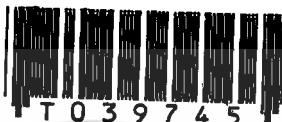


การศึกษากลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศปล่องคลื่นแฉักที่ฟ
ชนิดร่องแฉักลำดับในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

STUDY OF HOTSPOT STEERING MECHANISM FROM SLOT ARRAY
ACTIVE APPLICATOR IN LOSSY MEDIUM



อานติ เหมือนชู
ANAT MEARNCHU

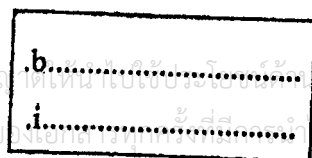
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-157-6

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 39745

วัน, เดือน, ปี 21 ส.ย. 2544



**STUDY OF HOTSPOT STEERING MECHANISM FROM SLOT ARRAY
ACTIVE APPLICATOR IN LOSSY MEDIUM**



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

2001

ISBN 974-648-157-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษากลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศปล่อยคลื่น
แอมป์ที่พจนีร่องแถวลำดับในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

นักศึกษา

นายอานัติ เหมือนชู

รหัสประจำตัว

41061151

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2544

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษากลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศ
ร่องแถวลำดับบนแผ่นระนาบตัวนำในตัวกลางที่มีการสูญเสีย อันได้แก่ กล้ามเนื้อ เพื่อให้ได้พื้นที่
ของจุดความร้อนกว้างมากขึ้น ณ ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับในการทำ
ให้เกิดความร้อนบริเวณเซลล์มะเร็ง ซึ่งอุณหภูมิที่มีผลในการทำลายเซลล์ดังกล่าวจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่
43 องศาเซลเซียส สำหรับจุดความร้อนสามารถทำให้กวาดตำแหน่งเพื่อให้ได้พื้นที่กว้างขึ้น ได้โดย
การปรับเปลี่ยน แอมพลิจูด เฟส หรือ ความถี่ การคำนวณทำโดยการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระยะใกล้
ภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย จากสายอากาศแบบร่องที่วางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียโดยวิธี
โดเมนเชิงสเปคตรัม แล้วจึงนำค่าสนามไฟฟ้านี้ไปคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย
โดยวิธีผลต่างสี่บั่นเนื่อง สำหรับการทดลองได้เลือกทำกรณีของการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดเนื่อง
จากเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด ซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลอง มีความ
สอดคล้องกันคือ กรณีของการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด จะมีพื้นที่ประสิทธิผลที่กว้างมากกว่ากรณีที่
ไม่ได้ปรับเปลี่ยน

Thesis Title Study of Hotspot Steering Mechanism from Slot Array Active Applicator in Lossy Medium

Student Mr. Anat Mearnchu

Student ID. 41061151

Degree Master of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2001

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis presents the study of hotspot steering mechanism of the slot array active applicator in lossy medium at frequency 2450 MHz. The geometry of the problem comprises of the slot array cut on the conducting plate to perform as an applicator, and this applicator is located above the lossy medium i.e., the muscle. This applicator is very useful in the cancer therapy that the wide range coverage area is necessary. The maximum temperature to treat the cancer is 43 degree celsius. The hotspot can be steered to any position by adjusting the amplitude, phase or frequency of the source excited to the applicator. The spectral domain approaches play a powerful tool for determining the field near the applicator. The temperature distribution of the applicator can be subsequently carried out from the calculated fields. The prototype of the applicator are fabricated and measured their characteristics to compare and verify the computational results. For the experiment, we choose to adjust the amplitude since it is the simplest way. It is found that the theoretical and experimental results are agreed satisfactorily i.e., the wider area is obtained when we vary the amplitude.

กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีอันใดที่บังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่บิดาและมารดาของข้าพเจ้า วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี อันเนื่องมาจากได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผศ. สมผล โกศลวิตร ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการทดลอง

ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ กล่าวคือ

- คุณ ชาญชัย ทองโสภาก ที่ช่วยเหลือด้านการทดลอง
- คุณ ดวงอาทิตย์ ศรีมูล ที่ให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี
- คุณ เพชรรัตน์ ประเสริฐเศียร ในการพิมพ์ต้นฉบับ

และขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภายในห้องปฏิบัติการเดียวกัน ที่มีส่วนผลักดันในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้

อาฉัตติ เหมือนชู

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบร่อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 สมการพื้นฐาน.....	5
2.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบไดโพล.....	6
2.4 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง.....	10
2.5 การปรับตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง.....	11
2.5.1 การปรับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องโดยปรับเปลี่ยนความถี่.....	14
2.5.2 การปรับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องโดยปรับเปลี่ยนเฟส.....	16
2.5.3 การปรับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องโดยปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด.....	17
2.6 สรุป.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ทฤษฎีสานามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่องโดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมและเงื่อนไขขอบเขต.....	20
3.1 กล่าวนำ.....	20
3.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบในตัวกลางใดๆ.....	20
3.1.1 คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย.....	20
3.1.2 คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	23
3.1.3 การเคลื่อนที่ตกกระทบแบบตั้งฉากของคลื่นระนาบ ณ รอยต่อของ 2 ตัวกลางใดๆ.....	24
3.3 วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม.....	27
3.4 รูปแบบของปัญหาสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลาง 2 ชั้น.....	28
3.5 เงื่อนไขขอบเขตของตัวกลาง 2 ชั้น.....	30
3.6 สรุป.....	34
บทที่ 4 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่องบนตัวกลาง 2 ชั้น.....	35
4.1 กล่าวนำ.....	35
4.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง.....	35
4.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง.....	37
4.3.1 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนเฟส.....	40
4.3.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนความถี่.....	42
4.3.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด.....	44
4.4 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง.....	46
4.4.1 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนเฟส.....	49
4.4.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนความถี่.....	51
4.4.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด.....	53
4.5 สรุป.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ทฤษฎีการส่งผ่านความร้อนและวิธีผลต่างสี่บเนื้อง	57
5.1 กล่าวนำ	57
5.2 การส่งผ่านความร้อน	57
5.2.1 การแพร่กระจายกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	58
5.2.2 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสีย	60
5.3 สมการการส่งผ่านความร้อน	61
5.4 แบบแผนของวิธีผลต่างสี่บเนื้อง	61
5.5 การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนโดยวิธีผลต่างสี่บเนื้อง	66
5.5.1 รูปแบบของสมการการส่งผ่านความร้อนโดยวิธีผลต่างสี่บเนื้อง	67
5.5.2 การพิจารณาจุดที่ต้องการหาอุณหภูมิ ณ บริเวณต่างๆของตัวกลางที่มีการสูญเสีย	69
5.5.2.1 การหาอุณหภูมิภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย	69
5.5.2.2 การหาอุณหภูมิที่ผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสีย	71
5.5.2.3 การหาอุณหภูมิที่ผิวมุมของตัวกลางที่มีการสูญเสีย	73
5.5.3 ค่าความเสถียรของวิธีผลต่างสี่บเนื้องที่ใช้คำนวณอุณหภูมิของตัวกลาง	75
5.6 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่อง	76
5.6.1 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง.....	77
5.6.2 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง.....	77
5.6.2.1 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส	77
5.6.2.2 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่	78
5.6.2.3 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด	79
5.6.3 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง	80
5.6.3.1 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.6.3.2 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่	81
5.6.3.3 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด	81
5.7 การทดลอง	82
5.7.1 อุปกรณ์และการเตรียมการทดลอง	82
5.7.2 วิธีการทดลอง	85
5.7.3 ผลการทดลอง.....	86
5.8 สรุป	89
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์	90
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์	90
6.2 วิจารณ์การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลอง.....	90
6.3 แนวทางการพัฒนา	91
เอกสารอ้างอิง	92
ภาคผนวก	94
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบปัญหาของสายอากาศไดโพล	7
2.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพล	9
2.3 รูปแบบปัญหาของสายอากาศแบบร่อง	10
2.4 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง	11
2.5 รูปแบบปัญหาของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง	12
2.6 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศ	13
2.7 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนความถี่	15
2.8 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนเฟส	17
2.9 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด	19
3.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องว่างอิสระ	23
3.2 รอยต่อขอบเขตของ 2 ตัวกลาง	24
3.3 ลักษณะการวางสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย	28
3.4 เงื่อนไขขอบเขตของตัวกลาง 2 ชั้น	31
4.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย	36
4.2 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง	36
4.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย	37
4.4 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศ	39
4.5 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนเฟส	41
4.6 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนความถี่	43
4.7 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด	45
4.8 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย	46
4.9 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศ	48
4.10 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนเฟส	50
4.11 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนความถี่	53
4.12 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและโคโพลเนื่องจากสนามไฟฟ้า	58
5.2 การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ ณ จุด P ใดๆ	62
5.3 การแบ่งขนาดตารางพื้นที่ของฟังก์ชันที่มี 2 ตัวแปร x และ t	65
5.4 ขั้นตอนการคำนวณของสมการอนุพันธ์ย่อย	65
5.5 การกำหนดจุดที่ต้องการทราบค่าในการวิเคราะห์โดยวิธีเชิงเลข	66
5.6 การนำความร้อนภายในตัวกลาง	70
5.7 การนำและการพาความร้อนบริเวณผิวของตัวกลาง	72
5.8 การนำและการพาความร้อนบริเวณผิวมุมของตัวกลาง	74
5.9 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง	77
5.10 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเฟส ..	78
5.11 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับความถี่	78
5.12 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับแอมพลิจูด	79
5.13 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเฟส	80
5.14 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับความถี่	81
5.15 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับแอมพลิจูด	82
5.16 สารเนื้อเทียม	83
5.17 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบร่องที่ปิดหลังด้วยโพรง	83
5.18 ผังวงจรการทำงานของหลอดแมกนีตรอน	84
5.19 การจัดอุปกรณ์และชุดควบคุมกำลังงานของหลอดแมกนีตรอน	85
5.20 สายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรงเนื้อสารเนื้อเทียม	86
5.21 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ในสารเนื้อเทียม	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22	สายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรงเนื้อสารเนื้อเทียม87
5.23	การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ในสารเนื้อเทียม87
5.24	สายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรงเนื้อสารเนื้อเทียม88
5.25	การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ในสารเนื้อเทียม88



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การให้ความร้อนแก่เซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีการเสริมที่เมื่อใช้ร่วมกับการฉายรังสีและเคมีบำบัดแล้ว จะให้ผลการรักษาที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเพียงไม่กี่องศาจะมีผลอย่างมากต่อเซลล์และเนื้อเยื่อ โดยที่ความร้อนจะเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายเซลล์มะเร็งของรังสีและยารักษามะเร็งบางชนิด ซึ่งจะยับยั้งขบวนการฟื้นตัวของเซลล์ และจากการศึกษาทางชีววิทยาทำให้ทราบว่าคุณสมบัติของความร้อนมีผลกระทบต่อเซลล์มะเร็งมากกว่าเซลล์ปกติ [1] การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการทำให้เกิดความร้อนแก่เซลล์มะเร็งให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นวิธีที่ได้ผล โดยสนามไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดความร้อนได้จากการสั่นและบิดตัว (oscillate and rotation) ของโมเลกุลน้ำ ดังนั้นอวัยวะที่ประกอบด้วยน้ำ เช่น สิวหนังและกล้ามเนื้อต่างๆ จึงเป็นตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ดี [2] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีความพยายามพัฒนาอุปกรณ์ปล่อยคลื่นเข้าไปสู่ตำแหน่งของเซลล์มะเร็งอย่างต่อเนื่องเสมอมา ไม่ว่าจะด้วยวิธีสอดอุปกรณ์ปล่อยคลื่นเข้าไปในร่างกาย (invasive hyperthermia) หรือการปล่อยคลื่นจากภายนอก (non-invasive hyperthermia) เข้าไป การกระทำด้วยวิธีแรกให้ผลที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตำแหน่งเป้าหมายของเซลล์มะเร็งอยู่ลึกจากผิว แต่คนไข้จะได้รับความเจ็บปวด ในขณะที่วิธีหลังไม่ก่อให้เกิดความเจ็บปวดแต่จะประสบความยุ่งยากในการจัดการให้คลื่นเข้าสู่ร่างกายทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเหมาะสมทั่วถึง

ตัวอย่างสายอากาศปล่อยคลื่นจากภายนอกอันหนึ่งที่ทำการศึกษามาได้แก่ สายอากาศปล่อยคลื่นแบบร่องแถวลำดับบนผิวทรงกลม [3] ซึ่งได้รับการพัฒนาให้ใช้งานที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ต สามารถให้ความร้อนลึกลงไปจากผิวได้ประมาณ 1 เซนติเมตร และพื้นที่ประสิทธิผลที่ได้มีขนาดเล็ก สำหรับการรักษามะเร็งที่เกิดเป็นบริเวณกว้าง เช่น มะเร็งที่หน้าอก ขนาดของพื้นที่ประสิทธิผลที่ใช้ในการรักษาต้องมีขนาดกว้างครอบคลุมบริเวณของเซลล์มะเร็ง จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ปล่อยคลื่นให้สามารถก่อให้เกิดความร้อนอย่างสม่ำเสมอในบริเวณกว้าง ตัวอย่างของความพยายามดังกล่าวได้แก่งานวิจัยใน [4] – [5] ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการได้ แต่พบว่ามีระบบปล่อยคลื่นที่ซับซ้อน การจะทำให้เกิดความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอเป็นพื้นที่ขนาดกว้าง อาจทำได้โดยบังคับให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่สนามแรงไป วิธีหนึ่งสำหรับความต้องการดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยใช้วงจรเลื่อนเฟส [5] ของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศปล่อยคลื่น ซึ่งยังคงเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน และก่อให้เกิดต้นทุนที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการศึกษากลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศปล่อยคลื่นแอมป์ลิจูดในวงจรที่มีการสูญเสีย [6] อันได้แก่ กล้ามเนื้อ เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศชนิดร่องแฉก ลำดับ ว่ามีผลอย่างไรกับตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานให้ได้พื้นที่ครอบคลุมของจุดความร้อนกว้างขึ้น (wide range coverage) และนำไปใช้เป็นตัวทำให้เกิดความร้อนแก่บริเวณของเซลล์มะเร็งสายอากาศปล่อยคลื่นแอมป์ลิจูดนั้น มีลักษณะที่เป็นการต่อแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงโดยตรงเข้ากับสายอากาศ กลไกในการปรับจุดความร้อนของสายอากาศปล่อยคลื่นนั้น สามารถกระทำได้โดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าออกไปจากตำแหน่งปกติ ซึ่งได้มีผู้วิจัยอื่นทำมาก่อน โดยการปรับเฟสของแหล่งกำเนิด [5] แต่ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาเพิ่มในลักษณะโดยภาพรวมว่า นอกจากการปรับเฟสดังกล่าวแล้ว การปรับตำแหน่งของจุดความร้อนยังทำได้โดยการปรับแอมป์ลิจูดและความถี่อีกด้วย อีกทั้งผู้วิจัยยังพบว่าในการประยุกต์ใช้กลไกทางแอมป์ลิจูดในการปรับตำแหน่งของจุดความร้อน การเปลี่ยนแปลงแอมป์ลิจูดสามารถทำได้สะดวกกว่าวิธีอื่น ซึ่งหลักการที่นำเสนอนี้ยังไม่มีผู้วิจัยอื่นนำเสนอมาก่อน เมื่อเปรียบเทียบกับหลักการของสายอากาศที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ [3], [5] อันได้แก่ สายอากาศปล่อยคลื่นรูปทรงกลมซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นสายอากาศแฉก ลำดับบนผิวทรงกลม จะได้พื้นที่ครอบคลุมของจุดความร้อนเพียงบริเวณหนึ่ง ไม่สามารถปรับให้กว้างขึ้นได้ และขณะใช้งานจะต้องมีถุงน้ำ (Water bolus) วางกั้นระหว่างสายอากาศกับบริเวณที่ต้องการปล่อยคลื่นให้เกิดความร้อน ซึ่งมีปริมาณน้ำทำหน้าที่หมุนเวียนน้ำในระบบเพื่อช่วยระบายความร้อนที่ผิว แต่จากรูปแบบของปัญหาในการวิเคราะห์ที่เป็นสายอากาศลอยอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย เมื่อพิจารณาในเชิงปฏิบัติแล้ว สามารถลดขั้นตอนสำหรับการจัดการกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำได้ รวมถึงหลักการที่ได้นำเสนอของวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศร่องแฉก ลำดับ ซึ่งสายอากาศแบบร่องเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างที่ง่ายในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและปฏิบัติรูปแบบหนึ่ง อีกทั้งสามารถควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นให้ออกในด้านที่ต้องการได้ การเพิ่มพื้นที่ประสิทธิผลสามารถกระทำได้โดยหลักการของการปรับเปลี่ยน เฟส ความถี่ หรือ แอมป์ลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ ซึ่งทำให้สามารถขยายแนวความคิดจากเดิมที่จำกัดเฉพาะการเปลี่ยนเฟสเท่านั้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

กลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศปล่อยคลื่นแอมป์ลิจูดในวงจรที่มีการสูญเสียนี้สามารถทำให้กวาดตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดเป็นจุดความร้อน (hotspot) เพื่อให้ได้พื้นที่ประสิทธิผลกว้างขึ้นได้ โดยการเปลี่ยนเฟส (phase) ความถี่ (frequency) หรือ แอมป์ลิจูด (amplitude) ของแหล่งกำเนิด (source) ที่ป้อนให้กับตัวสายอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยคลื่น (applicator) นั้น โดยสายอากาศปล่อยคลื่นที่ทำการวิเคราะห์จะเป็นสายอากาศแบบร่อง ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายและสะดวกในการควบคุมทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศปล่อยคลื่นนี้ เริ่มจากการพิจารณารูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่องในตัวกลางเดียวที่เป็นช่องว่างอิสระ จากนั้นพิจารณารูปแบบของปัญหาที่ประกอบด้วยตัวกลาง 2 ชั้นที่ต่างชนิดกัน พิจารณารูปแบบการกระจายสนามที่แพร่ออกจากปากร่องของสายอากาศ (aperture field distribution) นำไปสู่การหาสนามไฟฟ้าระยะใกล้ (near field) พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตจากสายอากาศแบบร่องแล้วลำดับที่วางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม (spectral domain approach) [7] เมื่อได้สมการสนามไฟฟ้า แล้วจึงนำค่าสนามไฟฟ้าระยะใกล้ที่ได้ไปคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิ (temperature distribution) ที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียนั้น โดยวิธีการผลต่างสืบเนื่อง สามารถทำการวิเคราะห์ปัญหาที่ประกอบด้วยสายอากาศแบบร่อง 1, 2 และ 4 ร่อง สำหรับปัญหาที่ประกอบด้วยสายอากาศ 2 และ 4 ร่อง ได้แสดงผลของการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ ในกรณีของการปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่และแอมพลิจูด เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนใดแล้วแสดงผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องกับทางทฤษฎีในท้ายที่สุด

1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งออกเป็น 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความน่าสนใจของปัญหา การนำเสนอหลักการใหม่ และกล่าวโดยภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของการกระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบร่องในตัวกลางเดียวที่เป็นช่องว่างอิสระ และกลไกการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า โดยการปรับเปลี่ยน เฟส ความถี่ และแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในตัวกลางต่างๆ และทฤษฎีสถานะไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศชนิดร่องโดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม รูปแบบของปัญหาประกอบด้วยสายอากาศแบบร่องที่ลอยอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย หาสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงสเปกตรัมโดยใช้การแปลงฟูริเยร์ 2 มิติ พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตของตัวกลาง 2 ชั้น เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านลงไปในตัวกลางที่มีการสูญเสีย แล้วใช้การแปลงผกผันฟูริเยร์ 2 มิติ เพื่อได้สนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงพิคตที่ส่งผ่านลงไปในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ณ ตำแหน่งใดๆต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้า จากสายอากาศแบบร่องบนระนาบกราวน์ลอยเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ตามบทที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาสายอากาศที่มีจำนวน 2 ร่องขึ้นไป สามารถปรับปรุงวิธีการที่ทำให้ความแรงของขนาดสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปได้ เป็นผลให้มีขนาดพื้นที่ประสิทธิผลกว้างขึ้น โดยการปรับเปลี่ยน เฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ ซึ่งก่อนหน้าที่จะทำการปรับเปลี่ยน ตัวแปรต่างๆดังกล่าว ได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบและตำแหน่งของสายอากาศที่ทำให้ได้พื้นที่ประสิทธิผลกว้างและมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอมากที่สุด

บทที่ 5 กล่าวถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน โดยเริ่มจากการพิจารณากลไกของสนามไฟฟ้า ที่มีผลทำให้เกิดความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก สนามไฟฟ้าภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย สามารถคำนวณหาได้จากค่ากำลังงานของสนามไฟฟ้า และระยะเวลาที่กระตุ้นลงไป สำหรับการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยการใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่องกับสมการการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในการพิจารณาใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่องจำเป็นต้องแบ่งปัญหาออกเป็นตำแหน่งพิกัดที่แน่นอน ที่ต้องการทราบค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดย ณ บริเวณต่างๆของตัวกลางที่มีการสูญเสียจะมีระบบสมการในการคิดค่าการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ท้ายสุดได้แสดงผลการทดลองกับกรณีที่มีความเหมาะสม เปรียบเทียบกับผลที่ได้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ถึงความสอดคล้องกัน

บทที่ 6 กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและผลจากการทดลอง ประเมินผลที่ได้ว่ามีความสอดคล้องกันอย่างไร กับรูปแบบของปัญหาที่กำหนดขึ้น มีข้อผิดพลาดอย่างไร ซึ่งจะให้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาไปสู่กรณีที่มีความซับซ้อนขึ้นไปต่อไป

บทที่ 2

สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบร่อง

2.1 กล่าวนำ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงคลื่นที่อยู่ในบริเวณจำกัดเช่น สายส่งสัญญาณหรือ ท่อนำคลื่นให้แพร่กระจายออกสู่ตัวกลางที่ว่างสายอากาศเช่น ช่องว่างอิสระ (Free space) และในทางกลับกันก็สามารถทำหน้าที่รับคลื่นที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางที่ว่างสายอากาศนั้น ให้เข้ามาอยู่ในท่อนำคลื่น หรือสายส่งสัญญาณได้ การศึกษารูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละชนิดจึงมีความสำคัญ และทำให้ทราบถึงค่าการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาสนามไฟฟ้าระยะใกล้ที่แพร่กระจายจากสายอากาศไดโพล ซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศพื้นฐานที่มีรูปแบบที่ง่ายชนิดหนึ่ง และมีรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าแบบรอบตัว เนื่องจากสายอากาศไดโพลมีโครงสร้างที่เป็นคู่เติมเต็ม (Complementary structure) กับสายอากาศแบบร่อง จึงสามารถนำไปสู่การศึกษารูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศแบบร่อง ซึ่งสามารถควบคุมการแพร่กระจายคลื่นให้ออกด้านเดียวได้ จึงเป็นสายอากาศที่มีความเหมาะสมสำหรับการศึกษากลไกพื้นฐานในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ต่อไป

2.2 สมการพื้นฐาน

สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องสอดคล้องและเป็นไปตามหลักของสมการแมกซ์เวลล์ ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	\vec{B} คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	มีหน่วยเป็น	$(Wb \cdot m^{-2})$
	\vec{D} คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	$(C \cdot m^{-2})$
	\vec{E} คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	$(V \cdot m^{-1})$
	\vec{H} คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	มีหน่วยเป็น	$(A \cdot m^{-1})$
	\vec{J} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	$(A \cdot m^{-2})$
	ρ_v คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	$(C \cdot m^{-3})$
	μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก	มีหน่วยเป็น	$(H \cdot m^{-1})$
	ϵ คือ สภาพยอมไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	$(F \cdot m^{-1})$
	σ คือ ความนำไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	$(S \cdot m^{-1})$

นอกจากนี้ในการหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า บางครั้งจำเป็นต้องอาศัยฟังก์ชันศักย์แวกเตอร์ช่วย (Auxiliary Vector Potential Functions) ดังนั้นจึงแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันดังกล่าวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ ศักย์แวกเตอร์แม่เหล็ก \vec{A}

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.5)$$

ศักย์แวกเตอร์ไฟฟ้า \vec{F}

$$\vec{E} = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{F} \quad (2.6)$$

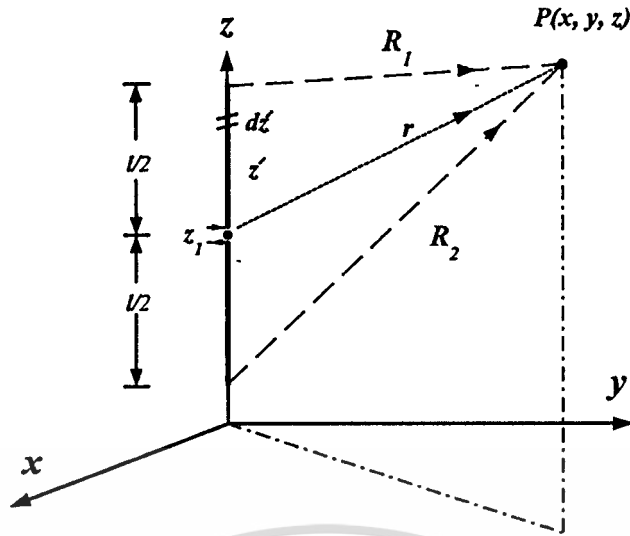
2.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพล

พิจารณาสายอากาศไดโพลขนาดความยาว l ตัวหนึ่งวางอยู่ในแนวแกน Z ณ ตำแหน่ง $(0, 0, z_1)$ ในตัวกลางเดียวที่มีคุณสมบัติประจำตัวเป็น (μ, ϵ) [8] ดังรูปที่ 2.1 หากไดโพลมีความหอม (Thin wire dipole) สามารถพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Electric Current Source) ที่ตัวของสายอากาศไดโพล ว่ามีการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า $(\vec{I}_e(x', y', z'))$ บนตัวของสายอากาศไดโพลเป็นไปในลักษณะของสัญญาณไซน์ ตามสมการ (2.7) ดังนี้

$$\vec{I}_e = \begin{cases} \hat{a}_z I_0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' + z_1 \right) \right] \\ \hat{a}_z I_0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' - z_1 \right) \right] \end{cases} \quad \text{เมื่อ} \quad \begin{cases} z_1 \leq z' \leq z_1 + \frac{l}{2} \\ z_1 - \frac{l}{2} \leq z' \leq z_1 \end{cases} \quad (2.7)$$

ดังนั้นสามารถหาศักย์แวกเตอร์แม่เหล็ก ตลอดความยาวของไดโพลได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 รูปแบบปัญหาของสายอากาศไดโพล

$$\vec{A} = \hat{a}_z \frac{\mu I_0}{4\pi} \left[\int_{z_1 - \frac{l}{2}}^{z_1} \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' - z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{z_1}^{z_1 + \frac{l}{2}} \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' + z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] \quad (2.8)$$

โดย I_0 เป็นค่าสูงสุดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศ

k เป็นค่าคงที่เฟส เท่ากับ $\omega\sqrt{\epsilon\mu}$

r เป็นระยะทางจากสายอากาศถึงจุดที่สนใจใดๆ $P(x, y, z)$

โดย

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.9ก)$$

เมื่อสายอากาศอยู่ที่จุดกำเนิด ณ ตำแหน่ง $x'=0, y'=0$ และพิจารณาในพิกัดทรงกระบอกจะได้ว่า

$$r = \sqrt{\rho^2 + (z-z')^2} \quad (2.9ข)$$

จากความสัมพันธ์ของศักย์แวกเตอร์แม่เหล็ก \vec{A} กับสนามแม่เหล็ก ตามสมการ (2.5) และพิจารณาในพิกัดทรงกระบอกสำหรับองค์ประกอบ A_z ไม่ได้แปรตามตัวแปร ϕ ในสมการ (2.8) จะได้ว่า

$$\vec{H} = -\hat{a}_\phi \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{H} = -\hat{a}_\phi \frac{I_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \int_{z_1 - \frac{l}{2}}^{z_1} \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' - z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{z_1}^{z_1 + \frac{l}{2}} \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' + z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right\} \quad (2.10)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler's Relation)

$$\sin \left[k \left(\frac{l}{2} \pm z' \pm z_1 \right) \right] = \frac{e^{jk(\frac{l}{2} \pm z' \pm z_1)} - e^{-jk(\frac{l}{2} \pm z' \pm z_1)}}{2j} \quad (2.11)$$

ทำให้สามารถลดรูปสมการ (2.10) ได้เป็น

$$H_\phi = -\frac{I_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \int_{z_1 - \frac{l}{2}}^{z_1} \left[\frac{e^{jk(\frac{l}{2} + z' - z_1)} - e^{-jk(\frac{l}{2} + z' - z_1)}}{2j} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{z_1}^{z_1 + \frac{l}{2}} \left[\frac{e^{jk(\frac{l}{2} - z' + z_1)} - e^{-jk(\frac{l}{2} - z' + z_1)}}{2j} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right\} \quad (2.12)$$

ทำการอินทิเกรตและจัดรูปใหม่ได้

$$H_\phi = -\frac{I_0}{4\pi j \rho} \left\{ e^{-jkR_1} + e^{-jkR_2} - 2 \cos \left(\frac{kl}{2} \right) e^{-jkr} \right\} \quad (2.13)$$

โดย

$$r = \sqrt{\rho^2 + (z - z_1)^2}$$

$$R_1 = \sqrt{\rho^2 + \left(z - z_1 - \frac{l}{2} \right)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{\rho^2 + \left(z - z_1 + \frac{l}{2} \right)^2}$$

จากสมการของแมกซ์เวลล์ (2.2) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และถ้าพิจารณาในตัวกลางที่เป็น ช่องว่างอิสระ ดังนั้น $\sigma = 0$ สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสมมติว่าองค์ประกอบ H_ϕ ไม่ได้แปรตามตัวแปร ϕ จะสามารถหาสนามไฟฟ้าจากสมการ (2.14) ได้เป็น

$$E_\rho = j \frac{\eta_0 I_0}{4\pi\rho} \left[\left(z - z_1 - \frac{l}{2} \right) \frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} + \left(z - z_1 + \frac{l}{2} \right) \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} - 2(z - z_1) \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \right] \quad (2.15)$$

$$E_z = -j \frac{\eta_0 I_0}{4\pi} \left[\frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} + \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \right] \quad (2.16)$$

โดย ρ เป็นตัวแปรรัศมีในพิกัดทรงกระบอก เท่ากับ $\sqrt{x^2 + y^2}$

η_0 เป็นค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของอากาศ เท่ากับ $\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$

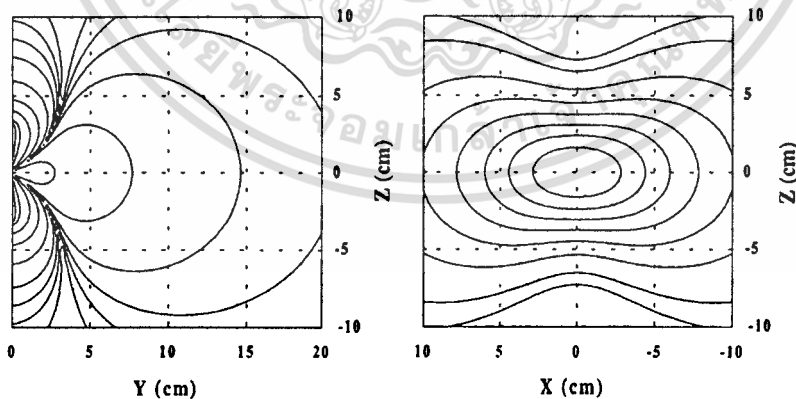
k_0 เป็นค่าคงตัวเฟส เท่ากับ $\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$

ω เป็นความเร็วเชิงมุมของความถี่ f เท่ากับ $2\pi f$

l เป็นความยาวของสายอากาศ เท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$

สนามไฟฟ้าทั้งหมดเป็นผลรวมของสมการ (2.15) และ (2.16) ของสายอากาศไดโพล 1 ตัว คือ

$$\vec{E} = E_\rho \hat{a}_\rho + E_z \hat{a}_z \quad (2.17)$$

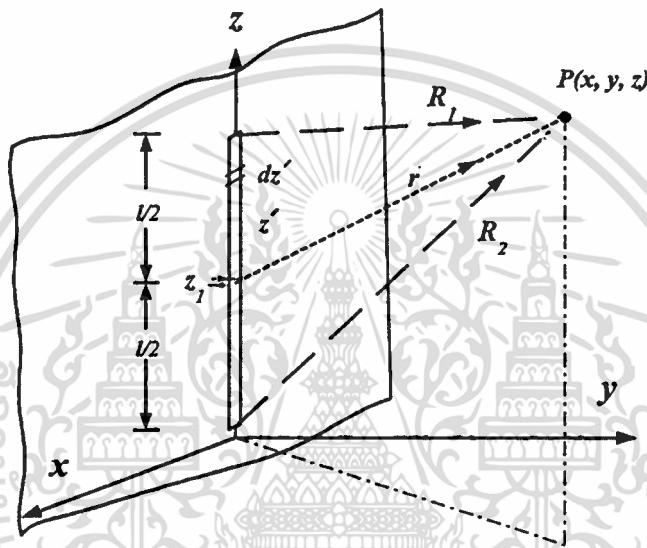


รูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศไดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณรูปแบบการกระจายขนาดของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพล แสดงดังรูปที่ 2.2 ณ ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต โดยสายอากาศไดโพลมีความยาวเท่ากับครึ่ง ความยาวคลื่น ซึ่งมีค่าประมาณ 6.1 เซนติเมตร วางอยู่ในช่องว่างอิสระ(Free space) ที่จุดกำเนิด รูป ทางด้านซ้ายแสดงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในระนาบ YZ และรูปทางด้านขวาแสดงรูปแบบ การกระจายสนามไฟฟ้าในระนาบ XZ ที่ตำแหน่ง $y=5$ เซนติเมตร

2.4 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง



รูปที่ 2.3 รูปแบบปัญหาของสายอากาศแบบร่อง

พิจารณาสายอากาศแบบร่องขนาดความยาว l ร่องหนึ่งวางอยู่ในแนวแกน Z ณ ตำแหน่ง $(0,0,z_1)$ ในตัวกลางเดี่ยวยที่มีคุณสมบัติประจำตัวเป็น (μ, ϵ) [8] ดังรูปที่ 2.3 หากร่องมีความกว้างน้อย สามารถพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก (Magnetic Current Source) ที่ตัวของสายอากาศแบบร่อง ว่ามีการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก $(\vec{I}_m(x', y', z'))$ บนตัวของสายอากาศแบบร่องเป็นไปในลักษณะของสัญญาณไซน์เช่นเดียวกับกรณีของการพิจารณาสายอากาศไดโพล และเนื่องจากสายอากาศแบบร่องมีโครงสร้างที่เป็นคู่เติมเต็ม (Complementary structure) กับสายอากาศไดโพล ดังนั้นจึงมีรูปแบบของการแก้สมการเพื่อหาสมการสนามไฟฟ้าที่เป็นไปในทำนองเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนจากการพิจารณาศักย์แวกเตอร์แม่เหล็กมาเป็นศักย์แวกเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเมื่อแก้สมการแล้วจะได้สมการของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศแบบร่องโดยตรง สมการของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง เป็นดังนี้

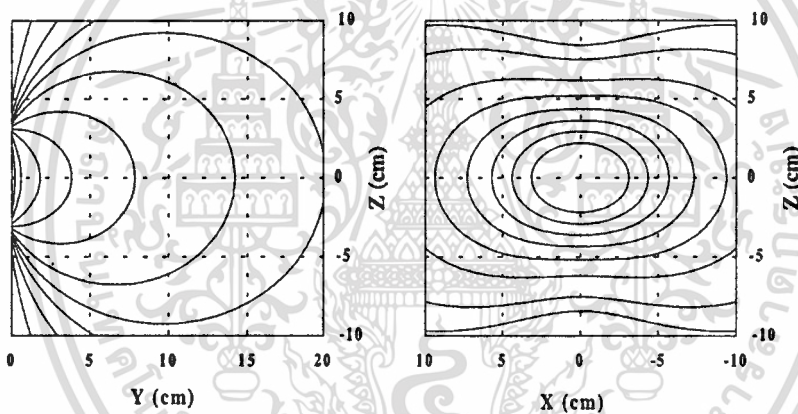
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{E} = E_\phi \hat{a}_\phi \quad (2.18)$$

โดย

$$E_\phi = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \left\{ e^{-jk_0 R_1} + e^{-jk_0 R_2} - 2\cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r} \right\}$$

ผลการคำนวณรูปแบบการกระจายขนาดของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง ณ ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยสายอากาศแบบร่องมีความยาวเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งมีค่าประมาณ 6.1 เซนติเมตร วางอยู่ในช่องว่างอิสระ (Free space) ที่จุดกำเนิด รูปทางด้านซ้ายแสดงสนามไฟฟ้าในระนาบ YZ และรูปทางด้านขวาแสดงสนามไฟฟ้าในระนาบ XZ ที่ตำแหน่ง $y=5$ เซนติเมตร จะเห็นว่าสายอากาศทั้งสองชนิดต่างก็มีสนามไฟฟ้าแรงที่สุดที่ตรงกลางของสายอากาศ



รูปที่ 2.4 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง

2.5 การปรับตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศโดยทั่วไปนั้น จะมีความแรงของสนามไฟฟ้า ณ บริเวณกึ่งกลางของสายอากาศ ดังเช่นกรณีของการกระจายสนามไฟฟ้าของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบร่องที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จากการศึกษาพบว่า สำหรับกรณีที่สายอากาศมีจำนวนมากกว่า 1 ตัว สามารถปรับความแรงของสนามไฟฟ้าให้เปลี่ยนตำแหน่งไปจากบริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศได้ สายอากาศแบบร่องเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างที่ง่ายในการสร้างและทำการทดลองรูปแบบหนึ่ง และสามารถควบคุมให้มีการกระจายคลื่นได้จากทางด้านเดียว จึงเลือกสายอากาศชนิดนี้เพื่อทำการศึกษาหลักการปรับตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า สามารถกระทำได้โดยการปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ แอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ [9] การปรับตำแหน่งของสายอากาศแบบร่องเป็นปัจจัยแรก เพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่ของสนามไฟฟ้ากว้างและมีความสม่ำเสมอมากที่สุด ในระยะที่สนใจ ก่อนการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆต่อไป

พิจารณารูปแบบของปัญหา เมื่อจัดลักษณะตำแหน่งการวางสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ในแนวแกน Z ณ ตำแหน่ง $-z_1$ และ z_1 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5 จากสมการสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง (2.18) จะได้ว่า สนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแบบร่องทั้งสองสามารถรวมกันแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

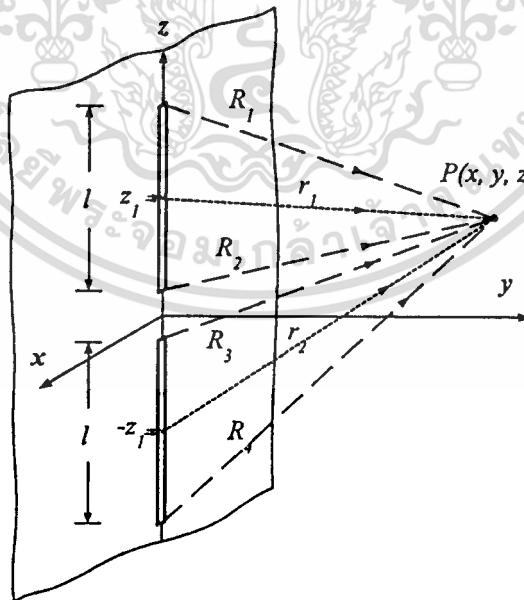
$$\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2.19)$$

โดย

$$\vec{E}_1 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \left\{ e^{-jk_0 R_1} + e^{-jk_0 R_2} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r_1} \right\} \hat{a}_\phi$$

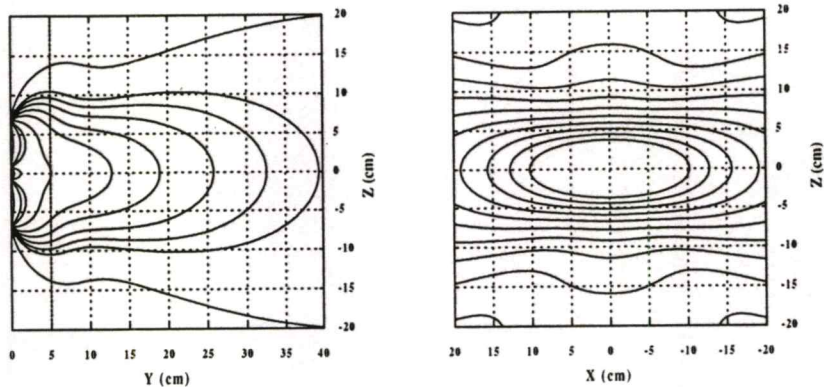
$$\vec{E}_2 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \left\{ e^{-jk_0 R_3} + e^{-jk_0 R_4} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r_2} \right\} \hat{a}_\phi$$

\vec{E}_1, \vec{E}_2 เป็นสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องร่องบนและร่องล่างตามลำดับ

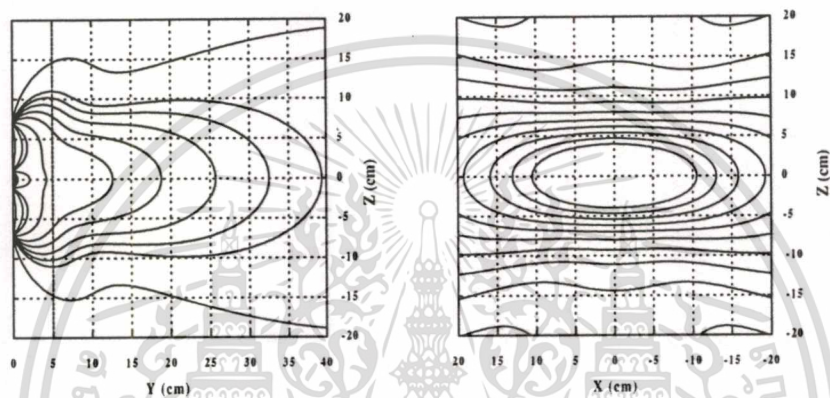


รูปที่ 2.5 รูปแบบปัญหาของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง

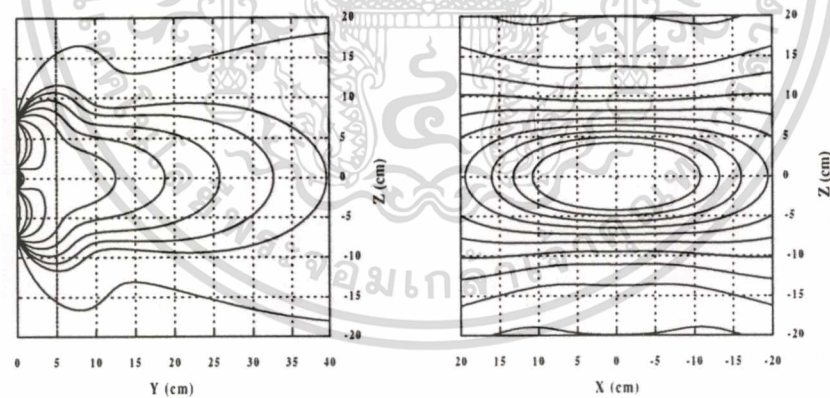
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศ

ก) ระยะห่าง 7 เซนติเมตร ข) ระยะห่าง 8 เซนติเมตร ค) ระยะห่าง 9 เซนติเมตร

ผลรวมของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ความยาวของแต่ละร่องมีขนาดเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นวางอยู่ในแนวแกน Z โดยการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงดังรูปที่ 2.6 รูปทางด้านซ้ายแสดงการกระจายของสนามไฟฟ้ารวมในระนาบ YZ และรูปทางด้านขวาแสดงภาพตัดขวาง(การกระจายของสนามไฟฟ้าในระนาบ XZ) ที่ตำแหน่ง $y=5$ เซนติเมตร รูป 2.6ก แสดงผลรวมของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองที่มีระยะห่างกัน 7 เซนติเมตร ณ ตำแหน่ง $z_1 = 3.5$ เซนติเมตร และ $-z_1 = -3.5$ เซนติเมตร รูป 2.6ข แสดงผลรวมของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองที่มีระยะห่างกัน 8 เซนติเมตร ณ ตำแหน่ง $z_1 = 4$ เซนติเมตร และ $-z_1 = -4$ เซนติเมตร ตามลำดับ รูป 2.6ค แสดงผลรวมของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองที่มีระยะห่างกัน 9 เซนติเมตร ณ ตำแหน่ง $z_1 = 4.5$ เซนติเมตร และ $-z_1 = -4.5$ เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าที่เส้นทึบดำซึ่งมีค่าระดับของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 75 % (ที่ความแรงของสนามสูงสุดเท่ากับ 100 %) ของรูป 2.6ก จะมีความสม่ำเสมอ แต่มีขนาดพื้นที่ที่น้อยกว่ารูป 2.6ข ในกรณีของรูป 2.6ค จะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องตามรูป 2.6ข จึงมีความเหมาะสมสำหรับศึกษาการปรับตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าในวิธีอื่นๆต่อไป

2.5.1 การปรับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง โดยปรับเปลี่ยนความถี่

จากลักษณะการวางสายอากาศตามรูปที่ 2.5 เมื่อทำการปรับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่องทั้งสองไม่เท่ากัน สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าตามสมการ

$$\vec{E}_r = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad ; \quad f_1, f_2 \quad (2.20)$$

โดย

$$\vec{E}_1 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \left\{ e^{-jk_0 R_1} + e^{-jk_0 R_2} - 2\cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r} \right\} \hat{a}_\phi$$

$$\vec{E}_2 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \left\{ e^{-jk_0 R_{31}} + e^{-jk_0 R_4} - 2\cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r} \right\} \hat{a}_\phi$$

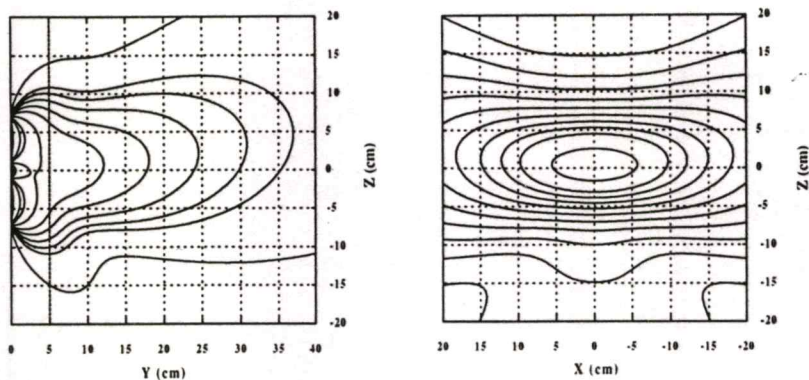
เมื่อ f_1 เป็นความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่องร่องบน

f_2 เป็นความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่องร่องล่าง

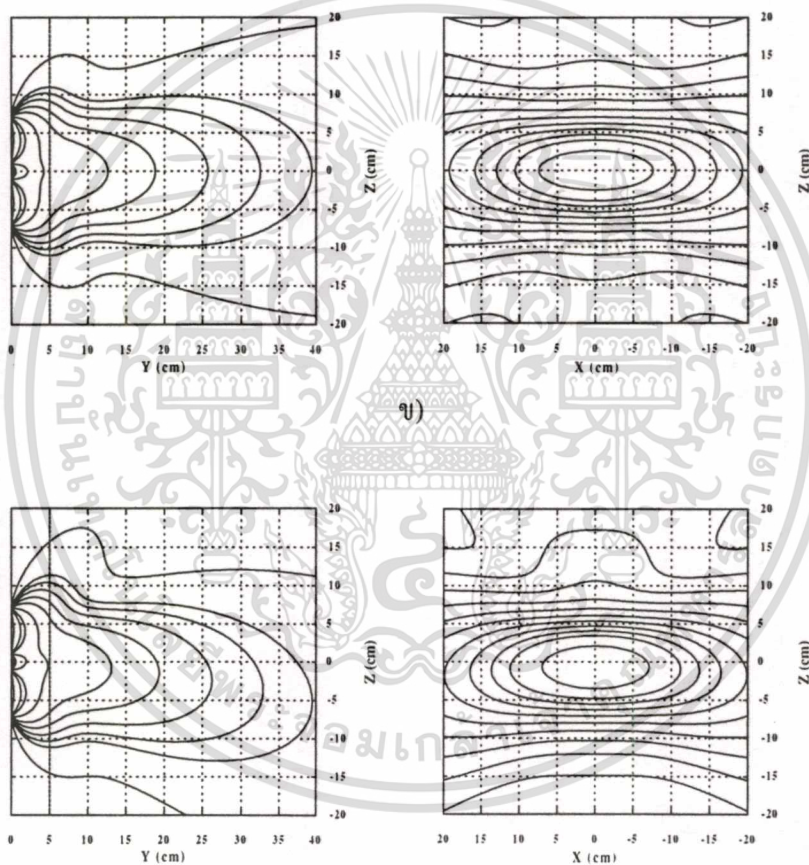
กำหนดแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าเท่ากัน แล้วทำการปรับเปลี่ยนความถี่ f_1 และคงค่าความถี่ f_2 ณ ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ตจะ ได้ผลการคำนวณดังนี้

การปรับเปลี่ยนความถี่ที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่อง ดังแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า รูป 2.7ก เมื่อกำหนดความถี่ของสายอากาศร่องบนเป็น 2350 เมกกะเฮิร์ต ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้ารวม จะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง z เป็นบวก รูป 2.7ข เมื่อความถี่ของสายอากาศแบบร่องทั้งสองเท่ากัน 2450 เมกกะเฮิร์ต ตำแหน่งสนามไฟฟ้ารวมจะขึ้นที่ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ค)

รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

ก) ความถี่ 2350 เมกกะเฮิรต์ ข) ความถี่ 2450 เมกกะเฮิรต์ ค) ความถี่ 2550 เมกกะเฮิรต์

และรูป 2.7ค เมื่อปรับความถี่ของสายอากาศร่องบนเป็น 2550 เมกกะเฮิรต์ ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้ารวม จะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง z เป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การปรับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องโดยปรับเปลี่ยนเฟส

จากลักษณะการวางสายอากาศตามรูปที่ 2.5 เมื่อทำการปรับเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่องทั้งสองไม่เท่ากัน สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าตามสมการ

$$\vec{E}_T = \vec{E}_1 e^{-j\phi_1} + \vec{E}_2 e^{-j\phi_2} \quad (2.21)$$

โดย

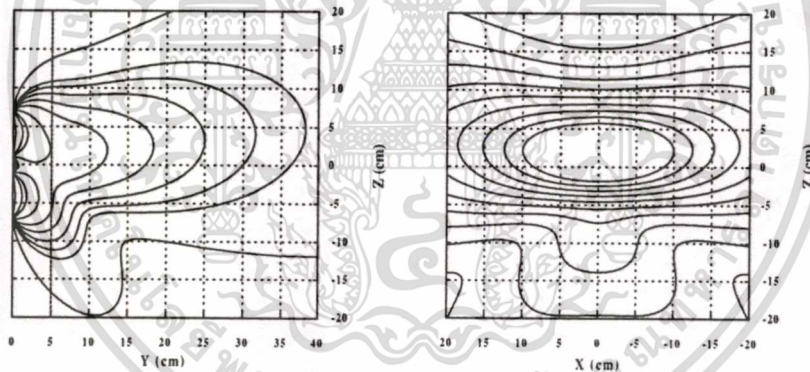
$$\vec{E}_1 = \frac{I_0}{4\pi j \rho} \left\{ e^{-jk_0 R_1} + e^{-jk_0 R_2} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r_1} \right\} \hat{a}_\phi$$

$$\vec{E}_2 = \frac{I_0}{4\pi j \rho} \left\{ e^{-jk_0 R_{31}} + e^{-jk_0 R_4} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r_2} \right\} \hat{a}_\phi$$

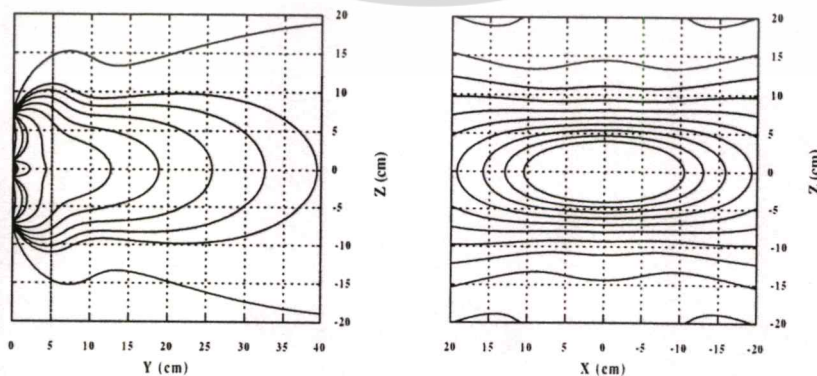
เมื่อ

ϕ_1 เป็นเฟสของสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่องร่องบน

ϕ_2 เป็นเฟสของสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่องร่องล่าง

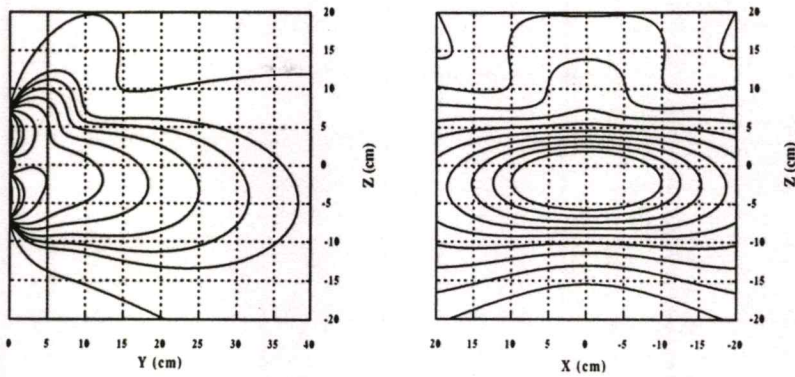


ก)



ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส

ก) เฟส -22.5° ข) เฟส 0° ค) เฟส 22.5°

เมื่อกำหนดแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าเท่ากัน แล้วทำการเปลี่ยนแปลงเฟส ϕ_1 และคงค่าเฟส ϕ_2 ณ เฟส 0° จะได้ผลการคำนวณดังนี้

การเปลี่ยนแปลงเฟสที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่องดังแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่า รูป 2.8ก เมื่อกำหนดเฟสของสายอากาศร่องบนเป็น -22.5° ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้ารวม จะขี้อยู่ที่ตำแหน่ง z เป็นบวก รูป 2.8ข เมื่อเฟสของสายอากาศแบบร่องทั้งสองเท่ากัน 0° ตำแหน่งสนามไฟฟ้ารวมจะขี้อยู่ที่ตรงกลาง และรูป 2.8ค เมื่อปรับเฟสของสายอากาศร่องบนเป็น 22.5° ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้ารวม จะขี้อยู่ที่ตำแหน่ง z เป็นลบ

2.5.3 การปรับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่องโดยปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

จากลักษณะการวางสายอากาศตามรูปที่ 2.5 เมื่อทำการปรับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่องทั้งสองไม่เท่ากัน สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าตามสมการ

$$\vec{E}_T = I_1 \vec{E}_1 + I_2 \vec{E}_2 \quad (2.22)$$

โดย

$$\vec{E}_1 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \left\{ e^{-jk_0 R_{11}} + e^{-jk_0 R_{12}} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r_1} \right\} \hat{a}_\phi$$

$$\vec{E}_2 = \frac{I_0}{4\pi j\rho} \left\{ e^{-jk_0 R_{21}} + e^{-jk_0 R_{22}} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) e^{-jk_0 r_2} \right\} \hat{a}_\phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

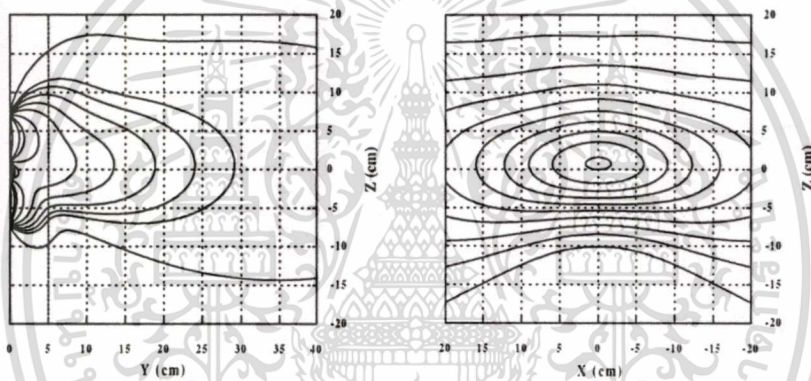
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

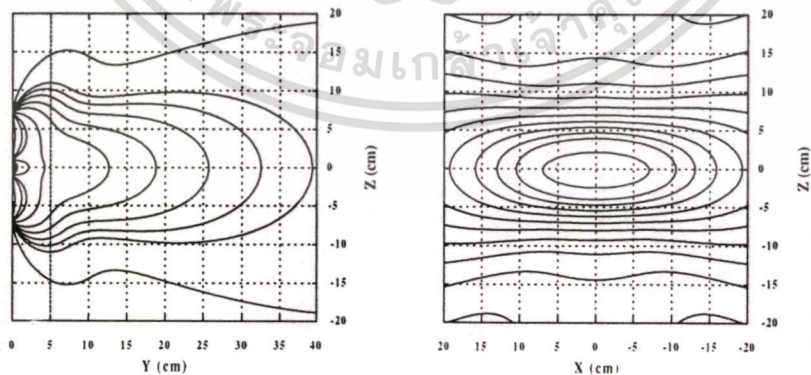
 I_1 เป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่องร่องบน I_2 เป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่องร่องล่าง

เมื่อกำหนดเฟสและความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าเท่ากัน แล้วทำการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด I_1 และคงค่าแอมพลิจูด I_2 ณ อัตราส่วนของแอมพลิจูดเท่ากับ 1 จะได้ผลการคำนวณดังนี้

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่อง ดังแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่า รูป 2.9ก) เมื่อกำหนดอัตราส่วนของแอมพลิจูดของสายอากาศร่องบนเป็น 2 ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้ารวม จะชี้อยู่ที่ตำแหน่ง z เป็นบวก รูป 2.9ข) เมื่ออัตราส่วนของแอมพลิจูดของสายอากาศแบบร่องทั้งสองเท่ากัน 1 ตำแหน่งสนามไฟฟ้ารวมจะชี้ที่ตรงกลาง และ รูป 2.9ค) เมื่อปรับอัตราส่วนของแอมพลิจูดของสายอากาศร่องล่างเป็น 2 ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้ารวม จะชี้อยู่ที่ตำแหน่ง z เป็นลบ

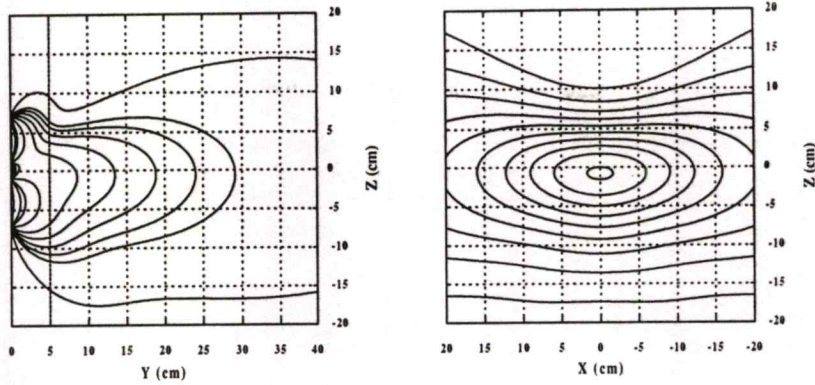


ก)



ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค)

รูปที่ 2.9 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

ก) แอมพลิจูดร่องที่ 1 เป็น 2 ข) แอมพลิจูดเท่ากัน ค) แอมพลิจูดร่องที่ 2 เป็น 2

2.6 สรุป

สายอากาศโคโพลมีลักษณะ โครงสร้างที่เป็นคู่เติมเต็มกับสายอากาศแบบร่อง แต่เมื่อพิจารณาการกระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศโคโพลกับสายอากาศแบบร่อง พบว่าจะมีความแตกต่างกันของรูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้า สายอากาศแบบร่องสามารถถูกควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นให้ออกทางด้านเดียวได้ จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งความแรงสนามไฟฟ้า การกระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของตำแหน่งการวางสายอากาศ ซึ่งความแรงของสนามไฟฟ้ารวมนี้สามารถเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศได้โดยการปรับเปลี่ยนความถี่ เฟส และแอมพลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ ในทางปฏิบัตินั้น การปรับเปลี่ยนความถี่จะทำให้ระบบมีการใช้งานย่านความถี่ที่กว้าง มีความยุ่งยากในการจัดเตรียมสายอากาศและแหล่งกำเนิดกำลังงาน เป็นผลทำให้เกิดการรบกวนกับระบบการสื่อสารอื่นๆ ได้ การปรับเปลี่ยนเฟสก็ทำให้ต้องหาแหล่งกำเนิดที่มีกำลังงานสูงขึ้นเพื่อชดเชยการลดทอนที่ระบบการปรับเฟส ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าในการจัดเตรียมระบบปรับ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดจึงมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำงาน ณ ความถี่เดียว และไม่ต้องจัดเตรียมระบบเพิ่มเติมใดๆเป็นพิเศษ จากผลการวิเคราะห์ได้แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังกล่าวกับสายอากาศแบบร่อง เพื่อให้เข้าใจหลักพื้นฐานของการพิจารณาการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศที่มากกว่า 1 ร่อง ใน 1 ตัวกลางที่เป็น ช่องว่างอิสระได้ และนำไปสู่การพิจารณาปัญหาที่ซับซ้อนในบทความต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีสานาไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่องโดยวิธี โดเมนเชิงสเปกตรัมและเงื่อนไขขอบเขต

3.1 กล่าวนำ

การพัฒนาาระบบสายอากาศปล่อกคลื่นภายนอกเพื่อการรักษามะเร็งโดยใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อน (Air cool) สามารถลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในระบบทำความเย็น แต่จะมีความยุ่งยากในการจัดการให้คลื่นแพร่กระจายบริเวณที่จะรักษา ดังนั้นการพิจารณาปัญหาที่มีโครงสร้างเป็นสายอากาศแบบร่องบนระนาบกราวด์ลยเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศ โดยมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้ได้พื้นที่ประสิทธิผลที่กว้าง จึงถือว่าเป็นปัญหาหลักในการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และในบทนี้จะกล่าวถึง การพิจารณาสนามไฟฟ้าในระยะใกล้ (Near field) ของสายอากาศ ซึ่งเป็นคลื่นทรงกลมไม่สามารถนำมาใช้กับทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นระนาบได้โดยตรง สนามไฟฟ้าระยะใกล้ในโดเมนเชิงสเปกตรัมสามารถพิจารณาได้ว่ามีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ วิธีการที่สามารถแปลงระบบสมการให้เป็นโดเมนเชิงสเปกตรัมกระทำได้โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ (Fourier transformation) เนื่องจากโครงสร้างของปัญหาประกอบด้วยการเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางที่ต่างชนิดกันจึงต้องทำการศึกษารูปแบบของการเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางนั้นๆเป็นอันดับแรก และจากคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน ณ บริเวณรอยต่อของสองตัวกลางนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ของคลื่นที่ส่งผ่านและคลื่นที่สะท้อนกลับขึ้น ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีของการตกกระทบแบบตั้งฉาก (Normal Incident) ของทั้งสองตัวกลางเท่านั้น [10] ดังนั้นทฤษฎีพื้นฐานและเงื่อนไขขอบเขตที่กล่าวมาจึงมีความจำเป็นในการพิจารณาเพื่อหารูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

3.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบในตัวกลางใดๆ

3.2.1 คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

การเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบสม่ำเสมอในตัวกลางใดๆ จะต้องสอดคล้องกับสมการของแมกซ์เวลล์ ตามสมการ (2.1) - (2.4) เมื่อพิจารณาคำเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นช่องว่างอิสระ ซึ่งไม่มีประจุอิสระ $\rho_v = 0$ และไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ $\sigma = 0$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของแมกซ์เวลล์ได้ใหม่เป็น

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{H} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_0 \vec{E} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (3.4)$$

สมการคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้า สามารถหาได้โดยกระทำกับสมการ (3.1)

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -j\omega\mu_0 (\nabla \times \vec{H}) \quad (3.5)$$

แทนสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.5) แล้วทำการจัดรูปใหม่ จะได้

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = k_0^2 \vec{E} \quad (3.6)$$

โดย

$$k_0 \text{ เป็น ค่าคงที่เฟส เท่ากับ } \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$$

พิจารณาเทอมทางด้านซ้ายของสมการ (3.6) ตามคุณสมบัติของเวกเตอร์ จะได้

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (3.7)$$

แทนสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.6) แล้วจัดรูปใหม่ จะได้

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} - k_0^2 \vec{E} = 0 \quad (3.8)$$

พิจารณาคุณสมบัติตามสมการ (3.3) จะได้ว่า

$$\nabla^2 \vec{E} + k_0^2 \vec{E} = 0 \quad (3.9)$$

เมื่อกำหนดให้เวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีองค์ประกอบในแนวแกน X อย่างเดียวและพิจารณาในพิกัดมุมฉาก จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k_0^2 E_x = 0 \quad (3.10)$$

ถ้าคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่พิจารณา ณ ตำแหน่งระนาบ $z = 0$ และสนามไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบ z เท่านั้น จะได้

$$\frac{\partial^2 E_x(z)}{\partial z^2} + k_0^2 E_x(z) = 0 \quad (3.11)$$

ผลเฉลยของสมการ (3.11) จะอยู่ในรูปของ

$$E_x(z) = Ae^{-jk_0z} + Be^{+jk_0z} \quad (3.12)$$

โดย A และ B ไม่เป็นฟังก์ชันกับ z แต่จะขึ้นอยู่กับ ω และเมื่อกำหนดให้ $A \equiv E_0^+$ และ $B \equiv E_0^-$ สามารถเขียนสมการ (3.12) ได้ใหม่เป็น

$$E_x(z) = E_0^+ e^{-jk_0z} + E_0^- e^{+jk_0z} \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.1) สามารถหาสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

$$\vec{H} = -\frac{1}{j\omega\mu_0} (\nabla \times \vec{E}) \quad (3.14)$$

สนามไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบ z เท่านั้น จะได้

$$\vec{H} = -\frac{\hat{a}_y}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (3.15)$$

หรือ

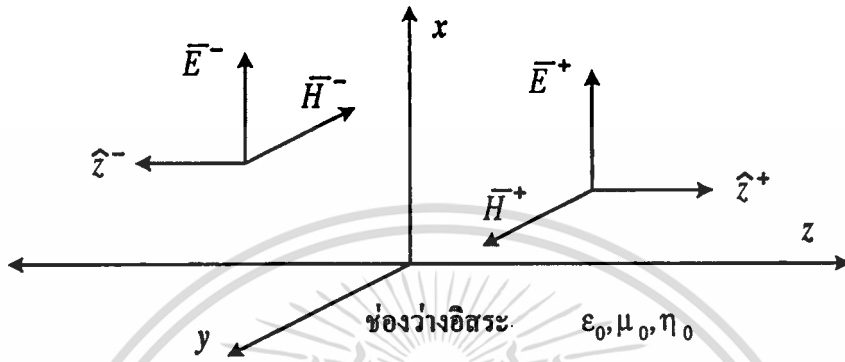
$$H_y(z) = \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_0^+ e^{-jk_0z} - \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_0^- e^{+jk_0z} \quad (3.16)$$

แทน $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ ลงในสมการ (3.16) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_y(z) = \frac{E_0^+}{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}} e^{-jk_0 z} - \frac{E_0^-}{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}} e^{+jk_0 z} \quad (3.17)$$

สมการ (3.16) และ (3.17) เป็นสมการของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ การเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นไปตามแนวแกน Z ทั้งทิศบวกและลบ ดังรูป



รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องว่างอิสระ

3.2.2 คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ผลกระทบของตัวกลางที่มีความสูญเสียที่มีต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบสามารถทำให้เกิดกลไกการสูญเสียได้หลายรูปแบบ แต่สิ่งที่มีอิทธิพลส่วนใหญ่มักพิจารณาว่าเป็นเพราะมีความนำไฟฟ้า $\sigma \neq 0$ นั้นเอง เมื่อย้อนกลับไปพิจารณาสมการ (2.1)-(2.4) และสมการ (3.5) จะได้ว่า

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\gamma^2 \vec{E} \quad (3.18)$$

โดย
$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \quad (3.19)$$

ถ้าสนามไฟฟ้า E_x เป็นฟังก์ชันของ z เท่านั้น จะสามารถจัดสมการ (3.18) ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \gamma^2 E_x = 0 \quad (3.20)$$

ซึ่งจะได้ผลเฉลยในรูปของ

$$E_x(z) = E_0^+ e^{-\gamma z} + E_0^- e^{+\gamma z} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการสนามแม่เหล็กที่สอดคล้องกันคือ

$$H_y(z) = \frac{E_0^+ e^{-\gamma z}}{j\omega\mu/\gamma} - \frac{E_0^- e^{+\gamma z}}{j\omega\mu/\gamma} \quad (3.22)$$

พิจารณาสมการ (3.19) จะได้ว่า

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \equiv \alpha + j\beta \quad (3.23)$$

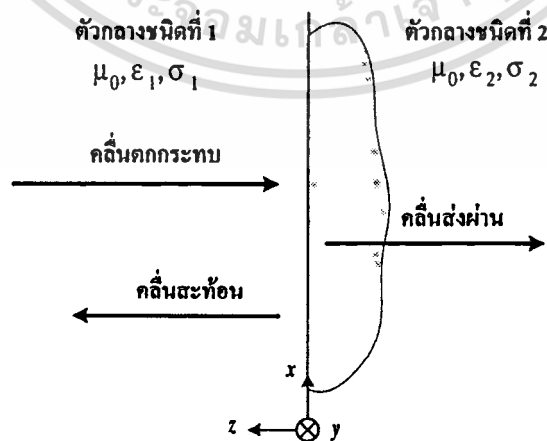
โดย $\alpha = \text{Re}(\gamma) = \text{Re}\left\{\sqrt{-\omega^2\mu\epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)}\right\}$ มีหน่วยเป็น (Np/m)

$\beta = \text{Im}(\gamma) = \text{Im}\left\{\sqrt{-\omega^2\mu\epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)}\right\}$ มีหน่วยเป็น (rad/m)

α คือ ค่าคงที่การลดทอน β คือ ค่าคงที่เฟส และ γ คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายเชิงซ้อน

3.2.3 การเคลื่อนที่ตกกระทบแบบตั้งฉากของคลื่นระนาบ ณ รอยต่อของ 2 ตัวกลางใด ๆ

เมื่อมีแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากที่ใดๆ แพร่กระจายคลื่นระนาบมาตกกระทบระหว่าง 2 ตัวกลางใดๆ ที่ต่างชนิดกัน จะเกิดการส่งผ่านของคลื่นผ่านขอบเขตของรอยต่อเข้าไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง และมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา จึงพิจารณากรณีการตกกระทบของคลื่นระนาบแบบตั้งฉากระหว่างรอยต่อของ 2 ตัวกลางใด ๆ นั้น



รูปที่ 3.2 รอยต่อขอบเขตของ 2 ตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นกรเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบผ่านรอยต่อของ 2 ตัวกลางต่างชนิดกัน แบบตกกระทบตั้งฉาก โดยขอบเขตที่ $z > 0$ จะเป็นตัวกลางใดๆชนิดที่ 1 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์เป็น μ_0, ϵ_1 และ σ_1 ขอบเขตที่ $z < 0$ จะเป็นตัวกลางใดๆชนิดที่ 2 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์เป็น μ_0, ϵ_2 และ σ_2 สำหรับคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่ขอบเขต $z > 0$ จะได้เป็น

$$E_x = E^- e^{+jk_1 z} + E^+ e^{-jk_1 z} \quad z > 0 \quad (3.24)$$

และ

$$H_y = -\frac{E^-}{\eta_1} e^{+jk_1 z} + \frac{E^+}{\eta_1} e^{-jk_1 z} \quad z > 0 \quad (3.25)$$

โดย E^- และ E^+ เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบและสะท้อนที่รอยต่อ 2 ตัวกลาง ตามลำดับ

k_1 เป็นค่าคงที่เฟสของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย เท่ากับ $\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_1}$

η_1 เป็นอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย เท่ากับ $\sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_1 + j\omega\epsilon_1}}$

สมการ (3.24) และ (3.25) แสดงให้เห็นว่า เป็นคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียในแนวแกน z ทั้งในทิศบวกและลบ คลื่นระนาบสม่ำเสมอที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีการสูญเสียจะต้องมีโพลาไรซ์เดียวกันกับคลื่นตกกระทบตามหลักของความต่อเนื่องขององค์ประกอบของคลื่นที่ขอบเขตรอยต่อของ 2 ตัวกลาง ซึ่งจะต้องมีความถี่เดียวกัน ดังนั้นคลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีการสูญเสียคือ

$$E_x = E_2 e^{+\alpha_2 z} e^{+j\beta_2 z} \quad z < 0 \quad (3.26)$$

$$H_y = -\frac{E_2}{\eta_2} e^{+\alpha_2 z} e^{+j\beta_2 z} \quad z < 0 \quad (3.27)$$

โดย E_2 เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

η_2 เป็นอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย เท่ากับ $\sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_2 + j\omega\epsilon_2}}$

พิจารณาที่รอยต่อของ 2 ตัวกลาง ณ $z = 0$ องค์ประกอบในแนวสัมผัส จะเป็น

$$E_x |_{z=0^+} = E_x |_{z=0^-} \quad (3.28)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_y |_{z=0^+} = H_y |_{z=0^-} \quad (3.29)$$

หรือ

$$E_0^+ + E_0^- = E_2 \quad (3.30)$$

และ

$$\frac{E_0^+}{\eta_1} - \frac{E_0^-}{\eta_1} = \frac{E_2}{\eta_2} \quad (3.31)$$

การแก้ปัญหาค้นหาค่าของ E^+ และ E_2 ในเทอมของ E^- ซึ่งทราบค่า จะได้

$$E^+ = E^- \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.32)$$

และ

$$E_2 = E^- \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.33)$$

สามารถนิยามสัมประสิทธิ์การสะท้อน ได้ว่าเป็น อัตราส่วนของสนามไฟฟ้าที่สะท้อนต่อสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ ที่รอยต่อขอบเขต $z = 0$ หรือ

$$R = \frac{E^+}{E^-} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.34)$$

ส่วนสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สามารถนิยามได้ว่าเป็น อัตราส่วนของสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านต่อสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ ที่รอยต่อขอบเขต $z = 0$ หรือ

$$T = \frac{E_2}{E^-} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.35)$$

จากนิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สามารถเขียนสมการ (3.24) - (3.27) ได้ใหม่เป็น

$$E_x = E^- e^{jk_1 z} (1 + R.e^{-2jk_1 z}) \quad z > 0 \quad (3.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_y = -\frac{E^-}{\eta_1} e^{jk_1 z} (1 - R e^{-2jk_1 z}) \quad z > 0 \quad (3.37)$$

และ

$$E_x = TE^- e^{\alpha_2 z} e^{j\beta_2 z} \quad z < 0 \quad (3.38)$$

$$H_y = -\frac{TE^-}{\eta_2} e^{\alpha_2 z} e^{j\beta_2 z} \quad z < 0 \quad (3.39)$$

สมการ (3.36) – (3.37) แสดงสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่สะท้อนกลับจากขอบเขตรอยต่อตามลำดับ ส่วนสมการ (3.38) - (3.39) แสดงสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่ส่งผ่านขอบเขตรอยต่อ ตามลำดับ

3.3 วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม

การหาสนามระยะใกล้ที่แพร่กระจายในอากาศจากสายอากาศแบบร่องโดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม [7] จะใช้วิธีการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transformation) ของสนามที่อยู่บนปากสายอากาศ โดยใช้คุณสมบัติต่างๆของคู่การแปลงฟูริเยร์จากหลักเกณฑ์เบื้องต้นของการแปลงฟูริเยร์ เมื่อ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันใดๆ จะสามารถจัดรูปสมการของการแปลงฟูริเยร์ได้ดังนี้

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-j\omega x} d\omega \quad \text{เมื่อ} \quad -\infty < \omega < \infty \quad (3.40)$$

และสมการผกผันเป็น

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{j\omega x} dx \quad \text{เมื่อ} \quad -\infty < x < \infty \quad (3.41)$$

เพื่อความเหมาะสมกับสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจะกำหนด k_x เทียบได้กับ x จึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x) e^{-jk_x x} dk_x \quad (3.42)$$

และสมการผกผันเป็น

$$F(k_x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{jk_x x} dx \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน เมื่อมีฟังก์ชัน 2 มิติใดๆ $f(x, y)$ ก็จะสามารถจัดรูปสมการของการแปลงฟูรีเยร์ตามหลักเกณฑ์ข้างต้นได้ดังนี้

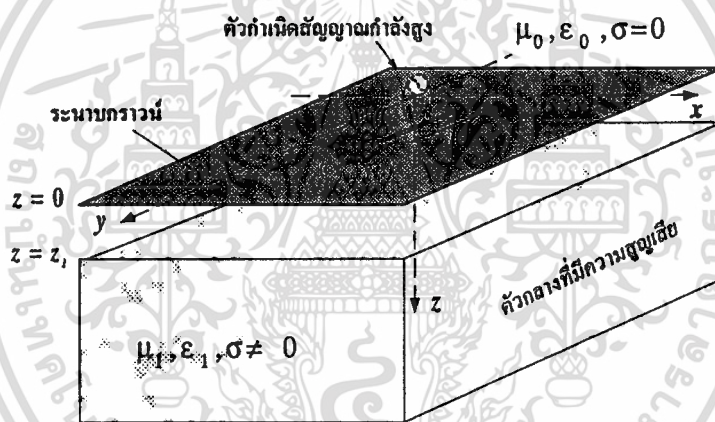
$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad \text{เมื่อ} \quad -\infty < k_x, k_y < \infty \quad (3.44)$$

และสมการผกผันเป็น

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad \text{เมื่อ} \quad -\infty < x, y < \infty \quad (3.45)$$

ซึ่งสมการ (3.44) และ (3.45) จะเป็นคู่สมการพื้นฐานของการแปลงฟูรีเยร์ที่จะใช้ต่อไป

3.4 รูปแบบของปัญหาสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลาง 2 ชั้น



รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

พิจารณาสายอากาศแบบร่องที่มีความยาว l เรียงตัวอยู่ในแนวแกน Y บนแผ่นตัวนำขนาดอนันต์อยู่บนระนาบ XY ในอากาศ ($\mu_0, \epsilon_0, \eta_0, \sigma = 0$) เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดอนันต์ ($\mu_1, \epsilon_1, \eta_1, \sigma \neq 0$) เป็นระยะ z_1 และป้อนสัญญาณจากตัวกำเนิดสัญญาณเชิงกำลังสูง (Power Oscillator) ตรงกลางของสายอากาศแบบร่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 พิจารณาสายอากาศแบบร่อง ณ ตำแหน่ง (x_0, y_0) หากร่องมีความกว้างน้อย สามารถพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก (Magnetic Current Source) ที่ปากของสายอากาศแบบร่อง ว่ามีการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก ($\vec{M}(x, y)$) บนปากของสายอากาศแบบร่องเป็นไปในรูปโคไซน์ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{M}(x, y) = \hat{a}_y \begin{cases} \frac{M_0 \cos(k_0(l - |y - y_0|))\delta(x - x_0)}{\cos(k_0 l)} & ; |y + y_0| \leq \frac{l}{2} \\ 0 & ; |y + y_0| > \frac{l}{2} \end{cases} \quad (3.46)$$

โดย M_0 เป็น ขนาดของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

k_0 เป็น ค่าคงตัวเฟส

$\delta(x - x_0)$ เป็น ฟังก์ชันดิเรคเดลต้า

เนื่องจากสนามใกล้ปากสายอากาศแบบร่องไม่ได้เป็นคลื่นระนาบ ดังนั้นจะใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมเพื่อแปลงรูปแบบของสมการคลื่นนี้ให้เป็นคลื่นระนาบ ซึ่งทำได้โดยแปลงความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กบนปากสายอากาศแบบร่องให้เป็นแผ่นกระแสแม่เหล็กโดยใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบสองมิติ ดังนี้

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{M}(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3.47)$$

โดย k_x, k_y คือ เวกเตอร์ของการแพร่กระจายในแนวแกน X และ Y ตามลำดับ $\bar{M}(x, y)$ เป็นฟังก์ชันของ x และ y คือ

$$\bar{M}(x, y) = M(y)\delta(x)\hat{a}_y \quad (3.48)$$

เมื่อแทนสมการ (3.48) ลงในสมการ (3.47) จะได้

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{-jk_x x} dx \int_{-\infty}^{\infty} M(y) e^{-jk_y y} dy \quad (3.49)$$

จากคุณสมบัติของฟังก์ชันเดลต้า กำหนด ให้ $f(x)$ เท่ากับ $e^{-jk_x x}$ จะได้ว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) f(x) dx = f(0) = e^0 = 1 \quad (3.50)$$

จากสมการ (3.50) เราสามารถลดรูปสมการ (3.49) ได้เป็น

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \int_{-\infty}^{\infty} M(y) e^{-jk_y y} dy \quad (3.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการ (3.46) ถ้ากำหนด $M_0 = 1$ จะเปลี่ยนสมการ (3.51) ได้เป็น

$$\vec{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \int_{y_0 - \frac{l}{2}}^{y_0 + \frac{l}{2}} \frac{\cos(k_0(l - |y - y_0|))}{\cos(k_0 l)} e^{-jk_y y} dy \quad (3.52)$$

หลังจากทำการอินทิเกรตจะได้

$$\vec{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \frac{2e^{-jk_y y_0}}{\cos(k_0 l)} \left[\frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \cos(k_0 \frac{l}{2}) \sin(k_y \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \right] \quad (3.53)$$

โดยการใช้หลักสนามสมมูลของฮอยเกน [10] ดังนี้

$$\vec{M}(k_x, k_y) = -\hat{n} \times \vec{E}(k_x, k_y) \quad (3.54)$$

โดย \hat{n} คือ เวกเตอร์ตั้งฉาก 1 หน่วย ในทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกรณีนี้จะมีทิศในแนวแกน Z และ จากสมการ (3.54) สามารถหาสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงสเปกตรัมได้ดังนี้

$$\vec{E}(k_x, k_y) = -\hat{a}_x \frac{2e^{-jk_y y_0}}{\cos(k_0 l)} \left[\frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \cos(k_0 \frac{l}{2}) \sin(k_y \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \right] \quad (3.55)$$

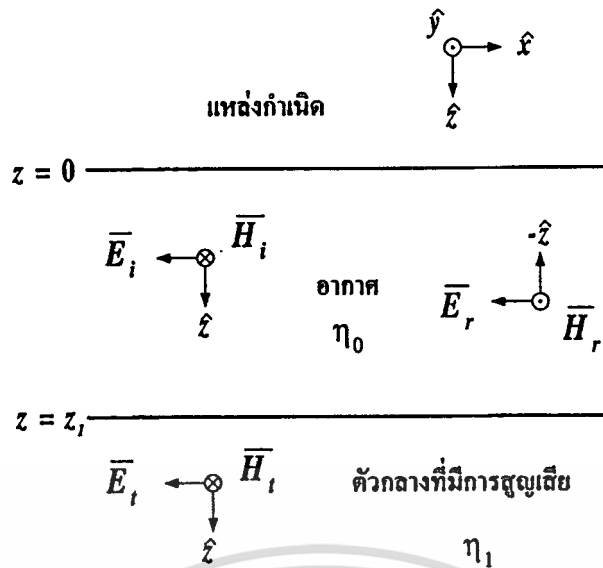
สมการ (3.55) เป็นสูตรทั่วไปของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในโดเมนเชิงสเปกตรัมจากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง

3.5 เงื่อนไขขอบเขตของตัวกลาง 2 ชั้น

ต่อไปพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตเพื่อหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ตามรูปที่ 3.4 เงื่อนไขของตัวกลาง 2 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่น ณ ตำแหน่ง $z=0$ ในอากาศ ($\mu_0, \epsilon_0, \eta_0, \sigma=0$) แพร่กระจายคลื่นตกกระทบบนรอยต่อของอากาศกับตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดอนันต์ ($\mu_1, \epsilon_1, \eta_1, \sigma \neq 0$) ซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ z_1 โดยมีคลื่นที่ส่งผ่านและสะท้อนกลับ ณ ขอบเขตรอยต่อนั้น ดังนี้

$$\vec{E}_i, \vec{H}_i \quad \text{คือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบบ ตามลำดับ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เส้นใยขอบเขตของตัวกลาง 2 ชั้น

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

คือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สะท้อน ตามลำดับ

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

คือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ส่งผ่าน ตามลำดับ

โดย

$$\vec{\tilde{E}}_i = -I.e^{-jk_z z} \hat{a}_x \quad (3.56ก)$$

$$\vec{\tilde{E}}_r = -R.e^{jk_z z} \hat{a}_x \quad (3.56ข)$$

$$\vec{\tilde{E}}_t = -T.e^{-\gamma z} \hat{a}_x \quad (3.56ค)$$

$$\vec{\tilde{H}}_i = -\frac{I}{\eta_0}.e^{-jk_z z} \hat{a}_y \quad (3.57ก)$$

$$\vec{\tilde{H}}_r = \frac{R}{\eta_0}.e^{jk_z z} \hat{a}_y \quad (3.57ข)$$

$$\vec{\tilde{H}}_t = -\frac{T}{\eta_1}.e^{-\gamma z} \hat{a}_y \quad (3.57ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

I คือ สัมประสิทธิ์การตกกระทบ

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

เมื่อ γ คือ ค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น มีค่าเท่ากับ $\alpha + j\beta$

โดย α คือ ค่าคงตัวการลดทอน มีค่าเท่ากับ $\omega \sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_1 \omega} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}}$

β คือ ค่าคงตัวเฟส มีค่าเท่ากับ $\omega \sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_1 \omega} \right)^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}}$

จากหลักของความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้าที่ ณ บริเวณแนวสัมผัสในโดเมนเชิงสเปกตรัมที่ $z=0$ จะเท่ากับสนามไฟฟ้าจากความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E} \quad (3.58)$$

แทนสมการ (3.56ก) และ (3.56ข) ลงในสมการ (3.58) จะได้

$$-I - Re^{-jk_z z_1} = \vec{E} \quad (3.58ก)$$

เงื่อนไขขอบเขตของสนามที่ต่อเนื่อง ณ รอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองที่ $z = z_1$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_t \quad (3.59)$$

แทนสมการ (3.56ก) (3.56ข) และ (3.56ค) ลงในสมการ (3.59) จะได้

$$-Ie^{-jk_z z_1} - R = -Te^{-\gamma z_1} \quad (3.59ก)$$

และพิจารณาสนามแม่เหล็กที่ต่อเนื่อง ณ ขอบเขตรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{H}_i + \bar{H}_r = \bar{H}_t \quad (3.60)$$

แทนสมการ (3.57ก) (3.57ข) และ (3.57ค) ลงในสมการ (3.60) จะได้

$$-\frac{I}{\eta_0} e^{-jk_z z_1} + \frac{R}{\eta_0} = -\frac{T}{\eta_1} e^{-\gamma_1 z_1} \quad (3.60ก)$$

จากสมการ (3.58ก) (3.59ก) และ (3.60ก) สามารถจัดรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} -1 & -e^{-jk_z z_1} & 0 \\ -e^{-jk_z z_1} & -1 & e^{-\gamma_1 z_1} \\ \frac{e^{-jk_z z_1}}{\eta_0} & \frac{1}{\eta_0} & \frac{e^{-\gamma_1 z_1}}{\eta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ R \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

ซึ่งสามารถหาค่าของสัมประสิทธิ์การตกกระทบ การสะท้อน และการส่งผ่าน ได้ดังนี้

$$I = \frac{-(\eta_0 + \eta_1) e^{2jk_z z_1} \bar{E}}{(\eta_0 + \eta_1) e^{2jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)} \quad (3.62)$$

$$R = \frac{(\eta_0 - \eta_1) e^{jk_z z_1} \bar{E}}{(\eta_0 + \eta_1) e^{2jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)} \quad (3.63)$$

$$T = \frac{-2\eta_1 e^{\gamma_1 z_1 + jk_z z_1} \bar{E}}{(\eta_0 + \eta_1) e^{2jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)} \quad (3.64)$$

หลังจากพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน แล้วทำการเปลี่ยนค่าสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงสเปกตรัมให้เป็นค่าสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงพิกัด ได้โดยการแปลงผกผันฟูรีเยร์แบบสองมิติ ดังสมการ (3.65) จึงจะได้ค่าสนามไฟฟ้าในโดเมนเชิงพิกัด ณ ตำแหน่งใดๆ

$$\bar{E}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\bar{E}}(k_x, k_y) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (3.65)$$

$$\text{โดยที่} \quad \bar{\bar{E}}(k_x, k_y) = -T e^{-\gamma_1 \hat{a}_x} \quad (3.65ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการ (3.55) และ (3.64) ลงในสมการ (3.65) จะได้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

กำหนด
$$k_z = \begin{cases} + [k_0^2 - (k_x^2 + k_y^2)]^{1/2} & \text{เมื่อ } k_0^2 \geq k_x^2 + k_y^2 \\ -j [(k_x^2 + k_y^2) - k_0^2]^{1/2} & \text{เมื่อ } k_0^2 < k_x^2 + k_y^2 \end{cases}$$

สมการที่ (3.66) เป็นสูตรทั่วไปของการคำนวณสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในตัวกลางที่มีการสูญเสียในโดเมนเชิงพิกัดของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง

3.6 สรุป

โครงสร้างที่มีสายอากาศแบบร่องลอยเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย เป็นรูปแบบปัญหาที่เป็นหัวข้อหลักในการศึกษา เพื่อพัฒนาไปสู่สายอากาศปล่อยคลื่นภายนอกที่ลดต้นทุนในส่วนระบบระบายความร้อนที่ผิว เนื่องจากพิจารณาสนามไฟฟ้าระยะใกล้ จึงใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมเพื่อที่จะสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคลื่นระนาบ และใช้ทฤษฎีของคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใดๆได้ โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตของ 2 ตัวกลาง จึงสามารถหาสัมประสิทธิ์การตกกระทบ การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ณ รอยต่อของตัวกลางที่ต่างชนิดกัน นำไปสู่การหาค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่สนใจภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียนั้น ซึ่งเป็นพื้นฐานความเข้าใจในการศึกษากลไกการปรับตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าโดยวิธีต่างๆ ในบทความต่อไป

บทที่ 4

ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่องบน ตัวกลางสองชั้น

4.1 กล่าวนำ

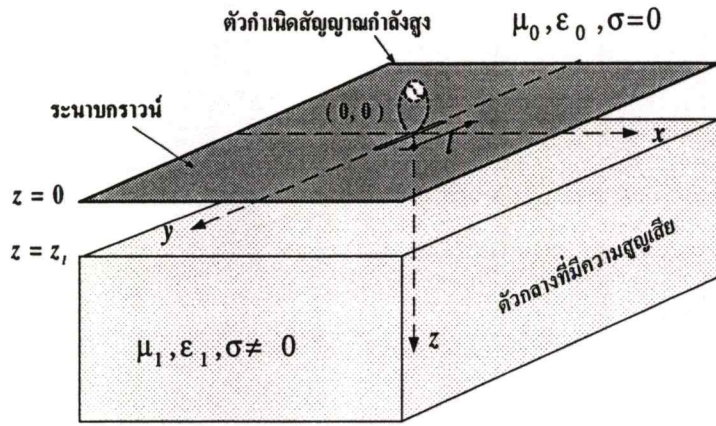
โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่ได้ทำการวิเคราะห์ดังแสดงตามบทที่ 3 ซึ่งในบทนี้ได้ทำการแสดงผลการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าจากโครงสร้างดังกล่าว ในกรณีของสายอากาศแบบร่องจำนวน 1 2 และ 4 ร่อง ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงอยู่มากมาย เช่น ตำแหน่งการวางระหว่างสายอากาศ ระยะระหว่างสายอากาศถึงตัวกลางที่มีการสูญเสีย เป็นต้น สำหรับกรณีของการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศ 2 และ 4 ร่องนั้น จะแสดงให้เห็นว่า สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าให้กว้างขึ้นได้ โดยการปรับเปลี่ยน ความถี่ เฟส หรือแอมพลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบร่อง

กรณีที่พิจารณาในการวิเคราะห์นี้จะทำการศึกษาตัวกลางที่มีการสูญเสียที่มีลักษณะคุณสมบัติที่เหมือนกล้ำเนื้อ แต่เพื่อลดความยุ่งยากในการพิจารณาจะถือว่าเป็นตัวกลางชนิดเดียว การพิจารณาขนาดของพื้นที่ที่เกิดความร้อนเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเรียกว่า พื้นที่ประสิทธิผล (Effective field size) ซึ่งเป็นขนาดของพื้นที่ที่มีค่าของอุมหภูมิลดลงมาครึ่งหนึ่งของค่าอุมหภูมิสูงสุด โดยค่าของอุมหภูมิแปรผันตรงกับกำลังสองของสนามไฟฟ้า ดังนั้นจากผลการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าที่แสดงกราฟคอนทัวร์ของนอร์มัลไลซ์ขนาดของสนามไฟฟ้า จึงสามารถพิจารณาขนาดของพื้นที่ประสิทธิ์ผลอย่างคร่าวๆ ได้ที่เส้นคอนทัวร์ค่า 0.7

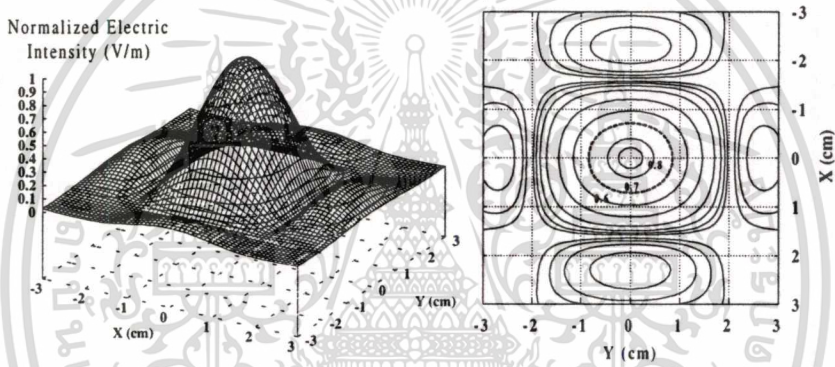
4.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง

พิจารณารูปที่ 4.1 กรณีที่มีสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง มีความยาว l วางอยู่ในแนวแกน Y ณ ตำแหน่งจุดกำเนิด บนระนาบกราวน์ขนาดอนันต์ เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดอนันต์เป็นระยะ z_1 และป้อนสัญญาณจากแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงที่ตรงกลางปากสายอากาศ

การกระจายของสนามไฟฟ้าตามโครงสร้างปัญหาดังรูปที่ 4.1 จากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียที่เป็นกล้ำเนื้อ ($\mu_m = 1, \epsilon_m = 47, \sigma_m = 2.21 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$) ณ ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต โดยสายอากาศแบบร่องมีความยาว 5.5 เซนติเมตร (ซึ่งเป็นค่าที่ได้ในทางปฏิบัติ)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย



รูปที่ 4.2 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง

มีระยะระหว่างสายอากาศถึงตัวกลางที่มีการสูญเสีย 1 เซนติเมตร และระยะสี่กจากผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสีย 1 เซนติเมตร สามารถพิจารณาการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ตามโครงสร้างดังกล่าว จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0) + k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

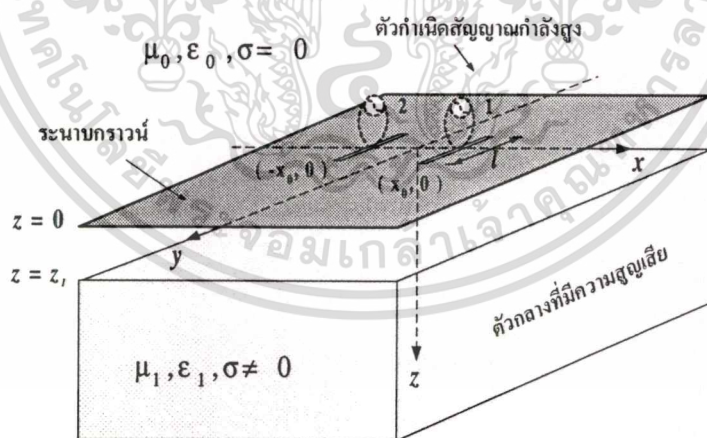
$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟคอนทัวร์ของนอร์แมลไลซ์ขนาดของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ตามรูปที่ 4.2 วงเส้นประของรูปทางด้านซ้ายเป็นเส้นของค่าระดับ 0.7 ซึ่งจะเป็นเส้นที่อ้างอิงถึงพื้นที่ประสิทธิผลที่ต้องการพิจารณาอย่างคร่าวๆ จากกรณีนี้จะได้พื้นที่ภายในเส้นดังกล่าวประมาณ 3 ตารางเซนติเมตร

4.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง

การพิจารณาการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ที่เกิดจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง นั้น มีรูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศอยู่หลายรูปแบบเช่น การจัดเรียงตำแหน่งแบบแถว ลำดับร่วมแนว (Colinear array) การจัดเรียงตำแหน่งแบบข้างต่อข้าง (Side by side array) การจัดเรียงตำแหน่งแบบตั้งฉาก (Orthogonal array) เป็นต้น แต่จุดประสงค์ของการวิจัยนี้ต้องการลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าที่มีพื้นที่กว้างและสม่ำเสมอ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ลักษณะการจัดเรียงตำแหน่งแบบข้างต่อข้าง (Side by side array) จะได้รูปแบบลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ จึงเลือกรูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศลักษณะดังกล่าวในการศึกษาการปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าให้เปลี่ยนตำแหน่งไปจากบริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ และแอมพลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ การเลือกระยะระหว่างสายอากาศแบบร่องเป็นปัจจัยแรก เพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่ของสนามไฟฟ้ากว้างและมีความสม่ำเสมอมากที่สุด ในระยะที่สนใจ ก่อนการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆต่อไป โดยพิจารณารูปแบบของปัญหา ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

พิจารณาโครงสร้างของปัญหาตามรูปที่ 4.3 ที่ประกอบด้วยสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ซึ่งมีความยาว l วางอยู่ในแนวแกน Y โดยสายอากาศร่องที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง $x_0, 0$ และสายอากาศร่องที่ 2 อยู่ ณ

ตำแหน่ง $-x_0, 0$ บนระนาบกราวน์ขนาดอนันต์เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดอนันต์เป็นระยะ z_1 และป้อนสัญญาณกำลังงานสูงที่ตรงกลางปากสายอากาศ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

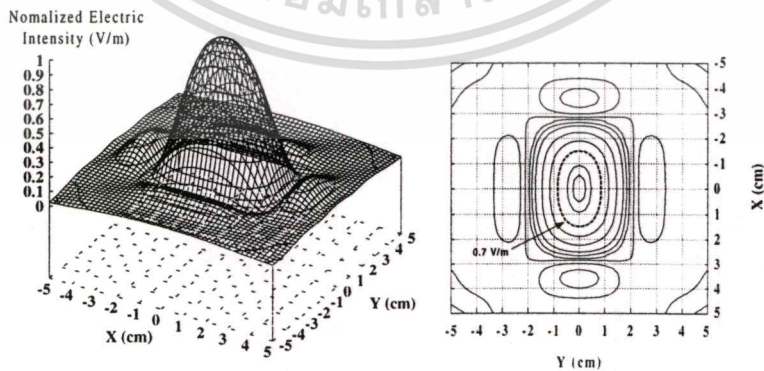
โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแบบร่องทั้งสองสามารถรวมกันแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

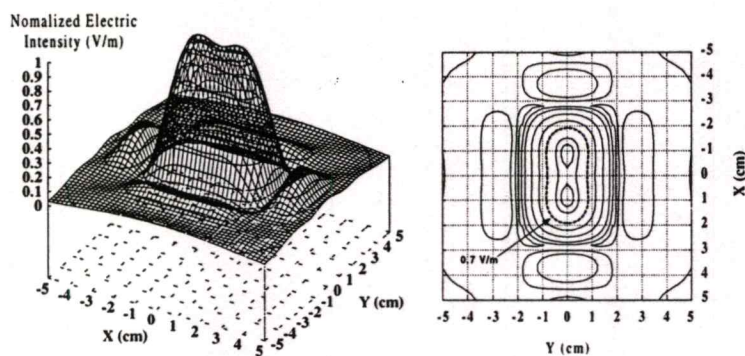
$$\bar{E}_T = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 \quad (4.1)$$

โดย \bar{E}_1 และ \bar{E}_2 เป็นสนามไฟฟ้าจากสายอากาศร่องที่ 1 และร่องที่ 2 ตามลำดับ รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่มีความยาวของสายอากาศแต่ละร่องเท่ากับ 5.5 เซนติเมตร สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศแบบร่องทั้งสอง ดังรูปที่ 4.4 จะทำให้ได้รูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้ารวมคือ รูป 4.4ก

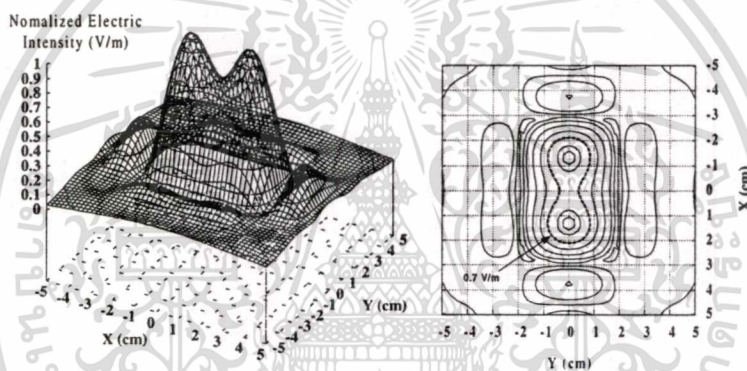


ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)



ค)

รูปที่ 4.4 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศ

ก) ระยะห่าง 2 เซนติเมตร ข) ระยะห่าง 2.2 เซนติเมตร ค) ระยะห่าง 2.4 เซนติเมตร

กำหนดระยะระหว่างสายอากาศเป็น 2 เซนติเมตร ค่าความแรงสนามไฟฟ้าภายในพื้นที่ของเส้นคอนทัวร์ 0.7 มีความสม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดประมาณ 5 ตารางเซนติเมตร รูป 4.4ข กำหนดระยะระหว่างสายอากาศเป็น 2.2 เซนติเมตร ค่าความแรงสนามไฟฟ้าภายในพื้นที่ของเส้นคอนทัวร์ 0.7 มีความสม่ำเสมอและมีขนาดพื้นที่ที่ใหญ่กว่ารูป ก ซึ่งมีขนาดประมาณ 6 ตารางเซนติเมตร รูป 4.4ค กำหนดระยะระหว่างสายอากาศเป็น 2.4 เซนติเมตร ค่าความแรงสนามไฟฟ้าภายในพื้นที่ของเส้นคอนทัวร์ 0.7 ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดประมาณ 7 ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่ปรับเปลี่ยนเฟส

รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่มีการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศ 2 ร่องแบบข้างต่อข้าง สามารถทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสองไม่เท่ากัน ซึ่งกำหนดว่าความถี่ และแอมพลิจูด มีค่าเท่ากัน และคงที่ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

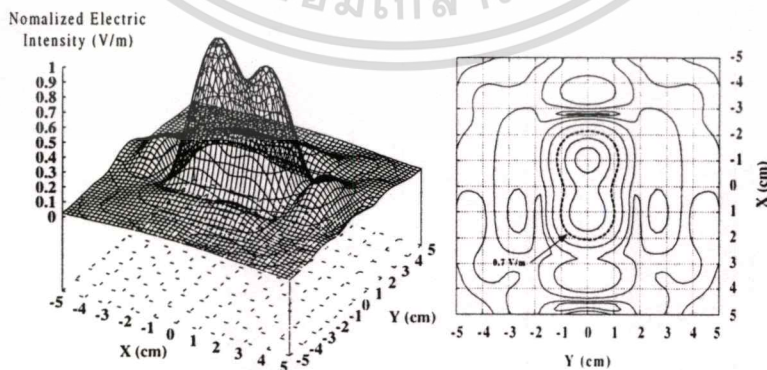
โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าตามสมการดังนี้

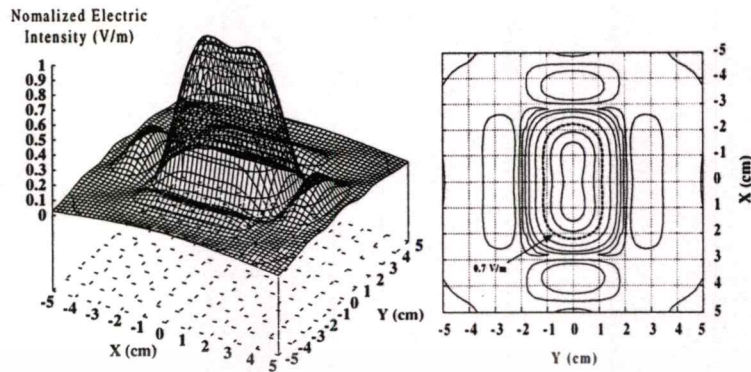
$$\bar{E}_T = \bar{E}_1 e^{-j\phi_1} + \bar{E}_2 e^{-j\phi_2} \quad (4.2)$$

โดย ϕ_1 และ ϕ_2 เป็นเฟสของสนามไฟฟ้าของสายอากาศร่องที่ 1 และร่องที่ 2 ตามลำดับ จะได้ผลการคำนวณดังนี้

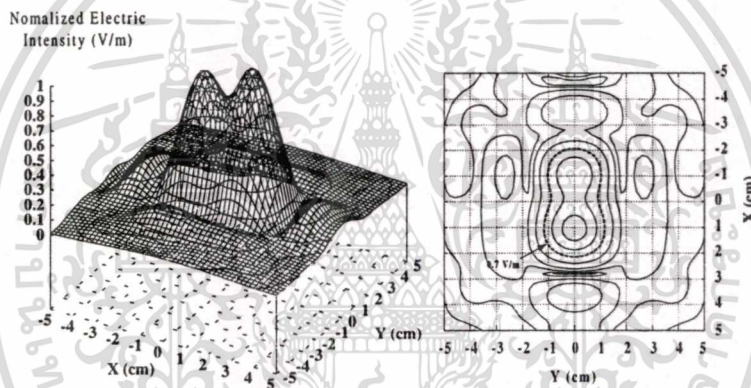


ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)



ค)

รูปที่ 4.5 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส

ก) เฟส 22.5°

ข) เฟส 0°

ค) เฟส -22.5°

การกระจายของสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศร่องที่ 1 มีค่า 0° และไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดย รูป 4.5ก แสดงกรณีที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศร่องที่ 2 มีเฟส 22.5° สามารถเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า จากตำแหน่งตรงกลางระหว่างสายอากาศมาอยู่ที่ $x = -1$ เซนติเมตร รูป 4.5ข แสดงกรณีที่เฟสของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศทั้งสองร่อง มีค่า 0° ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าจะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างสายอากาศ รูป 4.5ค แสดงกรณีที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศร่องที่ 2 มีเฟส -22.5° สามารถเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า จากตำแหน่งตรงกลางระหว่างสายอากาศมาอยู่ที่ $x = 1$ เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่มีการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศ 2 ร่องแบบข้างต่อข้าง สามารถทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสองไม่เท่ากัน ซึ่งกำหนดว่าเฟส และแอมพลิจูด มีค่าเท่ากัน และคงที่ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\vec{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

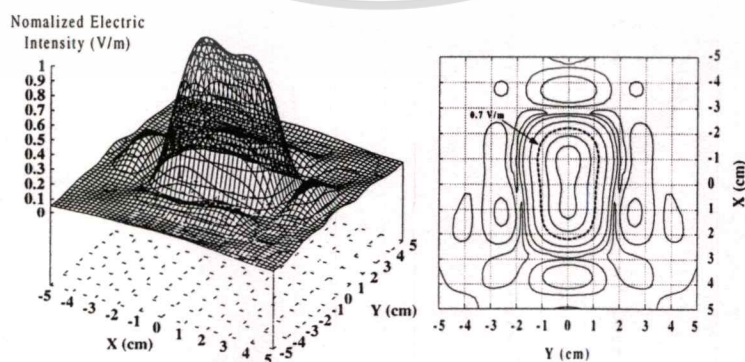
โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าตามสมการดังนี้

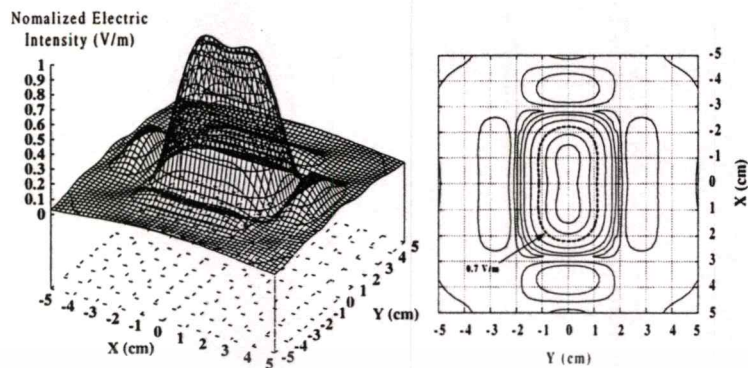
$$\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad ; \quad f_1, f_2 \quad (4.3)$$

โดย f_1 และ f_2 เป็นความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศร่องที่ 1 และร่องที่ 2 ตามลำดับ จะได้ผลการคำนวณดังนี้

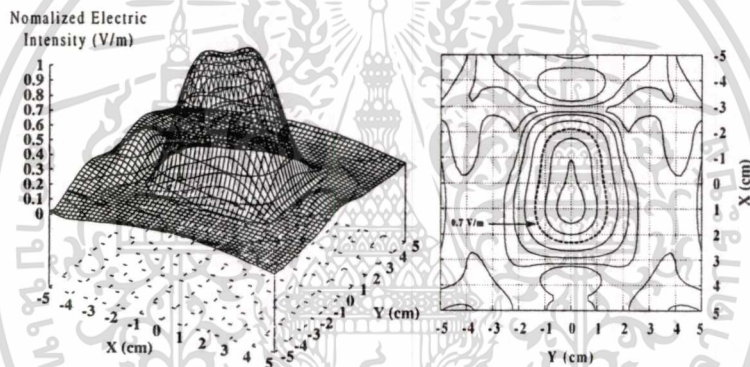


ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)



ค)

รูปที่ 4.6 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

ก) ความถี่ 2350 เมกกะเฮิร์ต ข) ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต ค) ความถี่ 2550 เมกกะเฮิร์ต

การกระจายของสนามไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 4.6 เป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ ซึ่งกำหนดให้สายอากาศร่องที่ 1 มีความถี่คงที่ที่ 2450 เมกกะเฮิร์ต โดยรูป 4.6ก เมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 2 เป็น 2350 เมกกะเฮิร์ต สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x = -1$ เซนติเมตร รูป 4.6ข เป็นกรณีที่มีความถี่เท่ากัน คือ 2450 เมกกะเฮิร์ต ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าจะอยู่ที่ตรงกลางระหว่างสายอากาศ รูป 4.6ค เมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 2 เป็น 2550 เมกกะเฮิร์ต สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x = 1$ เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่องที่มีการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศ 2 ร่องแบบข้างต่อข้าง สามารถทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสองไม่เท่ากัน ซึ่งกำหนดว่าเฟส และแอมพลิจูด มีค่าเท่ากัน และคงที่ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

โดย $A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)}$ (3.66ก)

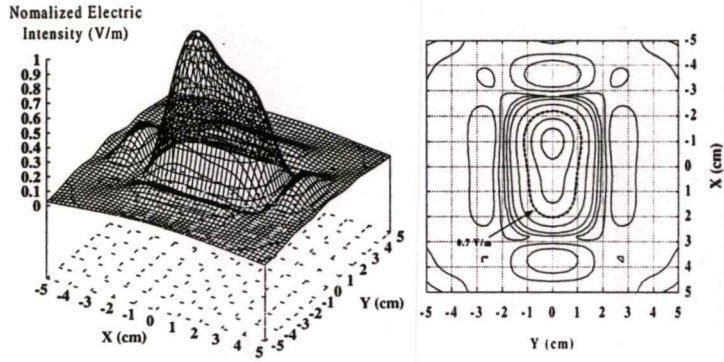
$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมจากสายอากาศแบบร่องทั้งสองมีค่าตามสมการดังนี้

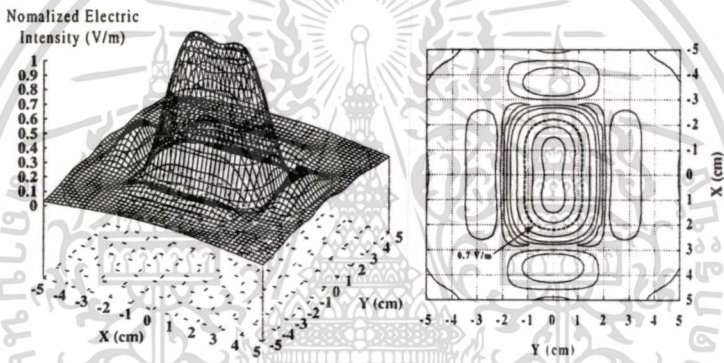
$$\bar{E}_T = I_1 \bar{E}_1 + I_2 \bar{E}_2 \quad (4.4)$$

โดย I_1 และ I_2 เป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของสายอากาศร่องที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จะได้ผลการคำนวณดังนี้

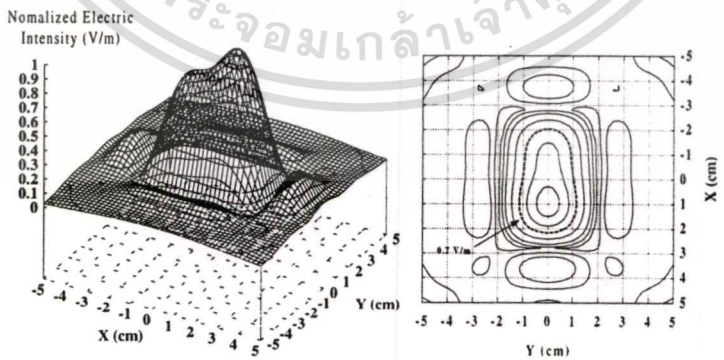
การกระจายของสนามไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 4.7 เป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ โดย รูป 4.7ก เมื่อปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 2 ให้มีอัตราส่วนเป็น 1.2 เท่าของสายอากาศร่องที่ 1 สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x = -1$ เซนติเมตร รูป 4.7ข เป็นกรณีที่มีอัตราส่วนของแอมพลิจูดเท่ากัน คือ 1 เท่า ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าจะอยู่ที่ตรงกลางระหว่างสายอากาศ รูป 4.7ค เมื่อปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1 ให้มีอัตราส่วนเป็น 1.2 เท่าของสายอากาศร่องที่ 2 สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x = 1$ เซนติเมตร



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.7 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด

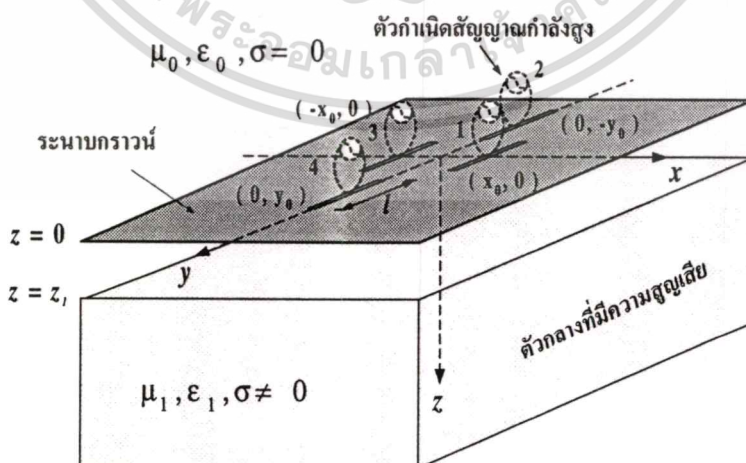
ก) แอมพลิจูดร่องที่ 2 เป็น 1.2 ข) แอมพลิจูดเท่ากัน ค) แอมพลิจูดร่องที่ 1 เป็น 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณทางทฤษฎีของการกระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศ 2 ร่อง ที่มี การจัดเรียงตำแหน่งแบบข้างต่อข้าง โดยมีเงื่อนไขของการปรับเฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูด ของ แหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนทั้ง 3 เงื่อนไข สามารถทำให้ความ แรงของขนาดสนามไฟฟ้าเปลี่ยนตำแหน่งไปได้

4.4 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง

การพิจารณาการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องนั้น มีรูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศอยู่หลายรูปแบบเช่น การจัดเรียงตำแหน่งแบบแถวลำดับ ร่วมแนว (Colinear array) การจัดเรียงตำแหน่งแบบข้างต่อข้าง (Side by side array) การจัดเรียง ตำแหน่งแบบตั้งฉาก (Orthogonal array) การจัดเรียงตำแหน่งแบบผสมระหว่าง 3 แบบข้างต้น เป็นต้น แต่จุดประสงค์ของการวิจัยนี้ต้องการลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าที่มีพื้นที่กว้างและ สม่าเสมอ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงพื้นที่ประสิทธิผลที่มีขนาดกว้างเช่นกัน จากการศึกษาพบว่า ลักษณะการจัดเรียงตำแหน่งแบบผสมระหว่างแบบแถวลำดับร่วมแนวที่อยู่ตรงกลางและแบบข้าง ต่อข้าง จะได้รูปแบบลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ จึงเลือก รูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศลักษณะดังกล่าว ในการศึกษาการปรับเปลี่ยนความแรง ของสนามไฟฟ้าให้เปลี่ยนตำแหน่งไปจากบริเวณกึ่งกลางระหว่างสายอากาศ ซึ่งสามารถกระทำได้ โดยการปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ และแอมพลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ การเลือก ระยะระหว่างสายอากาศแบบร่องมีความจำเป็นอันดับแรก เพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่ของสนามไฟฟ้า กว้างและมีความสม่าเสมอมากที่สุด ในระยะที่สนใจ ก่อนการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆต่อไป โดย พิจารณารูปแบบของปัญหา ตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาโครงสร้างของปัญหาตามรูปที่ 4.8 ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง วางอยู่ในแนวแกน Y โดย สายอากาศร่องที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง $x_0, 0$ และสายอากาศร่องที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง $0, -y_0$ สายอากาศร่องที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง $-x_0, 0$ และสายอากาศร่องที่ 4 อยู่ที่ตำแหน่ง $0, y_0$ บนระนาบกราวน์ขนาดอนันต์ เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดอนันต์เป็นระยะ z_1 และ ป้อนสัญญาณจากแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงที่ตรงกลางปากสายอากาศ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

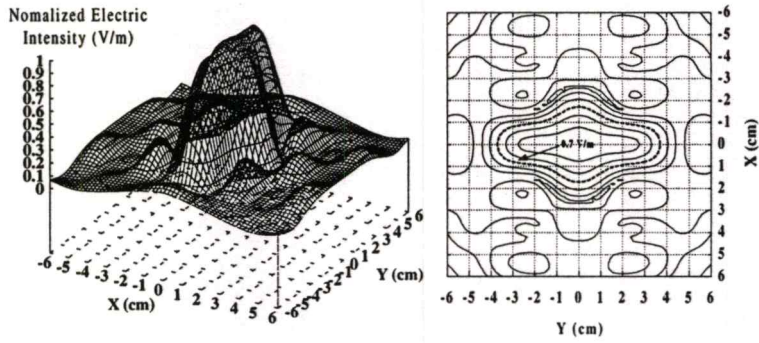
$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแบบร่องทั้งสองสามารถรวมกันแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

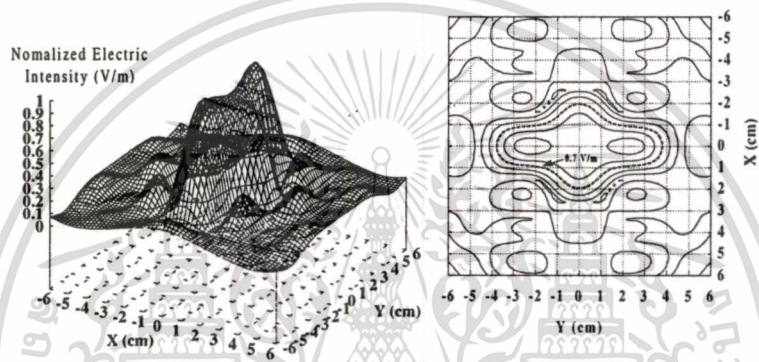
$$\bar{E}_T = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3 + \bar{E}_4 \quad (4.5)$$

โดย \bar{E}_1 \bar{E}_2 \bar{E}_3 และ \bar{E}_4 เป็นสนามไฟฟ้าจากสายอากาศร่องที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ จากโครงสร้างปัญหาตามรูปที่ 4.8 รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่มีความยาวของสายอากาศแต่ละร่องเท่ากับ 5.5 เซนติเมตร สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศแบบร่องทั้งสิ้น ดังนี้ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศทั้งสิ้นที่อยู่บนระนาบกราวน์ ตามรูปที่ 4.9 ทำให้ได้ลักษณะของสนามไฟฟ้ารวมคือ รูป 4.9ก ระยะระหว่างสายอากาศในแนวแกน X และ Y เป็น 1.8 และ 5.2 เซนติเมตร ตามลำดับ ณ ตำแหน่ง $x_0 = 0.9$ เซนติเมตร $y_0 = 2.6$ เซนติเมตร ค่าความแรงสนามไฟฟ้าภายในพื้นที่ของเส้นคอนทัวร์ 0.7 มีความสม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดประมาณ 14 ตารางเซนติเมตร รูป 4.9ข ระยะระหว่างสายอากาศในแนวแกน X และ Y เป็น 2 และ 5.2 เซนติเมตร ตามลำดับ ณ ตำแหน่ง $x_0 = 1$ เซนติเมตร $y_0 = 2.6$ เซนติเมตร ค่าความแรงสนามไฟฟ้าภายในพื้นที่ของเส้นคอนทัวร์ 0.7 มีความสม่ำเสมอและมีขนาดพื้นที่ที่ใหญ่กว่ารูป ก ซึ่งมีขนาดประมาณ 16 ตารางเซนติเมตร รูป 4.9ค ระยะระหว่างสายอากาศในแนวแกน X และ Y เป็น 2.2 และ 5.2 เซนติเมตร ตามลำดับ ณ ตำแหน่ง $x_0 = 1.1$ เซนติเมตร

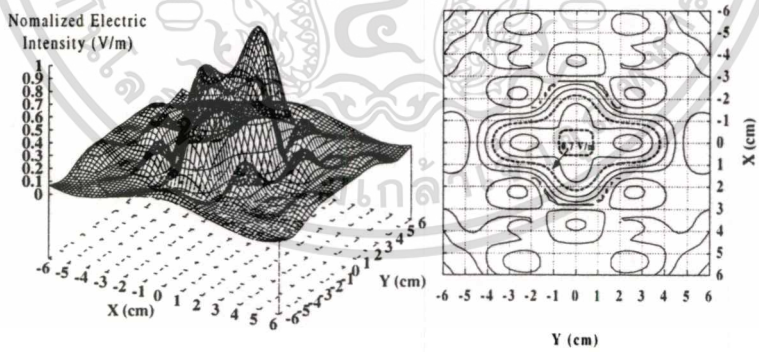
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.9 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศ

ก) ระยะห่าง ในแนวแกน X และ Y เป็น 1.8 และ 5.2 เซนติเมตร ตามลำดับ

ข) ระยะห่าง ในแนวแกน X และ Y เป็น 2 และ 5.2 เซนติเมตร ตามลำดับ

ค) ระยะห่าง ในแนวแกน X และ Y เป็น 2.2 และ 5.2 เซนติเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$y_0 = 2.6$ เซนติเมตร ค่าความแรงสนามไฟฟ้าภายในพื้นที่ของเส้นคอนทอร์ 0.7 ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดประมาณ 15 ตารางเซนติเมตร

4.4.1 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส

รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่มีการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศตามโครงสร้างปัญหารูปที่ 4.8 สามารถทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสิ้นไม่เท่ากัน ซึ่งกำหนดว่าความถี่ และแอมพลิจูด มีค่าเท่ากัน และคงที่ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

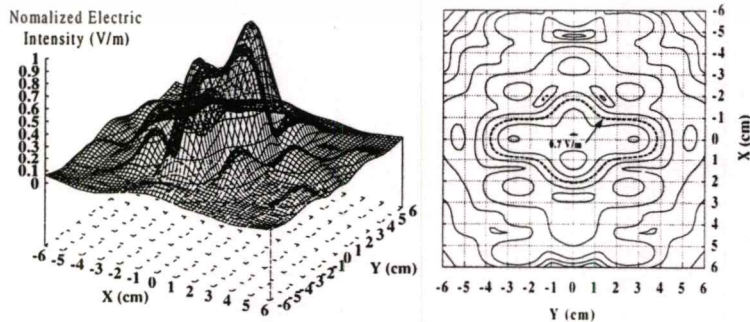
โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมจากสายอากาศแบบร่องทั้งสี่มีค่าตามสมการดังนี้

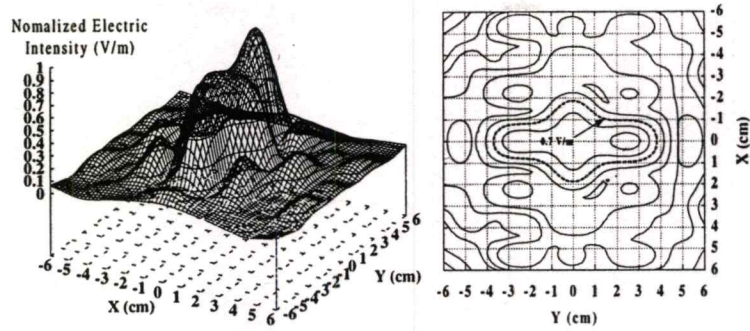
$$\bar{E}_T = \bar{E}_1 e^{-j\phi_1} + \bar{E}_2 e^{-j\phi_2} + \bar{E}_3 e^{-j\phi_3} + \bar{E}_4 e^{-j\phi_4} \quad (4.6)$$

โดย ϕ_1 ϕ_2 ϕ_3 และ ϕ_4 เป็นเฟสของสนามไฟฟ้าของสายอากาศร่องที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ จะได้ผลการคำนวณดังนี้

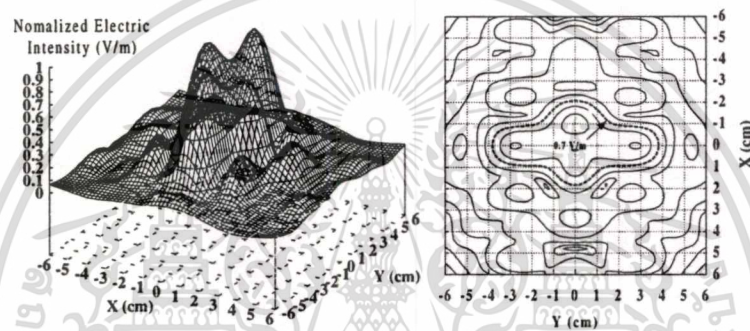


ก)

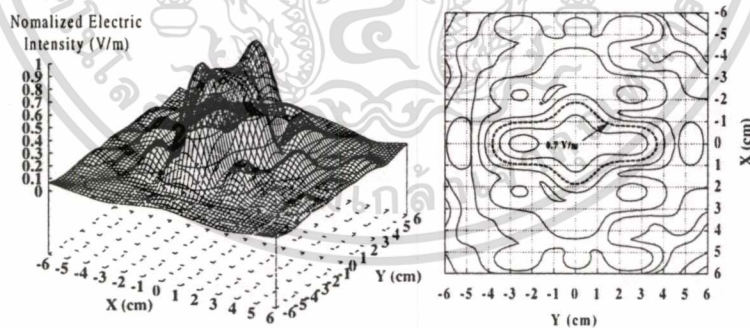
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.10 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศ 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนเฟส

- ก) เฟสสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $45^\circ, 22.5^\circ, 0^\circ$ และ 22.5° ตามลำดับ
 ข) เฟสสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $22.5^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ$ และ 0° ตามลำดับ
 ค) เฟสสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ และ 22.5° ตามลำดับ
 ง) เฟสสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $22.5^\circ, 0^\circ, 22.5^\circ$ และ 45° ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายของสนามไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 4.10 เป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ โดย รูป 4.10ก เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศช่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $45^\circ, 22.5^\circ, 0^\circ$ และ 22.5° ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=1$ เซนติเมตร $y=0$ เซนติเมตร รูป 4.10ข เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศช่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $22.5^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ$ และ 0° ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0$ เซนติเมตร $y=2.5$ เซนติเมตร รูป 4.10ค เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศช่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ และ 22.5° ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=-1$ เซนติเมตร $y=0$ เซนติเมตร รูป 4.10ง เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศช่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $22.5^\circ, 0^\circ, 22.5^\circ$ และ 45° ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0$ เซนติเมตร $y=-2.5$ เซนติเมตร

4.4.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่ปรับเปลี่ยนความถี่

รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่มีการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศตามโครงสร้างปัญหารูปที่ 4.8 สามารถทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสิ้น ซึ่งกำหนดว่าเฟส และแอมพลิจูด มีค่าเท่ากัน และคงที่ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

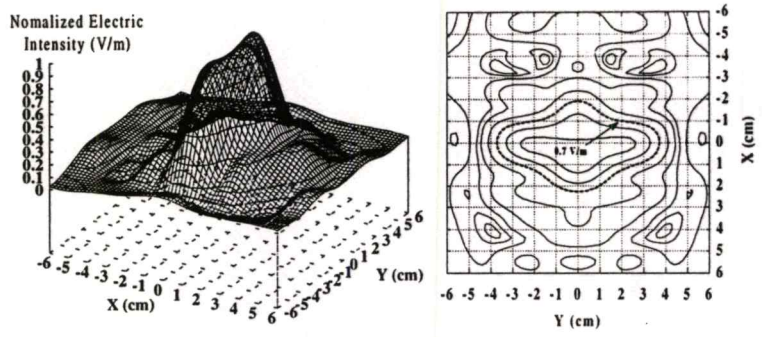
$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมจากสายอากาศแบบร่องทั้งสิ้นมีค่าตามสมการดังนี้

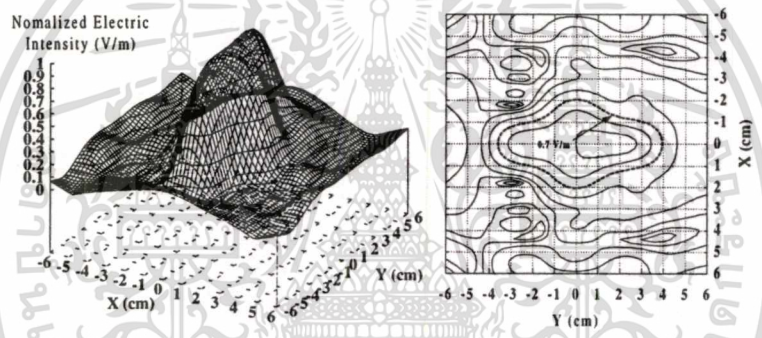
$$\bar{E}_T = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3 + \bar{E}_4 ; \quad f_1, f_2, f_3, f_4 \quad (4.7)$$

โดย f_1, f_2, f_3 และ f_4 เป็นความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศช่องที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จะได้ผลการคำนวณดังนี้

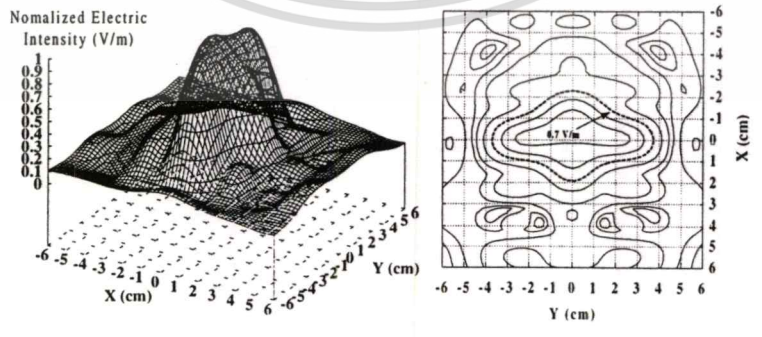
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

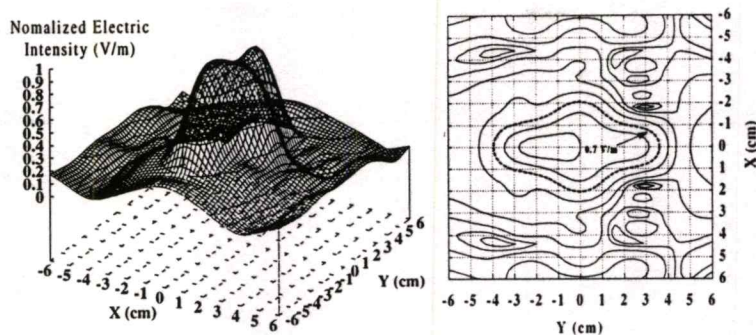


ข)



ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง)

รูปที่ 4.11 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

- ก) ความถี่สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2650, 2550, 2450, 2550 MHz ตามลำดับ
- ข) ความถี่สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2550, 2650, 2550, 2450 MHz ตามลำดับ
- ค) ความถี่สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2450, 2550, 2650, 2550 MHz ตามลำดับ
- ง) ความถี่สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2550, 2450, 2550, 2650 MHz ตามลำดับ

การกระจายของสนามไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 4.11 เป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ โดย รูป 4.11ก เมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2650, 2550, 2450 และ 2550 เมกกะเฮิร์ต ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0.8$ เซนติเมตร $y=0$ เซนติเมตร รูป 4.11ข เมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2550, 2650, 2550 และ 2450 เมกกะเฮิร์ต ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0$ เซนติเมตร $y=1.2$ เซนติเมตร รูป 4.11ค เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2450, 2550, 2650 และ 2550 เมกกะเฮิร์ต ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=-0.8$ เซนติเมตร $y=0$ เซนติเมตร รูป 4.11ง เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 2550, 2450, 2550 และ 2650 เมกกะเฮิร์ต ตามลำดับ สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0$ เซนติเมตร $y=-1.2$ เซนติเมตร

4.4.3 สนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่องที่มีการจัดเรียงตำแหน่งของสายอากาศตามโครงสร้างปัญหารูปที่ 4.8 สามารถทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความเอกซาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงของสนามไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่อง ทั้งสี่ ซึ่งกำหนดว่าเฟส และความถี่ มีค่าเท่ากัน และคงที่ จากสมการ (3.66) ดังนี้

$$\bar{E}(x, y) = \hat{a}_x A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B \frac{e^{j(k_x(x-x_0)+k_y(y-y_0))}}{(\eta_0 + \eta_1)e^{jk_z z_1} - (\eta_0 - \eta_1)e^{-jk_z z_1}} dk_x dk_y \quad (3.66)$$

โดย
$$A = \frac{\eta_1 e^{-\gamma(z-z_1)}}{\pi^2 \cos(k_0 l)} \quad (3.66ก)$$

$$B = \frac{k_0 \sin(k_0 l) - k_0 \sin(k_0 \frac{l}{2}) \cos(k_y \frac{l}{2}) - k_y \sin(k_y \frac{l}{2}) \cos(k_0 \frac{l}{2})}{k_0^2 - k_y^2} \quad (3.66ข)$$

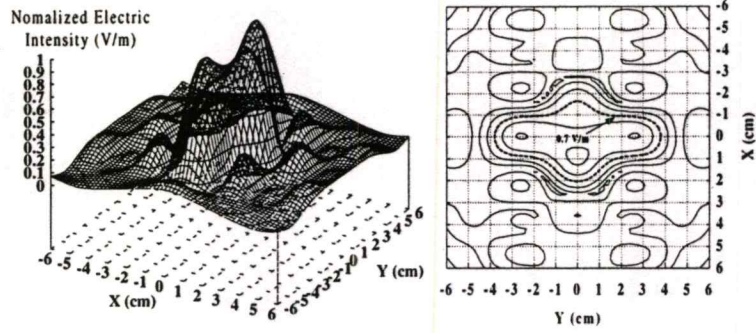
สนามไฟฟ้ารวมจากสายอากาศแบบร่องทั้งสี่มีค่าตามสมการดังนี้

$$\bar{E}_T = I_1 \bar{E}_1 + I_2 \bar{E}_2 + I_3 \bar{E}_3 + I_4 \bar{E}_4 \quad (4.8)$$

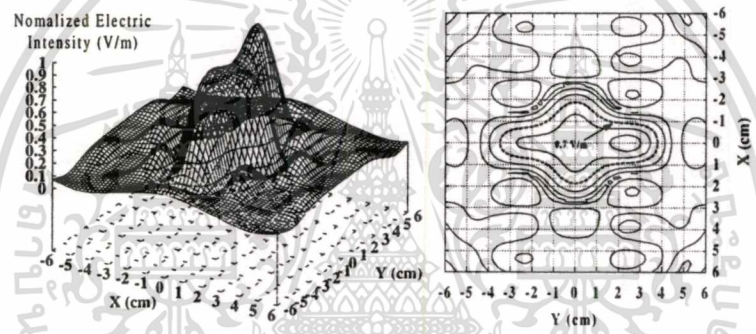
โดย I_1 , I_2 , I_3 และ I_4 เป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จะได้ผลการคำนวณดังนี้

การกระจายของสนามไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 4.12 เป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ โดย รูป 4.12ก เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1.3 : 1.2 : 1 : 1.2 จะสามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0.9$ เซนติเมตร $y=0$ เซนติเมตร รูป 4.12ข เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1.2 : 1.3 : 1.2 : 1 สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0$ เซนติเมตร $y=2.4$ เซนติเมตร รูป 4.12ค เมื่อปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1 : 1.2 : 1.3 : 1.2 สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=-0.9$ เซนติเมตร $y=0$ เซนติเมตร รูป 4.12ง เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1.2 : 1 : 1.2 : 1.3 สามารถปรับเปลี่ยนความแรงของสนามไฟฟ้าไปอยู่ ณ ตำแหน่ง $x=0$ เซนติเมตร $y=-2.4$ เซนติเมตร

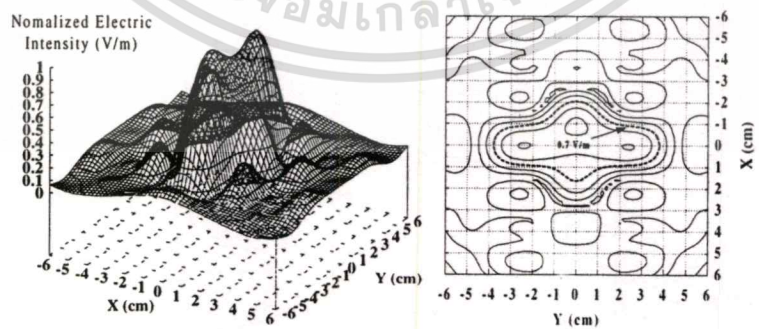
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

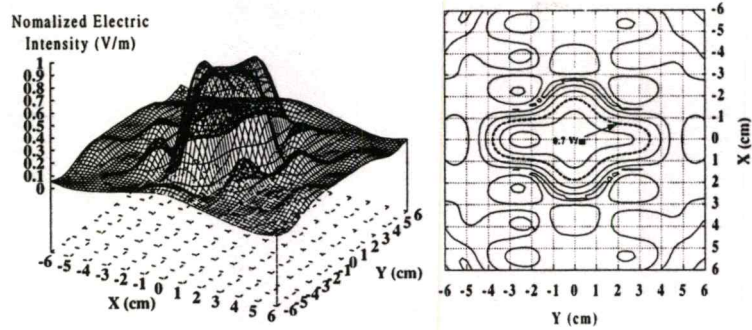


ข)



ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง)

รูปที่ 4.12 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

- ก) แอมพลิจูดสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1.3 : 1.2 : 1 : 1.2 ตามลำดับ
- ข) แอมพลิจูดสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1.2 : 1.3 : 1.2 : 1 ตามลำดับ
- ค) แอมพลิจูดสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1 : 1.2 : 1.3 : 1.2 ตามลำดับ
- ง) แอมพลิจูดสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 1.2 : 1 : 1.2 : 1.3 ตามลำดับ

ผลการคำนวณทางทฤษฎีของการกระจายสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่มีการจัดเรียงตำแหน่งแบบผสมระหว่างแบบแถวลำดับร่วมแนวที่อยู่ตรงกลางและแบบข้างต่อข้าง โดยมีเงื่อนไขของการปรับเฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนทั้ง 3 เงื่อนไข สามารถทำให้ความแรงของขนาดสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปได้

4.5 สรุป

ผลการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากโครงสร้างที่เป็นสายอากาศแบบร่องลอยเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย พบว่ากรณีที่มีสายอากาศมากกว่า 1 ร่อง สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าได้ โดยวิธีการปรับเปลี่ยน เฟส ความถี่ หรือ แอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ ซึ่งในทางปฏิบัติ วิธีการปรับเปลี่ยนความถี่นั้น มีความยุ่งยากทางด้านแหล่งกำเนิดสัญญาณ และขนาดของสายอากาศที่ใช้ อีกทั้งขณะใช้งานยังทำให้เกิดการรบกวนระบบสื่อสารอื่นๆอีกด้วย สำหรับวิธีการปรับเปลี่ยนเฟสนั้น จะเกิดการลดทอนกำลังงานของแหล่งกำเนิด อันเนื่องจากระบบการปรับเฟส จึงทำให้ต้องใช้แหล่งกำเนิดที่มีกำลังงานสูงขึ้น ซึ่งทั้งสองวิธีที่กล่าวมาจะทำให้ระบบโดยรวมมีค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนที่สูงขึ้นมาก ดังนั้นวิธีการปรับแอมพลิจูดจึงมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากระบบไม่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

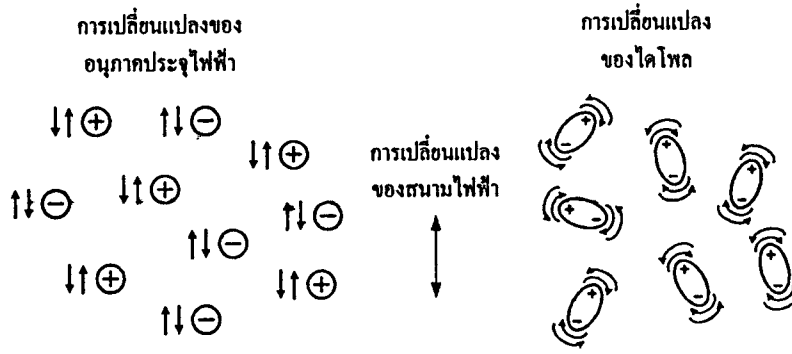
ทฤษฎีการส่งผ่านความร้อนและวิธีผลต่างสลับเนื่อง

5.1 กล่าวนำ

การศึกษาปัจจัยทางกายภาพของการเกิดความร้อนเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ทราบถึงกลไกของการที่มีปฏิกิริยาตอบสนองของตัวกลางที่มีการสูญเสียต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง คุณสมบัติของตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความร้อนได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายเข้าไปในตัวกลางที่มีการสูญเสียนั้น การพิจารณากำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย สามารถพิจารณาได้จากสมการพื้นฐานของแมกซ์เวลล์ ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยใช้วิธีการหาผลเฉลยของสมการส่งผ่านความร้อนโดยวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite Difference Method) ซึ่งเป็นวิธีเชิงเลข ภายใต้งื่อนไขว่าเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียชนิดเดียว มีการส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อน (Heat Conduction) ภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีการพาความร้อนที่บริเวณผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสียและไม่เกิดการระเหยของน้ำ กลายเป็นไอ (มวลไม่เปลี่ยนแปลง)

5.2 การส่งผ่านความร้อน

ตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถทำให้เกิดความร้อนได้โดยการให้พลังงานกระตุ้นที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง กลไกของความร้อนที่เกิดขึ้นนี้มาจากสนามไฟฟ้าไปกระตุ้นอนุภาคที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือ ประจุไฟฟ้าที่อยู่ในตัวกลางนั้นจากสภาวะสมดุล ทำให้เกิดสภาพเป็นไดโพลซึ่งมีผลต่อสนามไฟฟ้าที่กระตุ้น ให้เกิดการโพลาไรซ์ตามทิศทางของสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่กระตุ้นนี้เป็นผลให้เกิดการกระจายกำลังงานในรูปของความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียนั้น อีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นควบคู่กันคือ ตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเกิดความร้อนได้โดยตรงจากการนำไฟฟ้าเนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคประจุไฟฟ้า ภายใต้อิทธิพลของการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าขึ้น แหล่งกำเนิดอื่นที่ทำให้เกิดการโพลาไรซ์ มาจากประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของตัวกลางที่แตกต่างกับประจุไฟฟ้าในอากาศ หรือ การโพลาไรซ์ของแมกซ์เวลล์แวกเนอร์ (Maxwell – Wagner polarisation) โครงสร้างของการโพลาไรซ์ของแมกซ์เวลล์ แสดงดังรูปที่ 5.1 การสลับกลับไปมาของการโพลาไรซ์เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสลับทิศทาง(ชั่ว) ไปมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นกลไกพื้นฐานของการทำให้เกิดความร้อนโดยใช้คลื่นความถี่สูง [2]



รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและไดโพล เนื่องจากสนามไฟฟ้า

5.2.1 การแพร่กระจายกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหลักการที่ว่าใช้พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแปลงไปเป็นความร้อน ซึ่งพลังงานที่ถ่ายเทไปในตัวกลางใดๆ จะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กำลังงานที่ไหลผ่านพื้นผิวปิดสามารถคำนวณได้จากเวกเตอร์พอยน์ทิง (Poynting vector) [10]

$$\vec{p} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (5.1)$$

ทำการอินทิเกรตตามพื้นผิว จะได้

$$\int_S \vec{p} \cdot d\vec{S}' = \int_S (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\vec{S}' \quad (5.2)$$

จากกฎกระแสของแมกซ์เวลล์ (Maxwell current law)

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon_0\epsilon^* \vec{E} \quad (5.3)$$

เมื่อแทน $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ และ $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ ลงในสมการ (5.3) จะได้

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + (\omega\epsilon_0\epsilon'' + j\omega\epsilon_0\epsilon')\vec{E} = \omega\epsilon_0\epsilon''_{eff}\vec{E} + j\omega\epsilon_0\epsilon'\vec{E} \quad (5.4)$$

โดยที่

$$\epsilon''_{eff} = \epsilon'' + \sigma/\omega\epsilon_0 \quad (5.5)$$

ในสมการ (5.5) ϵ''_{eff} เป็นค่าตัวประกอบในการสูญเสียขงผล (Effective Loss Factor) ซึ่งรวมการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากการนำไฟฟ้า $\sigma \neq 0$ ดังนั้น

$$(\nabla \times \vec{H}^*) \cdot \vec{E} = \omega \epsilon_0 \epsilon''_{eff} \vec{E} \cdot \vec{E}^* - j \omega \epsilon_0 \epsilon' \vec{E} \cdot \vec{E}^* \quad (5.6)$$

โดย \vec{E}^* และ \vec{H}^* เป็นค่าสังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ จากสมการของแมกซ์เวลล์ (2.1) สำหรับ $(\nabla \times \vec{E})$ และหาผลคูณจุด (dot product) ของ \vec{H}^* จะได้

$$(\nabla \times \vec{E}) \cdot \vec{H}^* = -j \omega \mu_0 \mu' \vec{H} \cdot \vec{H}^* \quad (5.7)$$

เมื่อนำสมการ (5.7) ลบสมการ (5.6) จะได้

$$(\nabla \times \vec{E}) \cdot \vec{H}^* - (\nabla \times \vec{H}^*) \cdot \vec{E} = -j \omega \mu_0 \mu' \vec{H} \cdot \vec{H}^* + j \omega \epsilon_0 \epsilon' \vec{E} \cdot \vec{E}^* - \omega \epsilon_0 \epsilon''_{eff} \vec{E} \cdot \vec{E}^* \quad (5.8)$$

อินทิเกรตสมการ (5.8) ตามปริมาตร V และใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (Divergence theorem) จะได้

$$\begin{aligned} \int_{S'} (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\vec{S}' &= \int_V \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}^*) dV \\ &= -j \omega \int_V (\mu_0 \mu' \vec{H} \cdot \vec{H}^* - \epsilon_0 \epsilon' \vec{E} \cdot \vec{E}^*) dV - \int_V \omega \epsilon_0 \epsilon''_{eff} \vec{E} \cdot \vec{E}^* dV \quad (5.9) \end{aligned}$$

จากนิยามของกำลังงานเฉลี่ย จะได้ว่า

$$P_{av} = -\frac{1}{2} \int_{S'} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\vec{S}' \quad (5.10)$$

หรือ

$$P_{av} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon''_{eff} \int_V (\vec{E} \cdot \vec{E}^*) dV \quad (5.11)$$

สนามไฟฟ้านั้นไม่ใช่ค่าคงที่ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่พิจารณา จะได้ว่า

$$\vec{E} \cdot \vec{E}^* = |\vec{E}|^2 \quad (5.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สมการ (5.11) เปลี่ยนเป็น

$$P_{av} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_{eff}'' |\vec{E}|^2 V \quad (5.13)$$

ดังนั้น กำลังงานที่แพร่กระจาย ต่อ 1 หน่วยปริมาตร สามารถหาได้โดย

$$P = \frac{P_{av}}{V} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_{eff}'' |\vec{E}|^2 \quad (5.14)$$

ซึ่งกำลังงานนี้จะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

5.2.2 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

เมื่อตัวกลางที่มีการสูญเสียได้รับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในอัตราที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์เฉพาะของตัวกลางที่มีการสูญเสียนั้น กำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้ตัวกลางที่มีการสูญเสียซึ่งมีมวล M_a กิโลกรัม เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก T_0 องศาเซลเซียส ไปเป็น T องศาเซลเซียส ในเวลา t วินาที โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังนี้

$$P_{av} = M_a c_p (T - T_0) / t \quad (5.15)$$

แทนสมการ (5.13) ลงในสมการ (5.15) แล้วจัดรูปใหม่

$$\frac{(T - T_0)}{t} = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_{eff}'' |\vec{E}|^2}{2 \rho c_p} \quad (5.16)$$

ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา โดย ρ เป็นความหนาแน่นของตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีหน่วยเป็น $(kg \cdot m^{-3})$ และ c_p เป็นความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ มีหน่วยเป็น $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$ สำหรับการให้ความร้อนโดยใช้พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง f อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อ ϵ_{eff}'' และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า

5.3 สมการการส่งผ่านความร้อน

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายเข้าไปในตัวกลางที่มีการสูญเสียทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับตัวแปรต่างๆ ได้ตามสมการการส่งผ่านความร้อน [11] – [12] ดังนี้

$$\rho_m c_m \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k_r \nabla^2 T(x, y, z, t) + V_s (T(x, y, z, t) - T_a) + P_d(x, y, z, t) \quad (5.17)$$

โดย $T(x, y, z, t)$ เป็น อุณหภูมิของตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีหน่วยเป็น ($^{\circ}C$)
 t เป็น เวลาที่ตัวกลางที่มีการสูญเสียได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (s)
 ρ_m เป็น ค่าความหนาแน่นของตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีหน่วยเป็น ($kg \cdot m^{-3}$)
 c_m เป็น ค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีหน่วยเป็น ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)
 k_r เป็น ค่าความนำความร้อนของตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีหน่วยเป็น ($W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)
 T_a เป็น อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอก มีหน่วยเป็น ($^{\circ}C$)
 V_s เป็น อัตราการส่งผ่านความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก มีหน่วยเป็น ($W \cdot m^{-3} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)
 $P_d(x, y, z, t)$ เป็น กำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่พิจารณาในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งนิยามตามสมการ (5.14) มีหน่วยเป็น ($W \cdot m^{-3}$)

การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของตัวกลางที่มีการสูญเสีย กำหนดเงื่อนไขว่า เป็นการพิจารณาในระบบพิกัดฉาก มีการส่งผ่านความร้อนโดยการนำและพาความร้อน และไม่มีการระเหยของน้ำ กลายเป็นไอ (มวลของตัวกลางที่มีการสูญเสียคงที่) ดังนั้นโดยแทนสมการ (5.14) จึงสามารถลดรูปสมการ (5.17) ได้เป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_r}{\rho_m c_m} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{V_s}{\rho_m c_m} (T - T_a) + \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_{eff}'' |E|^2}{2 \rho_m c_m} \quad (5.18)$$

สมการ (5.18) คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตเทียบกับเวลา ดังกล่าวอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์กำลังสอง ซึ่งสามารถหาผลเฉลยได้โดยวิธีเชิงเลขแบบผลต่างสี่บเนื่อง

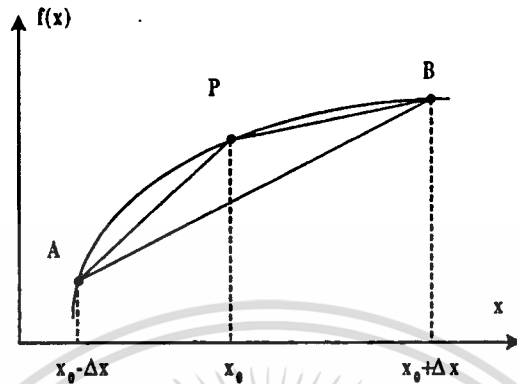
5.4 แบบแผนของวิธีผลต่างสี่บเนื่อง

ทฤษฎีผลต่างสี่บเนื่อง (Finite difference scheme) [13] ได้รับการพัฒนาเป็นครั้งแรกโดย

A. Thom ในราวปี 1920 ภายใต้ชื่อ “ทฤษฎีสี่เหลี่ยมจัตุรัส (The method of squares)” วิธีการของผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างสี่เหลี่ยมมีพื้นฐานที่ว่าเป็นการประมาณค่าของสมการอนุพันธ์จากสมการผลต่างสี่เหลี่ยม ผลลัพธ์ของสมการสามารถหาได้โดย กำหนดรูปแบบของการประมาณค่าผลต่างสี่เหลี่ยมเนื่องจากสมการอนุพันธ์ ดังนี้



รูปที่ 5.2 การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ ณ จุด P ใดๆ

สมมติ ฟังก์ชัน $f(x)$ แสดงดังรูปที่ 5.2 สามารถประมาณค่าของอนุพันธ์ โดยพิจารณาค่าความชัน ณ จุด P ใดๆ ซึ่งความชันของส่วนโค้ง PB คือ ผลต่างไปข้างหน้า (Forward difference) มีค่า

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (5.19)$$

ความชันของส่วนโค้ง AP คือ ผลต่างไปข้างหลัง (Backward difference) มีค่า

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} \quad (5.20)$$

ความชันของส่วนโค้ง AB คือ ผลต่างตรงกลาง (Central difference) มีค่า

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (5.21)$$

การประมาณค่าของอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชัน $f(x)$ ณ จุด P ใดๆ สามารถหาได้โดย

$$f''(x_0) \cong \frac{f'(x_0 + \Delta x/2) - f'(x_0 - \Delta x/2)}{\Delta x}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} - \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} \right]$$

หรือ

$$f''(x_0) \equiv \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (5.22)$$

ซึ่งเป็นการประมาณเพื่อหาค่าของสมการอนุพันธ์ในแบบของจุดที่ไม่ต่อเนื่องจะเรียกว่า การประมาณค่าแบบผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference approximation) นอกจากนี้ยังมีการประมาณค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันอีกหลายวิธีเช่น วิธีของอนุกรมเทเลอร์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการกระจายสมการที่เป็นที่รู้จักกันดี ดังนี้

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \Delta x f'(x_0) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x_0) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x_0) + \dots \quad (5.23)$$

และ

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \Delta x f'(x_0) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x_0) - \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x_0) + \dots \quad (5.24)$$

เมื่อรวมทั้ง 2 สมการจะได้

$$f(x_0 + \Delta x) + f(x_0 - \Delta x) = 2f(x_0) + (\Delta x)^2 f''(x_0) + O(\Delta x)^4 \quad (5.25)$$

โดย $O(\Delta x)^4$ เป็นเทอมของค่าความผิดพลาดเนื่องจากการตัดเทอมที่เหลือ พบว่าค่าของความผิดพลาดจะมีค่าเป็นอันดับที่ 4 และจะมีค่าไม่เกิน $(\Delta x)^4$ ซึ่งมีค่าน้อย สมมติว่าไม่นำเทอมดังกล่าวมาคิด จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ลักษณะสมการเหมือนกับสมการ (5.22) ได้ดังนี้

$$f''(x_0) \equiv \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

ในการประยุกต์ใช้กับการหาผลเฉลยของฟังก์ชัน $\Phi(x, t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัด 1 มิติกับเวลา จะต้องแบ่งขอบเขตของระนาบ $x-t$ ออกเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆที่มีขนาด $\Delta x \times \Delta t$ ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งกำหนดพิกัดเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}x &= i\Delta x & i &= 0,1,2,\dots \\t &= j\Delta t & j &= 0,1,2,\dots\end{aligned}\quad (5.26\text{ก})$$

ค่าของฟังก์ชัน $\Phi(x,t)$ ที่จุด P กำหนดได้โดย

$$\Phi_P = \Phi(i\Delta x, j\Delta t) = \Phi(i, j) \quad (5.26\text{ข})$$

โดยใช้การประมาณค่าผลต่างตรงกลางกับการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\Phi(x,t)$ ที่จุด (i, j) จะได้

$$\Phi_x|_{i,j} \equiv \frac{\Phi(i+1, j) - \Phi(i-1, j)}{2\Delta x} \quad (5.27\text{ก})$$

$$\Phi_t|_{i,j} \equiv \frac{\Phi(i, j+1) - \Phi(i, j-1)}{2\Delta t} \quad (5.27\text{ข})$$

$$\Phi_{xx}|_{i,j} \equiv \frac{\Phi(i+1, j) - 2\Phi(i, j) + \Phi(i-1, j)}{(\Delta x)^2} \quad (5.27\text{ค})$$

$$\Phi_{tt}|_{i,j} \equiv \frac{\Phi(i, j+1) - 2\Phi(i, j) + \Phi(i, j-1)}{(\Delta t)^2} \quad (5.27\text{ง})$$

สมการ (5.27) แสดงสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 และ 2 เทียบกับตัวแปร x และ t ตามลำดับ พิจารณาสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ที่มีตัวแปรพิกัด 1 ตัว ดังนี้

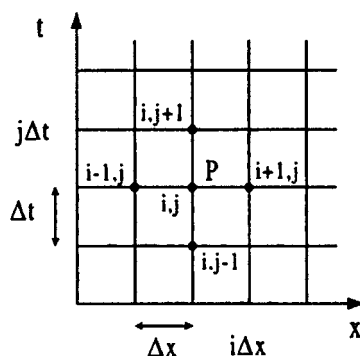
$$k \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad (5.28)$$

โดย k เป็นค่าคงที่ใดๆ สมการ (5.28) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของการประมาณค่าแบบผลต่างสี่เหลี่ยมได้เป็น

$$k \frac{\Phi(i, j+1) - \Phi(i, j)}{\Delta t} = \frac{\Phi(i+1, j) - 2\Phi(i, j) + \Phi(i-1, j)}{(\Delta x)^2} \quad (5.29)$$

ซึ่งการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา t จะใช้สูตรผลต่างไปข้างหน้า และสำหรับการหาอนุพันธ์เทียบกับพิกัด x จะใช้สูตรผลต่างตรงกลาง ถ้ากำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



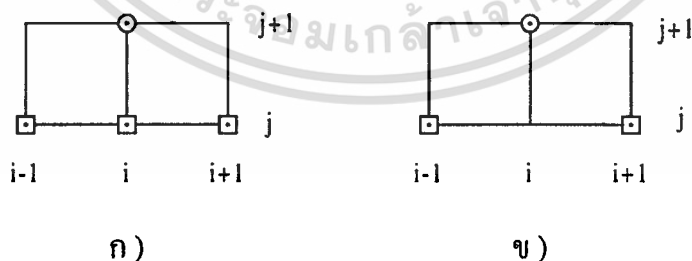
รูปที่ 5.3 การแบ่งขนาดตารางพื้นที่ของฟังก์ชันที่มี 2 ตัวแปร x และ t

$$r = \frac{\Delta t}{k(\Delta x)^2} \quad (5.30)$$

สมการ (5.30) เป็นค่าความเสถียร (Stability) จะสามารถเขียนสมการ (5.29) ได้ใหม่เป็น

$$\Phi(i, j+1) = r\Phi(i+1, j) + (1-2r)\Phi(i, j) + r\Phi(i-1, j) \quad (5.31)$$

ซึ่งจะเรียกวิธีการนี้ว่า วิธีโดยชัดแจ้ง (Explicit) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าของฟังก์ชันที่ตำแหน่งปัจจุบัน ณ เวลาถัดไป $\Phi(x, t+\Delta t)$ จากค่าของฟังก์ชันที่ตำแหน่งปัจจุบันและข้างเคียง ณ เวลาปัจจุบัน $\Phi(x-\Delta x, t)$, $\Phi(x, t)$ และ $\Phi(x+\Delta x, t)$ ได้ สมการ (5.31) สามารถแสดงความหมายออกมาเป็นขั้นตอนของการคำนวณตามรูปที่ 5.4 คือ ในรูปที่ 5.4ก สี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงจุดที่ทราบค่าของฟังก์ชัน Φ และวงกลมแสดงจุดที่ไม่ทราบค่าของฟังก์ชัน Φ



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการคำนวณของสมการอนุพันธ์ย่อย

การเลือกรูปแบบการประมาณค่าอนุพันธ์ มีหลักการคือ การพิจารณาค่าความเสถียร สามารถทดสอบได้โดยวิธีนอยมานน์ (Neumann) ซึ่งพิจารณาได้จากสมการ (5.30) และ (5.31) ตามรูปที่ 5.4ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

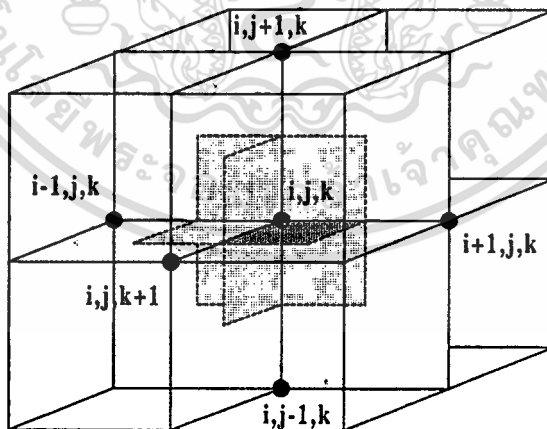
เป็นกรณีของ $0 < r \leq 1/2$ เมื่อกำหนดค่าของ $r=1/2$ ดังนั้นสมการ (5.31) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\Phi(i, j+1) = \frac{1}{2} [\Phi(i+1, j) + \Phi(i-1, j)] \quad (5.32)$$

ตามสมการ (5.32) จึงสามารถแสดงขั้นตอนของการคำนวณได้ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าของฟังก์ชันที่ตำแหน่งปัจจุบัน ณ เวลาถัดไป $\Phi(x, t + \Delta t)$ จากค่าของฟังก์ชันที่ตำแหน่งข้างเคียง ณ เวลาปัจจุบัน $\Phi(x - \Delta x, t)$ และ $\Phi(x + \Delta x, t)$ ได้

5.5 การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนโดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง

การแก้ปัญหาของการส่งผ่านความร้อนแบบ 3 มิติในสถานะสงบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical analyzed technique) [14] ซึ่งจะแก้ปัญหาได้เฉพาะกรณีของตัวกลางที่มีการสูญเสียที่พิจารณามีการถ่ายเทของความร้อน มีลักษณะเชิงเรขาคณิตอย่างง่าย และมีเงื่อนไขขอบเขตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน กรณีที่ไม่สามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ได้ก็สามารถใช้วิธีเชิงเลข (Numerical technique) ในการแก้ปัญหาได้ ข้อแตกต่างของวิธีการทั้งสองก็คือ การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จะได้ค่าของอุณหภูมิภายในตัวกลางที่สนใจทุกจุด สำหรับวิธีเชิงเลขจะได้ผลของอุณหภูมิเป็นบางจุด



รูปที่ 5.5 การกำหนดจุดที่ต้องการทราบค่าในการวิเคราะห์โดยวิธีเชิงเลข

ขั้นตอนของกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เริ่มต้นด้วยการเลือกจุดต่างๆ ที่ต้องการทราบค่าของอุณหภูมิ โดยกำหนดแกนสมมติขึ้นภายในตัวกลางนั้น แล้วแบ่งออกเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็กๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยลากเส้นขนานกับแกน X , Y และ Z จุดที่เกิดจากการตัดกันของเส้นจะเป็นจุดที่ต้องการทราบค่าของอุณหภูมิ หากสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาดเล็กลง (ค่าของ Δx , Δy และ Δz มีค่าน้อย) จะทำให้มีจำนวนจุดเพิ่มมากขึ้น ผลเฉลยที่ได้จะละเอียดและมีความถูกต้องมากขึ้นเช่นกัน ในการคำนวณจะต้องมีการระบุตำแหน่งที่กำลังพิจารณา ระบบที่สะดวกที่สุดกระทำได้โดยเรียกตามตำแหน่งทางแนวแกน X , Y และ Z เช่น $T_{i,j,k}$ เป็นต้น การระบุถึงอุณหภูมิของจุดต่าง ๆ นั้น อันที่จริงเป็นอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของจุดรอบๆจุดที่สนใจ เช่น $T_{i,j,k}$ เป็นการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่อยู่รอบด้านของจุด (i, j, k) คือ จุด $(i-1, j, k)$, $(i+1, j, k)$, $(i, j-1, k)$, $(i, j+1, k)$, $(i, j, k-1)$ และ $(i, j, k+1)$ ตามรูปที่ 5.5

5.5.1 รูปแบบของสมการการส่งผ่านความร้อนโดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง

การนำความร้อนภายในตัวกลางแบบ 3 มิติ ณ เวลาใดๆ อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง สามารถเขียนแทนด้วยสมการการส่งผ่านความร้อนได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.33)$$

โดย

T เป็นอุณหภูมิ	มีหน่วยเป็น ($^{\circ}C$)
t เป็นเวลา	มีหน่วยเป็น (s)
α เป็นค่าการกระจายของอุณหภูมิ	มีหน่วยเป็น ($W \cdot J^{-1} \cdot m^{-3}$)
Q เป็นอัตราการเกิดความร้อน	มีหน่วยเป็น ($W \cdot m^{-3}$)
ρ เป็นความหนาแน่น	มีหน่วยเป็น ($kg \cdot m^{-3}$)
c เป็นค่าความร้อนจำเพาะ	มีหน่วยเป็น ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$)

และสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.34)$$

เมื่อพิจารณาสมการนี้ในรูปแบบของผลต่างสืบเนื่องจะได้เป็น

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \alpha \left(\frac{\Delta^2 T}{(\Delta x)^2} + \frac{\Delta^2 T}{(\Delta y)^2} + \frac{\Delta^2 T}{(\Delta z)^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.35)$$

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา สามารถหาได้จากผลต่างของอุณหภูมิต่อช่วง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้น ซึ่งจะได้เป็นค่าเฉลี่ย เมื่อพิจารณาอุณหภูมิจุด (i, j, k) ณ เวลาปัจจุบัน (n) และเวลาถัดไป $(n+1)$ จะได้ว่า

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (5.36)$$

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับระยะทาง (Temperature gradient) หาได้จากการหาผลต่างของอุณหภูมิจุด 2 จุด ต่อระยะห่างระหว่าง 2 จุดนั้น ซึ่งจะได้เป็นค่าเฉลี่ย เมื่อพิจารณาอุณหภูมิจุด (i, j, k) และจุดข้างเคียง ณ เวลาปัจจุบัน (n) จะได้ว่า

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta x} \right]_{i+\frac{1}{2},j,k}^n = \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta x} \quad (5.37)$$

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta x} \right]_{i-\frac{1}{2},j,k}^n = \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} \quad (5.38)$$

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta y} \right]_{i,j+\frac{1}{2},k}^n = \frac{T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta y} \quad (5.39)$$

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta y} \right]_{i,j-\frac{1}{2},k}^n = \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y} \quad (5.40)$$

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta z} \right]_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n = \frac{T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta z} \quad (5.41)$$

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta z} \right]_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n = \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} \quad (5.42)$$

$$\left. \frac{\Delta^2 T}{(\Delta x)^2} \right]_{i,j,k}^n = \frac{T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n}{(\Delta x)^2} \quad (5.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \frac{\Delta^2 T}{(\Delta y)^2} \right]_{i,j,k}^n = \frac{T_{i,j+1,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2} \quad (5.44)$$

$$\left. \frac{\Delta^2 T}{(\Delta z)^2} \right]_{i,j,k}^n = \frac{T_{i,j,k+1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k-1}^n}{(\Delta z)^2} \quad (5.45)$$

ดังนั้นสมการ (5.34) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \alpha \left(\frac{T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{i,j,k+1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k-1}^n}{(\Delta z)^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.46)$$

และ กำหนดให้ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \alpha \Delta t (T_{i+1,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n + T_{i,j+1,k}^n + T_{i,j-1,k}^n + T_{i,j,k+1}^n + T_{i,j,k-1}^n - 6T_{i,j,k}^n) + T_{i,j,k}^n + \frac{Q \Delta t}{\rho c} \quad (5.47)$$

สมการ (5.47) แสดงอุณหภูมิภายในตัวกลางที่เวลาใดๆ ซึ่งระบุว่า ค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆ ณ เวลาถัดไปสามารถหาได้จากค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆ และจุดรอบๆจุดนั้นอีก 6 จุด ณ เวลาปัจจุบัน

5.5.2 การพิจารณาจุดที่ต้องการหาอุณหภูมิ ณ บริเวณต่างๆของตัวกลางที่มีการสูญเสีย

การแก้ปัญหการส่งผ่านความร้อนของตัวกลางที่มีการสูญเสียที่ได้รับสนามไฟฟ้า โดยใช้การวิเคราะห์วิธีผลต่างสืบเนื่อง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาแต่ละส่วน ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น ที่ผิว หรือ ภายในตัวกลาง เป็นต้น ซึ่งทำให้การเลือกรูปแบบและสมการของการแก้ปัญหาแตกต่างกัน ดังนี้

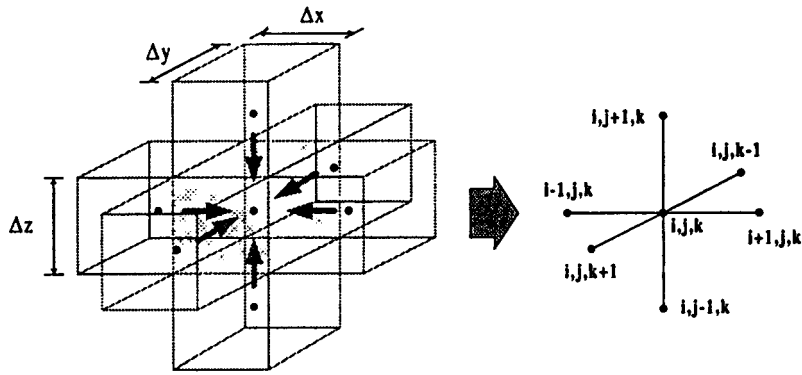
5.5.2.1 การหาอุณหภูมิภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

จุด (i, j, k) อยู่ในปริมาตรที่พิจารณาหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ตามรูปที่ 5.6 จึงมีเฉพาะการนำความร้อนจากบริเวณรอบข้างเท่านั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในปริมาตรดังกล่าว สามารถเขียนในรูปของสมการการส่งผ่านความร้อนได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{m=1}^6 Q_{m \rightarrow i,j,k} + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 การนำความร้อนภายในตัวกลาง

โดย ρ เป็นความหนาแน่น มีหน่วยเป็น $(kg \cdot m^{-3})$
 c เป็นค่าความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น $(J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1})$
 $Q_{m \rightarrow i,j,k}$ เป็นอัตราการนำความร้อนจากจุดต่างๆ รอบจุด (i, j, k) มาสู่ปริมาตรที่พิจารณา
 หากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถหาได้จาก

$$Q = \frac{kA}{l}(T_s - T_c) \quad (5.49)$$

โดย k เป็นค่าการนำความร้อนของตัวกลาง มีหน่วยเป็น $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
 A เป็นพื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน มีหน่วยเป็น (m^2)
 l เป็นระยะของจุดข้างเคียงถึงจุดที่พิจารณา (i, j, k) มีหน่วยเป็น (m)
 T_s เป็นอุณหภูมิของจุดข้างเคียง มีหน่วยเป็น $(^\circ C)$
 T_c เป็นอุณหภูมิของจุดที่พิจารณา (i, j, k) มีหน่วยเป็น $(^\circ C)$

พิจารณาการนำความร้อนจากจุด $(i+1, j, k)$ มายังจุด (i, j, k) ผ่านพื้นที่หน้าตัด $\Delta y \times \Delta z$ มีระยะของจุดข้างเคียงถึงจุดที่พิจารณาเป็น Δx ณ เวลาปัจจุบัน (n) เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตคือ $(T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n)$ จะได้ว่า

$$Q_{(i+1,j,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\Delta x} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.50)$$

และสำหรับจุดอื่นๆ มีวิธีการหาในทำนองเดียวกัน ซึ่งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{(i-1,j,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\Delta x} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.51)$$

$$Q_{(i,j+1,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta x \cdot \Delta z}{\Delta y} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.52)$$

$$Q_{(i,j-1,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta x \cdot \Delta z}{\Delta y} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.53)$$

$$Q_{(i,j,k+1) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\Delta z} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.54)$$

$$Q_{(i,j,k-1) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\Delta z} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.55)$$

แทนค่าสมการ (5.36) (5.50) – (5.55) ลงในสมการ (5.48) และกำหนดให้ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ จะได้

$$\frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} = k \cdot \Delta (T_{i+1,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n + T_{i,j+1,k}^n + T_{i,j-1,k}^n + T_{i,j,k+1}^n + T_{i,j,k-1}^n - 6T_{i,j,k}^n) + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.56)$$

จัดรูปใหม่ จะได้

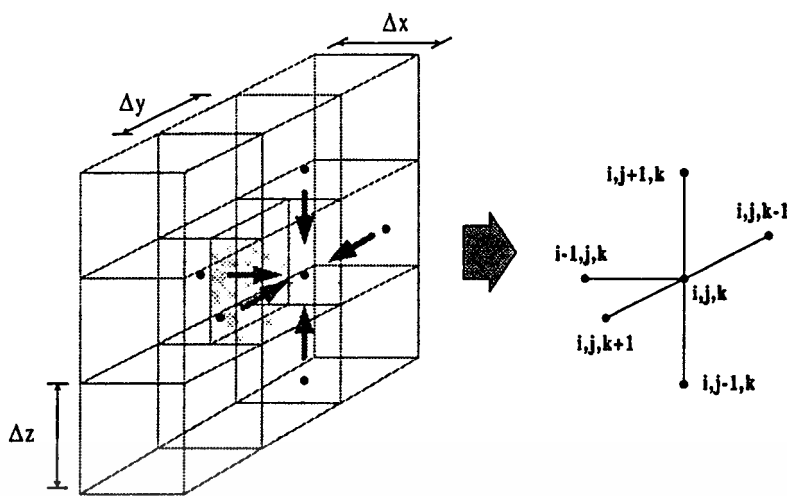
$$T_{i,j,k}^{n+1} = k \cdot \Delta \cdot \Delta t (T_{i+1,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n + T_{i,j+1,k}^n + T_{i,j-1,k}^n + T_{i,j,k+1}^n + T_{i,j,k-1}^n - 6T_{i,j,k}^n) + T_{i,j,k}^n + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho c} \quad (5.57)$$

สมการ (5.57) แสดงอุณหภูมิภายในตัวกลางที่เวลาใดๆ ซึ่งระบุว่า ค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆ ณ เวลาถัดไปสามารถหาได้จากค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆ และจุดรอบๆจุดนั้นอีก 6 จุด ณ เวลาปัจจุบันตามโครงสร้างที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.6

5.5.2.2 การหาอุณหภูมิที่ผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสีย

กรณีของการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องนั้น จะใช้ได้สะดวกสำหรับกรณีของการพิจารณาจุดที่ต้องการทราบอุณหภูมิอยู่ภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียและไม่สัมผัสกับของไหล หากพิจารณาจุดที่อยู่บริเวณผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสีย จะต้องคิดการส่งผ่านความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนด้วย ตามรูปที่ 5.7 จุด (i, j, k) อยู่ในปริมาตรที่พิจารณาหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณผิวของตัวกลาง การส่งผ่านความร้อนมีทั้งการนำความร้อนที่ภายใต้ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 การนำและพาความร้อนบริเวณผิวของตัวกลาง

และการพาความร้อนที่บริเวณผิวที่สัมผัสกับของไหล เช่น อากาศ เป็นต้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในปริมาตรดังกล่าว สามารถเขียนในรูปของสมการการส่งผ่านความร้อนได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{m=1}^5 Q_{m \rightarrow i,j,k} + Q_{f \rightarrow i,j,k} + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.58)$$

โดย Q_f เป็นอัตราการพาความร้อนของของไหล สามารถหาได้จาก

$$Q_{f \rightarrow i,j,k} = hA(T_f^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.59)$$

โดย h เป็นค่าการพาความร้อนของของไหล มีหน่วยเป็น ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)

A เป็นพื้นที่หน้าตัดที่มีการพาความร้อนของของไหล มีหน่วยเป็น (m^2)

T_f^n เป็นอุณหภูมิของของไหล มีหน่วยเป็น ($^\circ C$)

$Q_{m \rightarrow i,j,k}$ เป็นอัตราการนำความร้อนจากจุดต่างๆ รอบจุด (i, j, k) มาสู่ปริมาตรที่พิจารณา หากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถพิจารณาได้จากสมการ (5.49) ดังนี้ พิจารณาการนำความร้อนจากจุด $(i-1, j, k)$ มายังจุด (i, j, k) ผ่านพื้นที่หน้าตัด $\Delta y \times \Delta z$ มีระยะของจุดข้างเคียงถึงจุดที่พิจารณาเป็น $\frac{\Delta x}{2}$ ณ เวลาปัจจุบัน (n) เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิคือ $(T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n)$ จะได้ว่า

$$Q_{(i-1,j,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{2 \cdot k \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\Delta x} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับจุดอื่นๆสามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน

$$Q_{(i,j-1,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot (\Delta x/2) \cdot \Delta z}{\Delta y} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.61)$$

$$Q_{(i,j+1,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot (\Delta x/2) \cdot \Delta z}{\Delta y} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.62)$$

$$Q_{(i,j,k-1) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot (\Delta x/2) \cdot \Delta y}{\Delta z} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.63)$$

$$Q_{(i,j,k+1) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot (\Delta x/2) \cdot \Delta y}{\Delta z} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.64)$$

สำหรับการพาความร้อนที่ผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสียที่สัมผัสกับของไหล ผ่านพื้นที่หน้าตัด $\Delta y \times \Delta z$ สามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{f \rightarrow i,j,k} = h \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot (T_f^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.65)$$

แทนค่าสมการ (5.36) (5.60) – (5.65) ลงในสมการ (5.58) และกำหนดให้ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ จะได้

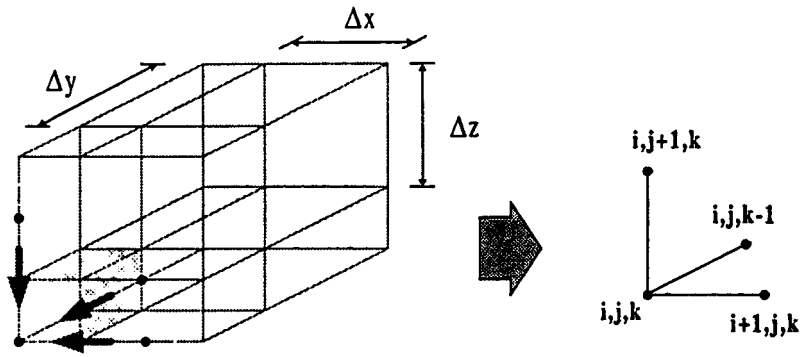
$$T_{i,j,k}^{n+1} = k \cdot \Delta \cdot \Delta t (T_{i-1,j,k}^n + T_{i,j,k}^n) + k \cdot \frac{\Delta}{2} \cdot \Delta t (T_{i,j+1,k}^n + T_{i,j-1,k}^n + T_{i,j,k+1}^n + T_{i,j,k-1}^n - 4T_{i,j,k}^n) \\ + h \cdot \Delta^2 \cdot \Delta t (T_f^n - T_{i,j,k}^n) + T_{i,j,k}^{n+1} + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho c} \quad (5.66)$$

สมการ (5.66) แสดงอุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนและที่บริเวณผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนตามโครงสร้าง ซึ่งระบุว่า ค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆ ณ เวลาถัดไปสามารถหาได้จากค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆนั้น จุดรอบๆจุดนั้นอีก 5 จุด และอุณหภูมิของของไหล ณ เวลาปัจจุบันตามโครงสร้างที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.7

5.5.2.3 การหาอุณหภูมิที่ผิวมุมของตัวกลางที่มีการสูญเสีย

การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อน ณ บริเวณผิวในส่วนที่เป็นมุมของตัวกลางที่มีการสูญเสีย จะมีรูปแบบของปัญหาตามรูปที่ 5.8 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การนำและพาความร้อนบริเวณผิวมุมของตัวกลาง

ความร้อนที่เกิดขึ้นในปริมาตรที่พิจารณาหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถเขียนในรูปของสมการการส่งผ่านความร้อนได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{m=1}^3 Q_{m \rightarrow i,j,k} + \sum_{f=1}^3 Q_{f \rightarrow i,j,k} + \frac{Q}{\rho c} \quad (5.67)$$

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเนื่องการนำความร้อน สามารถพิจารณาได้ตามสมการ (5.49) โดยพิจารณารูปที่ 5.8 การนำความร้อนจากจุด $(i+1, j, k)$ มายังจุด (i, j, k) ผ่านพื้นที่หน้าตัด $\frac{\Delta y}{2} \times \frac{\Delta z}{2}$ มีระยะของจุดข้างเคียงถึงจุดที่พิจารณาคือ Δx ณ เวลาปัจจุบัน (n) เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิคือ $(T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n)$ จะได้ว่า

$$Q_{(i+1,j,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{4 \cdot \Delta x} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.68)$$

สำหรับจุดอื่นๆสามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน

$$Q_{(i,j+1,k) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta x \cdot \Delta z}{4 \cdot \Delta y} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.69)$$

$$Q_{(i,j,k-1) \rightarrow (i,j,k)} = \frac{k \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{4 \cdot \Delta z} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.70)$$

สำหรับการพาความร้อนที่ผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสียที่สัมผัสกับของไหล ผ่านพื้นที่หน้าตัด

$\frac{\Delta y}{2} \times \frac{\Delta z}{2}$ ณ เวลาปัจจุบัน (n) สามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{f_j \rightarrow i,j,k} = \frac{h \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{4} \cdot (T_f^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.71)$$

และสำหรับด้านอื่นๆ มีลักษณะการคิดที่เหมือนกัน ดังนี้

$$Q_{f_j \rightarrow i,j,k} = \frac{h \cdot \Delta x \cdot \Delta z}{4} \cdot (T_f^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.72)$$

$$Q_{f_k \rightarrow i,j,k} = \frac{h \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{4} \cdot (T_f^n - T_{i,j,k}^n) \quad (5.73)$$

แทนค่าสมการ (5.36) (5.68) – (5.73) ลงในสมการ (5.69) และกำหนดให้ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ จะได้

$$T_{i,j,k}^{n+1} = k \cdot \frac{\Delta}{4} \cdot \Delta t (T_{i+1,j,k} + T_{i,j+1,k} + T_{i,j,k-1} - 3T_{i,j,k}) + 3 \cdot h \cdot \frac{\Delta^2}{4} \cdot \Delta t (T_f - T_{i,j,k}) + T_{i,j,k}^n + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho c} \quad (5.74)$$

สมการ (5.74) แสดงอุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนและที่บริเวณผิวในส่วนที่เป็นมุมของตัวกลางที่มีการสูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนตามโครงสร้างที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งระบุว่า ค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆ ณ เวลาถัดไปสามารถหาได้จากค่าของอุณหภูมิที่จุดใดๆนั้น จุรรอบๆจุดนั้นอีก 3 จุด และอุณหภูมิของของไหล 3 ด้าน ณ เวลาปัจจุบัน

5.5.3 ค่าความเสถียรของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมที่ใช้คำนวณอุณหภูมิของตัวกลาง

การวิเคราะห์ปัญหาในการหาค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากสนามไฟฟ้าของตัวกลางที่มีความสูญเสียโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้ ค่าความถูกต้องของผลเฉลยสามารถกำหนดได้โดยการเลือกเวลาที่เหมาะสม [11] ดังนี้

$$\Delta t \leq \frac{\rho c}{2k} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-1} \quad (5.75)$$

โดย ρ เป็นความหนาแน่น มีหน่วยเป็น $(kg \cdot m^{-3})$ c เป็นค่าความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น $(J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1})$ k เป็นค่าความนำความร้อนของตัวกลาง มีหน่วยเป็น $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$ และ $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ เป็นขนาดของระยะห่างระหว่างพิกัดในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (5.75) แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลาง และการเลือกขนาดของระยะห่างระหว่างพิกัด

5.6 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่อง

การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่องจากบทที่ 4 ทำให้สามารถเข้าใจถึงกลไกของการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าไปจากตำแหน่งปกติได้โดยการปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการรักษาอยู่ในช่วง 41-43 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เซลล์มะเร็งมีการตอบสนองต่อการรักษาได้ดี และเซลล์ปกติยังคงองค์ประกอบของเซลล์อยู่ได้โดยไม่ได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบด้านเวลาและกำลังงานของแหล่งกำเนิดของสัญญาณที่ป้อนให้กับตัวกลางที่มีการสูญเสียเป็นสำคัญ จากสมการการส่งผ่านความร้อนที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงรูปแบบการกระจายของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอันเกิดจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ ในกรณีต่างๆดังแสดงในบทที่ 4 ดังนั้นสำหรับการแสดงผลของการกระจายอุณหภูมิจะมีค่าของอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 43 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิที่เป็นขอบเขตของพื้นที่ประสิทธิผล (Effective field size) ซึ่งเป็นขนาดของพื้นที่ที่มีค่าของอุณหภูมิตกลงมาครึ่งหนึ่งของค่าอุณหภูมิสูงสุด จะพิจารณาที่เส้นคอนทัวร์ 40 องศาเซลเซียส

เมื่อกำหนดรูปแบบของตัวกลางที่มีการสูญเสียให้มีลักษณะที่เป็นกล้ามเนื้อ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [15] ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้โดยสมการการส่งผ่านความร้อนที่กล่าวมาในตอนต้นได้ดังนี้

ความถี่ f มีค่า	2450	เมกกะเฮิรต์
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของกล้ามเนื้อ ϵ_m มีค่า	47	
ค่าการนำไฟฟ้าของกล้ามเนื้อ σ_m มีค่า	2.21	$S \cdot m^{-1}$
ค่าความร้อนจำเพาะของกล้ามเนื้อ c_m มีค่า	4180	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
ค่าความหนาแน่นของกล้ามเนื้อ ρ_m มีค่า	1000	$kg \cdot m^{-3}$
ค่าการนำความร้อนของกล้ามเนื้อ k_m มีค่า	0.55	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ค่าการพาความร้อนของอากาศ h มีค่า	10	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
อุณหภูมิเริ่มต้นของกล้ามเนื้อ T_0 มีค่า	37	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของอากาศ T_f มีค่า	25	องศาเซลเซียส

เมื่อกำหนดขนาดของระยะห่างระหว่างพิกัด Δx , Δy และ Δz มีขนาดเท่ากัน และเท่ากับ 2

มิลลิเมตร จากสมการ (5.75) ทำให้สามารถหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณโดยวิธีผลต่าง

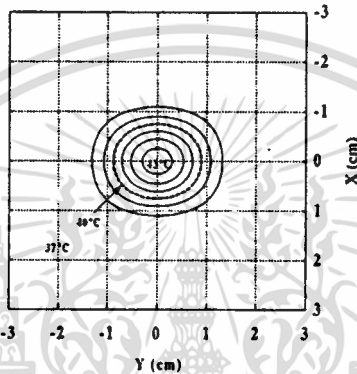
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สืบเนื่องนี้ได้เท่ากับไม่เกิน 5 วินาที กำหนดกำลังงานที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดที่ป้อนสายอากาศ มีค่า 100 วัตต์ และเวลาที่ปล่อยคลื่น 5 นาที เท่ากันทุกกรณี

5.6.1 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง

รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ถือว่าเป็นกรณีพื้นฐานสำหรับศึกษา ก่อนที่จะพิจารณาสนามไฟฟ้ารวมจากสายอากาศที่มีมากกว่า 1 ร่อง จากสมการการส่งผ่านความร้อน และค่าคงที่ต่างๆที่กำหนด สามารถแสดงรูปแบบการกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ได้ดังนี้



รูปที่ 5.9 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง

รูปแบบของการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 5.9 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับรูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 4.2 และได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 3 ตารางเซนติเมตร

5.6.2 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง

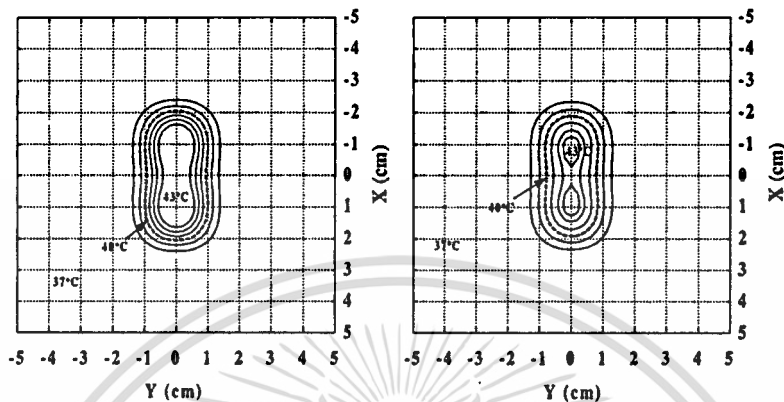
การปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสองแตกต่างกัน ทำให้ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้เปลี่ยนแปลงไปได้ ดังแสดงในบทที่ 4 รูปแบบการกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากการปรับเปลี่ยนกรณีต่างๆดังกล่าวสามารถพิจารณาแยกเป็นกรณีต่างๆได้ดังนี้

5.6.2.1 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส

การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ โดยการปรับเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศทั้ง 2 ร่อง ที่ต่างกัน ตามรูปที่ 4.5 สามารถหารูปแบบการกระจายของอุณหภูมิ จากกรณีดังกล่าว โดยพิจารณาสมการการส่งผ่านความร้อน ซึ่งได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

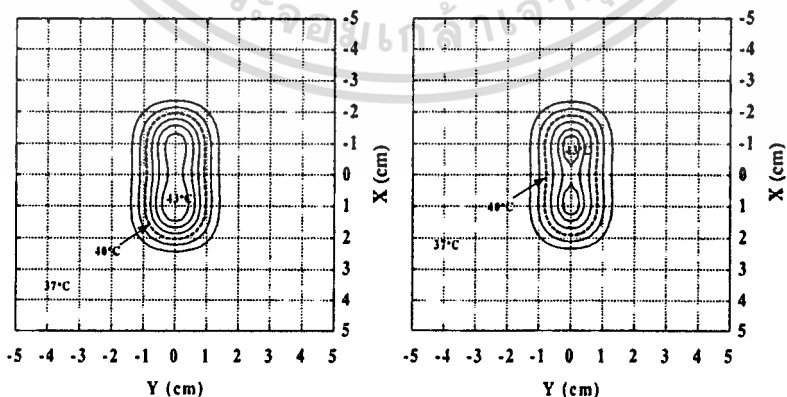
การกระจายอุณหภูมิจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง แสดงดังรูปที่ 5.10 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างรูปทางด้านซ้าย ซึ่งมีเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนเฟสของสายอากาศร่องที่ 2 เป็น $-22.5^{\circ}, 0^{\circ}, 22.5^{\circ}$ โดยสายอากาศร่องที่ 1 มีเฟสคงที่ 0° ได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 8 ตารางเซนติเมตร กับรูปทางด้านขวาซึ่งไม่มีการปรับเปลี่ยนเฟสจะได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 6 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 5.10 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส

5.6.2.2 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ โดยการปรับความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศทั้ง 2 ร่อง ที่ต่างกัน ตามรูปที่ 4.6 สามารถหารูปแบบการกระจายของอุณหภูมิ จากกรณีดังกล่าว โดยพิจารณาสมการการส่งผ่านความร้อน ซึ่งได้ผลดังนี้



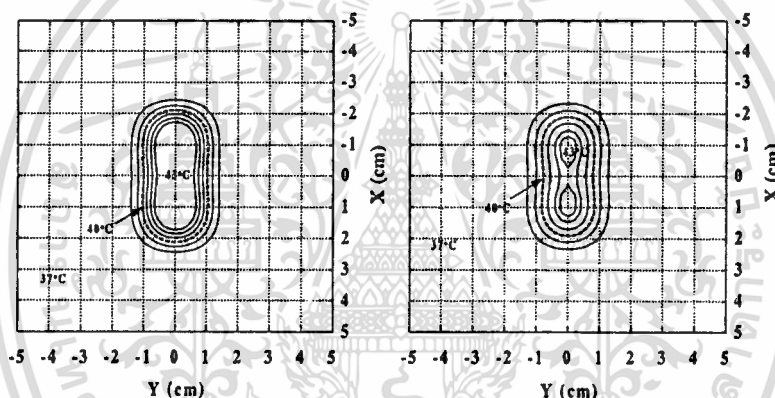
รูปที่ 5.11 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายอุณหภูมิจากสายอากาศดังรูปที่ 5.11 เป็นกรณีเปรียบเทียบระหว่างรูปทางด้านซ้าย ซึ่งมี การปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศช่องที่ 2 เป็น 2350, 2450 และ 2550 เมก กะเฮิร์ตตามลำดับ โดยสายอากาศช่องที่ 1 มีความถี่คงที่ที่ 2450 เมกกะเฮิร์ต ได้พื้นที่ประสิทธิผล ประมาณ 8 ตารางเซนติเมตร กับรูปทางด้านขวาซึ่งไม่มีการปรับเปลี่ยนความถี่จะได้พื้นที่ประสิทธิ ผลประมาณ 6 ตารางเซนติเมตร

5.6.2.3 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ โดยการปรับแอมพลิจูดของ แหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศทั้ง 2 ร่อง ที่ต่างกัน ตามรูปที่ 4.7 สามารถหารูปแบบการกระจาย ของอุณหภูมิ จากกรณีดังกล่าว โดยพิจารณาสมการการส่งผ่านความร้อน ซึ่งได้ผลดังนี้



รูปที่ 5.12 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปรับ เปลี่ยนแอมพลิจูด

การกระจายอุณหภูมิจากสายอากาศดังรูปที่ 5.12 เป็นกรณีเปรียบเทียบระหว่างการปรับเปลี่ยน แอมพลิจูด ซึ่งแสดงรูปทางด้านซ้าย โดยกำหนดอัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างสายอากาศช่องที่ 1 ต่อสายอากาศช่องที่ 2 เป็น 1:1.2, 1:1 และ 1.2:1 ตามลำดับ ได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 8 ตาราง เซนติเมตร กับรูปทางด้านขวาซึ่งไม่มีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดจะได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 6 ตารางเซนติเมตร

ผลการคำนวณทางทฤษฎีของการกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสาย อากาศ 2 ร่อง ที่มีการจัดเรียงตำแหน่งแบบข้างต่อข้าง โดยมีเงื่อนไขของการปรับเฟส ความถี่ หรือ แอมพลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนทั้ง 3 เงื่อนไข สามารถทำให้ความแรงของขนาดสนามไฟฟ้าเปลี่ยนตำแหน่งไปได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

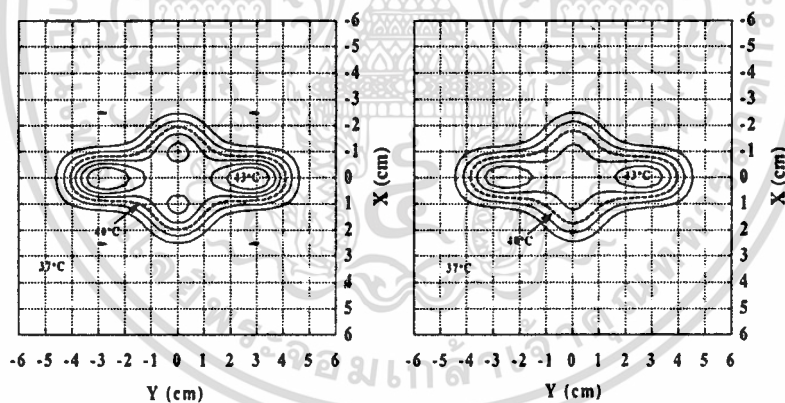
สามารถเพิ่มพื้นที่ประสิทธิผลได้มากกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับเปลี่ยน ที่กำลังงานของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศและเวลาที่เท่ากัน และพบว่ากรณีของการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดจะได้พื้นที่ประสิทธิผลมากกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย จึงเลือกกรณีดังกล่าวเพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบ

5.6.3 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง

การปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่องทั้งสี่แตกต่างกัน ทำให้ตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้เปลี่ยนแปลงไปได้ ดังแสดงในบทที่ 4 รูปแบบการกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากการปรับเปลี่ยนกรณีต่างๆดังกล่าว สามารถพิจารณาแยกเป็นกรณีต่างๆได้ดังนี้

5.6.3.1 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส

การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ โดยการปรับเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศทั้ง 4 ร่อง ที่ต่างกัน ตามรูปที่ 4.10 สามารถหารูปแบบการกระจายของอุณหภูมิ จากกรณีดังกล่าว โดยพิจารณาสมการการส่งผ่านความร้อน ซึ่งได้ผลดังนี้

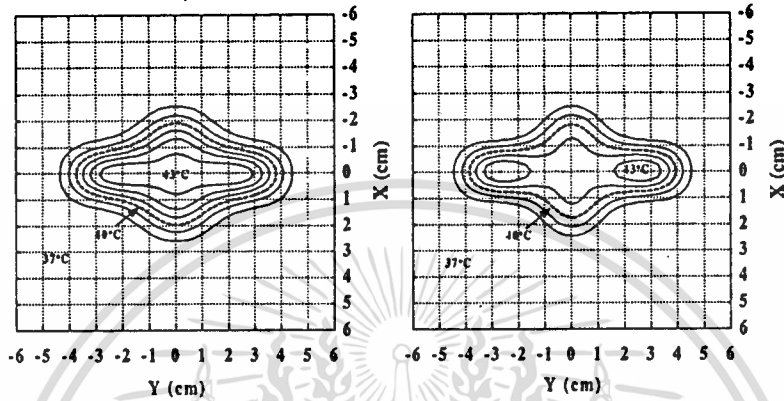


รูปที่ 5.13 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนเฟส

การกระจายอุณหภูมิจากสายอากาศดังรูปที่ 5.13 เป็นกรณีเปรียบเทียบระหว่างรูปทางด้านซ้าย ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งมีค่าเฟสเป็น $45^\circ, 22.5^\circ, 0^\circ$ ตามเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 4.10 ได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 18 ตารางเซนติเมตร กับรูปทางด้านขวาซึ่งไม่มีการปรับเปลี่ยนเฟสจะได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 16 ตารางเซนติเมตร

5.6.3.2 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ โดยการปรับความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศทั้ง 4 ร่อง ที่ต่างกัน ตามรูปที่ 4.11 สามารถหารูปแบบการกระจายของอุณหภูมิ จากกรณีดังกล่าว โดยพิจารณาสมการการส่งผ่านความร้อน ซึ่งได้ผลดังนี้



รูปที่ 5.14 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนความถี่

การกระจายอุณหภูมิจากสายอากาศดังรูปที่ 5.14 เป็นกรณีเปรียบเทียบระหว่างรูปทางด้านซ้าย ซึ่งมี การปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งมีค่าความถี่ เป็น 2450, 2550, 2650 เมกกะเฮิร์ต ตามเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 4.11 ได้พื้นที่ ประสิทธิภาพประมาณ 18 ตารางเซนติเมตร กับรูปทางด้านขวาซึ่งไม่มีการปรับเปลี่ยนความถี่จะได้ พื้นที่ประสิทธิภาพประมาณ 16 ตารางเซนติเมตร

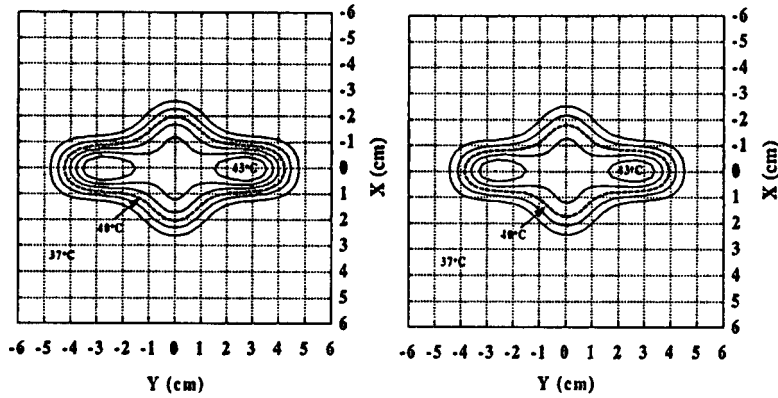
5.6.3.3 การกระจายของอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ โดยการปรับแอมพลิจูดของ แหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศทั้ง 4 ร่อง ที่ต่างกัน ตามรูปที่ 4.12 สามารถหารูปแบบการกระจาย ของอุณหภูมิ จากกรณีดังกล่าว โดยพิจารณาสมการการส่งผ่านความร้อน ซึ่งได้ผลดังนี้

การกระจายอุณหภูมิจากสายอากาศดังรูปที่ 5.15 เป็นกรณีเปรียบเทียบระหว่างรูปทางด้านซ้าย ซึ่งมี การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศร่องที่ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดเป็น 1 : 1.2 : 1.3 ตามเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 4.12 ได้พื้นที่ ประสิทธิภาพประมาณ 19 ตารางเซนติเมตร กับรูปทางด้านขวาซึ่งไม่มีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด

ได้พื้นที่ประสิทธิผลประมาณ 16 ตารางเซนติเมตร

ผลการคำนวณทางทฤษฎีของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิจากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่มีการจัดเรียงตำแหน่งแบบผสมระหว่างแบบแถวลำดับร่วมแนวที่อยู่ตรงกลางและแบบข้างค่อข้าง โดยมีเงื่อนไขของการปรับเฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูด ของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศ แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนทั้ง 3 เงื่อนไข สามารถทำให้ความแรงของขนาดสนามไฟฟ้าเปลี่ยนตำแหน่งไปได้ เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วสามารถเพิ่มพื้นที่ประสิทธิผลได้มากกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับเปลี่ยน ที่กำลังงานของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศและเวลาที่เท่ากัน และพบว่ากรณีของการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดจะได้พื้นที่ประสิทธิผลมากกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย จึงเลือกกรณีดังกล่าวเพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบ

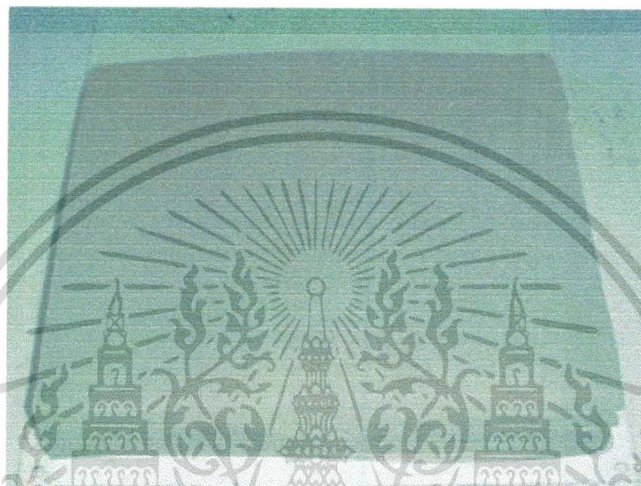
5.7 การทดลอง

จากผลการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า การปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศได้พื้นที่ประสิทธิผลมากกว่ากรณีของการปรับเปลี่ยนเฟสและความถี่ และในทางปฏิบัติมีความยุ่งยากน้อยที่สุด จึงเลือกวิธีการดังกล่าวสำหรับการทดลองตามโครงสร้างปัญหาที่ทำการวิเคราะห์เพื่อยืนยันผลทางทฤษฎี และสำหรับการทดลองเพื่อปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่มาจากต่างแหล่งกัน สามารถพิจารณาได้ว่าแหล่งกำเนิดดังกล่าวมีเฟสเดียวกัน โดยอาศัยวิธีการกระตุ่น (Injection locking) [16]

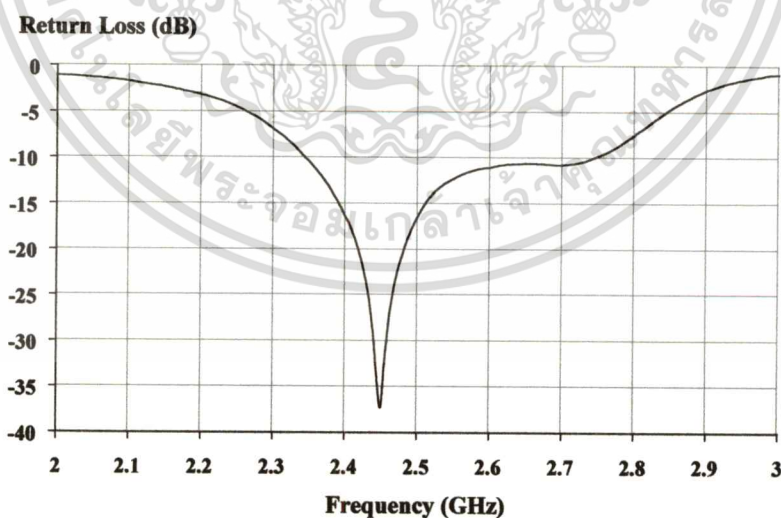
5.7.1 อุปกรณ์และการเตรียมการทดลอง

การทดลองประกอบด้วย สายอากาศแบบร่องที่ต่อกับแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยสายอากาศแบบร่องที่ใช้ในการทดลองมีรูปแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เป็นร่องที่ปิดหลังด้วยโพรง (Cavity-backed slot) ที่มีขนาด $9 \times 3 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความยาวของสายอากาศเท่ากับ 5.5 เซนติเมตร (เป็นความยาวที่ได้จากการปฏิบัติ) บนระนาบกราวน์ขนาด 30×40 ตารางเซนติเมตร ตัวกลางที่มีการสูญเสียที่ใช้ในการทดลองคือ สารเนื้อเทียม (Agar phantom) ซึ่งมีองค์ประกอบที่เป็น 0.4% NaCl, 0.02% NaN_3 และ 4% Agar วิธีการเตรียมได้แสดงไว้ในภาคผนวก โดยมีขนาด $30 \times 30 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร และทำเป็นชั้นมีความหนา 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5.16



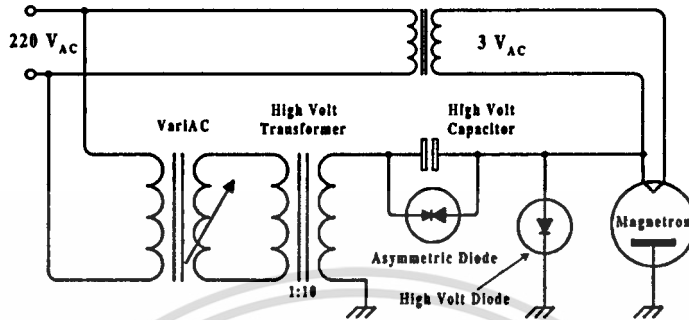
รูปที่ 5.16 สารเนื้อเทียม



รูปที่ 5.17 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบร่องที่ปิดหลังด้วยโพรง

ก่อนการทดลองได้ทำการทดสอบเพื่อปรับแต่งสายอากาศแบบร่องที่ปิดหลังด้วยโพรง บนระนาบกราวน์เหนือสารเนื้อเทียมที่มีขนาดดังกล่าว โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) ราคาไม่ต่ำกว่าหมื่นห้าพันบาท อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

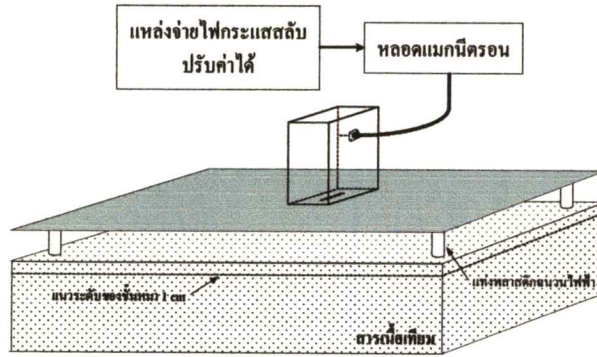
HP8510C เพื่อทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ซึ่งผลการทดสอบสายอากาศแบบร่องที่ปิดหลังด้วยโพรงนี้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำที่สุด -37 เดซิเบล ณ ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต แสดงให้เห็นว่าสายอากาศนี้มีการทำงานที่ดีที่สุด ณ ความถี่ดังกล่าว



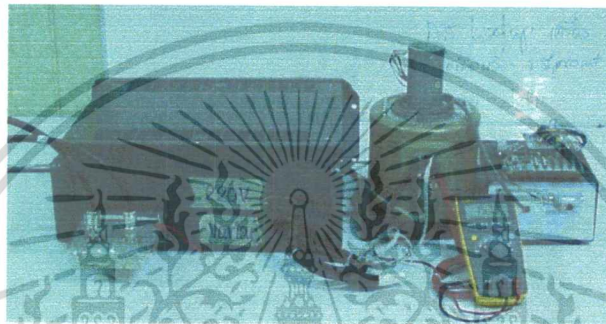
รูปที่ 5.18 ผังวงจรการทำงานของหลอดแมกนีตรอน

แหล่งกำเนิดกำลังงานสูงที่ใช้ในการทดลองสำหรับกำเนิดความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต คือ หลอดแมกนีตรอน (Magnetron tube) [17] ซึ่งมีหลักการการทำงานที่แสดงดังผังวงจรตามรูปที่ 5.18 โดยการทำงานเริ่มจากป้อนความต่างศักย์ 3 โวลต์ กระแสสูงให้กับไส้หลอด (Filament) เพื่อกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกร่งโดยค่ากระแสไฟตรงความต่างศักย์สูง (Direct current high voltage) จากขั้วแคโทดสู่ขั้วแอโนดที่ได้จากหม้อแปลงสัจย์สูงผ่านการเรียงกระแส (Rectify) โดยไดโอดสัจย์สูง และตัวเก็บประจุที่ต่อกันในลักษณะของวงจรทวิแรงดัน 2 เท่าแบบครึ่งคลื่น [18] กำลังงานของหลอดแมกนีตรอนสามารถกำหนดได้จากค่าความต่างศักย์สูง (High voltage) ที่ป้อนให้กับขั้วแคโทดของหลอดแมกนีตรอน จากความสัมพันธ์ของหม้อแปลง แรงดันที่ขดทุติยภูมิแปรผันตรงกับแรงดันที่ขดปฐมภูมิ ดังนั้นค่าของกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนจึงสามารถควบคุมได้จากแรงดันที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิของหม้อแปลงสัจย์สูง ในการทดลองใช้วารีแอก (Variac) เป็นตัวควบคุมค่าความต่างศักย์ที่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลงสัจย์สูง ขั้นตอนในการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่จ่ายให้กับสายอากาศแบบร่องสำหรับการทดลองกระทำได้โดย ปรับค่าความต่างศักย์ที่วารีแอก ซึ่งใช้ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor) ทำหน้าที่นี้ ดังแสดงในรูปที่ 5.19x โดยผลการทดลองในการควบคุมกำลังงานของหลอดแมกนีตรอน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหลอดแมกนีตรอนนี้ ได้มีผู้ทำวิจัย [19] ทำการทดลองไว้แล้ว ระบบการควบคุมประกอบด้วย ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Basic Stamp II (ด้านขวาของรูป) ที่เขียนโปรแกรมควบคุมสเตปปีงมอเตอร์เพื่อหมุนวารีแอก ซึ่งทำให้ค่าความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงแล้วป้อนหม้อแปลงความต่างศักย์สูงที่จ่ายให้หลอดแมกนีตรอน (กล่องสี่ด้านภายในรูป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

รูปที่ 5.19 การจัดอุปกรณ์และชุดควบคุมกำลังงานของหลอดแมกนีตรอน

ก) รูปแบบการจัดอุปกรณ์

ข) แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับและหลอดแมกนีตรอน

5.7.2 วิธีการทดลอง

การทดลองกระทำโดยจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.19 ก เริ่มต้นด้วยการให้ความร้อน(Pre-heat) กับสารเนื้อเทียมเพื่อให้มีอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการทดลองเป็น 37 องศาเซลเซียส สำหรับการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของหลอดแมกนีตรอน กระทำได้โดยการปรับกำลังงานของหลอด หรืออีกนัยหนึ่งคือการปรับความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับหลอด โดยเมื่อปรับวารีแอกให้ได้ความต่างศักย์ 150 โวลต์ จะทำให้หลอดแมกนีตรอนจ่ายกำลังงานออกมาประมาณ 100 วัตต์ เมื่อปรับความต่างศักย์ที่วารีแอกเป็น 153 โวลต์ จะทำให้หลอดจ่ายกำลังงานออกมาประมาณ 120 วัตต์ และเมื่อปรับความต่างศักย์ที่วารีแอกเป็น 155 โวลต์ จะทำให้หลอดจ่ายกำลังงานออกมาประมาณ 130 วัตต์ เป็นต้น เริ่มต้นทำการทดลอง ในระยะเวลาที่กำหนดคือ 5 นาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด การพิจารณาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถทำได้โดยใช้แผ่นฟิล์มอุณหภูมิ (Liquid crystal film) ทาบไปบนสารเนื้อเทียมที่ระยะลึกจากผิว 1 เซนติเมตร เพื่อเก็บผลการทดลอง โดยการทดลองจะมีการเปรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบระหว่างวิธีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่จ่ายให้สายอากาศแบบร่องปิดด้านหลังด้วยโพรง กับวิธีการที่แอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดคงที่ ดังนี้

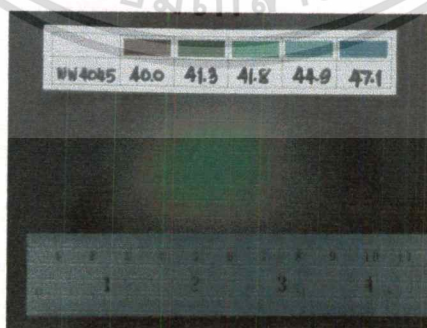
5.7.3 ผลการทดลอง

โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ที่ปิดด้านหลังด้วยโพรงบนระนาบกราวนัลลอยเหนือสารเนื้อเทียม ที่แสดงดังรูปที่ 5.20 มีรูปแบบการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากทำการทดลองโดยปรับกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนเป็น 100 วัตต์ ใช้เวลาทดลอง 5 นาที ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.20 สายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง เนื้อสารเนื้อเทียม

รูปแบบการกระจายอุณหภูมิของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ลึกลงจากผิวของสารเนื้อเทียม 1 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 5.21 แนวการเรียงตัวของสายอากาศแบบร่องจะตั้งฉากกับไม้บรรทัดในรูป ได้พื้นที่ประสิทธิผลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 3.5 เซนติเมตร ถึง ประมาณ 7 เซนติเมตร ขนาดประมาณ 9 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 5.21 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 1 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ในสารเนื้อเทียม

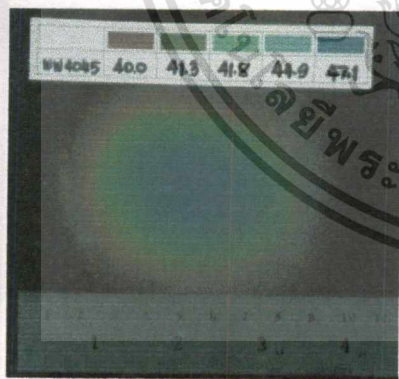
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปิดด้านหลังด้วยโพรงบนระนาบกราวน์ลอยเหนือสารเนื้อเทียม ที่แสดงดังรูปที่ 5.22 การทดลองกระทำดังนี้ กรณีของการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดตามเงื่อนไขที่คำนวณตามรูปที่ 4.7 โดยปรับกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนเป็น 100 และ 120 วัตต์ ระดับละ 5 วินาที ใช้เวลาทดลองทั้งหมด 5 นาที สามารถแสดงรูปแบบการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากทำการทดลองได้ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.22 สายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรงเหนือสารเนื้อเทียม

รูปแบบการกระจายอุณหภูมิของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ลึกจากผิวของสารเนื้อเทียม 1 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 5.23 ซึ่งรูป 5.23ก เป็นกรณีที่ไม่มีปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิด ได้พื้นที่ประสิทธิผลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่



ก)



ข)

รูปที่ 5.23 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 2 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ในสารเนื้อเทียม

ก) ไม่ปรับแอมพลิจูด

ข) ปรับแอมพลิจูด

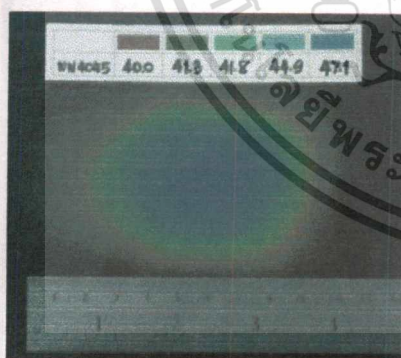
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 2.5 เซนติเมตร ถึง ประมาณ 8.5 เซนติเมตร ขนาดประมาณ 27 ตารางเซนติเมตร และรูป 5.23 ข เป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิด ได้พื้นที่ประสิทธิผลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ ประมาณ 1 เซนติเมตร ถึง ประมาณ 9 เซนติเมตร ขนาดประมาณ 36 ตารางเซนติเมตร

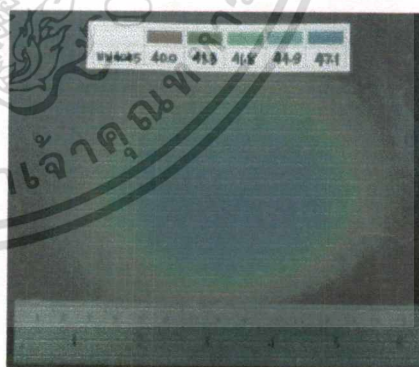
โครงสร้างของสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปิดด้านหลังด้วยโพรงบนระนาบกราวน์ลอยเหนือ สารเนื้อเทียม ที่แสดงดังรูปที่ 5.24 เป็นการทดลองปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดแหล่งกำเนิดโดยปรับกำลังงาน ของหลอดแมกนีตรอนเป็น 100 และ 130 วัตต์ โดยการปรับสลับไขว้ 2 ระดับ ระดับละ 5 วินาที ใช้เวลา ทดลองทั้งหมด 5 นาที สามารถแสดงรูปแบบการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากทำการทดลอง ได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.24 สายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง เนื้อสารเนื้อเทียม



ก)



ข)

รูปที่ 5.25 การกระจายอุณหภูมิเนื่องจากสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปิด หลังด้วยโพรง ในสารเนื้อเทียม

ก) ไม่ปรับแอมพลิจูด

ข) ปรับแอมพลิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการกระจายอุณหภูมิของสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากสายอากาศแบบร่อง 4 ร่อง ที่ปิดหลังด้วยโพรง ลึกจากผิวของสารเนื้อเทียม 1 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 5.25 ซึ่งรูป 5.25ก เป็นกรณีที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิด ได้พื้นที่ประสิทธิผลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 2.5 เซนติเมตร ถึง ประมาณ 9.5 เซนติเมตร ขนาดประมาณ 33 ตารางเซนติเมตร และรูป 5.25ข เป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิด ได้พื้นที่ประสิทธิผลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 3.5 เซนติเมตร ถึง ประมาณ 13 เซนติเมตร ขนาดประมาณ 50 ตารางเซนติเมตร

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศ ทั้งกรณีที่มีสายอากาศ 2 และ 4 ร่อง จะได้ขนาดพื้นที่ประสิทธิผลที่ใหญ่กว่า กรณีที่ไม่มีการปรับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แต่ขนาดของพื้นที่ประสิทธิผลที่ได้จากการทดลองจะใหญ่กว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากการปรับความต่างศักย์ที่ป้อนให้หลอดแมกนีตรอนเป็นระบบกลไก และกำลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดที่เป็นหลอดแมกนีตรอนไม่เป็นเชิงเส้น การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ให้กับหลอดแมกนีตรอนเพียงเล็กน้อย จะทำให้กำลังงานที่ได้เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นสาเหตุของความผิดพลาดนี้

5.8 สรุป

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง สามารถทำให้เกิดความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียได้ จากบทที่ผ่านมาได้พิจารณารูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ จากโครงสร้างที่ประกอบด้วยสายอากาศแบบร่อง ลอยเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งค่าสนามไฟฟ้านี้เองที่เป็นปัจจัยทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย เงื่อนไขของการพิจารณาเป็นกรณีที่ เมื่อเกิดความร้อนขึ้นภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียแล้วไม่เกิดไอน้ำ(มวลคงที่) ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อแปลงค่าของสนามไฟฟ้า ไปเป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกระทำได้โดย ใช้การวิเคราะห์แบบวิธีผลต่างสืบเนื่องกับสมการการส่งผ่านความร้อน สำหรับการปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า โดยการปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ หรือ แอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้สายอากาศแบบร่อง ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ร่อง เป็นผลให้พื้นที่ประสิทธิผลที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่า กรณีที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนใดๆ จากการทดลองที่กระทำเฉพาะกรณีการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด ซึ่งมีความยุ่งยากน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าผลในทางปฏิบัติมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แต่มีขนาดพื้นที่ประสิทธิผลได้ไม่เท่ากัน อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของหลอดแมกนีตรอนไม่เป็นเชิงเส้น และกลไกในการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดเกิดความผิดพลาดสะสม

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอผลของการศึกษากลไกการปรับอุณหภูมิของสายอากาศ ปลดออกเส้นแรงแท่งที่พจนีร่องแถวลำดับในตัวกลางที่มีการสูญเสีย อันสืบเนื่องมาจากต้องการนำไปใช้ในการรักษาระเบียงที่มีพื้นที่กว้างและอยู่ไม่ลึกจากผิว เริ่มต้นด้วยการตั้งปัญหาเพื่อพิจารณาโดยกำหนดสายอากาศแบบร่องอยู่บนระนาบกราวน์ที่มีขนาดอนันต์ ลอยอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่มีขนาดอนันต์เช่นกัน พิจารณาสนามไฟฟ้าที่เป็นสนามระยะใกล้โดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม เพื่อที่จะมีความสอดคล้องและสามารถนำไปใช้กับสมการพื้นฐานของแมกซ์เวลล์ได้ จากนั้นพิจารณากรณีที่เป็นเงื่อนไขขอบเขตของ 2 ตัวกลางที่ต่างชนิดกัน เพื่อหาค่าของสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สามารถคำนวณหาได้โดยใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่องในการวิเคราะห์สมการการส่งผ่านความร้อน การปรับเปลี่ยนตำแหน่งความแรงของสนามไฟฟ้า สามารถกระทำได้โดยการปรับเปลี่ยนเฟส ความถี่ หรือแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิด ซึ่งวิธีการปรับเปลี่ยนต่างๆสามารถทำให้ขนาดของความร้อนเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากจุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศได้ เป็นผลให้พื้นที่ประสิทธิผลมีขนาดความกว้างเพิ่มมากขึ้น จากผลการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า การปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดสามารถทำได้พื้นที่ประสิทธิผลมากกว่าวิธีอื่น และมีความซับซ้อนยุ่งยากน้อยที่สุด ดังนั้นจึงนำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการทดลองพิสูจน์ ซึ่งจากผลของการคำนวณทางทฤษฎีและผลจากการทดลองเปรียบเทียบมีความสอดคล้องกัน นั่นคือ การปรับเปลี่ยนแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับสายอากาศจะได้พื้นที่ประสิทธิผลที่มีขนาดความกว้างที่มากกว่ากรณีที่ไม่ได้ปรับเปลี่ยนใดๆ

6.2 วิจารณ์การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลอง

ขั้นตอนในการกำหนดปัญหาเริ่มต้นในการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎี ยังไม่ตรงกับความเป็นจริง เช่น การกำหนดรูปแบบการกระจายของสนามที่ปากสายอากาศแบบร่องเป็นรูปแบบโคไซน์ กำหนดว่าปากสายอากาศแบบร่องมีขนาดความยาวเพียงอย่างเดียว กำหนดว่าระนาบกราวน์และตัวกลางที่มีการสูญเสียมีขนาดใหญ่มากอนันต์ และกำหนดว่าตัวกลางที่มีการสูญเสียเป็นตัวกลางชนิดเดียว ซึ่งจากการทดลอง สายอากาศแบบร่องนั้นมีความกว้าง ขนาดของระนาบกราวน์และตัวกลางที่มีการสูญเสียมีขนาดที่จำกัด ในส่วนนี้เป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลในทางทฤษฎีและผลในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 แนวทางการพัฒนา

การพัฒนารูปแบบการแก้ปัญหาให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงนั้น ปัญหาที่พิจารณาจะมีความซับซ้อนยุ่งยากในการแก้ปัญหามากขึ้น การตั้งสมมติฐานเพื่อแก้ปัญหาทางทฤษฎีนั้นควรเริ่มต้นด้วยการพิจารณาสายอากาศแบบร่องที่มีขนาดความกว้างและยาว ลักษณะรูปแบบการกระจายของสนามที่ปากของสายอากาศที่อยู่บนระนาบกราวนที่มีขนาดจำกัด เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่ขนาดจำกัด ในกรณีของการพิจารณาสายอากาศที่เป็นร่องแถวลำดับ ค่าการเชื่อมต่อร่วม (mutual coupling) ระหว่างสายอากาศ มีส่วนสำคัญซึ่งมีผลต่อความถูกต้องของคำตอบในการวิเคราะห์ปัญหา สำหรับตัวกลางที่มีการสูญเสียควรมีการคิดชั้นของผิวหนัง ชั้นของไขมัน ชั้นกล้ามเนื้อ ตลอดจนเส้นเลือด และกระดูก ซึ่งองค์ประกอบต่างๆเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของบริเวณที่เป็นเซลล์ปกติและเซลล์มะเร็งทั้งสิ้น ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นแนวทางสำหรับการแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆของทางทฤษฎีและปรับปรุงรูปแบบวิธีการในการรักษา เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการรักษามะเร็งร้ายที่สร้างความทุกข์ต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาลี กนิษฐชาติ. “ความรู้ทางฟิสิกส์เบื้องต้นที่เกี่ยวกับ Hyperthermia” มะเร็งวิทยวัฒน์. ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, ตุลาคม 2537, : 10-14.
- [2] Metaxas A.C. and Meredith R.J., **Industrial Microwave Heating**. London : Peter Peregrinus Ltd., 1983.
- [3] Krairiksh M., Wakabayashi T., and Kiranon W., “A Spherical Slot Array Applicator for Medical Applications,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, no. 1, Jan. 1995, pp. 78-86.
- [4] Stauffer P.R., Diederich C.J. and Bozzo D., “Conformal array microwave applicator for superficial hyperthermia of large contoured surfaces,” 1994 *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol.1, pp.531-534., 1994.
- [5] Boesch R.D., et.al., “Phase Shifter for a 915 MHz Phased Array Hyperthermia System,” *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol. 34, pp. 904-906, November 1987.
- [6] อาฉิติ เหมือนชู และ โมไนย ไกรฤกษ์, “การศึกษากลไกการปรับจูดความร้อนของสายอากาศป้อนคลื่นแบบร่องแถวลำดับ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22, ม. เกษตรศาสตร์, ธันวาคม 2542, หน้า 99-102.
- [7] Scott C., **The Spectral Domain Method in Electromagnetics.** : Artech House Inc., 1989.
- [8] Constantine A. Balanis, **Antenna Theory Analysis and Design.** : John Wiley & Sons, 1997.
- [9] Krairiksh M., Thongsopa C. and Mearnchu A., “A Steerable Active Applicator,” *Proceedings of the 1998 Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, Japan*, vol. 2, pp. 861-864, Dec. 1998.
- [10] Constantine A. Balanis, **Advance Engineering Eletromagnetics.** : John Wiley & Sons, 1989.
- [11] Torres F. and Jecko B., “Complete FDTD Analysis of Microwave Heating Processes in Frequency-Dependent and Temperature-Dependent Media,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, No. 1, pp. 108-116, January 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Ma L., Pual D., Potheary N., Railton C., Bows J., Barratt L., Mullin J. and Simons D., "Experimental validation of a combined electromagnetic and thermal FDTD model of a microwave heating process," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, pp. 2565-2572, Nov. 1995.
- [13] Matthew N.O. Sadiku, **Numerical Techniques in Electromagnetics.** : CRC Press, 1992.
- [14] M. Necati Ozisik, **Heat Transfer.** : McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [15] Guy A.W., Lehmann J.F. and Stonebridge J.B., "Therapeutic Applications of Electromagnetic Power," Proceedings of the IEEE, vol. 62, No.1, January 1974.
- [16] Krairiksh M., Thongsopa C., Srimoon D. and Mearnchu A., "Analysis of steerable active slot array applicator," Proceedings of the 1999 Asia-Pacific Microwave Conference, Singapore, vol.2, pp.489-492, Dec. 1999.
- [17] E. Kettlewell, **The Magnetron Oscillator.** : Mills & Boon Limited, 1971.
- [18] สุรพล สุธีระเวชช์, คู่มือเข้าใจและซ่อมเตาไมโครเวฟ. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์อาร์ตเอจกราฟฟิค. 2541.
- [19] มนตรี ธนภักดิ์, "การพัฒนาระบบให้ความร้อน สำหรับการรักษาโรคมะเร็ง โดยใช้คลื่นไมโครเวฟควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเนื้อเทียม (Agar Phantom)

ส่วนประกอบ ขนาด 1 ลิตร ประกอบด้วย

1.	น้ำกลั่น	956.6	ซีซี
2.	ผงวุ้น (Agar powder)	40	กรัม
3.	NaCl	2.4	กรัม
4.	NaN ₃	1	กรัม

ขั้นตอนในการทำ

1. ต้มน้ำกลั่นให้มีอุณหภูมิ $70-80^{\circ}C$ แล้วเติม NaCl คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $70-80^{\circ}C$
2. เติม NaN₃ ลงไป คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้คงที่
3. ค่อยๆเติมผงวุ้นลงไปทีละน้อย คนให้ทั่วอย่าให้เกิดฟองอากาศ ระวังอย่าให้จับเป็นก้อน คนให้ละลายตลอดเวลา
4. เติมน้ำกลั่นลงไปให้สารละลายมีปริมาตรครบ 1 ลิตร เพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง $95^{\circ}C$
5. ทำความสะอาดภาชนะที่จะใส่ด้วยน้ำกลั่น เทสารละลายที่เตรียมไว้ลงในภาชนะ เก็บไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาใช้งานได้

ประวัติผู้เขียน

นาย อาฉติ เหมือนชู เกิดเมื่อวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปี พ.ศ. 2540

บทความที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์

1. อาฉติ เหมือนชู และ โมไนย ไกรฤกษ์, “การศึกษากลไกการปรับจุดความร้อนของสายอากาศป้อนคลื่นแบบร่องแฉวลำดับ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22, ม.เกษตรศาสตร์ หน้า 99-102, ธันวาคม 2542
2. M. Krairiksh, C. Thongsopa and A. Mearnchu, “A Steerable Active Applicator,” *Proceedings of the 1998 Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 861-864, Yokohama, Japan, 1998.
3. M. Krairiksh, C. Thongsopa, D. Srimoon and A. Mearnchu, “Analysis of Steerable Active Slot Applicator,” *Proc. the 1999 Asia Pacific Microwave Conference*, Singapore, vol. 2, pp. 489-492, Dec. 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้