

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสายอากาศปล่องคลื่นแบบแถวลำดับร่องที่สามารถ
ปรับจุดให้ความร้อนได้ด้วยเทคนิคอินเจกชันล็อกกิ้ง

**STUDY ON HOTSPOT STEERING ACTIVE SLOT ARRAY APPLICATOR
BY INJECTION LOCKING TECHNIQUE**



ชาญชัย ทองโสภะ

CHANCHAI THONGSOPA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 64122
วัน,เดือน,ปี..... - 4 ก.ย. 2549

b. 11 641344
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-083-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON HOTSPOT STEERING ACTIVE SLOT ARRAY APPLICATOR
BY INJECTION LOCKING TECHNIQUE**



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

2002

ISBN 974-324-083-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสายอากาศปล่อยคลื่นแบบแถวลำดับรองที่สามารถปรับจุดให้ความร้อนได้ด้วยเทคนิคอินเจกชันลึอกึ่ง
นักศึกษา	นายชาญชัย ทองโสภา
รหัสประจำตัว	40060204
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอสายอากาศปล่อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟที่สามารถปรับตำแหน่งจุดความร้อนได้ โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของการป้อนส่วนประกอบของแถวลำดับ ให้ได้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้างเพื่อนำไปประยุกต์ในการรักษามะเร็งด้วยความร้อน (Microwave Hyperthermia) การเปลี่ยนแปลงขนาดของการป้อนแถวลำดับ มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน ทำให้สามารถลดขนาดโครงสร้างของเครื่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟให้มีขนาดเล็กกระทัดรัด สำหรับสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในศูนย์กลางที่มีการสูญเสีย นั้น กระทำการวิเคราะห์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) อันจะทำให้สามารถหาการกระจายอุณหภูมิ ณ บริเวณจุดความร้อนบนเซลล์มะเร็งได้ และนำไปสู่การออกแบบ สร้างระบบที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำต่อไป

Thesis Title Study on Hotspot Steering Active Slot Array Applicator
by Injection Locking Technique

Student Mr.Chanchai Thongsopa

Student ID. 40060204

Degree Doctor of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2002

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis proposes a hotspot steering active array applicator which is supposed to provide a wide uniform temperature distribution region. The application of interest is a microwave hyperthermia cancer therapy. The hotspot steering can be simply achieved by varying amplitude excitation in the array. This results in a rugged applicator. The near-field electric field distribution can be analyzed by using the Finite Difference Time Domain (FDTD) method. Then, the temperature distribution in the cancer cell can be investigated. The results from this investigation will be applied in the design of a cost effective and efficient hyperthermia system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ และ รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ รศ.ชัยวัฒน์ ชัยกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้โอกาสที่ดีในการทำงานตลอดมา จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สมพล โกศลวิตร ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบสายอากาศและทำการทดลอง

ขอขอบคุณ ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่คอยให้คำปรึกษาในทุกเรื่อง เสมือนเป็นที่เลี้ยงเป็นต้นแบบที่ดี

ขอขอบคุณ อ.รังสรรค์ วงศ์สรรค์และดร.คมศักดิ์ เมฆสมุทร ที่ให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิค

ขอขอบคุณ คุณดวงอาทิตย์ ศรีมูล ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษา ให้ข้อมูล และให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม FD-TD ตลอดจนเป็นกำลังสำคัญในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จด้วยดี คุณอาณัติ เหมือนชู ที่ร่วมกันทำการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จได้ คุณอภิชาติ อินทรพาณิชย์ น้องที่คอยเป็นกำลังใจ เป็นคู่คิด และเป็นผู้จุดประกายให้เกิดแนวคิดในเรื่องการศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกให้แก่ข้าพเจ้า และ คุณไพศาล งามจรรยาภรณ์ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในทุกเรื่อง..

ขอขอบคุณ มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ไทยประเทศไทย (Thailand Toray Science Foundation) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณน้องๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจที่ดี เป็นผู้ช่วยและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องเมื่อขอความร่วมมือ หรือขอความช่วยเหลือใดๆ ตลอดจนช่วยกันสร้างสีสันและบรรยากาศที่ดีในการเรียนตลอดมา

และสุดท้าย ต้องขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณมาลีรัตน์ ทองโสภา ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ตลอดจนเป็นผู้ช่วยดูแลเลี้ยงดูบุตรชายทั้ง 2 คน เด็กชายณัฐคนย์ ทองโสภา และเด็กชายชนม์คนัย ทองโสภา ได้เป็นอย่างดี ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าไม่เป็นกังวลและมีเวลาเต็มที่ในการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ชาญชัย ทองโสภา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 หลักการของสายอากาศแบบแอกทีฟ.....	7
2.1 การวิเคราะห์สายอากาศแบบแอกทีฟ.....	7
2.2 สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของการป้อนสายอากาศปล่อยคลื่นแบบแอกทีฟ.....	15
2.2.1 ลักษณะการมอดูเลตเชิงขนาดด้วยคลื่นรูปไซน์.....	15
2.2.2 ลักษณะการมอดูเลตด้วยคลื่นรูปฟันเลื่อย.....	16
2.3 สรุป.....	17
บทที่ 3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศปล่อยคลื่นแบบแอกทีฟโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา.....	18
3.1 รูปแบบของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขต.....	18
3.2 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา.....	19
3.2.1 รูปแบบของผลต่างสี่เหลี่ยม.....	19
3.2.2 สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา.....	23
3.3 เงื่อนไขขอบเขตการคูณ.....	27
3.4 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วม.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5 ผลการคำนวณ.....	36
3.6 การกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้.....	40
3.6.1 รูปแบบการจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้แบบเชิงเส้น.....	40
3.6.2 รูปแบบจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้แบบระนาบ.....	43
3.7 สรุป.....	46

บทที่ 4 การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนในตัวกลางที่มีความสูญเสียที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของ

สายอากาศปลัวยคลื่นแบบแถวลำดับร่อง.....	48
4.1 สมการการส่งผ่านความร้อน.....	48
4.2 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อน.....	57
4.2.1 สายอากาศปลัวยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบเชิงเส้น.....	57
4.2.2 สายอากาศปลัวยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบระนาบ.....	64
4.3 สรุป.....	66

บทที่ 5 ผลการทดลอง.....

5.1 รูปแบบของปัญหาและการสร้างสายอากาศปลัวยคลื่น.....	68
5.2 การทดลองวัดการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศปลัวยคลื่นแบบแถวลำดับ แอกทีฟ.....	72
5.3 สรุป.....	80

บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์.....

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	82
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	84

บรรณานุกรม.....85

ภาคผนวก.....89

ประวัติผู้เขียน.....91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

5.1 แสดงขนาดพื้นที่การกระจายอนุหภูมิที่ ระยะห่าง s_1 และ s_2 ต่างๆกัน เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลต เมื่อเฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณที่ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 เท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ (ω_s) เท่ากับ 100 Hz.....77



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สายอากาศแบบแอกทิฟเมื่อถูกกระตุ้นสัญญาณและวงจรสมมูล.....	7
2.2 วงจรสมมูลสายอากาศแบบแอกทิฟเมื่อถูกกระตุ้นสัญญาณ.....	8
2.3 สัญญาณเอาต์พุตที่มอดูเลตด้วยคลื่นรูปไซน์.....	15
2.4 สัญญาณเอาต์พุตที่มอดูเลตด้วยคลื่นรูปฟันเลื่อย.....	16
3.1 เงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์ขนาดส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่อง.....	18
3.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรงที่ใช้สำหรับการคำนวณ.....	19
3.3 การประมาณสำหรับ $f(x)$ ที่จุด P โดยใช้ผลต่างแบบสี่เหลี่ยมไปข้างหน้า ข้างหลัง และตรงกลาง ตามลำดับ.....	20
3.4 ความผิดพลาดในฟังก์ชันของขนาดกริดเซลล์.....	22
3.5 โครงสร้างส่วนประกอบสนามในหน่วยเซลล์ของ Yee.....	24
3.6 ช่วงเวลาตามแอสซิมเมตริกของ Yee.....	25
3.7 เทคนิคของเงื่อนไขขอบเขตคูลกิ้นแบบขั้นที่เข้ากันอย่างสมบูรณ์.....	28
3.8 แสดงมุมบนขวาของกริดผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาในตัวกลาง PML.....	29
3.9 การจำลองสายอากาศโมโนโพลแบบช่องว่างเคลด้า.....	34
3.10 การจำลองสายอากาศแบบโมโนโพลอย่างง่ายตามกฎของแอมแปร์.....	35
3.11 การกำหนดขนาดของเงื่อนไขขอบเขตการคูลกิ้น.....	36
3.12 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์.....	37
3.13 ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	38
3.14 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	38
3.15 ขนาดของส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	39
3.16 ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	39
3.17 รูปแบบจำลองสายอากาศแอกทิฟแบบเชิงเส้น.....	40
(ก) ลักษณะการจัดวางของสายอากาศแบบร่องแถวลำดับแบบแอกทิฟเชิงเส้น.....	40
(ข) รูปแบบของสัญญาณ.....	40
3.18 สนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบของการจัดวางแบบเชิงเส้น.....	41
(ก) เมื่อเวลาผ่านไป $1/4$ วินาที.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) เมื่อเวลาผ่านไป 1/2 วินาที.....	42
(ค) เมื่อเวลาผ่านไป 3/4 วินาที.....	42
(ง) เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที.....	42
3.19 รูปแบบจำลองสายอากาศแอกทีฟแบบระนาบ.....	43
(ก) ลักษณะการจัดวางของสายอากาศแบบร่องแถวลำดับแบบแอกทีฟแบบระนาบ.....	43
(ข) รูปแบบของสัญญาณ.....	43
3.20 สนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงในรูปของการจัดวางแบบระนาบ.....	44
(ก) เมื่อเวลาผ่านไป 1/4 วินาที.....	44
(ข) เมื่อเวลาผ่านไป 1/2 วินาที.....	44
(ค) เมื่อเวลาผ่านไป 3/4 วินาที.....	45
(ง) เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที.....	45
4.1 การกำหนดจุดบนก้อนวัตถุตามวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	50
(ก) ตำแหน่งบนก้อนวัตถุ.....	50
(ข) ความสัมพันธ์ของตำแหน่ง.....	50
4.2 สายอากาศปล่องคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบเชิงเส้น.....	58
4.3 การกระจายอุณหภูมิเมื่อดัชนีการมอดูเลตแตกต่างกัน ที่เวลาการปล่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 นาที่	59
(ก) ระยะห่างระหว่างร่อง 1 เซนติเมตร.....	59
(ข) ระยะห่างระหว่างร่อง 2 เซนติเมตร.....	59
(ค) ระยะห่างระหว่างร่อง 3 เซนติเมตร.....	59
(ง) รูปแบบของสัญญาณมอดูเลต.....	60
4.4 พื้นที่การกระจายอุณหภูมิเมื่อมีการมอดูเลตด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน	61
(ก) $\omega_r = 10 \text{ Hz}$	61
(ข) $\omega_r = 100 \text{ Hz}$	61
(ค) $\omega_r = 1 \text{ kHz}$	62
(ง) รูปแบบของสัญญาณมอดูเลต.....	62
4.5 พื้นที่การกระจายอุณหภูมิเมื่อเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตไม่เท่ากัน และรูปแบบของสัญญาณมอดูเลต.....	63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ก) $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 เท่ากับ 0 องศา.....	63
(ข) $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 มีค่าเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ.....	63
4.6 รูปแบบการจัดวางสายอากาศแบบร่องแบบระนาบ.....	64
(ก) แบบสี่เหลี่ยมด้านขนาน.....	64
(ข) แบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน.....	64
4.7 พื้นที่การกระจายอนุหภูมิเมื่อมีการจัดวางสายอากาศแบบร่องที่แตกต่างกัน.....	65
(ก) แบบสี่เหลี่ยมด้านขนาน.....	65
(ข) แบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน.....	65
4.8 พื้นที่การกระจายอนุหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต ที่ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 มีค่าเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ.....	66
5.1 ขนาดส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่อง.....	69
5.2 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมจากการวิเคราะห์ด้วย วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา กับการวัดของสายอากาศแบบร่องที่วางอยู่เหนือตัวกลางที่ มีการสูญเสีย.....	69
(ก) ค่าของการสูญเสียย้อนกลับ.....	69
(ข) ค่าของการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วม.....	70
(ค) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วมที่ระยะต่าง ๆ.....	70
5.3 วงจรควบคุมการกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	71
5.4 รูปถ่ายเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง.....	72
(ก) รูปด้านหน้า.....	72
(ข) รูปด้านหลัง.....	72
5.5 กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่จ่ายออกจากสายอากาศแบบร่องโดยการเปลี่ยนแปลง แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดแมกนีตรอน.....	73
5.6 ระบบการทดลองสายอากาศปล่อยคลื่นแบบระนาบ 4 ชุด.....	74
(ก) ภาพวาดระบบการทดลอง.....	74
(ข) รูปถ่ายสายอากาศปล่อยคลื่น 4 ชุด.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7	
ขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ค่าของดัชนีการมอดูเลตที่ 0, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับ 100 Hz.....	75
(ก) เฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณที่สายอากาศแบบร่องทั้งหมดเท่ากับ 0 องศา.....	75
(ข) เฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณต่างกันที่สายอากาศแบบร่องตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 เท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ.....	76
5.8	
รูปแบบของสัญญาณความถี่รูปคลื่น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม โดยกำหนดให้ความกว้างของสัญญาณภาพ(Video bandwidth) 10 kHz เวลาในการกวาด (sweep time) 10 s สเกลตามแนวตั้ง 10 dB/ช่อง สเกลตามแนวนอน 10 MHz/ช่อง.....	78
(ก) เมื่ออยู่ในเงื่อนไขของการอินเจกชันล๊อค.....	78
(ข) ไม่อยู่ในเงื่อนไขของการอินเจกชันล๊อค.....	78
5.9	
พื้นที่การกระจายอุณหภูมิเมื่อดัชนีการมอดูเลตในแต่ละสายอากาศแบบร่องไม่เท่ากัน โดยที่เฟสเริ่มต้นเท่ากันที่ 0 องศา ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณที่ 100 Hz.....	80
(ก) ดัชนีการมอดูเลตที่สายอากาศแบบร่อง 2 และ 4 เท่ากับ 100 % ที่ 1 และ 3 เท่ากับ 0%....	80
(ข) ที่สายอากาศแบบร่อง 1 เท่ากับ 100% ที่ 2 และ 4 เท่ากับ 50% และร่อง ที่ 3 เท่ากับ 0%.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

สายอากาศแบบแอคทีฟ (active antenna) คือตัวสายอากาศหรือส่วนที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ ซึ่งสายอากาศแบบแอคทีฟนี้ได้รับการพัฒนาจนเป็นที่ยอมรับและใช้งานโดยทั่วไป โดยเฉพาะในสาขาโทรคมนาคม [1] ไม่ว่าจะเป็นในเชิงพาณิชย์หรือทางการทหารโดยที่การใช้งานจะอยู่ในย่านความถี่สูง เช่น ความถี่ย่านไมโครเวฟ และในย่านความถี่มิลลิเมตร ซึ่งงานที่เกี่ยวกับสายอากาศแบบแอคทีฟที่สำคัญได้แก่ อุปกรณ์รวมกำลัง (power combiner) เนื่องจากสายอากาศแบบแอคทีฟนิยมออกแบบที่ความถี่สูงและให้กำลังงานที่แพร่กระจายออกมามาก ดังนั้นเมื่อต้องการรวมกำลังให้สูงขึ้น จึงนิยมนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ (array) และอุปกรณ์แอคทีฟที่นิยมนำมาออกแบบในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ได้แก่ เฟต (FET) ไดโอดกันน์ (gunn diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) ตัวอย่างของอุปกรณ์รวมกำลังอย่างเช่น [2]–[4] เป็นลักษณะของสายอากาศแบบแอคทีฟที่มีส่วนการแพร่กระจายคลื่นเป็นแพตช์ (patch) สี่เหลี่ยมหรือวงกลมบนแผ่นวัสดุฐานรอง (PCB) โดยมีอุปกรณ์แอคทีฟเป็นเฟต การออกแบบวงจรจะออกแบบในแต่ละชุดของสายอากาศแบบแอคทีฟแยกกันอย่างอิสระ แล้วนำมาจัดรวมกันเป็นลักษณะแถวลำดับและอาจจะมีส่วนของวงจรเชื่อมต่อ (network) ร่วมกันระหว่างชุดสายอากาศแบบแอคทีฟในแต่ละชุดหรือไม่ก็ได้ [2] ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 6 GHz จำนวนสายอากาศแบบแอคทีฟ 16 ชุดเป็นแบบแพตช์สี่เหลี่ยมแยกกันอย่างอิสระ ไม่มีวงจรเชื่อมต่อ (spatial combiner) ให้กำลังงานรวม 10 วัตต์ [3] เป็นแบบสายอากาศแบบแอคทีฟแพตช์สี่เหลี่ยมทำงานที่ความถี่ 6 GHz จำนวน 16 ชุด มีส่วนของวงจรเชื่อมต่อระหว่างชุดของสายอากาศแบบแอคทีฟ และวงจรควบคุมการรวมกำลังด้วยการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอก [4] เป็นสายอากาศแบบแพตช์วงกลม ทำงานที่ความถี่ 4 GHz จำนวน 26 ชุด และมีส่วนของวงจรเชื่อมต่อในแต่ละชุดของสายอากาศแบบแอคทีฟให้กำลังงานรวม 20 วัตต์

ส่วนการปรับลำคลื่นหลัก (beam steering) ของสายอากาศแบบแอคทีฟแถวลำดับสามารถกระทำได้หลายวิธีดังเช่น โดยการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอก ในรูปของการกระตุ้นด้วยความถี่ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ส่วนตำแหน่งของการกระตุ้นและความถี่ที่กระตุ้นต่อสายอากาศแบบแอคทีฟ จะแตกต่างกันและให้ผลของการเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลักที่แตกต่างกันด้วย [5]–[6] เป็นลักษณะของสายอากาศแบบแอคทีฟแพตช์สี่เหลี่ยมวางเรียงกันเป็นแถวลำดับเชิงเส้น อุปกรณ์แอคทีฟคือ เฟต [5] ทำงานที่ความถี่ 10 GHz จำนวน 4 ชุด ทำการกระตุ้นด้วยความถี่ที่ตำแหน่งของสายอากาศแบบแอคทีฟชุดแรกและชุดสุดท้าย ด้วยย่านความถี่ที่ 9.5 GHz ทำให้เกิด

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลัก ตั้งแต่ -88 ถึง 66 องศา [6] ทำงานที่ความถี่ 6 GHz จำนวน 3 ชุด โดยแต่ละชุดสายอากาศแบบแอกทิฟที่มีการเชื่อมต่อถึงกันของสัญญาณเอาต์พุตผ่านวงจรขยายสัญญาณ (amplifier) โดยที่แต่ละชุดวางห่างกัน 0.7λ มีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกด้วยความถี่ที่ตำแหน่งของสายอากาศแบบแอกทิฟที่ชุดแรกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลัก $+6$ ถึง -22 องศา ส่วนการเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลักโดยวิธีการเลือกเปิด ปิดอุปกรณ์แอกทิฟ เนื่องจากอุปกรณ์แอกทิฟถูกออกแบบให้แยกออกจากกันอย่างอิสระในแต่ละชุดของสายอากาศอยู่แล้ว [7] เป็นการเปิด ปิดอุปกรณ์แอกทิฟซึ่งถูกควบคุมผ่านมาทางเส้นใยแก้วนำแสงผ่านมาที่ชุดวงจรเปิด ปิดอุปกรณ์แอกทิฟ เป็นลักษณะของสายอากาศแบบแอกทิฟแพทช์สี่เหลี่ยม ขนาด 2×2 ที่ความถี่ 6.6 GHz ระยะห่างของสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยม 0.7λ [8] เป็นลักษณะของสายอากาศแบบแอกทิฟแพทช์สี่เหลี่ยมร่วมกับสายอากาศแบบร่อง จำนวน 3 ชุด มีการเชื่อมต่อระหว่างชุดสายอากาศแบบแอกทิฟผ่านวงจรขยายสัญญาณ ทำงานที่ความถี่ 10 GHz เมื่อทำการเปิด ปิด อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ชุดเชื่อมต่อ จะทำให้มุมบีมหลักเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลักโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่ของอุปกรณ์แอกทิฟของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ล็อกกันไว้ (locking bandwidth) คือช่วงของความถี่ที่ไม่แตกต่างจากความถี่หลักมากนักซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลักได้ รวมทั้งอาจจะทำให้เกิดความถี่ขึ้นมาใหม่ซึ่งจะเป็นความถี่ที่อยู่ในช่วงความถี่ที่ล็อกกันไว้เช่นกัน และการเปลี่ยนแปลงความถี่นี้ขมกระทำโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์แอกทิฟของสายอากาศในแต่ละชุดที่แยกจากกันอย่างอิสระ [9] เป็นลักษณะของสายอากาศแบบแอกทิฟแพทช์วงกลม อุปกรณ์แอกทิฟคือไดโอดกันน์ ขนาด 2×2 ทำงานในช่วงย่านความถี่ 9 GHz มีการจัดวางสายอากาศเป็นแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลม ทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ในแต่ละชุดของสายอากาศแบบแอกทิฟที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลัก [10] เป็นลักษณะของสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมเดี่ยวที่สามารถปรับเปลี่ยนมุมบีมหลักได้โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่จุดป้อนของสัญญาณทั้งสองด้านของสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยม ทำงานที่ย่านความถี่ 2.5 GHz อุปกรณ์แอกทิฟคือ เฟด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมบีมหลักได้ $+18$ ถึง -18 องศา จากวิธีดังที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งอุปกรณ์การรวมกำลังและการปรับเปลี่ยนลำคลื่นหลักพบว่าขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศแบบแอกทิฟมีค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงและใช้งานส่วนมากจะอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าระยะไกล

สำหรับการงานใช้เกี่ยวกับสนามไฟฟ้าระยะไกล อย่างเช่นการให้ความร้อนแก่ตัวกลางที่มีการสูญเสีย เช่น เซลมะเร็งได้มีความพยายามพัฒนาสายอากาศปล่อยคลื่นเข้าไปสู่ตำแหน่งของเซลล์มะเร็งอย่างต่อเนื่องเสมอมา ทั้งแบบที่ต้องสอดใส่อุปกรณ์ปล่อยคลื่นเข้าร่างกาย (invasive applicators) และแบบที่ไม่ต้องสอดใส่เข้าไปในร่างกาย (non-invasive applicators) เพื่อการรักษา ซึ่งการให้ความร้อนแก่เซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิและในช่วงเวลาที่เหมาะสม ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีการเสริมที่ใช้ร่วมกับการฉายรังสีและเคมีบำบัด แล้วจะให้ผลของการรักษาที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคุณสมบัติของความร้อนมีผลกระทบต่อเซลล์มะเร็งมากกว่าเซลล์ปกติ ซึ่งในการบำบัดรักษาแต่ละครั้งจะให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 1.5 ถึง 2.5 องศาเซลเซียสต่อ นาที และจะให้คงที่ของอุณหภูมิ ที่ 41 ถึง 42 องศาเซลเซียสเป็นเวลานานประมาณ 1 ชั่วโมง โดยที่ ช่วงของสัญญาณความถี่ที่ใช้ จะมีอยู่หลายช่วงความถี่ อย่างเช่น 73 MHz 430 MHz 915 MHz 2,450 MHz และ 9,000 MHz ส่วนสายอากาศแบบที่ต้องสอดใส่อุปกรณ์ปล่อยคลื่นเข้าสู่ร่างกาย จะมุ่งเน้น ในการออกแบบสายอากาศที่ใช้กับพื้นที่ทำลายเซลล์มะเร็งขนาดเล็กเฉพาะจุด ตำแหน่งเป้าหมายส่วนใหญ่จะอยู่ลึกจากผิวหนัง ซึ่งการรักษาจะต้องทำการผ่าตัดใส่อุปกรณ์ปล่อยคลื่นเข้าไปในร่างกาย ซึ่งจะให้ผลที่ดีแต่คนไข้จะได้รับความเจ็บปวด ลักษณะของสายอากาศจะมีขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 3 มิลลิเมตร เป็นรูปแบบของสายอากาศนำคลื่นแกนร่วม (coaxial antenna) [11]-[12] ทำงานที่ความถี่ 915 MHz [13] เป็นสายอากาศนำคลื่นแกนร่วมเช่นเดียวกัน ทำงานที่ความถี่ 2,450 MHz ทำการทดลองหาพื้นที่การกระจายอุณหภูมิกับค้ำของหนูเปรียบเทียบกับ การคำนวณโดยใช้วิธี (finite difference time domain : FDTD) และแสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิต่อระยะห่างระหว่างสายอากาศ 2 ชุด กำหนดให้อินพุทของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 50 วัตต์ [14] เป็นลักษณะของสายอากาศแบบเส้นลวด (wire antenna) ขดกันเป็นรูปก้นหอย (spiral) อยู่ในกรอบแก้ว (balloon) ต่อร่วมกับสายโคแอกเซียล เพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่กระจาย อุณหภูมิกว้างขึ้น ทำงานที่ความถี่ 915 MHz และทำการทดลองเปรียบเทียบผลกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังงานที่ 50 วัตต์ 100 วัตต์ และ 150 วัตต์

สำหรับสายอากาศปล่อยคลื่นที่ไม่ต้องสอดใส่เข้าสู่ร่างกาย พื้นที่เป้าหมายอยู่ไม่ลึกจากผิวหนัง จึงไม่ต้องทำการผ่าตัดเพื่อใส่อุปกรณ์ปล่อยคลื่น ทำให้คนไข้ไม่เกิดความเจ็บปวด แต่จะประสบปัญหาเกี่ยวกับความยุ่งยากในการจัดให้คลื่นเข้าสู่ร่างกาย ที่จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเหมาะสมและทั่วถึงพื้นที่เป้าหมาย ซึ่งสายอากาศปล่อยคลื่นที่ไม่ต้องสอดใส่อุปกรณ์เข้าสู่ร่างกายที่ให้พื้นที่ ความร้อนที่เล็กเฉพาะจุดได้แก่ งานวิจัย [15] เป็นสายอากาศปล่อยคลื่นรูปทรงกลมแถวลำดับบนผิว ทรงกลมจะให้ความร้อนครอบคลุมพื้นที่เพียงบริเวณหนึ่ง ไม่สามารถปรับให้กว้างขึ้นได้ที่ความถี่ 2,450 MHz จะใช้ฉนวนนำความร้อนช่วยระบายความร้อน วางค้ำระหว่างสายอากาศปล่อยคลื่นกับผิว ของบริเวณที่ต้องการให้เกิดความร้อน [16] เป็นสายอากาศก้นหอยแบบไมโครสตริป (microstrip spiral) ที่ความถี่ 915 MHz นำมาเรียงลำดับให้ได้พื้นที่ความร้อนขนาดใหญ่ขึ้นรวมถึงแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างสายอากาศต่อพื้นที่การกระจายอุณหภูมิ มีอุปกรณ์ตรวจวัดขนาดของ อุณหภูมิ รวมถึงผลการทดลองในสถานพยาบาล (clinical test) โดยที่แต่ละชุดของสายอากาศมี ขนาดกำลังเท่ากับ 100 วัตต์ [17] เป็นลักษณะของสายอากาศปล่อยคลื่นสี่เหลี่ยมบนแผ่นระนาบ ทองแดง (dual concentric conductor : DCC) มีขนาดของพื้นที่ของสายอากาศ 2X2 เซนติเมตร น้ำหนักเบา จุดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่บริเวณมุมสี่เหลี่ยมของสายอากาศด้วยสายโคแอกเซียล มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบายความร้อนด้วยน้ำมัน (silicon oil) ที่ความถี่ 2,450 MHz ทำการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิด้วย FDTD

ส่วนของสายอากาศปล่อยคลื่นที่ใช้กับเป้าหมายขนาดใหญ่จะเป็นสายอากาศปล่อยคลื่นแถวลำดับ (array applicator) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งพื้นที่การกระจายอุณหภูมิ (hotspot) ให้ได้พื้นที่กว้างมากขึ้น จะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ส่วนประกอบของสายอากาศแถวลำดับซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากในทางปฏิบัติ [18] เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ส่วนประกอบของสายอากาศที่มีผลต่อการกระจายของอุณหภูมิโดยการวิเคราะห์ด้วย FDTD ในรูปของสายอากาศไดโพล (dipole antenna) ล้อมรอบตำแหน่งเซลล์เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 85 MHz และ 500 MHz ส่วนการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งพื้นที่การกระจายอุณหภูมิด้วยวิธีการใช้มอดูเลตเฟส (phase modulation) [19] เป็นลักษณะของสายอากาศไดโพล 4 ชุด วางเป็นมุมสี่เหลี่ยมมุมฉาก ระยะห่างกัน 2 เซนติเมตร ไดโพลยาว 6 เซนติเมตร ที่ความถี่ 433 MHz และ 915 MHz การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิกระทำโดย การกำหนดระยะเวลาในการมอดูเลตเฟสให้กับส่วนประกอบของสายอากาศในแต่ละชุด [20] คือลักษณะของสายอากาศนำคลื่นแกนร่วม 6 ชุด วางเป็นวงกลมระยะห่างระหว่างสายอากาศ 4 เซนติเมตร ที่ความถี่ 915 MHz กำหนดระยะเวลาในการมอดูเลตเฟสให้กับส่วนประกอบของสายอากาศในแต่ละชุดเช่นเดียวกัน และสุดท้ายการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและเฟสในเวลาเดียวกัน ที่ส่วนประกอบของสายอากาศแถวลำดับ [21]-[24] เป็นการวิเคราะห์หาพื้นที่การกระจายอุณหภูมิของรูปแบบสายอากาศปล่อยคลื่นในแบบต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและเฟสในเวลาเดียวกัน [21] เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบของระนาบตำแหน่งของสายอากาศขนาด 4X4 ที่ความถี่ 434 MHz และ 915 MHz ซึ่งสามารถกำหนดพื้นที่ให้ความร้อนได้ตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดและเฟส ในแต่ละตำแหน่งของระนาบสายอากาศ [23] เป็นสายอากาศรูปปากแตร (horn antenna) ที่ความถี่ 200 MHz จำนวน 4 ชุด วางเป็นวงกลมล้อมรอบตำแหน่งเซลล์เรโซแนนซ์ [24] เป็นลักษณะของสายอากาศท่อนำคลื่น (waveguide antenna) วางล้อมรอบเซลล์เรโซแนนซ์เช่นเดียวกันที่ความถี่ 70 MHz และ 433 MHz จากวิธีการเปลี่ยนแปลงเฟสให้กับส่วนประกอบของแต่ละสายอากาศจะมีวงจรเลื่อนเฟสซึ่งวงจรเลื่อนเฟสมีระบบควบคุมที่ยุงยากและซับซ้อนจะทำให้ระบบมีขนาดใหญ่และมีราคาแพง ส่วนวิธีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดมีข้อยุ่งยากตรงที่ต้องมีส่วนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ หรือส่วนของอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ (attenuator) และการลดทอนสัญญาณจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางขนาดโดยที่ไม่ให้เกิดความยุ่งยากหรือสูญเสียกำลังงาน [25] เป็นการศึกษาเปรียบเทียบถึงการเปลี่ยนแปลงทางขนาดเฟส และความถี่ในแต่ละส่วนประกอบของสายอากาศแบบแอคทีฟที่พร้อม 2 ชุด บนตัวกลางที่มีการสูญเสียที่ความถี่ 2,450 MHz ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางขนาดจะให้ผลของการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ที่กว้างเด่นชัด รวมไปถึงออกแบบทดลองการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสายอากาศ

การคำนวณการกระจายอุณหภูมิด้วย FDTD

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแอกทีฟร็อง 2 ชุด แสดงผลให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสูงสุดของสนามไฟฟ้าระยะไกล [26] เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงทางขนาดที่ส่วนประกอบของสายอากาศแบบแอกทีฟ ซึ่งให้ผลของพื้นที่การกระจายอณูภูมิที่กว้างน่าสนใจจึงทำการวิเคราะห์สายอากาศแบบแอกทีฟร็อง 4 ชุด วางแบบแถวลำดับเชิงเส้น มีการเปลี่ยนแปลงขนาดในแต่ละส่วนประกอบของสายอากาศแบบแอกทีฟในรูปของสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด (amplitude modulation) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การกระจายอณูภูมิตลอดจนระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบแอกทีฟร็อง ซึ่งแสดงผลให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การกระจายอณูภูมิที่น่าสนใจ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางขนาดที่ส่วนประกอบในแต่ละสายอากาศเป็นวิธีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การกระจายอณูภูมิที่เด่นชัดวิธีหนึ่ง ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาทำการเปลี่ยนแปลงทางขนาด โดยที่ไม่ให้เกิดความยุ่งยากเมื่อต้องการขยายสัญญาณและเกิดการสูญเสียกำลังงานเมื่อต้องการลดทอนสัญญาณ จึงวิเคราะห์ใช้สายอากาศแบบแอกทีฟ โดยวิธีการอินเจกชันล็คคของสัญญาณ ทำให้ขนาดของการกระตุ้นของสายอากาศแบบแอกทีฟเปลี่ยนแปลง เพื่อบังคับตำแหน่งของสนามไฟฟ้าให้เปลี่ยนที่ อันจะทำให้เพิ่มขนาดพื้นที่ใช้งานกว้างขึ้น และได้รวมเอาข้อดีของสายอากาศแบบแอกทีฟ โดยการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกและจะทำให้ไม่ต้องมีส่วนของวงจรรีโองกันการย้อนกลับของกำลังงานในแต่ละชุดของสายอากาศ (circulators) ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กกะทัดรัด ลดความซับซ้อนของระบบการทำงานของเครื่อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงการประยุกต์ใช้หลักการอินเจกชันล็คคที่มีการเชื่อมต่อกัน (Mutual Coupling) เพื่อควบคุมการปรับพื้นที่การกระจายอณูภูมิของสายอากาศปล่อยคลื่นร็องแถวลำดับแบบแอกทีฟได้แสดงความสัมพันธ์ของการควบคุมขนาดของสัญญาณแอกทีฟของสายอากาศแอกทีฟซึ่งพบว่ามีลักษณะเป็นสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด (Amplitude Modulation) และวิเคราะห์หาดัชนีการมอดูเลตของสัญญาณ (Modulation Index : m) ความถี่และเฟสเริ่มต้นขนาดของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Modulation frequency : $\omega_c + \alpha$) โดยรวมไปถึง รูปแบบการจัดวางสายอากาศ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร็อง ที่เหมาะสม ที่ทำให้ได้บริเวณความร้อนที่สม่ำเสมอและกว้างที่สุด ในตัวกลางที่มีการสูญเสียที่มีอากาศคั่นตรงกลาง สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศปล่อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟ ได้แก่สนามไฟฟ้าระยะไกลภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย กระทำโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงการกระจายอณูภูมิของสายอากาศปล่อยคลื่นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถวลำดับแอกทีฟ นอกจากนี้ยังทราบอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับ รวมทั้งค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ รวมถึงได้ออกแบบสร้างสายอากาศปล้อยคลื่นแถวลำดับที่ปรับตำแหน่งพื้นที่การกระจายอุณหภูมิโดยใช้แหล่งกำเนิดสี่ตัวป้อนสายอากาศแบบร่องสี่ตัวแยกกันอย่างอิสระ ทดสอบการกระจายอุณหภูมิ แล้วแสดงผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องกับทางทฤษฎี

1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งออกเป็น 6 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของงานวิจัย และกล่าวโดยภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์สายอากาศแบบแอกทีฟ ที่มีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและเฟส และแสดงสมการความสัมพันธ์ของรูปแบบสัญญาณภายนอกที่มีการกระตุ้นต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของการป้อนสายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟ รูปแบบของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขต โดยวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา การคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับ

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์สมการการส่งผ่านความร้อนในศูนย์กลางที่มีการสูญเสีย โดยวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา และแสดงผลการวิเคราะห์จากสมการการส่งผ่านความร้อนในศูนย์กลางที่มีการสูญเสียของสายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบเชิงเส้นและรูปแบบระนาบ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองวัดการกระจายอุณหภูมิจากรูปแบบของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขตตามการวิเคราะห์ที่กล่าวมาของสายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟ ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศปล้อยคลื่น

บทที่ 6 กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและผลจากการทดลอง ประเมินผลที่ได้ว่ามีความสอดคล้องกันอย่างไร กับรูปแบบของปัญหาที่กำหนดขึ้น มีข้อผิดพลาดอย่างไรซึ่งจะได้เป็นแนวทางสำหรับพัฒนาในอนาคต

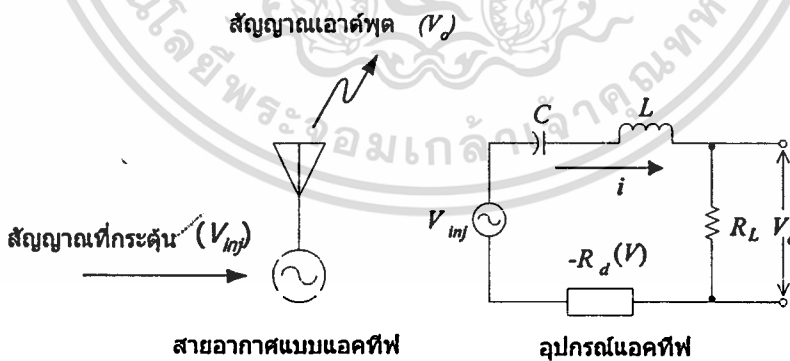
บทที่ 2

หลักการของสายอากาศแบบแอคทีฟ

สายอากาศแบบแอคทีฟ (Active Antenna) คือสายอากาศที่มีตัวกระจายคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของตัวกำเนิดสัญญาณ และเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกจะเป็นผลทำให้สัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศแบบแอคทีฟเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางขนาดและเฟส ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีในการวิเคราะห์สายอากาศแบบแอคทีฟ เมื่อมีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางขนาดและเฟสได้อย่างไร รวมไปถึงการวิเคราะห์แสดงความสัมพันธ์เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกด้วยขนาดและรูปแบบของสัญญาณชนิดต่างๆ แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสายอากาศแบบแอคทีฟ

2.1 การวิเคราะห์สายอากาศแบบแอคทีฟ

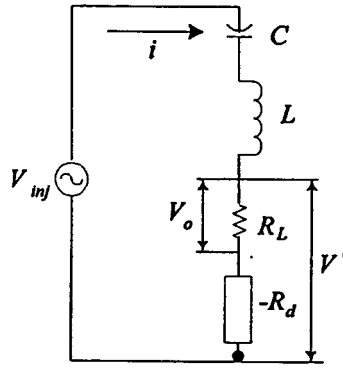
ในการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่มีอุปกรณ์แอคทีฟอยู่ในรูปของความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance) และประกอบไปด้วยวงจรรวมกลุ่ม (lumped circuit R,L,C) ต่อเป็นวงจรรีโซแนนซ์อนุกรม (Series Resonance) ให้ความต้านทานเชิงลบ $R_d(V)$ ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ใดๆ สำหรับสายอากาศแบบแอคทีฟที่ถูกกระตุ้น (Inject) สัญญาณและวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงสายอากาศแบบแอคทีฟเมื่อถูกกระตุ้นสัญญาณและวงจรสมมูล

เมื่อใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์เกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้า (Kirchhoff's Voltage Law) V_c คือแรงดันตกคร่อม C และ V_L คือแรงดันตกคร่อม L จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการ $V_{inj} = V_C + V_L + V'$
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลสายอากาศแบบแอกทีฟเมื่อถูกกระตุ้นสัญญาณ

ผลลัพธ์เมื่อแทนค่าแรงดันตกคร่อม C , L และ R จะเป็นดังสมการ

$$V_{inj} = \frac{1}{C} \int idt + L \frac{di}{dt} + i(R_L + (-R_d)) \quad (2.1)$$

เมื่อแทน $i = \frac{V_o}{R_L}$ ลงในสมการ (2.1) จะได้

$$V_{inj} = \frac{1}{C} \int \frac{V_o}{R_L} dt + L \frac{d}{dt} \frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o}{R_L} (R_L + (-R_d))$$

$$V_{inj} = \frac{1}{CR_L} \int V_o dt + \frac{L}{R_L} \frac{dV_o}{dt} + V_o \left(1 - \frac{R_d}{R_L}\right) \quad (2.2)$$

V_{inj} เป็นสัญญาณจากภายนอกที่กระตุ้นเป็นสัญญาณไซน์ชอยด์เข้าไปมีขนาดเท่ากับ $A_{inj}(t)$ และมีเฟสเท่ากับ θ_{inj} ($V_{inj} = A_{inj}(t)e^{j\theta_{inj}}$) V_o คือสัญญาณในรูปของจำนวนเชิงซ้อนของสัญญาณเอาต์พุต ต่อมาเมื่อแทนค่าสมการ (2.2) ให้อยู่ในรูปของตัวประกอบคุณภาพ (Q) กับความถี่รีโซแนนท์ของวงจร (ω_0) โดยคูณทั้งเศษและส่วนด้วย ω_0 ในสมการ (2.2) เฉพาะพจน์ที่ 1 และ 2 จะได้

$$V_{inj} = \frac{1}{CR_L} \frac{\omega_0}{\omega_0} \int V_o dt + \frac{L}{R_L} \frac{\omega_0}{\omega_0} \frac{dV_o}{dt} + V_o \left(1 - \frac{R_d}{R_L}\right) \quad (2.3)$$

จัดให้อยู่ในรูปของตัวประกอบคุณภาพ โดยที่ตัวประกอบคุณภาพของวงจรรีโซแนนท์อนุกรมมีค่า

$Q = \frac{\omega_0 L_0}{R_L} = \frac{1}{\omega_0 CR_L}$ สมการ (2.3) จะกลายเป็น การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{inj} = Q\omega_0 \int V_0 dt + \frac{Q}{\omega_0} \frac{dV_0}{dt} + V_0 \left(1 - \frac{R_d}{R_L}\right) \quad (2.4)$$

ถ้าคูณทุกพจน์ด้วย $\frac{\omega_0}{Q}$ ในสมการ (2.4) เพื่อที่จัดให้พจน์ในสมการอยู่ในรูปของ $\frac{dV_0}{dt}$ จะได้

$$\frac{\omega_0}{Q} V_{inj} = \frac{\omega_0}{Q} Q\omega_0 \int V_0 dt + \frac{\omega_0}{Q} \frac{Q}{\omega_0} \frac{dV_0}{dt} + \frac{\omega_0}{Q} V_0 \left(1 - \frac{R_d}{R_L}\right) \quad (2.5)$$

เราสามารถจัดสมการที่แสดงได้ง่ายเป็น

$$\frac{\omega_0}{Q} V_{inj} = \omega_0^2 \int V_0 dt + \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0 \omega_0}{Q} \left(1 - \frac{R_d}{R_L}\right) \quad (2.6)$$

สำหรับสัญญาณเอาต์พุต สามารถเขียนเป็นปริมาณเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$V_0 = A_0(t) e^{j(\omega_0(t) + \phi(t))} = A_0(t) e^{j\theta(t)} \quad (2.7)$$

$A_0(t)$ คือขนาดของสัญญาณเอาต์พุต และ θ คือเฟสของสัญญาณเอาต์พุต และ เมื่ออินทิเกรตบางส่วน (integration by part) สมการที่ (2.7) จากสูตรอินทิเกรตบางส่วน

$$\int UV dx = UV_1 - U'V_2 + U''V_2 - \dots$$

จาก $\int V_0 dt = \int A_0(t) e^{j\theta(t)} dt$ กำหนดให้ $U = A_0(t)$ และ $V = e^{j\omega_0(t)}$ การอินทิเกรตบางส่วนได้ผลลัพธ์เป็น

$$\int A_0(t) e^{j\omega_0(t)} dt = A_0(t) \frac{1}{j\omega_0} e^{j\omega_0(t)} + A_0'(t) \frac{1}{\omega_0^2} e^{j\omega_0(t)} + \dots \quad (2.8)$$

จัดสมการ (2.8) ให้อยู่ในรูปของ $\frac{dV_0}{dt}$ จาก $\frac{dV_0}{dt} = \frac{dA_0(t) e^{j\omega_0(t)}}{dt}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\frac{dV_0}{dt} = A_0(t) j\omega_0 e^{j\omega_0(t)} + e^{j\omega_0(t)} A_0'(t) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อบวกและลบด้วย $A_0(t)j\omega_0 e^{j\omega_0(t)}$ ในสมการ (2.8) จะได้

$$\int A_0(t)e^{j\theta(t)} dt = A_0(t)\frac{1}{j\omega_0}e^{j\omega_0(t)} + A_0'(t)\frac{1}{\omega_0^2}e^{j\omega_0(t)} + A_0(t)\frac{j\omega_0}{\omega_0^2}e^{j\omega_0(t)} - A_0(t)\frac{j\omega_0}{\omega_0^2}e^{j\omega_0(t)} \dots$$

ซึ่งหากเราจัดสมการให้อยู่ในรูปของ $\frac{dV_0}{dt}$ กล่าวคือ

$$\int A_0(t)e^{j\theta(t)} dt = A_0(t)\frac{1}{j\omega_0}e^{j\omega_0(t)} + \frac{1}{\omega_0^2}(A_0'(t)e^{j\omega_0(t)} + A_0(t)j\omega_0 e^{j\omega_0(t)}) - A_0(t)\frac{j\omega_0}{\omega_0^2}e^{j\omega_0(t)} \dots$$

จะได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$\begin{aligned} \int A_0(t)e^{j\theta(t)} dt &\approx \frac{1}{j\omega_0}V_0 + \frac{1}{\omega_0^2}\frac{dV_0}{dt} - j\frac{1}{\omega_0}V_0 \\ \int A_0(t)e^{j\theta(t)} dt &\approx \frac{-2j}{\omega_0}V_0 + \frac{1}{\omega_0^2}\frac{dV_0}{dt} \end{aligned} \quad (2.10)$$

จากสมการตัวกำเนิดสัญญาณของ van der Pol [27] โดยการสมมติของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างช้าๆ และจากความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับขนาดของสัญญาณเอาต์พุต

$$1 - \frac{R_d}{R_L} = -\kappa(\alpha_0^2 - A_0^2(t)) \quad (2.11)$$

โดยที่ α_0 คือขนาดสัญญาณของออสซิลเลเตอร์เมื่อเริ่มการออสซิลเลตและ κ คือฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของแต่ละวงจรรอออสซิลเลเตอร์ เมื่อแทนสมการ (2.10) และ (2.11) ในสมการ (2.6) จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุต ต่อเวลาเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{\omega_0}{Q}V_{inj} = \omega_0^2\left(\frac{-2jV_0}{\omega_0} + \frac{1}{\omega_0^2}\frac{dV_0}{dt}\right) + \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0\omega_0}{Q}(-\kappa(\alpha_0^2 - A_0^2(t)))$$

จัดสมการในรูปแบบอย่างง่ายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega_0}{Q} V_{inj} = -2jV_0\omega_0 + 2\frac{dV_0}{dt} - \frac{\kappa V_0\omega_0}{Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t))$$

$$\frac{dV_0}{dt} = V_0 \left(\frac{\kappa\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) + j\omega_0 \right) + \frac{\omega_0}{2Q} V_{inj} \quad (2.12)$$

เมื่อแทนสัญญาณเอาต์พุตในสมการ (2.7) แทนลงในสมการ (2.12) จะได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$\frac{dA_0(t)e^{j\theta(t)}}{dt} = A_0(t)e^{j\theta(t)} \left(\frac{\kappa\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) + j\omega_0 \right) + \frac{\omega_0}{2Q} V_{inj}$$

$$jA_0(t) \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{dA_0(t)}{dt} = A_0(t) \left(\frac{\kappa\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) + j\omega_0 \right) + \frac{\omega_0}{2Q e^{j\theta(t)}} V_{inj} \quad (2.13)$$

เมื่อแยกส่วนของส่วนจริง (Re) กับส่วนจินตภาพ (Im) สามารถเขียนสมการในเทอมของขนาดและเฟสได้ตามลำดับดังนี้

แยกส่วน สมการ (2.13) เฉพาะของส่วนจริง (Re) ได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = A_0(t) \left(\frac{\kappa\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) \right) + \frac{\omega_0}{2Q e^{j\theta(t)}} R_e(V_{inj})$$

ทำการคูณด้วย $A_0(t)e^{j\theta(t)}$ ทั้งเศษและส่วนในพจน์ที่สอง

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = A_0(t) \left(\frac{\kappa\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) \right) + \frac{\omega_0}{2Q} \frac{A_0(t)e^{j\theta(t)}}{e^{j\theta(t)} A_0(t)e^{j\theta(t)}} R_e(V_{inj})$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระตุ้นกับสัญญาณเอาต์พุต

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = \frac{A_0(t)\kappa\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) + \frac{\omega_0 A_0(t)}{2Q} R_e\left(\frac{V_{inj}}{V_0}\right) \quad (2.14)$$

แยกส่วน สมการ (2.13) เฉพาะของจินตภาพ (Im) ได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$jA_0(t)e^{j\theta(t)} \frac{d\theta(t)}{dt} = j\omega_0 A_0(t)e^{j\theta(t)} + \frac{\omega_0}{2Q} \text{Im}(V_{inj})$$

เมื่อคูณด้วย $jA_0(t)e^{j\theta(t)}$ ทั้งเศษและส่วนในพจน์ที่สอง

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{j\omega_0 A_0(t)e^{j\theta(t)}}{jA_0(t)e^{j\theta(t)}} + \frac{\omega_0 jA_0(t)e^{j\theta(t)}}{2QjA_0(t)e^{j\theta(t)}(jA_0(t)e^{j\theta(t)})} \text{Im}(V_{inj})$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระตุ้นกับสัญญาณเอาต์พุต

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q} \text{Im}\left(\frac{V_{inj}}{V_0}\right) \quad (2.15)$$

จากสัญญาณภายนอกที่กระตุ้น (V_{inj}) และ $V_{inj} = A_{inj}(t)e^{j(\omega_{inj}(t)+\phi_{inj})} = A_{inj}(t)e^{j\theta_{inj}(t)}$

และจากสมการ $e^{j\theta_{inj}} = \cos\theta_{inj} + j\sin\theta_{inj}$ ทำให้ได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$V_{inj} = A_{inj}(t)(\cos\theta_{inj} + j\sin\theta_{inj}) \quad (2.16ก)$$

และสัญญาณเอาต์พุต (V_0) และ $V_0 = A_0(t)e^{j(\omega_0(t)+\phi_0)} = A_0(t)e^{j\theta(t)}$

$$V_0 = A_0(t)(\cos\theta + j\sin\theta) \quad (2.16ข)$$

จากส่วนจริง (Re) สมการ (2.16ก) และ (2.16ข) แทนลงในสมการ (2.14) ได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = \frac{A_0(t)k\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) + \frac{\omega_0 A_0(t)}{2Q} \frac{A_{inj}(t) \cos\theta_{inj}}{A_0(t) \cos\theta}$$

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = \frac{A_0(t)k\omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) + \frac{\omega_0}{2Q} A_{inj}(t) \cos(\theta_{inj} - \theta) \quad (2.17)$$

จากส่วนจินตภาพ (Im) สมการ (2.16ก) และ (2.16ข) แทนลงในสมการ (2.15) ได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q} \frac{A_{inj}(t) j \sin \theta_{inj}}{A_0(t) j \sin \theta}$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q} \frac{A_{inj}(t)}{A_0(t)} (\sin(\theta_{inj} - \theta)) \quad (2.18)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสมการผลลัพท์เป็นสมการการเปลี่ยนแปลงทางขนาด และเฟส เมื่อมีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอก ดังความสัมพันธ์ ในสมการ (2.19ก) และ (2.19ข) ซึ่งเป็นสมการหลักของสายอากาศแบบแอดทีฟที่มีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอก

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = \frac{A_0(t) \kappa \omega_0}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) + \frac{\omega_0}{2Q} A_{inj}(t) (\cos(\theta - \theta_{inj})) \quad (2.19ก)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q} \frac{A_{inj}(t)}{A_0(t)} (\sin(\theta - \theta_{inj})) \quad (2.19ข)$$

ในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะทางขนาดของสัญญาณแอดทีฟ จากสมการ (2.19ก) และ (2.19ข) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความแตกต่างระหว่างเฟสของสัญญาณแอดทีฟ (θ) กับเฟสของสัญญาณกระตุ้น (θ_{inj}) ได้ดังสมการต่อไปนี้คือ

$$\cos(\theta - \theta_{inj}) = \left(\frac{dA_0(t)}{dt} - \frac{\kappa \omega_0 A_0(t)}{2Q} (\alpha_0^2 - A_0^2(t)) \right) \frac{2Q}{\omega_0 A_{inj}(t)} \quad (2.20ก)$$

$$\sin(\theta - \theta_{inj}) = \frac{(\omega_0 - \frac{d\theta(t)}{dt}) 2Q A_0(t)}{\omega_0 A_{inj}(t)} \quad (2.20ข)$$

เมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (Steady State) จะทำให้เกิดเงื่อนไขของการล็อก (Injection Locking) [28],[29] ขนาดของสัญญาณแอดทีฟที่เปลี่ยนแปลงจะเท่ากับขนาดของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ เมื่อเริ่มการออสซิลเลต ($A_0(t) = \alpha_0$) และการเปลี่ยนแปลงของเฟสต่อเวลาจะเท่ากับค่าที่กระตุ้น ($\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_{inj}$)

ดังนั้นหากแทน ($A_0(t) = \alpha_0$) และ ($\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_{inj}$) ลงในสมการ (2.20ก) และสมการ (2.20ข) ตามลำดับทำให้ได้สมการผลลัพท์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cos(\theta - \theta_{inj}) = \left(\frac{dA_0(t)}{dt} \right) \frac{2Q}{\omega_0 A_{inj}(t)} \quad (2.21ก)$$

และ

$$\sin(\theta - \theta_{inj}) = \frac{(\omega_0 - \omega_{inj}) 2QA_0(t)}{\omega_0 A_{inj}(t)} \quad (2.21ข)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเฟสของสัญญาณเอาต์พุตกับเฟสของสัญญาณกระตุ้นที่ว่า $\cos^2(\theta - \theta_{inj}) + \sin^2(\theta - \theta_{inj}) = 1$ ดังนั้นเมื่อจัดสมการ (2.21ก) และ (2.21ข) จะได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$\begin{aligned} \cos^2(\theta - \theta_{inj}) + \sin^2(\theta - \theta_{inj}) &= \left(\left(\frac{dA_0(t)}{dt} \right) \frac{2Q}{\omega_0 A_{inj}(t)} \right)^2 + \left(\frac{(\omega_0 - \omega_{inj}) 2QA_0(t)}{\omega_0 A_{inj}(t)} \right)^2 \\ &= 1 = \left(\left(\frac{dA_0(t)}{dt} \right) \frac{2Q}{\omega_0 A_{inj}(t)} \right)^2 + \left(\frac{(\omega_0 - \omega_{inj}) 2QA_0(t)}{\omega_0 A_{inj}(t)} \right)^2 \end{aligned}$$

หากทำการกระตุ้นด้วยสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับความถี่เอาต์พุต $\omega_{inj} = \omega_0$ แล้ว ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงตามสมการต่อไปนี้

$$1 = \left(\left(\frac{dA_0(t)}{dt} \right) \frac{2Q}{\omega_0 A_{inj}(t)} \right)^2$$

ซึ่งจะได้สมการผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเป็น

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = \frac{\omega_0 A_{inj}(t)}{2Q} \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.22) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะแปรผันตามขนาดของสัญญาณที่กระตุ้นเข้าไป การเปลี่ยนแปลงสัญญาณดังกล่าวสามารถพิจารณาได้เป็นลักษณะสัญญาณการมอดูเลตเชิงขนาดซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างแบ่งเป็นสองกรณีดังแสดงในหัวข้อ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของการป้อนสายอากาศปล่อยคลื่นแบบแอมพลิฟ

2.2.1 ลักษณะการมอดูเลตเชิงขนาดด้วยคลื่นรูปไซน์

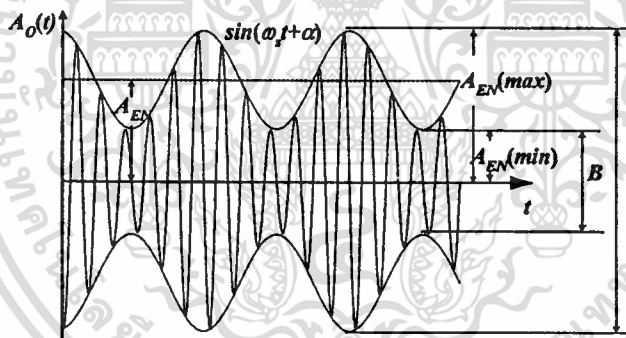
ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตสามารถหาได้จากสมการ

$$A_0(t) = A_{EN} + A_{EN}m \sin(\omega_s t + \alpha) \quad (2.23)$$

โดยที่

$$m = \frac{A_{EN}(\max) - A_{EN}(\min)}{A_{EN}(\max) + A_{EN}(\min)} = \frac{A - B}{A + B}$$

เมื่อ m คือ ดัชนีการมอดูเลต A_{EN} คือ ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าคงที่ ω_s และ α คือ ความถี่และเฟสของขอบสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่มอดูเลตด้วยคลื่นรูปไซน์

จะได้ขนาดสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังนี้คือ

$$\frac{dA_0(t)}{dt} = A_{EN}m\omega_s \cos(\omega_s t + \alpha) \quad (2.24)$$

จากความสัมพันธ์ของขนาดที่ถูกกระตุ้นตามสมการ (2.22) และขนาดสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาตามสมการ (2.24) ทำให้สามารถหาขนาดของสัญญาณที่กระตุ้นเข้าไป ได้ดังสมการต่อไปนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore A_{EN} m \omega_s \cos(\omega_s t + \alpha) = \frac{\omega_0 A_{inj}(t)}{2Q}$$

ดังนั้นจะได้สมการผลลัพธ์เป็น

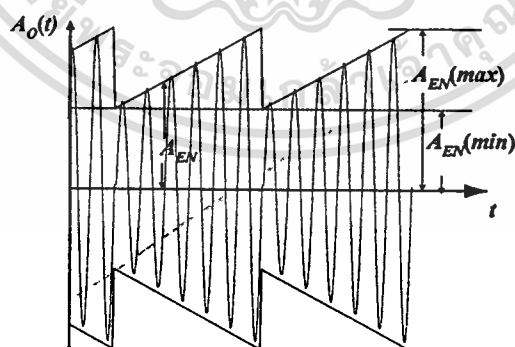
$$A_{inj}(t) = \frac{2Qm\omega_s A_{EN} \cos(\omega_s t + \alpha)}{\omega_0} \quad (2.25)$$

ซึ่งจากสมการข้างต้นทำให้สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตโดยการควบคุมดัชนีการมอดูเลต (m) ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดและเฟสสามารถควบคุมด้วยความถี่ของสัญญาณกระตุ้น ($\omega_s t + \alpha$) โดยกำหนดให้ A_{EN} มีค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสัญญาณ

2.2.2 ลักษณะการมอดูเลตด้วยคลื่นรูปฟันเลื่อย
ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตสามารถหาได้จากสมการ

$$A_o(t) = A_{EN} + \frac{A_{EN} m t}{T}, \quad 0 < t < T \quad (2.26)$$

เมื่อ t คือเวลาที่ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง T คือช่วงของคาบของเวลาที่สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงซ้ำ ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่มอดูเลตด้วยคลื่นรูปฟันเลื่อย

จะได้ขนาดสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังนี้คือ

$$\frac{dA_o(t)}{dt} = \frac{A_{EN} m}{T} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของสมการ (2.22) และขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาในสมการ (2.27) ทำให้สามารถหาขนาดของสัญญาณที่กระตุ้น เข้าไปได้ดังนี้

$$\frac{A_{EN} m}{T} = \frac{\omega_0 A_{inj}(t)}{2Q}$$

ดังนั้นจะได้สมการผลลัพธ์เป็น

$$A_{inj}(t) = \frac{2A_{EN} m Q}{T \omega_0} \quad (2.28)$$

จากสมการของสัญญาณเอาต์พุตในแบบต่าง ๆ ดังเช่นสมการ (2.23) และ (2.26) สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุต โดยการเปลี่ยนแปลงที่วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) วงจร ลดทอนสัญญาณ (Attenuator) หรือใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply) ที่วงจรออสซิลเลเตอร์ให้เป็นตามรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ

2.3 สรุป

จากการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศแบบแอกทีฟ เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสัญญาณจากภายนอกทำให้พบได้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางขนาดและเฟสขึ้นได้ในเวลาเดียวกัน ดังสมการ (2.19ก) และ (2.19ข) และเมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว และอยู่ในเงื่อนไขของการล็อก เฟสของสายอากาศแบบแอกทีฟที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะเท่ากับค่าที่กระตุ้นเข้าไป ดังนั้นถ้าระบบถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่เท่ากับค่าของสัญญาณออสซิลเลเตอร์แล้ว ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณที่กระตุ้นเข้าปอดังสมการ(2.22) นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสายอากาศแบบแอกทีฟจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสัญญาณที่ทำการกระตุ้น

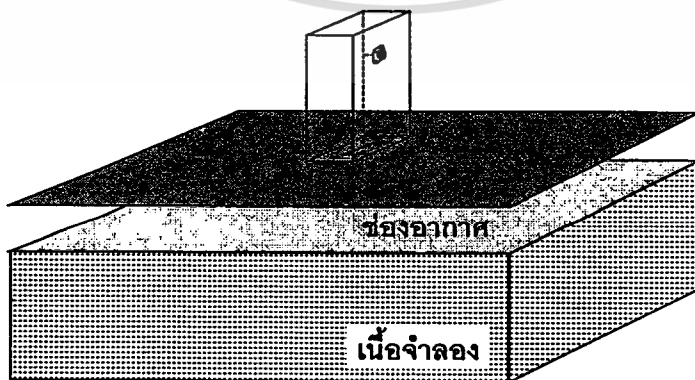
บทที่ 3

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศปล่องคลื่นแบบแถวลำดับ แอกทีฟโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศปล่องคลื่นเพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าระยะใกล้ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อกัน สามารถทำได้หลายวิธีได้แก่วิธีโมเมนต์ วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา ฯลฯ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลาในการวิเคราะห์เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาแทนวิธีการอื่นได้ในส่วนของการกำหนดความกว้างของปากช่อง หรือการกำหนดค่าสภาพยอมในตัวกลางที่กำหนดขึ้นให้เป็นชั้นของฉนวน ไขมัน หรือกัมมันเนื้อ ของก้อนเนื้อจำลองที่สมมุติขึ้น เป็นต้น และวิธีการนี้เป็นที่ยอมรับว่าให้คำตอบแม่นยำ ประกอบกับปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าไปเร็วมากทำให้ความเร็วของการประมวลผลเร็วกว่ายุคก่อนซึ่งเอื้ออำนวยกับวิธีการคำนวณเชิงเลขต่าง ๆ โดยเฉพาะวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลานี้เป็นอย่างดี

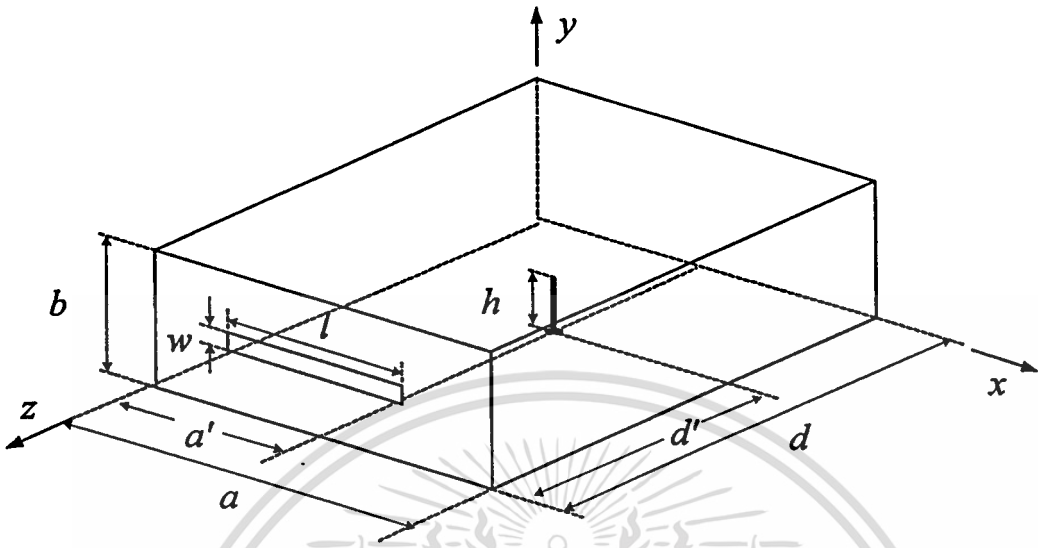
3.1 รูปแบบของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขต

เมื่อกำหนดรูปแบบของปัญหา ให้สายอากาศปล่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นลักษณะสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรง (cavity backed-slot applicator) มีสายอากาศแบบ โมโน โพลเป็นตัวปล่องคลื่นผ่านปากช่องสายอากาศอยู่บนแผ่นระนาบขนาดใหญ่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียมีช่องอากาศชั้นกลางแสดงดังรูปที่ 3.1 จะวิเคราะห์ออกแบบสายอากาศปล่องคลื่นนี้โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (FDTD)



รูปที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์ขนาดส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่องด้านการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นทุกสิ่งทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดขนาดของสายอากาศแบบร่องที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรงที่ใช้สำหรับการคำนวณ

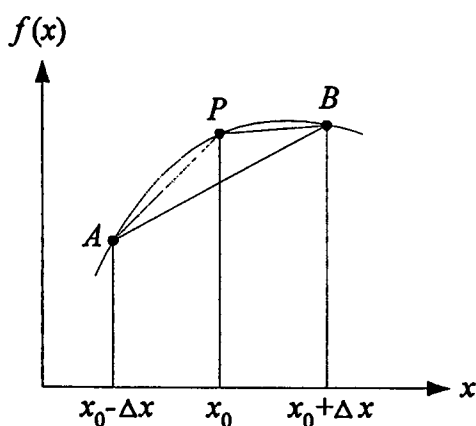
จากรูปที่ 3.2 คือโครงสร้างของสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรงที่ใช้สำหรับการคำนวณ เมื่อโครงสร้างมีความยาว a ในแกน x หน้า b ในแกน y และยาว d ในแกน z ตามลำดับ เจาะร่องกว้าง w ยาว l บนผนังของโพรงด้านหนึ่ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบ xy และสายอากาศโมโนโพลวางอยู่ภายในโพรง ณ พิกัดห่างจากปากร่องเป็นระยะ d' ตามแกน z และห่างจากผนังด้านแกน x เป็นระยะ a' โพรงมีความสูง h

3.2 วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

3.2.1 รูปแบบของผลต่างสืบเนื่อง

ก่อนที่จะเริ่มแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยวิธีการแบบผลต่างสืบเนื่อง จะต้องศึกษาว่าจะสร้างการประมาณค่าผลต่างสืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่ให้มาได้อย่างไร จากฟังก์ชัน $f(x)$ ที่ให้มาดังแสดงในรูปที่ 3.3 เราสามารถจะประมาณโดยใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่ง โดยใช้ความชันของเส้นโค้ง PB ให้เป็นสูตรผลต่างสืบเนื่องไปข้างหน้า (Forward Difference Formula)

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.3 แสดงการประมาณสำหรับ $f'(x)$ ที่จุด P โดยใช้ผลต่างแบบสลับเนื่องไปข้างหน้า ข้างหลัง และตรงกลาง ตามลำดับ

หรือความชันของเส้นโค้ง AP ให้เป็นสูตรผลต่างสลับเนื่องไปข้างหลัง (Backward Difference Formula)

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} \quad (3.2)$$

หรือความชันของเส้นโค้ง AB ให้เป็นสูตรผลต่างสลับเนื่องตรงกลาง (Central Difference Formula)

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (3.3)$$

และเราสามารถจะประมาณอนุพันธ์อันดับสองของ $f(x)$ ที่จุด P ได้อีกเป็น

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

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

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f''(x_0) \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (3.4)$$

อีกแนวทางหนึ่งที่จะได้มาซึ่งสมการผลต่างสี่บเนื่องคือ การวิเคราะห์ด้วยสมการอนุกรมเทเลอร์ (Taylor's series) ที่ว่า

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \Delta x f'(x_0) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x_0) + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x_0) + \dots \quad (3.5)$$

และ

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \Delta x f'(x_0) + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 f''(x_0) - \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 f'''(x_0) + \dots \quad (3.6)$$

เมื่อนำสมการ (3.5) และ (3.6) รวมกันจะได้

$$f(x_0 + \Delta x) + f(x_0 - \Delta x) = 2f(x_0) + (\Delta x)^2 f''(x_0) + O(\Delta x)^4 \quad (3.7)$$

เมื่อ $O(\Delta x)^4$ คือค่าความผิดพลาดที่อยู่ในรูปของความผิดพลาดที่เกิดจากการตัดปลาย (Truncation Errors) โดยการตัดพจน์ $O(\Delta x)^4$ ออก เนื่องจากมีค่าน้อยมาก จะได้

$$f''(x_0) \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (3.8)$$

ซึ่งพบว่าตรงกับสมการ (3.4)

นำสมการ (3.5) ลบด้วย (3.6) และตัดพจน์ที่ยกกำลังสามขึ้นไปออก ด้วยเหตุผลเดียวกันจะได้

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (3.9)$$

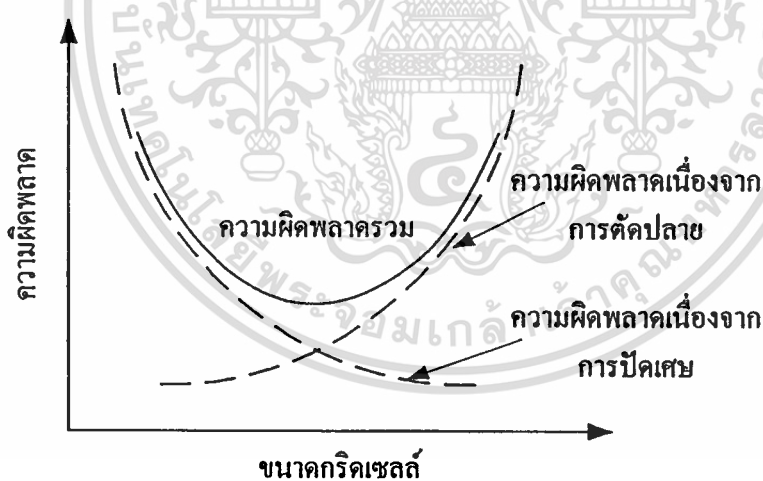
ซึ่งตรงกับสมการ (3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความถูกต้องและเสถียรภาพของผลการแก้สมการแบบผลต่างสี่เหลี่ยม มีความผิดพลาดอยู่ 3 ประเภท ในการหาผลเฉลยของคำตอบ การคำนวณเชิงเลขในทางปฏิบัติ คือ

1. ความผิดพลาดเนื่องจากการจำลองรูปทรง
2. ความผิดพลาดเนื่องจากการตัดปลาย
3. ความผิดพลาดเนื่องจากการปิดเศษ
4. ความผิดพลาดเนื่องจากการคำนวณ

ความผิดพลาดเนื่องจากการจำลองรูปทรงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาจมีความสลับซับซ้อน ในขณะที่ความผิดพลาดเนื่องจากการตัดปลายนั้น เนื่องจากการแก้สมการที่มีผลต่างสี่เหลี่ยมที่มิลำดับสูงๆ ของอนุกรมเทเลอร์จะถูกตัดทิ้งไป ส่วนความผิดพลาดเนื่องจากการปิดเศษ เป็นความผิดพลาดในทางคำนวณที่เกิดจากเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่จะต้องมีค่าแน่นอนที่ค่าใดค่าหนึ่ง และเนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีแบบผลต่างสี่เหลี่ยม จะกระทำการคำนวณ โดยการแบ่งรูปทรงจำลอง เป็นรูปแบบของขนาดกริดเซลล์ ดังนั้น เมื่อต้องการให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด จะต้องนำความผิดพลาดทั้งสองมาพิจารณาร่วมกัน โดยกำหนดให้ไม่มีความผิดพลาดเนื่องจากการจำลองรูปทรงดังแสดงในรูป 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงความผิดพลาดในฟังก์ชันของขนาดกริดเซลล์

ดังรูปข้างต้นแสดงได้ว่า การลดขนาดของกริดเซลล์จะมีความผิดพลาดเนื่องจากการปิดเศษได้มาก แต่ในทางตรงกันข้าม ความผิดพลาดเนื่องจากการตัดปลายจะน้อยลง แต่ถ้าเพิ่มขนาดกริดเซลล์ให้ใหญ่มากขึ้น จะเกิดผลในทางตรงกันข้าม จึงแสดงให้เห็นได้ว่า ขนาดกริดเซลล์ควรมีขนาดที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากความผิดพลาดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

ในค้วงกลางที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกันตลอดจะได้สมการของแมกซ์เวลล์เป็น

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (3.10)$$

เมื่อ \bar{E} และ \bar{H} เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กตามลำดับ ขณะที่ μ คือค่าความซึมซาบได้สนามแม่เหล็ก ε คือค่าสภาพยอมสนามไฟฟ้าและ σ คือค่าความนำสนามไฟฟ้า จากสมการ (3.10) สามารถแสดงในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังนี้ [30]

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (3.11ก)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (3.11ข)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (3.11ค)$$

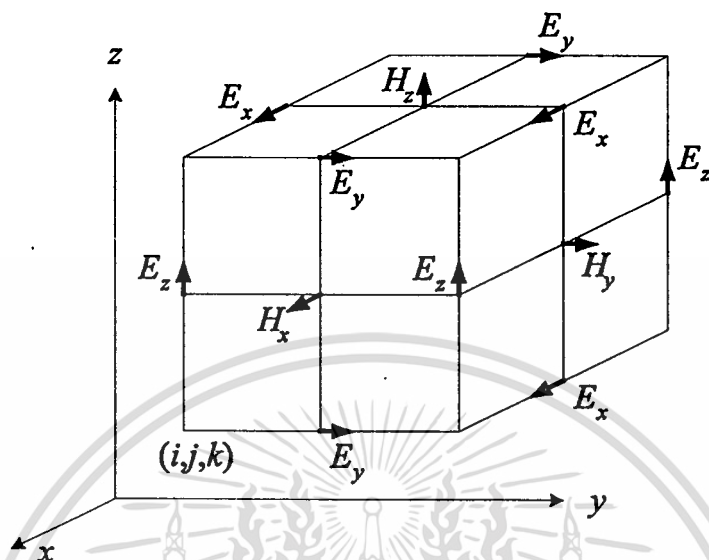
$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (3.11ง)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (3.11จ)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (3.11ฉ)$$

ตามเงื่อนไขรูปแบบของ Yee [31] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 อันเป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายแอสกอร์ทิม ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า \bar{E} และสนามแม่เหล็ก \bar{H} ถูกจัดวางไว้ระหว่างกลางของกันและกันในสามมิติ ดังส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า \bar{E} ใดๆ จะถูกล้อมรอบ

ด้วยส่วนประกอบของสนามแม่เหล็ก \bar{H} สีดำของสนาม และส่วนประกอบของสนามแม่เหล็ก \bar{H} จะถูกล้อมรอบด้วยสนามไฟฟ้า \bar{E} สีดำของสนามเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างส่วนประกอบสนามในหน่วยเซลล์ของ Yee

ซึ่งจะได้ตำแหน่งกริดเซลล์ในพื้นที่ของผลเฉลยเป็น

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (3.12)$$

และฟังก์ชันทางตำแหน่งและเวลาเป็น

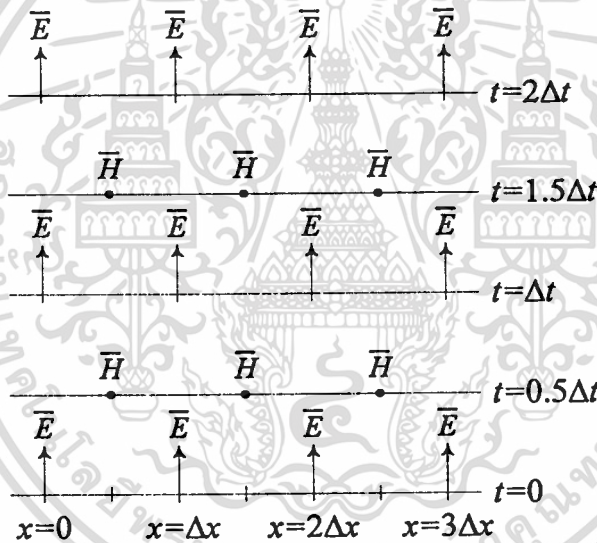
$$F^n(i, j, k) = F(i\delta, j\delta, k\delta, n\Delta t) \quad (3.13)$$

โดย $\delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ เป็นช่วงความต่างของตำแหน่งและ Δt แทนช่วงความต่างของเวลา ในขณะที่ i, j, k และ n เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยที่การประมาณผลต่างสืบเนื่องแบบตรงกลางในรูปทรงของปัญหาขึ้นอยู่กับระยะทางและเวลาอันดับที่สอง สามารถหาได้จาก

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i+1/2, j, k) - F^n(i-1/2, j, k)}{\delta} + O(\delta^2) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + O(\Delta t^2) \quad (3.15)$$

โดยการประยุกต์สมการ (3.14) กับทุกอนุพันธ์ตามระยะทางในสมการ (3.11) และเมื่อรวมสมการ (3.15) เข้าไปด้วย ส่วนประกอบของ \bar{E} และ \bar{H} จะถูกคำนวณหาในทุกครึ่งของช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นรูปแบบของแอลกอริทึมของ Yee จะสลับระหว่างสนามไฟฟ้า \bar{E} และ สนามแม่เหล็ก \bar{H} ด้วยระยะห่างของเวลาโดยที่การคำนวณของสนาม \bar{E} ทุกตำแหน่งแบบสามมิติ แล้วเสร็จ จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะใช้ในการคำนวณสนามแม่เหล็ก \bar{H} ในเวลาถัดไป และจากนั้นทุกส่วนประกอบของสนามแม่เหล็ก \bar{H} คำนวณจนแล้วเสร็จ จะใช้ผลในการคำนวณหาสนามไฟฟ้า \bar{E} ต่อไป ซึ่งขั้นตอนการคำนวณจะกระทำซ้ำกลับไปกลับมาจนกระทั่งสิ้นสุดการคำนวณที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 3.6 แสดงช่วงเวลาตามแอลกอริทึมของ Yee

ดังนั้นจากสมการ (3.11) จะได้การประมาณผลต่างสี่บเนื่องที่เป็นแบบโดยชัดแจ้งดังนี้

$$H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) = H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + \frac{\delta t}{\mu(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})\delta} \left[E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) + E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j + 1, k + \frac{1}{2}) \right] \quad (3.16ก)$$

$$H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) = H_y^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \frac{\delta t}{\mu(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})\delta} \left[\begin{array}{l} E_z^n(i+1, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2}) \\ + E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k+1) \end{array} \right] \quad (3.16\text{ว})$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) + \frac{\delta t}{\mu(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)\delta} \left[\begin{array}{l} E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) \\ + E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k) - E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k) \end{array} \right] \quad (3.16\text{ค})$$

$$E_x^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j, k) = \left[1 - \frac{\sigma(i+\frac{1}{2}, j, k)\delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j, k)} \right] E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j, k)\delta} \left[\begin{array}{l} H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k) \\ + H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) \end{array} \right] \quad (3.16\text{ง})$$

$$E_y^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}, k) = \left[1 - \frac{\sigma(i, j+\frac{1}{2}, k)\delta t}{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2}, k)} \right] E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2}, k)\delta} \left[\begin{array}{l} H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}) \\ + H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) \end{array} \right] \quad (3.16\text{จ})$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k+\frac{1}{2}) = \left[1 - \frac{\sigma(i, j, k+\frac{1}{2})\delta t}{\varepsilon(i, j, k+\frac{1}{2})} \right] E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2}) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i, j, k+\frac{1}{2})\delta} \left[\begin{array}{l} H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) \\ + H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) \end{array} \right] \quad (3.16\text{ฉ})$$

จากสมการ (3.16) รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 จะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะสลับกันอยู่ในหนึ่งหน่วยเซลล์และถูกคำนวณหาค่าในแต่ละครึ่งช่วงเวลาและเนื่องจากการคำนวณหาค่าผลเฉลยของสนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลานั้น ต้องมีการกำหนดขอบเขตที่จะไม่ให้ค่าผลเฉลยของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างไร้ขีดจำกัด ซึ่งขอบเขตของความสำคัญ ก็คือ การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างพิกัดในแกน $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ กับขั้นของเวลา Δt เพื่อให้การคำนวณมีเสถียรภาพ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกันของระนาบสามมิติดังในสมการ [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (3.17ก)$$

เมื่อ $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ เป็นค่าของความเร็วแสงและถ้ากำหนดให้ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ เงื่อนไขเสถียรภาพทางการคำนวณ สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายเป็น

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta^2} + \frac{1}{\Delta^2} + \frac{1}{\Delta^2}}} = \frac{1}{c \sqrt{\frac{3}{\Delta^2}}} = \frac{\Delta}{c\sqrt{3}} \quad (3.17ข)$$

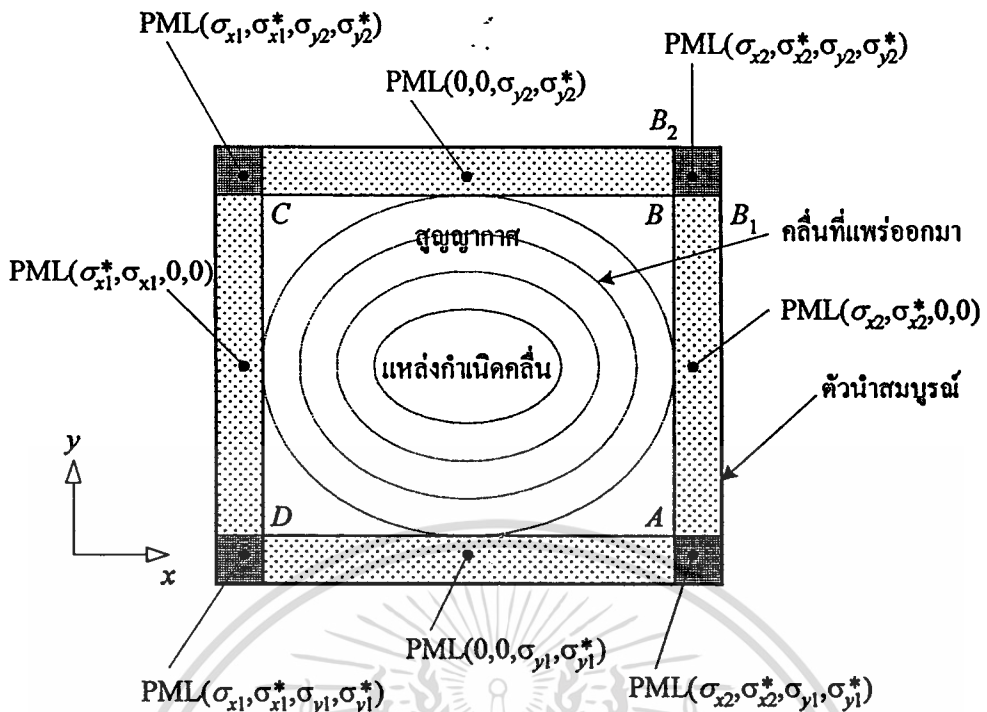
จากสมการ (3.17ข) แสดงให้เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขั้นของเวลาจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดเซลล์หารด้วยความเร็วแสงในตัวกลางคูณกับรากที่สองของสาม

3.3 เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน

วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลาต้องมีการพิจารณาในขอบเขตที่แน่นอน เมื่อจำลองคุณลักษณะของชิ้นงาน ตัวกลาง หรืออื่นใดก็ตาม ขอบมีส่วนเปิดหรือช่องทางที่จะให้คลื่นแพร่กระจายออกไปสู่บริเวณกว้าง เมื่อเป็นเช่นนี้การจะจำลองให้ครอบคลุมได้ทั้งหมดคงเป็นไปได้ยาก แนวทางที่กระทำกันอยู่คือการสร้างขอบเขตการดูดกลืนเพื่อดูดซับคลื่นดังกล่าวนั้นไว้ หมายความว่าหากคลื่นเดินทางมาถึงบริเวณที่เป็นขอบเขตการดูดกลืน แอมพลิจูดของคลื่นจะถูกทำให้มีขนาดลดลงจนมีค่าน้อยมาก ก่อนที่จะสะท้อนกลับเข้าไปมีผลต่อการคำนวณอีกครั้ง ในทางตรงข้ามหากไม่มีบริเวณขอบเขตดูดกลืน จะเปรียบเสมือนพื้นที่ในการคำนวณล้อมรอบด้วยผนังโลหะ นั่นคือคลื่นจะมีการสะท้อนกลับไปกลับมา

ขอบเขตดูดกลืนได้มีผู้นำเสนอหลากหลายรูปแบบ [33] รูปแบบหนึ่งที่ได้ผลและง่ายต่อการใช้งานเรียกว่าเงื่อนไขขอบเขตดูดกลืนแบบชั้นที่เข้ากันอย่างสมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า PML

ลักษณะของเทคนิคแบบ PML เป็นดังรูปที่ 3.7 โดยที่สมการของแมกซ์เวลล์ถูกแก้ด้วยวิธีการแบบผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา โดยมีแหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยตัวกลางแบบ PML เพื่อกั้นคลื่นที่แพร่กระจายออกมา โดยที่ชั้นนอกสุดเป็นชั้นของตัวนำสมบูรณ์



รูปที่ 3.7 แสดงเทคนิคของเงื่อนไขขอบเขตดูดคลื่นแบบชั้นที่เข้ากันอย่างสมบูรณ์

เมื่อตัวแปร $\sigma_x, \sigma_x^*, \sigma_y$ และ σ_y^* คือความนำทางไฟฟ้าและความนำทางแม่เหล็ก ในแกน x และแกน y ตามลำดับ และกำหนดให้

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \tag{3.18}$$

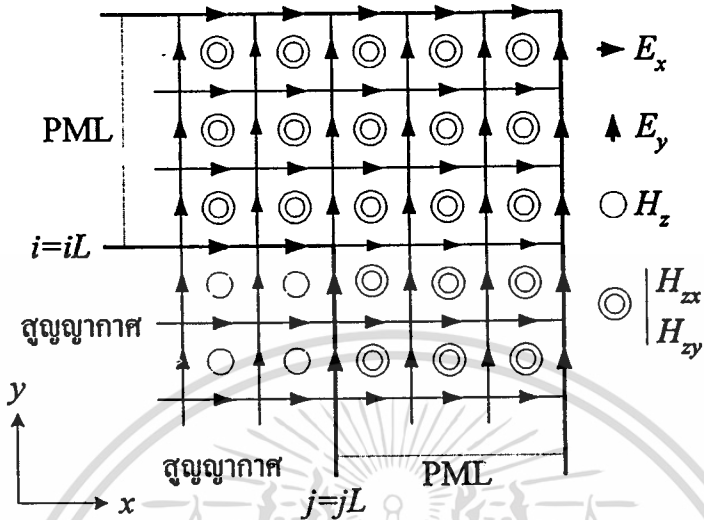
ซึ่งจะทำให้อิมพีแดนซ์ของตัวกลางเท่ากับในสุญญากาศและ ไม่มีการสะท้อนกลับเกิดขึ้นเมื่อคลื่นระนาบเดินทางตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าตัวกลาง

โดยที่ด้านซ้ายและด้านขวาเป็นการจำลองเพื่อคำนวณชั้นการดูดคลื่นที่แมตซ์ด้วยตัวกลาง PML ที่ความนำเป็น $(\sigma_x, \sigma_x^*, 0, 0)$ ในทำนองเดียวกันตัวกลางที่แมตซ์แบบ PML ที่ความนำเป็น $(0, 0, \sigma_y, \sigma_y^*)$ ใช้กับขอบด้านบนและด้านล่างสำหรับการคำนวณ สำหรับมุมทั้งสี่ของชั้นการดูดคลื่นที่เป็นตัวกลาง PML จะได้ความนำเป็นแบบ $(\sigma_x, \sigma_x^*, \sigma_y, \sigma_y^*)$ ซึ่งก็จะเป็นเหมือนกับชั้นตัวกลางแบบ $(\sigma_x, \sigma_x^*, 0, 0)$ และ $(0, 0, \sigma_y, \sigma_y^*)$ รวมกัน

การนำเสนอการคำนวณเชิงเลขของชั้นแบบ PML ตามเทคนิคแบบผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา อย่างเช่นพิจารณามุมบนด้านขวาดังตัวอย่างในรูปที่ 3.8 ในตัวกลางที่เป็นชั้นแบบ PML สมการจะถูกแยกส่วนประกอบเช่น ส่วนประกอบของสนามแม่เหล็ก H_z ออกเป็นสองส่วนประกอบย่อย H_{zx}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ H_{zy} ส่วนด้านในก่อนถึงชั้นแบบ PML ที่เป็นอากาศและแหล่งกำเนิด ยังใช้สมการเดิมดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 3.8 แสดงมุมมองของกริดผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลาในตัวกลาง PML

ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตดัดแปลงแบบขั้นที่เข้ากันอย่างสมบูรณ์ในสามมิติจากส่วนประกอบสนามในพิกัดคาร์ทีเซียน สร้างเป็นสมการแบบ PML เจริญสมการของแมกซ์เวลล์ได้ดังนี้

$$\mu_0 \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} + \sigma_y * H_{xy} = -\frac{\partial(E_{xz} + E_{zy})}{\partial y} \quad (3.19ก)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} + \sigma_z * H_{xz} = \frac{\partial(E_{yx} + E_{yz})}{\partial z} \quad (3.19ข)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{yx}}{\partial t} + \sigma_x * H_{yx} = \frac{\partial(E_{zy} + E_{zx})}{\partial x} \quad (3.19ค)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{yz}}{\partial t} + \sigma_z * H_{yz} = -\frac{\partial(E_{xy} + E_{xz})}{\partial z} \quad (3.19ง)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x * H_{zx} = -\frac{\partial(E_{yz} + E_{yx})}{\partial x} \quad (3.19จ)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y * H_{zy} = \frac{\partial (E_{xz} + E_{xy})}{\partial y} \quad (3.19ก)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{xy}}{\partial t} + \sigma_y E_{xy} = \frac{\partial (H_{zx} + H_{zy})}{\partial y} \quad (3.19ข)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{xz}}{\partial t} + \sigma_z E_{xz} = -\frac{\partial (H_{yx} + H_{yz})}{\partial z} \quad (3.19ค)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{yx}}{\partial t} + \sigma_x E_{yx} = -\frac{\partial (H_{zy} + H_{zx})}{\partial x} \quad (3.19ด)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{yz}}{\partial t} + \sigma_z E_{yz} = \frac{\partial (H_{xy} + H_{xz})}{\partial z} \quad (3.19ด)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial (H_{yz} + H_{yx})}{\partial x} \quad (3.19จ)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = \frac{\partial (H_{zx} + H_{xy})}{\partial y} \quad (3.19จ)$$

และในรูปแบบของผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา จากสมการ (3.19) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$H_{xy}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = e^{-\sigma_y * (j) \Delta t / \mu_0} H_{xy}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_y * (j) \Delta t / \mu_0})}{\sigma_y * (j) \Delta y} \times [E_z^n(i, j + \frac{1}{2}, k) - E_z^n(i, j - \frac{1}{2}, k)] \quad (3.20ก)$$

$$H_{xz}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = e^{-\sigma_z * (k) \Delta t / \mu_0} H_{xz}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_z * (k) \Delta t / \mu_0})}{\sigma_z * (k) \Delta z} \times [-E_y^n(i, j, k + \frac{1}{2}) + E_y^n(i, j, k - \frac{1}{2})] \quad (3.20ข)$$

$$H_{yx}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = e^{-\sigma_x * (i) \Delta t / \mu_0} H_{yx}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_x * (i) \Delta t / \mu_0})}{\sigma_x * (i) \Delta x} \times [-E_z^n(i + \frac{1}{2}, j, k) + E_z^n(i - \frac{1}{2}, j, k)] \quad (3.20ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{yz}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = e^{-\sigma_z^*(k)\Delta t/\mu_0} H_{yz}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_z^*(k)\Delta t/\mu_0})}{\sigma_z^*(k)\Delta z} \times [E_x^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_x^n(i, j, k - \frac{1}{2})] \quad (3.20\alpha)$$

$$H_{xz}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = e^{-\sigma_x^*(i)\Delta t/\mu_0} H_{xz}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_x^*(i)\Delta t/\mu_0})}{\sigma_x^*(i)\Delta x} \times [E_y^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - E_y^n(i - \frac{1}{2}, j, k)] \quad (3.20\beta)$$

$$H_{xy}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = e^{-\sigma_y^*(j)\Delta t/\mu_0} H_{xy}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_y^*(j)\Delta t/\mu_0})}{\sigma_y^*(j)\Delta y} \times [-E_z^n(i, j + \frac{1}{2}, k) + E_z^n(i, j - \frac{1}{2}, k)] \quad (3.20\gamma)$$

$$E_{xy}^{n+1}(i, j, k) = e^{-\sigma_y(j)\Delta t/\epsilon_0} E_{xy}^n(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_y(j)\Delta t/\epsilon_0})}{\sigma_y(j)\Delta y} \times [H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k)] \quad (3.20\delta)$$

$$E_{xz}^{n+1}(i, j, k) = e^{-\sigma_x(k)\Delta t/\epsilon_0} E_{xz}^n(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_x(k)\Delta t/\epsilon_0})}{\sigma_x(k)\Delta z} \times [-H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2}) + H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - \frac{1}{2})] \quad (3.20\theta)$$

$$E_{yx}^{n+1}(i, j, k) = e^{-\sigma_x(i)\Delta t/\epsilon_0} E_{yx}^n(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_x(i)\Delta t/\epsilon_0})}{\sigma_x(i)\Delta x} \times [-H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k) + H_z^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k)] \quad (3.20\omega)$$

$$E_{yz}^{n+1}(i, j, k) = e^{-\sigma_z(k)\Delta t/\epsilon_0} E_{yz}^n(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_z(k)\Delta t/\epsilon_0})}{\sigma_z(k)\Delta z} \times [H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - \frac{1}{2})] \quad (3.20\upsilon)$$

$$E_{zx}^{n+1}(i, j, k) = e^{-\sigma_x(i)\Delta t/\epsilon_0} E_{zx}^n(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_x(i)\Delta t/\epsilon_0})}{\sigma_x(i)\Delta x} \times [H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k)] \quad (3.20\phi)$$

$$E_{zy}^{n+1}(i, j, k) = e^{-\sigma_y(j)\Delta t/\epsilon_0} E_{zy}^n(i, j, k) - \frac{(1 - e^{-\sigma_y(j)\Delta t/\epsilon_0})}{\sigma_y(j)\Delta y} \times [-H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k) + H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k)] \quad (3.20\eta)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $H_x = H_{xy} + H_{xz}$, $H_y = H_{yx} + H_{yz}$, $H_z = H_{zx} + H_{zy}$ และ $E_x = E_{xy} + E_{xz}$,
 $E_y = E_{yx} + E_{yz}$, $E_z = E_{zx} + E_{zy}$,

3.4 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วม

การวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลาจะได้เวกเตอร์ของการกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงเวลาและตำแหน่งทั้งหมด การเชื่อมโยงสนามที่กระจายอยู่นั้นไปสู่วงจรสมมูลอันประกอบด้วยขนาดของกระแสและแรงดันไฟฟ้า สามารถทำได้จากสมการพื้นฐานต่อไปนี้ [33]

$$V(t, x_i) = \int_{C_v} \bar{E}(t, x_i) \cdot d\bar{l} \quad (3.21ก)$$

$$I(t, x_i) = \int_{C_i} \bar{H}(t, x_i) \cdot d\bar{l} \quad (3.21ข)$$

เมื่อ C_v คือคอนทอร์ที่ขยายออกไปจากจุดที่กำหนดให้เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (ปกติคือระนาบเงา, Ground Plane) จนถึงตำแหน่ง x_i ซึ่งโดยทั่วไป x_i มักจะเป็นจุด ๆ หนึ่งที่อยู่บนสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางในแบบแผนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่ง $V(t, x_i)$ จะไม่ขึ้นอยู่กับการเลือก C_v ถ้าขอบเขตของคอนทอร์ขยายออกไปถึงระนาบตามขวางดังกล่าวและเราสามารถที่จะเลือก C_v ให้ขยายออกไปได้ตามต้องการ ดังฉากกับระนาบสร้างเงาไปจนถึงพื้นผิวของสายอากาศ ในทำนองเดียวกันการเลือกคอนทอร์ C_i ห่อหุ้มแผ่นตัวนำให้หมดตลอดทั้งพื้นผิวระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง ก็จะได้กระแสที่จุดนั้น ๆ

พารามิเตอร์ของสายส่งแแกนร่วมของช่วงกว้างความถี่สามารถหาได้โดยการประยุกต์การแปลงฟูริเยร์จากแรงดันไฟฟ้าและกระแสตอบสนองจากสมการ (3.21) ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากการกระตุ้นด้วยพัลส์หรือคลื่นรูปไซน์ ดังนั้นในกรณีที่เป็นอิมพีแดนซ์ ฟังก์ชันของความถี่สามารถหาได้จากค่าของศักดาต่อกระแส

$$Z_0(\omega, x_i) = F[V(t, x_i)] / F[I(t, x_i)] \quad (3.22)$$

เมื่อ $F[]$ คือสัญลักษณ์เครื่องหมายการแปลงฟูริเยร์ และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่มีสายส่งแแกนร่วมต่อโหลดอยู่ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\Gamma(\omega, x_i) = \frac{F[V_r(t, x_i)]}{F[V_i(t, x_i)]} \quad (3.23)$$

เมื่อ V_r คือแรงดันไฟฟ้าสะท้อนกลับและ V_i คือแรงดันไฟฟ้าตกกระทบสังเกตที่จุด x_i ซึ่งสัมพันธ์การสะท้อนกลับนี้สามารถแปลงไปเป็นการสะท้อนกลับเนื่องจากโหลดได้โดย

$$\Gamma_L(\omega) = \Gamma(\omega, x_i) e^{2\gamma(\omega)l} \quad (3.24)$$

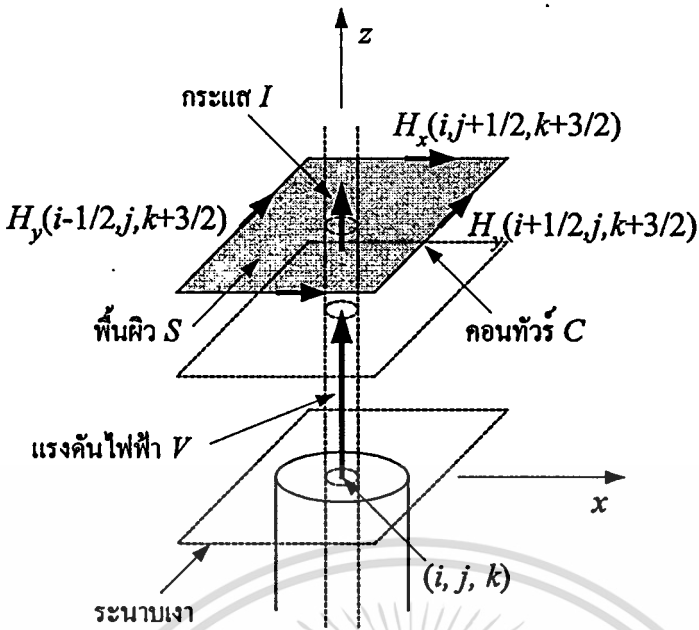
เมื่อ l คือระยะทางจาก x_i ถึง โหลดและ γ คือค่าคงตัวการแพร่กระจายซึ่งหาได้จาก

$$\gamma(\omega) = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{F[g(t, x_i)]}{F[g(t, x_j)]} \right\} \quad (3.25)$$

โดยที่ $g(t, x_i)$ และ $g(t, x_j)$ คือรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสที่ตำแหน่ง $x=x_i$ และ $x=x_j$ ตามลำดับ วางห่างกัน d ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์โหนดประสิทธิผลเป็น

$$Z_L(\omega) = Z_0(\omega, x_i) \left[\frac{1 + \Gamma_L(\omega)}{1 - \Gamma_L(\omega)} \right] \quad (3.26)$$

สำหรับสายอากาศแบบโมโนโพลจะจำลองด้วยวิธีการแบบช่องว่างเดลต้า (Delta Gap) ซึ่งง่ายต่อการคำนวณตำแหน่งการแทรกใส่พัลส์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.9 เป็นมุมมองแบบสองมิติทำจากเส้นลวดทรงกระบอกรัศมี a และแสดงตำแหน่งการแทรกใส่พัลส์ จะกระทำเพียงจุดเดียว ณ ตำแหน่งช่องว่าง (Gap)



รูปที่ 3.10 แสดงการจำลองสายอากาศแบบโมโนโพลอย่างง่ายตามกฎของแอมแปร์

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสามารถหาได้จาก

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \quad (3.30)$$

และหลังจากที่ทำการแปลงฟูริเยร์แรงดันไฟฟ้าตกกระทบแล้ว จะสามารถหาแรงดันไฟฟ้าสะท้อนกลับได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับโดย

$$V_{ref}(\omega) = \Gamma(\omega)V_{inc}(\omega) \quad (3.31)$$

ณ ฐานของสายอากาศโมโนโพลตัวรับ สามารถหาแรงดันไฟฟ้าได้จากสนามไฟฟ้าที่อยู่ในช่องว่างเคลด้า ซึ่งจะมีลักษณะเป็นวงจรมีเปิด

$$V_{oc} = -\Delta dE \quad (3.32)$$

จากนั้นทำการแปลงฟูริเยร์แรงดันไฟฟ้าที่สายอากาศตัวรับจาก $v_{rec}(t) \leftrightarrow V_{rec}(\omega)$ โดยความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าในช่องว่างเคลด้าบนสายอากาศตัวรับ ซึ่งหลังจากทำการแปลงฟูริเยร์ $v_{oc}(t) \leftrightarrow V_{oc}(\omega)$ ก็จะได้ศักดาไฟฟ้าที่สายอากาศตัวรับในโดเมนของความถี่เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

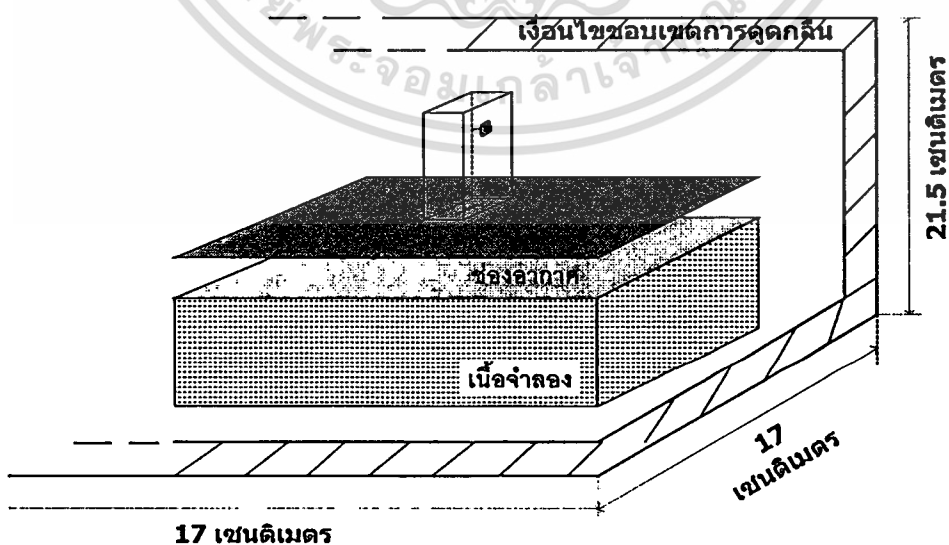
$$V_{\text{rec}}(\omega) = \left[\frac{Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \right] V_{\text{oc}}(\omega) \quad (3.33)$$

ซึ่งสมการที่ (3.33) คือศักดาไฟฟ้าบนสายอากาศตัวที่สองที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายมาจากสายอากาศตัวแรก ดังนั้นเราสามารถที่จะนำศักดาดังกล่าวหาค่าพารามิเตอร์การเชื่อมต่อร่วมต่าง ๆ ได้ต่อไป

3.5 ผลการคำนวณ

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการคำนวณหาขนาดส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่อง ที่แสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีเงื่อนไขขอบเขตแสดงดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้ได้ขนาดของส่วนประกอบบนแผ่นระนาบเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่สอดคล้องที่ดีกับพารามิเตอร์ที่สนใจในสายอากาศส่งซึ่งประกอบไปด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วม ซึ่งค่าของการสูญเสียย้อนกลับและค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

จากผลการวิเคราะห์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลาบนเงื่อนไขขอบเขตดังรูปที่ 3.1 ที่ความถี่ 2,450 MHz บนแผ่นระนาบวางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย มีความหนา 6 เซนติเมตร ขนาดกว้างxยาว เท่ากับ 12 x 12 เซนติเมตร ตัวกลางที่มีค่าการสูญเสียกำหนดให้มีค่าเท่ากับกลีมน้ำมันนุขย์ที่ความถี่ 2,450 MHz $\epsilon_m = 47$, $\sigma_m = 2.21 \text{ S/m}$ ระยะห่างระหว่างสายอากาศบนระนาบเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร



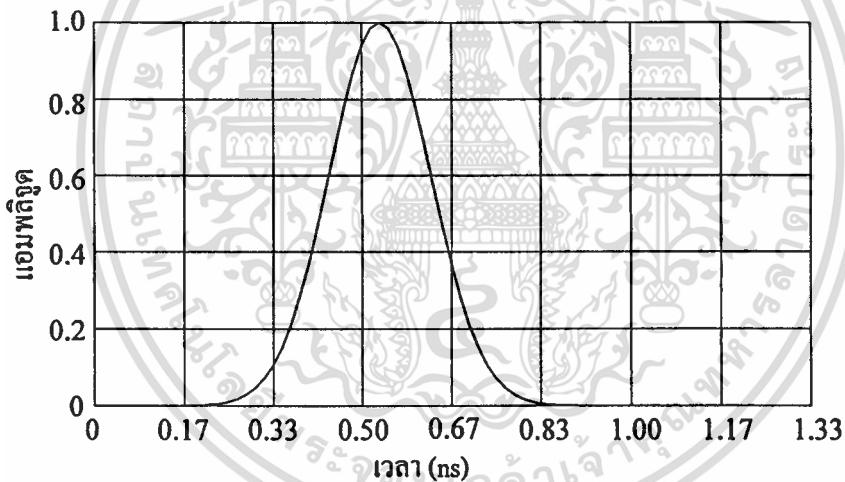
รูปที่ 3.11 แสดงการกำหนดขนาดของเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้กริดเซลล์มีขนาด 0.25 เซนติเมตร เท่ากันทั้งสามทิศทาง จำนวนกริดเซลล์ในแนวแกน x, y และ z เท่ากับ $69 \times 69 \times 87$ ตามลำดับ ให้การเปลี่ยนแปลงของเวลา Δt มีขนาดเป็น $\Delta/2c$ หรือเท่ากับ 4.16×10^{-12} วินาที ซึ่งในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและค่าการสูญเสียการส่งผ่าน เชื่อมต่อรวมในที่นี้เลือกใช้พัลส์แบบเกาส์ (Gaussian Pulse) ช่วงความกว้างของพัลส์แบบเกาส์ มีค่าเป็น 64 ช่วงเวลา Δt ตำแหน่งของช่องว่างของการจำลองสายอากาศโมโนโพลแบบช่องว่างเคลด้า โดยที่ช่องว่างมีขนาดความกว้าง 0.25 เซนติเมตร โดยการแทรกใส่พัลส์เพียงจุดเดียวและลูกเดียว ดังแสดงสมการ (3.34) และรูปสัญญาณพัลส์แสดงดังรูปที่ 3.12 [34]

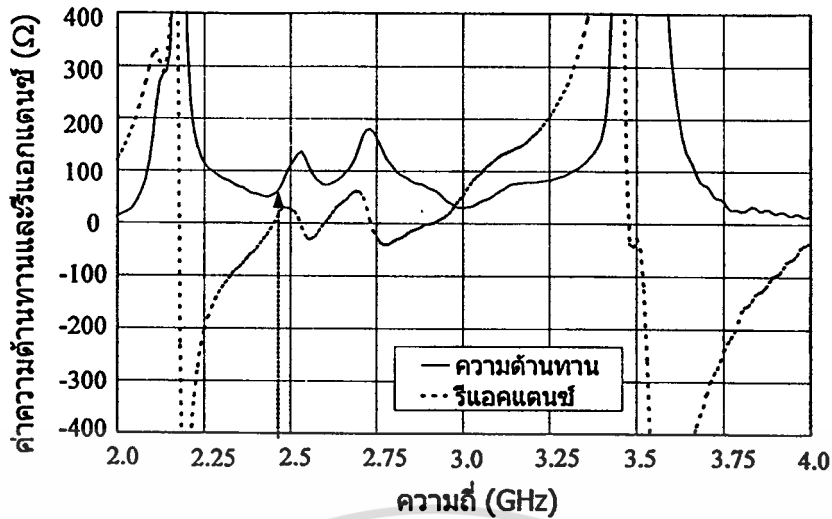
$$V_{inc} = V_0 \exp[-\alpha(\tau - \beta\Delta t)^2] \quad (3.34)$$

เมื่อ V_0 คือ ขนาดของแรงดันสูงสุด τ ค่าคุณสมบัติของเวลา และตัวแปรที่ดัดแปลงมีการกำหนดค่า คือ α, β และ Δt ตามลำดับ

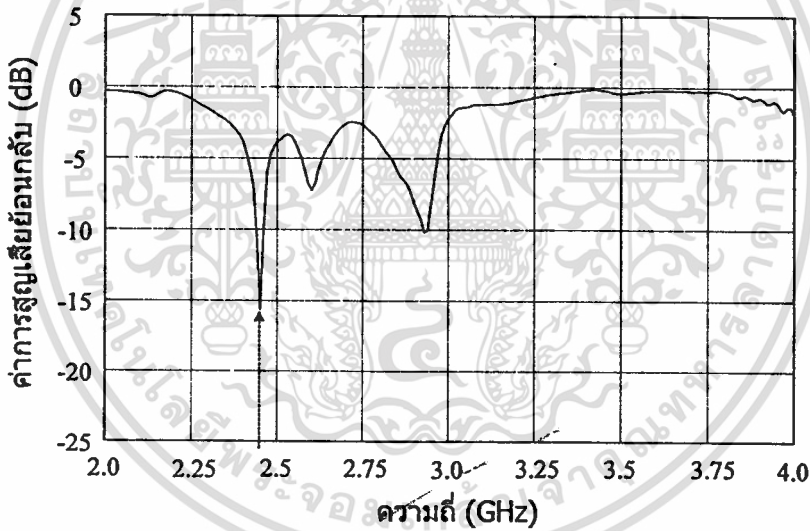


รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณพัลส์แบบเกาส์

หลังจากยุติการวิ่งของโปรแกรมที่ 50,000 ขึ้นเวลาและทำให้ได้ค่าของพารามิเตอร์ที่สนใจ โดยใช้เวลาในการวิ่งของโปรแกรมทั้งหมดประมาณ 15 ชั่วโมง กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล รุ่น Pentium II ที่ความเร็ว 400 MHz ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ผลการคำนวณค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งได้จากส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

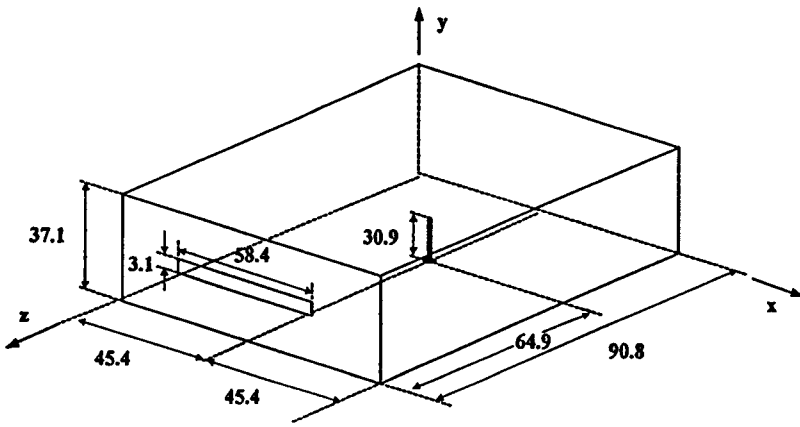


รูปที่ 3.13 แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย



รูปที่ 3.14 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

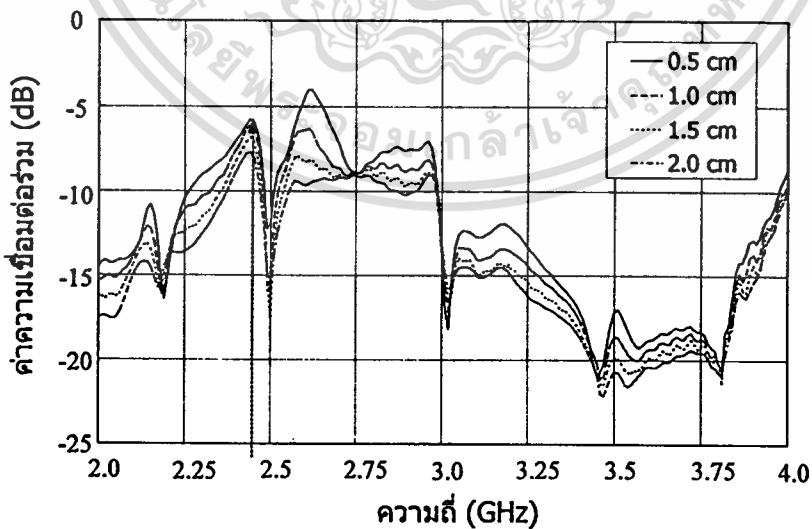
ที่ความถี่ใช้งาน 2,450 MHz จะได้ค่าความต้านทานเท่ากับ 55.7 โอห์ม และค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศเท่ากับ 0.7 โอห์ม ค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.13 ที่ได้จากความสัมพันธ์ของ $(Z_{11} - Z_0)/(Z_{11} + Z_0)$ โดยค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า Z_{11} จะเป็นค่าของขนาดที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน Z_0 กำหนดให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ใดๆ ส่วนค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่ใช้งาน 2,450 MHz มีค่าเท่ากับ -17 dB ผลจากการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียและให้ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่คี่ที่สุด ทำให้ได้ขนาดของส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.15 นั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วย : มิลลิเมตร

รูปที่ 3.15 แสดงขนาดของส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต้อรวม แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 เป็นการแสดงขนาดของคลื่นที่แพร่กระจายจากสายอากาศหนึ่ง ไปมีผลต่ออีกสายอากาศหนึ่งเล็กน้อยเพียงใด โดยที่มีการจัดวางสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียแบบเชิงเส้นในแนวแกน x จำนวนสองชุด เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างขอบของสายอากาศทั้งสองเป็น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลของค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต้อรวมจะมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.16 แสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต้อรวมของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

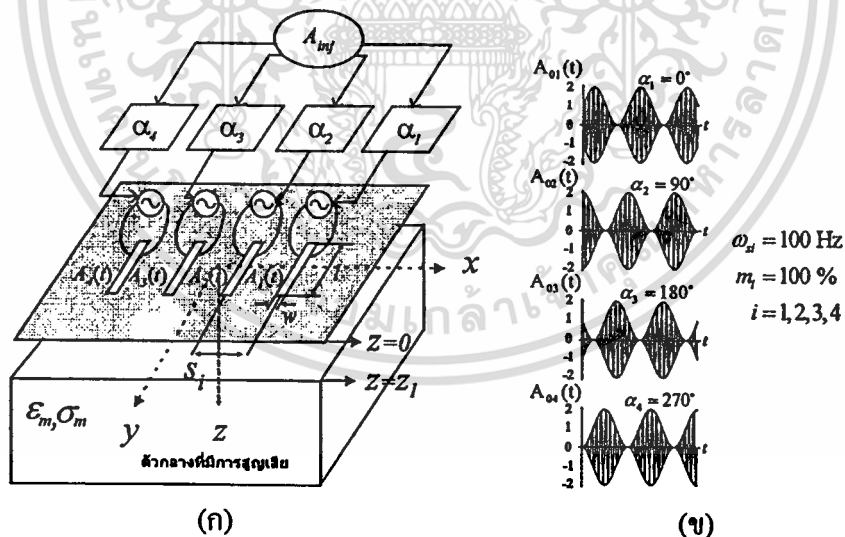
ส่วนผลของการวัดเพื่อยืนยันผลจากการคำนวณในพารามิเตอร์ที่สนใจดังเช่น ค่าความสูญเสียย้อนกลับ ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อยุบรวม จะแสดงผลการวัดเปรียบเทียบในบทที่ 5 ในหัวข้อเรื่องการออกแบบสร้าง และผลการทดลอง

3.6 การกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้

ในการคำนวณได้จำลองโครงสร้างตามวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา ของสายอากาศแบบร่องแฉกลำดับบนแผ่นระนาบตัวนำเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.17 และเงื่อนไขขอบเขตเช่นเดียวกับการคำนวณหาค่าของอิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อยุบรวมที่ผ่านมา ดังเช่นให้ขนาดกริดเซลล์มีค่าเท่ากับ 0.25 เซนติเมตร ทั้งสามทิศทาง จำนวนกริดเซลล์ในแนวแกน x, y และ z มีจำนวนเท่ากับ $69 \times 69 \times 51$ ตามลำดับ กำหนดให้ชั้นเวลามีขนาดเท่ากับ 4.16×10^{-12} วินาที และใช้ระนาบคลื่นชาวนเป็นแหล่งกำเนิดแทนพัลส์แบบเกาส์คิงสมการ

$$E_{inc} = A_0 \sin(2\pi f n \Delta t) \tag{3.35}$$

3.6.1 รูปแบบการจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้แบบเชิงเส้น



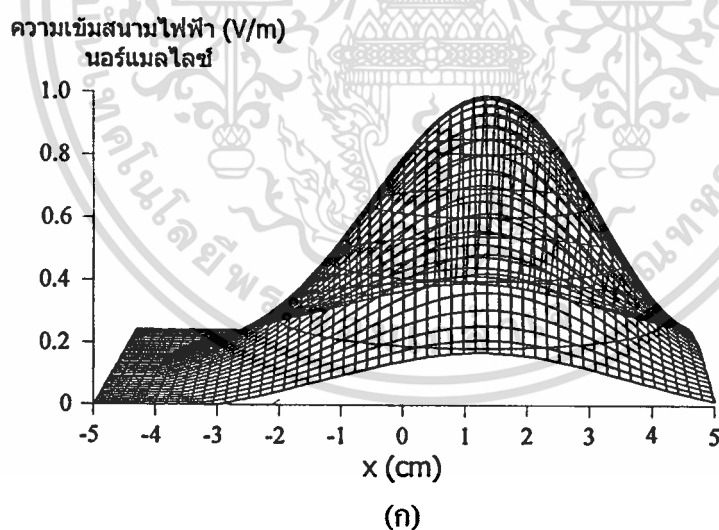
รูปที่ 3.17 แสดงรูปแบบจำลองสายอากาศแอคทีฟแบบเชิงเส้น

(ก) ลักษณะการจัดวางของสายอากาศแบบร่องแฉกลำดับแบบแอคทีฟเชิงเส้น

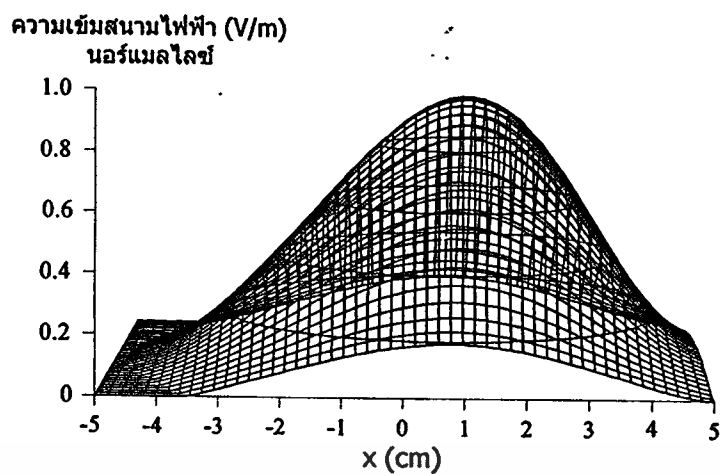
(ข) รูปแบบของสัญญาณ

เมื่อ E_{inc} คือสนามไฟฟ้าที่ถูกแทรกใส่เข้าไปเป็นระนาบคลื่นไซน์ A_0 คือขนาดของแรงดัน f คือ ความถี่ของคลื่นไซน์กำหนดให้มีค่าเป็น 2,450 MHz และ t คือจำนวนของชั้นเวลา การคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ ได้ถูกจำลองเพื่อหาสนามไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันที่ไม่เท่ากัน ในแต่ละสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ทั้งแบบเชิงเส้นและแบบระนาบ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าของสนามไฟฟ้าระยะใกล้นี้จะถูกนำไปเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนในตัวกลางที่มีการสูญเสียต่อไป

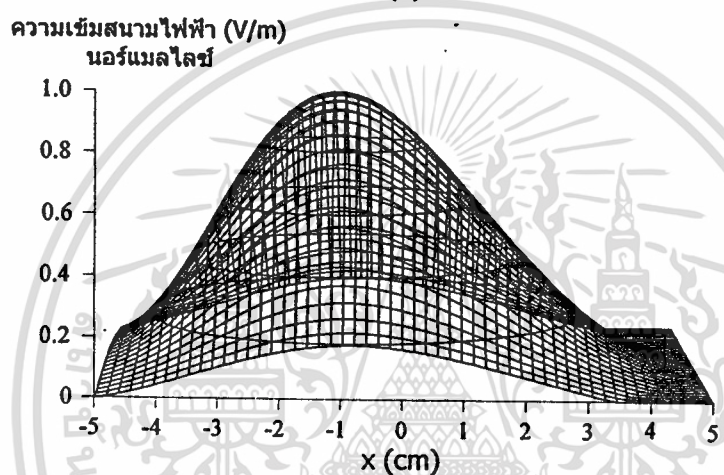
จากรูปแบบของสัญญาณ ขนาดส่วนประกอบของสายอากาศ และเงื่อนไขขอบเขตคั่งที่กล่าวมาแล้ว จะได้พิจารณาการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยมีการจัดวางเป็นแถวลำดับในแนวแกน x บนแผ่นระนาบตัวนำที่อยู่บนระนาบ x, y ในอากาศเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียเป็นระยะห่าง z , เท่ากับ 1.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องที่ใช้ในการคำนวณ s , เท่ากับ 2 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.17(ก) แต่ละสายอากาศทำงานที่ความถี่เท่ากัน คือ 2,450 MHz ขนาดของแรงดันในแต่ละสายอากาศแบบร่องมีค่าไม่เท่ากันเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปแบบของสัญญาณที่ 3.17(ข) ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปที่ระยะความลึกจากผิวตัวกลางที่มีการสูญเสีย 1 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.18



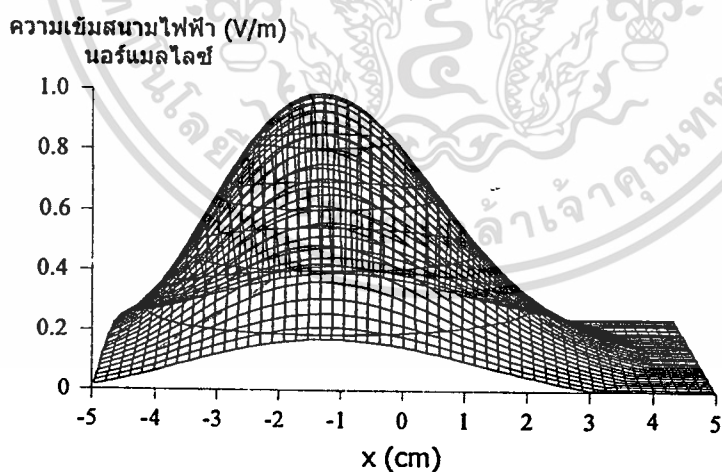
รูปที่ 3.18 แสดงสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบของการจัดวางแบบเชิงเส้น



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.18 (ต่อ)

(ก) เมื่อเวลาผ่านไป $1/4$ วินาที(ข) เมื่อเวลาผ่านไป $1/2$ วินาที(ค) เมื่อเวลาผ่านไป $3/4$ วินาที

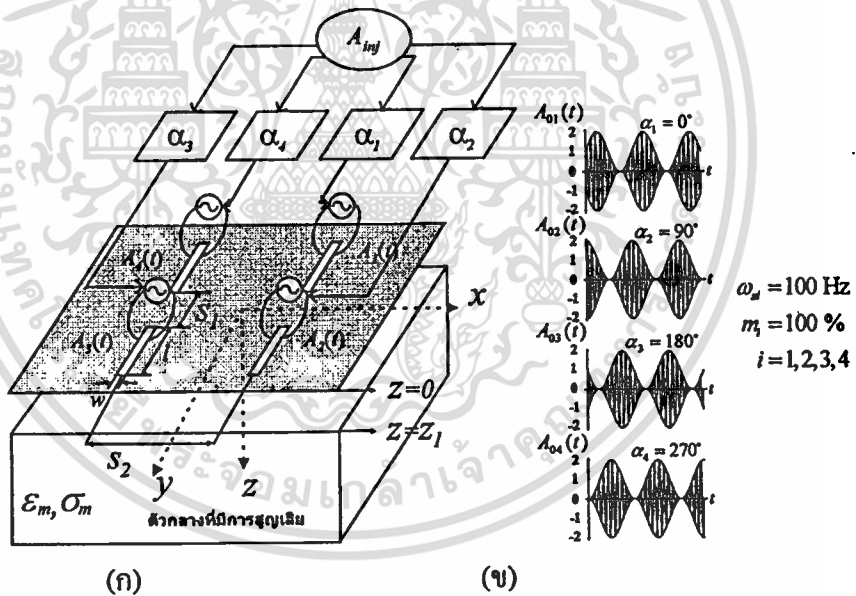
(ง) เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นถึงการย้ายตำแหน่งของขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้า โดยเริ่มเมื่อเวลาผ่านไป 1/4 วินาที ในรูปที่ 3.18(ก) ขนาดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งขวาสุดไปทางแกน X เป็นระยะ 1.40 เซนติเมตรจากกึ่งกลาง ส่วนรูปที่ 3.18(ข) เมื่อเวลาผ่านไป 1/2 วินาที ขนาดสูงสุดจะอยู่ตำแหน่งทางขวาไปทางแกน X เป็นระยะ 0.96 เซนติเมตรจากกึ่งกลาง รูปที่ 3.18(ค) เมื่อเวลาผ่านไป 3/4 วินาที ขนาดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งทางด้านซ้ายไปทางแกน X เป็นระยะ 1.24 เซนติเมตรจากจุดกึ่งกลาง ส่วนรูปที่ 3.18(ง) เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที ขนาดสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งทางด้านซ้ายไปทางแกน X เป็นระยะ 1.47 เซนติเมตรจากจุดกึ่งกลาง ดังนั้นจากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งขนาดสูงสุดอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องนี้จะนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างร่องและสัมประสิทธิ์การมอดูเลตที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การกระจายอุณหภูมิที่กว้างและสม่ำเสมอตลอดพื้นที่คือ ไปในบทที่ 4 ต่อไป

3.6.2 รูปแบบจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้แบบระนาบ



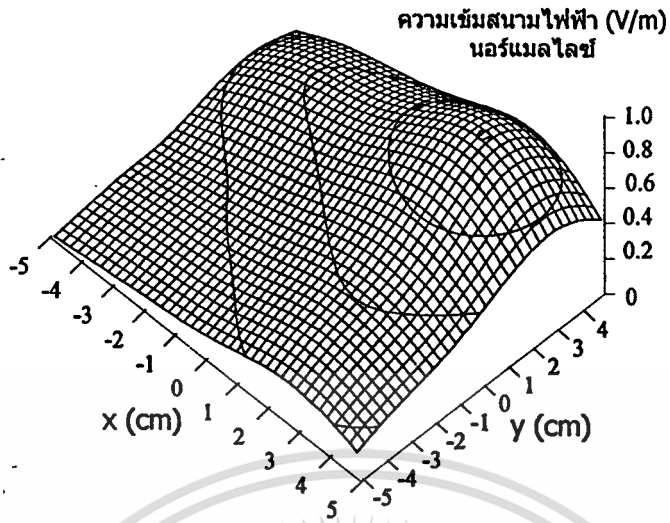
รูปที่ 3.19 แสดงรูปแบบจำลองสายอากาศแอกทิฟแบบระนาบ

- (ก) ลักษณะการจัดวางของสายอากาศแบบร่องแถวลำดับแบบแอกทิฟแบบระนาบ
- (ข) รูปแบบของสัญญาณ

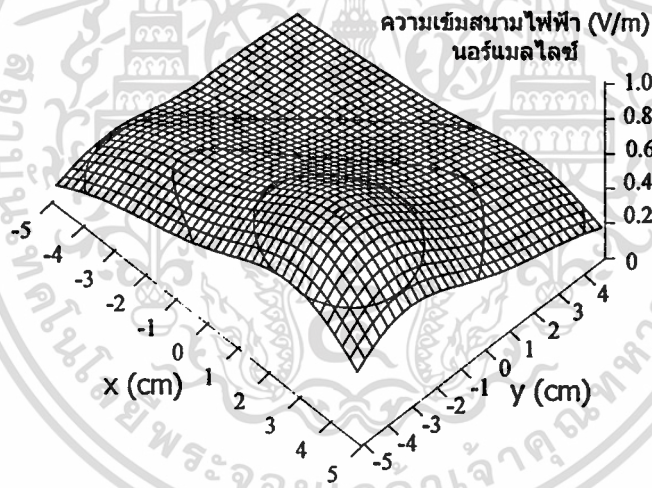
จากเงื่อนไขขอบเขตเดียวกันกับการคำนวณในหัวข้อ 3.5.1 เพียงแต่รูปแบบการจัดวางสายอากาศเป็นแบบระนาบ และมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 3.19(ข) ซึ่งผลของการคำนวณสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



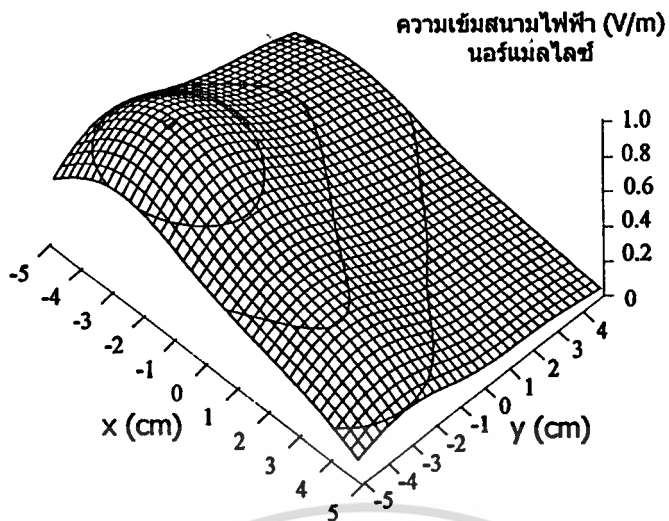
(ก)



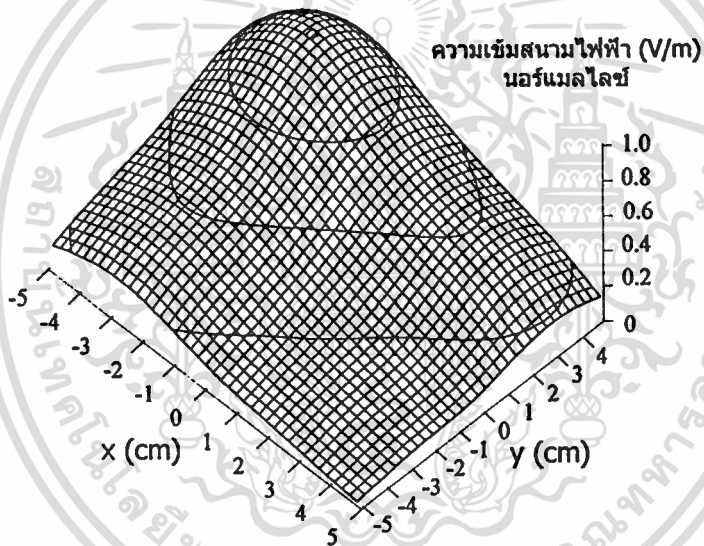
(ข)

รูปที่ 3.20 แสดงสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงในรูปของการจัดวางแบบระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ง)

รูปที่ 3.20 (ต่อ)

- (ก) เมื่อเวลาผ่านไป $1/4$ วินาที
- (ข) เมื่อเวลาผ่านไป $1/2$ วินาที
- (ค) เมื่อเวลาผ่านไป $3/4$ วินาที
- (ง) เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที

รูปที่ 3.20 แสดงให้เห็นถึงการย้ายขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้าโดยเริ่มเมื่อเวลาผ่านไป $1/4$ วินาที ในรูปที่ 3.20(ก) ขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้าจะอยู่ที่ตำแหน่งทางด้านขวาไปทางแกน x เป็นระยะ 1.8 เซนติเมตรและตำแหน่งทางด้านขวาไปทางแกน y เป็นระยะ 2.8 เซนติเมตรจากกึ่งกลางการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรูปที่ 3.20(ข) เมื่อเวลาผ่านไป $1/2$ วินาที ขนาดสูงสุดจะอยู่ตำแหน่งทางด้านขวาไปทางแกน X เป็นระยะ 1.84 เซนติเมตรและตำแหน่งทางด้านซ้ายไปทางแกน Y เป็นระยะ 2.9 เซนติเมตรจากกึ่งกลาง รูปที่ 3.20(ค) เมื่อเวลาผ่านไป $3/4$ วินาที ขนาดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งทางด้านซ้ายไปทางแกน X เป็นระยะ 1.84 เซนติเมตรและตำแหน่งทางด้านซ้ายไปทางแกน Y เป็นระยะ 3.0 เซนติเมตรจากจุดกึ่งกลาง รูปที่ 3.20(ง) เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที ขนาดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งทางด้านซ้ายไปทางแกน X เป็นระยะ 1.87 เซนติเมตรและตำแหน่งทางด้านขวาไปทางแกน Y เป็นระยะ 3.2 เซนติเมตรจากจุดกึ่งกลาง ดังนั้นจากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งขนาดสูงสุดอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกันกับสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบของการจัดวางแบบเชิงเส้น

3.7 สรุป

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศปล่องคลื่นแบบแถวลำดับแอดทิฟ โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา จะเริ่มจากหลักการของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม คือ การประมาณค่าจากฟังก์ชันของอนุพันธ์ จากผลต่างสี่เหลี่ยมไปข้างหน้า ผลต่างสี่เหลี่ยมไปข้างหลัง หรือผลต่างสี่เหลี่ยมตรงกลาง สำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา อาจเกิดจากการจำลองรูปทรงทางคณิตศาสตร์ ความผิดพลาดจากการตัดปลายของฟังก์ชันก่อนอันดับสูงๆ และ ความผิดพลาดจากการปิดเศษที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมทั้งความผิดพลาดจากการกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรในการคำนวณ ฉะนั้นจึงต้องพยายามเลือกความผิดพลาดรวมจากเงื่อนไขให้เหมาะสม

รูปแบบของการวิเคราะห์ ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา จะกระทำโดยการกำหนดระยะทางในแนวแกน x, y และ z เป็นเสมือนลูกบาศก์สามมิติ ซึ่งมาจากแนวคิดของ K.S Yee ซึ่งจะประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้า E_x, E_y, E_z และส่วนประกอบของสนามแม่เหล็ก H_x, H_y, H_z ที่สัมพันธ์กันในทุกจุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในอีกครั้งช่วงเวลาในอนาคต จะได้มาจากส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กที่อยู่รอบๆ ณ เวลาปัจจุบัน รวมกับค่าส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าตำแหน่งเดียวกันในอดีตครั้งช่วงเวลา และส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กในอนาคตอีกหนึ่งช่วงเวลา จะได้จากส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า ณ ครั้งช่วงเวลาในอนาคตที่อยู่รอบๆ กับค่าของส่วนประกอบสนามแม่เหล็กจุดเดียวกันที่เวลาปัจจุบันรวมกัน การคำนวณจะกระทำวนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนถึงสุดการวิ่งของโปรแกรม และการคำนวณตามเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา จะต้องมีความสัมพันธ์กันกับระยะการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน x, y และ z กับการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาเพื่อให้เกิดเสถียรภาพของผลการคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

ส่วนในการคำนวณสายอากาศปล้อยคลื่นแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียได้ทำการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมจากผลการวิเคราะห์ห่อพีแคนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเป็นสายอากาศแบบปล้อยคลื่น ซึ่งมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -17 dB ที่ความถี่ 2,450 MHz

ส่วนการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในตัวกลางที่มีความสูญเสีย กระทำโดยการจัดวางรูปแบบจำลองเหมือนกับ ในเงื่อนไขขอบเขตของสายอากาศแอกทิฟ ซึ่งกำหนดไว้สองรูปแบบคือ สายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทิฟแบบเชิงเส้น และแบบระนาบ ได้ทำการคำนวณหา รูปแบบของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยที่มีขนาดของแรงดันในแต่ละสายอากาศไม่เท่ากัน ซึ่งผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าจากเงื่อนไขนี้จะนำไปสู่การคำนวณหาอุณหภูมิในเงื่อนไขเดียวกัน ในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนในตัวกลางที่มีการสูญเสียที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศปล่องคลื่นแบบแถวลำดับร่อง

ในบทนี้จะพิจารณาการแปลงพลังงานของสนามไฟฟ้าให้เป็นอุณหภูมิซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สมการการส่งผ่านความร้อนวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในก้อนเนื้อจำลอง โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวเกิดจากสนามไฟฟ้าจากสายอากาศปล่องคลื่นแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรงสี่เหลี่ยมที่อยู่เหนือเนื้อวัตถุนั้นเอง ผลเฉลยของสมการการส่งผ่านความร้อนได้มาจากการคำนวณเชิงเลขแบบผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆภายในก้อนเนื้อจำลองที่สัมพันธ์กับเวลา รวมถึงผลการวิเคราะห์การวางสายอากาศปล่องคลื่นแบบแถวลำดับร่องแบบเชิงเส้นและแบบระนาบ เพื่อหาเงื่อนไขการมอดูเลตและรูปแบบการจัดวางสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้ขนาดของพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและเป็นบริเวณกว้าง

4.1 สมการการส่งผ่านความร้อน

การแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟเพื่อทำให้เกิดความร้อนแก่วัตถุใด ๆ สามารถแสดงด้วยสมการการส่งผ่านความร้อน (Heat Transport Equation) [35], [36] ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = R_T \nabla^2 T + \frac{\epsilon_v}{C_p} L_h \frac{\partial M_l}{\partial t} + \frac{P}{\rho C_p} \quad (4.1)$$

เมื่อ	T	คือ อุณหภูมิ องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)
	t	คือ เวลา วินาที (s)
	R_T	คือ ความสามารถในการกระจายอุณหภูมิ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
	ϵ_v	คือ อัตราส่วนการถ่ายเทของเหลวไอน้ำต่อการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (kg^{-1})
	C_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของวัตถุ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	L_h	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของของเหลว ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	M_l	คือ มวลของของเหลว (kg)
	P	คือ ความหนาแน่นของกำลังงาน ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของวัตถุ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดจากสมการ (4.1) มีอยู่ 3 ปัจจัย ตามเทอมของสมการที่ได้แบ่งเอาไว้คือ เทอมแรกหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการนำความร้อน เทอมที่สองหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการพาความร้อน และเทอมที่สามหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากกำลังงานภายนอกที่ป้อนให้แก่ระบบ เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นรูปทรงสามมิติในระบบพิกัดมุมฉาก จะสามารถเขียนสมการ (4.1) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = R_T \left[\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right] + \frac{\varepsilon_v}{C_p} L_h \frac{\partial M_l}{\partial t} + \frac{P}{\rho C_p} \quad (4.2)$$

การใช้สมการผลต่างสี่เหลี่ยมประยุกต์ใช้กับสมการการส่งผ่านความร้อนในสมการ (4.1) สามารถกระทำได้ดังนี้ เทอมทางซ้ายมือใช้สมการผลต่างสี่เหลี่ยมไปข้างหน้า (Forward Difference)

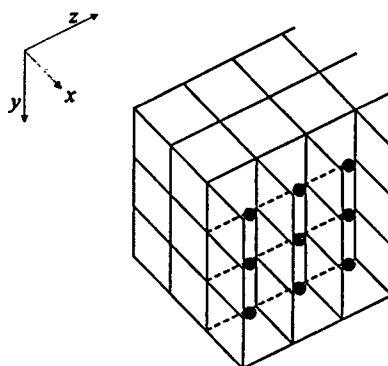
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} \quad (4.3)$$

สมการ (4.3) เป็นอนุพันธ์ย่อยของอุณหภูมิเทียบกับเวลา หรือผลต่างของอุณหภูมิที่เวลาปัจจุบัน $T(t)$ กับเวลาในอนาคต $T(t + \Delta t)$ ต่อขนาดของเวลา Δt วินาที

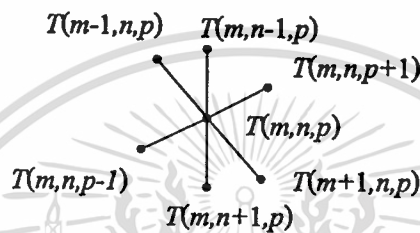
เทอมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดจากการนำความร้อนแทนด้วยสมการผลต่างสี่เหลี่ยมตรงกลาง (Central Difference) อันดับสอง จะได้

$$R_T \left[\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right] = R_T \left[\frac{T(x + \Delta x) - 2T(x) + T(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} + \frac{T(y + \Delta y) - 2T(y) + T(y - \Delta y)}{(\Delta y)^2} + \frac{T(z + \Delta z) - 2T(z) + T(z - \Delta z)}{(\Delta z)^2} \right] \quad (4.4)$$

สมการ (4.4) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งศูนย์กลางจากค่าของอุณหภูมิตำแหน่งใกล้เคียงดังรูปที่ 4.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 แสดงการกำหนดจุดบนก้อนวัตถุตามวิธีผลต่างสืบเนื่อง

(ก) ตำแหน่งบนก้อนวัตถุ

(ข) ความสัมพันธ์ของตำแหน่ง

รูปที่ 4.1(ก) คือการแบ่งกริดเซลล์บนก้อนวัตถุเพื่อประยุกต์ใช้ตามวิธีผลต่างสืบเนื่อง โดยกำหนดให้ระยะห่างของกริดเซลล์มีขนาดเท่ากันทั้งสามด้านคือ $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ จากนั้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางกริดเซลล์จะถูกแทนด้วยจุด $T_{m,n,p}$ เมื่อ m , n และ p เป็นตำแหน่งในแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ เมื่อพิจารณาคำแหน่งใดๆที่สมมติขึ้นจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างจุดดังรูปที่ 4.1(ข)

สำหรับพจน์ที่แทนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดจากการพาความร้อนนั้น จะใช้สำหรับการพิจารณาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งผิวของก้อนเนื้อจำลอง

จากเงื่อนไขการพาความร้อนสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [35], [37]

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h}{k_t} (T_{\text{ext}} - T_{\text{surf}})$$

(4.5)

เมื่อ k_t คือ ความนำความร้อนของวัตถุ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)

เอกสารนี้ h เป็นเอกสาร คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับพื้นผิว ณ ตำแหน่งที่พิจารณา
 T_{surf} คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ($^{\circ}C$)
 T_{ext} คือ อุณหภูมิรอบ ๆ วัตถุ ($^{\circ}C$)

โดยใช้ความสัมพันธ์

$$L_h \rho \alpha \frac{\partial M_l}{\partial t} = -h(T_{ext} - T_{surf}) \quad (4.6)$$

สนามไฟฟ้าที่ได้จากวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลาคือสนามในโดเมนของเวลา ดังนั้นการหาอุณหภูมิโดยใช้สนามไฟฟ้าที่แปรตามเวลาสามารถกระทำได้ แต่สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือการสเกล (Scale) เวลาในอัตราส่วนที่เป็นจริง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในขบวนการให้ความร้อนจะช้ากว่าคืออยู่ในหน่วยของวินาที ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในหน่วยของนาโนวินาที ดังนั้นจึงกำหนดให้ปัจจัยการสเกลเวลาเป็น α แล้วทำการคูณสมการ (4.2) จะได้

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha R_T \left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_v}{C_p} L_h \frac{\partial M_l}{\partial t} \right) + \alpha \left(\frac{P}{\rho C_p} \right) \quad (4.7)$$

และกำหนดให้ตัวแปร ρ , C_p และ k , มีความเป็นอิสระจากกัน ในตำแหน่ง อุณหภูมิและเวลาใด ๆ โดยที่ความสามารถในการกระจายอุณหภูมิ R_T , มีความสัมพันธ์กับความนำความร้อน k , ดังนี้

$$R_T = \frac{k_l}{\rho C_p} \quad (4.8)$$

เมื่อทำการแยกตัวแปรร่วมจากสมการ(4.7) จะได้

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha R_l \left[\left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) - \frac{\rho}{k_l} \left(\epsilon_v L_h \frac{\partial M_l}{\partial t} \right) + \frac{P}{k_l} \right] \quad (4.9)$$

ในสมการ (4.9) จะหมายความว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลาในอัตราส่วน α จะเป็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อตำแหน่งด้วย

การสเกลเวลากระทำได้อันนี้ สมมติว่าต้องการที่จะสเกลช่วงเวลาการให้ความร้อนจริงเป็น T_{heat} กับช่วงเวลาการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น T_{FDTD} จะได้ปัจจัยคงที่การสเกล α เป็น

$$\alpha = \frac{T_{\text{heat}}}{T_{\text{FDTD}}} \quad (4.10)$$

เพราะฉะนั้นนำสมการ (4.3), (4.4) ประกอบกับ (4.8) แทนลงใน (4.9) จะได้สมการสำหรับหาการกระจายอุณหภูมิภายในวัตถุแต่ไม่รวมการพาความร้อนในเทอมที่สองของสมการ(4.9)ทำให้ได้สมการดังนี้คือ

$$\alpha \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = \alpha R_l \left[\frac{T(x + \Delta x) - 2T(x) + T(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} + \frac{T(y + \Delta y) - 2T(y) + T(y - \Delta y)}{(\Delta y)^2} + \frac{T(z + \Delta z) - 2T(z) + T(z - \Delta z)}{(\Delta z)^2} \right] + \frac{P}{k_l} \quad (4.11)$$

นำการแบ่งกริดเซลล์ตามวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลามาใช้กับสมการ(4.11) โดยการแบ่งเวลาและระยะห่างของตำแหน่ง $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ในการคำนวณหาอุณหภูมิ ก็คือเวลาและระยะห่างของตำแหน่งที่ใช้ในการหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลานั้นเอง แต่จะอยู่ที่จุดกึ่งกลางของกริดเซลล์ดังนี้

$$T^{n+1}(i, j, k) = T^n(i, j, k) + \Delta t \alpha R_l \left[\frac{T^n(i+1, j, k) - 2T^n(i, j, k) + T^n(i-1, j, k)}{(\Delta x)^2} + \frac{T^n(i, j+1, k) - 2T^n(i, j, k) + T^n(i, j-1, k)}{(\Delta y)^2} + \frac{T^n(i, j, k+1) - 2T^n(i, j, k) + T^n(i, j, k-1)}{(\Delta z)^2} + \frac{P^n(i, j, k)}{k_l} \right] \quad (4.12)$$

ความเสถียรจากการหาผลเฉลยการกระจายอุณหภูมิตามสมการ (4.12) เป็นลักษณะเช่นเดียวกับความเสถียรในการคำนวณหาค่าแม่เหล็กไฟฟ้าตามวิธีการแบบผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา สามารถหาได้จาก

$$\Delta t \leq \frac{1}{2\alpha R_i} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \quad (4.13)$$

การคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิภายในก้อนวัตถุที่มีคุณสมบัติดูดซับกำลังงาน ในวิชานีพนธ์ฉบับนี้ ใช้การคำนวณจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา ซึ่งจะเป็นการแพร่กระจายของคลื่นตกกระทบในโดเมนของเวลา ดังนั้นการคำนวณหาการสูญเสียกำลังงานในโดเมนของเวลาจะอาศัยจากสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\nabla \cdot \bar{S} + \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -P \quad (4.14)$$

เมื่อ \bar{S} คือเวกเตอร์พอยน์ติง (Poynting Vector) หาได้จาก $\bar{E} \times \bar{H}$, P คือการสูญเสียกำลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและ ρ_w คือความหนาแน่นเชิงปริมาตรของพลังงานมีค่าเป็น $(\bar{E} \cdot \bar{D} + \bar{H} \cdot \bar{B})/2$ จากความสัมพันธ์ของ

$$\nabla \cdot (\bar{E} \times \bar{H}) = \bar{H} \cdot \nabla \times \bar{E} - \bar{E} \cdot \nabla \times \bar{H} \quad (4.15)$$

และจากสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \quad (4.16)$$

และสนใจเฉพาะพจน์ที่เกี่ยวข้องกับเวลาในอนุพันธ์ของ ρ_w จากสมการ (4.15) จึงสามารถเขียนได้เป็น [38]

$$\nabla \cdot (\bar{E} \times \bar{H}) + \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -\frac{1}{2} \left(\bar{E} \cdot \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} - \bar{D} \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \right) - \frac{1}{2} \left(\bar{H} \cdot \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \bar{B} \cdot \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right) - \bar{J} \cdot \bar{E} \quad (4.17)$$

ส่วนเทอมด้านขวาของสมการ (4.17) คือการสูญเสียกำลังงานรวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้เป็นสามเทอมคือ เทอมแรกหมายถึงการสูญเสียกำลังงานชั่วขณะของวัตถุตัวกลางที่มีการสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เทอมที่สองหมายถึงการสูญเสียกำลังงานชั่วขณะด้วยการสูญเสียเป็นสภาพแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และเทอมที่สามหมายถึงการสูญเสียกำลังงานชั่วขณะด้วยการสูญเสียเป็นสภาพความนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

โดยที่พิจารณาในตัวกลางของวัตถุที่มีการสูญเสียที่ไม่เป็นวัสดุแม่เหล็กและไม่เป็นวัสดุตัวนำ สมการการสูญเสียกำลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะลดเหลือเพียง

$$P = P_e = \frac{1}{2} \left(\bar{E} \cdot \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} - \bar{D} \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \right) \quad (4.18)$$

ซึ่งสมการ (4.18) นี้จะถูกใช้เสมือนเป็นเทอมของแหล่งกำเนิดในขั้นตอนของการหาอุณหภูมิ ซึ่งจะถูกคำนวณหาที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทุกกริดเซลล์ตามวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

และจากสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ที่ขึ้นกับเวลาในสมการ(4.16) จะได้เวกเตอร์การกระจัด \bar{D} สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า \bar{E} ด้วยค่าสภาพยอมเชิงซ้อน $\epsilon^*(\omega)$ ในเนื้อตัวกลางเป็นดังนี้

$$\bar{D} = \epsilon^*(\omega) \bar{E} \quad (4.19)$$

และเนื่องจากสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ที่ขึ้นกับเวลาจะต้องถูกหาโดยการวนซ้ำในโดเมนของเวลา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องให้ความสัมพันธ์ในสมการ (4.19) อยู่ในโดเมนของเวลาด้วย เพราะฉะนั้นจากค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน $\epsilon^*(\omega)$ ที่สามารถหาได้จาก [37],[38]

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (4.20)$$

และจากการแทนสมการ(4.20) ในสมการ(4.19) จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\begin{aligned} \bar{D}(\omega) &= \epsilon^*(\omega) \bar{E}(\omega) \\ &= \epsilon_0 \left[\epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \right] \bar{E}(\omega) \end{aligned} \quad (4.21)$$

เมื่อ ϵ_0 คือค่าสภาพยอม ϵ_∞ คือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ความถี่อนันต์หรือเป็นค่าเดียวกับค่าสภาพยอมทางแสงซึ่ง $\epsilon_\infty = n^2$ โดยที่ n เป็นดัชนีทางแสงของตัวกลาง ϵ_s คือค่าสภาพยอมคงที่และ τ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือรีแลกเซชัน ซึ่ง $\tau = \tau_0 \exp(-W_a/k_B T)$ เมื่อ τ_0 คือค่าคงที่รีแลกเซชันในตัวกลางและ W_a คือพลังงานกระตุ้น k_B คือค่าคงที่โบลต์ซมานน์และ T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวินและเนื่องจากสมการ (4.21) อยู่ในรูปของความถี่ตามกระแสการกระจัด \bar{D} หาได้จากความถี่ค่าหนึ่งในตัวแปรของสนามไซมูซอค์ สามารถเขียนได้ใหม่ตามเงื่อนไขของเวลาใด ๆ ในอนุพันธ์ของสมการดังต่อไปนี้

$$\tau \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{D} = \varepsilon_0 \left[\varepsilon_s E(t) + \varepsilon_\infty \tau \frac{\partial E}{\partial t} \right] \quad (4.22)$$

และเนื่องจากต้องการแก้สมการเชิงรีลของแมกซ์เวลล์ที่ขึ้นกับเวลา ด้วยรูปแบบตามสมการ (4.22) ดังนั้นสามารถเขียนสมการในรูปแบบของผลต่างสี่เหลี่ยมได้เป็น [38]

$$\left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s + \varepsilon_\infty \tau}{2} + \frac{\varepsilon_\infty \tau}{\Delta t} \right] E_x^{n+1} = \left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \tau}{2} - \frac{\varepsilon_\infty \tau}{\Delta t} \right] E_x^n + \left[\frac{1}{2} + \frac{\tau}{\Delta t} \right] D_x^{n+1} + \left[\frac{1}{2} - \frac{\tau}{\Delta t} \right] D_x^n \quad (4.23ก)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s + \varepsilon_\infty \tau}{2} + \frac{\varepsilon_\infty \tau}{\Delta t} \right] E_y^{n+1} = \left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \tau}{2} - \frac{\varepsilon_\infty \tau}{\Delta t} \right] E_y^n + \left[\frac{1}{2} + \frac{\tau}{\Delta t} \right] D_y^{n+1} + \left[\frac{1}{2} - \frac{\tau}{\Delta t} \right] D_y^n \quad (4.23ข)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s + \varepsilon_\infty \tau}{2} + \frac{\varepsilon_\infty \tau}{\Delta t} \right] E_z^{n+1} = \left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \tau}{2} - \frac{\varepsilon_\infty \tau}{\Delta t} \right] E_z^n + \left[\frac{1}{2} + \frac{\tau}{\Delta t} \right] D_z^{n+1} + \left[\frac{1}{2} - \frac{\tau}{\Delta t} \right] D_z^n \quad (4.23ค)$$

โดยที่สนามการกระจัด D ที่แปรตามเวลาสามารถหาได้จาก

$$D_x^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k) = D_x^n(i + \frac{1}{2}, j, k) + \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} \frac{\delta t}{\delta} \left[\begin{aligned} & \tilde{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - \tilde{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k) \\ & + \tilde{H}_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}) - \tilde{H}_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) \end{aligned} \right] \quad (4.24ก)$$

$$D_y^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}, k) = D_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) + \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} \frac{\delta t}{\delta} \left[\begin{aligned} & \tilde{H}_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - \tilde{H}_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}) \\ & + \tilde{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - \tilde{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) \end{aligned} \right] \quad (4.24ข)$$

$$D_z^{n+1}(i, j, k + \frac{1}{2}) = D_z^n(i, j, k + \frac{1}{2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \frac{\delta}{\delta} \left[\begin{aligned} & \tilde{H}_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - \tilde{H}_y^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) \\ & + \tilde{H}_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - \tilde{H}_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) \end{aligned} \right] \quad (4.24ก)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \tilde{H}_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) &= \tilde{H}_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) \\ &+ \frac{c\delta}{\delta} \left[\begin{aligned} & E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k+1) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k) \\ & + E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j+1, k+\frac{1}{2}) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (4.25ก)$$

$$\begin{aligned} \tilde{H}_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) &= \tilde{H}_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) \\ &+ \frac{c\delta}{\delta} \left[\begin{aligned} & E_z^n(i+1, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2}) \\ & + E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k+1) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (4.25ข)$$

$$\begin{aligned} \tilde{H}_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) &= \tilde{H}_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) \\ &+ \frac{c\delta}{\delta} \left[\begin{aligned} & E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) \\ & + E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k) - E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (4.25ค)$$

จากนั้นนำส่วนประกอบสนามไฟฟ้าและส่วนประกอบสนามกระแสกระจัดที่ได้คำนวณหา กำลังงาน P โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ(4.18)

ซึ่งขั้นตอนของการคำนวณพอสรุบได้ดังนี้ โดยเริ่มจาก คำนวณส่วนประกอบสนามแม่เหล็ก H โดยใช้ส่วนประกอบสนามไฟฟ้า E ดังสมการ(4.25) จากนั้นส่วนประกอบสนามกระแสกระจัด D จึงถูกคำนวณโดยใช้ส่วนประกอบสนามแม่เหล็ก H ที่ได้ ดังสมการ(4.24) และส่วนประกอบสนามไฟฟ้า E จึงถูกคำนวณในขั้นตอนต่อมาหลังจากที่ส่วนประกอบสนามกระแสกระจัดคำนวณเสร็จแล้ว โดยใช้สมการ(4.23) จากนั้นนำส่วนประกอบสนามไฟฟ้าและส่วนประกอบสนามกระแสกระจัดที่ได้ คำนวณหาค่ากำลังงาน P โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ(4.18) โดยตำแหน่งกำลังงาน P ที่ได้จะอยู่ ณ กึ่งกลางกริดเซลล์ ซึ่งกำลัง P เป็นกำลังเฉลี่ยจากส่วนประกอบสนามไฟฟ้า E และส่วนประกอบกระแสกระจัด D และเมื่อได้กำลัง P แล้วนำกำลังดังกล่าวนี้คำนวณหาค่าอุณหภูมิต่อไป ตามความสัมพันธ์ของสมการ(4.12) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงเองตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป การคำนวณจะวนซ้ำเช่นนี้เรื่อยไปจนสิ้นสุดการคำนวณของโปรแกรม

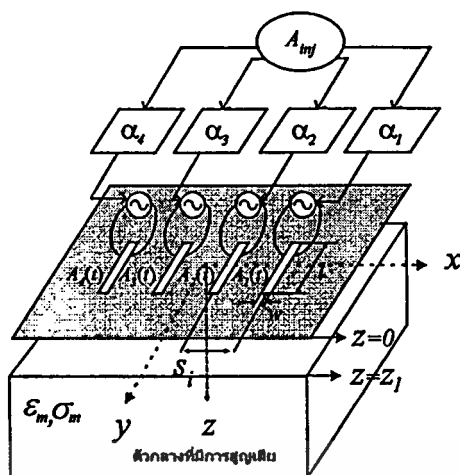
4.2 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อน

รูปแบบของการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ สายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบเชิงเส้น และ สายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบระนาบ โดยที่แบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เพื่อคำนวณหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเปลี่ยนแปลง คณิตการมอดูเลต ความถี่ในการมอดูเลต เฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต ที่จะทำให้ได้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ และค่าของอุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนแบบระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เพื่อคำนวณหาพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่กว้างและสม่ำเสมอ โดยอาศัยเงื่อนไขที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ในรูปแบบเชิงเส้น โดยที่การจัดวางรูปแบบของสายอากาศแบบร่องแต่ละชุดถูกต้องเข้ากับชุดกำเนิดสัญญาณที่แยกกันอย่างอิสระ และชุดกำเนิดสัญญาณถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณจากภายนอกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของชุดกำเนิดสัญญาณ แต่มีขนาดที่ไม่เท่ากันที่เวลาเดียวกันในแต่ละชุดของสายอากาศแบบร่อง

ในสภาวะปกติ สายอากาศทั้ง 4 ชุดซึ่งต่อกันเป็นลักษณะแถวลำดับภายใต้เงื่อนไขของการกระตุ้นที่เหมาะสม ดังสมการ(2.19ก) และ(2.19ข) สายอากาศจะเกิดการเชื่อมต่อร์่วมเสมือนเป็นหนึ่งเดียวกัน หรือเกิดการชิงโครโนซ์จะทำให้ขนาดของสัญญาณในแต่ละสายอากาศแบบร่องมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟสระหว่างสายอากาศแบบร่องมีค่าคงที่ แต่เมื่อมีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของชุดกำเนิดสัญญาณแต่มีขนาดไม่เท่ากันในแต่ละสายอากาศแบบร่องภายใต้เงื่อนไขของการกระตุ้นที่เหมาะสมดังสมการ(2.22) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณในแต่ละสายอากาศแบบร่อง โดยที่ความต่างเฟสระหว่างสายอากาศแบบร่องยังคงมีค่าเท่าเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณจะมีผลทำให้สนามไฟฟ้ารวมเกิดการเปลี่ยนแปลงผลที่ได้จากการคำนวณนี้จะใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสร้างทดลองสายอากาศแบบแอกทีฟที่มีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกแล้วมีผลทำให้ขนาดของสัญญาณในแต่ละสายอากาศแบบร่องเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากัน

4.2.1 สายอากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบเชิงเส้น

เราจะวิเคราะห์การกระตุ้นทางขนาดของสายอากาศแบบแอกทีฟเชิงเส้น เพื่อหาขบวนการมอดูเลต ความถี่ในการมอดูเลต ตลอดจนเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต รวมถึงระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องที่เหมาะสม ซึ่งค่าเหล่านี้หาได้จากกรวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิในศูนย์กลางที่มีการสูญเสีย ที่ระยะความลึกจากผิว 1 เซนติเมตร โดยที่สายอากาศแบบร่องมี 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงสายอากาศปล้องคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบเชิงเส้น

โดยที่เงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณหาค่าของอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียตามวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา จะคำนวณการกระจายอุณหภูมิเฉพาะภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียเท่านั้น โดยเริ่มจากการนำค่าของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในตัวกลางที่มีการสูญเสียในตำแหน่งต่างๆ จากการคำนวณของโปรแกรมตลอดพื้นที่ของตัวกลางที่มีการสูญเสีย ณ เวลาต่างๆ แล้วนำมาคำนวณหาค่าของการกระจายอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ของสมการดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งค่าของสนามไฟฟ้าระยะใกล้ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย และเงื่อนไขขอบเขตตลอดจนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหา สนามไฟฟ้าใช้ค่าเช่นเดียวกันกับผลการคำนวณที่แสดงดังในรูปที่ 3.14 และในรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดวางสายอากาศแบบเชิงเส้นและแบบระนาบตามลำดับ

ส่วนของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อแทนเนื้อมนุษย์ที่มีความถี่ 2,450MHz สำหรับการคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิมียังค่าดังต่อไปนี้ [39]

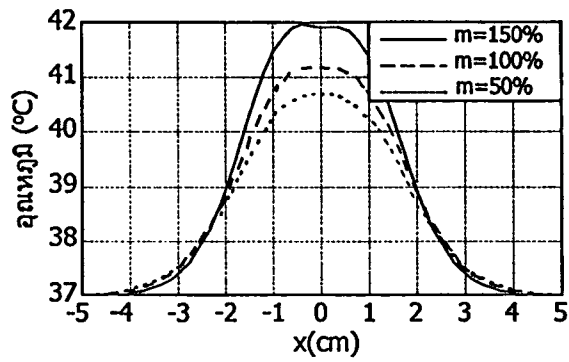
$$W_a = 9.84 \times 10^{-21} \text{ J}, \tau_0 = 2.297 \times 10^{-12} \text{ s}, U = -1.77 \times 10^{-20} \text{ J}, N_0 \frac{p_m^2}{3\epsilon_0 k_B} = 19.69,$$

$$\epsilon_\infty = 5.5, k_t = 0.55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}, h = 10.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}, C_p = 4,180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1},$$

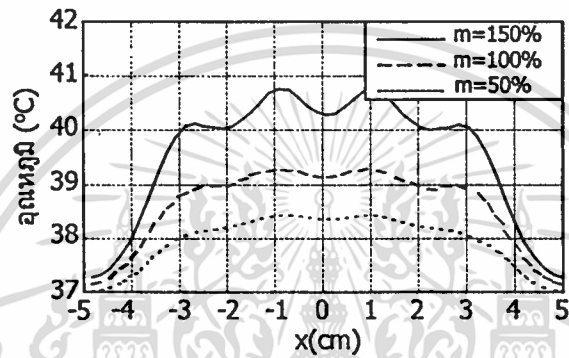
$$\rho = 1,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ และ } R_T = 152.77 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ โดยกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของตัว}$$

กลางที่มีการสูญเสียเท่ากับ 37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสียให้มีอุณหภูมิตั้งที่ 27 องศาเซลเซียส

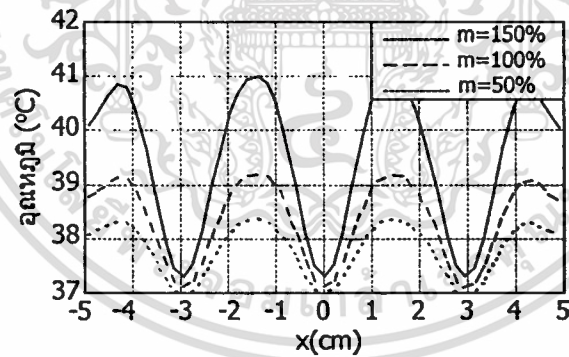
จากเงื่อนไขของการกระตุ้นสายอากาศแบบแอกทีฟ เมื่อมีการกระตุ้นสัญญาณด้วยคลื่นรูปซายน์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุต โดยการเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลต ความถี่ในการมอดูเลต และเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต ที่กระตุ้นเข้าไป



(ก)



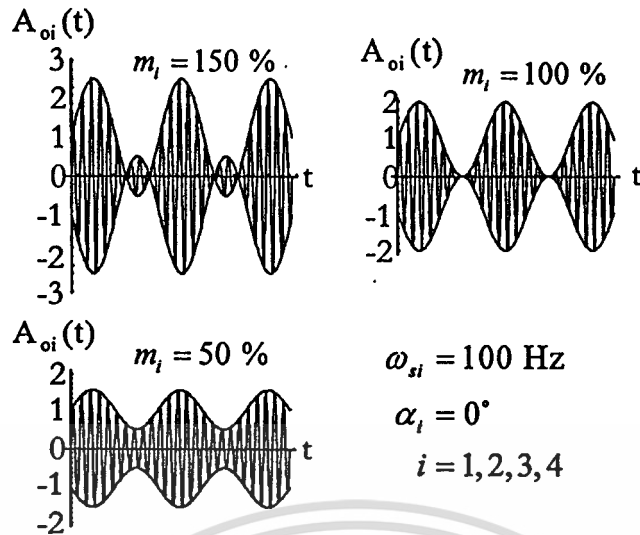
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิเมื่อดัชนีการมอดูเลตแตกต่างกัน ที่เวลาการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 (ต่อ)

- (ก) ระยะห่างระหว่างร่อง 1 เซนติเมตร
- (ข) ระยะห่างระหว่างร่อง 2 เซนติเมตร
- (ค) ระยะห่างระหว่างร่อง 3 เซนติเมตร
- (ง) รูปแบบของสัญญาณมอดูเลต

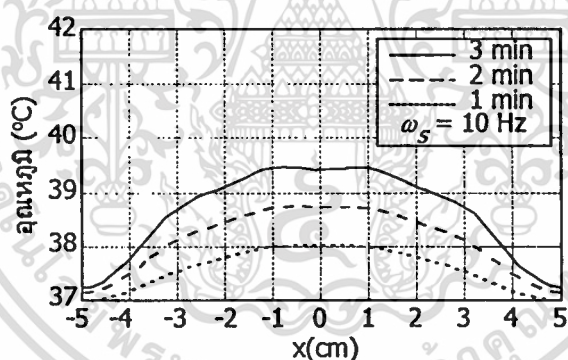
รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิเมื่อดัชนีการมอดูเลตที่แตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง 1 เซนติเมตร 2 เซนติเมตร และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ เวลาในการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาจากการที่กำหนดให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพื่อการทำลายเซลล์มะเร็งเท่ากับ 2 องศาเซลเซียสต่ออนาที คือจาก 38-41 องศาเซลเซียสและระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง ถึงผิวหนังกลางที่มีการสูญเสียเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร ความถี่ในการมอดูเลตเท่ากับ 100 Hz และเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตมีค่าเท่ากับ 0 องศา และความถี่ในการออกซิเลตของสายอากาศแบบร่องเท่ากับ 2,450 MHz ซึ่งแสดงผลจากการวิเคราะห์และรูปแบบของสัญญาณมอดูเลตได้ดังรูปที่ 4.3(ก)-(ง) แสดงให้เห็นได้ว่า ถ้าระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องมีระยะที่ชิดกัน ในพื้นที่ใช้งานอุณหภูมิจะมีค่าสูงมาก เมื่อพิจารณาจากตำแหน่งที่อุณหภูมิมีค่าครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิสูงสุดโดยแสดงในแนวแกน x แต่เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องมีระยะกว้างมากขึ้น การกระจายอุณหภูมิจะไม่สม่ำเสมอ แต่จะให้เห็นพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่กว้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ค) ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง 1 เซนติเมตร จะให้เห็นพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอแต่พื้นที่มีขนาดเล็ก และมีค่าของอุณหภูมิสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ก) แต่ที่ระยะระหว่างสายอากาศแบบร่องที่ 2 เซนติเมตร จะให้เห็นพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ และค่าของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยสรีรวิทยาและสรีรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ จังหวัดปทุมธานี ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

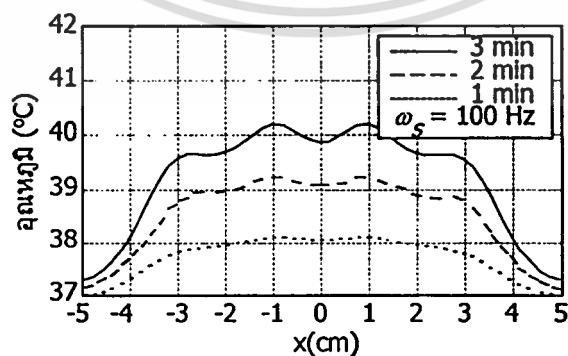
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องที่เหมาะสมแล้ว จะมาพิจารณาเมื่อดัชนีการมอดูเลตเปลี่ยนแปลง จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ถ้าดัชนีการมอดูเลตมีค่าสูงดังเช่น 150 เฮอร์เซ็นต์ จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข) แต่ถ้าดัชนีการมอดูเลตที่ 100 เฮอร์เซ็นต์ จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าของอุณหภูมิที่เหมาะสม ดังนั้นจะสรุปได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องที่ 2 เซนติเมตร และดัชนีการมอดูเลตที่ 100 เฮอร์เซ็นต์ จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด

ต่อมาเป็นการพิจารณาผลที่เกิดจากการมอดูเลตด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 โดยเวลาในการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 1 นาที 2 นาที และ 3 นาที ตามลำดับ และค่าเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตมีค่าเท่ากันในทุกสายอากาศแบบร่อง จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นได้ว่า การมอดูเลตด้วยความถี่ที่ต่ำ คือ 100 Hz จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอแต่มีค่าของอุณหภูมิที่ต่ำ แต่ถ้ามอดูเลตด้วยความถี่ที่สูงขึ้น ดังเช่นที่ 1 kHz พื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะไม่สม่ำเสมอและมีค่าอุณหภูมิสูงขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) และรูปที่ 4.4(ข) ตามลำดับ ดังนั้น ในการวิเคราะห์นี้จะใช้การมอดูเลตที่ความถี่เท่ากับ 100 Hz ซึ่งจะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและค่าของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด



(ก)

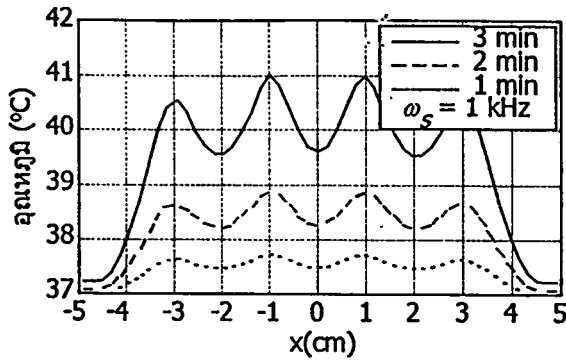


(ข)

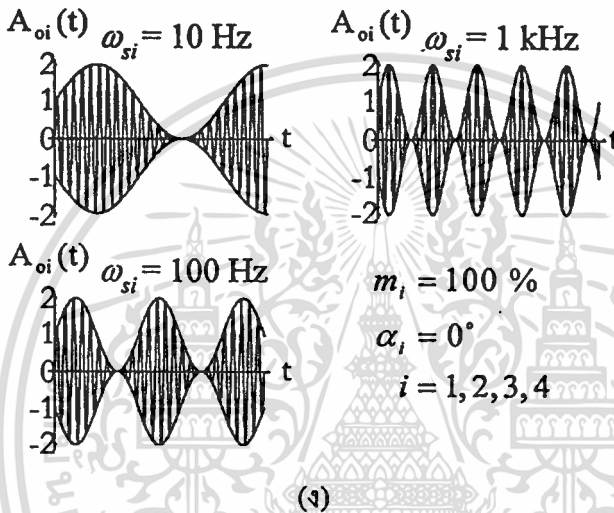
รูปที่ 4.4 แสดงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิเมื่อมีการมอดูเลตด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ง)

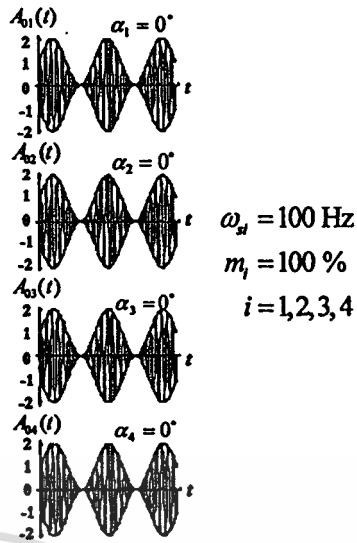
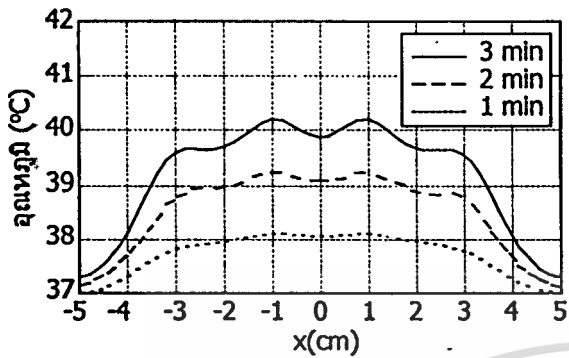
รูปที่ 4.4 (ต่อ)

(ก) $\omega_s = 10 \text{ Hz}$ (ข) $\omega_s = 100 \text{ Hz}$ (ค) $\omega_s = 1 \text{ kHz}$

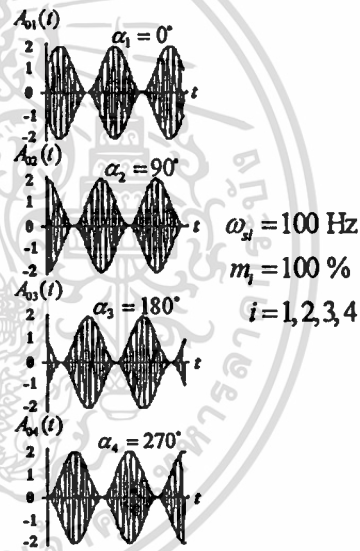
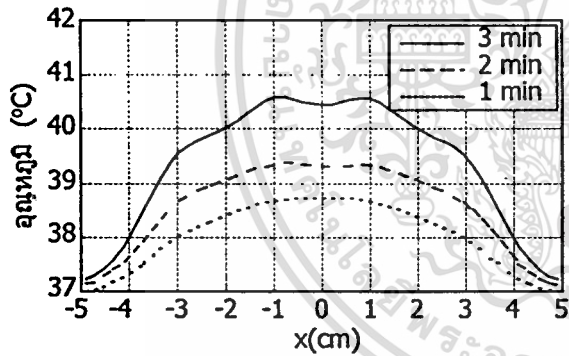
(ง) รูปแบบของสัญญาณมอดูเลต

สุดท้ายจะวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสเริ่มต้นของความถี่มอดูเลตในแต่ละสายอากาศแบบร่องที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิอย่างไร เมื่อกำหนดให้ค่าของดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง 2 เซนติเมตร ความถี่ในการมอดูเลตเท่ากับ 100 Hz แสดงผลดังรูปที่ 4.5 ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นได้ว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสเริ่มต้นของความถี่มอดูเลตที่เหมาะสมดังเช่น $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 มีค่าเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศาตามลำดับ ซึ่งจะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ข) ส่วนในรูปที่ 4.5(ก) กำหนดให้เฟสเริ่มต้นของความถี่มอดูเลต $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 มีค่าเท่ากับ 0 องศาในทุกสายอากาศแบบร่อง จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิไม่ต่ำสุดเหมือนกับในรูปที่ 4.5(ข)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 แสดงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิเมื่อเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตไม่เท่ากัน และรูปแบบของสัญญาณมอดูเลต

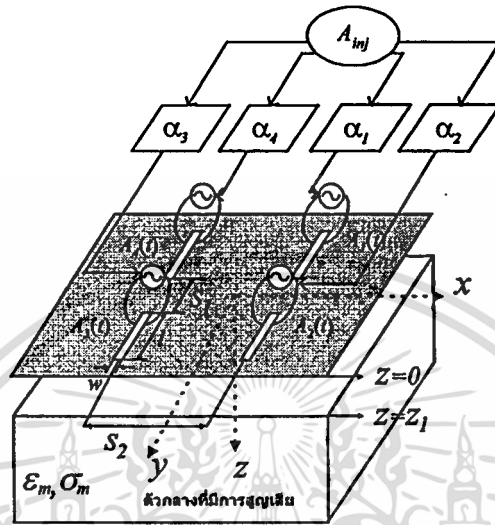
(ก) $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 เท่ากับ 0 องศา

(ข) $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 มีค่าเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ

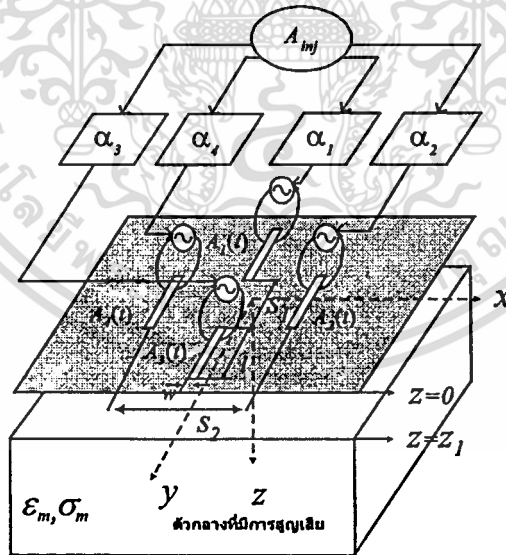
ผลจากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ และค่าของอุณหภูมิที่เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง ดังนั้นการมอดูเลต ความถี่ในการมอดูเลต และเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต ซึ่งค่าเหล่านี้จะใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบร่องต่อไป
 เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สายอากาศปล่อยคลื่นแบบแถวลำดับแอดทีฟแบบระนาบ

ในหัวข้อนี้เป็นการจัดวางสายอากาศแบบร่องแบบระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ก) และรูปที่ 4.6(ข) ซึ่งเป็นการจัดวางแบบสี่เหลี่ยมด้านขนานและสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนตามลำดับ



(ก)



(ข)

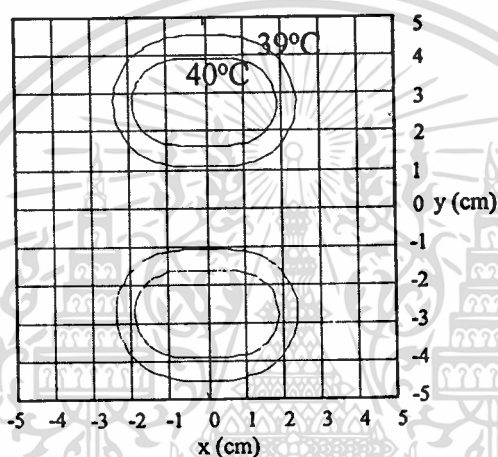
รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการจัดวางสายอากาศแบบร่องแบบระนาบ

(ก) แบบสี่เหลี่ยมด้านขนาน

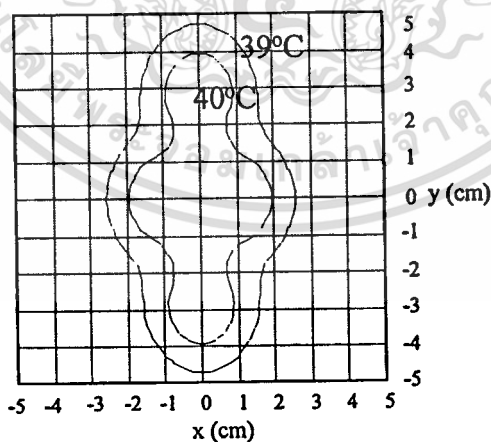
(ข) แบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์การจลวงสายอากาศแบบร่องแบบระนาบ จะหาพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ให้บริการกว้างและสม่ำเสมอ โดยจากเงื่อนไขที่เหมาะสมดังที่วิเคราะห์มาแล้วในหัวข้อของการจลวงสายอากาศแบบร่องแถวลำดับเชิงเส้น ดังเช่น คณิตกรรมการมอดูเลตที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ในการมอดูเลต 100 Hz ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง 1 เซนติเมตร และ 2 เซนติเมตร ตามลำดับ และให้เฟสเริ่มต้นของความถี่มอดูเลตเท่ากันในทุกสายอากาศแบบร่อง พื้นที่การกระจายอุณหภูมิของระนาบในรูปสี่เหลี่ยมด้านขนานที่เวลาในการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 นาที แสดงให้เห็นได้ว่า พื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะรวมกันเฉพาะในแนวแกน x แต่ในแนวแกน y จะแยกจากกัน แสดงดังในรูปที่ 4.7(ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 แสดงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิเมื่อมีการจลวงสายอากาศแบบร่องที่แตกต่างกัน

(ก) แบบสี่เหลี่ยมด้านขนาน

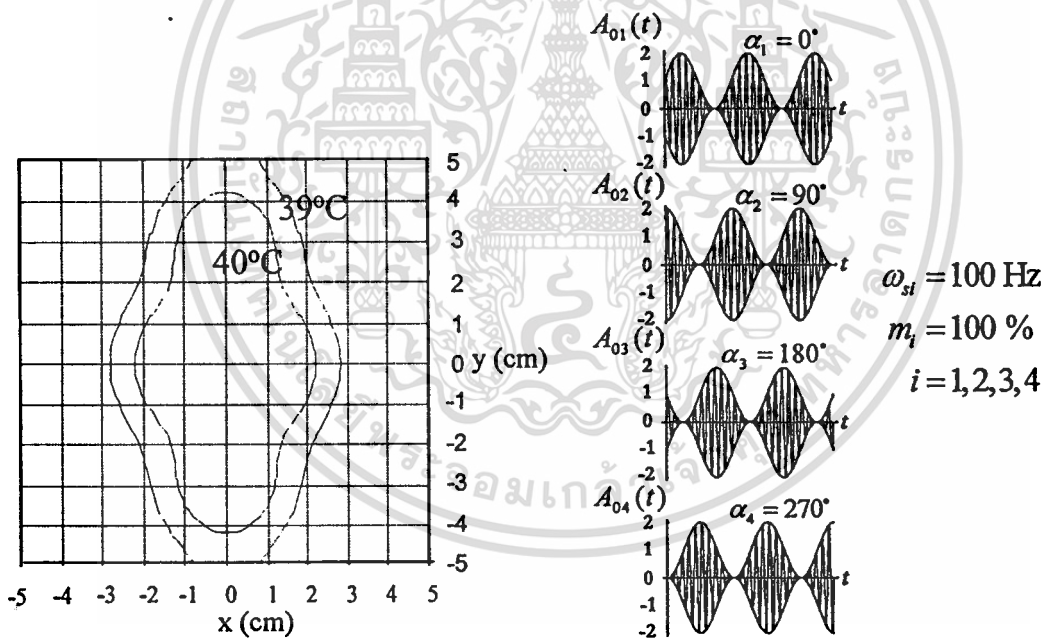
(ข) แบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการจัดวางสายอากาศแบบร่องแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิตัวรวมกันเป็นพื้นที่เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า รูปแบบในการจัดวางสายอากาศแบบร่องมีผลต่อพื้นที่การกระจายอุณหภูมิด้วยเช่นกัน

จากผลการวิเคราะห์การจัดวางรูปแบบสายอากาศแบบร่องแบบขนมเปียกปูน ซึ่งให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิตัวรวมเท่ากับ 16 ตารางเซนติเมตร ที่เวลาในการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 นาที อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 37 องศาเซลเซียส เป็น 40 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ข) และจากเงื่อนไขเดียวกันนี้ ถ้ามีการจัดให้เฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเหมาะสม คือ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 มีค่าเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ และเวลาในการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 นาทีเท่ากัน จะให้ผลของพื้นที่การกระจายอุณหภูมิตัวรวมเป็นบริเวณกว้างมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิตัวรวมที่ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิตัวรวมยังขึ้นอยู่กับการจัดเฟสเริ่มต้นของความถี่มอดูเลตที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.8 แสดงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิตัวรวมที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตที่ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 มีค่าเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ

4.3 สรุป

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของสนามไฟฟ้าให้มาอยู่ในรูปของอุณหภูมิสามารถทำได้โดยการใช้สมการการส่งผ่านความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวเกิดจากสนามไฟฟ้าที่อยู่ในเนื้อวัตถุนั้นๆ ซึ่งในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลเฉลยจากการคำนวณเชิงเลขคณิต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่สำคัญต่อการกระจายอุณหภูมิใน
ตัวกลางที่มีการสูญเสีย คือ ความสามารถในการกระจายอุณหภูมิ เวลาในการแพร่กระจายคลื่น และ
ค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้นๆ

ส่วนผลของการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ที่มีการจัดวางสาย
อากาศปล้อยคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟแบบเชิงเส้น และแบบระนาบ ซึ่งในรูปแบบการจัดวาง
แบบเชิงเส้น ใช้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และรูปแบบการ
กระจายของอุณหภูมิเมื่อขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ปล่อยไว้ในแต่ละสายอากาศไม่เท่ากัน ซึ่งทำ
ให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือ ดัชนีการมอดูเลตที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ในการมอดูเลต 100 Hz และการ
เปลี่ยนแปลงของเฟสเริ่มต้นในการมอดูเลตเท่ากับ 0 , 90 , 180 และ 270 องศา ตามลำดับ ส่วนรูป
แบบในการจัดวางสายอากาศแบบระนาบ ใช้ในการวิเคราะห์หาผลการกระจายอุณหภูมิที่ได้พื้นที่
ที่เป็นบริเวณกว้างและสม่ำเสมอ คังการจัดวางสายอากาศแบบระนาบและวางสายอากาศให้เหลื่อม
กันแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ซึ่งจะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิมิขนาดเท่ากับ 16 ตาราง
เซนติเมตร และถ้ามีการจัดให้เฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตมีค่าเท่ากับ 0 , 90 , 180 และ
270 องศา ตามลำดับ จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 20 ตารางเซนติเมตร ซึ่งผลจากการ
วิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นได้ว่า รูปแบบของการจัดวางสายอากาศปล้อยคลื่น ค่าดัชนีการมอดูเลต
ความถี่ในการมอดูเลต และการเปลี่ยนแปลงเฟสเริ่มต้นของความถี่มอดูเลต ที่เหมาะสมที่จะให้
ขนาดของพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและเป็นบริเวณกว้าง อันจะนำไปสู่การออกแบบ
สร้างและทดลองต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดลอง

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา ของสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่แสดงในบทที่ 4 ทำให้ทราบขนาดของส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่องที่เหมาะสม ตลอดจนเงื่อนไขการมอดูเลตของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อให้ได้พื้นที่การกระจายอูณหภูมิที่กว้างสม่ำเสมอ และนำมาสู่การออกแบบสร้างและวัดผลการทดลองจริงในบทนี้ ซึ่งแบ่งออกเป็นการสร้างและทดลองดังนี้คือ การสร้างสายอากาศปล่องคลื่นแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรงสี่เหลี่ยม การสร้างสารเนื้อเทียมแทนคลื่นเหนือนมนุษย์ การออกแบบชุดกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและชุดควบคุมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุต รวมไปถึงการประกอบเป็นชุดทดลองสายอากาศแบบร่องแยกกันอย่างอิสระ 4 ชุดวางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ส่วนการทดลองวัดผล ได้แก่ วัดค่าของการสูญเสียย้อนกลับ ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อยุ่ร่วมของสายอากาศแบบร่องวางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย การวัดกำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายออกจากปากสายอากาศปล่องคลื่นแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรงสี่เหลี่ยม การวัดรูปแบบของสัญญาณสเปกตรัมเพื่อแสดงเงื่อนไขของการอินเจกชันล๊อค รวมถึงการวัดการกระจายอูณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียด้วยเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลตและเฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต ตลอดจนวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง

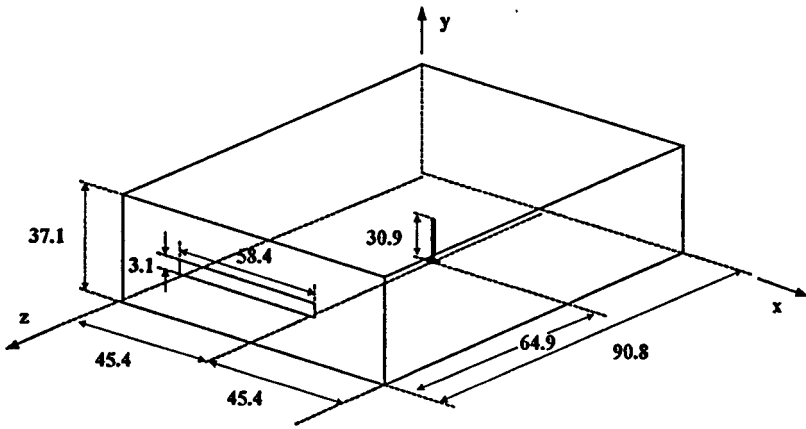
5.1 รูปแบบของปัญหาและการสร้างสายอากาศปล่องคลื่น

ได้ออกแบบสร้างสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยโพรงสี่เหลี่ยม โดยใช้วิธีการผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา [40] โดยรวมผลของสายอากาศแบบร่องวางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่ระยะห่าง 1.5 เซนติเมตร ที่ความถี่ 2,450 MHz บนแผ่นระนาบตัวนำ โดยที่ตัวกลางที่มีการสูญเสียมีความหนา 6 เซนติเมตร ขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 12x12 เซนติเมตร

ตัวกลางที่มีการสูญเสียมีส่วนประกอบของ NaCl 0.4%, NaN_3 0.02% และ Agar 4% เมื่อใช้วิธีการวัดแบบองค์ประกอบแบบก้อน (Lumped Elements) ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไมโครเวฟ (Microwave Network Analyzer HP 8720 C) [41]-[43] จะได้ค่าของ $\epsilon_m = 47$, $\sigma_m = 21 \text{ S/m}$ ที่ความถี่ 2,450 MHz

ในการทดลองได้แบ่งตัวกลางที่มีการสูญเสียเป็น 2 ชั้น โดยที่ชั้นบนมีความหนา 1 เซนติเมตร เพื่อความสะดวกในการวัดโดยแผ่นฟิล์มผลึกของเหลว (Liquid Crystal Film) วัดการกระจายอูณหภูมิที่ความลึก 1 เซนติเมตร สำหรับขนาดของสายอากาศแบบร่อง แสดงดังรูปที่ 5.1

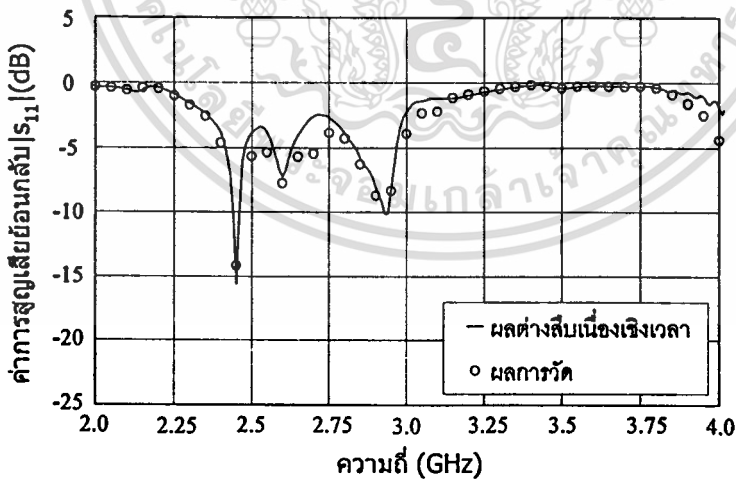
ซึ่งเป็นขนาดของสายอากาศที่อยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วย:มิลลิเมตร

รูปที่ 5.1 แสดงขนาดส่วนประกอบของสายอากาศแบบร่อง

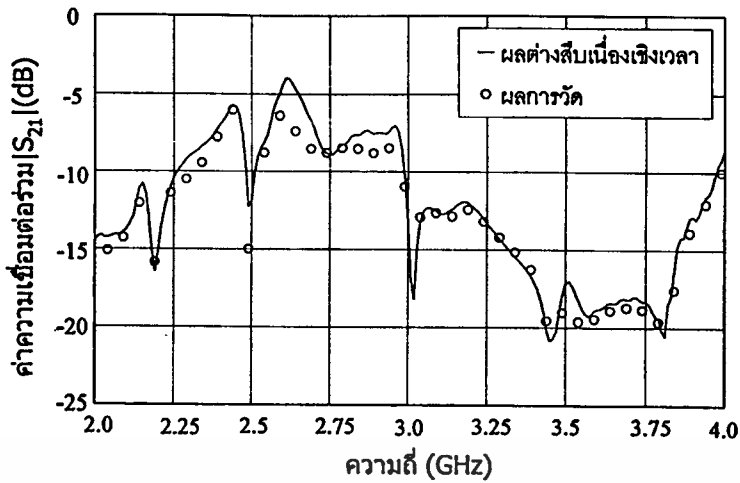
เมื่อวัดค่าของการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศพบว่ามีความถี่ 2,450 MHz ดังแสดงในรูปที่ 5.2(ก) ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไมโครเวฟ ที่ความถี่ต่าง ๆ เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ส่วนในรูปที่ 5.2(ข) เป็นการวิเคราะห์ผลของค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วม (S_{21}) ระหว่างสายอากาศแบบร่องวางอยู่ในแนวแกน x ที่ระยะห่างระหว่างขอบของสายอากาศแบบร่อง 2 ชุดเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ที่ความถี่ต่างๆ ผลจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับ การวัดที่ กำลังงานต่ำ (low power)



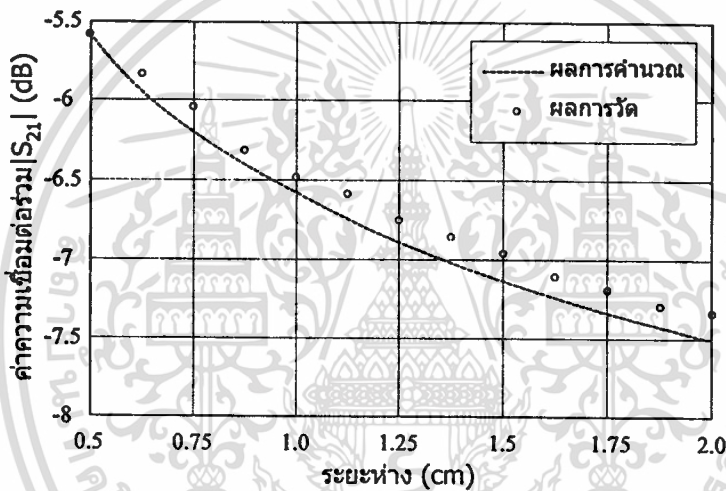
(ก)

รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วม จากกรวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา กับการวัดของสายอากาศแบบร่องที่วางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



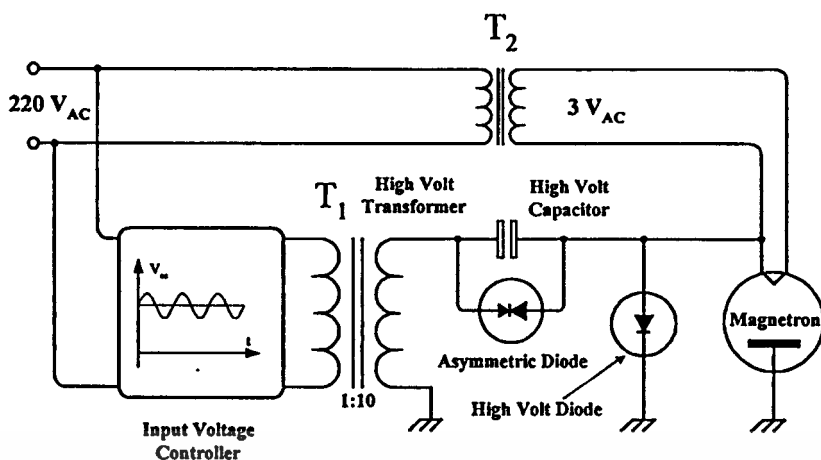
(ค)

รูปที่ 5.2 (ต่อ)

- (ก) ค่าของการสูญเสียย้อนกลับ
- (ข) ค่าของการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วม
- (ค) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วมที่ระยะต่าง ๆ

แสดงให้เห็นค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วมไปในทิศทางเดียวกัน และในรูปที่ 5.2(ค) คือการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรวัดเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องที่ระยะต่างๆ ที่ความถี่ 2,450 MHz แสดงให้เห็นได้ว่าที่ระยะห่างมากขึ้นจะทำให้ขนาดของค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อร่วมลดน้อยลง

ในส่วนของตัวกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2,450 MHz จะใช้หลอดแมกนีตรอน (Magnetron) ยี่ห้อซาร์ป # RV-MZ A 407 ส่วนวงจรกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังในรูปที่ 5.3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบเขียวระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรควบคุมการกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยการทำงาน เริ่มจากการป้อนความต่างศักย์ 3 โวลต์กระแสสลับ ที่กระแสประมาณ 8 แอมป์ ให้กับขั้วแคโทด (Cathode) เพื่อกำเนิดอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนจะถูกเร่งโดยค่ากระแสไฟตรงความต่างศักย์สูงประมาณ 14-20 กิโลโวลต์ กระแสต่ำประมาณ 20 มิลลิแอมป์ จากขั้วแคโทดสู่ขั้วแอโนดที่ได้จากหม้อแปลงผ่านวงจรการเรียงกระแส (Rectifier) โดยไดโอดและตัวเก็บประจุที่ต่อในลักษณะของวงจรทวิแรงดัน 2 เท่า กำลังงานของหลอดแมกนีตรอนสามารถกำหนดได้จากค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับขั้วแคโทดของหลอดแมกนีตรอน จากความสัมพันธ์ของหม้อแปลงแรงดันที่ขดทุติยภูมิแปรผันตรงกับแรงดันที่ขดปฐมภูมิ (High Volt Transformer T_1) ดังนั้นในการทดลองได้ใช้วารีแอก (Variac) เป็นตัวควบคุมค่าความต่างศักย์ที่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลงเพื่อปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยการปรับค่าความต่างศักย์ที่วารีแอกโดยใช้ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมสเตปมอเตอร์ (Stepping motor) เพื่อหมุนวารีแอกเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ

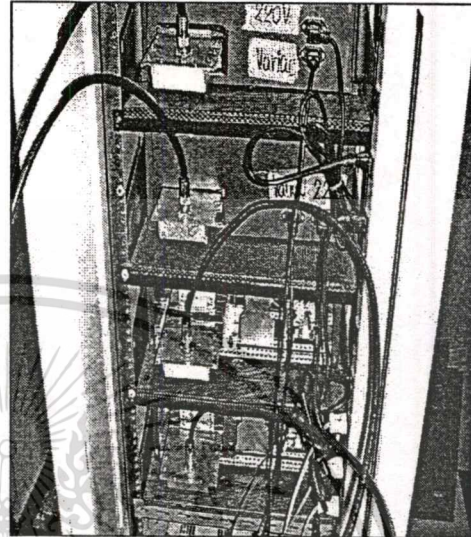
จากจุดประสงค์ที่ต้องการพิสูจน์ว่าการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่สายอากาศแบบร่องแบบระนาบแอกทิฟเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากันอย่างเหมาะสม ทำให้พื้นที่การกระจายอูมทิกกว้างขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยให้ตัวกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับตัวกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรงเมื่อนำไปต่อกับสายอากาศจะเป็นสายอากาศแบบแอกทิฟที่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดเป็นไปตามสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด โดยการควบคุมที่หม้อแปลง T_1 ให้มีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามดัชนีการมอดูเลต และที่ความเร็วการเปลี่ยนแปลงขนาดคงที่เท่ากับ 100 Hz ส่วนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดแมกนีตรอน จะส่งต่อมาทางท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง x ยาว y สูง เท่ากับ $9 \times 20 \times 3$ เซนติเมตร บริเวณปลายท่อนำคลื่นจะมีสายอากาศโมโนโพลความยาว 3 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความยาว $\lambda/4$ ของความยาวคลื่นที่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2,450 MHz ต่ออยู่กับหัวต่อสายนำคลื่นแกนร่วม RG-8/u ยาว 1 เมตร รับกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งต่อไปยังตัวสายอากาศแบบร่อง ซึ่งการออกแบบสร้างทั้งหมด 4 ชุดแยกกันอย่างอิสระดังแสดง ในรูปที่ 5.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.4 แสดงรูปถ่ายเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

(ก) รูปด้านหน้า

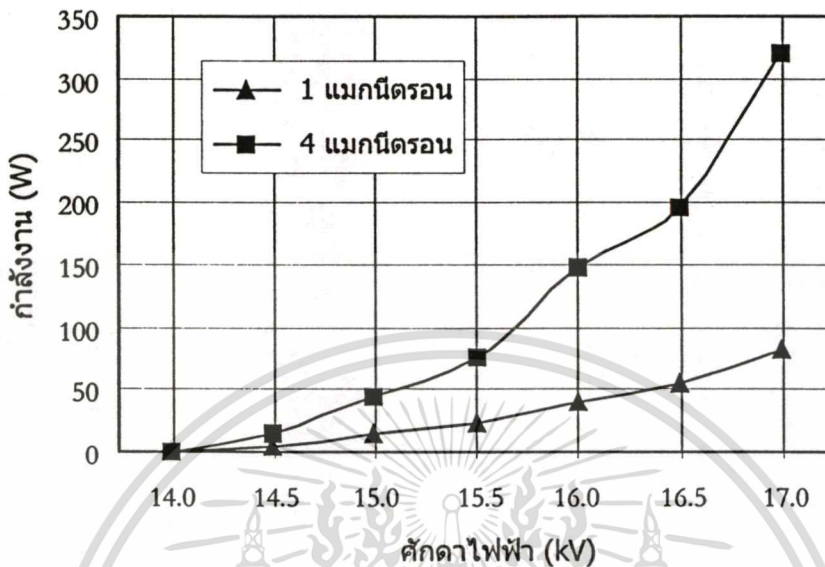
(ข) รูปด้านหลัง

5.2 การทดลองวัดการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศปล้อยคลื่นแบบแฉลวดำดับแอกทีฟ

จากการออกแบบสายอากาศแบบร่องเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียจนได้ขนาดเหมาะสมดังที่กล่าวมาแล้ว นำมาต่อเข้ากับตัวกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นหลอดแมกนีตรอน โดยที่หลอดแมกนีตรอนแต่ละตัวจะกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณได้โดยการควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้า จากนั้นได้วัดกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่จ่ายออกมาจากสายอากาศปล้อยคลื่นแบบร่องเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดแมกนีตรอน โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ [35] เพื่อที่จะวัดกำลังงานที่จ่ายออกมาจากสายอากาศแบบร่องโดยตรง และได้แสดงผลการวัดกำลังงานจากสายอากาศแบบร่อง 1 ตัวกับแบบที่จ่ายกำลังงานจากสายอากาศแบบร่องพร้อมกันทั้ง 4 ตัวที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าค่าต่างๆแสดงดังในรูปที่ 5.5

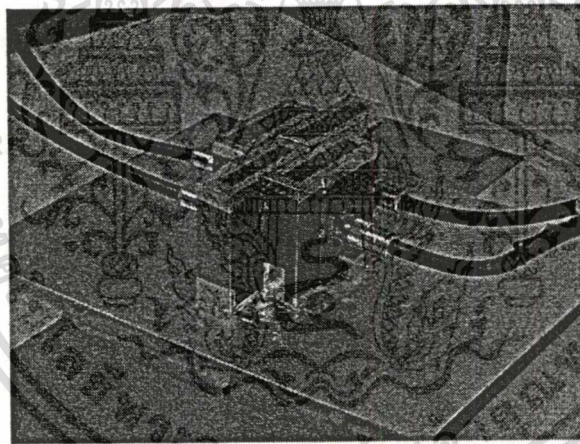
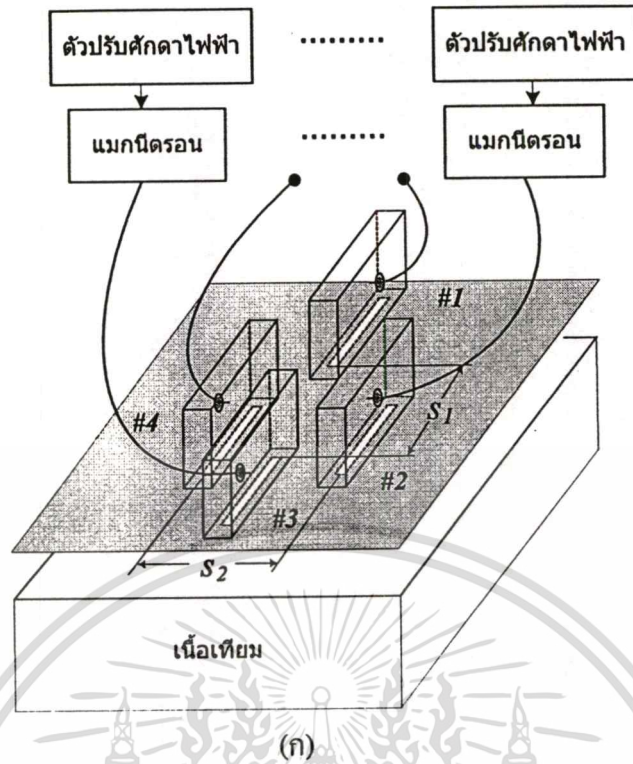
รูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นได้ว่าหลอดแมกนีตรอนจะเริ่มจ่ายกำลังงานเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 14.0 กิโลโวลต์และเมื่อมีการเพิ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้มากขึ้นกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่จ่ายออกจากสายอากาศแบบร่องจะมากขึ้นตาม ดังเช่นที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 14.5-17.0 กิโลโวลต์ กำลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่จ่ายออกมาจากสายอากาศแบบร่อง 1 ตัวมีค่าตั้งแต่ 5-80 วัตต์ แต่ถ้าให้ทำงานพร้อมกันทั้ง 4 ตัวจะให้กำลังงานมีค่าตั้งแต่ 10-320 วัตต์



รูปที่ 5.5 แสดงกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่จ่ายออกจากสายอากาศแบบร่องโดยการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดแมกนีตรอน

จากการออกแบบชุดการทดลองจำนวน 4 ชุด โดยแต่ละชุดแยกกันอย่างอิสระต่อเข้าโดยตรงกับสายอากาศปล่องคลื่นที่แสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นรูปถ่ายเครื่องต้นแบบ และในรูปที่ 5.6(ก) แสดงภาพวาดระบบการทดลอง โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่องคือ s_1 และ s_2 และสายอากาศปล่องคลื่นทั้ง 4 ชุด ต่อเข้าโดยตรงกับหลอดแมกนีตรอนซึ่งหลอดแมกนีตรอนในแต่ละชุดสามารถควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้โดยอิสระแยกจากกัน ส่วนในรูปที่ 5.6(ข) แสดงรูปถ่ายตัวสายอากาศปล่องคลื่น 4 ชุด วางแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนอยู่บนแผ่นระนาบตัวนำเชื่อมติดกัน ระยะความสูงจากตัวสายอากาศแบบร่องถึงตัวกลางที่มีการสูญเสีย 1.5 เซนติเมตร มีการระบายความร้อนด้วยลมระหว่างสายอากาศแบบร่องกับผิวตัวกลางที่มีการสูญเสียให้มีอุณหภูมิที่ผิวตัวกลางคงที่ 27 องศา ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง s_1 และ s_2 เท่ากับ 3.3 และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ชิดกัน



รูปที่ 5.6 แสดงระบบการทดลองสายอากาศปล่อยคลื่นแบบระนาบ 4 ชูด

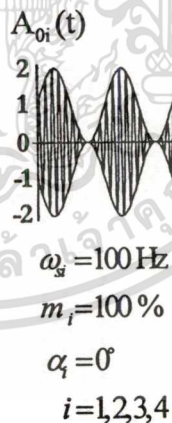
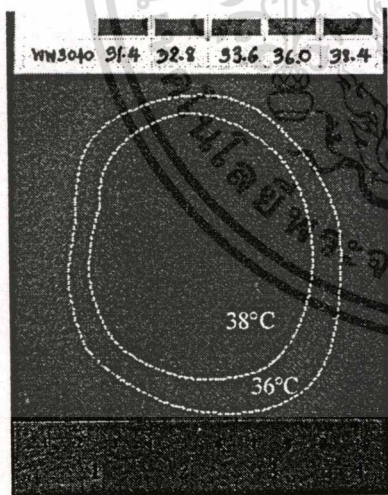
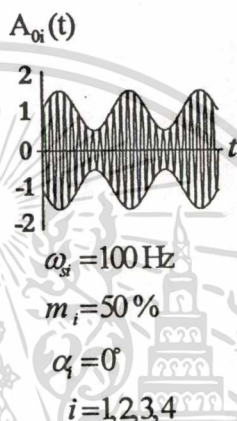
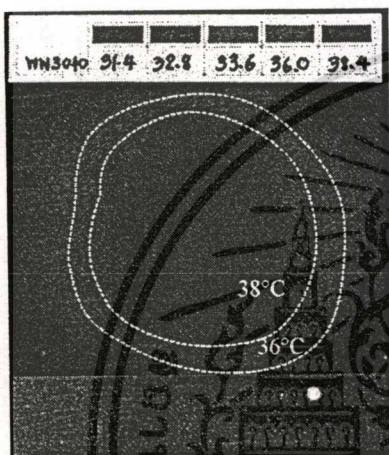
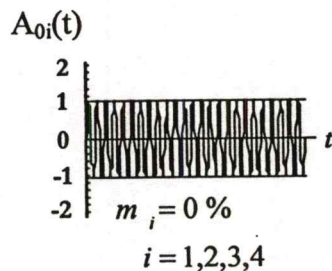
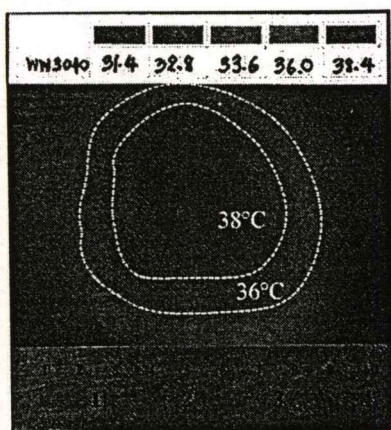
(ก) ภาพวาดระบบการทดลอง

(ข) รูปถ่ายสายอากาศปล่อยคลื่น 4 ชูด

ได้จัดการทดลองที่ความถี่ 2,450 MHz และความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเท่ากับ 100 Hz ทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณเอาต์พุตทั้งหมดเท่ากับ 0 องศา กับเฟสของขนาดสัญญาณเอาต์พุตเริ่มต้นที่ไม่พร้อมกันที่ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 คือ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

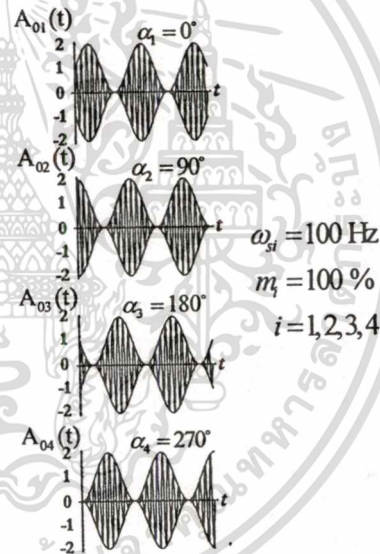
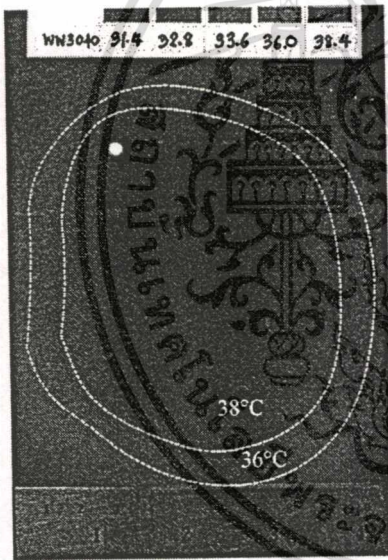
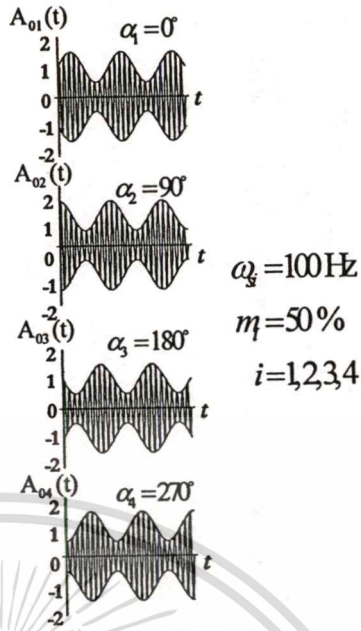
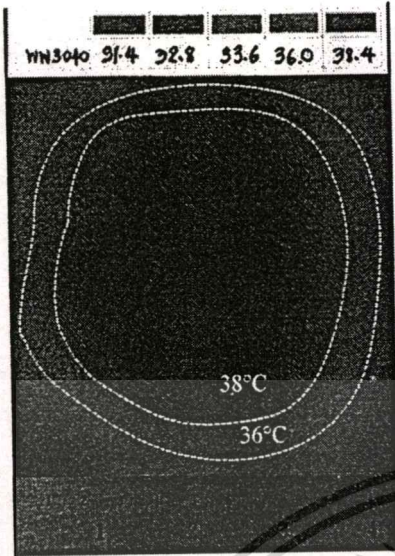
รูปที่ 5.7 แสดงขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ค่าของดัชนีการมอดูเลตที่ 0, 50 และ 100

เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟ

ฟ้าที่มีความถี่เท่ากับ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 5.7 (ต่อ)

- (ก) เฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณที่สายอากาศแบบร่องทั้งหมดเท่ากับ 0 องศา
- (ข) เฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณต่างกันที่สายอากาศแบบร่องตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 เท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ

เมื่อวัดการกระจายอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียหลังจากทำการปล่อยกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมกันทั้ง 4 ชุดนาน 2 นาที แล้วหยุดปล่อยกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยนำแผ่นฟิล์มผลึกของเหลว ทาบลงไปที่ชั้นของตัวกลางที่มีการสูญเสียที่มีความลึก 1 เซนติเมตร โดยการออก

เอกสแบบให้ตัวกลางที่มีการสูญเสียมีความหนา 1 เซนติเมตร ในชั้นบนแล้วจึงยกออกทาบแผ่นฟิล์มผลึก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลว โดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวกลางที่มีการสูญเสียอยู่ที่ 27 องศา จากนั้นวัดขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิ [44] แสดงดังรูปที่ 5.7

การเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลตและเฟสเริ่มต้นของขนาดที่ไม่เท่ากัน ทำได้โดยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการควบคุมที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดแมกนีตรอน ซึ่งในการทดลองนี้จะควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าอยู่ในช่วง 15.5-16.0 กิโลวัตต์ หรือ 80-150 วัตต์ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าพื้นที่การกระจายอุณหภูมิกว้างมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มดัชนีของการมอดูเลต ดังรูปที่ 5.7(ก) ขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ 38 ที่ดัชนีการมอดูเลต 0, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 49, 64 และ 72 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และจะมีพื้นที่กว้างมากขึ้นอีก ถ้ามีการจัดให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเฟสเริ่มต้นที่ไม่เท่ากันอย่างเหมาะสม ดังรูปที่ 5.7(ข) ขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ 38 องศา ที่ดัชนีการมอดูเลต 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 81 และ 90 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลจากการจัดให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเฟสเริ่มต้นที่เหมาะสมดังกล่าวมาแล้วตามรูปที่ 5.7(ข) นำมาทำการทดลองเปรียบเทียบที่ระยะ s_1 และ s_2 ต่างๆ กับการเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลตที่เปอร์เซ็นต์แตกต่างกัน ทำให้ได้ขนาดของพื้นที่การกระจายอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 5.1

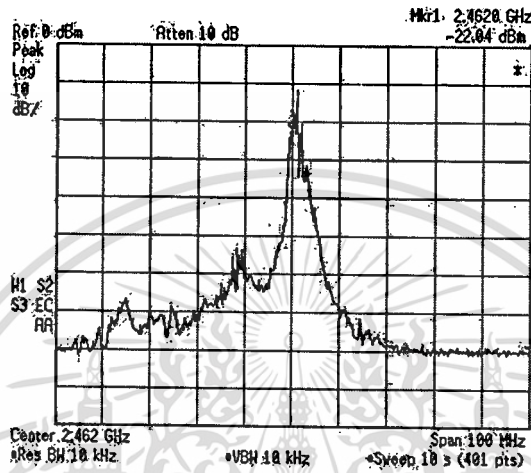
ตารางที่ 5.1 แสดงขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ ระยะห่าง s_1 และ s_2 ต่างๆกัน เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงดัชนีการมอดูเลต เมื่อเฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณที่ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 เท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ (ω_s) เท่ากับ 100 Hz

ระยะห่าง s_1 (cm)	ระยะห่าง s_2 (cm)	ดัชนีการมอดูเลต %				
		0	30	50	80	100
3.3	7.5	49cm ²	64 cm ²	81 cm ²	85 cm ²	90 cm ²
3.8	8.5	60 cm ²	75 cm ²	90 cm ²	97 cm ²	100 cm ²
4.3	9.5	70 cm ²	81 cm ²	95 cm ²	99 cm ²	109 cm ²
4.8	10.5	-	-	-	-	-

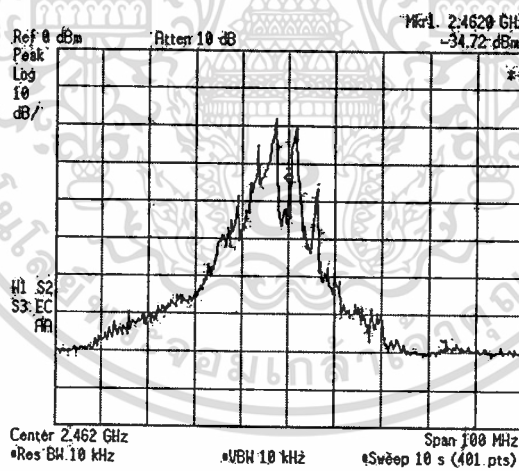
จากตารางผลการทดลอง แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง s_1 และ s_2 มากขึ้นและดัชนีการมอดูเลตเพิ่มขึ้น จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ 38 องศา มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากการศึกษาจากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นตามของขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับเวลาการปล่อยกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย กล่าวคือเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง ขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตาม แต่อัตราการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อพื้นที่ที่จะลดลง จึงจะต้องเพิ่มเวลาในการปล่อยกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจนได้อุณหภูมิตามต้องการ ซึ่งในการทดลองจากกรณีที่ระยะห่างระหว่างร่อง s_1 และ s_2 เท่ากับ 4.3 และ 9.5 เซนติเมตร ตามลำดับ เพิ่มเวลามากขึ้นอีก 0.15 นาที และเมื่อระยะห่างระหว่างร่องที่ s_1 และ s_2 เท่ากับ 4.8 และ 10.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลของการกระจายอุณหภูมิเริ่มไม่สม่ำเสมอ แม้จะเพิ่มเวลาในการปล่อยกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้มากขึ้นก็ตาม



(ก)



(ข)

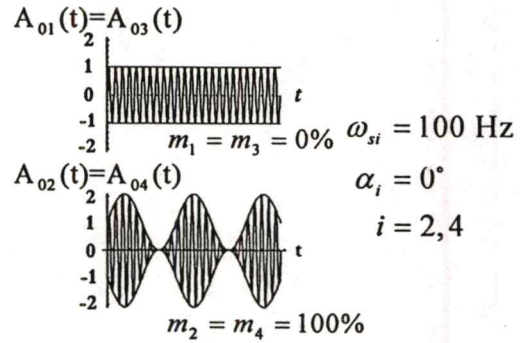
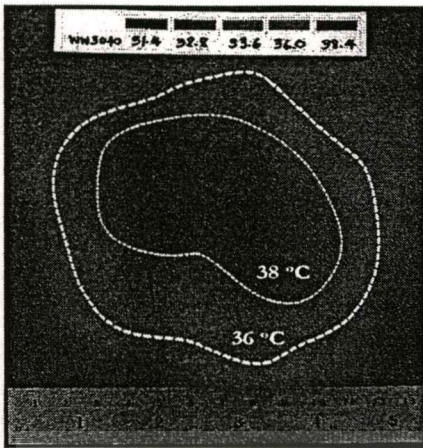
- รูปที่ 5.8 แสดงรูปแบบของสัญญาณสเปกตรัม โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม โดยกำหนดให้
 ความกว้างของสัญญาณภาพ (Video bandwidth) 10 kHz เวลาในการกวาด (sweep time) 10 s สเกลตามแนวตั้ง 10 dB/ช่อง สเกลตามแนวนอน 10 MHz/ช่อง
 (ก) เมื่ออยู่ในเงื่อนไขของการอินเจกชันล๊อค
 (ข) ไม่อยู่ในเงื่อนไขของการอินเจกชันล๊อค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

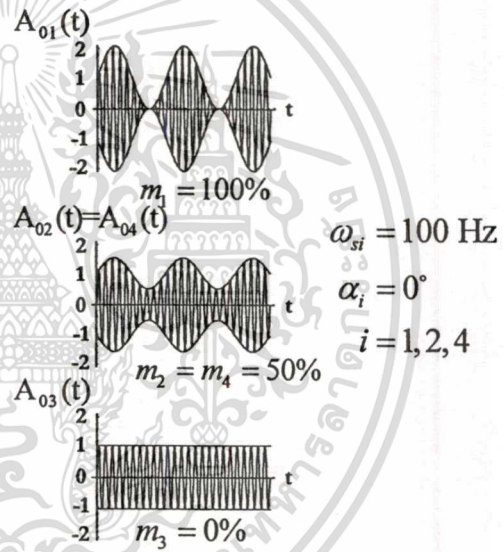
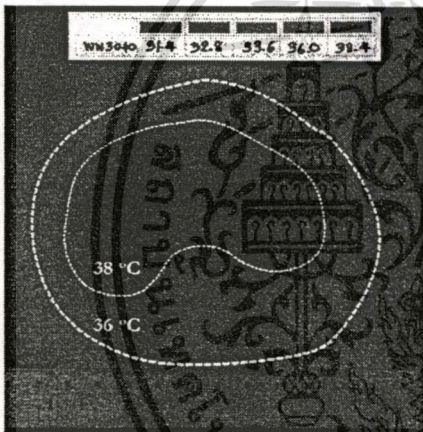
และจากการทดลองโดยอาศัยหลักการของอินเจกชันล๊อค ระหว่างสายอากาศแบบร่องแอกทีฟในแต่ละชุดรวมกัน ซึ่งสามารถแสดงผลของสัญญาณสเปกตรัมเมื่อเกิดการอินเจกชันล๊อคและสัญญาณสเปกตรัมของสัญญาณไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขของการ อินเจกชันล๊อค แสดงดังรูปที่ 5.8 และจากการศึกษาจากผลการทดลองยังพบว่าถ้าสัญญาณสเปกตรัมขณะทำการทดลองพร้อมกันทั้ง 4 ชุดไม่เป็นไปตามลักษณะดังสัญญาณสเปกตรัมที่ 5.8(ก) คือรูปแบบของสัญญาณสเปกตรัมแคบความถี่ศูนย์กลาง เท่ากับ 2.4625 GHz แล้ว จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่จุดเชื่อมต่อของตัวสายอากาศ รวมไปถึงสายโคแอกเชียลหรือในบางครั้งการกระจายอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียจะเกิดเป็นจุดความร้อนเฉพาะพื้นที่ที่ไม่สามารถควบคุมให้เป็นไปตามที่คาดการณ์ได้ ดังนั้นในการทดลองทุกครั้งจะต้องสังเกตสัญญาณสเปกตรัมให้เป็นดังรูปที่ 5.8(ก) จากการสังเกตผลการทดลองอาจเกิดจากรูปแบบการวางสายอากาศ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบร่อง

ในรูปที่ 5.8(ก) แสดงรูปแบบสัญญาณสเปกตรัม เมื่อสายอากาศแอกทีฟทำงานพร้อมกันในเงื่อนไขเดียวกับการทดลอง จะเห็นได้ว่ารูปแบบของสัญญาณสเปกตรัมแคบ ความถี่ศูนย์กลาง เท่ากับ 2.4625 GHz อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(Signal-to-noise ratio) ประมาณ 20 dB ส่วนในรูปที่ 5.8(ข) แสดงรูปแบบสัญญาณสเปกตรัมซึ่งอยู่ในเงื่อนไขการทดลองเช่นเดียวกัน แต่สายอากาศแบบร่องแอกทีฟทำงานเพียงชุดเดียว หรือไม่อยู่ในเงื่อนไขการอินเจกชันล๊อค ดังเช่น จากรูปแบบการจัดวางสายอากาศ หรือเพิ่มระยะห่างของสายอากาศแบบแอกทีฟจนมีรูปแบบสัญญาณสเปกตรัมต่างจากรูปที่ 5.8(ก) จะเห็นได้ว่าความถี่ศูนย์กลางมีหลายความถี่ ค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น รูปแบบของสัญญาณสเปกตรัมจะกว้าง [45]

ได้ทำการทดลองที่แสดงให้เห็นได้ว่ารูปแบบของพื้นที่การกระจายอุณหภูมิสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการกำหนดเงื่อนไขของดัชนีการมอดูเลตในแต่ละสายอากาศแบบร่องที่เหมาะสมดังในรูปที่ 5.9(ก) พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ 38 องศา เวลาในการปล่อยกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 นาฬิกา พื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะเอียงมาทางสายอากาศแบบร่องที่มีดัชนีของการมอดูเลตที่สูงกว่าคือมีค่า 100 เปอร์เซนต์ ที่สายอากาศแบบร่อง 2 และ 4 ส่วนรูปที่ 5.9(ข) พื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะมีค่าอุณหภูมิสูง ที่สายอากาศแบบร่อง ที่1 และพื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะลดลงตามดัชนีของการมอดูเลตที่สายอากาศแบบร่อง ที่ 3 คือ 0 เปอร์เซนต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.9 แสดงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิเมื่อดัชนีการมอดูเลตในแต่ละสายอากาศแบบร่องไม่เท่ากัน โดยที่เฟสเริ่มต้นเท่ากับ 0 องศา ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณที่ 100 Hz (ก) ดัชนีการมอดูเลตที่สายอากาศแบบร่อง 2 และ 4 เท่ากับ 100 % ที่ 1 และ 3 เท่ากับ 0% (ข) ที่สายอากาศแบบร่อง 1 เท่ากับ 100% ที่ 2 และ 4 เท่ากับ 50% และร่อง ที่ 3 เท่ากับ 0%

5.3 สรุป

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาในการหาขนาดส่วนประกอบของสายอากาศปลอยคลื่นเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลที่เกิดจากเงื่อนไขของการมอดูเลตสัญญาณเอาต์พุตที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้างนำมาสู่การออกแบบสร้างและวัดผลการทดลองในบ้นนี้ โดยเริ่มจากการสร้างสายอากาศปลอยคลื่นแบบร่องที่ป้อนด้วยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรงสี่เหลี่ยม ค่าของการสูญเสียย้อนกลับที่วางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย ที่ความถี่ 2,450 MHz มีค่าเท่ากับ -17 dB และค่าของการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อยุบรวมของสายอากาศ 2 ชุดวางในแนวแกน x ที่ระยะห่างของขอบสายอากาศเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งจากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 และเปรียบเทียบกับกราฟแสดงได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศร่อนมากขึ้นจะทำให้ขนาดของค่าการสูญเสียการส่งผ่านเชื่อมต่อยุบรวมลดน้อยลง ในส่วนของชุดกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2,450 MHz ใช้หลอดแมกนีตรอนซึ่งจะแยกกันอย่างอิสระในแต่ละชุดของสายอากาศทั้ง 4 ชุด และการควบคุมให้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากันตามดัชนีการมอดูเลตที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่ 100 Hz กระทำโดยการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดแมกนีตรอน การวัดกำลังงานที่แพร่กระจายออกมาโดยตรงจากสายอากาศแบบร่องกระทำโดยการวัดกำลังงานเฉลี่ยด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำซึ่งจะได้กำลังงานตามการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ 14.5-17 กิโลวัตต์ ที่สายอากาศทั้ง 4 ชุดทำงานพร้อมกัน ได้กำลังงานเท่ากับ 10-320 วัตต์

ในการทดลองสายอากาศปล่อยคลื่นจำนวน 4 ชุดแยกกันอย่างอิสระ ที่ความถี่ 2,450 MHz ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 100 Hz เมื่อให้ดัชนีการมอดูเลตต่างกันคือ 0, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ เฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 0 องศาให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่ 38 องศาเท่ากับ 49, 64 และ 72 ตารางเซนติเมตรตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อดัชนีการมอดูเลตมีค่ามากขึ้นจะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้น และเมื่อให้เฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณเอาต์พุตไม่เท่ากันที่ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่เพิ่มกว้างมากขึ้นอีก ดังเช่นที่ดัชนีการมอดูเลต 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ จะให้พื้นที่เท่ากับ 81 และ 90 ตารางเซนติเมตรตามลำดับ และยังสามารถควบคุมพื้นที่การกระจายอุณหภูมิให้ได้ในตำแหน่งที่ต้องการ โดยการควบคุมดัชนีการมอดูเลต กล่าวคือ พื้นที่การกระจายอุณหภูมิจะอยู่ในตำแหน่งของสายอากาศที่มีค่าดัชนีการมอดูเลตสูงที่สุด และในการทดลองจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการอินเจกชันล๊อคของสายอากาศแบบแอกทีฟ

สรุปผลและวิจารณ์

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ เทคนิคใหม่ในการทำให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียกว้างและสม่ำเสมอ คือการใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด โดยการปรับดัชนีมอดูเลต ความถี่ในการมอดูเลต เฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศปล่องคลื่นได้ทุกแบบ นอกจากนี้ยังได้นำมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศปล่องคลื่นแบบแอกทีฟที่ทำการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอกแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาดได้โดยตรง แล้วทำให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งจะช่วยให้ลดปัญหาความซับซ้อนในการควบคุมที่ต้องใช้วงจรขยายสัญญาณและวงจรลดทอนสัญญาณเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางขนาด ของสัญญาณเอาต์พุต

การศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์ทฤษฎีสายอากาศแบบแอกทีฟที่มีการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอก แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางขนาดและเฟสของสัญญาณเอาต์พุตได้ รวมไปถึงการวิเคราะห์รูปแบบเงื่อนไข แสดงสมการความสัมพันธ์ของสัญญาณจากภายนอกที่จะมากระตุ้นให้กับสายอากาศแบบแอกทีฟ แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะขนาดของสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นไปตามรูปแบบของสัญญาณที่มากระตุ้นให้กับสายอากาศแบบแอกทีฟนั้น

จากหลักการของสายอากาศแบบแอกทีฟ เมื่อขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงได้จากการกระตุ้นด้วยสัญญาณภายนอก นำมาสู่การวิเคราะห์หาคูสมบัตินิยของสายอากาศปล่องคลื่นแบบแถวลำดับแอกทีฟเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา เพื่อวิเคราะห์หาการกระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อขนาดในแต่ละสายอากาศป้อนคลื่นเปลี่ยนแปลงไป รวมไปถึงการวิเคราะห์หาขนาดส่วนประกอบของสายอากาศปล่องคลื่นที่ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับคิตีที่สุดเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

จากการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป และจากค่าของสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่มีการสูญเสียนี้นำมาสู่การวิเคราะห์หาการกระจายอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา และได้แสดงถึงสมการการกระจายอุณหภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสย รวมไปถึงการวิเคราะห์สายอากาศแบบร่องแอกทีฟเชิงเส้น และแบบระนาบ ซึ่งการวิเคราะห์สายอากาศแบบเชิงเส้น เป็นการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมของดัชนีมอดูเลต ความถี่ในการมอดูเลต เฟสเริ่มต้นของความถี่ในการคำนวณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมอดูเลตที่จะทำให้ได้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าอุณหภูมิเหมาะสม กล่าวคือ ค่าของดัชนีมอดูเลตที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ในการมอดูเลตเท่ากับ 100 Hz เฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลตเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์แบบระนาบ เป็นการวิเคราะห์หาพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่กว้างและสม่ำเสมอที่สุด ซึ่งได้จากรูปแบบการจัดวางสายอากาศแบบร่องแบบระนาบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

ในส่วนของ การทดลอง ได้ออกแบบสร้างสายอากาศปล่องคลื่นแบบร่อง ที่ป้อนด้วยโพรงสี่เหลี่ยม วัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบร่องวางอยู่เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียแทนกล้ำมเนื้อมนุษย์ที่ระยะห่าง 1.5 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ -17 dB

ได้วัดการกระจายอุณหภูมิด้วยแผ่นฟิล์มผลึกของเหลวที่ระยะความลึก 1 เซนติเมตรจากหัวตัวกลางที่มีการสูญเสียจากการปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านาน 2 นาที โดยที่สายอากาศทั้ง 4 ชุดจัดวางเป็นแบบระนาบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ในแต่ละชุดสายอากาศแบบร่องสามารถควบคุมให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตแตกต่างกันอย่างอิสระ โดยการควบคุมจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดแมกนีตรอนโดยจะอยู่ในช่วง 15.5-16.0 กิโลวัตต์หรือที่กำลังงานเท่ากับ 80-150 วัตต์ ซึ่งการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตนี้ให้เป็นไปตามดัชนีการมอดูเลตที่ค่าต่างๆ โดยความถี่ในการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณเท่ากับ 100 Hz ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่า ที่ดัชนีการมอดูเลตมีค่ามาก จะให้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิมีขนาดเพิ่มมากขึ้น และถ้ามีการจัดให้มีค่าเฟสเริ่มต้นของขนาดสัญญาณที่ไม่เท่ากันอย่างเหมาะสม คือเท่ากับ 0, 90, 180 และ 270 องศา ตามลำดับด้วยแล้ว จะให้ขนาดพื้นที่การกระจายอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้นไปอีก และการทดลองนี้จะต้องอยู่ภายในเงื่อนไขของอินเจกชันลีดของสายอากาศแบบแอดทีฟ

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การกระจายอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในตัวกลางที่มีการสูญเสียด้วยวิธีควบคุมการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด ทำให้ได้พื้นที่การกระจายอุณหภูมิเป็นบริเวณกว้างมากขึ้นและสม่ำเสมอ โดยการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการมอดูเลต ความถี่ในการมอดูเลต เฟสเริ่มต้นของความถี่ในการมอดูเลต ในแต่ละส่วนประกอบของสายอากาศปล่องคลื่นโดยตรง

และในขณะเดียวกันได้นำเทคนิคดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบแอดทีฟ โดยการกระตุ้นจากสัญญาณภายนอก แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบของมอดูเลตเชิงขนาดได้โดยตรง ซึ่งทำให้ลดความยุ่งยากซับซ้อนของวงจรควบคุมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณมอดูเลต โดยที่ขนาดในแต่ละส่วนประกอบของสายอากาศแบบแอดทีฟจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของสัญญาณภายนอกที่มากระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์และทดลองนี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะขนาดของสัญญาณเอาต์พุตในแต่ละส่วนประกอบของสายอากาศแบบแอกทิฟ ที่ทำให้ได้พื้นที่การกระจายอณูภูมิเป็นบริเวณกว้างและสม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณเอาต์พุตในแต่ละส่วนประกอบของสายอากาศที่มีการนำเสนอฟลางงานวิจัยเป็นจำนวนมากก่อนหน้านี้ ด้วยเหตุนี้ ถ้าทำการกระตุ้นแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและเฟสที่สัมพันธ์กันอย่างเหมาะสมในแต่ละส่วนประกอบของสายอากาศแบบแอกทิฟ น่าจะเป็นหนทางที่ดีต่อการกระจายอณูภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียว่าการควบคุมอย่างใดอย่างหนึ่ง

6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การกระจายอณูภูมิในตัวกลางที่มีการสูญเสียได้ ด้วยการกระตุ้นไปที่สายอากาศแบบแอกทิฟด้วยรูปแบบของสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด ดังนั้นการวิเคราะห์ในตัวกลางที่มีการสูญเสียจึงกระทำเฉพาะการสมมุติที่กล้ำเนื้อมนุษย์เท่านั้น ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ดังนั้น ในขั้นตอนต่อไปจึงควรมีการวิเคราะห์ผลรวมของชั้นผิวหนัง ชั้นไขมัน ส่วนของกล้ำเนื้อ เส้นเลือด ตลอดจนอัตราการไหลของเลือดและส่วนของกระดูก ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา ซึ่งสามารถรองรับการวิเคราะห์ในส่วนต่างๆ ต่อไปนี้ได้

บรรณานุกรม

- [1] Navaro J.A. and Chang K. **Integrated active antennas and spatial power combining.**:John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [2] York R.A. and Compton R.C. "Quasi-optical power combining using mutually synchronized oscillator arrays." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.39, no.6, June 1991. pp.1000-1009.
- [3] Birkeland J. and Itoh T. "A 16 element quasioptical FET oscillator power combining array with external injection locking." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.40, no.3, Mar. 1992. pp.475-481.
- [4] Rahman M., Ivanov T. and Mortazawi A. "A 26 MESFET spatial power-combining oscillator." *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol.7, no.4, Apr. 1997. pp.100-102.
- [5] Liao P. and York R.A. "A new phase-shifterless beam scanning technique using arrays of coupled oscillators." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.41, no.10, Oct. 1993. pp.1810-1815.
- [6] Lin J., Chew S.T. and Itoh T. "A unilateral injection-locking type active phased array for beam scanning." *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, San Diego, CA, May 1994. pp.1231-1234.
- [7] Chew S.T., Tong T.K., Wu M.C. and Itoh T. "Use of direct-modulated/gain-switched optical links in monopulse-type active phased array systems." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.44, no.2, Feb.1996. pp.326-330.
- [8] Chou Y.H. and Chung S.J. "Design of a beam-switching active microstrip antenna array." *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol.8, no.5, May 1998. pp.202-204.
- [9] Navaro J.A., Fan L. and Chang K. "Active inverted stripline circular patch antennas for spatial power combining." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.41, no.10, Oct. 1993. pp.1856-1863.
- [10] Thongsopa C., Krairiksh M., Srirattana N. and Intarapanich A. "A single patch beam steering antenna." *Proc. 2000 Asia-Pacific Microwave Conference*, Dec. 2000. pp.1510-1513.
- [11] Jones K.M., Mechling J.A., Trembly B.S. and Strohbehn J.W. "SAR distributions for 915 MHz interstitial microwave antennas used in hyperthermia for cancer therapy." *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.35, no.10, Oct. 1988. pp.851-857.

- [12] Camart J.C., Fabre J.J., Prevost B., Pribetich J. and Chive M. "Coaxial antenna array for 915 MHz interstitial hyperthermia : design and modelization-power deposition and heating pattern -phase array." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.40, no.12, Dec. 1992. pp.2243-2250.
- [13] Saito K., Hayashi Y., Yoshimura H. and Ito K. "Heating characteristics of array applicator composed of two coaxial-slot antennas for microwave coagulation therapy." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.48, no.11, Nov. 2000. pp.1800-1806.
- [14] Gu Z., Rappaport C.M., Wang P.J. and Vander B.A. "Development and experimental verification of the wide-aperture catheter-based microwave cardiac ablation antenna." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.48, no.11, Nov. 2000. pp.1892-1900.
- [15] 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.
- [16] Lee E.R., Wilsey T.R., Hornoch P.T., Kapp D.S., Fessenden P., Lohrbach A. and Prionas S.D. "Body conformable 915 MHz microstrip array applicators for large surface area hyperthermia." IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.39, no.5, May 1998. pp. 470- 483.
- [17] Stauffer P.R., Rossetto F., Leoncini M. and Gentilli G.B. "Radiation patterns of dual concentric conductor microstrip antennas for superficial hyperthermia." IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.45, no.5, May 1998. pp.605-613.
- [18] Kowalski M.E. and Jin J.M. "Determination of electromagnetic phased-array driving signals for hyperthermia based on a steady-state temperature criterion." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.48, no.11, Nov. 2000. pp.1864-1873.
- [19] Tremblay B.S., Wilson A.H., Havard J.M., Sabatakakis K. and Strohbehn J.W. "Comparison of power deposition by in-phase 433 MHz interstitial antenna array hyperthermia systems." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.36, no.5, May 1988. pp.908-916.
- [20] Zhang Y., Zhang W.T. and Oleson J.R. "Heating patterns generated by phase modulation of a hexagonal array of interstitial antennas." IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.38, no.1, Jan. 1991. pp.92-97.
- [21] Hand J.W., Cheetham J.L. and Hind A.J. "Absorbed power distributions from coherent microwave arrays for localized hyperthermia." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.34, no.5, 1986. pp.484-489.
- [22] Chen J.Y. and Gandhi O.P. "Numerical simulation of annular-phased arrays of dipoles for hyperthermia of deep-seated tumors." IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.39, no.3, Mar. 1992.

pp.209-216.

- [23] Deng T. "Use of the field-iteration method in studying the three-dimensional phased array for electromagnetic hyperthermia." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.44, no.10, Oct. 1996. pp.1778-1787.
- [24] Nikita K.S., Maratos N.G. and Uzunoglu N.K. "Optimization of the deposited power distribution inside a layered lossy medium irradiated by a coupled system of concentrically placed waveguide applicators." *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.45, no.7, July 1998. pp.909-920.
- [25] Krairiksh M., Thongsopa C. and Mearnchu A. "A steerable active applicator." *Proc. 1998 Asia-Pacific Microwave Conference*, vol.2, Dec.1998. pp.861-864.
- [26] Krairiksh M., Thongsopa C., Srimoon D. and Mearnchu A. "Analysis of steerable active slot array applicator." *Proc. 1999 Asia-Pacific Microwave Conference*, vol.2, Dec. 1999. pp.489-492.
- [27] Van Der Pol B. "The nonlinear theory of electric oscillation." *Proc. IRE*, vol.22, no.9, Sept. 1934. pp.1051-1085.
- [28] Adler R. "A study of locking phenomena in oscillators." *Proc. IRE*, vol.34, June 1946. pp.351-357.
- [29] Thongsopa C., Krairiksh M., Mearnchu A. and Srimoon D. "Analysis and Design of Injection Locking Steerable Active Array Applicator." accepted for publication in *IEICE Trans. Communications* in Oct. 2002.
- [30] Berenger J.P. "Perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves." *J. Computat. Phys.*, vol. 114, Oct. 1994. pp. 185-200.
- [31] Yee K.S. "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, no. 8, May 1966. pp. 302-307.
- [32] Sadiku M.N. **Numerical Techniques in Electromagnetics**. CRC Press Inc., 1992
- [33] Taflove A. **Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method**. Norwood, MA, Artech House, 1995.
- [34] Kunz K.S. and Luebbers R.J. **The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics**. CRC Press Inc., 1993.
- [35] Metaxas A.C. and Meredith R.J. **Industrial Microwave Heating: Peter Peregrinus Ltd.**,

1983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] ดวงอาทิตย์ ศรีมูล, “การศึกษากระบวนการให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา,” วิทยานิพนธ์ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2544
- [37] 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, 1997. pp. 108-117.
- [38] Gandhi O.P., Gao B.Q. and Chen J.Y. “A Frequency-Dependent Finite-Difference Time-Domain Formulation for General Dispersive Media.” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, no. 4, 1993. pp. 658-664.
- [39] Guy A.W., Lehmann J.F. and Stonebridge J.B. “Therapeutic applications of electromagnetic power.” *Proc. IEEE*, vol.62, no.1, Jan.1974.
- [40] Omiya M., Hikage T., Ohno N., Horiguchi K. and Itoh K. “Design of cavity-backed slot antennas using the finite-difference time-domain technique.” *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol.46, no.12, Dec.1998. pp.1853-1858.
- [41] Rzepecka M.A. and Stuchly S.S. “Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies - a review.” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.29, no.3, Sept. 1980. pp.176-183.
- [42] Athey T.W., Stuchly M.A. and Stuchly S.S. “Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: part I.” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.30, no.1, Jan. 1982. pp.82-86.
- [43] Stuchly M.A., Athey T.W., Samaras G.M. and Taylor G.E. “Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: part II - experimental results.” *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol.30, no.1, Jan. 1982. pp.87-91.
- [44] Cristoforetti L., Pontalti R., Cescatti L. and Antolini R. “Quantitative calorimetric analysis of liquid crystal films (LCF) for phantom dosimetry in microwave hyperthermia.” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.40, no.11, Nov. 1993. pp.1159-1165.
- [45] Treado T.A., Bolton R.A., Hansen T.A., Brown P.D. and Barry J.D. “High-power, high efficiency, injection-locked, secondary-emission magnetron.” *IEEE Trans. Plasma Science*, vol.20, no.3, June 1992. pp.351-359.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเนื้อเทียม (Agar Phantom)

ส่วนประกอบขนาด 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. คำนํ้ากลั่นให้มีอุณหภูมิ 70-80°C แล้วเติม NaCl คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 70-80°C
2. เติม NaN₃ ลงไป คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้คงที่
3. ค่อย ๆ เติมผงวุ้นลงไปทีละน้อย คนให้ทั่วอย่าให้เกิดฟองอากาศ ระวังอย่าให้จับเป็นก้อน คนให้ละลายตลอดเวลา
4. เติมนํ้ากลั่นลงไปให้สารละลายมีปริมาตรครบ 1 ลิตร เพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 95°C
5. ทำความสะอาดภาชนะที่จะใส่ด้วยนํ้ากลั่น เทสารละลายที่เตรียมไว้ลงในภาชนะเก็บไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาใช้งานได้

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

- 1 M.Krairiksh, C.Thongsopa and A.Mearnchu, "A Steerable Active Applicator," *Proceedings of the 1998 Asia-Pacific Microwave Conference*, Yokohama, vol. 2, pp.861-864, Dec. 1998.
- 2 M.Krairiksh, C.Thongsopa and C.Phongcharoenpanich, "A Steerable Active Spherical Slot Array Antenna," *Proceedings of the 1999 Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Taipei, vol. 1, p.483, Mar. 1999.
- 3 M.Krairiksh, C.Thongsopa, D.Srimoon and A.Mearnchu, "Analysis of Steerable Active Slot Array Applicator," *Proceedings of the 1999 Asia-Pacific Microwave Conference*, Singapore, vol. 2, pp.489-492, Dec. 1999.
- 4 M.Krairiksh, C.Thongsopa, C.Phongcharoenpanich, E.Khoomwong and C.Leekpai, "A Steerable Spherical Slot Array Antenna," *Science Asia*, vol. 25, no.4, pp.231-236, 1999.
- 5 C.Thongsopa, M.Krairiksh, N.Srirattana and A.Intarapanich, "A Single Patch Beam Steering Antenna," *Proceedings of the 2000 Asia-Pacific Microwave Conference*, Sydney, pp. 1510-1513, Dec. 2000.
- 6 C.Thongsopa, M.Krairiksh, A.Mearnchu and D.Srimoon, "Analysis and Design of Injection Locking Steerable Active Array Applicator," *accepted for publication in IEICE Trans. Communications* in Oct. 2002.

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล :** นายชาญชัย ทองโสภาก
- วัน เดือน ปีเกิด :** 6 มีนาคม 2509 (สุพรรณบุรี)
- ที่อยู่ :** 454/168 ม.ชนชอบ-ธันว์รัช ถ.รามอินทรา-วัชรพล
แขวงคลองถนน เขตสายไหม กทม. 10220 โทร. (02) 994-2095
- ประวัติการศึกษา :** 2539 – วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้าสื่อสาร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2535 – วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์
(เกียรตินิยม อันดับ 1)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ความชำนาญเฉพาะด้าน:** 1) ระบบโทรคมนาคม
2) การออกแบบวงจรความถี่สูง
3) ระบบสายอากาศ และสายอากาศแบบแอคทีฟ (Active Antenna)
- ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย :**
- พ.ศ. 2535 – 2540 ตำแหน่งนักวิจัย บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด
- ผลงานการออกแบบระบบสื่อสาร หอบังคับการบินกับนักบิน
 - ผลงานการออกแบบวิทยุรับ-ส่งความถี่ย่าน VHF, UHF (AM) 25W (ระบบเปิดตลอด 24 ชั่วโมง)
 - ผลงานการออกแบบระบบวิทยุคลื่นสั้น HF (AM) 1 kW (ระบบเปิดตลอด 24 ชั่วโมง)
- พ.ศ. 2540 – 2543 ตำแหน่งนักวิจัย สังกัดหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโทรคมนาคม ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
- เป็นที่ปรึกษาองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ในโครงการ SDH
 - ผลงานการออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง
- ปัจจุบัน** อาจารย์พิเศษ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตกรุงเทพฯ
- ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า – ไฟฟ้ากำลัง
 - ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ – โทรคมนาคม
- รางวัลเกียรติคุณ :**
- พ.ศ. 2534 : โล่เกียรติคุณ จากกรมสื่อสารทหารอากาศ ในฐานะบุคคลดีเด่น

เอกสาร พ.ศ. 2535 : ที่สงวนไว้ โล่เกียรติคุณ จากกองทัพอากาศ ในฐานะบุคคลดีเด่น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้