \phi_{i_1} \\
&- \sin^2 \theta_{i_2} \cos \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2} \cos \phi_{i_2} \sin^2 \theta_{i_1} \sin \phi_{i_1} \cos \phi_{i_1} \\
&+ \cos \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2} \cos \phi_{i_2} \sin^2 \theta_{i_1} \sin \phi_{i_1} \cos \phi_{i_1}
\end{aligned} \right] \\
&\quad \left[\begin{aligned}
&\cos^3 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \cos^2 \theta_{r_1} \sin^2 \phi_{r_1} \\
&+ \cos^3 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \cos^2 \phi_{r_1} \\
&- \cos \theta_{i_2} \sin^2 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \cos^2 \theta_{r_1} \sin^2 \phi_{r_1} \\
&- \cos \theta_{i_2} \sin^2 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \cos^2 \phi_{r_1} \\
&- \cos \theta_{i_2} \sin^2 \phi_{i_2} \cos^2 \theta_{r_1} \sin^2 \phi_{r_1} \\
&- \cos \theta_{i_2} \sin^2 \phi_{i_2} \cos^2 \phi_{r_1} \\
&+ 2 \cos^3 \theta_{i_2} \cos \phi_{i_2} \sin \phi_{i_2} \sin \phi_{r_1} \cos \phi_{r_1} \sin^2 \theta_{r_1}
\end{aligned} \right] dy \\
&\quad + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{jk_1(r_{R_2} - r_{l_1})}}{r_{R_2} r_{l_1}} E_{x_{R_2}} E_{x_{l_1}} [\cos \theta_{r_2} \cos^2 \theta_{i_1} - \cos \theta_{r_2} \sin^2 \theta_{i_1} \cos^2 \phi_{i_1}] \\
&\quad + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{jk_1(r_{R_2} + r_{R_1})}}{r_{R_2} r_{R_1}} E_{x_{R_2}} E_{x_{R_1}} [-\cos \theta_{r_2} \cos^2 \theta_{r_1} \sin^2 \phi_{r_1} - \cos \theta_{r_2} \cos^2 \phi_{r_1}]
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.116)

ต่อไปเป็นการหาค่าแอดมิตแตนซ์ตัวเองหรือ Y_{11} ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$Y_{11} = \frac{1}{V_1 V_1} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} (\vec{E}_1 \times \vec{H}_1) \cdot \hat{a}_z dy \quad (2.117)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 \times \vec{H}_1 &= \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ (E_{xI_1} + E_{xR_1}) & (E_{yI_1} + E_{yR_1}) & (E_{zI_1} + E_{zR_1}) \\ (H_{xI_1} + H_{xR_1}) & (H_{yI_1} + H_{yR_1}) & (H_{zI_1} + H_{zR_1}) \end{vmatrix} \\ &= [(E_{yI_1} + E_{yR_1})(H_{zI_1} + H_{zR_1}) - (E_{zI_1} + E_{zR_1})(H_{yI_1} + H_{yR_1})] \hat{a}_x \\ &\quad + [(E_{zI_1} + E_{zR_1})(H_{xI_1} + H_{xR_1}) - (E_{xI_1} + E_{xR_1})(H_{zI_1} + H_{zR_1})] \hat{a}_y \\ &\quad + [(E_{xI_1} + E_{xR_1})(H_{yI_1} + H_{yR_1}) - (E_{yI_1} + E_{yR_1})(H_{xI_1} + H_{xR_1})] \hat{a}_z \end{aligned}$$

ดังนั้นทำให้หาค่าแอดมิตแตนซ์ตัวเองได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{1}{V_1^2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} [(E_{xI_1} + E_{xR_1})(H_{yI_1} + H_{yR_1}) - (E_{yI_1} + E_{yR_1})(H_{xI_1} + H_{xR_1})] dy \\ &= \frac{1}{V_1^2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{-jk_1 2r_{I_1}}}{r_{I_1}^2} E_{xI_1}^2 \begin{bmatrix} -\cos^3 \theta_{I_1} + \sin^2 \theta_{I_1} \cos^2 \phi_{I_1} \cos \theta_{I_1} + 2 \sin^2 \theta_{I_1} \cos^2 \phi_{I_1} \cos \theta_{I_1} \\ -2 \sin^4 \theta_{I_1} \cos^4 \phi_{I_1} \cos \theta_{I_1} - 2 \sin^3 \theta_{I_1} \cos \theta_{I_1} \sin^2 \phi_{I_1} \cos^2 \phi_{I_1} \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{-jk_1(r_{I_1} - r_{R_1})}}{r_{I_1} r_{R_1}} E_{xI_1} E_{xR_1} \begin{bmatrix} \cos \theta_{I_1} \cos^2 \phi_{R_1} + \cos \theta_{I_1} \cos^2 \theta_{R_1} \sin^2 \phi_{R_1} \\ -2 \sin^2 \theta_{I_1} \cos \theta_{I_1} \cos^2 \phi_{I_1} \cos^2 \phi_{R_1} \\ -2 \sin^2 \theta_{I_1} \cos \theta_{I_1} \cos^2 \phi_{I_1} \cos^2 \theta_{R_1} \sin^2 \phi_{R_1} \\ -2 \sin^2 \theta_{I_1} \cos \theta_{I_1} \sin \phi_{I_1} \cos \phi_{I_1} \sin \phi_{R_1} \cos \phi_{R_1} \\ + 2 \sin^2 \theta_{I_1} \cos \theta_{I_1} \sin \phi_{I_1} \cos \phi_{I_1} \cos^2 \theta_{R_1} \sin \phi_{R_1} \cos \phi_{R_1} \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{jk_1(r_{R_1} - r_{I_1})}}{r_{R_1} r_{I_1}} E_{xR_1} E_{xI_1} [\cos \theta_{R_1} \cos^2 \theta_{I_1} - \cos \theta_{R_1} \sin^2 \theta_{I_1} \cos^2 \phi_{I_1}] \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \left(\frac{k_1}{2\pi} \right)^2 \frac{e^{jk_1 2r_{R_1}}}{r_{R_1}^2} E_{xR_1}^2 [-\cos \theta_{R_1} \cos^2 \phi_{R_1} - \cos^3 \theta_{R_1} \sin^2 \phi_{R_1}] \right] dy \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ปร.(2.119) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.119) สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขเช่นเดียวกับการหาค่าแอดมิตแดนซ์ร่วม สำหรับการหาค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่อง เมื่อได้ค่า Y_{11} และ Y_{12} นำมาหาค่าพารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter) [17] ซึ่งหาได้ดังนี้

กำหนดให้ $Y_{11} = Y_{22}$ และ $Y_{12} = Y_{21}$

$$S_{11} = \frac{(Y_0 - Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y} \quad (2.120ก)$$

$$S_{12} = -\frac{2Y_{12}Y_0}{\Delta Y} \quad (2.120ข)$$

$$S_{21} = -\frac{2Y_{21}Y_0}{\Delta Y} \quad (2.120ค)$$

$$S_{22} = \frac{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y} \quad (2.120ง)$$

โดยที่

$$\Delta Y = (Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}$$

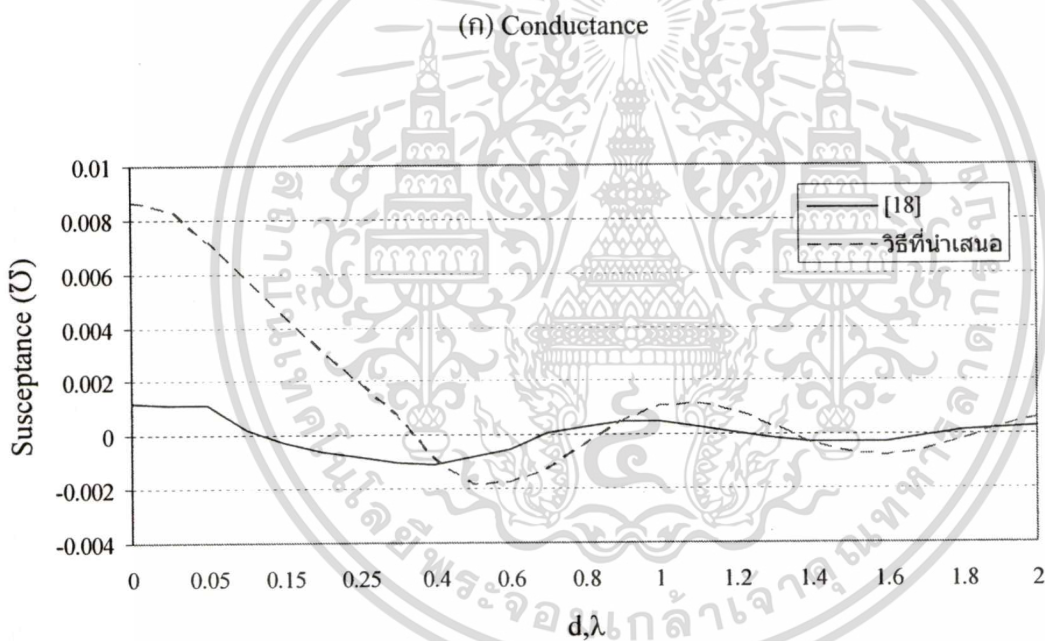
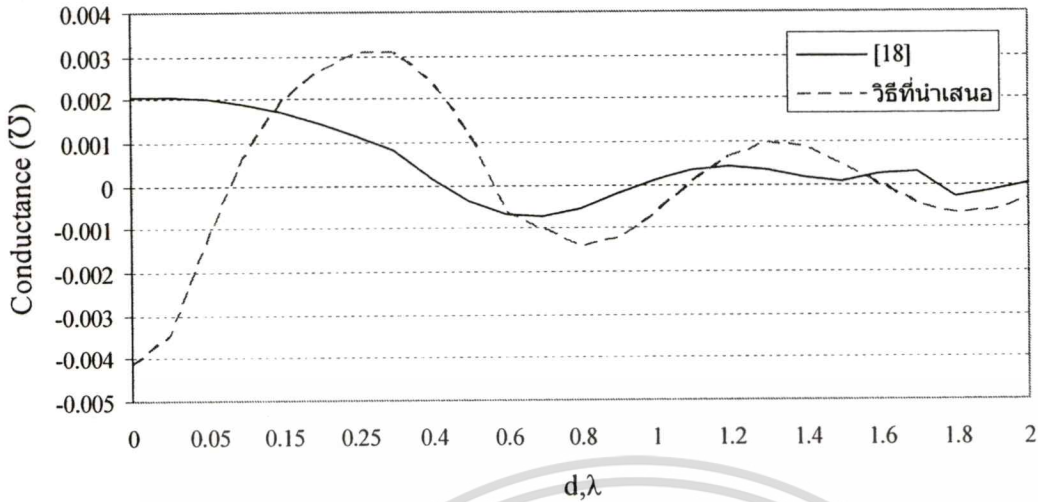
$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{50\Omega}$$

ดังนั้นจึงทำให้ $S_{11} = S_{22}$ และ $S_{12} = S_{21}$ ซึ่ง S_{21} คือค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องในกรณีที่สายอากาศร่องวางอยู่ใกล้ตัวกลางสองชั้น

2.6 การพิสูจน์สูตรคำนวณแอดมิตแดนซ์ร่วมในอวกาศว่าง

การพิสูจน์ผลการคำนวณในที่นี้จะวางสายอากาศให้อยู่ในอวกาศว่าง โดยใช้ความถี่ในการส่งคลื่นที่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากสูตรที่ได้คำนวณกับค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมของสายอากาศร่องที่ได้จากการแปลงสายอากาศโคโพลในอวกาศว่างด้วยหลักการบาบินेट (Babinet's principle) [18] และเงื่อนไขระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวกลางรวมถึงการกำหนดให้ตัวกลางเป็นอวกาศว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

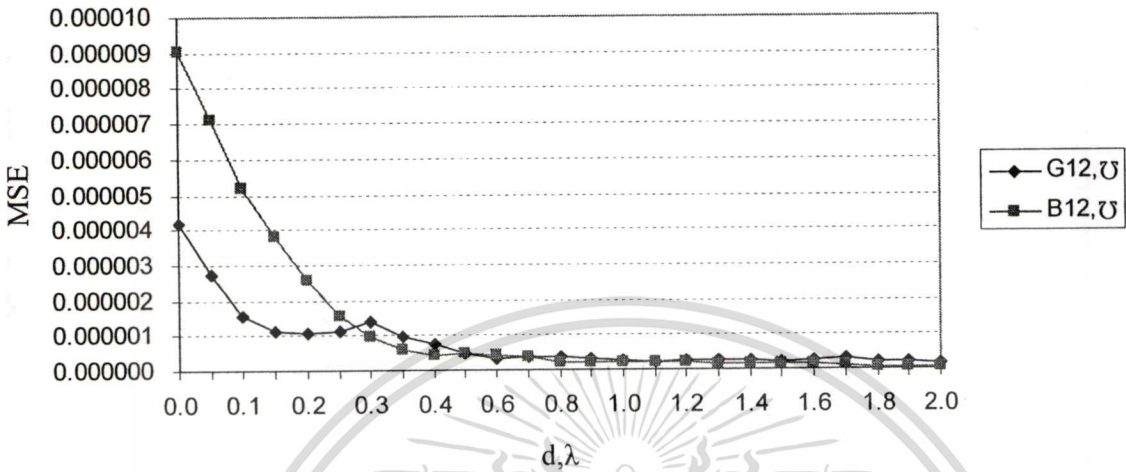


(ข) Susceptance

รูปที่ 2.3 แอดมิตแดนซ์ร่วมของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง

รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมของสายอากาศร่องในอวกาศว่างจากเอกสารอ้างอิง [18] กับจากการคำนวณที่พิสูจน์ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวกลางเป็นระยะไกล (10λ) และตัวกลางทั้งสองชั้นมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ จากการเปรียบเทียบโดยการเปลี่ยนค่าพิชผลาคพบว่าที่ระยะ มากกว่า 0.5λ ค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่การเปลี่ยนค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดพลาดไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งต่างกับในช่วงระยะน้อยกว่า 0.5λ ที่มีความผิดพลาดมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการหาค่าสนามใช้วิธีเฟสคงที่ซึ่งระยะ r ต้องไกลพอที่จะทำให้สนามนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด



รูปที่ 2.4 การเฉลี่ยค่าผิดพลาดของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง

2.7 สรุป

โครงสร้างสายอากาศร่องที่วางใกล้ตัวกลางสองชั้นเป็นรูปแบบปัญหาที่ได้นำมาศึกษาเพื่อใช้อธิบายการแพร่กระจายคลื่นไปยังวัตถุซึ่งเป็นหลักการทำงานของเซนเซอร์ เนื่องจากพิจารณาสนามไฟฟ้าระยะใกล้ จึงใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมเพื่อที่จะสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคลื่นระนาบ และใช้ทฤษฎีของคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใดๆ ได้ โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตของสองตัวกลางเพื่อหาสัมประสิทธิ์การตกกระทบ การสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รอยต่อของตัวกลางที่ต่างชนิดกัน จากนั้นจึงหาค่าสนามไฟฟ้ารวมและสนามแม่เหล็กรวมที่บริเวณปากร่องของสายอากาศที่เป็นตัวส่งและรับด้วยวิธีเฟสคงที่แล้วจึงนำค่าที่ได้จากวิธีนี้ไปหาค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมและแอดมิตแดนซ์ตัวเอง แล้วจึงหาค่าพารามิเตอร์การกระจายต่อไป เมื่อได้สูตรวิธีการคำนวณแล้วในหัวข้อสุดท้ายของบทยังได้มีการพิสูจน์ความเชื่อถือได้ด้วยการเปรียบเทียบกับกรณีสายอากาศอยู่ในอวกาศว่าง ซึ่งพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมในการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องหรือระยะห่างของตัวกลางกับสายอากาศมีลักษณะรูปแบบที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

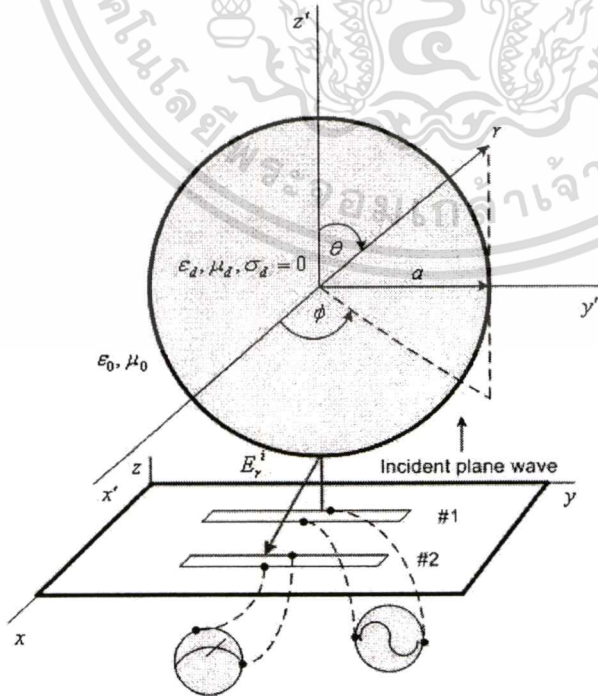
การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลม

3.1 กล่าวนำ

บทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงทฤษฎีการกระจายคลื่นที่เป็นระนาบแผ่ไปยังตัวกลางสองชั้น ซึ่งสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้โดยใช้วิธีเฟสคงที่ เช่นเดียวกันในบทนี้จะยังคงใช้หลักการเดิมในรูปแบบคลื่นตกกระทบ แต่ในรูปแบบของคลื่นสะท้อนจะต้องพิจารณาสนามที่บริเวณรอยต่อของผิวทรงกลมเพิ่มเข้ามาเพราะได้เปลี่ยนรูปแบบปัญหาเป็นตัวกลางทรงกลม ซึ่งได้ใช้ทฤษฎีการกระจายคลื่นระนาบบนตัวกลางทรงกลมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์รูปแบบโจทย์ดังกล่าว

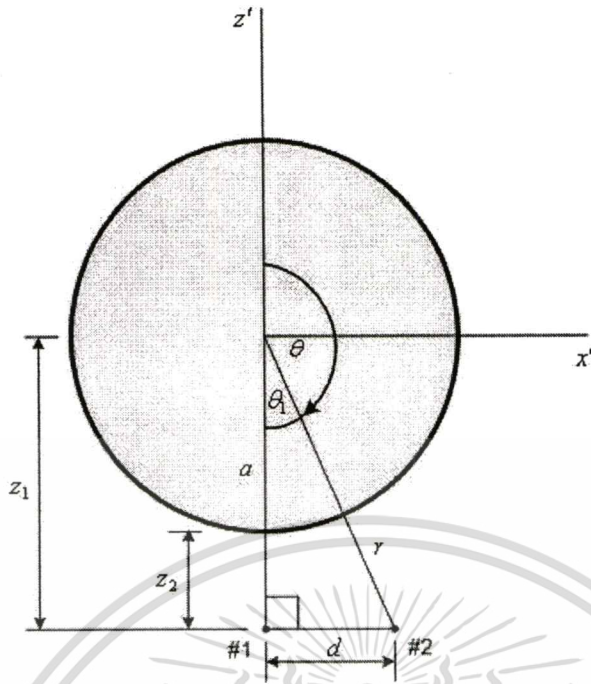
3.2 รูปแบบของปัญหาที่มีวัสดุทรงกลมวางใกล้สายอากาศร่อง

พิจารณารูปแบบปัญหาสายอากาศร่องวางอยู่ใกล้วัตถุตัวกลางทรงกลมที่ไม่มีการสูญเสีย ซึ่งเป็นสายอากาศตัวเดียวกันที่ใช้หาค่าการเชื่อมต่อร่วมในบทที่ 2 โดยที่ลักษณะ โครงสร้าง การป้อนคลื่นสัญญาณ และการหาสนามระยะใกล้วัตถุ ใช้หลักการเดียวกัน ความแตกต่างในการพิจารณาของบทนี้จะอยู่ที่การกระจายของคลื่นบนทรงกลม ส่วนหลักการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อให้ได้ค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องใกล้วัตถุทรงกลมจะเหมือนกันกับปัญหาตัวกลางสองชั้นกล่าวคือ หาค่าสนามของสายอากาศบริเวณร่อง หาค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยร่วม และสุดท้ายหาค่าการเชื่อมต่อร่วม



(ก) โครงสร้างของปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) มุมระหว่างสายอากาศกับทรงกลม

รูปที่ 3.1 การวางตัวกลางทรงกลมใกล้สายอากาศรอด

จากรูปที่ 3.1 กำหนดตัวแปรต่างๆ ในรูปแบบปัญหาสายอากาศวางอยู่ใกล้ตัวกลางทรงกลมได้ดังนี้

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} \quad (r \geq 0)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}} \quad (0 \leq \theta \leq \pi)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{d}{z_1} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{d}{a + z_2} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y'}{x'}$$

โดยที่ a คือ รัศมีทรงกลม

d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรอดที่ 1 กับรอดที่ 2

r คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรอดที่ 2 กับจุดศูนย์กลางทรงกลม

z_1 คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลมกับจุดศูนย์กลางทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

z_2 คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลม

ในการคำนวณได้กำหนดให้ มุม θ ของสายอากาศร่องที่ 1 และ 2 เท่ากับ π และ $\pi - \theta_1$ ตามลำดับ ส่วนมุม ϕ นั้นกำหนดให้เท่ากับศูนย์

พิจารณารูปแบบเงื่อนไขความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กตามสมการ (3.1) โดยที่สายอากาศร่องมีขนาดกราวด์เป็นอนันต์ มีความยาว l ที่ยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นและความกว้างน้อยมากๆ เข้าใกล้ศูนย์ สายอากาศมีสองร่องจัดวางขนานกัน กำหนดให้สายอากาศร่องที่ 1 เป็นตัวส่งวางตั้งฉากกับวัตถุทรงกลมในอวกาศว่างและสายอากาศร่องที่ 2 เป็นตัวรับห่างกันเป็นระยะ d ตามรูปที่ 3.1 (ข) โดยที่ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กบริเวณปากของสายอากาศร่องที่ 1 เป็นฟังก์ชันโคไซน์ ดังนี้

$$\bar{M}(x, y) = \hat{a}_y \begin{cases} \frac{M_0 \cos(k_0(l - |y - y_1|)) \delta(x - x_1)}{\cos(k_0 l)}, & |y - y_1| \leq \frac{l}{2} \\ 0, & |y - y_1| > \frac{l}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

โดย M_0 เป็นขนาดของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

k_0 เป็นค่าคงตัวเฟส

$\delta(x - x_1)$ เป็นฟังก์ชันไดเรคเดลต้า

ใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมโดยการแปลงฟูริเยร์เพื่อพิจารณาให้เป็นคลื่นระนาบ

$$\tilde{\bar{M}}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{M}(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3.2)$$

กำหนดให้ $M_0 = 1$

$$\tilde{\bar{M}}(k_x, k_y) = e^{-jk_x x_1} \hat{a}_y \int_{y_1 - \frac{l}{2}}^{y_1 + \frac{l}{2}} \frac{\cos(k_0(l - |y - y_1|))}{\cos(k_0 l)} e^{-jk_y y} dy \quad (3.3)$$

ผลการแปลงฟูริเยร์จะให้ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กที่อยู่ใน โดเมนเชิงสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \frac{2e^{-j(k_x x_1 + k_y y_1)}}{\cos(k_0 l)} \left[\frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_0^2 - k_y^2} \right] \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) ใช้หลักการสมมูลของฮอยเกนเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าในทางโดเมนเชิงสเปกตรัม

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = -2\hat{a}_n \times \tilde{E}(k_x, k_y) \quad (3.5)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าทางโดเมนเชิงสเปกตรัมที่บริเวณสายอากาศปรอทที่ 1 ได้เป็น

$$\tilde{E}(k_x, k_y) = -\hat{a}_x \frac{e^{-j(k_x x_1 + k_y y_1)}}{\cos(k_0 l)} \left[\frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{l}{2}\right) - k_y \cos\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_y \frac{l}{2}\right)}{k_0^2 - k_y^2} \right] \quad (3.6)$$

แปลงฟูเรียร์ผกผันเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าทางโดเมนเชิงพิกัดที่แพร่กระจายคลื่น ไปยังทรงกลม ได้เป็น

$$\tilde{E}(x, y) = -\hat{a}_x \frac{\cos(k_0(l - |y - y_1|))\delta(x - x_1)}{2\cos(k_0 l)} \quad (3.7)$$

ค่าสนามบริเวณสายอากาศปรอทที่ 1 ประกอบด้วยสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เป็นของคลื่นตกกระทบ และสะท้อน

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_i + \bar{E}_r \quad (3.8ก)$$

$$\bar{H}_1 = \bar{H}_i + \bar{H}_r \quad (3.8ข)$$

ค่าสนามบริเวณสายอากาศปรอทที่ 2 ประกอบด้วยสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เป็นของคลื่นตกกระทบ และสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{i_2} + \vec{E}_{r_2} \quad (3.9ก)$$

$$\vec{H}_2 = \vec{H}_{i_2} + \vec{H}_{r_2} \quad (3.9ข)$$

สำหรับการหาค่าแอมพลิจูดร่วมและแอมพลิจูดตัวเองจำเป็นต้องทราบค่า $\vec{E}_1, \vec{H}_1, \vec{E}_2$ และ \vec{H}_2 เพื่อแปลงฟูริเยร์ผกผันสำหรับหาสนามของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนทางโดเมนเชิงพิกัดที่บริเวณสายอากาศช่องที่ 1 และ 2

3.3 การหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่บริเวณสายอากาศช่องที่ 1 และ 2

3.3.1 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1

การหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 ใช้หลักการคำนวณตามหัวข้อ 2.4.1 ในบทที่ 2 หาค่าสนามได้ดังนี้
ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 คือ

$$\vec{E}_i(r, \theta, \phi) = j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_1}}{2\pi r_1} \left[\begin{array}{l} (E_{x_1} \cos \phi (1 - 2 \sin^2 \theta) + E_{y_1} \sin \phi (1 - 2 \sin^2 \theta)) \hat{a}_\theta \\ + \cos \theta (E_{y_1} \cos \phi - E_{x_1} \sin \phi) \hat{a}_\phi \end{array} \right] \quad (3.10)$$

แปลงสนามไฟฟ้าในพิกัดทรงกลมไปเป็นพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$\vec{E}_i(x, y, z) = E_{x_1} \hat{a}_x + E_{y_1} \hat{a}_y + E_{z_1} \hat{a}_z \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$E_{x_1} = E_{r_1} \sin \theta \cos \phi + E_{\theta_1} \cos \theta \cos \phi - E_{\phi_1} \sin \phi = j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_1}}{2\pi r_1} E_{x_1} \cos \theta_1 (1 - 2 \sin^2 \theta_1 \cos^2 \phi_1)$$

$$E_{y_1} = E_{r_1} \sin \theta \sin \phi + E_{\theta_1} \cos \theta \sin \phi + E_{\phi_1} \cos \phi = -j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_1}}{2\pi r_1} E_{x_1} 2 \sin^2 \theta_1 \cos \theta_1 \cos \phi_1 \sin \phi_1$$

$$E_{z_1} = E_{r_1} \cos \theta - E_{\theta_1} \sin \theta = -j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_1}}{2\pi r_1} E_{x_1} \sin \theta_1 \cos \phi_1 (1 - 2 \sin^2 \theta_1)$$

และค่าสนามแม่เหล็กของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 ดังนี้

$$\vec{H}_i(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left[j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_i}}{2\pi r_i} \left[(E_{x_1} \cos \theta_i \sin \phi_i) \hat{a}_\theta + (E_{x_1} \cos \phi_i (1 - 2 \sin^2 \theta_i)) \hat{a}_\phi \right] \right] \quad (3.12)$$

แปลงสนามแม่เหล็กในพิกัดทรงกลม ไปเป็นพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$\vec{H}_i(x, y, z) = H_{x_i} \hat{a}_x + H_{y_i} \hat{a}_y + H_{z_i} \hat{a}_z \quad (3.13)$$

เมื่อ

$$H_{x_i} = H_{r_i} \sin \theta \cos \phi + H_{\theta_i} \cos \theta \cos \phi - H_{\phi_i} \sin \phi = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_i}}{2\pi r_i} E_{x_1} \sin^2 \theta_i \sin \phi_i \cos \phi_i$$

$$H_{y_i} = H_{r_i} \sin \theta \sin \phi + H_{\theta_i} \cos \theta \sin \phi + H_{\phi_i} \cos \phi = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_i}}{2\pi r_i} E_{x_1} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_i \\ -\sin^2 \theta_i \cos^2 \phi_i \end{pmatrix}$$

$$H_{z_i} = H_{r_i} \cos \theta - H_{\theta_i} \sin \theta = -\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_i}}{2\pi r_i} E_{x_1} \sin \theta_i \sin \phi_i \cos \theta_i$$

โดยที่

$$E_{x_1} = \frac{1}{\cos(k_0 l)}$$

$$\times \left[\frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_0 \sin \theta_i \sin \phi_i \left(\frac{l}{2}\right)\right) - \left(k_0 \sin \theta_i \sin \phi_i\right) \cos\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_0 \sin \theta_i \sin \phi_i \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_0^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_i \sin^2 \phi_i} \right]$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2}$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2}} \right)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_1}{x - x_1} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2

การหาค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2 ทำได้เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 2.4.2 ในบทที่ 2 ซึ่งสามารถหาสนามไฟฟ้าได้ดังนี้
ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบริเวณสายอากาศร่องที่ 2 คือ

$$\therefore \vec{E}_{i_2}(r, \theta, \phi) = j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_{i_2}}}{2\pi r_{i_2}} \left[(E_{x_2} \cos \phi (1 - 2 \sin^2 \theta)) \hat{a}_\theta + (E_{x_2} \cos \theta \sin \phi) \hat{a}_\phi \right] \quad (3.14)$$

ทำการแปลงสนามไฟฟ้าในพิกัดทรงกลมไปเป็นพิกัดทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$\vec{E}_{i_2}(x, y, z) = E_{x_{i_2}} \hat{a}_x + E_{y_{i_2}} \hat{a}_y + E_{z_{i_2}} \hat{a}_z \quad (3.15)$$

เมื่อ

$$E_{x_{i_2}} = E_{r_{i_2}} \sin \theta \cos \phi + E_{\theta_{i_2}} \cos \theta \cos \phi - E_{\phi_{i_2}} \sin \phi = j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_{i_2}}}{2\pi r_{i_2}} E_{x_2} \cos \theta_{i_2} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} \\ -\sin^2 \theta_{i_2} \cos^2 \phi_{i_2} - \sin^2 \phi_{i_2} \end{pmatrix}$$

$$E_{y_{i_2}} = E_{r_{i_2}} \sin \theta \sin \phi + E_{\theta_{i_2}} \cos \theta \sin \phi + E_{\phi_{i_2}} \cos \phi = j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_{i_2}}}{2\pi r_{i_2}} E_{x_2} \cos \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_{i_2} \\ -\sin^2 \theta_{i_2} + 1 \end{pmatrix}$$

$$E_{z_{i_2}} = E_{r_{i_2}} \cos \theta - E_{\theta_{i_2}} \sin \theta = -j \frac{k_0 e^{-jk_0 r_{i_2}}}{2\pi r_{i_2}} E_{x_2} \sin \theta_{i_2} \cos \phi_{i_2} (\cos^2 \theta_{i_2} - \sin^2 \theta_{i_2})$$

โดยที่

$$E_{x_2} = \frac{1}{\cos(k_0 l)}$$

$$\times \left[\frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \cos\left(k_0 \sin \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2} \left(\frac{l}{2}\right)\right) - \left(k_0 \sin \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2}\right) \cos\left(k_0 \frac{l}{2}\right) \sin\left(k_0 \sin \theta_{i_2} \sin \phi_{i_2} \left(\frac{l}{2}\right)\right)}{k_0^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_{i_2} \sin^2 \phi_{i_2}} \right]$$

$$r_{i_2} = \sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + z^2}$$

$$\theta_{i_2} = \cos^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{(x - (x_2 + x_1))^2 + (y - (y_2 + y_1))^2 + z^2}} \right)$$

$$\phi_{i_2} = \tan^{-1} \left(\frac{y - (y_2 + y_1)}{x - (x_2 + x_1)} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นของคลื่นสะท้อนที่บริเวณสายอากาศช่องที่ 1 และ 2
ต่อไปมาพิจารณาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ต่อเนื่องบริเวณรอยสัมผัส
กับผิวทรงกลม คือ

$$E_r = \frac{1}{\hat{y}} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_r + k^2 A_r \right) \quad (3.16ก)$$

$$E_\theta = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} F_r + \frac{1}{\hat{y}r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} A_r \quad (3.16ข)$$

$$E_\phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} F_r + \frac{1}{\hat{y}r \sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \phi} A_r \quad (3.16ค)$$

$$H_r = \frac{1}{\hat{z}} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} F_r + k^2 F_r \right) \quad (3.17ก)$$

$$H_\theta = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} A_r + \frac{1}{\hat{z}r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} F_r \quad (3.17ข)$$

$$H_\phi = \frac{-1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} A_r + \frac{1}{\hat{z}r \sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \phi} F_r \quad (3.17ค)$$

พิจารณาการกระจายคลื่นระนาบบนตัวกลางทรงกลม โดยให้คลื่นตกกระทบบมีทิศทางโพลาไรซ์
ตามแกน x และเดินทางไปตามแนวแกน z นั่นคือ

$$E_x^i = E_0 e^{-jkz} = E_0 e^{-jkr \cos \theta} \quad (3.18)$$

$$H_y^i = \frac{E_0}{\eta} e^{-jkz} = \frac{E_0}{\eta} e^{-jkr \cos \theta} \quad (3.19)$$

สำหรับรูปแบบการใช้เงื่อนไขขอบเขตจะอธิบายการเกิดสนามของคลื่นระนาบที่กระทบทรงกลมด้วย
ผลรวมขององค์ประกอบ TM และ TE ด้วย r นั้นอยู่ในเทอมของ F_r (electric vector potential) และ A_r
(magnetic vector potential) จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.16ก) – (3.16ค) และ (3.17ก) – (3.17ค) ซึ่ง A_r หาได้จาก E_r และ F_r หาได้จาก H_r องค์ประกอบ r ของสนามไฟฟ้าตกกระทบคือ

$$E_r^i = \cos \phi \sin \theta E_x^i = E_0 \frac{\cos \phi}{jkr} \frac{\partial}{\partial \theta} (e^{-jkr \cos \theta}) \quad (3.20)$$

แทน $e^{-jr \cos \theta} = \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) j_n(r) P_n(\cos \theta)$ ลงในสมการ (3.20) เขียนใหม่เป็น

$$E_r^i = E_0 \frac{\cos \phi}{jkr} \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) j_n(kr) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n(\cos \theta) \quad (3.21)$$

ใช้รูปแบบฟังก์ชันเบสเซลทรงกลม (spherical Bessel function) [19] คือ $\hat{B}_n(kr) = kr b_n(kr)$ และความสัมพันธ์ฟังก์ชันเลอจอง (Legendre function) [20] $\frac{\partial}{\partial \theta} P_n = P_n^1$ จะได้

$$E_r^i = -j \frac{E_0 \cos \phi}{(kr)^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \hat{J}_n(kr) P_n^1(\cos \theta) \quad (3.22)$$

กำหนดให้ $E_r^i = 0$ จะได้รูปแบบ A_r ของคลื่นตกกระทบเป็น

$$A_r^i = \frac{E_0}{\omega \mu} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} a_n \hat{J}_n(kr) P_n^1(\cos \theta) \quad (3.23)$$

และหาค่า E_r^i โดยใช้สมการ (3.16ก) เพื่อให้ง่ายใช้ผลของ $\left[\frac{d^2}{dr^2} + k^2 - \frac{n(n+1)}{r^2} \right] \hat{B}_n = 0$ ซึ่งเป็นรูปแบบของฟังก์ชันเบสเซลทรงกลม จะได้

$$E_r^i = -j \frac{E_0 \cos \phi}{(kr)^2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n n(n+1) \hat{J}_n(kr) P_n^1(\cos \theta) \quad (3.24)$$

เปรียบเทียบจากสูตรหา E_r^i ดังนั้นจะได้

$$a_n = \frac{j^{-n} (2n+1)}{n(n+1)} \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้วิธีการเช่นเดียวกันในการหา F_r^i จาก H_r^i

$$F_r^i = \frac{E_0}{k} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} a_n \hat{J}_n(kr) P_n^1(\cos \theta) \quad (3.26)$$

ดังนั้น สามารถหาสนามภายนอกทรงกลม ($r > a$) ได้เป็น

$$A_r^+ = \frac{E_0}{\omega \mu} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(kr)] P_n^1(\cos \theta) \quad (3.27)$$

$$F_r^+ = \frac{E_0}{k} \sin \phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(kr)] P_n^1(\cos \theta) \quad (3.28)$$

และสนามภายในทรงกลม ($r < a$) เป็น

$$A_r^- = \frac{E_0}{\omega \mu_0} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} d_n \hat{J}_n(k_d r) P_n^1(\cos \theta) \quad (3.29)$$

$$F_r^- = \frac{E_0}{k_0} \sin \phi \sum_{n=1}^{\infty} e_n \hat{J}_n(k_d r) P_n^1(\cos \theta) \quad (3.30)$$

โดยที่ $\hat{H}_n^{(2)}$ คือ ฟังก์ชันแฮนเคิลทรงกลมชนิดที่สอง (spherical Hankel function of the second kinds) พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ $r = a$

$$E_\theta^+ = E_\theta^- \quad (3.31ก)$$

$$E_\phi^+ = E_\phi^- \quad (3.31ข)$$

$$H_\theta^+ = H_\theta^- \quad (3.31ค)$$

$$H_\phi^+ = H_\phi^- \quad (3.31ง)$$

ดังนั้น สนามภายนอกทรงกลมเท่ากับสนามภายในทรงกลมจะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\theta^+ - E_\theta^- = 0 \quad (3.32)$$

$$-\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} F_r^+ + \frac{1}{\hat{y}r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} A_r^+ + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} F_r^- - \frac{1}{\hat{y}r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} A_r^- = 0 \quad (3.32n)$$

$$E_\phi^+ - E_\phi^- = 0 \quad (3.33)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} F_r^+ + \frac{1}{\hat{y}r \sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \phi} A_r^+ - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} F_r^- - \frac{1}{\hat{y}r \sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \phi} A_r^- = 0 \quad (3.33n)$$

$$H_\theta^+ - H_\theta^- = 0 \quad (3.34)$$

$$\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} A_r^+ + \frac{1}{\hat{z}r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} F_r^+ - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} A_r^- - \frac{1}{\hat{z}r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} F_r^- = 0 \quad (3.34n)$$

$$H_\phi^+ - H_\phi^- = 0 \quad (3.35)$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} A_r^+ + \frac{1}{\hat{z}r \sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \phi} F_r^+ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} A_r^- - \frac{1}{\hat{z}r \sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \phi} F_r^- = 0 \quad (3.35n)$$

โดยที่

$$A_r^+ = \frac{E_0}{\omega \mu_d} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(k_0 a) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 a)] P_n^1(\cos \theta)$$

$$F_r^+ = \frac{E_0}{k_d} \sin \phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(k_0 a) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 a)] P_n^1(\cos \theta)$$

และ

$$A_r^- = \frac{E_0}{\omega \mu_0} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} d_n \hat{J}_n(k_d a) P_n^1(\cos \theta)$$

$$F_r^- = \frac{E_0}{k_0} \sin \phi \sum_{n=1}^{\infty} e_n \hat{J}_n(k_d a) P_n^1(\cos \theta)$$

ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{-\sqrt{\varepsilon_d \mu_0} \hat{J}_n'(k_0 a) \hat{J}_n(k_d a) + \sqrt{\varepsilon_0 \mu_d} \hat{J}_n(k_0 a) \hat{J}_n'(k_d a)}{\sqrt{\varepsilon_d \mu_0} \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 a) \hat{J}_n(k_d a) - \sqrt{\varepsilon_0 \mu_d} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 a) \hat{J}_n'(k_d a)} \cdot a_n \quad (3.36ก)$$

$$c_n = \frac{-\sqrt{\varepsilon_d \mu_0} \hat{J}_n(k_0 a) \hat{J}_n'(k_d a) + \sqrt{\varepsilon_0 \mu_d} \hat{J}_n'(k_0 a) \hat{J}_n(k_d a)}{\sqrt{\varepsilon_d \mu_0} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 a) \hat{J}_n'(k_d a) - \sqrt{\varepsilon_0 \mu_d} \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 a) \hat{J}_n(k_d a)} \cdot a_n \quad (3.36ข)$$

$$d_n = \frac{-j\sqrt{\varepsilon_d \mu_0}}{\sqrt{\varepsilon_d \mu_0} \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 a) \hat{J}_n(k_d a) - \sqrt{\varepsilon_0 \mu_d} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 a) \hat{J}_n'(k_d a)} \cdot a_n \quad (3.36ค)$$

$$e_n = \frac{j\sqrt{\varepsilon_0 \mu_d}}{\sqrt{\varepsilon_d \mu_0} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 a) \hat{J}_n'(k_d a) - \sqrt{\varepsilon_0 \mu_d} \hat{H}_n^{(2)'}(k_0 a) \hat{J}_n(k_d a)} \cdot a_n \quad (3.36ง)$$

โดยค่าที่แทนในการหาสัมประสิทธิ์จากสมการ (3.36ก) – (3.36ง) เป็นดังนี้

$$\hat{J}_n(k_0 a) = C_n(k_0 a) \sin\left(k_0 a - \frac{n\pi}{2}\right) + D_n(k_0 a) \cos\left(k_0 a - \frac{n\pi}{2}\right)$$

$$\hat{J}_n(k_d a) = C_n(k_d a) \sin\left(k_d a - \frac{n\pi}{2}\right) + D_n(k_d a) \cos\left(k_d a - \frac{n\pi}{2}\right)$$

$$\hat{H}_n^{(2)}(k_0 a) = j^n [D_n(k_0 a) + jC_n(k_0 a)] e^{-j(k_0 a)}$$

$$\hat{J}_n'(k_0 a) = \frac{d}{d(k_0 a)} \left[C_n(k_0 a) \sin\left(k_0 a - \frac{n\pi}{2}\right) + D_n(k_0 a) \cos\left(k_0 a - \frac{n\pi}{2}\right) \right]$$

$$\hat{J}_n'(k_d a) = \frac{d}{d(k_d a)} \left[C_n(k_d a) \sin\left(k_d a - \frac{n\pi}{2}\right) + D_n(k_d a) \cos\left(k_d a - \frac{n\pi}{2}\right) \right]$$

$$\hat{H}_n^{(2)'}(k_0 a) = \frac{d}{d(k_0 a)} [j^n [D_n(k_0 a) + jC_n(k_0 a)] e^{-j(k_0 a)}]$$

โดยที่

C_n และ D_n เป็นฟังก์ชันเบสเซล มีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_n(k_0 a) = \sum_{m=0}^{2m \leq n} \frac{(-1)^m (n+2m)!}{(2m)!(n-2m)!(2(k_0 a))^{2m}}$$

$$D_n(k_0 a) = \sum_{m=0}^{2m \leq n-1} \frac{(-1)^m (n+2m+1)!}{(2m+1)!(n-2m-1)!(2(k_0 a))^{2m+1}}$$

$$C_n(k_d a) = \sum_{m=0}^{2m \leq n} \frac{(-1)^m (n+2m)!}{(2m)!(n-2m)!(2(k_d a))^{2m}}$$

$$D_n(k_d a) = \sum_{m=0}^{2m \leq n-1} \frac{(-1)^m (n+2m+1)!}{(2m+1)!(n-2m-1)!(2(k_d a))^{2m+1}}$$

k_0 คือค่าคงตัวการแพร่กระจายในอวกาศว่าง

k_d คือค่าคงตัวการแพร่กระจายในทรงกลม

และฟังก์ชันเลอจอง คือ $P_n^{-1}(\cos \theta) = (-1)^1 (1 - \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \frac{d^1}{d(\cos \theta)^1} P_n(\cos \theta)$ ซึ่ง

$$P_n(\cos \theta) = \frac{1}{2^n \cdot n!} \frac{d^n}{d(\cos \theta)^n} (\cos^2 \theta - 1)^n$$

นำสมการ (3.7) แทนลงในสมการ (3.27) และ (3.28) หลังจากนั้นแทนค่าสัมประสิทธิ์เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าบริเวณสายอากาศรองที่ 2 และค่าสนามแม่เหล็กบริเวณสายอากาศรองที่ 1

$$A_r^+ = \frac{|\bar{E}|}{\omega \mu} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(kr)] P_n^{-1}(\cos \theta) \quad (3.37)$$

$$F_r^+ = \frac{|\bar{E}|}{k} \sin \phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(kr)] P_n^{-1}(\cos \theta) \quad (3.38)$$

แทนสมการ (3.37) และ (3.38) ลงในสมการ (3.16ก) – (3.16ค) จะได้องค์ประกอบสนามไฟฟ้าบริเวณสายอากาศรองที่ 2 ดังนี้

$$E_r = \frac{1}{\hat{y}} \left(\frac{\partial^2}{\partial r_2^2} A_r^+ + k^2 A_r^+ \right)$$

$$= \frac{1}{\hat{y}} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega \mu} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial^2}{\partial r_2^2} \hat{J}_n(kr_2) + b_n \frac{\partial^2}{\partial r_2^2} \hat{H}_n^{(2)}(kr_2) \right] P_n^{-1}(\cos \theta) \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \frac{k^2}{\hat{y}} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega\mu} \cos\phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr_2) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(kr_2)] P_n^1(\cos\theta) \right) \quad (3.39ก)$$

$$\begin{aligned} E_\theta &= \frac{-1}{r_2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial\phi} F_r^+ + \frac{1}{\hat{y}r_2} \frac{\partial^2}{\partial r_2 \partial\theta} A_r^+ \\ &= -\frac{1}{r_2 \sin\theta} \frac{|\bar{E}|}{k} \cos\phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr_2) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(kr_2)] P_n^1(\cos\theta) \\ &\quad + \frac{1}{\hat{y}r_2} \frac{|\bar{E}|}{\omega\mu} \cos\phi \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{J}_n(kr_2) + b_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{H}_n^{(2)}(kr_2) \right] \frac{\partial}{\partial\theta} P_n^1(\cos\theta) \end{aligned} \quad (3.39ข)$$

$$\begin{aligned} E_\phi &= \frac{1}{r_2} \frac{\partial}{\partial\theta} F_r^+ + \frac{1}{\hat{y}r_2 \sin\theta} \frac{\partial^2}{\partial r_2 \partial\phi} A_r^+ \\ &= \frac{1}{r_2} \frac{|\bar{E}|}{k} \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr_2) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(kr_2)] \frac{\partial}{\partial\theta} P_n^1(\cos\theta) \\ &\quad - \frac{1}{\hat{y}r_2 \sin\theta} \frac{|\bar{E}|}{\omega\mu} \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{J}_n(kr_2) + b_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{H}_n^{(2)}(kr_2) \right] P_n^1(\cos\theta) \end{aligned} \quad (3.39ค)$$

แทนสมการ (3.37) และ (3.38) ลงในสมการ (3.17ก)–(3.17ค) เพื่อหาองค์ประกอบสนามแม่เหล็กบริเวณสายอากาศร่องที่ 1 เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} H_r &= \frac{1}{\hat{z}} \left(\frac{\partial^2}{\partial r_1^2} F_r + k^2 F_r \right) \\ &= \frac{1}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k} \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{J}_n(kr_1) + c_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{H}_n^{(2)}(kr_1) \right] P_n^1(\cos\theta) \right) \\ &\quad + \frac{k^2}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k} \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr_1) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(kr_1)] P_n^1(\cos\theta) \right) \end{aligned} \quad (3.40ก)$$

$$\begin{aligned} H_\theta &= \frac{1}{r_1 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial\phi} A_r + \frac{1}{\hat{z}r_1} \frac{\partial^2}{\partial r \partial\theta} F_r \\ &= -\frac{1}{r_1 \sin\theta} \frac{|\bar{E}|}{\omega\mu} \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \hat{J}_n(kr_1) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(kr_1)] P_n^1(\cos\theta) \\ &\quad + \frac{1}{\hat{z}r_1} \frac{|\bar{E}|}{k} \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(kr_1) + c_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(kr_1) \right] \frac{\partial}{\partial\theta} P_n^1(\cos\theta) \end{aligned} \quad (3.40ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
H_\phi &= \frac{-1}{r_1} \frac{\partial}{\partial \theta} A_r + \frac{1}{\hat{z}r_1 \sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial r_1 \partial \phi} F_r \\
&= -\frac{1}{r_1} \frac{|\vec{E}|}{\omega\mu} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(kr_1) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(kr_1) \right] \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^1(\cos \theta) \\
&\quad + \frac{1}{\hat{z}r_1 \sin \theta} \frac{|\vec{E}|}{k} \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(kr_1) + c_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(kr_1) \right] P_n^1(\cos \theta) \quad (3.40ค)
\end{aligned}$$

เพื่อให้ง่ายในการหาคำตอบของฟังก์ชันเบสเซลทรงกลมและฟังก์ชันแฮนเกลทรงกลมชนิดที่สองที่ใช้ในคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้ใช้รูปแบบสมการ (3.41) ในการหาคำตอบ โดยที่ $B_{n+1/2}(kr)$ คือฟังก์ชันเบสเซล

$$\hat{B}_n(kr) = \sqrt{\frac{\pi kr}{2}} B_{n+1/2}(kr) \quad (3.41)$$

ซึ่งสามารถหาอนุพันธ์ย่อยในแต่ละสมการ (3.39ก) – (3.39ค) และ (3.40ก) – (3.40ค) โดยที่การสะท้อนกลับจากทรงกลมมายังสายอากาศครั้งที่ 1 และ 2 นั้นกำหนดให้เป็น r_1 และ r_2 ตามลำดับ การหาอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่งและสองของฟังก์ชันเบสเซลทรงกลม ที่ระยะ r_1

$$\frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(kr_1) = \sqrt{\frac{\pi(kr_1)}{2r_1^2}} J_{n+1/2}(kr_1) (2m + (n + 1/2)) + J_{n+1/2}(kr_1) \sqrt{\frac{\pi k}{8r_1}} \quad (3.42ก)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{J}_n(kr_1) &= \sqrt{\frac{\pi(kr_1)}{2r_1^4}} J_{n+1/2}(kr_1) \cdot (2m + (n + 1/2))^2 - \sqrt{\frac{\pi k}{2r_1^3}} J_{n+1/2}(kr_1) \cdot (2m + (n + 1/2)) \\
&\quad - \sqrt{\frac{\pi k}{32r_1^3}} J_{n+1/2}(kr_1) + \sqrt{\frac{\pi k}{8r_1^3}} J_{n+1/2}(kr_1) \cdot (2m + (n + 1/2)) \quad (3.42ข)
\end{aligned}$$

การหาอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่งและสองของฟังก์ชันแฮนเกลทรงกลมชนิดที่สอง ที่ระยะ r_1

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(kr_1) &= \sqrt{\frac{\pi(kr_1)}{2r_1^2}} \left[J_{n+1/2}(kr_1) \cdot (2m + (n + 1/2)) - j \left(\begin{aligned} &J_{n+1/2}(kr_1) \cdot (2m + (n + 1/2)) \cot((n + 1/2)\pi) \\ &- J_{-(n+1/2)}(kr_1) \cdot (2m - (n + 1/2)) \csc((n + 1/2)\pi) \end{aligned} \right) \right] \\
&\quad + \sqrt{\frac{\pi k}{8r_1}} \hat{H}_{n+1/2}^{(2)}(kr_1) \quad (3.43ก)
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{H}_n^{(2)}(kr_1) = & \sqrt{\frac{\pi k}{2r_1^3}} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(kr_1) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2}))^2 - j \left(\begin{aligned} & J_{n+\frac{1}{2}}(kr_1) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2}))^2 \cot((n + \frac{1}{2})\pi) \\ & - J_{-(n+\frac{1}{2})}(kr_1) \cdot (2m - (n + \frac{1}{2}))^2 \csc((n + \frac{1}{2})\pi) \end{aligned} \right) \right] \\ & - \sqrt{\frac{\pi k}{32r_1^3}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(kr_1) \end{aligned} \quad (3.43ข)$$

การหาอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่งและสองของฟังก์ชันเบสเซลทรงกลม ที่ระยะ r_2

$$\frac{\partial}{\partial r_2} \hat{J}_n(kr_2) = \sqrt{\frac{\pi(kr_2)}{2r_2^2}} J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) (2m + (n + \frac{1}{2})) + J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \sqrt{\frac{\pi k}{8r_2}} \quad (3.44ก)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial r_2^2} \hat{J}_n(kr_2) = & \sqrt{\frac{\pi(kr_2)}{2r_2^4}} J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2}))^2 - \sqrt{\frac{\pi k}{2r_2^3}} J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2})) \\ & - \sqrt{\frac{\pi k}{32r_2^3}} J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) + \sqrt{\frac{\pi k}{8r_2^3}} J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2})) \end{aligned} \quad (3.44ข)$$

การหาอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่งและสองของฟังก์ชันแฮนเกลทรงกลมชนิดที่สอง ที่ระยะ r_2

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{H}_n^{(2)}(kr_2) = & \sqrt{\frac{\pi(kr_2)}{2r_2^2}} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2})) - j \left(\begin{aligned} & J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2})) \cot((n + \frac{1}{2})\pi) \\ & - J_{-(n+\frac{1}{2})}(kr_2) \cdot (2m - (n + \frac{1}{2})) \csc((n + \frac{1}{2})\pi) \end{aligned} \right) \right] \\ & + \sqrt{\frac{\pi k}{8r_2}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(kr_2) \end{aligned} \quad (3.45ก)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial r_2^2} \hat{H}_n^{(2)}(kr_2) = & \sqrt{\frac{\pi k}{2r_2^3}} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2}))^2 - j \left(\begin{aligned} & J_{n+\frac{1}{2}}(kr_2) \cdot (2m + (n + \frac{1}{2}))^2 \cot((n + \frac{1}{2})\pi) \\ & - J_{-(n+\frac{1}{2})}(kr_2) \cdot (2m - (n + \frac{1}{2}))^2 \csc((n + \frac{1}{2})\pi) \end{aligned} \right) \right] \\ & - \sqrt{\frac{\pi k}{32r_2^3}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(kr_2) \end{aligned} \quad (3.45ข)$$

และการหาอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันเลอจองนั้นสามารถหาได้จาก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} P_n^1(\cos \theta) = \frac{1}{2} \{ (n)(n+1)P_n(\cos \theta) - P_n^2(\cos \theta) \} \quad (3.46)$$

$$\text{โดยที่ } P_n^2(\cos \theta) = (\sin \theta)^2 \frac{d^2 P_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)^2}$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าบริเวณสายอากาศครั้งที่ 2 ที่สะท้อนจากวัสดุทรงกลมคือ

$$\vec{E}_r(r, \theta, \phi) = E_r \hat{a}_r + E_\theta \hat{a}_\theta + E_\phi \hat{a}_\phi \quad (3.47)$$

แปลงสนามไฟฟ้าให้อยู่ในรูปพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$E_{x_{r_2}} = E_r \sin \theta \cos \phi + E_\theta \cos \theta \cos \phi - E_\phi \sin \phi$$

$$\begin{aligned} &= \left\{ \frac{1}{\hat{y}} \left(\frac{|\vec{E}|}{\omega \mu_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial^2 \hat{J}_n(k_0 r_2)}{\partial r_2^2} + b_n \frac{\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2)}{\partial r_2^2} \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right\} \\ &+ \frac{k_d^2}{\hat{y}} \left(\frac{|\vec{E}|}{\omega \mu_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_2) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right\} \\ &\cdot \sin \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \\ &+ \left[\frac{1}{r_2 \sin \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right)} \left(\frac{|\vec{E}|}{k_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_2) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right) \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& + \left\{ \frac{1}{r_2 \sin \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right)} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_2) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right) \right\} \\
& + \frac{1}{\hat{y} r_2} \left\{ \frac{|\bar{E}|}{\omega \mu_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \right. \\
& \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{J}_n(k_0 r_2) + b_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & (n)(n+1) P_n \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \\ & - P_n^2 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \end{aligned} \right\} \right\} \\
& \cdot \cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \\
& + \frac{1}{r_2} \left\{ \frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \right. \\
& \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_2) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & (n)(n+1) P_n \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \\ & - P_n^2 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \end{aligned} \right\} \right\} \\
& - \frac{1}{\hat{y} r_2 \sin \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right)} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega \mu_d} \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \right. \\
& \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{J}_n(k_0 r_2) + b_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right) \\
& \cdot \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right)
\end{aligned}$$

(3.48๙)

$$E_{zr_2} = E_r \cos \theta - E_\theta \sin \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \left\{ \frac{1}{\hat{y}} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega\mu_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial^2}{\partial r_2^2} \hat{J}_n(k_0 r_2) + b_n \frac{\partial^2}{\partial r_2^2} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right\} \\
&+ \frac{k_d^2}{\hat{y}} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega\mu_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_2) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right\} \\
&\cdot \cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \\
&- \left[\frac{1}{r_2 \sin \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right)} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_2) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] P_n^1 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \right) \right] \\
&+ \frac{1}{\hat{y} r_2} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega\mu_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{J}_n(k_0 r_2) + b_n \frac{\partial}{\partial r_2} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_2) \right] \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} (n)(n+1) P_n \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \\ - P_n^2 \left(\cos \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right) \right) \end{array} \right] \right) \right\} \\
&\cdot \sin \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{d}{a+z_2} \right) \right)
\end{aligned} \tag{3.48ค}$$

โดยที่ทรงกลมเป็นวัสดุตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย $\hat{y} = j\omega\epsilon$, $\hat{z} = j\omega\mu$ และ $k = \sqrt{-\hat{z}\hat{y}} = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ จะ
ได้ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนในรูปฟังก์ชันที่เหลี่ยมมุมฉาก คือ

$$\bar{E}_{r_2}(x, y, z) = E_{xr_2} \hat{a}_x + E_{yr_2} \hat{a}_y + E_{zr_2} \hat{a}_z \tag{3.49}$$

การหาค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 ทำได้เช่นเดียวกับการหาค่าสนามไฟฟ้า
บริเวณสายอากาศช่องที่ 2 ต่างกันเพียงตำแหน่ง คือ เปลี่ยนจาก r_2 เป็น r_1

$$\bar{E}_{r_1}(x, y, z) = E_{xr_1} \hat{a}_x + E_{yr_1} \hat{a}_y + E_{zr_1} \hat{a}_z \tag{3.50}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในส่วนของค่าสนามแม่เหล็กบริเวณปากสายอากาศรองที่ 1 ที่สะท้อนจากวัสดุทรงกลมหาได้ดังนี้

$$\bar{H}_r(r, \theta, \phi) = H_r \hat{a}_r + H_\theta \hat{a}_\theta + H_\phi \hat{a}_\phi \quad (3.51)$$

แปลงสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$H_{x\eta} = H_r \sin \theta \cos \phi + H_\theta \cos \theta \cos \phi - H_\phi \sin \phi$$

$$\begin{aligned} &= \left\{ \frac{1}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \right. \\ &+ \left. \frac{k_d^2}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \right\} \\ &\cdot \sin(\pi) \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \\ &+ \left\{ \frac{1}{r_1 \sin(\pi)} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega \mu_d} \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \right) \right. \\ &\cdot \left. \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right\} \\ &+ \left. \frac{1}{\hat{z} r_1} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \right) \right. \\ &\cdot \left. \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] \frac{1}{2} \left\{ (n)(n+1) P_n(\cos(\pi)) - P_n^2(\cos(\pi)) \right\} \right\} \\ &\cdot \cos(\pi) \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \\ &- \left. \frac{1}{r_1} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega \mu_d} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'}{x'} \right) \right) \right) \right. \\ &\cdot \left. \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] \frac{1}{2} \left\{ (n)(n+1) P_n(\cos(\pi)) - P_n^2(\cos(\pi)) \right\} \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \begin{aligned} & -\frac{1}{\hat{z}r_1 \sin(\pi)} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right. \\ & \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \\ & \cdot \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \end{aligned} \right\}$$

(3.52f)

$$H_{y_{r_1}} = H_r \sin \theta \sin \phi + H_\theta \cos \theta \sin \phi + H_\phi \cos \phi$$

$$\begin{aligned} & = \left\{ \frac{1}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \right. \\ & + \frac{k_d^2}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \\ & \left. \cdot \sin(\pi) \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right\} \\ & + \left\{ -\frac{1}{r_1 \sin(\pi)} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega \mu_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \right. \\ & + \frac{1}{\hat{z}r_1} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right. \\ & \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] \frac{1}{2} \{ (n)(n+1) P_n(\cos(\pi)) - P_n^2(\cos(\pi)) \} \right) \\ & \left. \cdot \cos(\pi) \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right\} \\ & - \left\{ \frac{1}{r_1} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega \mu_d} \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] \frac{1}{2} \{ (n)(n+1) P_n(\cos(\pi)) - P_n^2(\cos(\pi)) \} \right) \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& - \frac{1}{\hat{z}r_1 \sin(\pi)} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right. \\
& \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \\
& \cdot \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right)
\end{aligned} \tag{3.52ก}$$

$$H_{zr_2} = H_r \cos\theta - H_\theta \sin\theta$$

$$\begin{aligned}
& = \left\{ \frac{1}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial^2}{\partial r_1^2} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \right. \\
& \left. + \frac{k_d^2}{\hat{z}} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \right\} \cdot \cos(\pi) \\
& - \left\{ \frac{1}{r_1 \sin(\pi)} \left(\frac{|\bar{E}|}{\omega\mu_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \hat{J}_n(k_0 r_1) + b_n \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] P_n^1(\cos(\pi)) \right) \right. \\
& \left. + \frac{1}{\hat{z}r_1} \left(\frac{|\bar{E}|}{k_d} \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)\right) \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{J}_n(k_0 r_1) + c_n \frac{\partial}{\partial r_1} \hat{H}_n^{(2)}(k_0 r_1) \right] \frac{1}{2} \{n(n+1)P_n(\cos(\pi)) - P_n^2(\cos(\pi))\} \right) \right\} \cdot \sin(\pi)
\end{aligned} \tag{3.52ค}$$

โดยที่ทรงกลมเป็นวัสดุตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย $\hat{y} = j\omega\epsilon$, $\hat{z} = j\omega\mu$ และ $k = \sqrt{-\hat{z}\hat{y}} = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ จะได้ค่าสนามแม่เหล็กของคลื่นสะท้อนในรูปฟังก์ชันที่เหลี่ยมมุมฉาก คือ

$$\vec{H}_r(x, y, z) = H_{xr} \hat{a}_x + H_{yr} \hat{a}_y + H_{zr} \hat{a}_z \tag{3.53}$$

ในการหาค่าสนามแม่เหล็กของคลื่นสะท้อนบริเวณสายอากาศรองที่ 2 ทำได้เช่นเดียวกับการหาค่าสนามแม่เหล็กบริเวณสายอากาศรองที่ 1 ต่างกันเพียงตำแหน่ง คือ เปลี่ยนจาก r_1 เป็น r_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{H}_{r_2}(x, y, z) = H_{xr_2} \hat{a}_x + H_{yr_2} \hat{a}_y + H_{zr_2} \hat{a}_z \quad (3.54)$$

ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้ารวมบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 คือ

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(x, y, z) &= \vec{E}_{i_1} + \vec{E}_{r_1} = (E_{xi_1} + E_{xr_1}) \hat{a}_x + (E_{yi_1} + E_{yr_1}) \hat{a}_y + (E_{zi_1} + E_{zr_1}) \hat{a}_z \\ &= E_{x1} \hat{a}_x + E_{y1} \hat{a}_y + E_{z1} \hat{a}_z \end{aligned} \quad (3.55)$$

ค่าสนามแม่เหล็กรวมบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 คือ

$$\begin{aligned} \vec{H}_1(x, y, z) &= \vec{H}_{i_1} + \vec{H}_{r_1} = (H_{xi_1} + H_{xr_1}) \hat{a}_x + (H_{yi_1} + H_{yr_1}) \hat{a}_y + (H_{zi_1} + H_{zr_1}) \hat{a}_z \\ &= H_{x1} \hat{a}_x + H_{y1} \hat{a}_y + H_{z1} \hat{a}_z \end{aligned} \quad (3.56)$$

และค่าสนามไฟฟ้ารวมบริเวณสายอากาศช่องที่ 2 คือ

$$\begin{aligned} \vec{E}_2(x, y, z) &= \vec{E}_{i_2} + \vec{E}_{r_2} = (E_{xi_2} + E_{xr_2}) \hat{a}_x + (E_{yi_2} + E_{yr_2}) \hat{a}_y + (E_{zi_2} + E_{zr_2}) \hat{a}_z \\ &= E_{x2} \hat{a}_x + E_{y2} \hat{a}_y + E_{z2} \hat{a}_z \end{aligned} \quad (3.57)$$

3.4 การหาค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมและแอดมิตแตนซ์ตัวเอง

พิจารณาค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมได้โดยนำค่าสนามแม่เหล็กรวมบริเวณสายอากาศช่องที่ 2 และสนามไฟฟ้ารวมบริเวณสายอากาศช่องที่ 1 แทนลงในสมการ (3.58)

$$Y_{12} = \frac{1}{V_1 V_2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} (\vec{E}_2 \times \vec{H}_1) \cdot \hat{a}_z dy \quad (3.58)$$

โดยที่

$$\vec{E}_2 \times \vec{H}_1 = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ E_{x2} & E_{y2} & E_{z2} \\ H_{x1} & H_{y1} & H_{z1} \end{vmatrix} = (E_{y2} H_{z1} - E_{z2} H_{y1}) \hat{a}_x + (E_{z2} H_{x1} - E_{x2} H_{z1}) \hat{a}_y + (E_{x2} H_{y1} - E_{y2} H_{x1}) \hat{a}_z$$

จัดรูปสมการ (3.58) ได้ใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 Y_{12} &= \frac{1}{V_1 V_2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} ((E_{x2} H_{y1} - E_{y2} H_{x1}) \hat{a}_z) \cdot \hat{a}_z dy \\
 &= \frac{1}{V_1 V_2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \left(E_{x_{i2}} H_{y_{i1}} + E_{x_{i2}} H_{y_{r1}} + E_{x_{r2}} H_{y_{i1}} + E_{x_{r2}} H_{y_{r1}} \right. \\
 &\quad \left. - E_{y_{i2}} H_{x_{i1}} - E_{y_{i2}} H_{x_{r1}} - E_{y_{r2}} H_{x_{i1}} - E_{y_{r2}} H_{x_{r1}} \right) dy \quad (3.59)
 \end{aligned}$$

นำสมการ (3.13), (3.15), (3.48ก) – (3.48ค) และ (3.52ก) – (3.52ค) แทนลงในสมการ (3.59) อินทิเกรตแต่ละพจน์โดยใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขแล้วนำผลลัพธ์แต่ละสมการรวมกัน นั่นคือค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมในกรณีสายอากาศร่องวางอยู่ใกล้วัตถุทรงกลมและการหาค่าแอดมิตแดนซ์ตัวเองทำได้โดยการนำค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดบริเวณสายอากาศร่องที่ 1 ที่เป็นของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนมารวมกัน แทนค่าลงในสมการ (3.60) ดังนี้

$$Y_{11} = \frac{1}{V_1^2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} (\vec{E}_1 \times \vec{H}_1) \cdot \hat{a}_z dy \quad (3.60)$$

โดยที่

$$\vec{E}_1 \times \vec{H}_1 = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ E_{x1} & E_{y1} & E_{z1} \\ H_{x1} & H_{y1} & H_{z1} \end{vmatrix} = (E_{y1} H_{z1} - E_{z1} H_{y1}) \hat{a}_x + (E_{z1} H_{x1} - E_{x1} H_{z1}) \hat{a}_y + (E_{x1} H_{y1} - E_{y1} H_{x1}) \hat{a}_z$$

จากสมการ (3.60) จัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= \frac{1}{V_1^2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} ((E_{x1} H_{y1} - E_{y1} H_{x1}) \hat{a}_z) \cdot \hat{a}_z dy \\
 &= \frac{1}{V_1^2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} (E_{x_{i1}} H_{y_{i1}} + E_{x_{i1}} H_{y_{r1}} + E_{x_{r1}} H_{y_{i1}} + E_{x_{r1}} H_{y_{r1}} - E_{y_{i1}} H_{x_{i1}} - E_{y_{i1}} H_{x_{r1}} - E_{y_{r1}} H_{x_{i1}} - E_{y_{r1}} H_{x_{r1}}) dy \quad (3.61)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

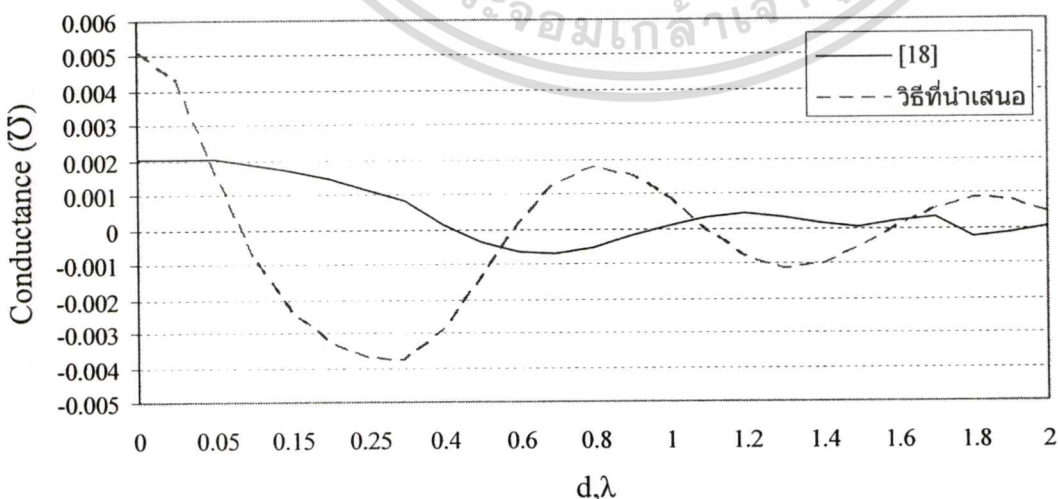
นำสมการ (3.11), (3.13), (3.48ก) – (3.48ค) และ (3.50) แทนลงในสมการ (3.61) แยกอินทิเกรตแต่ละพจน์หาคำตอบโดยใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขจะได้ผลลัพธ์ในแต่ละสมการแล้วนำมารวมกัน ซึ่งจะได้ค่าแอดมิตแตนซ์ตัวเองในกรณีสายอากาศร่องวางอยู่ใกล้กับวัตถุทรงกลม

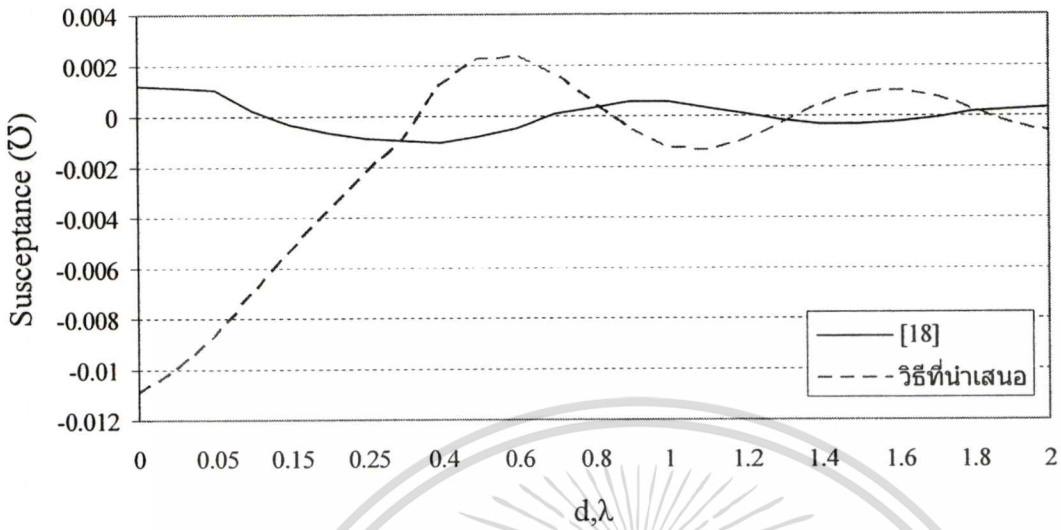
สำหรับการหาค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องนั้นให้นำค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมและแอดมิตแตนซ์ตัวเองแทนลงในสูตรการหาพารามิเตอร์การกระจายตามสมการ (2.120ก) – (2.120ง) โดยที่ S_{12} เท่ากับ S_{21} คือค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องเมื่อมีวัตถุทรงกลมวางอยู่ใกล้

3.5 การพิสูจน์สูตรคำนวณแอดมิตแตนซ์ร่วมในอวกาศว่าง

การคำนวณสายอากาศร่องกับทรงกลมในอวกาศว่างจะได้เปรียบเทียบกับสายอากาศที่ไม่มีตัวกลางทรงกลมในอวกาศว่างเพื่อดูความสัมพันธ์ของค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมจากสูตรที่คำนวณว่ามีความสอดคล้องกับกรณีสายอากาศร่องวางอยู่ในอวกาศว่างที่ใช้อ้างอิงมากน้อยเพียงใด ซึ่งเหมือนกับการพิสูจน์สูตรคำนวณสายอากาศร่องกับตัวกลางสองชั้นในบทที่ 2 โดยใช้ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์เช่นเดียวกัน

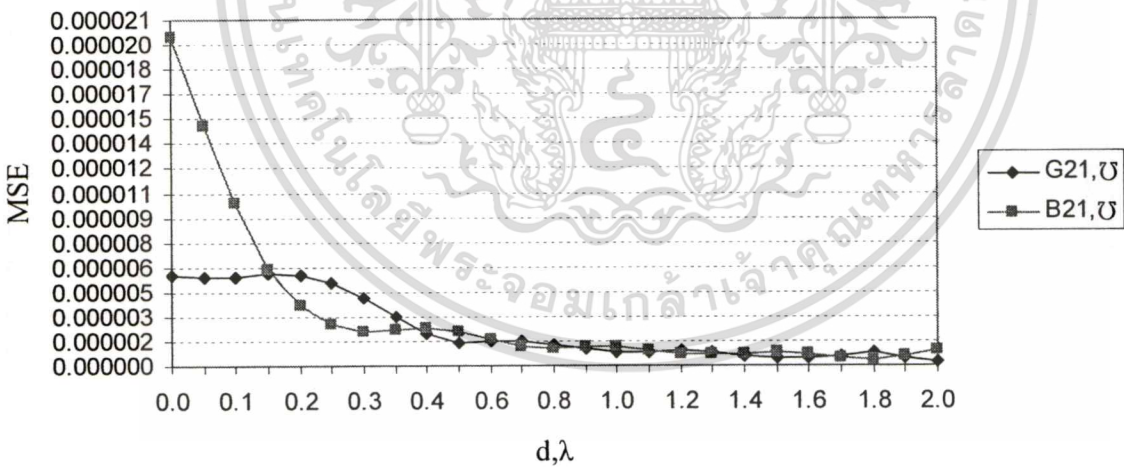
รูปที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศร่องที่ใช้อ้างอิงกับสายอากาศร่องที่ได้จากสูตรคำนวณเมื่อไม่มีทรงกลม ซึ่งค่าแอดมิตแตนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศร่องที่ได้จากสูตรคำนวณมีแนวโน้มค่าใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิง [18] จากรูปที่ 3.3 แสดงการเฉลี่ยค่าผิดพลาดของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง พบว่าค่าเฉลี่ยความผิดพลาดไม่เปลี่ยนแปลงที่ระยะมากกว่า 1λ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ต่างกับระยะที่น้อยกว่า 1λ มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ทั้งนี้เป็นเพราะเงื่อนไขการคำนวณหาค่าสนามด้วยวิธีเฟสคงที่ ซึ่งระยะ r ต้องไกลพอที่จะทำให้สนามเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด





(ข) Susceptance

รูปที่ 3.2 แอดมิตแตนซ์ร่วมของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง



รูปที่ 3.3 การเฉลี่ยค่าผิดพลาดของสายอากาศร่องในอวกาศว่าง

3.6 สรุป

ทฤษฎีการกระจายคลื่นระนาบบนทรงกลมได้ถูกนำมาอธิบายในรูปแบบโครงสร้างสายอากาศร่องที่มีทรงกลมวางอยู่ใกล้ ต่างจากบทที่ 2 ที่เป็นตัวกลางสองชั้น โดยใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นออกจากร่องของสายอากาศส่งเช่นเดียวกับตัวกลางที่เป็นชั้น แต่การหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏยังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งใดๆ บนทรงกลมจำเป็นต้องทราบศักย์แวกเตอร์ \vec{A} และ \vec{F} ก่อนซึ่งต้องใช้การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตการเกิดสนามทั้งภายในและภายนอกทรงกลม โดยที่จำนวนลำดับอนุกรม n มีค่า 100 ขึ้นไปจึงทำให้หาค่าประกอบ A_r และ F_r คงที่ แก่สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าตอบอยู่ในรูปฟังก์ชันเบสเซลทรงกลม ฟังก์ชันแฮนเกลทรงกลม และฟังก์ชันเลอจองด์แล้วแทนค่าหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก หลังจากนั้นจึงนำค่าสนามดังกล่าวไปคำนวณหาแอมิตแดนซ์ร่วมและแอมิตแดนซ์ตัวเองเพื่อหาค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องตามลำดับ ในส่วนท้ายของบทเป็นการพิสูจน์ความเชื่อถือได้ของการคำนวณเทียบกับสายอากาศร่องที่วางอยู่ในอวกาศว่าง พบว่าผลการคำนวณค่าแอมิตแดนซ์ร่วมมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลอ้างอิงและสังเกตได้ว่าแต่ละช่วงมีค่าแอมิตแดนซ์ต่างกัน ดังนั้นเวลานำไปใช้งานจริงต้องมีค่าแฟกเตอร์สำหรับเทียบวัดกับข้อมูลอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

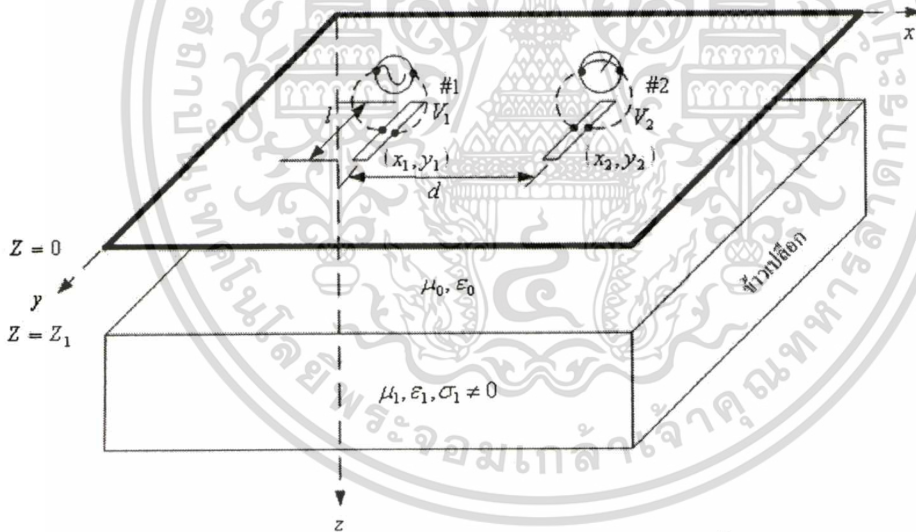
บทที่ 4

ผลการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องไถ้ตัวกลาง สองชั้นและทรงกลม

4.1 กล่าวนำ

วิธีการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศแบบร่องที่วางไถ้ตัวกลางสองชั้นและทรงกลม ได้วิเคราะห์ดังแสดงในบทที่ 2 และ 3 ตามลำดับ สำหรับในบทนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการเชื่อมต่อร่วมจากโครงสร้างดังกล่าว ที่สัมพันธ์กับปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงหลายประการ เช่น ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง ระยะระหว่างสายอากาศถึงตัวกลาง ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง เป็นต้น

4.2 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องไถ้ตัวกลางสองชั้น



รูปที่ 4.1 การวางสายอากาศอยู่ไถ้ตัวกลางสองชั้น

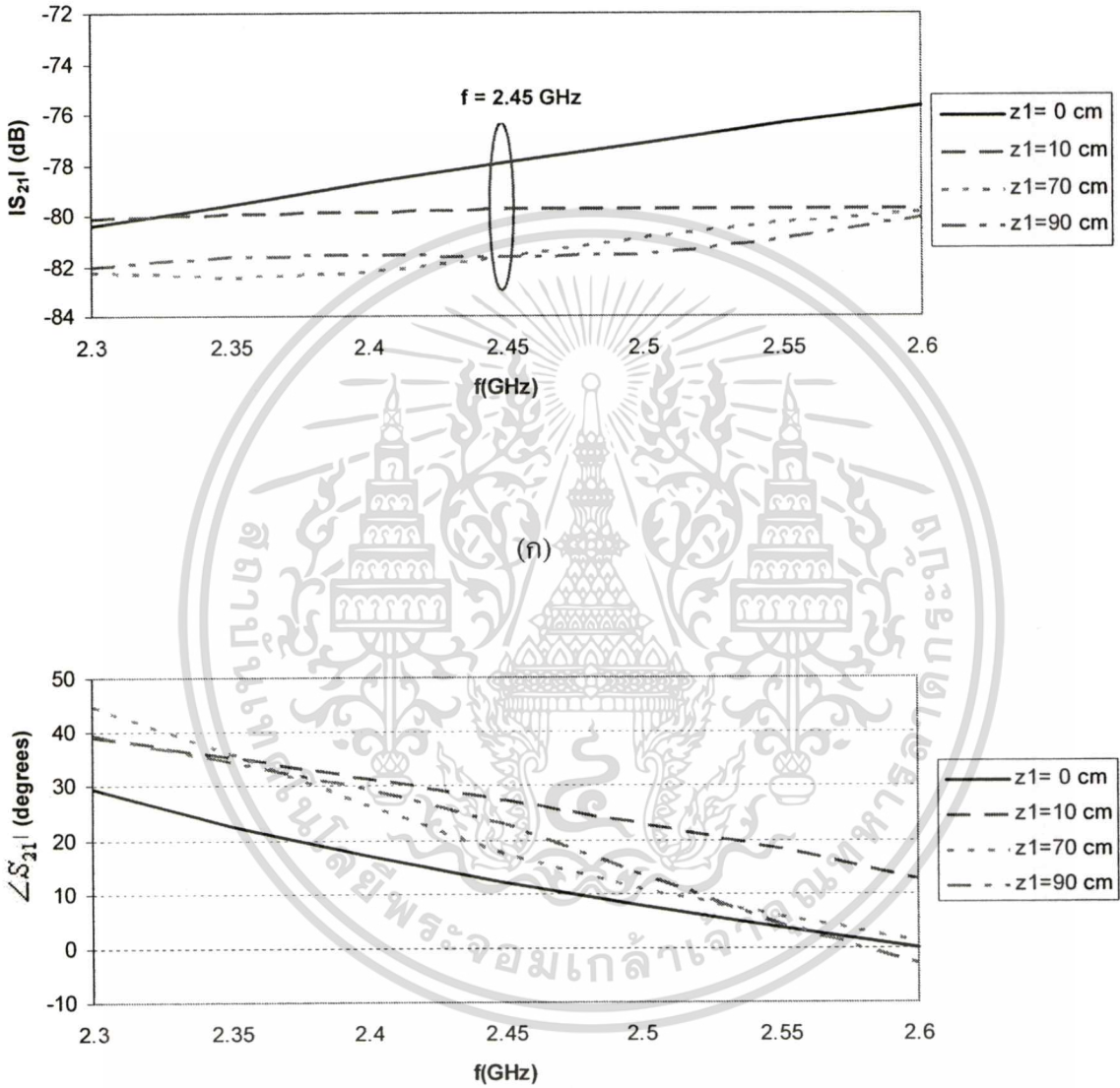
ในการวิเคราะห์รูปแบบปัญหาตัวกลางที่เป็นชั้นจะนำสายอากาศร่องมีความยาวร่อง l เท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้ ตำแหน่งร่องที่ 1 และ 2 คือ (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งร่องทั้งสองห่างกันเป็นระยะ d วางอยู่เหนือตัวกลางโดยให้ตัวกลางชั้นที่ 1 เป็นอวกาศว่างและตัวกลางชั้นที่ 2 เป็นข้าวเปลือก ระยะห่างจากสายอากาศถึงตัวกลางชั้นที่ 2 ห่างกันเป็นระยะ z_1 ดังรูปที่ 4.1 จะคำนวณโดยใช้ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ในการส่งคลื่นไปยังตัวกลางที่เป็นข้าวเปลือก โดยแยกเป็นสองกรณี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ขั้วเปลือกความชื้น 21.22 % ($\epsilon'_r = 3.474, \epsilon''_r = 0.537$)

4.2.1.1 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือก (z_1)

กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร



(จ)

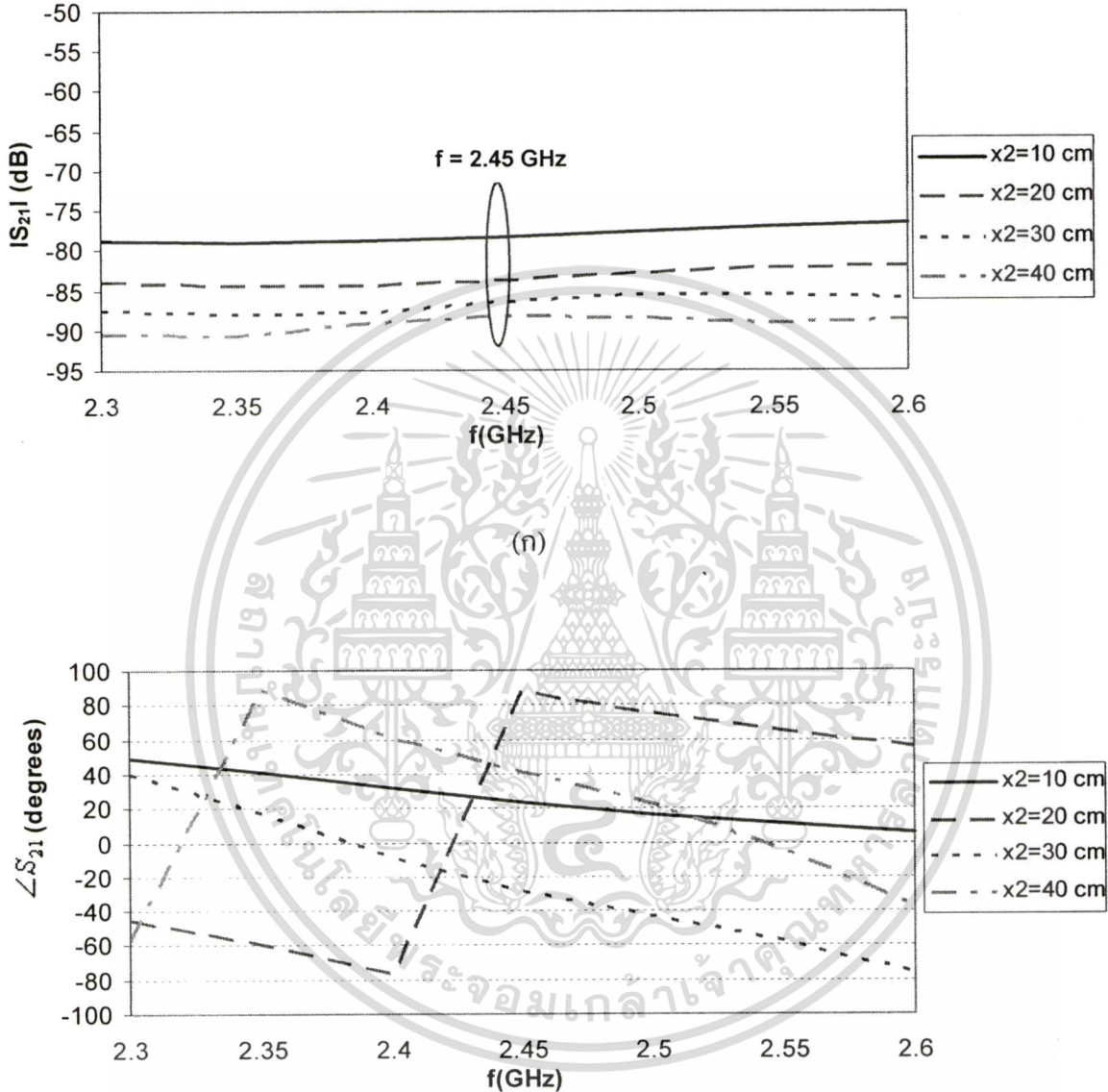
รูปที่ 4.2 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือกความชื้น 21.22%

(ก) ขนาด และ (ข) เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศสอง (x₂)

กำหนดให้ ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือก (z₁) เท่ากับ 70 เซนติเมตร



(ข)

รูปที่ 4.3 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศสองกับขั้วเปลือกความถี่

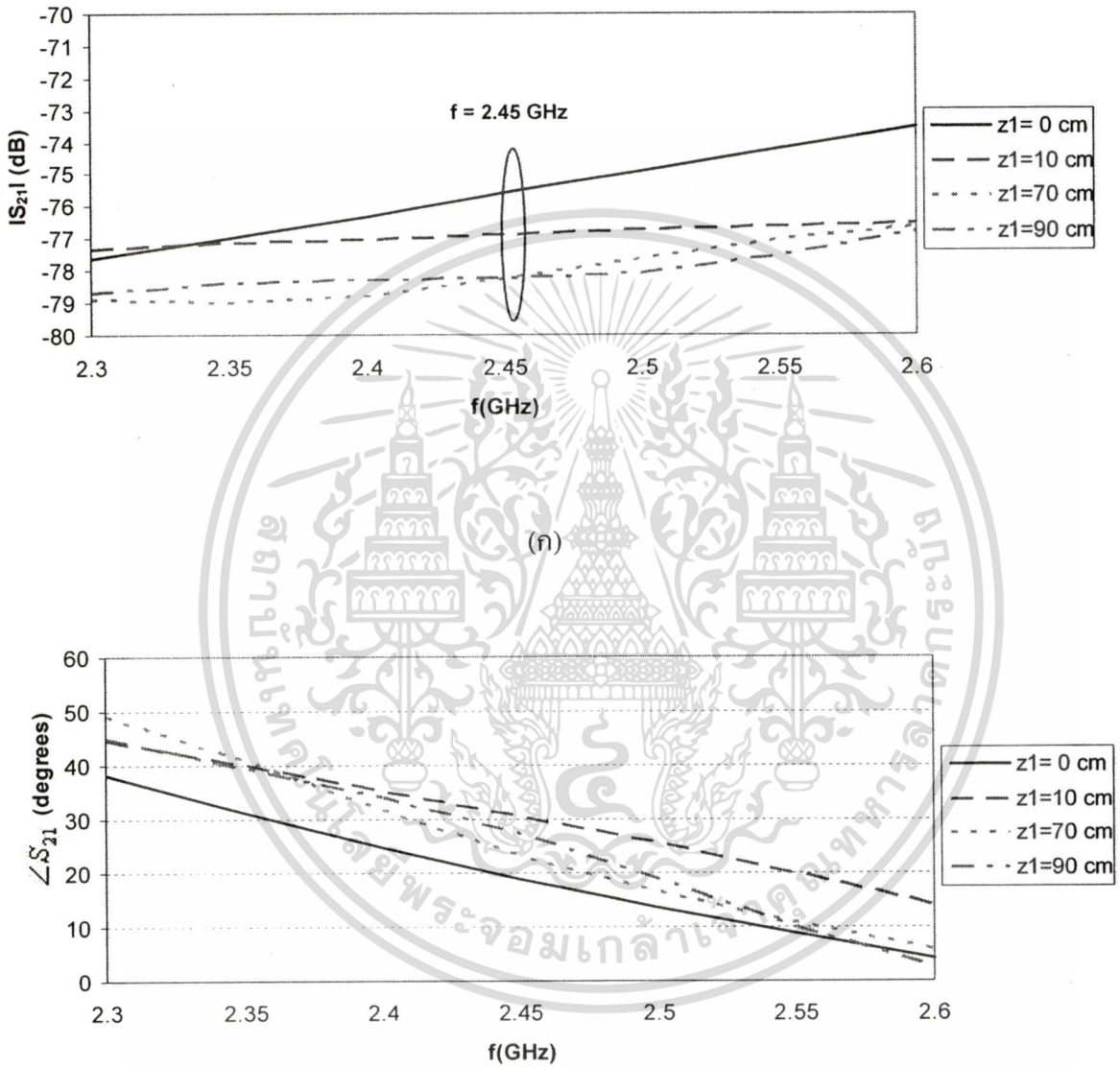
21.22% (ก) ขนาด และ (ข) เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ข้าวเปลือกความชื้น 12.19 % ($\epsilon'_r = 2.395, \epsilon''_r = 0.284$)

4.2.2.1 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับข้าวเปลือก (z_1)

กำหนดให้ ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร



(ข)

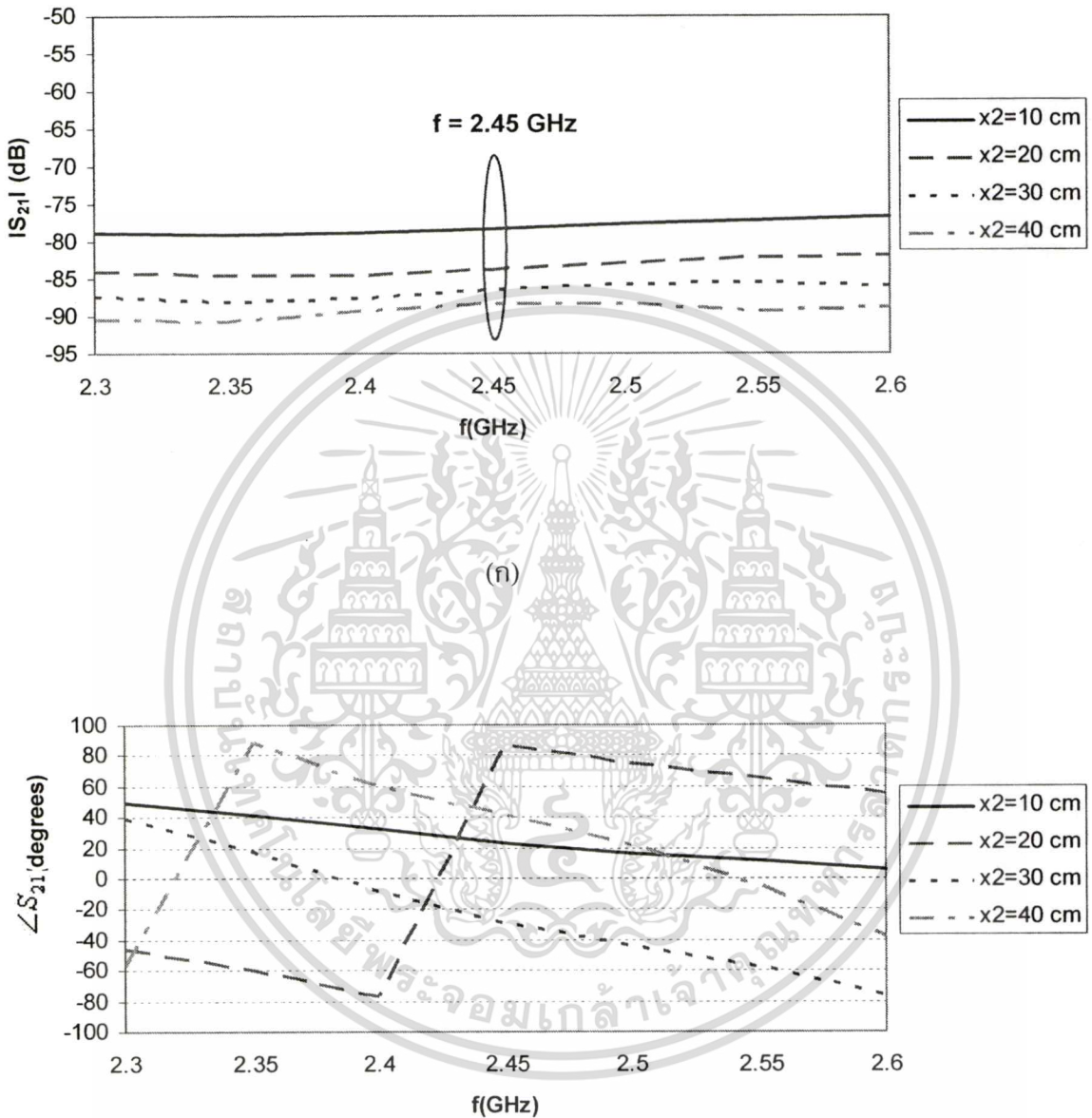
รูปที่ 4.4 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับข้าวเปลือกความชื้น 12.19%

(ก) ขนาด และ (ข) เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศช่อง (x_2)

กำหนดให้ ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือก (z_1) เท่ากับ 70 เซนติเมตร



(ข)

รูปที่ 4.5 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศช่องกับขั้วเปลือกความขึ้น
12.19% (ก) ขนาด และ (ข) เฟส

จากผลการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมสายอากาศช่องอยู่ใกล้ขั้วเปลือกที่ระดับความขึ้น 21.22% และ 12.19% พบว่าตัวแปรระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือกสามารถชี้ให้เห็นถึงความไม่แน่นอนใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

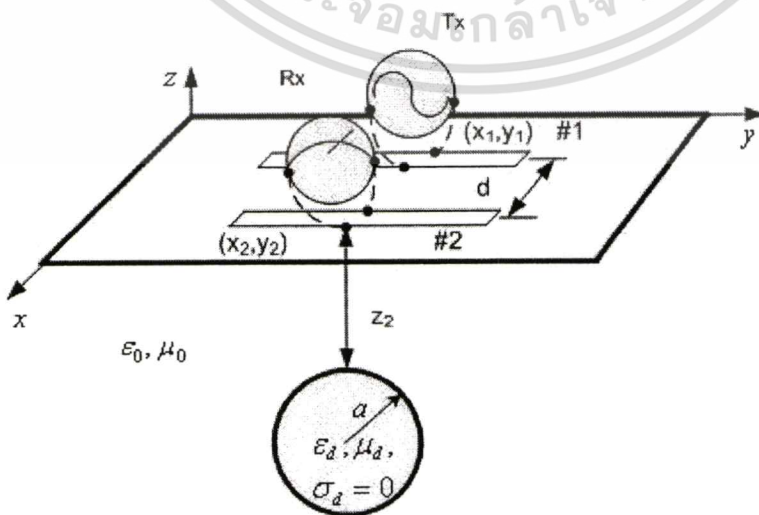
แตกต่างของค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่อง กล่าวคือที่ขั้วเปลือกระดับความถี่ 21.22 % ค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องจะมีค่าที่น้อยกว่าขั้วเปลือกที่ระดับความถี่ 12.19 % ส่วนตัวแปรระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง ค่าการเชื่อมต่อร่วมมีค่าอยู่ที่ระดับใกล้เคียงกันทั้งสองความถี่ และจากผลการคำนวณความถี่ในช่วง 2.3 ถึง 2.6 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าขนาดค่าการเชื่อมต่อร่วมมีค่ามากตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความยาวร่องคงที่แต่ความยาวคลื่นสั้นลง ซึ่งตรงกันข้ามกับเฟสของการเชื่อมต่อร่วมที่มีลักษณะลดลงและเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกองขั้วเปลือก (z_1) ห่างกันมากกว่า 70 เซนติเมตร ค่าการเชื่อมต่อร่วมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยสอดคล้องกับวิธีเฟสคงที่ สำหรับการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2) ระยะ 10 เซนติเมตร จะให้ค่าการเชื่อมต่อร่วมมากที่สุด

ในการวิเคราะห์ผลการคำนวณที่ระดับความถี่ขั้วเปลือกต่างกันนี้ก็เพื่อดูค่าการเชื่อมต่อร่วมว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใดซึ่งพบว่าที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ (x_2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร z_1 เท่ากับ 70 เซนติเมตร) ขั้วเปลือกความถี่ 21.22% และ 12.19% มีค่าขนาดการเชื่อมต่อร่วม 8.289×10^{-5} และ 1.222×10^{-4} ตามลำดับ ดังนั้นเป็นการยืนยันได้ว่าสายอากาศที่ใช้ทดสอบสามารถตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงในตัวกลางขั้วเปลือกได้

4.3 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลม

จากสูตรที่คำนวณได้กำหนดให้ทรงกลมเป็นตัวกลางเนื้อเดียวกันไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นในการคำนวณจึงคิดเฉพาะค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r') เพื่อให้ได้ผลการคำนวณค่าการเชื่อมต่อร่วมมากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้มองไปถึงวัสดุที่ใช้ทดลองจากที่ตัวกลางทรงกลมไม่มีการสูญเสียค้นหาได้ยาก ดังนั้นจึงใช้ของเหลวที่เป็นเนื้อเดียวกันที่หาได้ง่ายแต่เป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียมาวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ผลการวัดกับผลการคำนวณนั้นต่างกัน

4.3.1 การวิเคราะห์รูปแบบปัญหาการวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลมในอวกาศว่าง

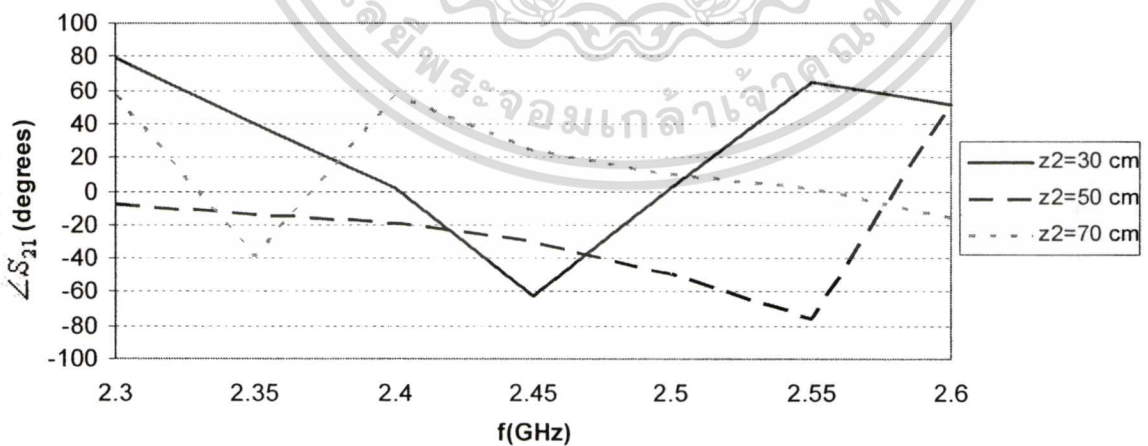
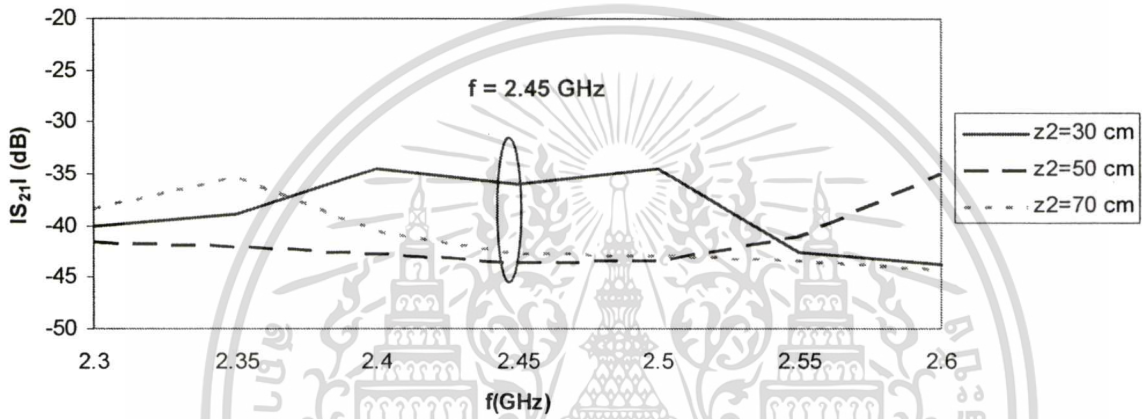


รูปที่ 4.6 การวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลมในอวกาศว่างนำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ผลการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องที่มีตัวกลางทรงกลมที่มีคุณสมบัติเป็นน้ำ ($\epsilon'_r = 77.8828, \epsilon''_r = 8.96801$) วางอยู่ในอวกาศว่างเช่นเดียวกับสายอากาศโดยแยกเป็นแต่ละกรณีดังนี้

4.3.1.1. เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวกลางทรงกลม (z_2)

กำหนดให้ ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร และรัศมีทรงกลม (a) เท่ากับ 3.58 เซนติเมตร



(ข)

รูปที่ 4.7 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องเมื่อเปลี่ยนระยะห่างของทรงกลมในอวกาศว่าง

เอกสารนี้เป็น (ก) ขนกัด และ (ข) เฟส การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 เมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติตัวกลางทรงกลม ($\epsilon_r', \epsilon_r''$) เป็น น้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลา และ น้ำหวาน จำนวนที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลม (z_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร 70 เซนติเมตร ตามลำดับ และรัศมีทรงกลม (a) เท่ากับ 3.58 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.1 การเชื่อมต่อรวมเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางทรงกลมในอวกาศว่าง

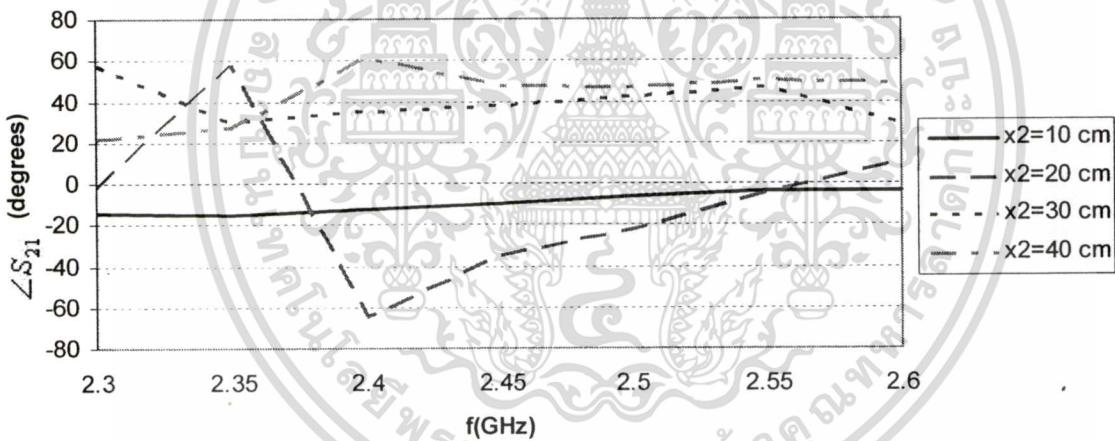
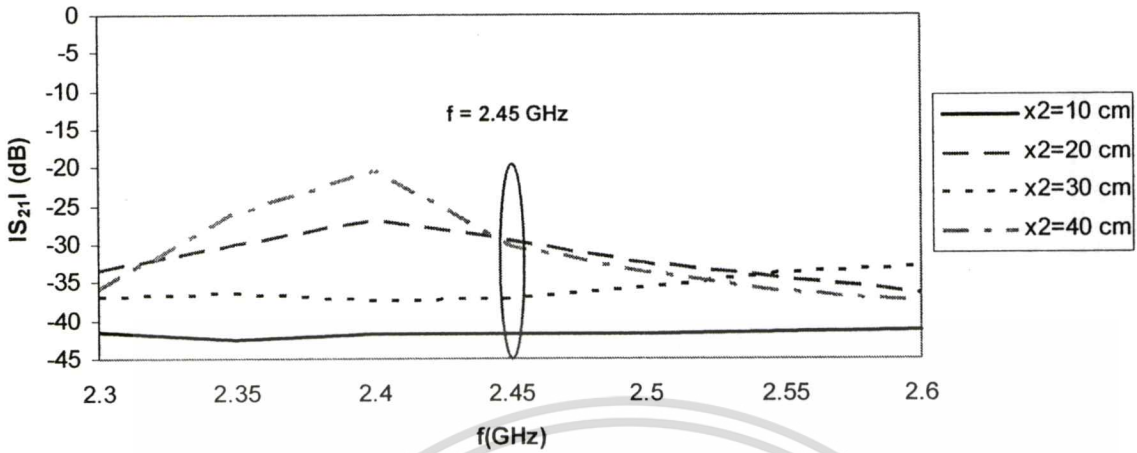
ตัวกลาง ของเหลว	คุณสมบัติไดอิเล็กตริก		S ₂₁ (dB)		∠S ₂₁ (Deg.)	
	ϵ_r'	ϵ_r''	z ₂ =10cm	z ₂ =70cm	z ₂ =10cm	z ₂ =70cm
น้ำ	77.78828	8.96801	-41.76120	-42.83078	-10.26530	24.59110
น้ำส้มสายชู	75.86752	10.55256	-41.75474	-42.88635	-10.26470	24.38181
น้ำปลา	44.93471	160.9896	-39.84004	-42.02321	-10.96243	12.50998
น้ำหวาน	22.84218	14.48351	-42.30360	-45.29967	-18.31212	21.69174

4.3.1.3. เมื่อเปลี่ยนรัศมีตัวกลางทรงกลม (a) ใช้ตัวกลางเป็นน้ำจำนวนที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้ ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลม (z_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร และ 70 เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 การเชื่อมต่อรวมเมื่อเปลี่ยนรัศมีของทรงกลมในอวกาศว่าง

a (cm)	S ₂₁ (dB)		∠S ₂₁ (Deg.)	
	z ₂ =10cm	z ₂ =70cm	z ₂ =10cm	z ₂ =70cm
3.58	-41.76120	-42.83078	-10.2653	24.5911
4.46	-42.17352	-42.76900	-21.44749	10.26044
6.76	-43.78136	-43.11954	-44.37384	-9.346312

4.3.1.4. เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง (x_2) กำหนดให้ ระยะห่างระหว่างทรงกลมกับสายอากาศ (z_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร รัศมีทรงกลม (a) เท่ากับ 3.58 เซนติเมตร



(จ)

รูปที่ 4.8 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่งที่มีทรงกลมในอวกาศว่าง
(ก) ขนาด และ (ข) เฟส

ผลการคำนวณทั้ง 4 กรณี แสดงให้เห็นว่าการปรับระยะห่างทรงกลมกับสายอากาศ คุณสมบัติตัวกลางทรงกลม ขนาดทรงกลมและระยะห่างระหว่างสายอากาศร่ง ค่าการเชื่อมต่อร่วมมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละกรณี กล่าวคือในช่วงความถี่ 2.3 ถึง 2.6 กิกะเฮิรตซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมต่อร่วมในแต่ละระยะห่างของทรงกลมกับสายอากาศ เนื่องจากลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรวงอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

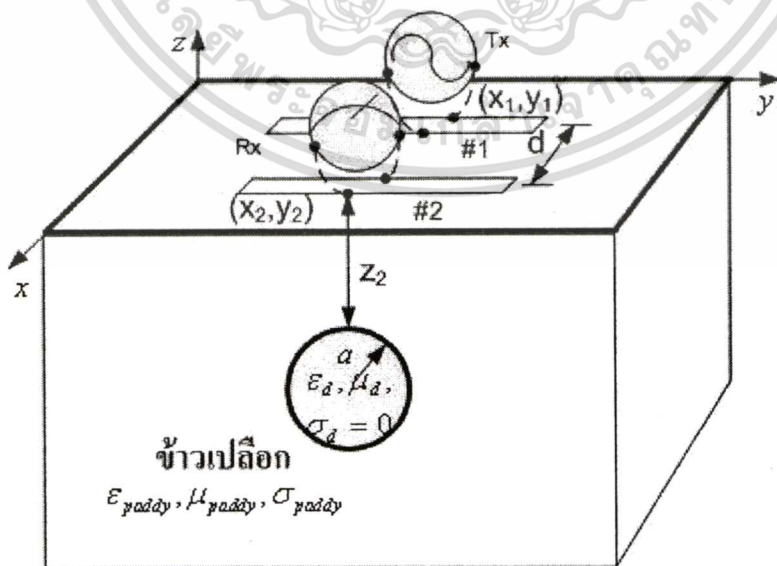
กลมมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง สังกะสีที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ระยะที่ทำให้ค่าการเชื่อมต้อมีค่าใกล้เคียงอยู่ในระดับเดียวกันและสอดคล้องกับวิธีเฟสคงที่คือระยะ 50 เซนติเมตรและ 70 เซนติเมตรตามลำดับ

กรณีเปลี่ยนคุณสมบัติตัวกลางทรงกลมพบว่าตัวกลางที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่างกันเล็กน้อยมีผลต่อการเชื่อมต้อมากกว่าคือ ที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมากมีผลทำให้ค่าการเชื่อมต้อมากตามกัน และมีบางกรณีที่ไม่เป็นตามนั้น ซึ่งอาจจะเป็นเพราะทรงกลมที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่างกันทำให้ลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมต่างกัน จากตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำปามีค่าการเชื่อมต้อมากที่สุด น้ำกับน้ำส้มสายชูมีค่าใกล้เคียงกัน และน้ำหวานมีค่าการเชื่อมต้อมีน้อยที่สุด

กรณีเปลี่ยนรัศมีทรงกลมที่ขนาดทรงกลมใหญ่ขึ้นผลการคำนวณการเชื่อมต้อมลดลงเพราะอิทธิพลของทรงกลมมีผลต่อการเชื่อมต้อมากกว่าตารางที่ 4.2 พบว่าการเปลี่ยนขนาดทรงกลมที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร จะได้ค่าการเชื่อมต้อมากที่สุดของขนาด 3.58 เซนติเมตรมีการเชื่อมต้อมากที่สุดรองลงมาเป็นขนาด 4.46 เซนติเมตรและขนาด 6.76 เซนติเมตรที่มีการเชื่อมต้อมีน้อยที่สุดกับที่ระยะห่าง 70 เซนติเมตรที่เป็นระยะจุดเฟสคงที่ค่าการเชื่อมต้อมีค่าใกล้เคียงกันตรงขนาด 3.58 เซนติเมตร ทั้งนี้ อาจจะเป็นเพราะระยะห่างมากขึ้นทำให้ลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมต่างกัน

การที่คำนวณในหัวข้อนี้ก็เพื่อแสดงความสัมพันธ์ค่าการเชื่อมต้อมีค่ากับระยะห่างระหว่างร่องระยะวัตถุทรงกลม ขนาดทรงกลมและคุณสมบัติตัวกลางทรงกลม ในสูตรที่คำนวณว่าเมื่อมีการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ค่าการเชื่อมต้อมีแนวโน้มเป็นอย่างไร สามารถนำไปวิเคราะห์กับกรณีผลไม้ที่มีรสชาติต่างกันหรือในผลไม้ที่มีตำหนิได้หรือไม่

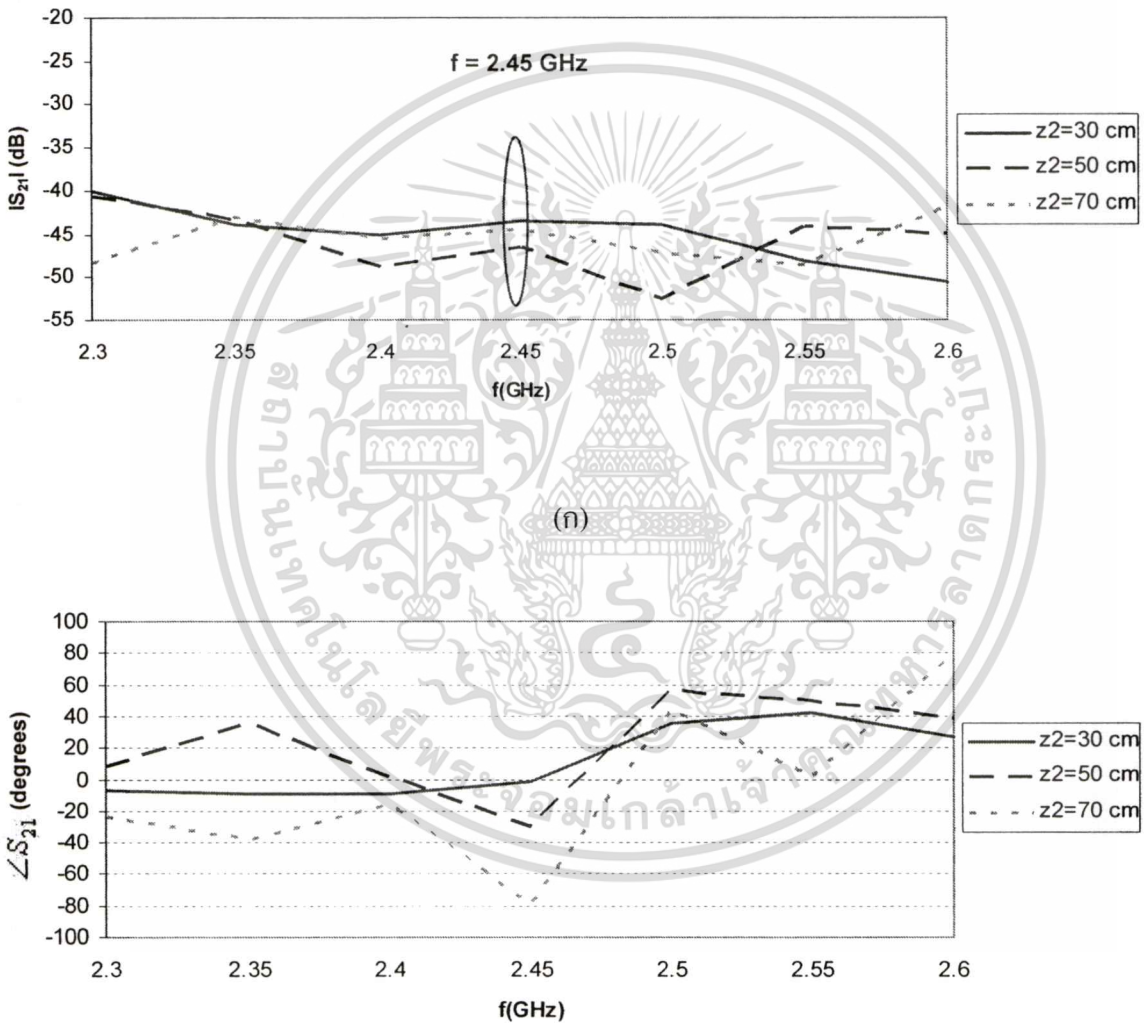
4.3.2 การวิเคราะห์รูปแบบปัญหาการวางสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางทรงกลมในข้าวเปลือก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปลี่ยนรูปแบบปัญหาสายอากาศและทรงกลมที่อยู่ในอวกาศว่างมาเป็นในตัวกลางข้าวเปลือกที่มีความชื้น 12.19 % ($\epsilon'_r = 2.395, \epsilon''_r = 0.284$) จะแยกเป็นแต่ละกรณีดังนี้

4.3.2.1 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลม (z_2) กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร และรัศมีทรงกลม (a) เท่ากับ 3.58 เซนติเมตร



(ข)

รูปที่ 4.10 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศสองเมื่อเปลี่ยนระยะห่างของทรงกลมในข้าวเปลือก

(ก) ขนาด และ (ข) เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 เมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติตัวกลางทรงกลม ($\epsilon_r', \epsilon_r''$) ด้วยการใช้น้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลา และ น้ำหวาน จำนวนที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างร่อง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลม (z_2) เท่ากับ 5 เซนติเมตร และ 70 เซนติเมตร ตามลำดับและ รัศมีทรงกลม (a) เท่ากับ 3.58 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.3 การเชื่อมต่อกันเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติตัวกลางทรงกลมในข้าวเปลือก

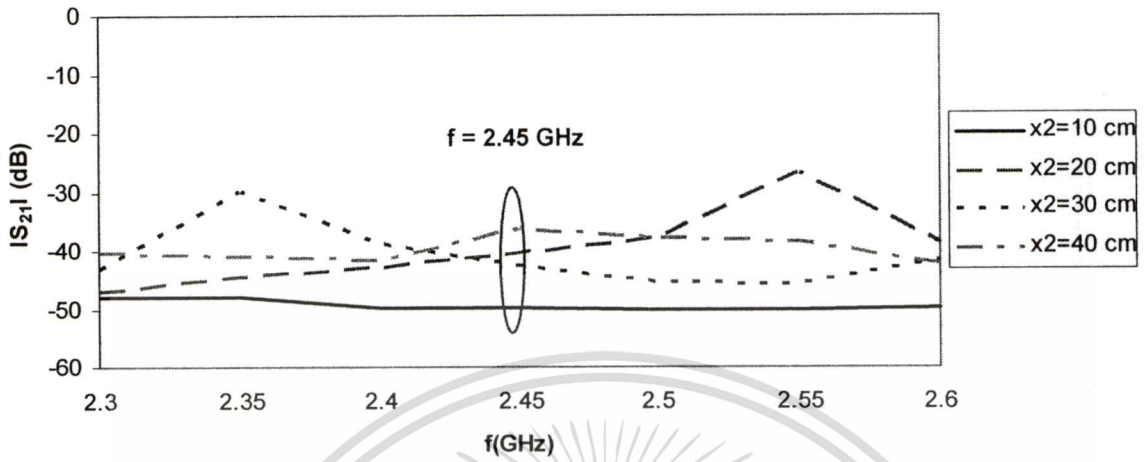
ตัวกลาง ของเหลว	คุณสมบัติไดอิเล็กตริก		IS ₂₁ (dB)		∠S ₂₁ (Deg.)	
	ϵ_r'	ϵ_r''	$z_2=5\text{cm}$	$z_2=70\text{cm}$	$z_2=5\text{cm}$	$z_2=70\text{cm}$
น้ำ	77.78828	8.96801	-49.93525	-38.09928	15.23319	-27.89512
น้ำส้มสายชู	75.86752	10.55256	-49.98782	-38.15272	14.48911	-27.21964
น้ำปลา	44.93471	160.9896	-48.36849	-42.96706	10.64880	-1.76196
น้ำหวาน	22.84218	14.48351	-50.47844	-35.13133	6.92033	-76.05896

4.3.2.3 เมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีตัวกลางทรงกลม (a) โดยใช้ตัวกลางเป็นน้ำจำนวนที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำหนดให้ ระยะห่างระหว่างร่อง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับ ทรงกลม (z_2) เท่ากับ 5 เซนติเมตร และ 70 เซนติเมตร ตามลำดับ

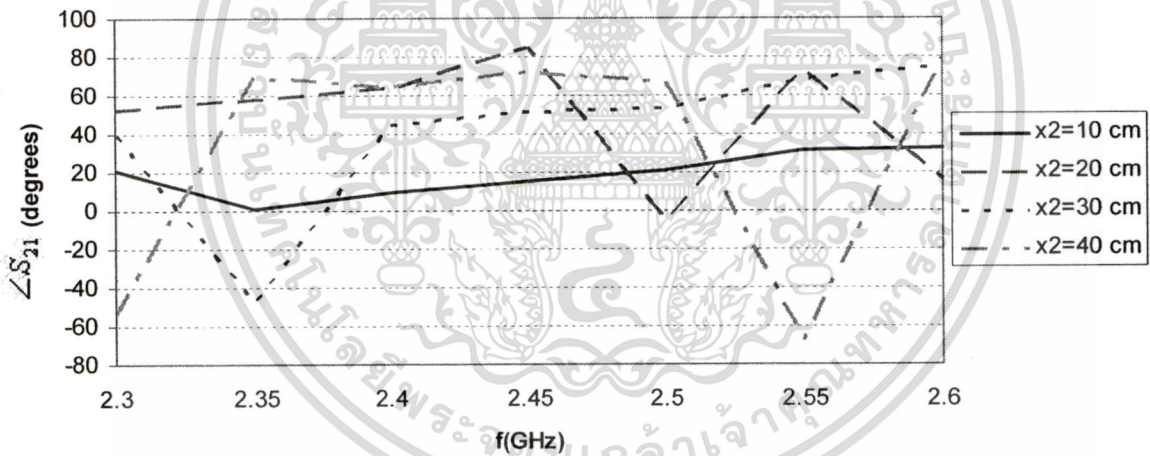
ตารางที่ 4.4 การเชื่อมต่อกันเมื่อเปลี่ยนรัศมีของทรงกลมในข้าวเปลือก

a (cm)	IS ₂₁ (dB)		∠S ₂₁ (Deg.)	
	$z_2=5\text{cm}$	$z_2=70\text{cm}$	$z_2=5\text{cm}$	$z_2=70\text{cm}$
3.58	-49.93525	-38.09928	15.23319	-27.89512
4.46	-49.60542	-40.66829	8.36982	52.11525
6.76	-50.29153	-48.20674	-33.19118	-10.60752

4.3.2.4 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศ (x_2) กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับ ทรงกลม (z_2) เท่ากับ 5 เซนติเมตร และรัศมีทรงกลม (a) เท่ากับ 3.58 เซนติเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 การเชื่อมต่อร่วมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องที่มีทรงกลมในขั้วเปลือก
(ก) ขนาด และ (ข) เฟส

จากผลการคำนวณในกรณีที่นำสายอากาศไปวางใกล้ขั้วเปลือกที่มีตัวกลางทรงกลมฝังอยู่ ซึ่งในกรณีระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลมสังเกตที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์พบว่าระยะที่ทำให้ค่าการเชื่อมต่อร่วมมีระดับค่าใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับวิธีการเฟสคงที่คือระยะ 50 เซนติเมตรและ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตร ซึ่งค่าการเชื่อมต่องานมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างทรงกลม เนื่องจากลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง

กรณีการเปลี่ยนคุณสมบัติตัวกลางทรงกลมนั้นค่าขนาดของการเชื่อมต่องานจะมีค่าใกล้เคียงกันในตัวกลางที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ไม่ต่างกันมาก (น้ำ น้ำส้มสายชู) โดยที่ระยะ 5 เซนติเมตรจะมีค่าการเชื่อมต่องานเรียงจากมากไปหาน้อยคือ น้ำปลา น้ำ น้ำส้มสายชู และน้ำหวาน ตามลำดับ ส่วนที่ระยะ 70 เซนติเมตรค่าการเชื่อมต่องานเรียงจากมากไปหาน้อยคือ น้ำหวาน น้ำส้มสายชู น้ำปลา และน้ำ ตามลำดับ พอสรุปได้ว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นค่าการเชื่อมต่องานเพิ่มตามและมีบางกรณีที่ไม่เป็นตามนั้นเพราะระยะห่างที่ไม่เท่ากันและทรงกลมที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่างกันทำให้ลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมต่างกัน

ส่วนในกรณีการเปลี่ยนขนาดทรงกลมจะให้ผลการเชื่อมต่องานที่ระยะ 70 เซนติเมตร เรียงจากมากไปหาน้อยคือ 3.58 เซนติเมตร 4.46 เซนติเมตร และ 6.76 เซนติเมตร ตามลำดับ ต่างกับที่ระยะ 5 เซนติเมตรที่ให้ผลไม่สอดคล้องกันบางกรณี ซึ่งพอสรุปได้ว่าเมื่อทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นค่าการเชื่อมต่องานลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดทรงกลมที่มากขึ้นทำให้ลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมต่างกันและกรณีสุดท้ายเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง พบว่าการเชื่อมต่องานมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง เนื่องจากลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง พิจารณาโดยรวมแล้วผลการคำนวณในกรณีที่มีข้าวเปลือกเป็นตัวกลางแทนที่ในอวกาศว่างค่าการเชื่อมต่องานที่แต่ละการปรับเปลี่ยนตัวแปรพบว่ามีค่าน้อยกว่ากรณีในอวกาศว่าง เพราะข้าวเปลือกมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสีย

การคำนวณโดยนำวัตถุทรงกลมฝังไว้ในข้าวเปลือกเพื่อวิเคราะห์ว่าเมื่อตัวกลางเปลี่ยนจากอวกาศว่างไปเป็นข้าวเปลือกสูตรการหาค่าการเชื่อมต่องานจะสามารถคำนวณความแตกต่างได้หรือไม่เปรียบเทียบสายอากาศเมื่อนำไปวางใกล้ข้าวเปลือกที่ไม่มีและมีทรงกลม โดยให้ตัวกลางเป็นน้ำพบว่าที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ (x_2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร z_2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร) พบว่าค่าขนาดการเชื่อมต่องานเป็น 1.66×10^{-4} และ 5.24×10^{-3} ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่ากรณีมีวัตถุทรงกลมฝังอยู่ในกองข้าวเปลือกค่าการเชื่อมต่องานจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ไม่มีวัตถุทรงกลม จากผลที่ได้นี้น่าจะสามารถนำหลักการดังกล่าวไปใช้ในการทำเซนเซอร์ตรวจสอบหาสิ่งเจือปนหรือวัตถุแปลกปลอม [21] ได้

4.4 สรุป

ผลการวิเคราะห์รูปแบบการคำนวณหาค่าการเชื่อมต่องานระหว่างสายอากาศของโครงสร้างสายอากาศร่องที่มีตัวกลางสองชั้นและทรงกลม พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการเชื่อมต่องาน คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวกลาง ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ขนาดทรงกลมและตำแหน่งการวางระหว่างสายอากาศร่อง โดยในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งทั้งที่เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศด้วยกันหรือระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวกลางนั้น ที่ตำแหน่งระยะใกล้เคียงค่าการเชื่อมต่องานจะไม่ต่างกันเท่าไรอีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมจะมีค่ามากและที่ระยะไกลออกไปค่าการเชื่อมต่องานก็จะมีค่าลดลง จากการวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับขั้วเปลือกหรือทรงกลมระยะจุดเฟสคงที่ทำให้ค่าการเชื่อมต่องานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยคือ ระยะห่าง 70 เซนติเมตรและระยะห่างระหว่างสายอากาศรองที่ทำให้ค่าการเชื่อมต่องานมากที่สุดและใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิงคือ ระยะ 10 เซนติเมตร ส่วนการปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกพบว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่มากขึ้นทำให้ค่าการเชื่อมต่องานเพิ่มตาม สำหรับการเปลี่ยนขนาดทรงกลมนั้นที่ทรงกลมขนาดเล็กจะมีค่าการเชื่อมต่องานที่มากกว่าทรงกลมขนาดใหญ่ ส่วนการเชื่อมต่องานที่ได้จากการวางสายอากาศรองใกล้ตัวกลางทรงกลมทั้งในอวกาศว่างและขั้วเปลือก ซึ่งมีบางกรณีที่ไม่สอดคล้องกันนั้น อาจจะมาจากลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และขนาดทรงกลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 กล่าวนำ

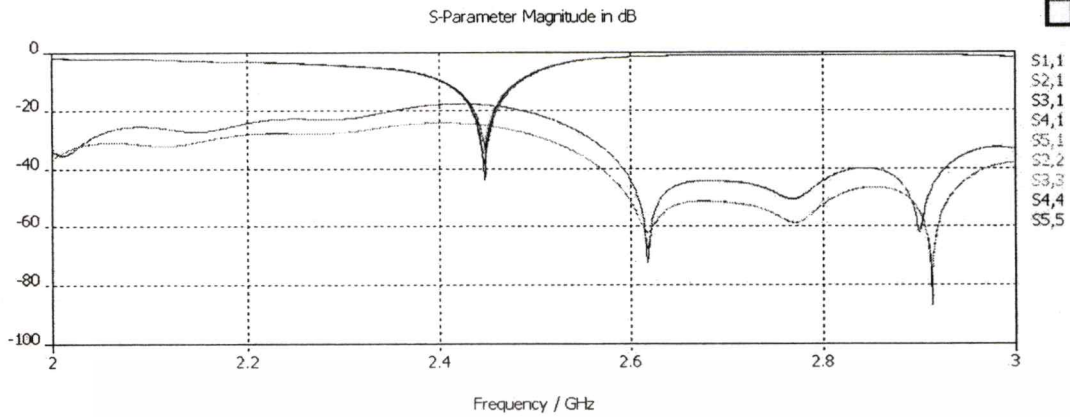
จากผลการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า การปรับเปลี่ยนตำแหน่งระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวกลาง ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางนั้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องได้ชัดเจน ดังนั้นจึงได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองโครงสร้างสายอากาศร่องวางใกล้ตัวกลางสองชั้นและทรงกลมตามเงื่อนไขการวิเคราะห์ในบทที่ 4 เพื่อพิสูจน์ผลการคำนวณกับผลการทดลองว่ามีผลตรงตามกันมากน้อยเพียงใด

5.2 อุปกรณ์และการเตรียมการทดลอง

5.2.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศร่อง

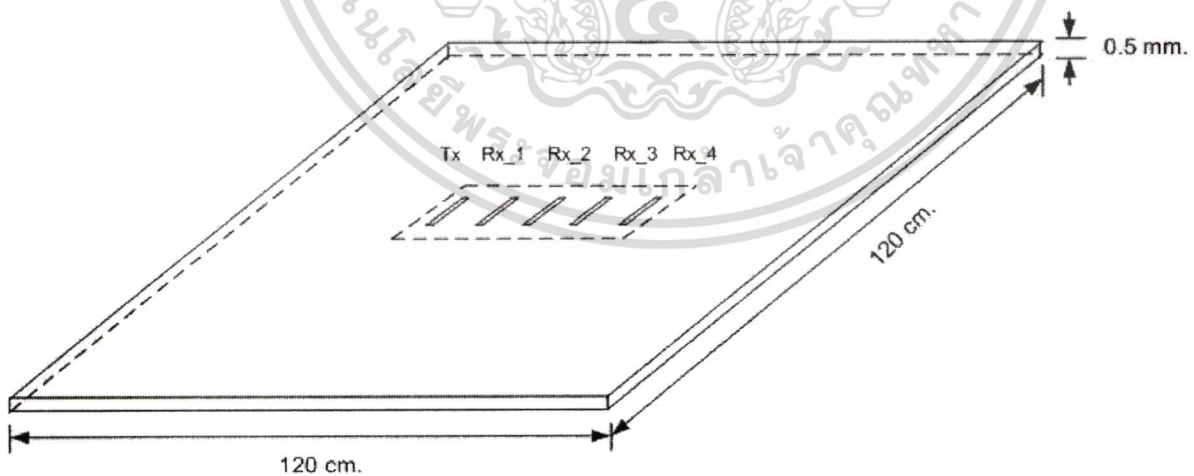
จะออกแบบสายอากาศร่องให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz กิกะเฮิรตซ์ กำหนดให้แผ่นระนาบกราวด์มีขนาด $(10\lambda) 120 \times 120$ ตารางเซนติเมตร ที่บริเวณจุดกึ่งกลางแผ่นระนาบเซาะร่องที่ความกว้าง 1 มิลลิเมตร ความยาวร่อง 6.1 เซนติเมตร จำนวน 5 ร่องในแต่ละร่องห่างกัน 10 เซนติเมตร จากโครงสร้างสายอากาศร่องไม่สามารถป้อนสัญญาณคลื่นได้โดยตรงที่บริเวณปากร่อง ดังนั้นจึงได้ออกแบบใช้สายป้อนไมโครสตริป (Microstrip feed) [22]-[25] ป้อนสัญญาณค้ำปลั่งไปยังปากสายอากาศร่องแทน โดยใช้แผ่นพิมพ์เอพอาร์โพร (FR-4) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.36 ค่าแทนเจนต์การสูญเสียเท่ากับ 0.01178 แผ่นพิมพ์หนา 0.8115 มิลลิเมตรและวัสดุฐานรองหนา 0.6525 มิลลิเมตรที่สายป้อนไมโครสตริปกำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม กว้าง 2.8 มิลลิเมตร ระยะจากตัวต่อ SMA ถึงมุมฉากยาว 6 เซนติเมตร ช่วงสายไมโครสตริปพาดผ่านร่องยาว 4 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างสายป้อนเป็น 11 เซนติเมตร สายป้อนทั้งหมดมีจำนวนเท่ากับร่องของสายอากาศที่สร้างขึ้น ซึ่งชุดที่เป็นสายป้อนไมโครสตริปจะมีขนาด 10×50 ตารางเซนติเมตร ในการออกแบบได้จำลองส่วนประกอบของโครงสร้างสายอากาศทีละส่วนแล้วนำมาประกอบร่วมกัน โดยผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST [6] เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



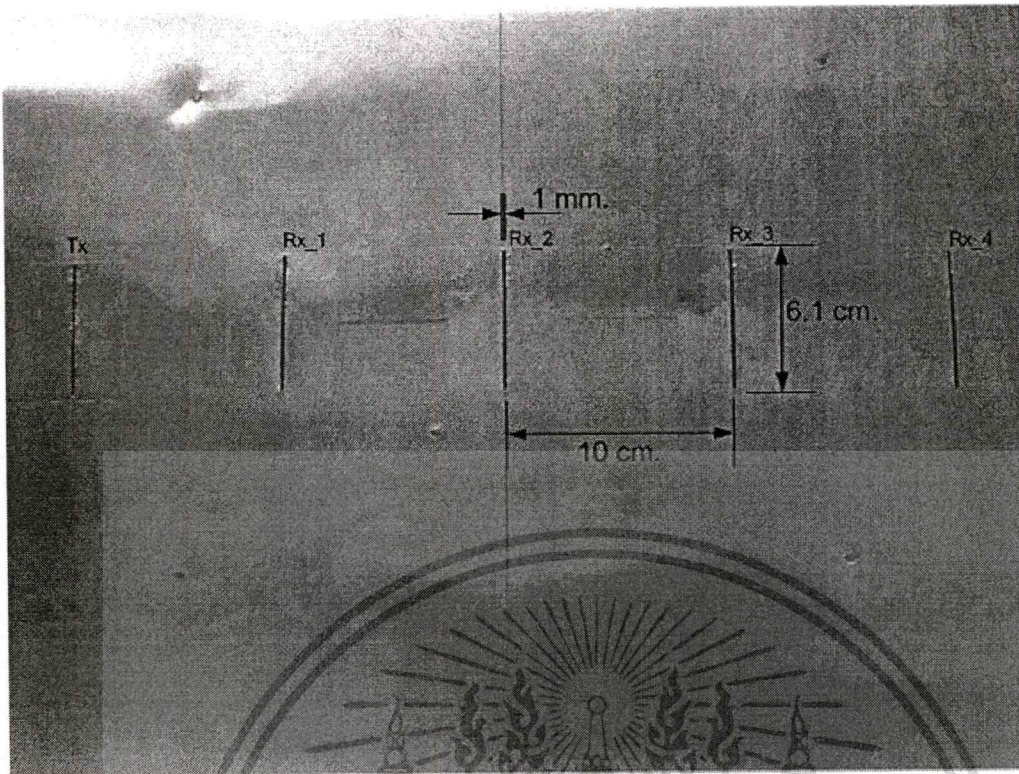
รูปที่ 5.1 การสูญเสียย้อนกลับและการเชื่อมต่อยุบรวมจากการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.1 พิจารณาที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแต่ละสายอากาศเรียงตามสายอากาศที่ใช้ส่งคลื่นจนถึงสายอากาศรับคลื่นตำแหน่งที่ 4 มีค่า -32 dB, -30.43 dB, -27.71 dB, -30.34 dB และ -33.29 dB ตามลำดับ ค่าการเชื่อมต่อยุบรวมของแต่ละสายอากาศที่ใช้รับคลื่นตำแหน่งที่ 1 จนถึงตำแหน่งที่ 4 มีค่า -18.05 dB, -25.05 dB, -17.98 dB และ -25.06 dB ตามลำดับ ในส่วนการสร้างสายอากาศทำตามที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 0.5 มิลลิเมตรมาทำเป็นแผ่นระนาบกราวด์ ดังรูปที่ 5.2 และชุดสายป้อนไมโครสตริปที่สร้างแสดงดังรูปที่ 5.3 ตามลำดับ

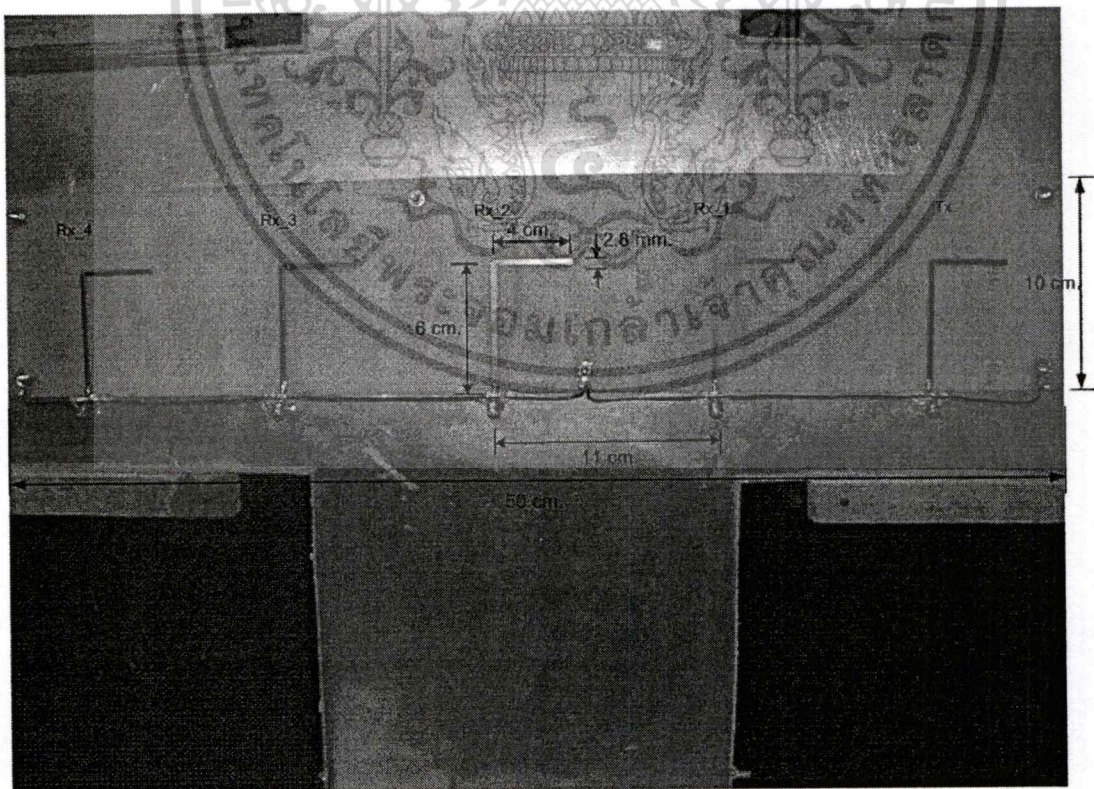


(ก) โครงสร้างสายอากาศช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



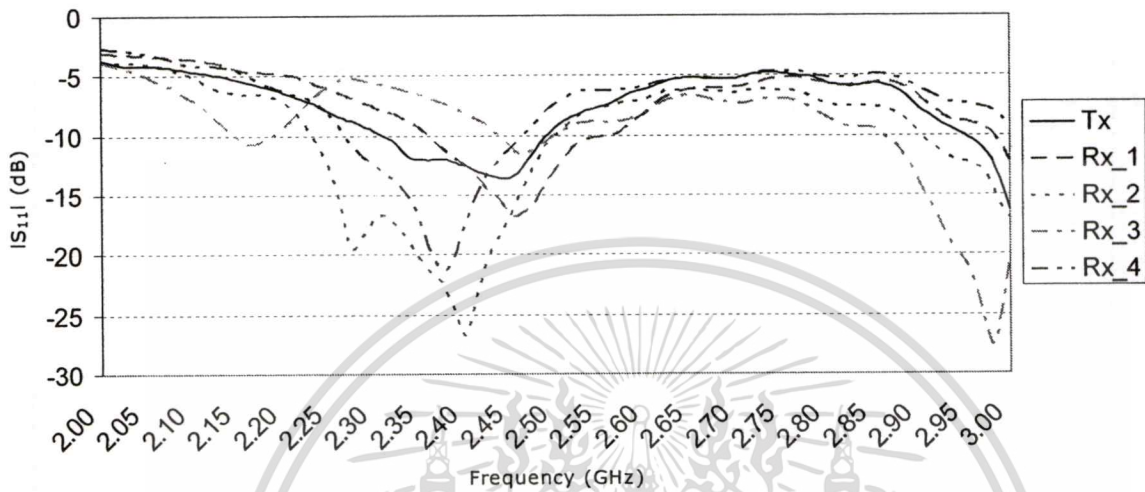
(ข) ขนาดของร่อง
รูปที่ 5.2 สายอากาศร่องที่สร้างขึ้น



รูปที่ 5.3 สายป้อนไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำสายอากาศที่สร้างมาทดสอบเพื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร้องแต่ละตัวที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 5.4 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร้องที่สร้างขึ้น

รูปที่ 5.4 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของแต่ละสายอากาศร้องเรียงตามสายอากาศที่ใช้ส่งคลื่นจนถึงสายอากาศรับคลื่นตำแหน่งที่ 4 มีค่า -13.59 dB, -16.54 dB, -16.87 dB, -11.04 dB และ -11.25 dB ตามลำดับ สำหรับค่าการเชื่อมต่อร่วมของแต่ละสายอากาศร้องที่ใช้รับคลื่นตำแหน่งที่ 1 จนถึงตำแหน่งที่ 4 มีค่า -76.61 dB, -74.93 dB, -75.98 dB และ -83.50 dB ตามลำดับ เปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมจากการจำลองโปรแกรมและจากการสร้างสายอากาศจริง พบว่ามีค่าแตกต่างกันค่อนข้างสูงด้วยเหตุผลที่ไม่สามารถควบคุมให้เหมือนกับสภาพสายอากาศในการจำลองด้วยโปรแกรม

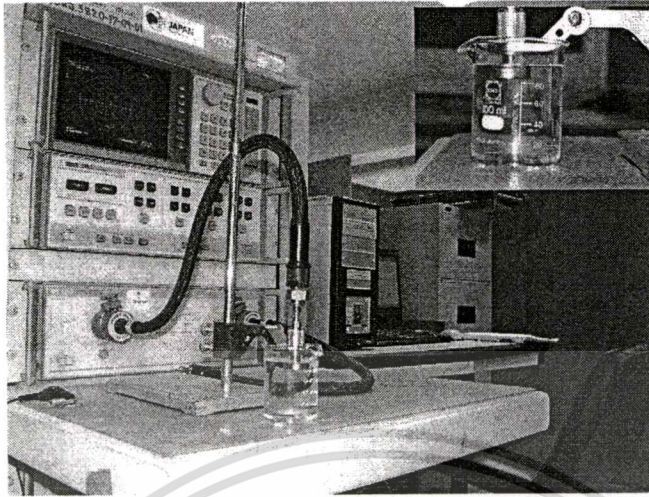
5.2.2 วัสดุทดสอบ

การเตรียมวัสดุเพื่อใช้ทดสอบมีดังนี้

1. ข้าวเปลือกความชื้น 12.19 % และ 21.22 %
2. น้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลา และน้ำหวาน

การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลา และน้ำหวาน นำของเหลวทั้ง 4 ชนิด เทใส่บีกเกอร์ขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้โคเอกเซียลโพรบ (Agilent 85070E Dielectric Probe Kit) ต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer HP8730A) วัดหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 5.5 และค่าการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าดังตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง

ตัวกลาง	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	ค่าตัวประกอบการสูญเสีย
น้ำ	77.78828	8.96801
น้ำส้มสายชู	75.86752	10.55256
น้ำปลา	44.93471	160.9896
น้ำหวาน	22.84218	14.48351

น้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลา และน้ำหวาน บรรจุพลาสติกทรงกลม (a เท่ากับ 3.58 เซนติเมตร) ที่มีปริมาตร 192.193 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนทรงกลม (a เท่ากับ 4.46 เซนติเมตร และ 6.76 เซนติเมตร) ที่มีปริมาตร 371.615 และ 1,293.983 ลูกบาศก์เซนติเมตร บรรจุเฉพาะน้ำ โดยทรงกลมพลาสติกมีความหนาผนัง เท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร

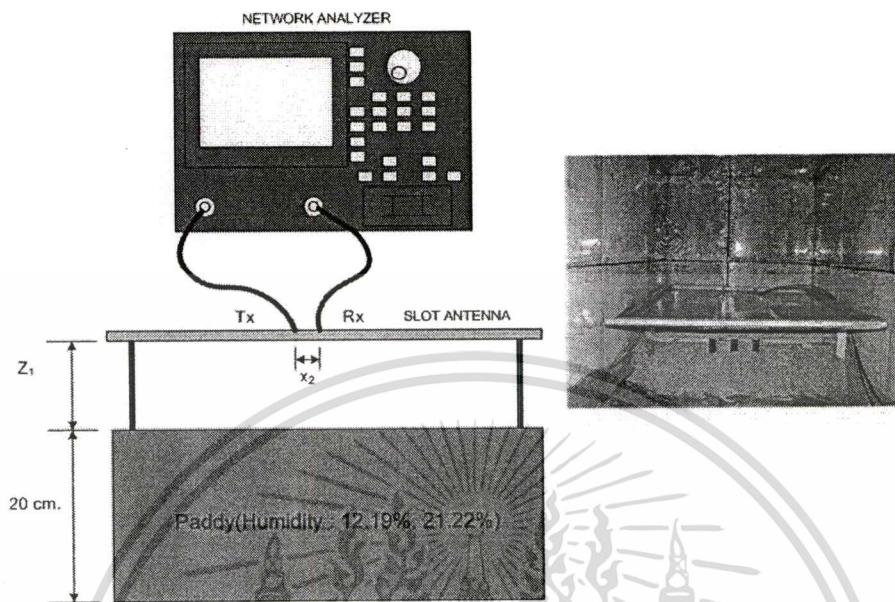
5.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศรอดตัวที่ 1 ที่ใช้ส่งคลื่นและรับคลื่นสัญญาณด้วยสายอากาศรอดตัวที่ 2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งการทดลองจะแบ่งเป็น 3 กรณีคือ

5.3.1 การวัดค่าการเปลือยความชื้น 21.22% และ 12.19%

ปรับกองข้าวเปลือกให้เรียบเสมอกันที่ความหนา 20 เซนติเมตร โดยเริ่มทดลองวัดระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกองข้าวเปลือก (z_1) ที่ระยะ 70 เซนติเมตร และปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างร่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

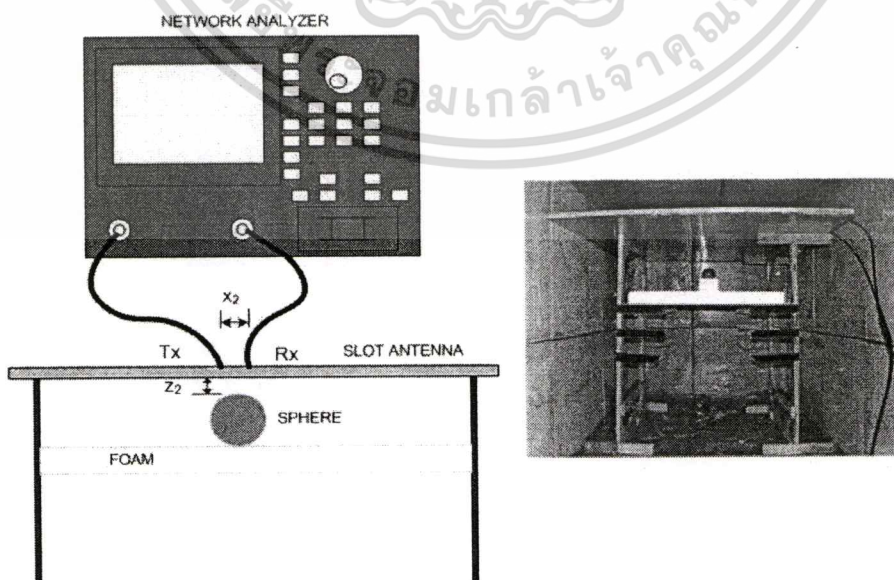
สายอากาศ (x_2) จนครบทั้ง 4 ร่อง แล้วจึงเปลี่ยนระยะห่างจากช่องข้าวเปลือกมาที่ระยะ 10 เซนติเมตร และระยะที่สายอากาศแนบติดกับช่องข้าวเปลือกตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 5.6 ผังภูมิการวัดข้าวเปลือกความชื้น 21.22% และ 12.19%

5.3.2 การวัดวัตถุทรงกลมในอากาศว่าง

นำทรงกลมพลาสติกที่บรรจุ น้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลาและน้ำหวานที่ขนาดต่างๆ ที่ได้เตรียมไว้มา ทดสอบที่ระยะห่าง (z_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร, 20 เซนติเมตรและ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยเลื่อน ตำแหน่งรับสัญญาณเฉพาะระยะห่าง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร

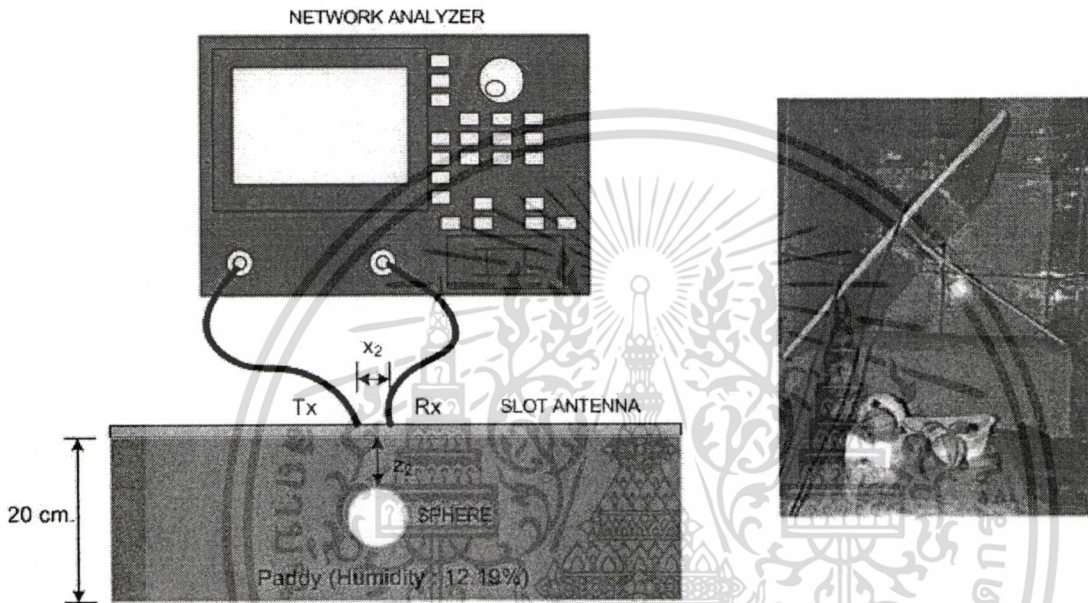


รูปที่ 5.7 ผังภูมิการวัดวัตถุทรงกลมในอากาศว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในโครงการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 การวัดวัตถุทรงกลมที่ฝังอยู่ในข้าวเปลือก

สำหรับการทดลองในกรณีนี้ใช้ข้าวเปลือกความชื้น 12.19% ปรับกองข้าวเปลือกให้เรียบเสมอกันที่มีความหนา 20 เซนติเมตร แล้วนำวัตถุทรงกลมแต่ละขนาดที่บรรจุของเหลวต่างๆ (น้ำ น้ำส้มสายชู น้ำปลา และน้ำหวาน) ฝังไว้ในกองข้าวเปลือก โดยทำการวัดที่ระยะความลึก (z_2) เท่ากับ 5 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ แล้วเลื่อนตำแหน่งการรับสัญญาณในระดับความลึก 5 เซนติเมตร



รูปที่ 5.8 ผังภูมิการวัดวัตถุทรงกลมในข้าวเปลือก

5.4 ผลการทดลอง

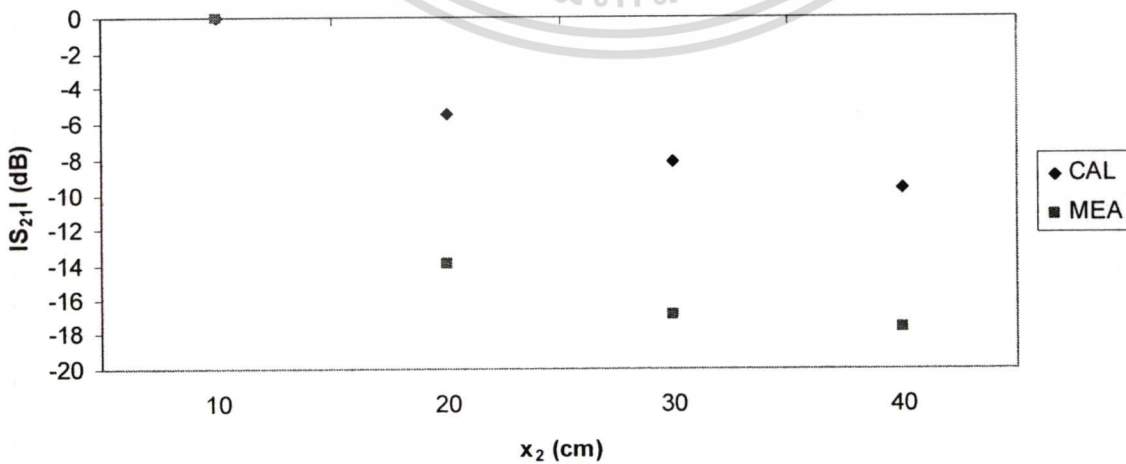
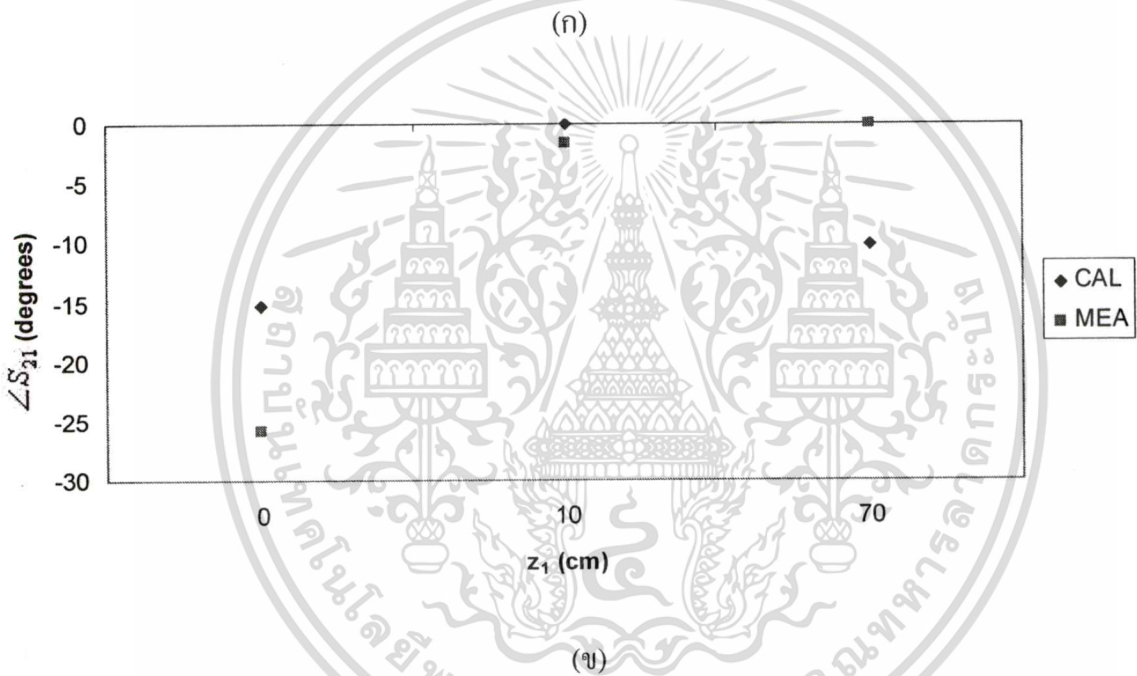
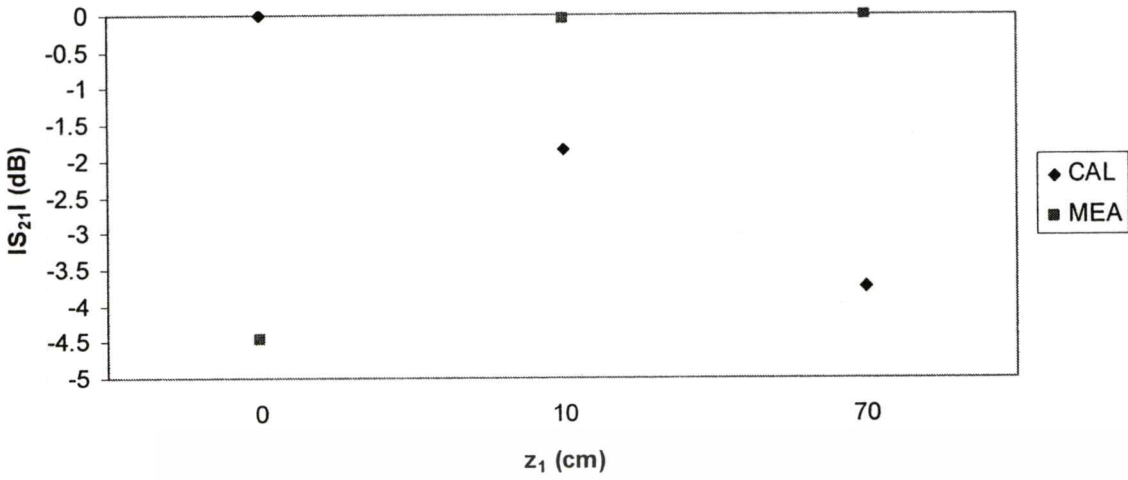
เพื่อให้เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองได้จึงนอมัลไลซ์ค่าที่ได้จากการทดลองและคำนวณ

5.4.1 การทดสอบวัดความชื้นข้าวเปลือก

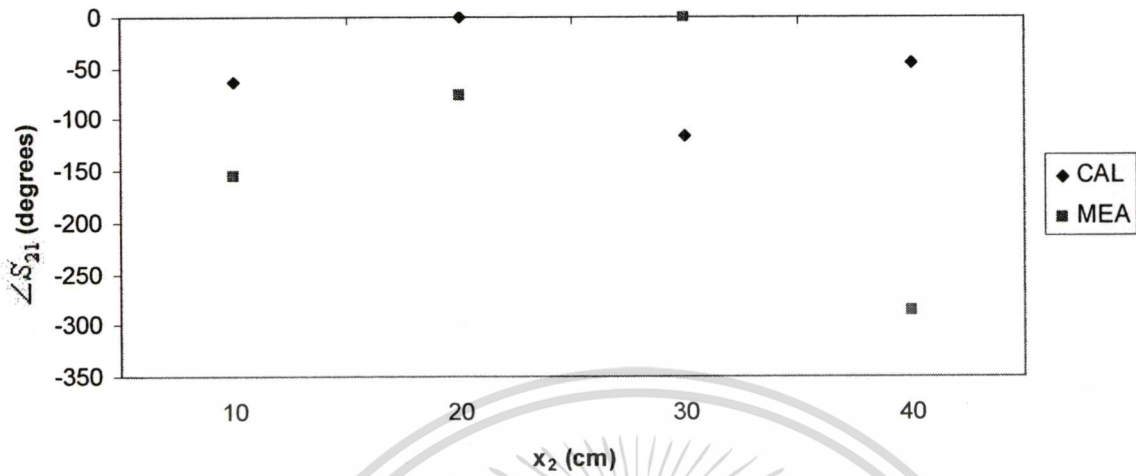
5.4.1.1 ข้าวเปลือกความชื้น 21.22%

กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกองข้าวเปลือก และระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกองข้าวเปลือก (z_1) เท่ากับ 70 เซนติเมตร เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (ค) ศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

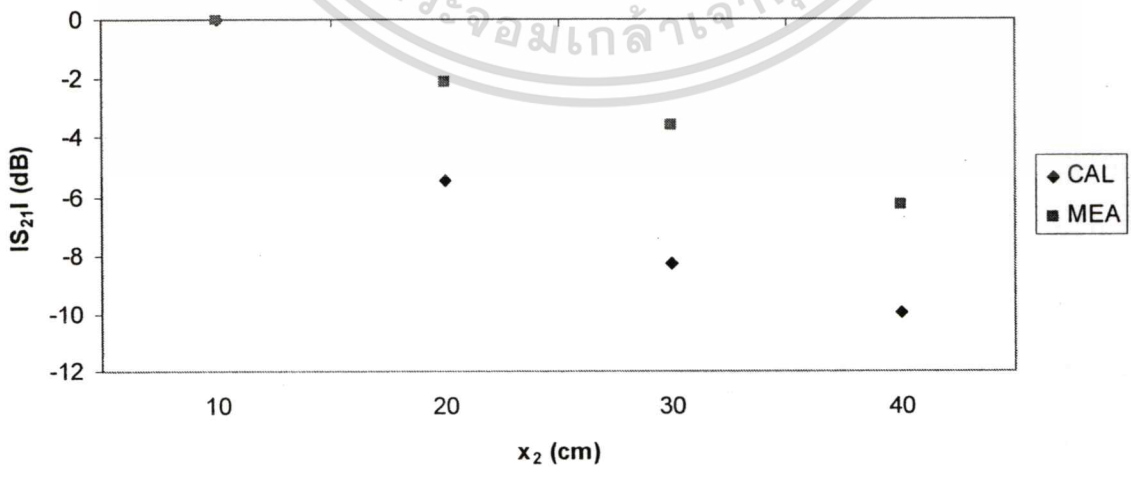
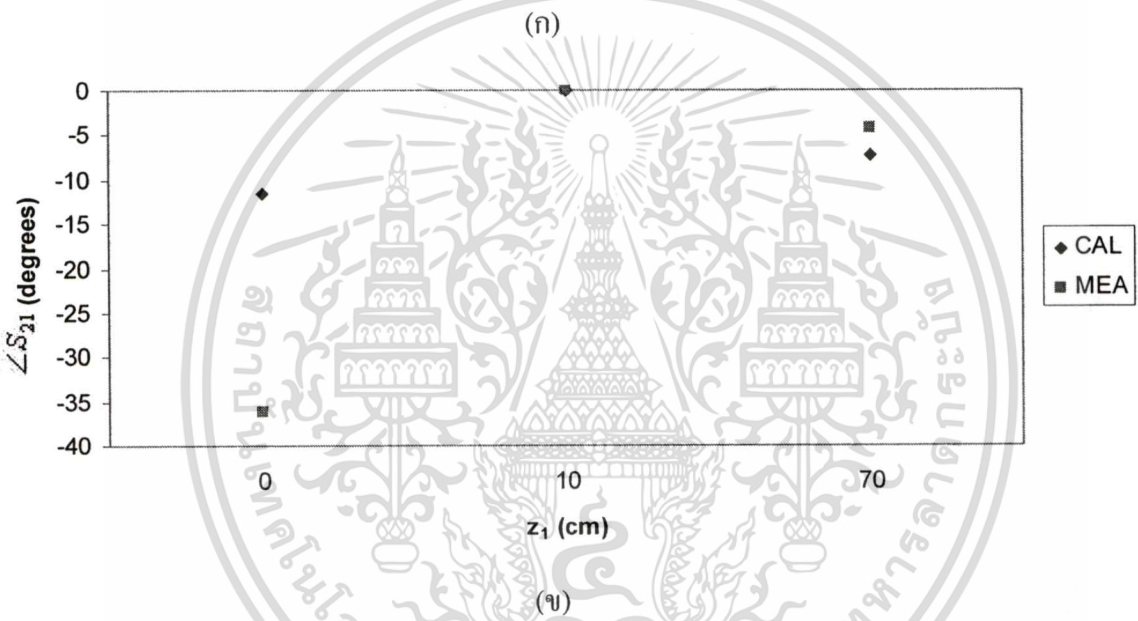
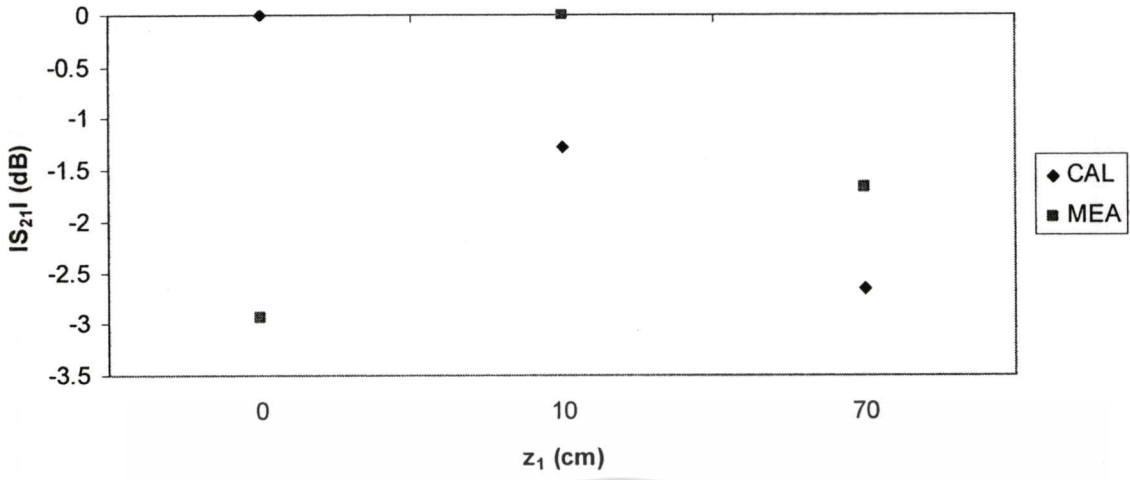


รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดในช่องเปลือกความถี่ 21.22% เมื่อเปลี่ยนระยะห่าง (z_1) และระยะห่างระหว่างสายอากาศ (x_2)

รูปที่ 5.9 (ก) – (ง) เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดเทียบกับผลการคำนวณในช่องเปลือกความถี่ 21.22% เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกึ่งช่องเปลือก เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าการเชื่อมต่อร่วมและเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดพบว่ามีการเชื่อมต่อร่วมต่างกันมากเมื่อ z_1 เท่ากับ 0 และ 70 เซนติเมตร แต่จะมีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเมื่อ z_1 มีค่า 10 เซนติเมตร โดยมีขนาดผิดพลาดประมาณ 1-5 dB และเฟสผิดพลาดประมาณ 10 องศา ส่วนในรูปที่ 5.9 (ค) – (ง) เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับผลการวัดกับผลการคำนวณของค่าการเชื่อมต่อร่วมพบว่ามีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน พิจารณาค่าการเชื่อมต่อร่วมโดยที่ผลการวัดจะน้อยกว่าผลการคำนวณอยู่ประมาณ -9 dB และเฟสจะต่างกันประมาณ 100 ถึง 200 องศา เมื่อระยะห่างไกลออกไป

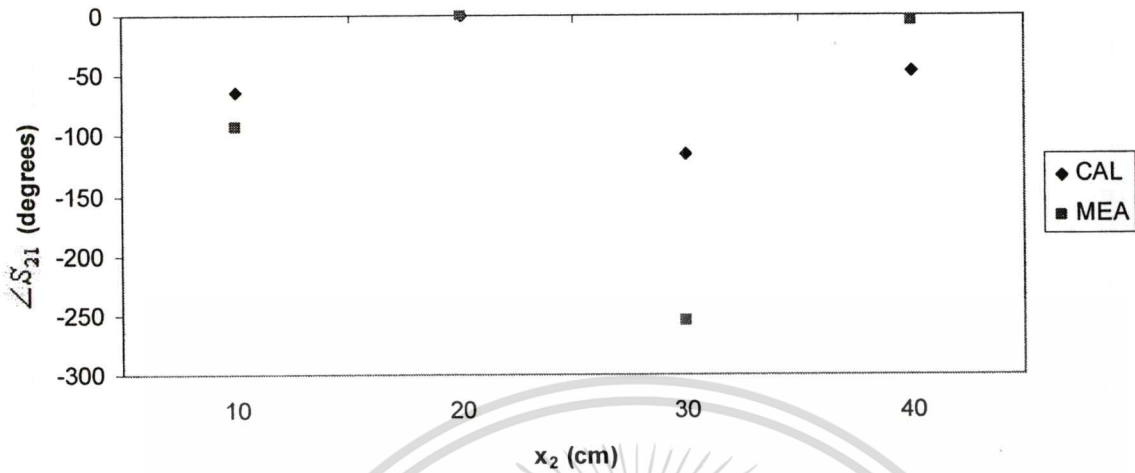
5.4.1.2 ช่องเปลือกความถี่ 12.19%

กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (x_2) เท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกึ่งช่องเปลือก และระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกึ่งช่องเปลือก (z_1) เท่ากับ 70 เซนติเมตร เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศ



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

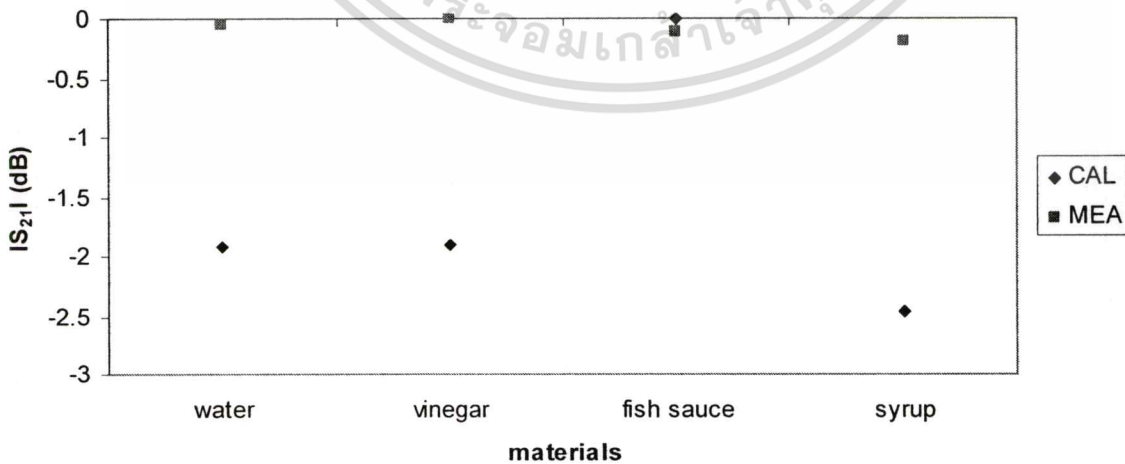
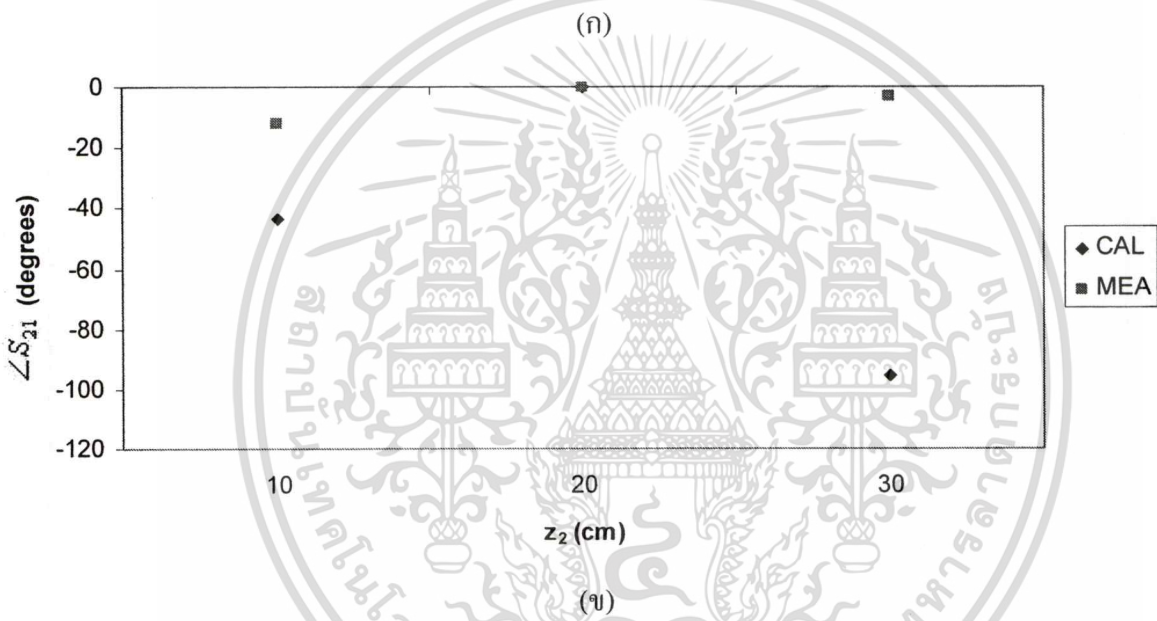
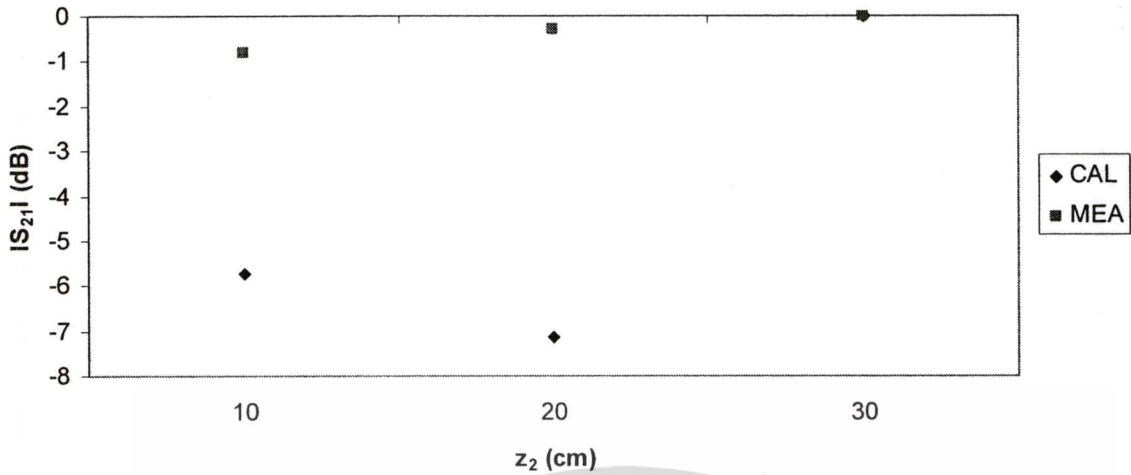


รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดในข้อผิดพลาดความขึ้น 12.19% เมื่อเปลี่ยนระยะห่าง (z_1) และระยะระหว่างสายอากาศช่อง (x_2)

ในรูปที่ 5.10 (ก) – (ง) ความสัมพันธ์การวัดค่าการเชื่อมต่อกับระยะห่างระหว่างสายอากาศกับกองขั้วเปลือยความขึ้น 12.19% มีผลการวัดกับผลการคำนวณที่สอดคล้องกันทางด้านขนาดของค่าการเชื่อมต่อก็คือค่าการวัดจะมากกว่าค่าคำนวณประมาณ 1.3 dB ส่วนเฟสนั้นค่าความแตกต่างไม่สม่ำเสมอ แต่ก็มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด เมื่อ z_1 เท่ากับ 10 เซนติเมตร รูปที่ 5.10 (ค) – (ง) แสดงผลการวัดเทียบกับผลการคำนวณของขนาดค่าการเชื่อมต่อกับระยะห่างระหว่างสายอากาศช่องพบว่า สอดคล้องมีค่าต่างกันประมาณ -4 dB ส่วนเฟสของค่าเชื่อมต่อกันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สม่ำเสมอแต่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

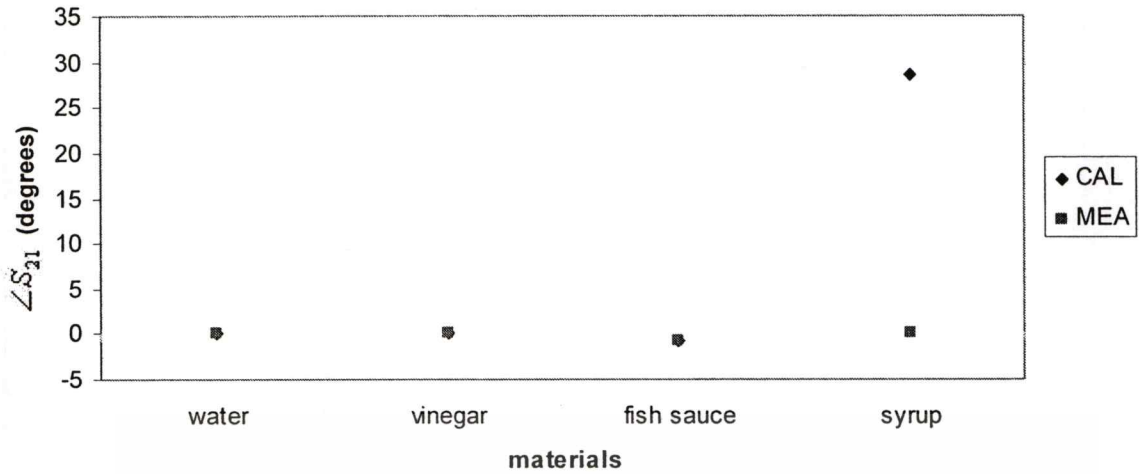
5.4.2 การทดสอบวัตถุทรงกลมในอวกาศว่าง

กำหนดให้ระยะ x_2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศกับวัตถุทรงกลม (z_2) และกำหนดให้ระยะ z_2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก



(ค)

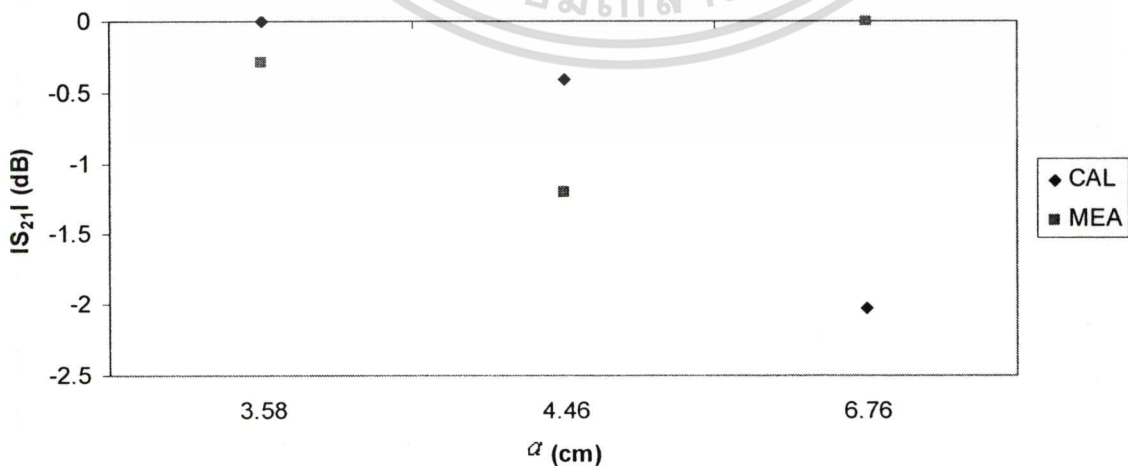
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

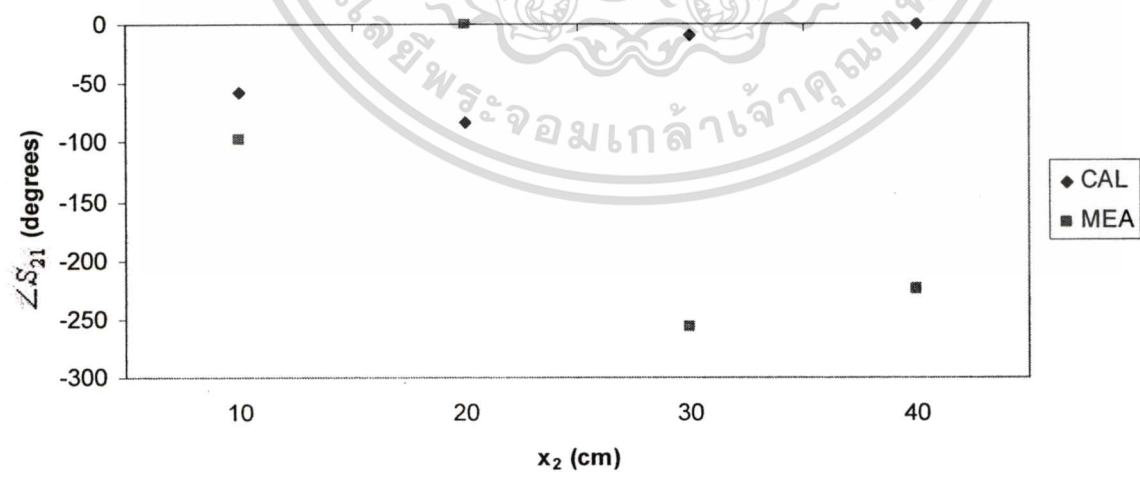
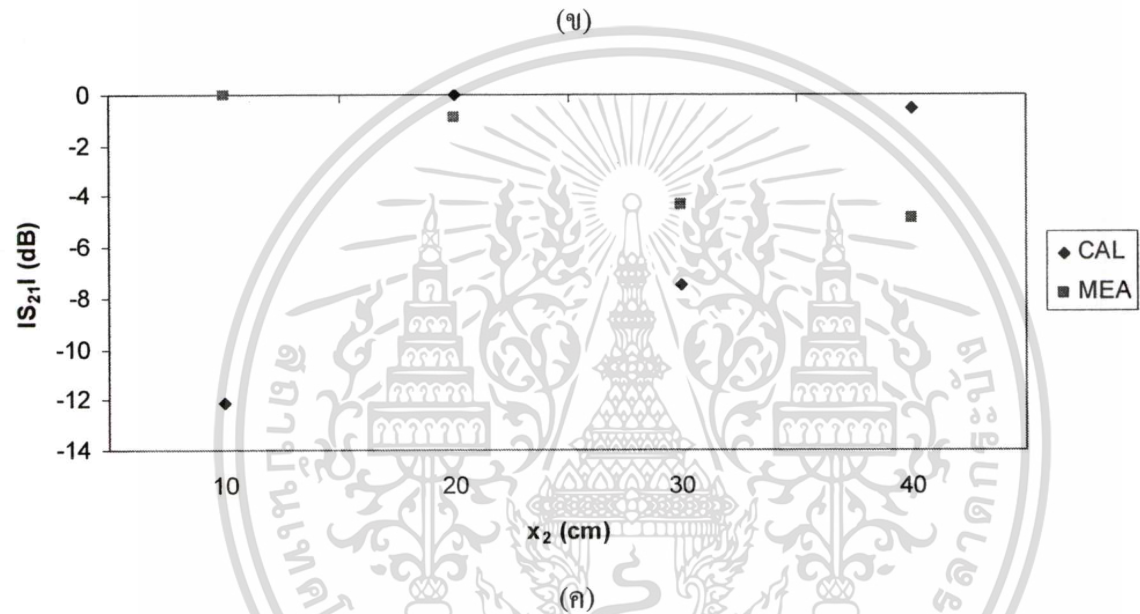
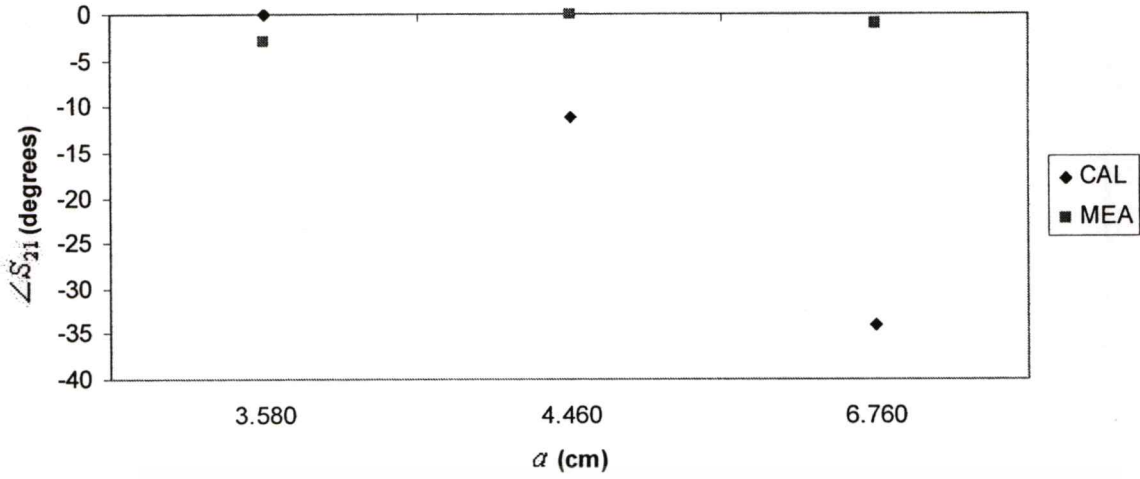
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัตถุทรงกลมในอวกาศว่างเมื่อเปลี่ยนระยะห่างทรงกลม (z_2) และคุณสมบัติตัวกลางทรงกลม

รูปที่ 5.11 (ก) – (ง) แสดงผลการวัดเทียบกับผลการคำนวณของค่าการเชื่อมต่อร่วมกับระยะห่างทรงกลมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่มีขนาดค่าต่างกันประมาณ 0 dB ถึง -7 dB และเฟสมีค่าประมาณ 0 องศา ถึง 90 องศา เมื่อพิจารณาขนาดจากบริเวณระยะห่าง 30 เซนติเมตรให้ผลแม่นยำที่สุด แต่หากพิจารณาเฟสที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตรจะได้ผลแม่นยำ สำหรับรูปที่ 5.11 (ก) – (ง) ขนาดและเฟสของค่าการเชื่อมต่อร่วมกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่เปลี่ยนไปมีความสอดคล้องของผลการวัดและผลคำนวณที่ชัดเจนกล่าวคือ ขนาดมีค่าต่างกันประมาณ -2 dB เฟสมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ยกเว้นน้ำหวานที่มีค่าผลการวัดต่างกับผลคำนวณ 27.5 องศา



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัดตรงกลมในอวกาศว่างเมื่อเปลี่ยนขนาดทรงกลม (a) และระยะห่างระหว่างสายอากาศ (x_2) ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.12 (ก) – (ข) แสดงผลการวัดกับผลการคำนวณของค่าการเชื่อมต่อกับขนาดทรงกลม ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดทรงกลมกับค่าการเชื่อมต่อกันทั้งขนาดและเฟสมีค่าต่างกันมากกล่าวคือ ที่ทรงกลมขนาดเล็ก (3.58 เซนติเมตร) ผลต่างค่าการเชื่อมต่อกันจะน้อยกว่าทรงกลมขนาดใหญ่ (6.76 เซนติเมตร) สำหรับรูปที่ 5.12 (ค) – (ง) แสดงผลการวัดเทียบกับผลคำนวณของค่าการเชื่อมต่อกันกับระยะห่างระหว่างสายอากาศพบว่าเมื่อระยะห่างมากขึ้นผลต่างระหว่างการวัดกับการคำนวณมีค่ามากขึ้นตามซึ่งก็คือผลการวัดกับผลการคำนวณมีค่าไม่เข้าใกล้กัน

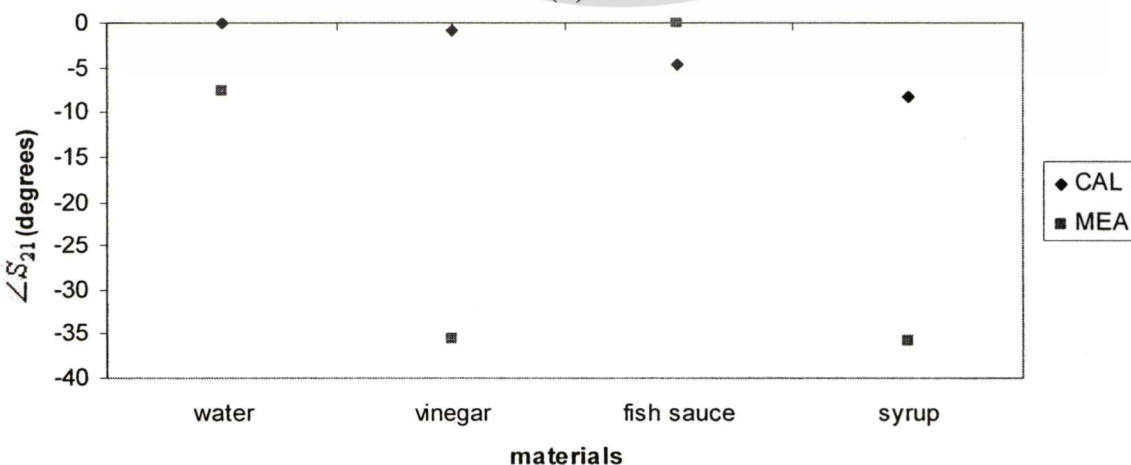
5.4.3 การทดสอบวัดดูทรงกลมในข้าวเปลือก

กำหนดให้ระยะ x_2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อปรับระยะ z_2 เท่ากับ 5 เซนติเมตรและ 10 เซนติเมตร ตามลำดับเพื่อเปรียบเทียบผลการวัดกับผลคำนวณของค่าการเชื่อมต่อกันกับระยะห่างระหว่างสายอากาศกับทรงกลมพบว่าที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร ค่าการวัดกับค่าการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าที่ระยะ 5 เซนติเมตรทั้งขนาดและเฟสของการเชื่อมต่อกัน

จึงกำหนดให้ระยะ x_2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง

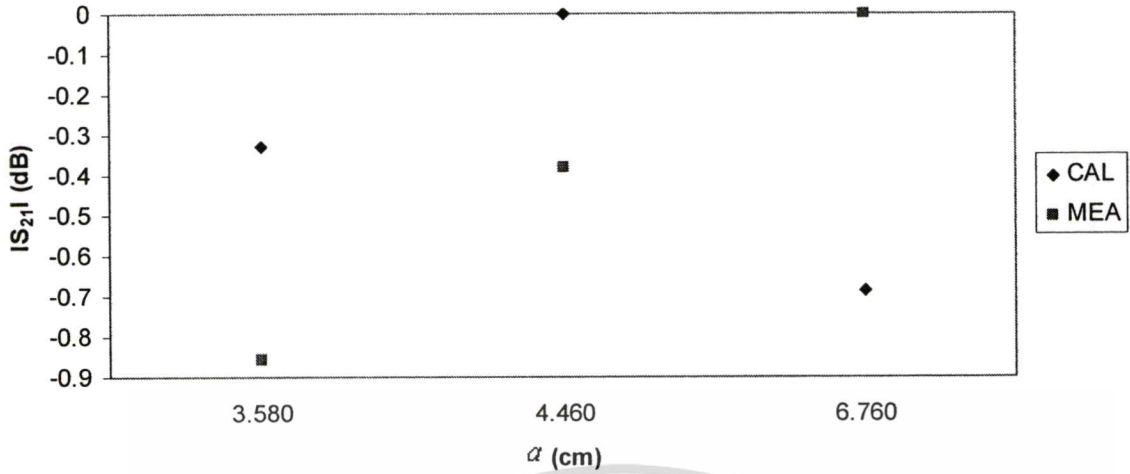


(ก)

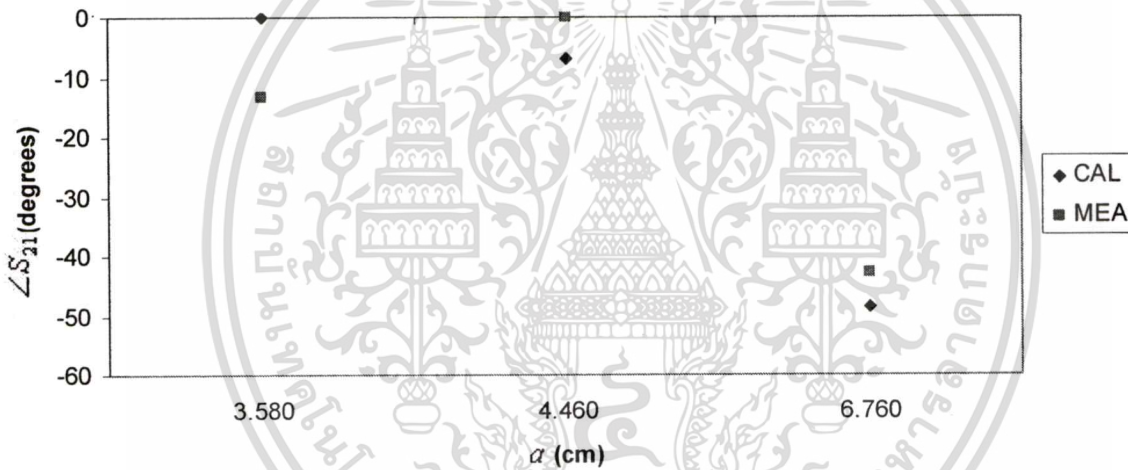


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

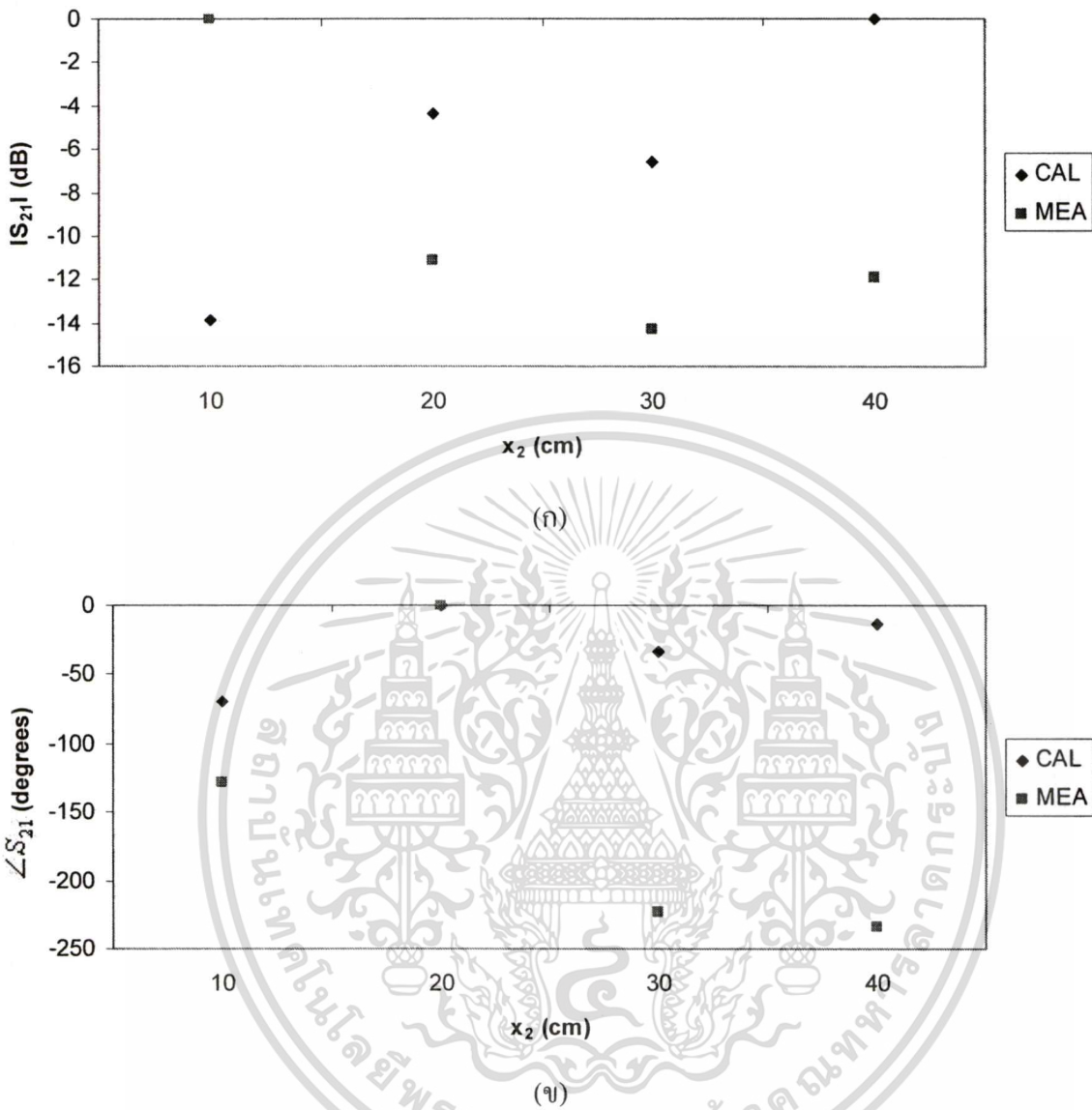


(ง)

รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัดตรงกลมในข้าวเปลือกเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติตัวกลางและรัศมีทรงกลม (a)

รูปที่ 5.13 (ก) – (ง) แสดงความสัมพันธ์ค่าการเชื่อมต่อกับคุณสมบัติตัวกลางทรงกลมที่ฝังในข้าวเปลือกมีการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการคำนวณของค่าการเชื่อมต่อกันพบว่า น้ำหวานมีผลต่างของขนาดมากที่สุดประมาณ -2 dB และเฟสเป็นน้ำปลาที่มีผลต่างเฟสมากที่สุดมีค่าประมาณ -35 องศา รูปที่ 5.13 (ค) – (ง) แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลคำนวณของค่าการเชื่อมต่อกันในกรณีทรงกลมขนาดต่างๆ ฝังในข้าวเปลือกที่ระยะความลึก 5 เซนติเมตร พบว่าขนาดทรงกลมรัศมี 4.46 เซนติเมตร มีค่าการเชื่อมต่อกันมากกว่าขนาดอื่นที่ใช้เปรียบเทียบทั้งขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัดวัตถุทรงกลมในช่องสี่เหลี่ยมเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศช่อง (x_2)

รูปที่ 5.14 (ก) – (ข) แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลคำนวณที่นำวัตถุทรงกลมฝังในช่องสี่เหลี่ยม พิจารณาความสัมพันธ์ค่าการเชื่อมต่อกับระยะห่างระหว่างสายอากาศช่องพบว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ 20 เซนติเมตรเป็นระยะที่ค่าการเชื่อมต่อมากและค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่ระยะอื่นๆ ทั้งขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 วิจารณ์การทดลอง

ผลการทดลองใช้สายอากาศร่อนวัดซ้ำเปลือกพบว่าที่ความชื้นซ้ำเปลือกต่างกันค่าการเชื่อมต่อร่วมก็มีค่าต่างกัน กล่าวคือยิ่งความชื้นซ้ำเปลือกสูงขึ้นค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่อนก็จะมีการลดลง สำหรับผลการทดลองวัดวัตถุทรงกลมในอวกาศว่างเทียบกับในซ้ำเปลือกพบว่าค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่อนในซ้ำเปลือกมีค่าน้อยกว่าในอวกาศว่าง จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทางการคำนวณแล้วมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งสาเหตุมาจากผลทางการคำนวณสายอากาศร่อนตรงบริเวณปากร่องที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์ค่าสูงทำให้ไม่แมตช์กับสายส่งที่อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม แต่ในการทดลองได้สร้างสายอากาศโดยใช้สายสตริปเป็นตัวป้อนเชื่อมต่อสัญญาณไปยังปากร่องที่ใช้ส่งคลื่นที่อินพุตอิมพีแดนซ์แมตช์กับสายส่ง การกำหนดทรงกลมในสูตรคำนวณเป็นตัวกลางไม่มีการสูญเสีย ทรงกลมไม่มีผนัง ซึ่งในการทดลองทรงกลมนั้นเป็นตัวกลางสูญเสียและมีความหนาผนังพลาสติก ขนาดแผ่นระนาบกรวดค้อนันต์ รวมถึงจุดเฟสคงที่ยังไม่ไกลพอด้วยข้อจำกัดในการทดลองสาเหตุเหล่านี้จะเป็นสาเหตุหลักของความคลาดเคลื่อน

5.6 สรุป

จากผลการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่อนคือตำแหน่งระยะห่างระหว่างร่อง ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับวัตถุตัวกลาง และคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับการคำนวณทำให้ทราบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างร่องหรือขนาดวัตถุทรงกลมเพิ่มขึ้นการเชื่อมต่อร่วมจะลดลง สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่มากขึ้นการเชื่อมต่อร่วมเพิ่มตามเช่นเดียวกัน ในส่วนการพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณนั้นมีค่าต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะในทางการคำนวณสายอากาศร่อนมีการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่ในการทดลองยังไม่สามารถทำตามข้อกำหนดดังกล่าวได้ ซึ่งได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ที่สูงมากของสายอากาศร่อนทำให้ไม่แมตช์กับสายส่ง ค่าการเชื่อมต่อร่วมจากการคำนวณที่ได้จึงเป็นค่าที่ไม่แมตช์ ส่วนค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่ทำให้แมตช์กับค่าอิมพีแดนซ์สายส่งแล้ว ทรงกลมที่เป็นตัวกลางไม่มีการสูญเสียและไม่มีผนัง ในทางการทดลองได้ใช้ทรงกลมที่เป็นตัวกลางสูญเสียและมีความหนาพลาสติก ขนาดแผ่นระนาบกรวดค้อนันต์ ระยะจุดเฟสคงที่ที่ยังมีข้อจำกัดในการทดลองด้วยข้อกำหนดเหล่านี้ที่เป็นสาเหตุให้ผลการวัดเมื่อเทียบกับผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลของการศึกษาการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศร่องใกล้ตัวกลางสองชั้นและตัวกลางทรงกลม วัตถุประสงค์เพื่อต้องการนำไปใช้อธิบายลักษณะการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นหลักการทำงานของเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพผลไม้หรือการวัดความชื้นข้าวเปลือก เริ่มต้นด้วยการพิจารณาโจทย์ปัญหาที่ตั้งขึ้น โดยกำหนดสายอากาศร่องอยู่บนระนาบกราวด์ที่มีขนาดอนันต์อยู่ใกล้ตัวกลางที่มีการสูญเสียที่มีขนาดอนันต์เช่นกัน พิจารณาสนามไฟฟ้าที่เป็นสนามระยะใกล้โดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมเพื่อที่จะให้มีความสอดคล้องกับรูปแบบปัญหาสามารถนำสมการพื้นฐานทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามาประยุกต์ได้ จากนั้นจึงได้พิจารณากรณีเงื่อนไขขอบเขตของตัวกลางสองชั้นที่ต่างชนิดกันเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้วิธีเฟสคงที่วิเคราะห์หาค่าสนามแล้วจึงนำไปหาค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมและแอดมิตแดนซ์ตัวเอง เพื่อหาค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องต่อไป สำหรับในกรณีวัตถุที่เป็นทรงกลมนั้น ได้พิจารณาคลื่นที่กระทบผิวทรงกลมเป็นคลื่นระนาบ ใช้หลักการวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมหาค่าสนามระยะใกล้ การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตภายนอก และภายในตัวกลางทรงกลมที่เป็นเนื้อเดียวกันด้วยฟังก์ชันคลื่นทรงกลมที่คลื่นระนาบเดินทางมากระทบวัตถุทรงกลม ซึ่งหาสนามได้ในบริเวณต่างๆ เมื่อได้ค่าสนามแล้วจึงนำไปหาค่าแอดมิตแดนซ์ร่วมและแอดมิตแดนซ์ตัวเอง เพื่อหาค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่องเมื่อมีตัวกลางทรงกลม การปรับเปลี่ยนตำแหน่งการวางตัวกลางทรงกลม ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อง และค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศร่อง โดยในที่นี้ต้องการค่าการเชื่อมต่อร่วมให้มีค่ามากเพื่อที่จะทดสอบสายอากาศว่าสามารถที่จะตรวจสอบความแตกต่างของวัสดุตัวกลางได้หรือไม่ จากผลการคำนวณทางทฤษฎีพบว่าค่าการเชื่อมต่อร่วมที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าในการทดลองและเมื่อได้นำค่าทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันพบว่ามีลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน

6.2 วิจารณ์การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลอง

ขั้นตอนในการกำหนดปัญหาเริ่มต้นที่การวิเคราะห์ผลทางทฤษฎียังไม่ตรงกับการทดลอง เช่น การกำหนดรูปแบบการกระจายของสนามบริเวณสายอากาศร่องเป็นรูปแบบโคไซน์มีขนาดความยาวเพียงอย่างเดียว ซึ่งความกว้างของร่องต้องแคบมากๆ เข้าใกล้ศูนย์ กำหนดว่าระนาบกราวด์และตัวกลางสองชั้นที่มีการสูญเสียมีขนาดอนันต์ และกำหนดว่าตัวกลางทรงกลมไม่มีการสูญเสียเป็นตัวกลางชนิดเดียวกัน ซึ่งจากการที่ทดลองสายอากาศร่องนั้นมีความกว้าง ขนาดของระนาบกราวด์กับตัวกลางชั้นที่มีการสูญเสียมีการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดจำกัด และตัวกลางทรงกลมมีการสูญเสีย ซึ่งเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัด

6.3 แนวทางการพัฒนา

การพัฒนารูปแบบการแก้ปัญหาให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงความ เป็นจริงตามธรรมชาติ ความซับซ้อนยุ่งยาก เพื่อการแก้ปัญหาให้ถูกต้องและมีความแม่นยำ ในการ ตั้งสมมติฐานเพื่อแก้ปัญหาทางทฤษฎีนั้นควรเริ่มที่การพิจารณาสายอากาศร่อง กำหนดขนาดความกว้าง และยาว ในส่วนรูปแบบการกระจายสนามที่บริเวณปากร่องของสายอากาศที่อยู่บนระนาบกรวดควร กำหนดให้มีขนาดที่จำกัดลง สำหรับตัวกลางที่ใช้ทดสอบควรจำกัดขนาดลง รวมถึงตัวกลางทรงกลมที่มี การสูญเสีย ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่สำคัญต่อความถูกต้องของคำตอบในการวิเคราะห์ปัญหา ในงาน ขั้นตอนต่อไปจะได้จัดปัญหาทางด้านขนาดของสายอากาศลง โดยใช้วิธีทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (Geometrical Theory of Diffraction : GTD) ในส่วนที่เกี่ยวกับวัตถุทรงกลมนั้นจะได้วิเคราะห์ตัวกลาง ทรงกลมที่มีการสูญเสีย ลักษณะการสะท้อนคลื่นของทรงกลมและศึกษาวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อพัฒนา ระบบเทคนิคการวัดย้อนกลับเพื่อให้ทราบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุที่ต้องการเป็นลำดับงานขั้น ต่อไป ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหาในการหาคำตอบทางทฤษฎี ได้เร็วขึ้นเพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ใช้ในทางปฏิบัติต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] S. O. Nelson, "Agricultural Applications of Dielectric Measurements," IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol.13(4), pp. 688-702 Aug. 2006.
- [2] A. Kaewrawang, S. Swatdiponphallop and A. Siritaratiwat, "Study on Complex Permittivity of Tropical Thai Fruit," Journal of Applied Science, vol. 7, pp. 1009-1012, 2007.
- [3] S. O. Nelson, S.Trabelsi and A.W.Krazewski, "RF Sensing of Grain and Seed Moisture Content," IEEE Sensors Journal, vol. 1, No. 2, pp. 119-126, Aug. 2001.
- [4] 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.
- [5] M. Krairiksh, J. Varith, A. Kanchanavapasatit, C. Phongcharoenpanich, A. Thanachayanont, P. Sirisuk and M. Chongcheawchamnan, "Microwave Sensor for Durian Inspection," Proceedings of INAS 2009, Johor, Malaysia, pp. 221-1 – 221-4, Dec. 2009.
- [6] CST Microwave Studio[®] 3D EM for High Frequency. CST STUDIO SUITE[™] 2006.
- [7] C. Scott, **The Spectral Domain Method in Electromagnetics**, Artech House Inc, 1989.
- [8] W. H. Hayt and J. A. Buck, **Engineering Electromagnetics**, 6th ed., McGraw-Hill, 2001.
- [9] R. F. Harrington, **Time-Harmonic Electromagnetic Fields**. New York : McGraw-Hill, 1961.
- [10] C. A. Balanis, **Antenna Theory: Analysis and design**. 3rd ed. New York : John Wiley and Sons, 1997.
- [11] C. G. Moschovitis, K. T. Karakatselos, E. G. Papkelis, H. T. Anastassiou, I. Ch. Ouranos, A. Tzoulis, and P. V. Frangos, "Scattering of Electromagnetic Waves From a Rectangular Plate Using an Enhanced Stationary Phase Method Approximation," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 58, No. 1, pp. 233-238, Jan. 2010.
- [12] P. Yoiyod and M. Krairiksh, "Mutual Coupling of Coupled-Slot Antennas on a Stratified Medium," Proceedings of TJMW 2009, Bangkok, Thailand, pp. 99-102, Aug. 2009.
- [13] 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.

- [14] B. K. J. C. Nauwelaers and A. R. Van De Capelle, “**Integrals for the Mutual Coupling Between Dipoles or Between Slots: With or Without Complex Conjugate?**,” IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 36, No. 10, pp. 1375-1381, Oct. 1988.
- [15] M. M. Dawoud and M. K. Amjad, “**Analytical solution for mutual coupling in microstrip patch antenna arrays,**” The Arabian Journal for Science and Engineering, vol.31, No. 1 B, pp. 47-60, Apr. 2006.
- [16] E. Kreyszig, **Advanced engineering mathematics**, 8th ed., John Wiley and Sons, 1999.
- [17] D. M. Pozar, **Microwave Engineering**, John Wiley and Sons, 2005.
- [18] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, **Antennas for All Applications**. New York : McGraw-Hill, 2003.
- [19] C. A. Balanis, **Advance Engineering Electromagnetics**, John Wiley and Sons, 1989.
- [20] J. E. Hansen, **Spherical Near-Field Antenna Measurements**. London : Peter Peregrinus, 1988.
- [21] S. H. Zainud-Deen, M.E. Badr, E.M. Ali, K.H. Awadalla and H.A. Sharshar, “**Effect of soil physical properties on landmines detection using microstrip antenna as a sensor,**” Progress In Electromagnetics Research C, vol. 7, pp. 13-24, 2009.
- [22] Y. Yoshimura, “**A microstrip-fed slot antenna,**” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT20, pp 760-762, Nov. 1972.
- [23] H. G. Akhavan and D. Mirshekhar-Syahkal, “**Approximate model for microstrip fed slot antennas,**” Electronics Letters, vol. 30, No. 23, pp. 1902-1903, Nov.1994.
- [24] J. P. Kim and W. S. Park, “**Network Modeling of an Inclined and Off-Center Microstrip-Fed Slot Antenna,**” IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 46, No. 8, pp. 1182-1188, Aug. 1998.
- [25] H.G. Akhavan and D. Mirshekar-Syahkal, “**Slots antennas for measurement of properties of dielectrics at microwave frequencies,**” Processdings of National Conference on Atennas and Propagation, pp.8-11, 1999.

ประวัติผู้เขียน

นายไพบูรณ์ ช้อยหยด เกิดเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ในปีการศึกษา พ.ศ. 2547 ในปี พ.ศ. 2548 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบงานการผลิต บริษัท ไพโอเนียร์แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด สวนอุตสาหกรรมโรจนะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และในปี พ.ศ. 2549 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ระบบงานคอมพิวเตอร์ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยรังสิต

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

P. Yoiod and M. Krairiksh, "Mutual Coupling of Coupled-Slot Antennas on a Stratified Medium," Proceedings of TJMW 2009, Bangkok, Thailand, pp. 99-102, Aug. 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้