

คุณสมบัติการแผ่คลื่นของสายอากาศแถบเฟิมพีส์ เหลี่ยมจตุรัส

(RADIATION PROPERTIES OF THE SQUARE MICROSTRIP ANTENNA)



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2525

กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อ	III
Abstract	IV
บทที่ 1 สายอากาศแผ่นพิมพ์	1
1.1 บทนำ	1
1.2 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์และตัวประกอบที่สำคัญ	3
1.3 วัสดุสำหรับทำสายอากาศ	5
บทที่ 2 การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากช่องเปิดหรืออะเปอร์เจอร์	6
2.1 บทนำ	6
2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่จากสายอากาศแผ่นพิมพ์	7
บทที่ 3 การคำนวณหาการแจกแจงของสนามไฟฟ้า	14
3.1 บทนำ	14
3.2 การคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของท่อนำคลื่น	16
3.3 การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก	18
บทที่ 4 การทดลองและผลการคำนวณ	21
4.1 บทนำ	21
4.2 การจัดการทดลองและวิธีการวัดสนามไฟฟ้า	21
4.3 ผลการวัดทดลอง	23
4.4 การวัดค่าอิมพีแดนซ์	31
4.5 การวัดค่าเปอมีติวิตีของสารไดอิเล็กตริก	36
บทที่ 5 วิจารณ์และสรุป	38
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวกที่ 1 ความถี่กั๊วธของสายอากาศแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมจตุรัส	43
ภาคผนวกที่ 2 การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์และโปรแกรม	45

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ผศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ เป็นอย่างสูงยิ่งที่ท่านได้ให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นมาโดยตลอดทั้ง เป็นกำลังใจให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ โดยสมบูรณ์ และอาจารย์สมผล โกศลวิทย์ที่ได้มอบอุปกรณ์ในการทำวิจัยจนได้รับผลสำเร็จ นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณจันทร์เพ็ญ เปรมปรุงวิทย์ที่ได้ช่วยจัดพิมพ์เอกสารวิทยานิพนธ์นี้ ส่วนดีของ วิทยานิพนธ์ขอมอบไว้ให้บิดา มารดา บุรพคณาจารย์ที่เคารพยิ่งทุกท่าน และขอขอบคุณสภาวิจัย แห่งชาติที่ได้มอบทุนอุดหนุนวิจัย ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงคุณสมบัติการแผ่คลื่นและค่าความถี่ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่สร้างขึ้นจากแผ่นพิมพ์สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ชนิด 2 หน้า โดยการกัดแผ่นทองแดงด้านหนึ่งออกให้เป็นรูปลี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่มีขนาดสัมพันธ์กับความถี่ที่ใช้ใช้งาน แผ่นทองแดงอีกด้านหนึ่งที่เหลือปล่อยให้ไว้ให้เป็นพื้นกราวด์ สารไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง เป็นตัวกำหนดความห่างระหว่างตัวนำและมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านไปในช่วงตัวนำนั้น สารไดอิเล็กตริกที่มีความบางมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น การป้อนกำลังงานไฟฟ้าให้แก่สายอากาศทำได้โดยการใช้สายส่งแถบรีวต์ต่อเข้ายังแผ่นทองแดงที่อยู่ด้านบนหรือใช้สายส่งแกนร่วมก็ได้โดยการเจาะทะลุสายอากาศแผ่นพิมพ์จากทางด้านกราวด์ ต่อตัวนำภายในของสายส่ง เข้ากับแผ่นตัวนำด้านบนและ เชื่อมตัวนำภายนอกของสายส่ง เข้ากับแผ่นกราวด์ ได้ทำการวัดทดสอบกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศแบบนี้ที่ขนาดต่างๆ กัน พบ ความถี่ไมโครเวฟย่านแถบคลื่น เอ็กซ์ โดยพยายามศึกษาองค์ประกอบสำคัญต่างๆ ที่มีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นด้วยการพิจารณาขนาดความกว้างยาวของตัวสายอากาศและลักษณะการป้อนกำลังงานไฟฟ้า ทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากช่องเปิดหรืออะเบอร์เจอร์ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกำลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในช่องเปิดที่มีการแ่งรูปสล็อตคล่องตาม เงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อหาผลความถูกต้องให้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด นอกจากนี้ได้วัดทดสอบหาค่าความถี่หรืออิมพีแดนซ์ของสายอากาศในลักษณะรูปรังสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและเป็นแนวทางในการป้อนกำลังงานไฟฟ้า เพื่อให้ได้ผลดีที่สุดอีกด้วย วิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 3 ตอน ในตอนแรกได้กล่าวถึงความ เป็นมาของสายอากาศแผ่นพิมพ์ และหลักทฤษฎีต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณและเทคนิคต่างๆ ที่ได้ดำเนินการมา ในตอนที่สองได้อธิบายวิธีการวิเคราะห์โดยหลักการของช่องเปิดและ เงื่อนไขขอบเขตซึ่งเป็นหลักสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งอยู่ในบทที่ 2 และบทที่ 3 ในตอนสุดท้ายได้แสดงการวัดทดสอบและผลการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวประกอบสำคัญต่างๆ ในอันที่จะได้ เข้าใจถึงคุณสมบัติ และลักษณะสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ABSTRACT

Radiation properties and Impedance of the square microstrip antenna has been presented in this thesis. The square microstrip antenna constructs from double sides printed electronic circuit board. By square shape of the conductor on side and leave the other side as ground plane. The dielectric between these conductors lead to the spacing between it's conductor and the corresponding wavelength of the electromagnetic wave propagates through this dielectric. The excitation method of this antenna would be the microstrip transmission line connects at the edge of its square or the coaxial line feed through the ground plane connects the inner conductor to the upper patch conductor and the outer conductor to the ground plane. Experimental result of the radiation pattern in the different antenna dimensions on the x-band microwave frequency. Effect of the important characteristics had been observed in term of the dimension (compare with the wavelength) and the excitation method. Theoretical analysis of the electromagnetic field radiated from the aperture which is the electric field distribution satisfies the boundary condition of the magnetic side wall include with the computer result has been performed. The input impedance of the square antenna observed as to understand The behavior of the antenna and the feed point problems.

This thesis is divided into 3 parts. First, the performance and theoretical principle also the forgoing techniques. Second, the principle of aperture with the magnetic sides wall boundary condition which is the main principle part of this thesis has expressed in chapter 2 and 3. The final part is the experimental results and the computer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

graphis programs of the parameter relationship and the associate necessary parameters has been computed to confirm the theoretical approach in order to understand the characteristic and specification of the square microstrip antenna.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

สายอากาศแผ่นพิมพ์

1.1 บทนำ

สายอากาศแผ่นพิมพ์สร้างขึ้นจากแผ่นพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดทองแดงสองด้าน มีสารไดอิเล็กตริกที่เป็นฉนวนเคลือบด้วยวัสดุพลาสติกหรือโฟเบอร์ ตัวสายอากาศมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาสามารถติดตั้งได้ การศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศชนิดนี้มีการพัฒนามาในหลายลักษณะ การวิเคราะห์สายอากาศทั้งแบบสี่เหลี่ยมและรูปกลม ตลอดจนรูปร่างอื่นๆ รวมทั้งไมโครสตริบ โคโพล หลัการเบื้องต้นได้ศึกษากันมาเป็นเวลานาน ตั้งแต่ปี 2496 (2) เป็นงานวิจัยใน สหรัฐอเมริกา ส่วนการศึกษาการกระจายคลื่นและทดลองหาค่าประมาณของการกระจายคลื่น ออกจากสตริบไลน์ Lawik ได้กระทำในภายหลัง ในปี 2505 มีการทดลองสายอากาศแผ่น พิมพ์สี่เหลี่ยมจตุรัสและแผ่นพิมพ์ผืนผ้าโดย Kaloi สายอากาศแผ่นพิมพ์ได้แสดงผลเป็นครั้งแรก โดย Munson (10) ข้อมูลของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมและกลม ได้พิมพ์เผยแพร่โดย Howell (11)

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์เบื้องต้น สามารถรวบรวมเป็น แนวทางในการวิเคราะห์ได้เป็น 4 ลักษณะ

1. การวิเคราะห์ในลักษณะของสายส่งกำลังไฟฟ้า (10), (11), (12).
2. การวิเคราะห์ในลักษณะของช่องเปิดหรืออะ เปอร์ เจอร์ (13)–(18).
3. การวิเคราะห์ในลักษณะคาร์ดีโม เกล (19), (20).
4. การวิเคราะห์ในลักษณะทางตัวเลขและคอมพิวเตอร์โดยวิธีโมเมนต์ (21)–(25)

ในแต่ละวิธีได้ให้รายละเอียดคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศพอที่จะทำให้สามารถ เข้าใจถึงคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศและเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและศึกษาคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ อีก การวิเคราะห์ในช่วง 10 ปี สามารถจัดแนวทางการทำวิจัยได้ 3 ลักษณะ วิชา คือ

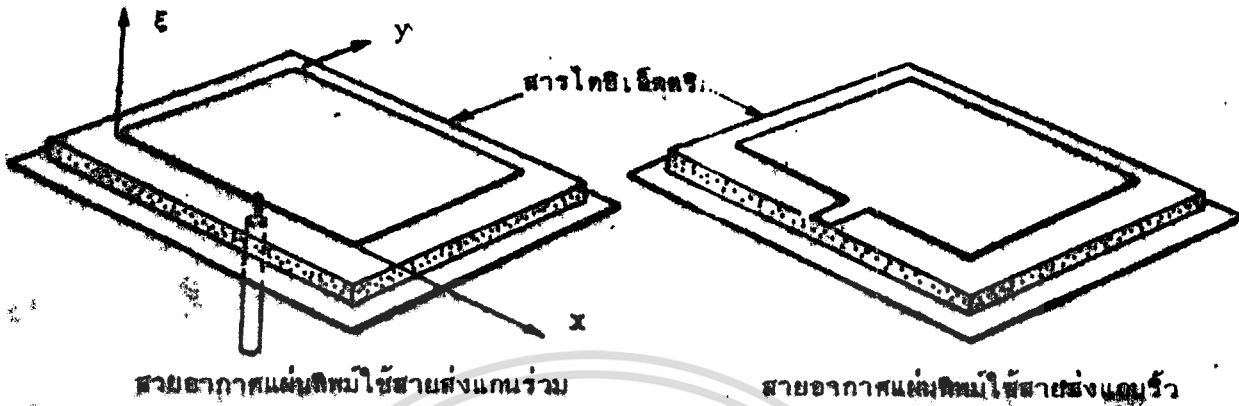
วิธีแรกอาศัยทฤษฎีสายอากาศแบบร่องที่มีสนามไฟฟ้าคงที่สม่ำเสมอตลอดร่อง แสดงผลการคำนวณในลักษณะการแผ่คลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากช่องเปิด แต่การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ยังคงยึดถือวิธีการของสายส่งแบบเดิม เป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องพอควร แต่อาจจะใช้ข้อสมมุติบางประการที่อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงนัก

วิธีที่สองอาศัยทฤษฎีกล่องคลื่นที่มีผนังในสลับ... เติร์ด เป็นผนังแม่เหล็ก เป็นวิธีการยุ่งยากเพราะต้องคำนวณหาโหมดต่างๆ ของสนามไฟฟ้าในกล่องคลื่นที่เกิดจากการกระตุ้นโดยการป้อนกำลังงานจากภายนอก แต่วิธีนี้สามารถหาค่าความสูญเสียต่างๆ ของสายอากาศได้อย่างถูกต้องแม่นยำดี

วิธีที่สามอาศัยวิธีโมเมนต์ วิเคราะห์โดยตัวเลขและคอมพิวเตอร์ เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศที่มีรูปร่างลักษณะแปลกๆ ซึ่งหากจะใช้วิธีที่สองอาจจะยุ่งยากขึ้นเป็นทวีคูณถึงแม้ว่าจะได้คำตอบสุดท้ายเป็นตัวเลขเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศก็ตาม แต่เราจะไม่ได้สูตรสำเร็จที่จะช่วยในการสร้างมโนภาพเกี่ยวกับการทำงานของสายอากาศ

การวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธีดังกล่าวเป็นหลักการใช้ค่าเงินการอยู่ในปัจจุบัน แต่ลักษณะวิธีก็ได้พยายามที่จะวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เพื่อที่จะพัฒนาเทคโนโลยีของสายอากาศชนิดนี้ให้ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ทั้งในระบบสื่อสารและงานวิจัยอื่นๆ ที่สายอากาศชนิดนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

1.2 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์และตัวประกอบที่สำคัญ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์

สายอากาศแผ่นพิมพ์แบบสี่เหลี่ยมจตุรัส เมื่อป้อนกำลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้าแรงรูปตามลักษณะ เงื่อนไขขอบเขตเป็นผลมาจากค่าเปอมิตริตี้ (ϵ_r) ของสารไดอิเล็กตริก ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้าภายในตัวสายอากาศกับค่าเปอมิตริตี้สัมพันธ์ เป็นไปตามสมการ

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-1)$$

λ_d = ความยาวคลื่นในไดอิเล็กตริก

λ_0 = ความยาวคลื่นในอากาศ

ϵ_r = ค่าเปอมิตริตี้สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริก ประมาณ (4-6) สำหรับแผ่นพิมพ์อีพอกซี (Epoxy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบ่อนกำลังงานไฟฟ้าที่นิยมใช้มีด้วยกัน 2 วิธี คือ

1. ใช้สายส่งแถบรีว (Microstrip transmission Line)

บ่อนกำลังงานไฟฟ้าเข้าไปยังขอบตัวนำด้านบน โดยอาศัยพื้นกราวด์ เป็นกราวด์ร่วมกับกับตัวสายอากาศ

2. ใช้สายส่งแกนร่วม (Coaxial transmission Line)

บ่อนกำลังงานไฟฟ้าโดยเจาะทะลุจากแผ่นพื้นกราวด์ด้านล่าง ต่อส่วนนำด้านบนเข้ากับตัวสายอากาศ ส่วนส่วนนำด้านบนนอกเชื่อมติดกับพื้นกราวด์

ความหนาของสารไดอิเล็กตริก และค่าของเปอร์มิติวิตีมีผลต่อการคำนวณหาขนาดของตัวสายอากาศ ณ ความถี่หนึ่งๆ นอกจากนี้ความกว้างของแผ่นพื้นกราวด์ยังมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่คลื่นของสายอากาศชนิดนี้อีกด้วย

คุณสมบัติพิเศษอื่นๆ ที่ดี และมีประโยชน์ของสายอากาศชนิดนี้ คือลักษณะที่แบนราบ มีความหนาน้อยมากสามารถติดตั้งได้ตามต้องการ สามารถสร้างได้ง่ายจากรัสตุธรรมตาๆ นอกจากนี้ยังสร้างให้เป็นเฟสอาเรย์ในกรณีที่ต้องการกระสวยการแผ่คลื่นที่ต้องการบังคับทิศทางได้ด้วย เนื่องจากสายอากาศมีขนาดเล็กมากจึงเหมาะสมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ของวงจรรวมในการสร้างสายอากาศ และวงจรรอเลคโทรนิคส์ต่างๆ ให้อยู่บนแผ่นพิมพ์ชั้นเดียวกันได้

1.3 วิธีสำหรับทำสายอากาศ

สารไดอิเล็กตริกมีคุณสมบัติการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้า น้อยมาก และเนื่องจาก สเปกตรัมนี้บางมาก ความถี่กำจร ความต้านการแผ่รังสี ความถี่หรืออิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับค่า สภาพไฟฟ้าสัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกและค่าน้ำข่างจะมีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า ดังกล่าว ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่กำจรของสาย อากาศแผ่นพิมพ์ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของค่าสภาพไฟฟ้าสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{\delta f}{f_0} = -\frac{1}{2} \frac{\delta \epsilon_r}{\epsilon_r} \quad (1-2)$$

ϵ_r = ค่าสภาพไฟฟ้าสัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกที่เป็นสเปกตรัม

f_0 = ความถี่กำจรของสายอากาศแผ่นพิมพ์

δf = การเปลี่ยนแปลงของความถี่กำจรของสายอากาศ

$\delta \epsilon_r$ = ความคลาดเคลื่อนของค่าสภาพไฟฟ้าสัมพัทธ์ของสเปกตรัม

เนื่องจากสายอากาศแผ่นพิมพ์สร้างขึ้นใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ และ มิลลิเมตรเวฟที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของมิติเชิงเส้นของสายอากาศไม่ ว่าจะเกิดจากการสร้างสายอากาศหรือจากการขยายตัวหรือหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ จะมีผล ให้ความถี่กำจรเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลง ความถี่กำจรของสายอากาศแผ่นพิมพ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของมิติเชิงเส้นและอุณหภูมิด้วย

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{-\delta L}{L} = \alpha_T \cdot \delta T \quad (1-3)$$

L = มิติเชิงเส้นของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่เป็นตัวกำหนดความถี่กำจร

δL = การเปลี่ยนแปลงของมิตินี้

α_T = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของสายอากาศ

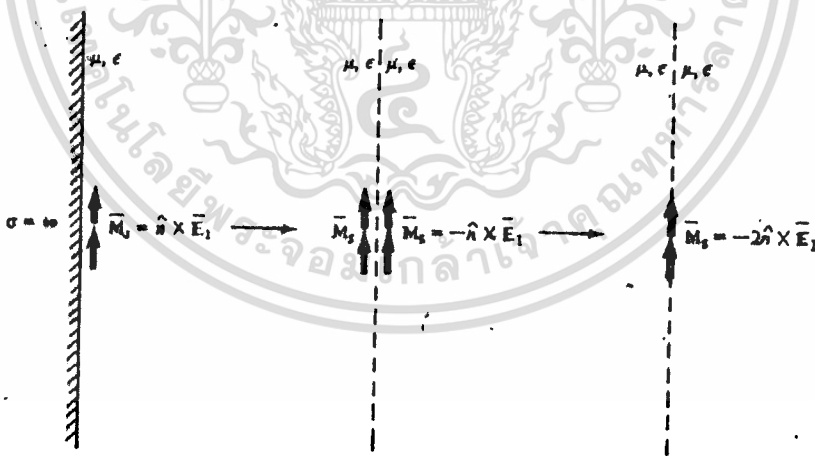
δT = การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นองศาเซลเซียส

บทที่ 2

การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากช่องเปิดหรืออะเปอร์เจอร์

2.1 บทนำ

ปัญหาสำคัญในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากช่องเปิดหรืออะเปอร์เจอร์ เป็นปัญหาของเงื่อนไขขอบเขตตามความเป็นจริงช่องเปิดจะอยู่ ณ บริเวณผิวของตัวนำไฟฟ้า ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำจะต้องเป็นศูนย์ เฉพาะอาณาบริเวณช่องเปิดเท่านั้นที่ยังคงปรากฏสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้านี้จะเป็นสนามสมมูลย์ของแหล่งกำเนิดความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลย์ (\vec{M}_s) แหล่งกำเนิดสมมูลย์นี้ จะเป็นค่าในการคำนวณหาศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (\vec{F}) แต่การพิจารณาจะต้องคำนึงถึงภาพสะท้อนของแหล่งกำเนิดสมมูลย์ในแผ่นกราวด์ด้วย รูปแสดงการคำนวณหาแหล่งกำเนิดสมมูลย์ในภาพ



รูปที่ 2.1 แสดงแหล่งกำเนิดสมมูลย์

ดังนั้นผลรวมของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลย์สามารถ เขียนความสัมพันธ์

ได้ดังสมการ

$$\vec{M}_s = -2\vec{n} \times \vec{E}_1 \quad (2-1)$$

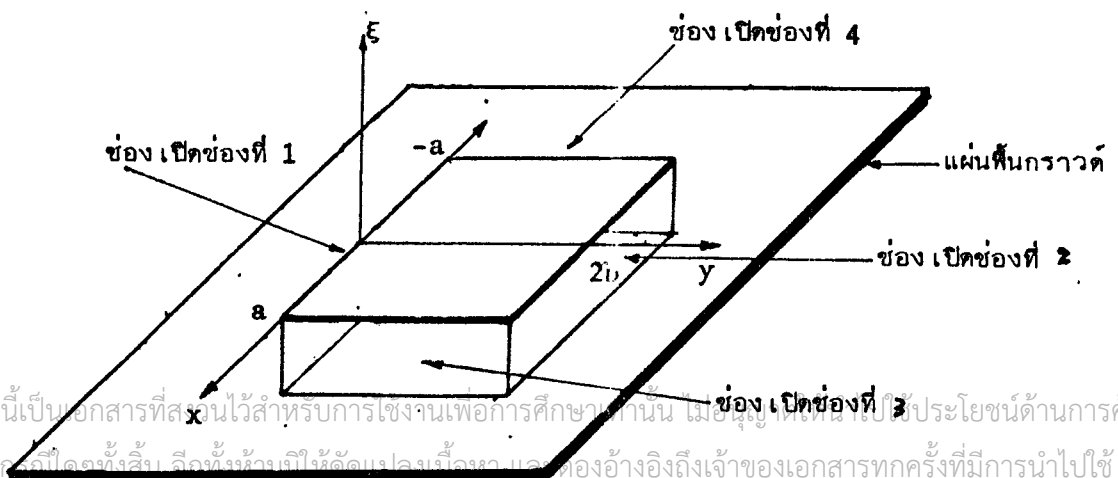
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบช่องเปิดหรืออะเปอร์เจอร์. การวิเคราะห์ด้วยวิธีการของสนามสมมูลย์ (Field Equivalent Principle) โดยการสมมูลฐานสนามไฟฟ้า ณ อาณาบริเวณช่องเปิดหรืออะเปอร์เจอร์ด้วยสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสกับแผ่นตัวนำ (Tangential Electric Field) และคำนวณหาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก (M_s) ด้วยเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เมื่อทราบแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลย์แล้วสามารถจะหาฟังก์ชันช่วยซึ่งเป็นศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า F ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันช่วยในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจากช่องเปิดได้

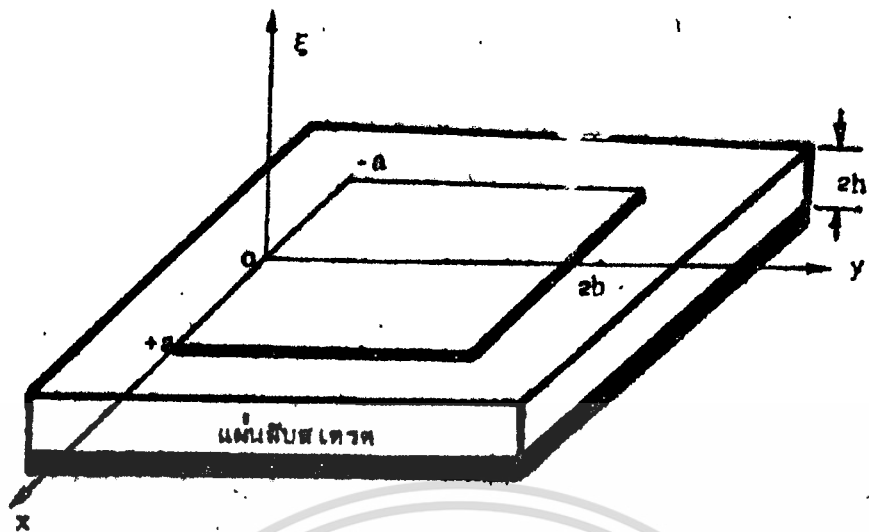
สายอากาศแผ่นพิมพ์ได้อาศัยหลักการเดียวกัน โดยสมมูลฐานการแจกแจงของสนามไฟฟ้า ณ บริเวณช่องเปิด คำนวณหาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากช่องเปิดแต่ละช่อง จากสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้มาพิจารณา ช่องเปิด 2 ช่องที่ระยะห่างของช่องเปิดมีระยะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นและทฤษฎีสายอากาศแบบอาร์เรย์คำนวณหาสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากช่องเปิดรวมทั้งหมด ซึ่งจะเป็นผลรวมของการแผ่คลื่นออกจากสายอากาศชนิดนี้

2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่จากสายอากาศแผ่นพิมพ์

สายอากาศแผ่นพิมพ์รูปสี่เหลี่ยมวางอยู่ในระนาบ $E=0$ ในระบบแกนทรงสี่เหลี่ยม สายอากาศมีความยาวตามแกน x เป็น $2a$ และความยาวตามแกน y เป็น $2b$ แผ่นสับสเตรตที่เป็นสารไดอิเล็กตริกมีความหนา h เราบ่อนกำลังงานให้แก่สายอากาศที่จุดเริ่มหรือออริจินคือจุด 0 หรือโดยอาจใช้สายส่งแถบรีว หรือสายส่งแกนร่วมก็ได้ สายอากาศมีช่องเปิด 4 ช่องอยู่ในสับสเตรต คือช่องเปิดในระนาบ $y=0$, $y=2b$, และ $x=a$, $x=-a$ การวิเคราะห์การแผ่คลื่นจากช่องเปิดเหล่านี้โดยเบื้องต้นจะพิจารณา 1 ช่องก่อน คือช่องที่อยู่ในระนาบ $y=0$



รูปที่ 2.2 แสดงช่องเปิด 4 ช่องในสับสเตรต



รูปที่ 2.3 แสดงการวางตำแหน่งแกนโคออดิเนตของสายอากาศ

สนามไฟฟ้าในช่องเปิดนี้สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\vec{E}_z = E_0 \cos \beta_d(a-|x|) \cdot \cos \beta_d(2b-y) \quad x < a, 0 < y < 2b \quad (2-2)$$

$$\beta_d = \frac{2\pi}{\lambda_d} \text{ และ } \lambda_d \text{ คือความยาวคลื่นในสายอากาศ}$$

ในสมการ (2-2) สมมติว่า E_z ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแนวทิศ z

ในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่จากช่องเปิด อาศัยหลักการสมมูลย์ โดยการหาค่าศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้าที่เกิดจากความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กที่ไหล ณ ช่องเปิด ดังนี้

$$\vec{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \int_S \vec{M}_s \cdot \frac{e^{j\beta R}}{R} ds' \quad (2-3)$$

ϵ เป็นค่าสภาพไฟฟ้าสัมพัทธ์ หรือเพอร์มิติวิตีของอากาศ

$\vec{M}_s = -\vec{n} \times \vec{E}_z$ เป็นความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลย์ ณ ช่องเปิด

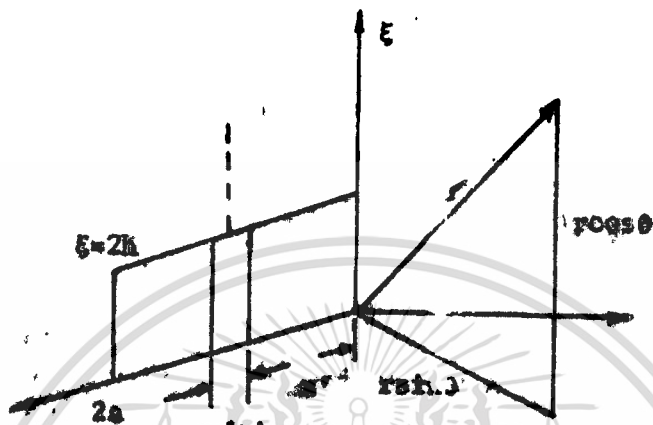
\vec{n} = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากออกจากช่องเปิด

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

λ = ความยาวคลื่นในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

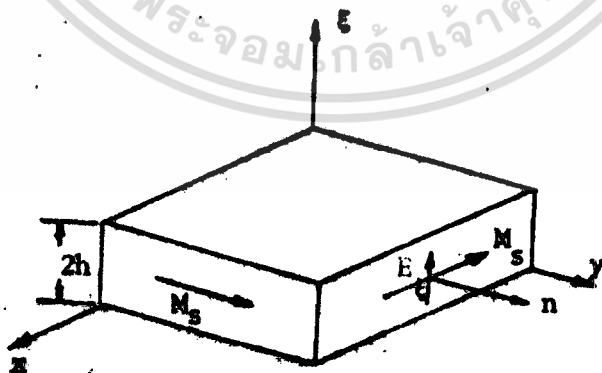
ตามรูปแสดงการพิจารณาช่องเปิด 1 ช่อง



รูปที่ 2.4 แสดงการพิจารณาช่องเปิด 1 ช่อง

เมื่อทราบการแจกแจงรูปของสนามไฟฟ้า ณ บริเวณช่องเปิดแล้ว เราสามารถคำนวณหาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล \vec{M}_s ได้โดยพิจารณาการไหลของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

$$\vec{M}_s = -2\vec{n} \times \vec{E}_Z = -2E_Z \vec{a}_x \quad (2-4)$$



รูปที่ 2.5 แสดงการคำนวณกระแสแม่เหล็กสมมูล

ดังนั้นศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า F คำนวณจากสมการ

$$F = \frac{\epsilon}{4\pi} \int_S M_s \cdot \frac{e^{-j\beta r}}{r} ds' \quad (2-5)$$

$$F = \frac{\epsilon}{4\pi} \int_S M_s \cdot \frac{e^{-j\beta(r-r'\cos\psi)}}{r} ds' \quad (2-6)$$

$$F = \frac{\epsilon}{4\pi} e^{-j\beta r} \int_S M_s \cdot e^{+j\beta r \cos\psi} ds' \quad (2-7)$$

การแปลงโคออดิเนต

$$\bar{a}_r = \bar{a}_x \sin\theta \cos\phi + \bar{a}_y \sin\theta \sin\phi + \bar{a}_z \cos\theta \quad (2-8)$$

$$\bar{a}_{r'} = \bar{a}_x \sin\theta \cos\phi + \bar{a}_y \sin\theta \sin\phi + \bar{a}_z \cos\theta \quad (2-9)$$

$$r' = x' \bar{a}_x + \xi' \bar{a}_\xi \quad (2-10)$$

$$r' \cos\psi = r' \cdot \bar{a}_r \quad (2-11)$$

$$r' \cos\psi = x' \sin\theta \cos\phi + \xi' \cos\theta \quad (2-12)$$

สมการศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า F สามารถเขียนอยู่ในรูป

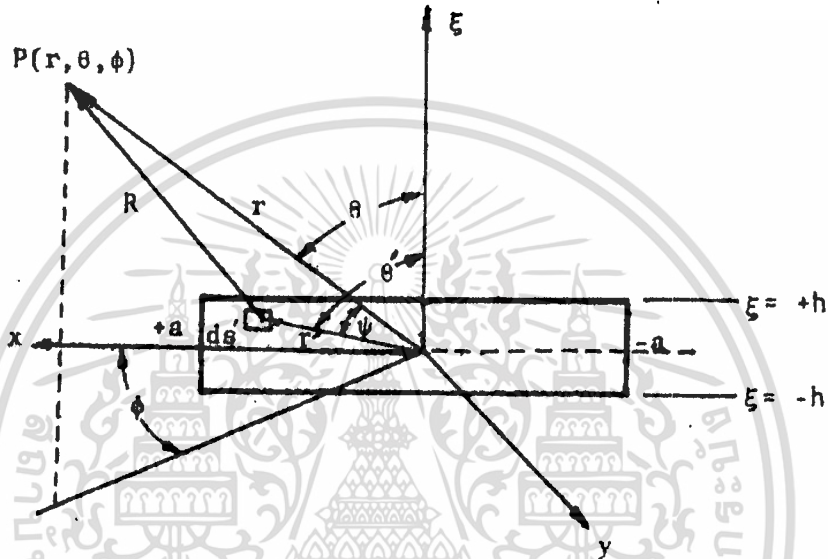
$$F = \frac{\epsilon}{4\pi r} e^{-j\beta r} \int_S M_s \cdot e^{-j\beta(x' \sin\theta \cos\phi + \xi' \cos\theta)} dx' d\xi' \bar{a}_x \quad (2-13)$$

โดยการอินทิเกรตแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

$$F_1 = \frac{\epsilon}{4\pi r} e^{-j\beta r} \int_{-a}^a M_s e^{-j\beta(x' \sin\theta \cos\phi)} dx' \quad (2-14)$$

$$F_2 = \int_0^{2h} e^{j\beta \xi' \cos\theta} d\xi' \quad (2-15)$$

การทาศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า F จะต้องพิจารณาที่สะท้อนของ M_S ในแผ่นกราวด์ด้วย ดังนั้นเพื่อความสะดวกจะต้องเลื่อนจุด $\xi=0$ ให้อยู่ในระนาบของแผ่นกราวด์และอินทิเกรตแหล่งกำเนิดซึ่งวางอยู่ในระบบแกนอัญญุประภาสตลอดผิวช่องเปิดที่มีความยาว $2a$ และความกว้าง $2h$ ดังรูป



รูป 2.6 แสดงตำแหน่งแกนในช่องเปิดช่องที่ 1

พิจารณา

$$R = r - r' \cos \psi \text{ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเฟส}$$

$$R = r \text{ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามขนาด}$$

ผลลัพธ์ของการอินทิเกรตของศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า F จะได้เป็นดังนี้

$$F = 2E_0 \cos(2\beta_d h) e^{-j\beta_d z} (4ah) \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cos \theta)}{\beta h \cos \theta} \right] \cdot \left[\frac{\beta_d \sin \beta_d a - \beta \sin \theta \cos \phi \sin(\beta a \sin \theta \cos \phi)}{\beta_d^2 - \beta^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi} \right] \cdot \left[a_\theta \cos \theta \cos \phi - a_\phi \sin \theta \right] \tag{2-16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ของการอินทิเกรตทั้ง 2 :เมื่อแปลงให้อยู่ในโคออดิเนตแบบทรงกลม สามารถเขียนได้เป็น

$$F_{\theta} = 2\epsilon E_0 \cos \beta_d (2b) \cdot \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \cos \theta \cos \phi \cdot 4ah \cdot \left[\frac{\beta_d \sin(\beta_d a) - \beta \sin \theta \cos \phi \sin(\beta a \sin \theta \cos \phi)}{\beta_d^2 - \beta^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi} \right] \quad (2-17)$$

$$F_{\phi} = 2\epsilon E_0 \cos \beta_d (2b) \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \sin \phi \cdot 4ah \cdot \left[\frac{\beta_d \sin(\beta_d a) - \beta \sin \theta \cos \phi \sin(\beta a \sin \theta \cos \phi)}{\beta_d^2 - \beta^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi} \right] \quad (2-18)$$

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ห่างไกลจากสายอากาศออกไปมากๆ สามารถคำนวณได้ โดยง่ายจากการพิจารณาช่องเปิดของสายอากาศทั้ง 4 ช่อง ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสแม่เหล็กในช่องเปิดในระนาบ $x=a$ และ $x=-a$ จะเป็นเวกเตอร์ที่มีทิศทางตรงข้ามเสมอ และจะมีผลขจัดกัน และกลายเป็นศูนย์ในที่สุดบนระนาบ $\phi=90^\circ$ ส่วนช่องเปิด $y=0$ และ $y=2b$ อาจพิจารณาได้เป็นช่วงเปิด 2 ช่อง วางขนานกันเป็นแผงหรืออาเรย์เช่นเดียวกับช่องเปิด 2 ช่องแรกแต่ทิศทางของกระแสแม่เหล็ก จะขึ้นอยู่กับความยาว $2b$ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นในสายอากาศ

ดังนั้นเราสามารถคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศแผ่นคิมพ์ให้เป็นสูตรสำเร็จและใช้ได้สำหรับทุกจุดในที่ว่าง $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$

ผลลัพธ์แสดงใน 2 ระนาบที่น่าสนใจเพื่อจะได้นำไปเปรียบเทียบกับ การทดลอง คือระนาบ $\phi=0^\circ$ และระนาบ $\phi=90^\circ$

สนามไฟฟ้าในระนาบ $\phi = 0^\circ$

$$E_\theta = 4\omega\eta\epsilon E_0 S_2 \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\sin 2\beta_d b}{2\beta_d b} \right] \cdot \sin(\beta a \cdot \sin\theta) \quad (2-19)$$

$$E_\phi = 2j\omega\eta\epsilon E_0 S_1 \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\beta_d \sin\beta_d a - \beta \sin\theta \sin(\beta a \sin\theta)}{(\beta_d^2 - \beta^2 \sin^2\theta) \cdot a} \right] \cdot \left[\cos(2\beta_d b) - 1 \right] \cdot \cos\theta \quad (2-20)$$

$\phi = 90^\circ$ $E_\phi = 0$

$$E_\theta = 2j\omega\eta\epsilon E_0 S_1 \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\sin\beta_d a}{\beta_d a} \right] \cdot \left[\cos(2\beta_d b) - e^{j2\beta b \cdot \sin\theta} \right] \quad (2-21)$$

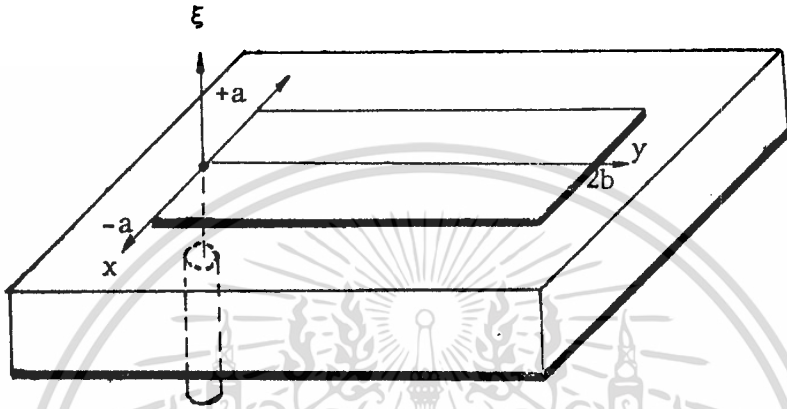
- $\eta = \frac{\mu}{\epsilon}$ เป็นความผิวนสัมบูรณ์ หรืออินทรีนดิกคิมพิคานซ์ของอากาศ
 μ = ค่าสภาพแม่เหล็ก หรือเปอร์มิอิลิตี้ ของอากาศ
 $S_1 = 4ah$ พื้นที่ช่องเปิดของสายอากาศในระนาบ
 $S_2 = 4bh$ พื้นที่ช่วงเปิดของสายอากาศในระนาบ $x=a, x=-a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณหาการแจกแจงของสนามไฟฟ้า

3.1 บทนำ



รูปที่ 3.1 แสดงการป้อนกำลังงานไฟฟ้าโดยสายส่งแกนร่วม

เมื่อเราป้อนกำลังงานไฟฟ้าให้แก่สายอากาศ จะเกิด E_z เป็นสนามไฟฟ้าที่เดินทางไปในทิศทาง y เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าในลักษณะโหมด TE ($E_y = 0$) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ สามารถจะคำนวณได้โดยอาศัย สนามแม่เหล็ก H_y และเงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก สมการคลื่น (wave equation) เขียนได้เป็น

$$\nabla_t^2 h_y + k_c^2 h_y = 0 \tag{3-1}$$

$$\frac{\partial^2 h_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_y}{\partial z^2} + k_c^2 h_y = 0 \tag{3-2}$$

การหาคำตอบของสมการคลื่นจะใช้วิธี คำตอบผลคูณคือ $h_y = f(x) \cdot g(z)$ เมื่อแทนค่าคำตอบลงในสมการ (3-2) จะได้สมการ ชุดแยกออกจากกัน และสามารถหาคำคำตอบของแต่ละสมการโดยอิสระ

$$\frac{d^2 f}{dx^2} + k_x^2 f = 0 \tag{3-3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีคำตอบเป็นฟังก์ชันตรีโกณ ดังนี้

$$f = A_1 \cos k_x x + A_2 \sin k_x x \quad (3-4)$$

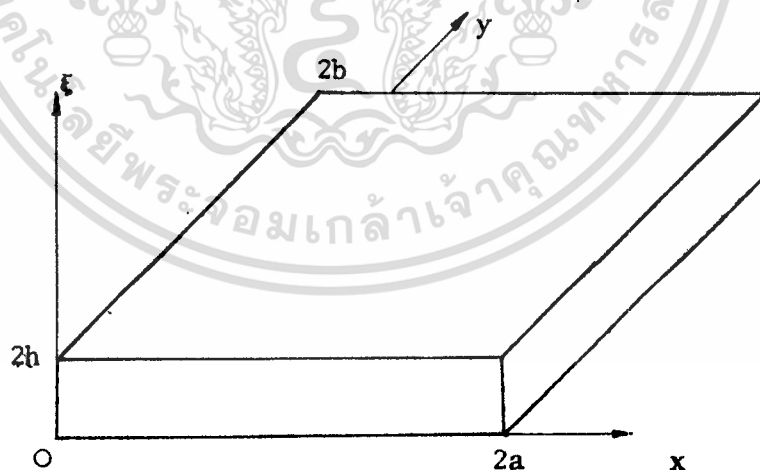
$$\text{และ } \frac{d^2 g}{d\xi^2} + k_\xi^2 g = 0 \quad (3-5)$$

มีคำตอบเป็นฟังก์ชันตรีโกณ ดังนี้

$$g = B_1 \cos k_\xi y + B_2 \sin k_\xi y \quad (3-6)$$

จากคำตอบทั่วไปของสมการ จำเป็นจะต้องหาคำตอบสมบูรณ์ โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก (Magnetic wall Boundary Condition) โดยกำหนดข้อจำกัดของสนามแม่เหล็ก ณ บริเวณแผ่นตัวนำแม่เหล็กด้านข้างทั้ง 2 ด้าน คือ $h_y = 0$ ณ จุด $x = +a$ และ $x = -a$ และข้อจำกัดของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อหน่วยระยะทางในแนวทิศ ξ คือ $\frac{\partial h_y}{\partial \xi} = 0$ ณ บริเวณ $\xi = +h$ และ $\xi = -h$

เมื่อวางแกนโคออดิเนตของช่องเปิดให้อยู่ในแนวแกนดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงโคออดิเนตของช่องเปิดในการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต

แทนค่าเงื่อนไขขอบเขต $h_y = 0$ ($x = 0, 2a$)

$$f = A_2 \sin \frac{n\pi x}{2a} \quad (3-7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่าเงื่อนไขขอบเขต } \frac{\partial h_y}{\partial \xi} = 0 \quad (\lambda = 0, 2a) \quad (3-8)$$

$$g = B_1 \cos \frac{m\pi \xi}{2h} \quad (3-8)$$

ดังนั้นคำตอบของ h ซึ่งเป็นผลคูณของคำตอบ f และคำตอบ g คือ

$$h_y = A_2 \sin \frac{n\pi x}{2a} \cdot B_1 \cos \frac{m\pi \xi}{2h} \quad (3-9)$$

สนามแม่เหล็กในแนวแกน y เขียนเป็นสมการทั่วไป

$$h_y = A_{nm} \sin \frac{n\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi \xi}{2h} \quad (3-10)$$

3.2 การคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของท่อนำคลื่น

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นสำหรับโหมด TE อาศัยการคำนวณจากคำตอบของสนามแม่เหล็ก h โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการคลื่น เช่นเดียวกัน สมการคลื่นของสนามแม่เหล็กคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{h} = \frac{-j\beta}{k_c^2} \nabla_t^2 \bar{h}_y = \bar{h}_x + \bar{h}_\xi \quad (3-11)$$

$$\bar{h} = \frac{-j\beta}{k_c^2} \cdot \left[\frac{\partial h_y}{\partial x} \bar{a}_x + \frac{\partial h_y}{\partial \xi} \bar{a}_\xi \right] \quad (3-12)$$

คำตอบสมบูรณธ์ของสนามแม่เหล็กแสดงไว้ด้วยโหมดต่างๆ ของท่อนำคลื่น เขียนได้ดังนี้

$$H_y = A_{nm} \sin \frac{n\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi \xi}{2h} e^{\pm j\beta_{nm} y} \quad (3-13)$$

$$H_x = \mp \frac{j\beta_{nm}}{k_{c,nm}^2} A_{nm} \frac{n\pi}{2a} \cos \frac{n\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi \xi}{2h} e^{\pm j\beta_{nm} y} \quad (3-14)$$

$$H_\xi = \pm \frac{j\beta_{nm}}{k_{c,nm}^2} A_{nm} \frac{m\pi}{2h} \sin \frac{n\pi x}{2a} \sin \frac{m\pi \xi}{2h} e^{\pm j\beta_{nm} y}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี (3-15) ใช้

คำตอบสมบรูณ์ของสนามไฟฟ้าที่อาศัยความสัมพันธ์ของสมการคลื่น แสดงได้

ด้วยสมการ

$$E_z = \frac{-j\beta_{nm}}{k_{c,nm}^2} Z_{h,nm} A_{nm} \frac{n\pi}{2a} \cos \frac{n\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi}{2h} e^{+j\beta_{nm}y} \quad (3-16)$$

$$E_x = \frac{-j\beta_{nm}}{k_{c,nm}^2} Z_{h,nm} A_{nm} \frac{m\pi}{2h} \sin \frac{n\pi x}{2a} \sin \frac{m\pi}{2h} e^{+j\beta_{nm}y} \quad (3-17)$$

$$E_y = 0 \quad (3-18)$$

พิจารณาโหมด TE₁₀ (n=1, m=0) เฉพาะคลื่นในทิศ +y

$$H_y = A_{10} \sin \frac{\pi x}{2a} e^{-j\beta_{10}y} \quad (3-19)$$

$$H_x = \frac{-j\beta_{10}}{k_{c,10}^2} \cdot A_{10} \frac{\pi}{2a} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} e^{-j\beta_{10}y} \quad (3-20)$$

$$H_z = 0 \quad (3-21)$$

$$E_z = \frac{-j\beta_{10}}{k_{c,10}^2} \cdot Z_{h,10} \cdot A_{10} \cdot \frac{\pi}{2a} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} e^{-j\beta_{10}y} \quad (3-22)$$

$$E_x = 0 \quad (3-23)$$

$$E_y = 0 \quad (3-24)$$

เมื่อคิดถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปจนถึงตำแหน่ง $y = 2b$

ผลรวมของการสะท้อนคลื่น ณ บริเวณช่องเปิดตำแหน่ง $y = 2b$

$$H_y = \left[A^+ e^{-j\beta_{10}y} + A^- e^{-j\beta_{10}y} \right] \cdot \sin \frac{\pi x}{2a} \quad (3-25)$$

$$H_x = -j\beta_{10} \frac{2a}{\pi} \left[A^+ e^{-j\beta_{10}y} - A^- e^{-j\beta_{10}y} \right] \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{\xi} = 0 \quad (3-27)$$

$$E_{\xi} = j k_0 Z_0 \frac{2a}{\pi} \cdot \left[A^+ e^{-j\beta_{10}y} - A^- e^{j\beta_{10}y} \right] \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-28)$$

$$E_x = 0 \quad (3-29)$$

$$E_y = 0 \quad (3-30)$$

$$k_0 Z_0 = Z_{h,nm} \beta_{nm}$$

3.3 การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก

พิจารณาการสะท้อนคลื่น ณ ตำแหน่ง $y = 2b$ ในลักษณะโหมด TE_{10} สามารถเขียนสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ดังสมการ

$$H_y = \left[A^+ e^{-j\beta_{10}y} + A^- e^{j\beta_{10}y} \right] \cdot \sin \frac{\pi x}{2a} \quad (3-31)$$

$$H_x = -j \beta_{10} \frac{2a}{\pi} \cdot \left[A^+ e^{-j\beta_{10}y} - A^- e^{j\beta_{10}y} \right] \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-32)$$

$$H_{\xi} = 0 \quad (3-33)$$

$$E_{\xi} = j k_0 Z_0 \frac{2a}{\pi} \left[A^+ e^{-j\beta_{10}y} + A^- e^{j\beta_{10}y} \right] \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-34)$$

$$E_x = 0 \quad (3-35)$$

$$E_y = 0 \quad (3-36)$$

ในลักษณะเงื่อนไขขอบเขตของตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศสัมผัส จะต้องเป็น 0 ดังแสดงได้ด้วยสมการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์

$$H_x = -2\beta_{10} \frac{2a}{\pi} A \cos \frac{\pi x}{2a} \sin \frac{\pi y}{2b} \quad (3-37)$$

$$H_y = 2A \sin \frac{\pi x}{2a} \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (3-38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดอย่างถึงถึง $\frac{\pi y}{2b}$ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\xi} = -2j k_{101} Z_0 \frac{2a}{\pi} A \cos \frac{\pi x}{2a} \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (3-39)$$

ถ้าไม่พิจารณาในลักษณะของเรโซเนเตอร์ แต่เป็นการมองคลื่นที่เคลื่อนที่
เดินทางในทิศทาง y เหมือนในสายส่งกำลังไฟฟ้า หรือในท่อนำคลื่น ณ ตำแหน่ง $y = 2b$
เป็นช่องเปิด (Open Circuit) พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก ด้วยสนาม
แม่เหล็ก ณ ผิวสัมผัสของช่องเปิด จะต้องเป็นศูนย์ ($H_x = 0$ ณ $y = 0, 2b$)

$$H_x = -j \beta_{10} \cdot \frac{2a}{\pi} \cdot \left[A^+ e^{-j \beta_{10} y} - A^- e^{j \beta_{10} y} \right] \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-40)$$

$$0 = j \beta_{10} \cdot \frac{2a}{\pi} \cdot \left[A^+ e^{-j \beta_{10} 2b} - A^- e^{j \beta_{10} 2b} \right] \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-42)$$

$$0 = A^+ e^{-j \beta_{10} 2b} - A^- e^{j \beta_{10} 2b} \quad (3-43)$$

$$\frac{A^-}{A^+} = e^{j 2\beta_{10} (b)} = \Gamma \quad (3-44)$$

ค่าของ $\frac{A^-}{A^+}$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ณ ตำแหน่ง $y = 2b$
ถ้าหากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น $\frac{A^-}{A^+} = 1$

$$A^- = A^+ = A \quad (3-45)$$

$$\cos (2\beta_{10} 2b) = 1 \quad (3-46)$$

$$\beta_{10} = \frac{1\pi}{2b} \quad l = 0, 2, 4 \quad (3-47)$$

ดังนั้น

$$A^+ e^{-j \beta_{10} 2b} - A^- e^{j \beta_{10} 2b} = A \cdot \left[e^{-j \beta_{10} 2b} - e^{j \beta_{10} 2b} \right]$$

$$= -2jA \sin \frac{\pi y}{2b} \quad (3-48)$$

และ

$$A^+ e^{-j \beta_{10} 2b} + A^- e^{j \beta_{10} 2b} = 2A \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (3-49)$$

โดยสรุป สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศแผ่นพิมพ์ เมื่อเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$H_x = -j \beta_{10} \frac{2a}{\pi} \cdot -2jA \sin \frac{\pi y}{2b} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z = -j \beta_{10} \frac{2a}{\pi} Z_{h,10} \cdot 2A \cos \frac{\pi y}{2b} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \quad (3-51)$$

ดังนั้นเมื่อไม่พิจารณาสายอากาศแผ่นพิมพ์ในลักษณะโรโซเนเตอร์ แต่เป็นคลื่นที่จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก โดยพิจารณาจุดบ่อนกำลังงานไฟฟ้าที่จุดออริจิน ในลักษณะการวางช่องเปิด ณ ตำแหน่ง $x = a$ และ $x = 2a$, $y = 2b$ ก็จะได้คำตอบในลักษณะเดียวกัน

ดังนั้น การสมมุติสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศแผ่นพิมพ์ ในบทที่ 2 ดังสมการ

$$E_z = \cos \beta(a-|x|) \cos \beta(2b-y) \quad (3-52)$$

ก็สามารถที่จะเป็นความจริงตามเงื่อนไขขอบเขตแบบผนังแม่เหล็ก



บทที่ 4

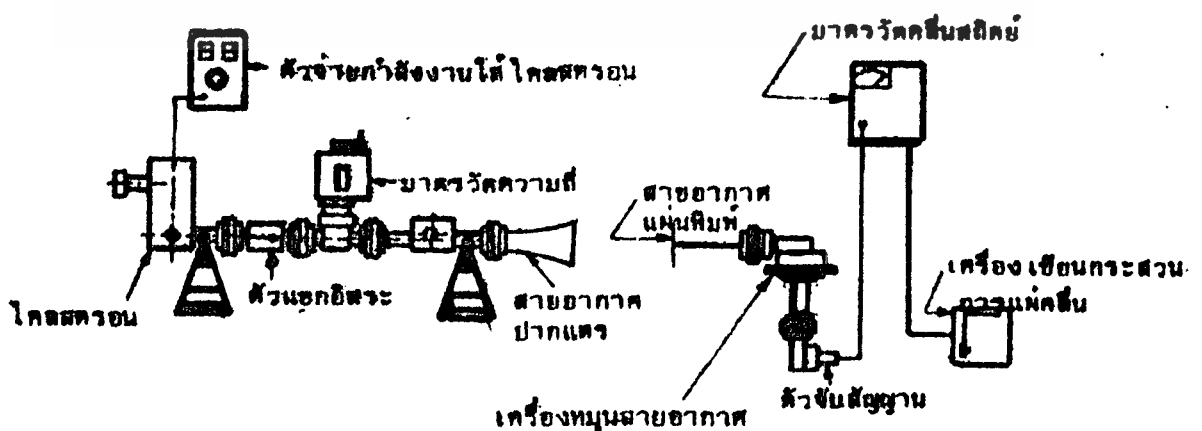
การทดลองและผลการคำนวณ

4.1 บทนำ

การทดลองสร้างสายอากาศไมโครสตริบเพื่อวัดทดสอบหาการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้แผ่นพิมพ์ชนิด 2 หน้า ซึ่งสารไดอิเล็กทริกเป็นอีพอกซี (Epoxy) และมีค่าเปอมิติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) $\epsilon_r \approx 4-5$ ได้จัดทำขึ้นในหลายลักษณะ ทั้งนี้เพื่อหาผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากรูปร่างขนาด และเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ยี่งๆที่จำเป็น โดยการสร้างสายอากาศเป็นชนิดสี่เหลี่ยมจตุรัสและวัดทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นกราวน์ และโดยขนาดของสายอากาศเมื่อพื้นกราวน์มีขนาดคงที่ โดยใช้อุปกรณ์ไมโครเวฟความถี่ย่านแถบคลื่นเอ็กซ์ (x-Band) ขนาดความถี่ 8,000-9,000 MHz

4.2 การจัดการทดลองและวิธีการวัดสนามไฟฟ้า

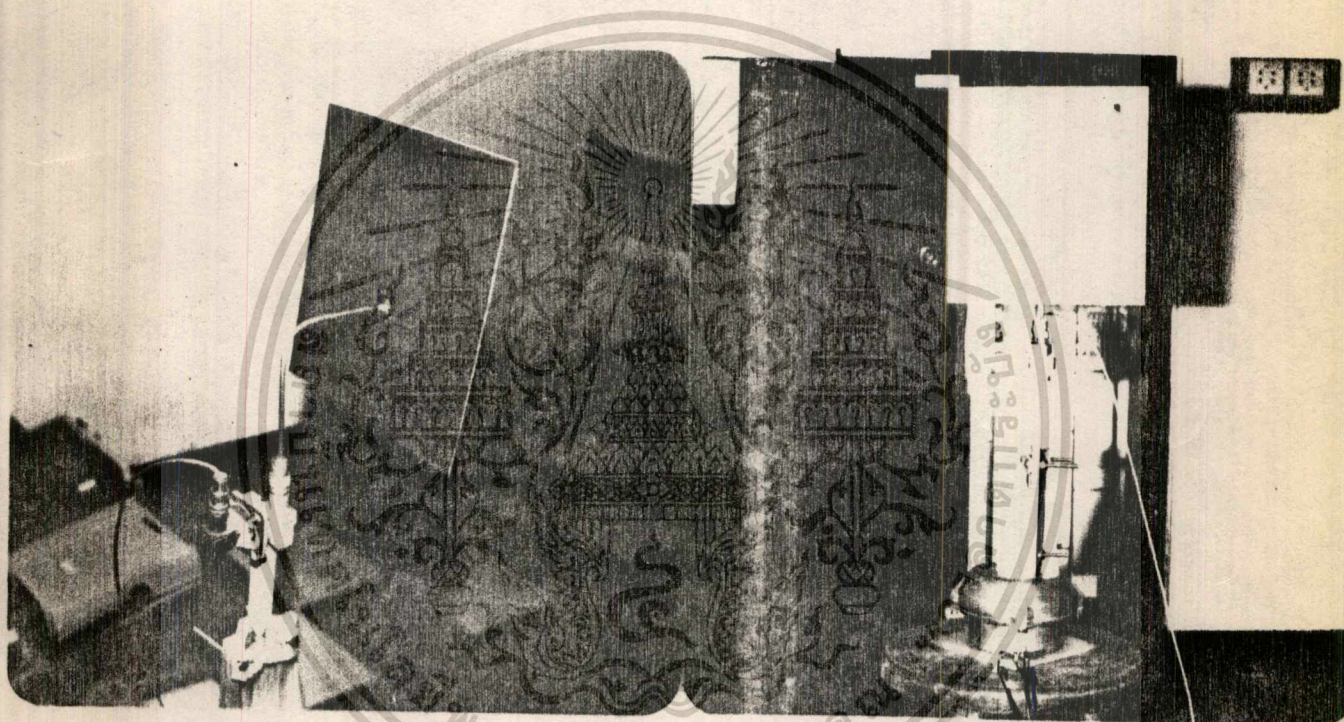
การจัดการทดลองทำในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือทดลองไมโครเวฟของ Philips รูปการทดลองได้แสดงไว้จะเห็นสายอากาศแผ่นพิมพ์ บ่อนกำลังงานไฟฟ้าด้วยสายส่งแกนร่วมชนิดสายกราวด์แข็ง (Solid Coaxial Transmission Line)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงการจัดเครื่องอุปกรณ์ไมโครเวฟเพื่อวัดกระแสการแผ่คลื่นของสายอากาศ

ตัวสายอากาศติดตั้งบนเครื่องหมุนสายอากาศ รับสัญญาณและป้อนเข้าเครื่อง เขียนกระสวนการแผ่คลื่น สำหรับตัวกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟ เป็นไครสตรอน (Klystron) และป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศปากแตรที่มีช่องเปิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นการจัดขั้วคลื่นของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศปากแตรไปยังสายอากาศแผ่นพิมพ์ก็สามารถทราบได้จากโหมดของสนามไฟฟ้าที่เดินทางในท่อนำคลื่น และจากการวางสายอากาศปากแตรด้วย



รูปที่ 4.2 แสดงการวางตำแหน่งการวัดสายอากาศ

การจัดการทดลองจำเป็นต้องระวังแนวทิศทางของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศปากแตร และจะต้องคำนึงถึงระยะความห่างของสายอากาศปากแตรและสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามิให้อยู่ใกล้กันมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

4.3 ผลการวัดทดลอง

การวัดทดลองโดยใช้สายอากาศไมโครสตริบเป็นตัวรับสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากสายอากาศปากแตร สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ผ่านตัวตรวจจับสัญญาณ (detector) เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง บ่อนให้กับเครื่อง SWR ดีเทคเตอร์ SWR ดีเทคเตอร์เป็นเครื่องมือมิลิวอลท์มิเตอร์และมีส่วนของสัญญาณออกบ่อนให้กับเครื่องเขียนกระสวยการแผ่คลื่นการเขียนกระสวยการแผ่คลื่นเขียนไว้ในลักษณะ Rectangular

ได้แสดงผลการวัดไว้จากลักษณะของสายอากาศไมโครสตริบ ชนิดกราว์นเพลน ใหญ่ ตัวสายอากาศมีขนาดลดลงเพื่อให้จุดเรโซแนนซ์ ณ ความถี่ 9,000 MHz

ขนาดของสายอากาศ ณ จุดเรโซแนนซ์ ประมาณ 3.33 เซนติเมตร เราคำนวณหาขนาดของสายอากาศ เมื่อสารไดอิเล็กตริกมีเปอร์มิททิวิตี $\epsilon_r = 4.25-5$ ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากการทดลอง และประกอบกับการพิจารณาผลจากคอมพิวเตอร์

สมการคำนวณขนาดของสายอากาศแผ่นพิมพ์ เมื่อสารไดอิเล็กตริกเป็น ϵ_r

$$2a = \frac{\lambda_d}{2} = \frac{\lambda_0/2\sqrt{\epsilon_r}}{2} = \frac{3.33}{2\sqrt{4.25}} = 0.807 \text{ เซนติเมตร}$$

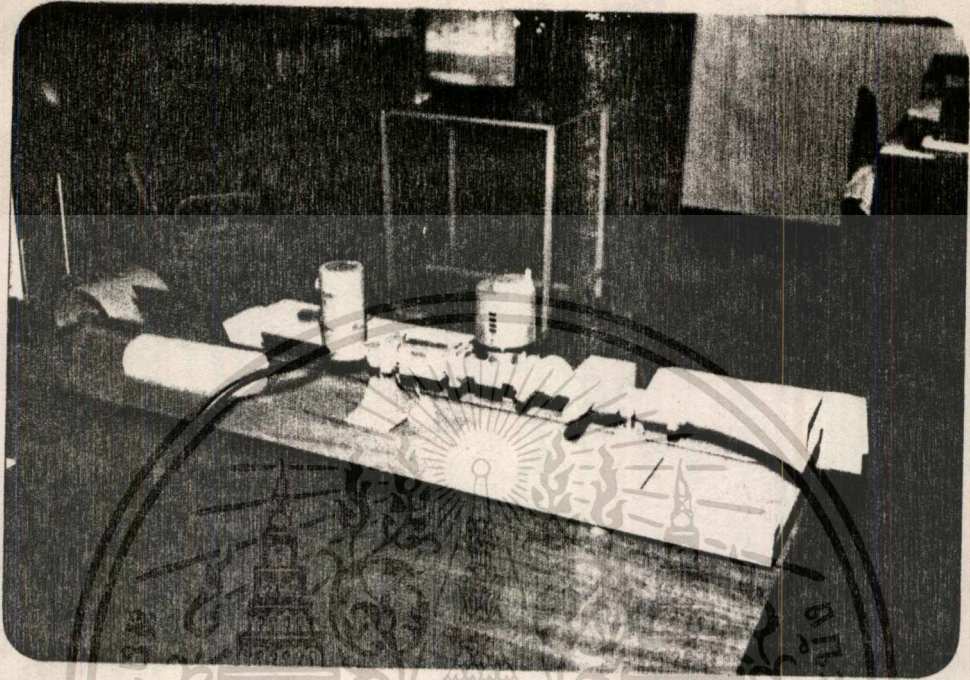
$$\frac{\lambda_d}{2} = 0.807 \text{ เซนติเมตร} \quad \lambda_d = 1.616 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\frac{3\lambda_d}{2} = 2.42 \text{ เซนติเมตร} \quad 2\lambda_d = 3.233 \text{ เซนติเมตร}$$

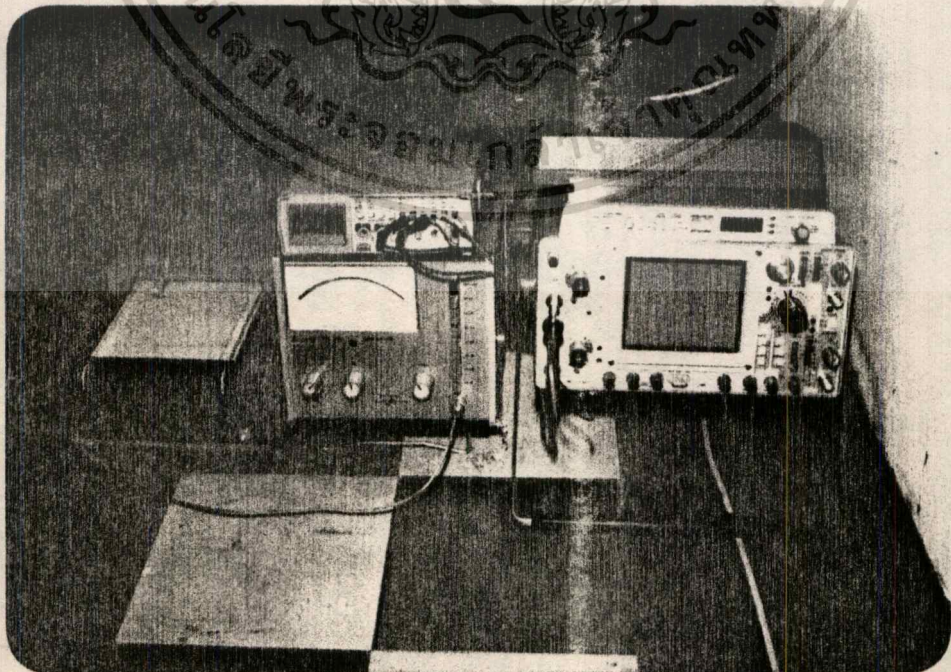
รูปแสดงผลการวัดทดลอง แสดงไว้เป็น 2 ลักษณะ

1. สนามไฟฟ้าที่วัดในทิศทาง θ E_θ เมื่อ $\phi = 90^\circ$
2. สนามไฟฟ้าที่วัดในทิศทาง ϕ E_ϕ เมื่อ $\phi = 0^\circ$

ณ ขนาดของสายอากาศต่างๆ กัน

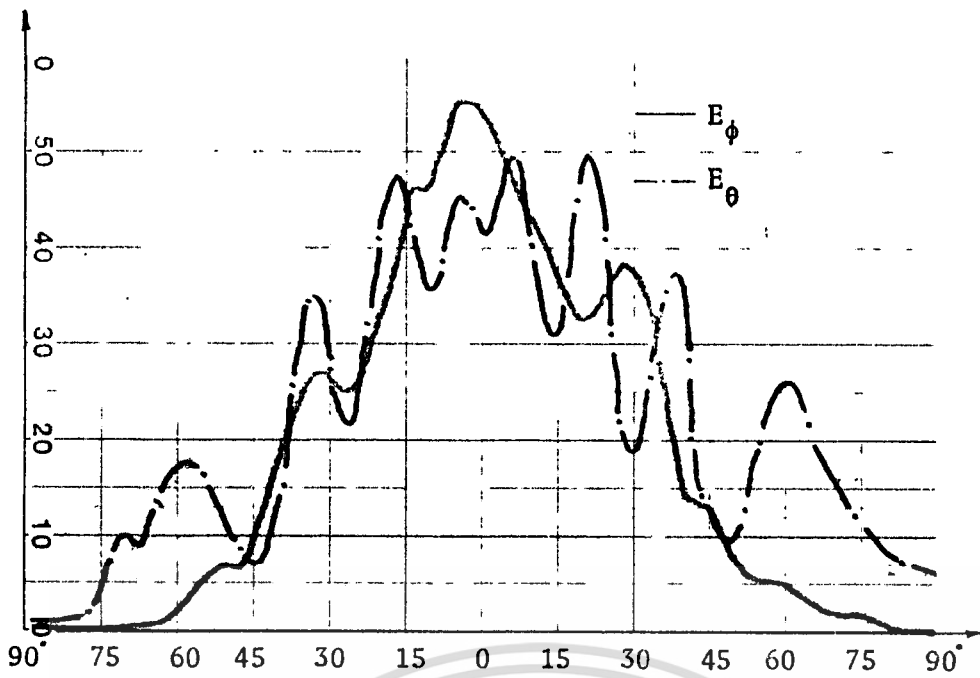


รูปที่ 4.3 แสดงการป้องกันกำลังงานไฟฟ้าให้สายอากาศปากแตร

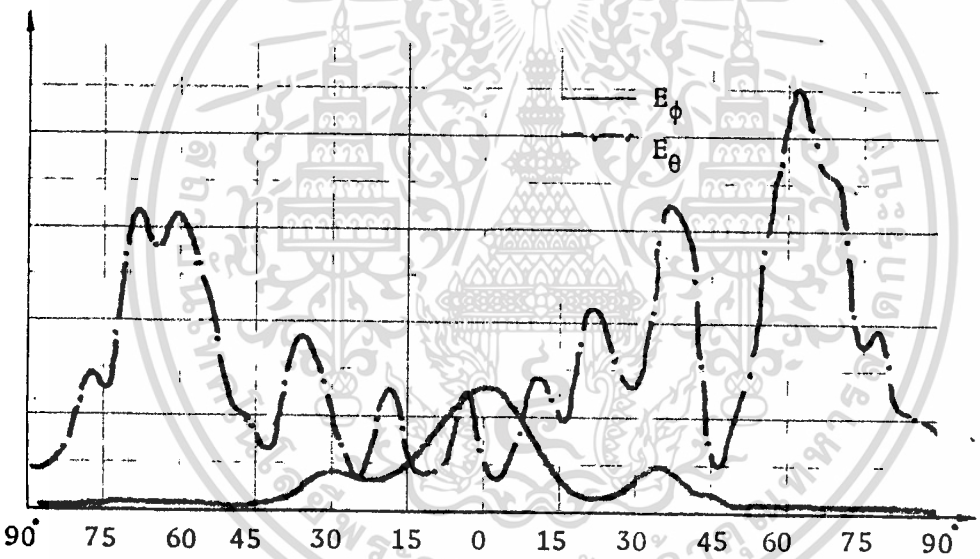


รูปที่ 4.4 แสดงเครื่องมือประกอบการวัดสัญญาณไฟฟ้า

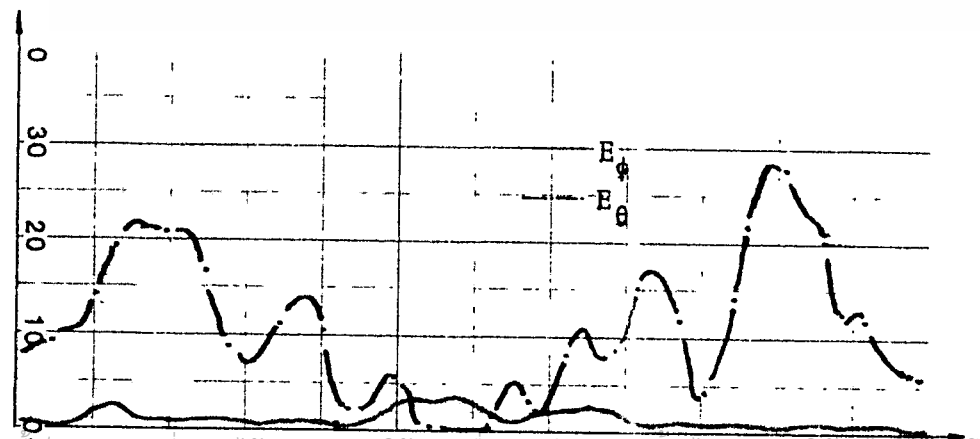
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 1.0x1.0 ซม.



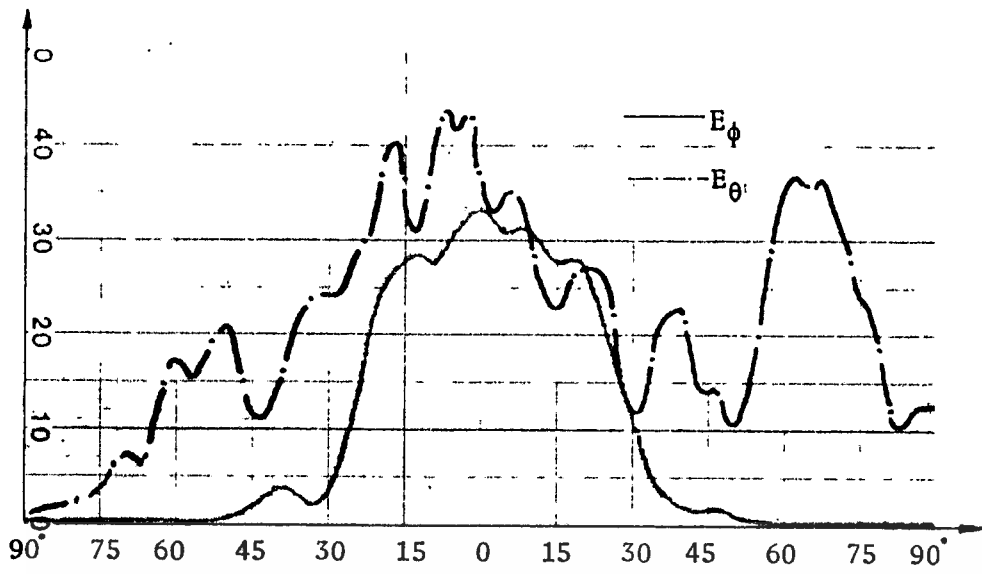
รูปที่ 4.6 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 1.2x1.2 ซม.



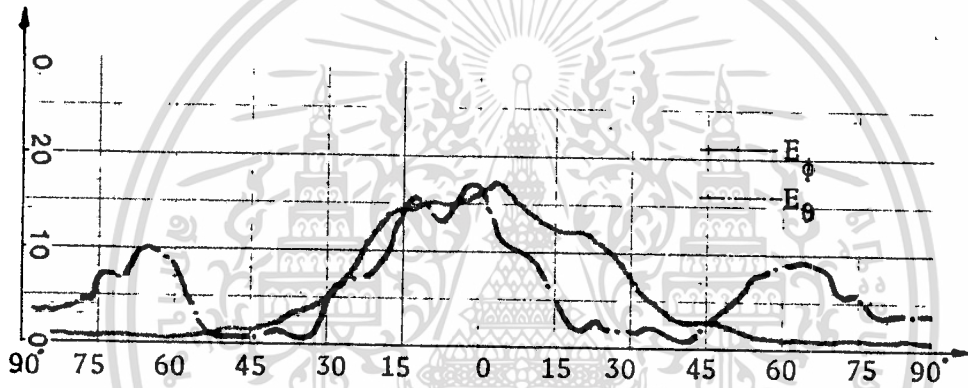
รูปที่ 4.7 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 1.4x1.4 ซม.

เอกสารนี้เป็นสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

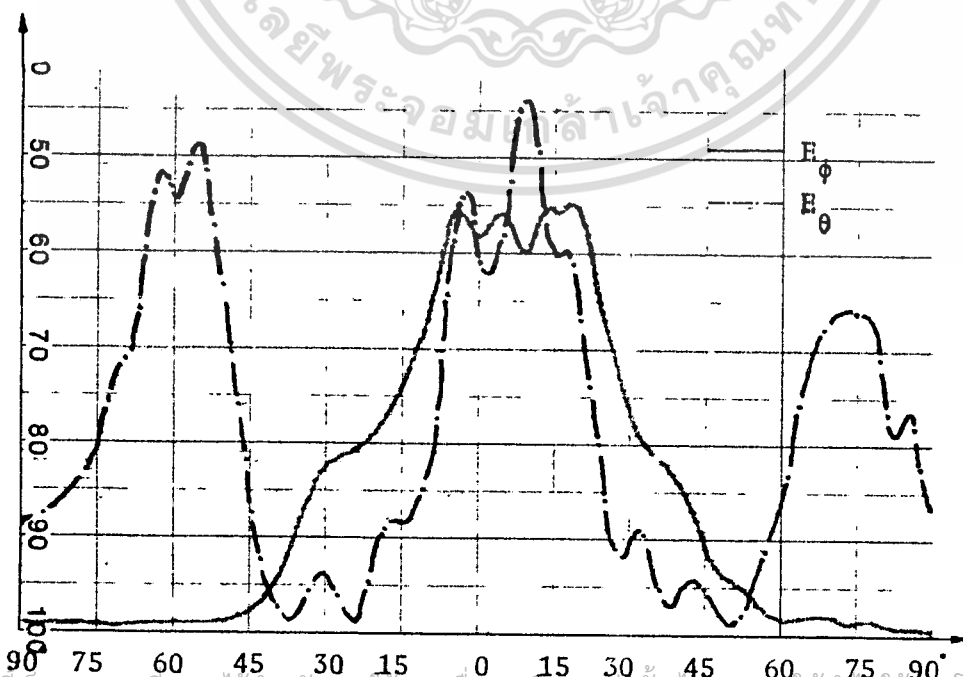
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 2.0x2.0 ซม.



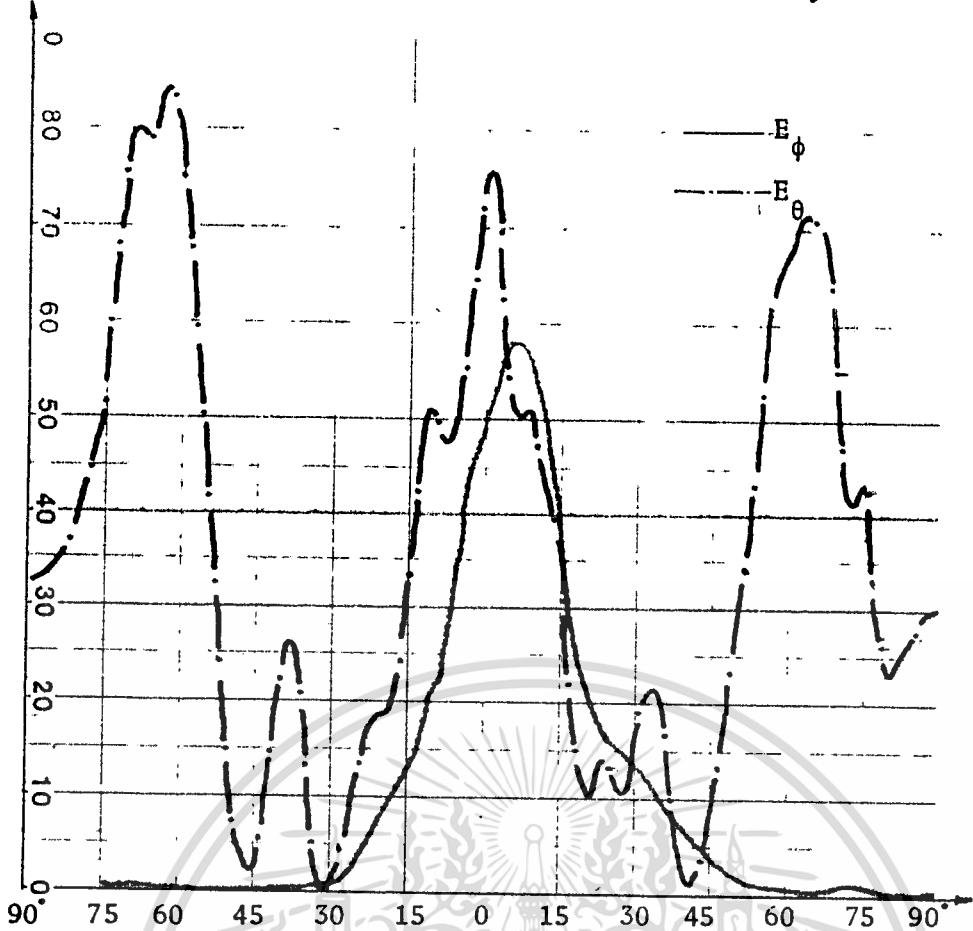
รูปที่ 4.9 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 2.2x2.2 ซม.



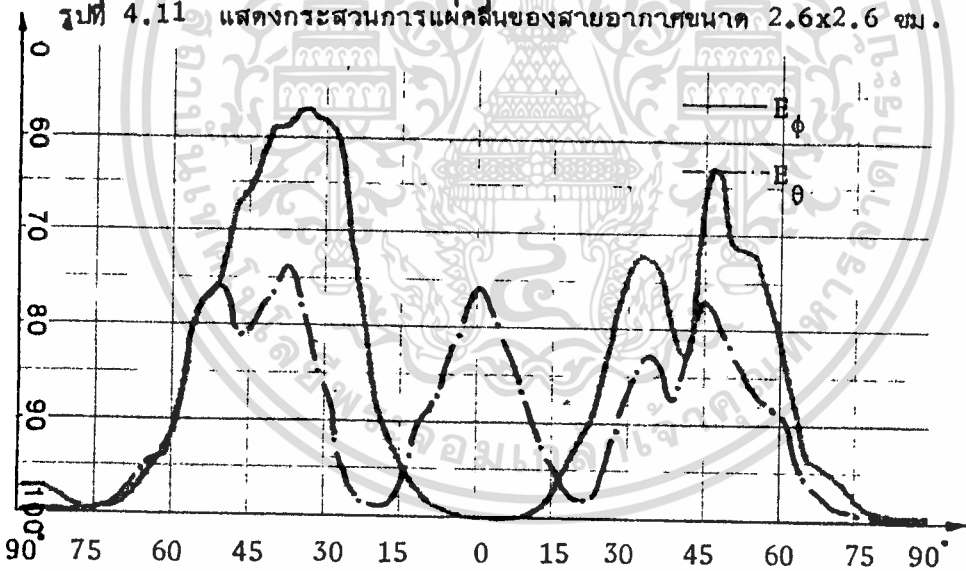
รูปที่ 4.10 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 2.4x2.4 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

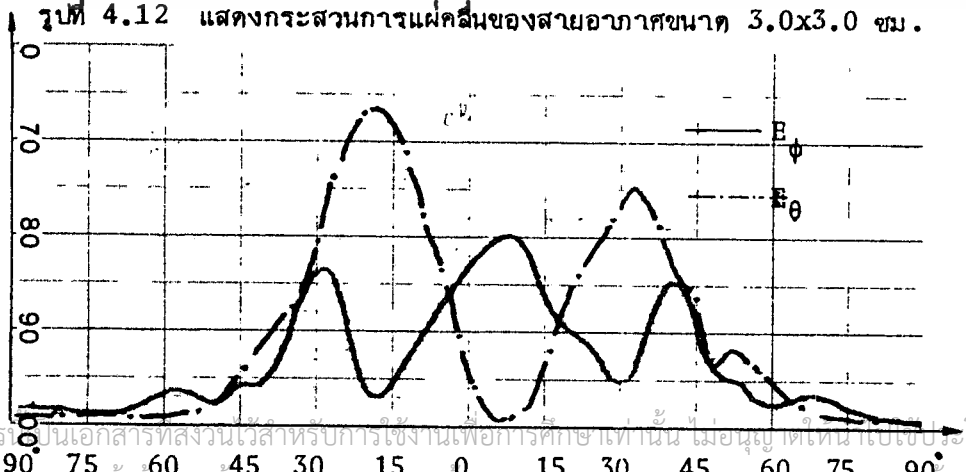
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 2.6x2.6 ซม.

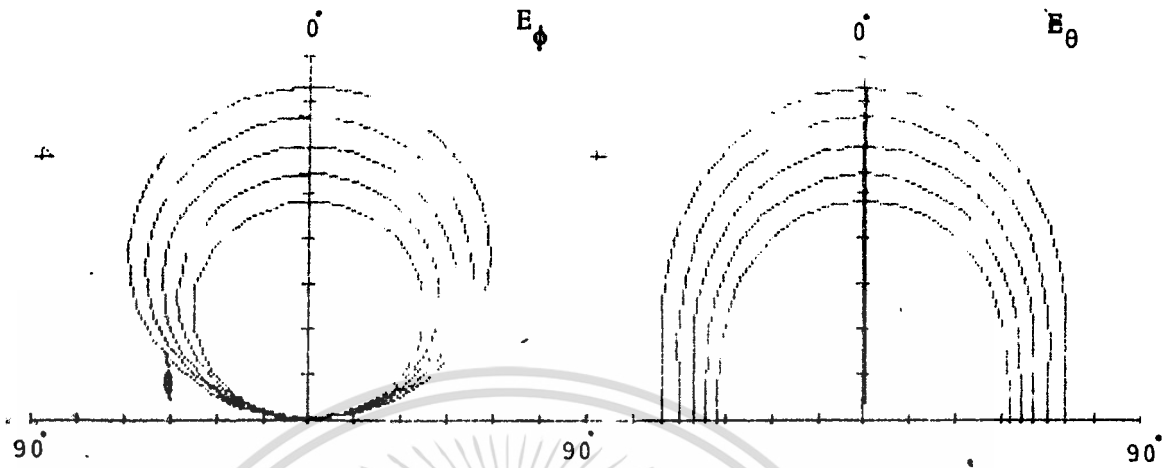


รูปที่ 4.12 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 3.0x3.0 ซม.

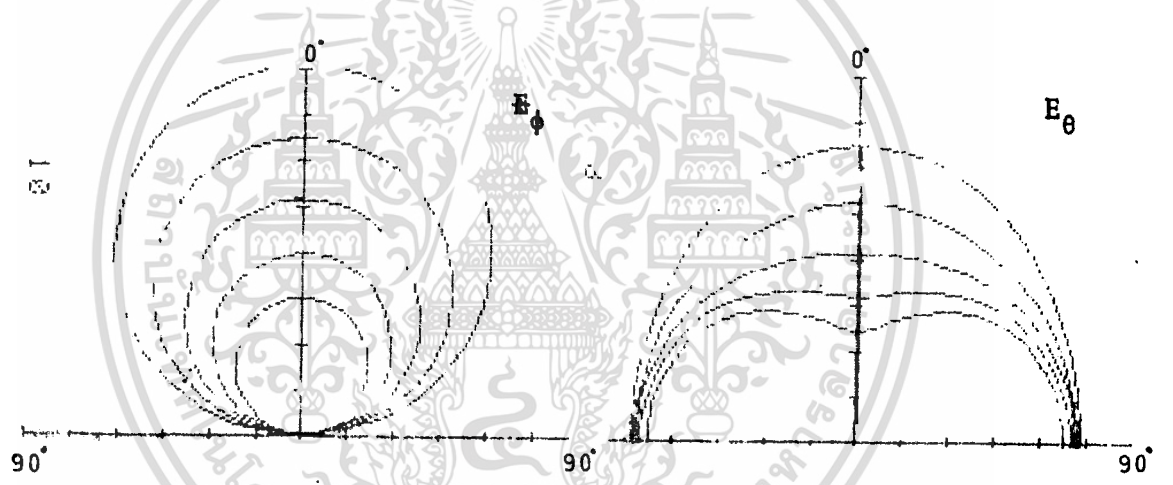


รูปที่ 4.13 แสดงกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศขนาด 3.2x3.2 ซม.

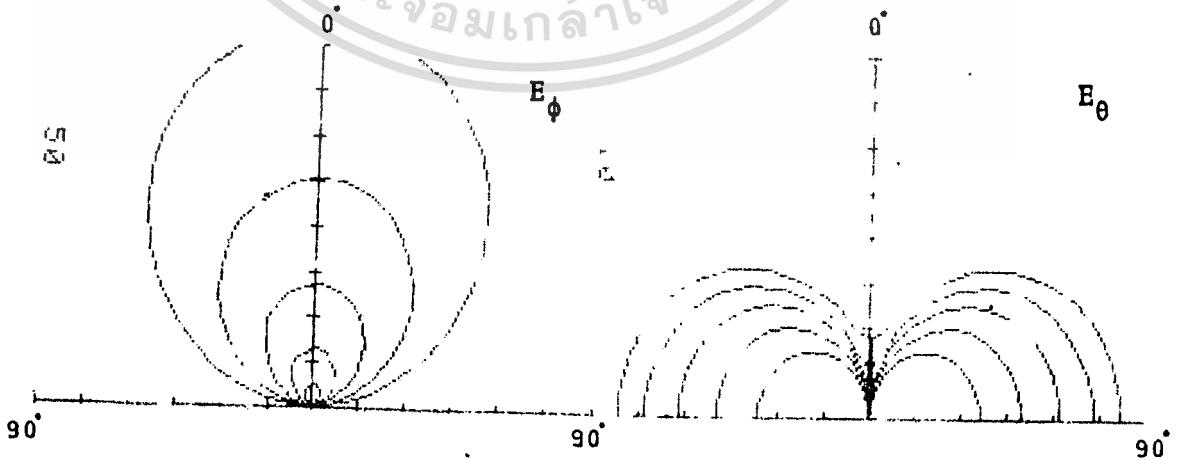
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 1.0x1.0 ซม.

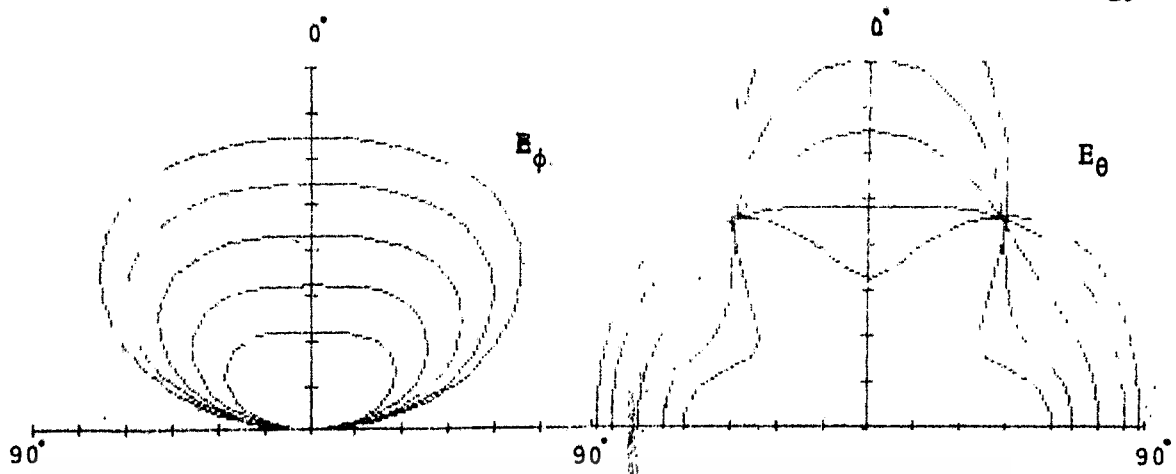


รูปที่ 4.15 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 1.2x1.2 ซม.



รูปที่ 4.16 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 1.4x1.4 ซม.

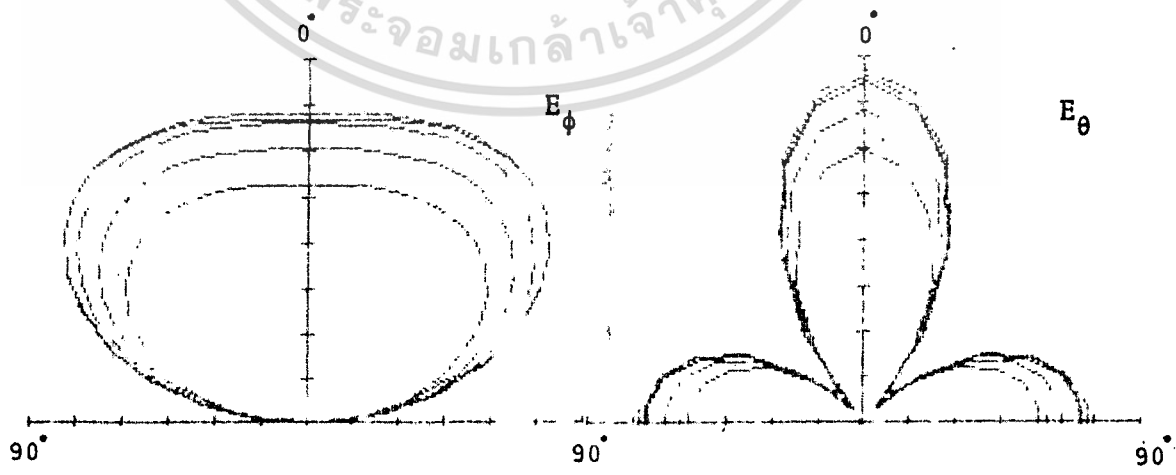
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 2.0x2.0 ซม.

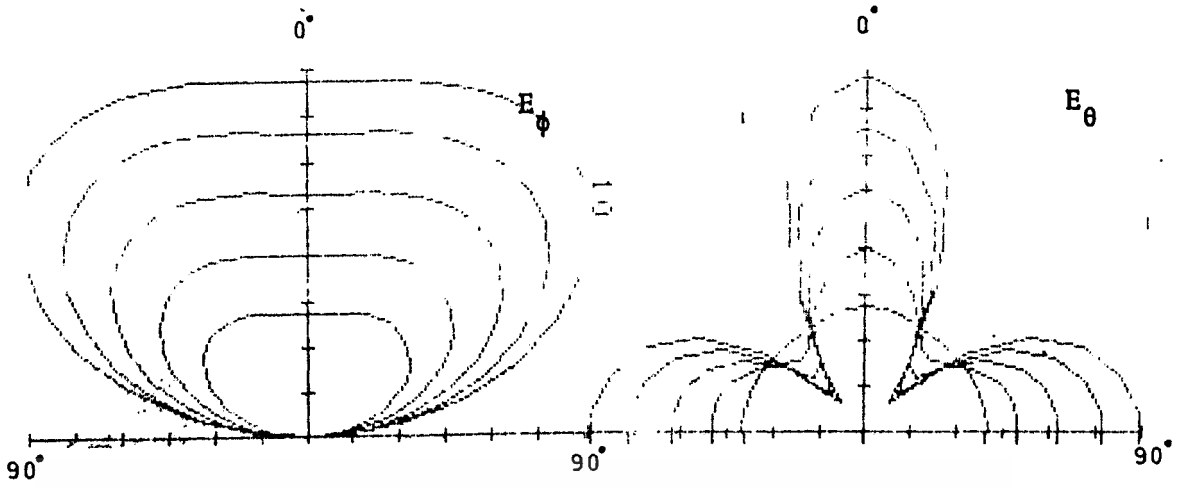


รูปที่ 4.18 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 2.2x2.2 ซม.

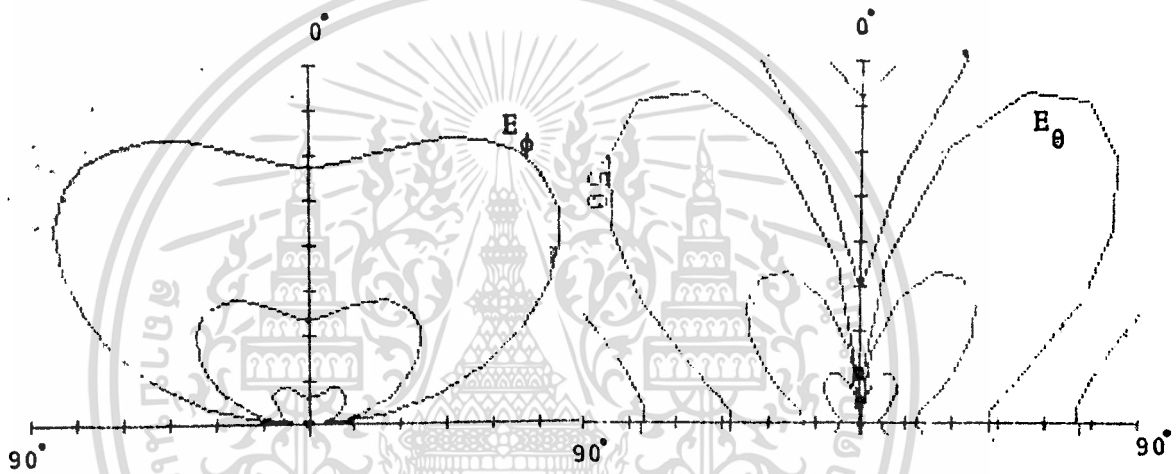


รูปที่ 4.19 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 2.4x2.4 ซม.

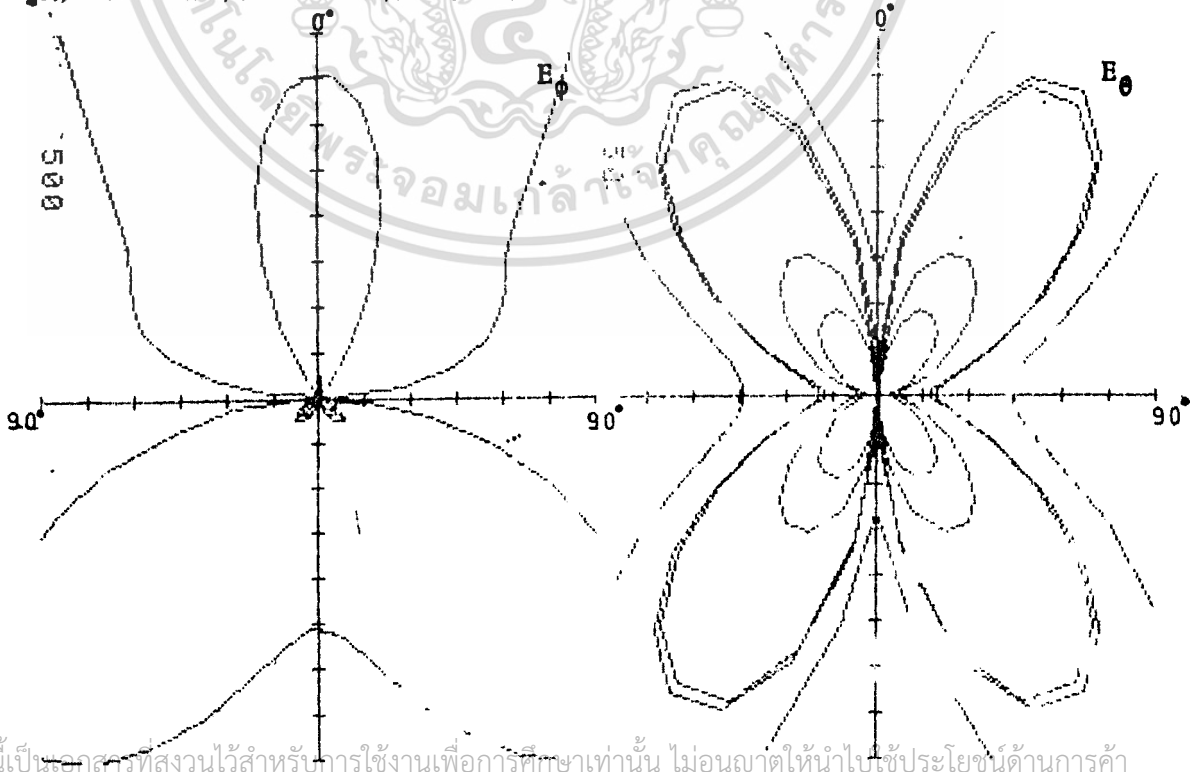
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 2.6x2.6 ซม.



รูปที่ 4.21 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 3.0x3.0 ซม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

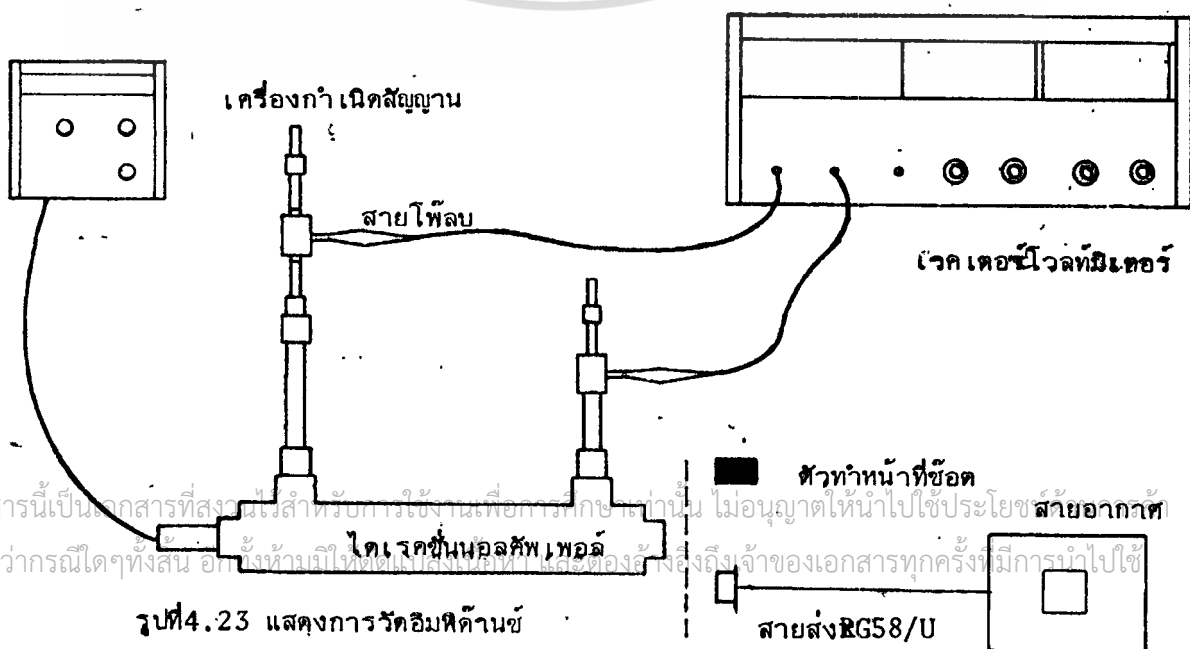
ไม่ว่ากรณีใดๆ อีกทั้งห้ามมีการนำข้อมูลจากเอกสารนี้ไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์หรือสื่อใดๆ ที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 แสดงผลการคำนวณของสายอากาศ ขนาด 3.2x3.2 ซม.

4.4 การวัดค่า อิมพีแดนซ์

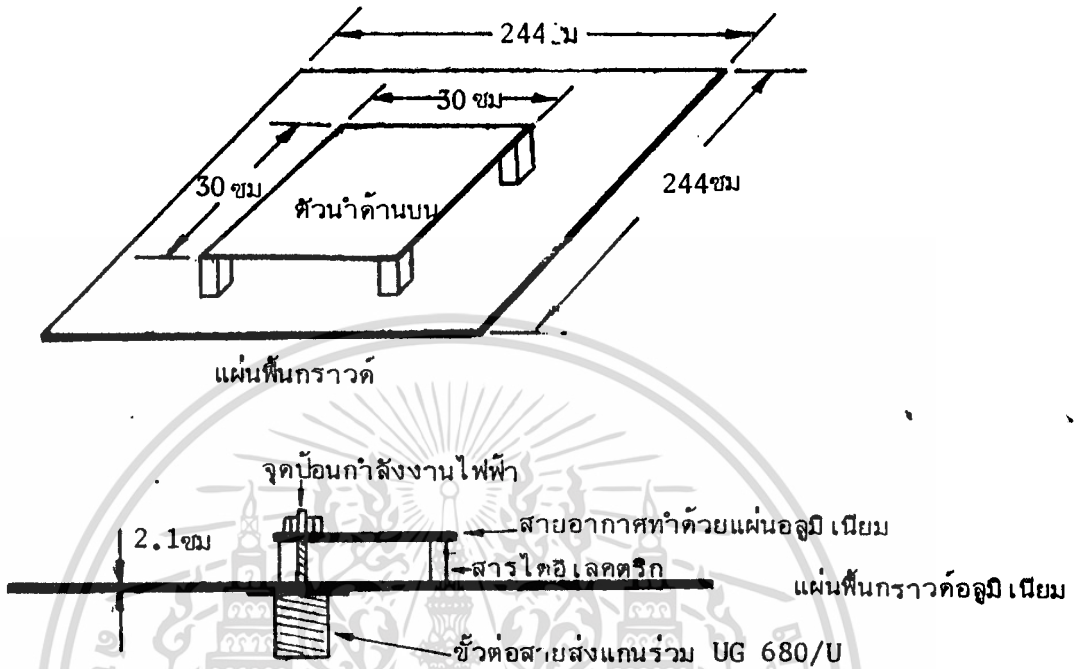
การวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดบ่อนกำลังงานไฟฟ้าของสายอากาศ ในย่านความถี่ไมโครเวฟโดยทั่วไปจะใช้วิธีการวัดแบบวิธีสลอตไลน์ เพื่อจะหาค่าของสแตนด์แวลเฟรโซ แล้วคำนวณกลับไปหาค่าอิมพีแดนซ์ การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมจตุรัส ในลักษณะเดียวกันจะเกิดปัญหาในกรณีของจุดบ่อนกำลังงานไฟฟ้า เพราะจะต้องทรานส์ฟอร์ม์ค่าจากปากช่องของท่อนำคลื่นไป ณ จุดปลายสายอากาศเล็กๆ ที่ทำหน้าที่คัปปลิงสัญญาณไฟฟ้าผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าชนิดแกนร่วมไปยังสายอากาศแผ่นพิมพ์ เนื่องจากความถี่ที่ใช้งานมีขนาดประมาณ 9000 MHz₂ มีความยาวคลื่น 3.33 ซม การทรานส์ฟอร์ม์จะทำได้ด้วยความความยุ่งยากและอาจเกิดการผิดพลาดได้โดยง่าย จึงได้ใช้วิธีการขยายสเกลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ไป ณ ช่วงความถี่ 500 MHz₂ ความยาวคลื่น 60 ซม สารไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นตัวนำปล่อยไว้ เป็นอากาศธรรมดา ระยะห่างระหว่างตัวนำออลูมิเนียมคั้นไว้ด้วยพลาสติกขนาดกว้างยาว 1.0x1.0 ซม² สูง 2.5 ซม บริเวณมุมทั้ง 4 ด้าน ขนาดของตัวสายอากาศตัดให้เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 30 ซม (λ/2) ส่วนแผ่นพื้นกราวด์ทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4 ฟุต x 8 ฟุต 2 แผ่นพับขอบติดกันให้เป็นแผ่นพื้นกราวด์ขนาดประมาณ 8 ฟุต x 8 ฟุต ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบขนาดของตัวสายอากาศกับพื้นกราวด์ประมาณ 1:8

การจัดการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนี้ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูง SYSTRON DONER MODEL 1702 เวคเตอร์โวลท์มิเตอร์ Hewlett Pachard 8405 dual directional coupler ทำหน้าที่แบ่งแยกสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน พร้อมทั้ง Constant Impedance Adjustable line 20 cm model 874-LK20L



รูปที่ 4.23 แสดงการวัดอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์สายอากาศ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

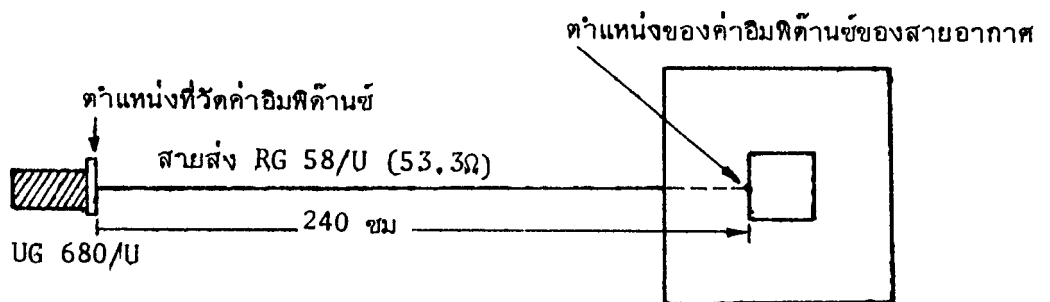


รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ใช้วัดค่าอิมพีแดนซ์

การวัดค่าอิมพีแดนซ์ กระทำในช่วงความถี่ 460 MHz ไปจนถึง 530 MHz

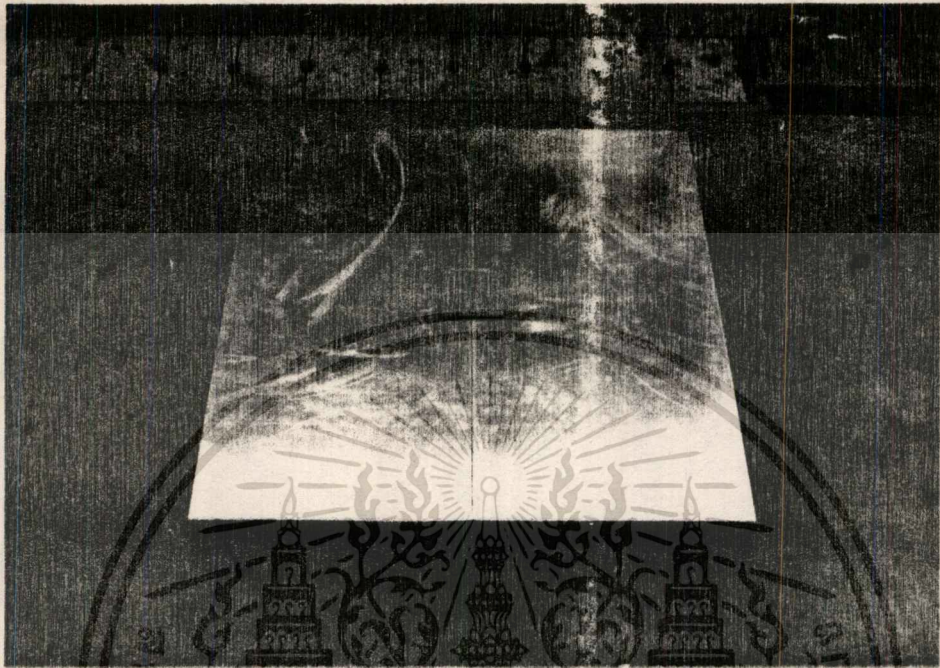
เพื่อทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ ณจุดปลายของ directional coupler ดังนั้นเมื่อได้ค่าอิมพีแดนซ์นำไปเขียนลงใน Smith chart เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

ค่าอิมพีแดนซ์จะต้องทรานสฟอร์มไปตามสายส่งแกนร่วม RG 58/U ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ 50Ω ยาว 240 มม เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งของหัวสายอากาศดังแสดงในรูป 4.25 การทรานสฟอร์มจะต้องหมุนจุดที่วัดได้จาก smith chart ไปตามทิศทางที่ชี้เข้าหาไปตามความยาวของสายส่งที่มีตัวประกอบความเร็ว(velocity factor)ประมาณ 0.66V_c

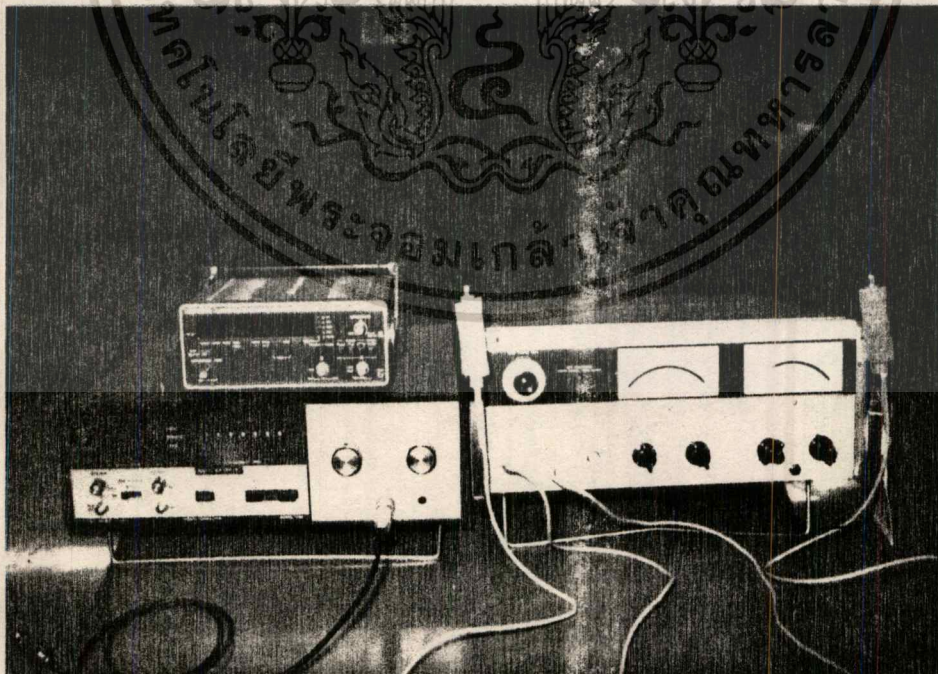


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.25 แสดงการทรานสฟอร์มอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.26 แสดงการวัดค่าอิมพิตทานซ์



รูปที่ 4.27 เครื่องมือประกอบการวัดค่าอิมพิตทานซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

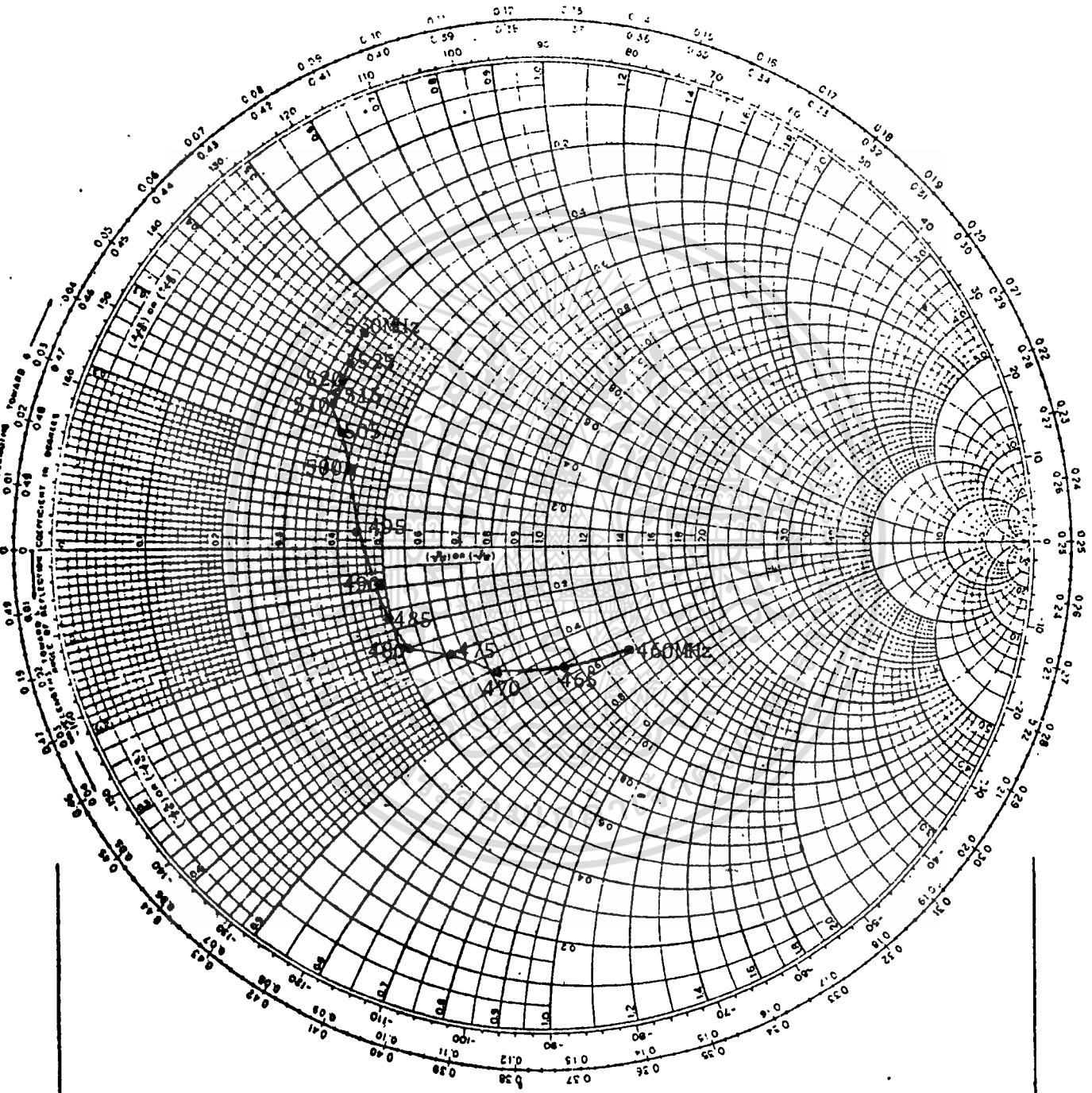
SMITH CHART

TITLE _____

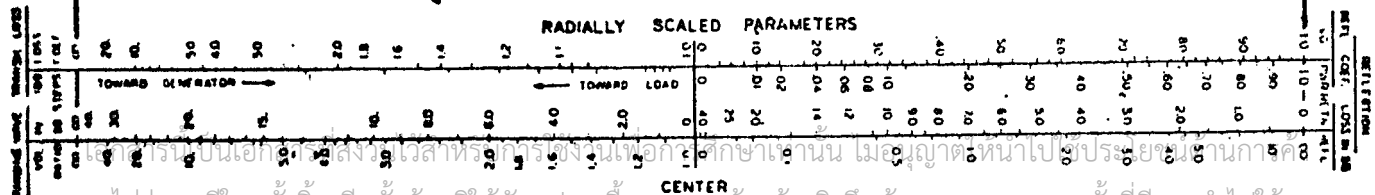
$z = R - jX, Z_0 = \Omega$
 $y = G - jB, Y_0 = U$

DATE _____

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATION ENGINEERING



รูปที่ 4.29 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดของสายอากาศ



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวัดค่าเปอมิติวิตี (Permittivity) ของสารไดอิเล็กตริก

การวัดค่าเปอมิติวิตี (ϵ_r) ของสารไดอิเล็กตริก จะต้องวัดด้วยวิธีควิตี้เรโซเนเตอร์ (Cavity Resonator) เพื่อหาตำแหน่งเรโซแนนท์ ที่สัมพันธ์กับค่าของเปอมิติวิตี แต่โดยวิธีการประมาณการหาค่าของสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในลักษณะแผ่นคิมพ์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับคาปาซิเตอร์ เราสามารถประมาณค่าเปอมิติวิตี โดยนำแผ่นคิมพ์มาตัดให้เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจตุรัส แล้วใช้สูตรมาตรฐานในการคำนวณคาปาซิเตอร์รูปสี่เหลี่ยม ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างยาวและความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก

โดยการสร้างแผ่นคิมพ์ให้เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจตุรัสมีขนาดต่างๆ กัน 4 ขนาด วัดค่าคาปาซิแตนซ์จากบริดจ์มาตรฐาน (Hewlett Packard 4265B) คำนวณค่าคาปาซิแตนซ์จากสูตรมาตรฐาน

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

สมมติค่าไดอิเล็กตริก มีค่าจาก 1-10 โดยเพิ่มคราวละ 1 และกำหนดค่า

A ให้เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจตุรัส ในตารางที่ 1

4 ตารางเซนติเมตร (2x2)	9 ตารางเซนติเมตร (3x3)	16 ตารางเซนติเมตร (4x4)	25 ตารางเซนติเมตร (5x5)
---------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------

ขนาดของความหนา d มีค่าประมาณเท่ากับ h ของแผ่นคิมพ์ ≈ 1.5 มิลลิเมตร

จากการวัดทดลองด้วยบริดจ์ ในตารางที่ 2

ขนาดแผ่นคิมพ์ (ตารางเซนติเมตร)	ค่าคาปาซิแตนซ์ที่วัดได้ (Cm) พโตฟาราดส์
1	12.15 PF
9	29.74 PF
16	50.87 PF
25	76.84 PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ตารางแสดงผลการวัดค่าคาปาซิแตนซ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณเปรียบเทียบ หาค่าคาปาซิเตอร์ด้วยกำหนดค่าเปอมิตริวิตี และคำนวณค่าคาปาซิเตอร์ โดยกำหนดพื้นที่ A ให้เปลี่ยนแปลงจาก 4 ตารางเซนติเมตร 9 ตารางเซนติเมตร , 16 ตารางเซนติเมตร , 25 ตารางเซนติเมตร

ค่าเปอมิตริวิตีสัมพัทธ์

ค่าคาปาซิเตอร์จากการคำนวณ (C_c)
(ทีโอ.ฟาราเดย์)

ϵ_r	A=4 ตาราง ซม.	A=9 ตาราง ซม.	A=16 ตาราง ซม.	A=25 ตาราง ซม.
3	7.08	15.93	28.33	44.27
4	9.44	21.24	37.77	59.02
5	11.80	26.56	47.22	73.78
6	14.16	31.87	56.66	88.54

เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณกับผลการวัด

A=4 ตาราง ซม.	A=9 ตาราง ซม.	A=16 ตาราง ซม.	A=25 ตาราง ซม.
$C_m = 12.15$	$= 29.74$	$= 50.87$	$= 76.84$
$C_c = 11.80$	$= 26.56$	$= 47.22$	$= 73.78$

การประมาณค่าเปอมิตริวิตีของสารไดอิเล็กตริก จากการวัดในลักษณะคล้ายคาปาซิเตอร์ เป็นการวัด ณ ช่วงความถี่ 1 kHz ซึ่งเมื่อเทียบกับการใช้งานจริง ณ ความถี่ 9,000 MHz จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันมาก ผลการวัดที่ได้มาเป็นเพียงหาข้อจำกัดของค่าเปอมิตริวิตีในชั้นแรกเท่านั้น หรืออย่างน้อยที่สุดก็เป็นตัวเลขที่บอกค่าเปอมิตริวิตีอย่างคร่าวๆ ในชั้นแรก

ผลสรุปของค่าเปอมิตริวิตี มีค่าประมาณ $4 < \epsilon_r < 6 \approx 4.75-5$

เพื่อที่จะนำค่าเปอมิตริวิตี ϵ_r ไปใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบในการออกแบบเพื่อทดสอบสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริบ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิจารณ์และสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้เน้นถึงทฤษฎีและการทดลองหากระสวนการแผ่คลื่นจากสายอากาศ แผ่นพินัมรูปลี่เหลี่ยมจตุรัสประกอบทั้งคำอธิบายด้านขั้ว แม้ว่าทฤษฎีที่เสนอไว้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่ก็ได้ก็ตาม ผลการทดลองวัดกระสวนการแผ่คลื่นโดยทั่วไปจะสอดคล้องกับทฤษฎีแต่ปัญหาสำคัญที่อาจก่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎีนั้นอาจมีสาเหตุมาจากหลายประการ แต่จะกล่าวถึงเพียง 4 ประการคือ ประการแรกเกี่ยวกับทฤษฎีโดยตรง กล่าวคือทฤษฎีที่แสดงได้สมมุติสนามไฟฟ้าในช่องเปิดของสายอากาศขึ้นมา เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตผนังแม่เหล็กและเงื่อนไขการกระตุ้นสนามไฟฟ้าโดยการป้อนกำลังงานเข้าไป และในการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ระยะทางไกลออกไปจากสายอากาศ ได้สมมุติว่ามีผลเกิดจากกระแสแม่เหล็กแต่เพียงอย่างเดียว และไม่ได้พิจารณากระแสไฟฟ้าที่ผิวช่องเปิดซึ่งเป็นเรื่องที่มีเหตุผลพอสมควรทีเดียว แต่อย่างไรก็ตาม ในสภาพความเป็นจริงนั้น อาจมีโหมคของสนามไฟฟ้าในสายอากาศเกิดขึ้น และแต่ละโหมคจะต้องมีค่าสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตในสภาพความเป็นจริงแทนที่จะเป็นผนังตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ การคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวสายอากาศให้ถูกต้องและครบถ้วนสมบูรณ์ เป็นเรื่องที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะมีผลให้เราสามารถคำนวณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกไปได้อย่างถูกต้อง ประการที่สองก็คือ ส่วนที่เกี่ยวกับการทดลองและการจัดอุปกรณ์ทดลอง ส่วนที่สำคัญเริ่มแรกก็จะต้องจัดให้ระนาบของสายอากาศแผ่นพินัม และระนาบช่องเปิดของสายอากาศปากแตรขนานกันและตั้งฉากกับจุดเชื่อมต่อแกนของสายอากาศทั้งสองอย่างแท้จริง และในการหมุนวัดสายอากาศ ต้องหมุนระนาบของสายอากาศจริง ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ยากหากระนาบของสายอากาศเอียงไปจากระนาบพิงประสงค์ แม้เพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนไปด้วย นอกจากนั้นการสะท้อนคลื่นจากสิ่งแวดล้อมก็จะมีผลต่อการวัดด้วย ประการที่สามนั้นคือความสัมพันธ์และข้อสมมุติทางทฤษฎีของสายอากาศกับสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงๆ จำเป็นต้องสอดคล้องกันพอสมควร ตัวอย่างเช่น ในทฤษฎีที่นำมาเสนอนี้ถือว่าแผ่นกราวด์กว้างใหญ่เป็นอนันต์ ในขณะที่การสร้างสายอากาศให้มีรูปร่างและขนาดของแผ่นกราวด์เช่นนั้นทำไม่ได้ ในการสร้างเพื่อการทดลองจึงทำได้แต่เพียงให้แผ่นกราวด์ขนาดความกว้างยาวเป็นหลายเท่าของความยาวคลื่น แม้กระนั้นหากแผ่นกราวด์โตไม่พอก็จะเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนหรือดิฟแฟรคชันของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ริมขอบแผ่นกราวด์ของสายอากาศทำให้กระบวนการแผ่คลื่นที่วัดได้แตกต่างจากที่ทำนายโดยทางทฤษฎีที่กำหนดให้แผ่นกราวด์กว้างใหญ่เป็นอนันต์ อย่างไรก็ตาม เราสามารถสร้างทฤษฎีที่กำหนดให้แผ่นกราวด์มีขนาดจำกัดก็ได้ สำหรับประการสุดท้ายที่จะกล่าวถึงในที่นี้ คือค่าสภาพไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้ทำลวดสเตรตซึ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่าที่ถูกต้องแน่นอน เพราะสารไดอิเล็กตริกนี้จะเป็นตัวกำหนดความยาวคลื่นในสายอากาศ ขนาดของสายอากาศที่สร้างขึ้นจะต้องใช้ความยาวคลื่นนี้เป็นตัวอ้างอิง เนื่องจากกระบวนการแผ่คลื่นอาจคลาดเคลื่อนได้หากมิติของสายอากาศเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นไม่เป็นที่ถูกต้องแม่นยำตามที่ต้องการ

โดยสรุปจะเห็นได้ว่ามี เรื่องที่จะต้องทำการศึกษาวิจัย เกี่ยวกับสายอากาศแผ่นดินพื้ อีกรวม ทั้งทางทฤษฎี และการทดลอง ตลอดจนการออกแบบสร้างและติดตั้งบนผิวรูปทรงแปลกๆ เพื่อประยุกต์ใช้กับงานในลักษณะต่างๆ ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Symposium on Microwave Strip Circuits, IRE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MIT - 3, Mar. 1955
 2. G.A. Deschamps, "Microstrip microwave antennas," presented at the 3rd USAF Sym. on Antennas, 1953
 3. A.G. Derneryd. "Linearly polarized microstrip antennas." IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP - 24, PP. 846 - 851, Nov. 1976
 4. Y.T. Lo, D. Solomon, and W.F. Richards, "Theory and experiment on microstrip antennas, : IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP - 27, pp. 137 - 145, Mar. 1979.
 5. P.K. Agrawal and M.C. Bailey, "An analysis technique for microstrip antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP - 25, pp. 756 -, Nov. 1977.
 6. S.A. Schelkunoff, "Some equivalence theorems of electromagnetics and their application to radiation problems," Bell Syst. Tech. J., vol. 15, pp. 92 - 112, Jan. 1936.
 7. IEEE Standard Test Procedures for Antennas, published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1979.
 8. สุธี อักษรภักดิ์ อธิวิมล ภูมิวิภาต " คุณสมบัติการแผ่คลื่นจากสายอากาศแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยม จตุรัส " วิศวกรรมสาร, ฉบับมกราคม ๒๕๒๖ หน้า ๔๗ - ๕๓
 9. เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ๑-๒ พฤษภาคม ๒๕๒๔
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง เทคนิคของสายอากาศแผ่นพิมพ์

เอกสารงานวิจัยที่อาศัย เทคนิคของสายส่งกำลังไฟฟ้า

10. Munson, "Conformal microstrip antenna and microstrip phase array.",
IEEE AP January 1974. pp 74 - 93

11. Howell, "Microstrip antenna.", IEEE AP 23 January 1975. pp 90 - 93

12. J.R. Jame and G.J. Wilson, "Radiation Characteristic of strip line
antennas.", Proc 4th EMC, Montreux, September 1974. pp 484 - 488

เอกสารงานวิจัยที่อาศัย เทคนิคของอะเปอร์เจอร์

13. A.G. Derneryd, "Linear polarized microstrip antennas.", IEEE Trans.
Antennas propagat., vol. AP - 24, pp 346 - 851 November 1976.

14. A.G. Derneryd, "A Theoretical investigation of the rectangular
microstrip elements.", IEEE Trans. vol. AP - 26, NO. 4 July 1978.

15. P. Hummer, D. D. Van Bouchaute, D. Verschraeven, A. Van De Capelle,
"A model for calculation the radiation field of microstrip antennas.",
IEEE Trans, Vol. AP - 27, NO. 2, March 1979,

16. A. Van De Campelle, "Analysis model for the microstrip slot antenna.",
8th EMC, PARIS. French, September 1978.

17. A.G. Derneryd, "Microstrip array antenna.", PROC 6th EMC, Paris.
French September 1976.

18. A.G. Derneryd and A.G. Lind, "Extended analysis of rectangular
microstrip resonator antennas.", IEEE Trans. Antennas Propagation.,
AP - 27 NO. 6, November 1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารงานวิจัยที่อาศัยเทคนิคของคาร์ทีโมเดล

19. Y.T. Lo, D. Solomon, W.F. Richards, "theory and experiment on Microstrip antennas.", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. Ap - 27, NO. 2, March 1979.

20. Y.T. Lo, D. Solomon, W.F. Richard, " Improved theory for microstrip antennas." Electronics Letter, 18th January 1979.

เอกสารงานวิจัยที่อาศัยเทคนิคของคาร์วิเคราะห์ทางตัวเลขและคอมพิวเตอร์

21. Coffery, " Microstrip antenna far-field radiation pattern analysis usint the unimiment-minte Carlo method." IEEE AP - 5 Inst symp d digest , June 1977. pp 276 - 279

22. P.K. Agrawal & M.C. Bailey, "An analysis technique for microstrip antennas.", IEEE AP - 25 November 1977.

23. E.H. Newman and Pravit Tulyathan, "Analysis of Microstrip using moment methods.", IEEE AP - 29 January 1981.

24. Tatsuo Itoh and Wlofgang Menzel, "A full wave analysis method for open microstrip strictires. ", IEEE Ap - 29 January 1981.

25. David C Chang, "Analytical Theory of an unloaded rectangular microstrip patch. ", IEEE AP - 29 January 1981.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 1

ความถี่กำลังของสายอากาศแผ่นผิวสี่เหลี่ยมจตุรัส

สายอากาศไมโครสตริบแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส

$$2b = \lambda_d/2 = 2a \quad (1-1)$$

$$2b = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-2)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (1-3)$$

$$2b = \frac{c}{f_0} \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-4)$$

$$f_0 = \frac{c}{2(2b)} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-5)$$

คุณลักษณะของสารไดอิเล็กตริก เมื่อป้อนกำลังงาน A.C.

ในอาณาบริเวณที่ไม่มีประจุหรือแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)

$$-\nabla \times \mathbf{E} = j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1-6) \quad \text{และ} \quad \nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (1-7)$$

เมื่อพิจารณา $j\omega\mu\mathbf{H}$ และ $j\omega\epsilon\mathbf{E}$

$$\text{ในอาณาบริเวณอากาศ} \quad j\omega\mu\mathbf{H} = j\omega\mu_0 \mathbf{H} \quad (1-8)$$

$$j\omega\epsilon\mathbf{E} = j\omega\epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1-9)$$

เมื่ออาณาบริเวณนั้นๆ เป็นสารไดอิเล็กตริก

$$\mu = \mu_0 \quad j\omega\mu\mathbf{H} = j\omega\mu_0 \mathbf{H} \quad (1-10)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad j\omega\epsilon\mathbf{E} = j\omega\epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1-11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเฟส (Phase Velocity) V_p

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1-12)$$

ในสารไดอิเล็กตริก

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}} \quad (1-13)$$

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-14)$$

$$V_p = \frac{V_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-15)$$

ค่าความต้านทาน (wave impedance) η

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1-16)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (1-17)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (1-18)$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-19)$$

ค่าความยาวคลื่นอินตริเนค (intrinsic wavelength) λ

$$\lambda = \frac{2\pi V_p}{\omega} \quad (1-20)$$

$$\lambda = \frac{2\pi V_0}{\omega \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-21)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{2\pi f_0} \frac{V_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-22)$$

$$\lambda = \frac{V_0}{f_0} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (1-24)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 2

การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2 และ 4.3 ได้แสดงเทคนิคการคำนวณการแผ่สนามไฟฟ้า

ในระนาบ 2 ลักษณะคือ

ในระนาบ $\phi = 0^\circ$

$$E_\theta = 4\omega\epsilon E_0 S_2 \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\sin 2\beta_d b}{2\beta_d b} \right] \cdot \sin(\beta a \cdot \sin\theta) \quad (2-1)$$

$$E_\phi = 2j\omega\epsilon E_0 S_1 \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\beta_d \sin\beta_d a - \beta \sin\theta \sin(\beta a \sin\theta)}{(\beta_d^2 - \beta^2 \sin^2\theta) \cdot a} \right] \cdot \left[\cos(2\beta_d b - 1) \right] \cdot \cos\theta \quad (2-2)$$

ในระนาบ $\phi = 90^\circ$

$$E_\theta = 2j\omega\epsilon E_0 S_1 \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\sin\beta_d a}{\beta_d a} \right] \cdot \left[\cos(2\beta_d b) - e^{j2\beta b \cdot \sin\theta} \right] \quad (2-3)$$

$$E_\phi = 0$$

$$S_1 = 4ah$$

$$S_2 = 4bh$$

การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ จะแสดงการคำนวณสนามไฟฟ้าในระนาบ $\phi = 0^\circ$

และระนาบ $\phi = 90^\circ$ โปรแกรมการคำนวณแสดงไว้ในภาษา Basic ด้วยคอมพิวเตอร์

Hewlett pachard HP 85

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของสนามไฟฟ้าในระนาบ $\phi = 0^\circ$

ในระนาบ $\phi = 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\phi} = 2j\omega n_e E_0 S_1 \left[\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right] \cdot \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\beta_d \sin\beta_d a - \beta \sin\theta \sin(\beta a \sin\theta)}{(\beta_d^2 - \beta^2 \sin^2\theta)a} \right] \cdot \left[\cos(2\beta_d b) - 1 \right] \cdot \cos\theta \quad (2-4)$$

เมื่อ normalize สมการเพื่อนำไปคำนวณรูปกราฟ: สมการที่คำนวณรูปกราฟจะมีสมการเป็น

$$E_{\phi} = \left[\frac{\beta_d \sin\beta_d a - \beta \sin\theta \sin(\beta a \sin\theta)}{(\beta_d^2 - \beta^2 \sin^2\theta)a} \right] \cdot \left[\cos(2\beta_d b) - 1 \right] \cdot \cos\theta \quad (2-5)$$

```

5 INPUT K
10 INPUT Y
20 SCALE -4.4, -3.3
30 MAXIS 0.5
40 YAXIS 0.5
50 RAD
60 MOVE 0,0
65 FOR E=3 TO 5 STEP .25
70 FOR T=0 TO PI+.1 STEP .1
74 L=3.333333333333
76 A=K
77 B=K
78 L1=L/SQR(E)
79 B1=2*PI/L
80 B2=2*PI/L1
86 Q=B2*SIN(B2*A)-B1*SIN(T)+SIN
(B*A*SIN(T))
87 S=(B2^2-B1^2*SIN(T)^2)*A
88 U=COS(2*B2*B)-1
89 V=COS(T)
90 R=Q/S*U*V*Y
91 DRAW R*COS(T),R*SIN(T)
92 NEXT T
93 MOVE 0,0
94 BEEP
95 NEXT E
96 BEEP
97 BEEP
98 BEEP
99 END

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของสนามไฟฟ้าในระนาบ $\phi = 90^\circ$

เมื่อ normalize สมการเพื่อนำไปคำนวณรูปภาพ

$$E_\theta = \left[\frac{\sin(\beta h \cdot \cos\theta)}{\beta h \cdot \cos\theta} \right] \cdot \left[\frac{\sin\beta_{da}}{\beta_{da}} \right] \cdot \left[\cos(2\beta_{db}) - e^{j2\beta b \sin\theta} \right] \quad (2-6)$$

```

5 INPUT K
6 INPUT P
10 PEN 1 @ GCLEAR
20 SCALE -4.4,-3.3
30 X AXIS 0,.5
40 Y AXIS 0,.5
50 RAD
60 MOVE 0,0
65 FOR E=3 TO 5 STEP .25
70 FOR T=0 TO PI+.1 STEP .15
74 L=3.33333333333
75 A=K
76 B=K
77 L1=L/SQR(E)
78 B1=2*PI/L
79 B2=2*PI/L1
80 Z=2*B1*B*SIN(T)
81 X=2*B2*B
82 A0=SQR((COS(X)-COS(Z))^2+SIN
(Z)^2)
83 Y=B2*A
84 C=SIN(Y)/Y
85 W=A0*C
86 R=W*P
90 DRAW R*COS(T),R*SIN(T)
95 NEXT T
100 BEEP
110 MOVE 0,0
113 FOR T=0 TO -PI-.1 STEP -.15
114 L=3.33333333333
115 A=K
116 B=K
117 L1=L/SQR(E)
118 B1=2*PI/L
119 B2=2*PI/L1
120 Z=2*B1*B*SIN(T)
121 X=2*B2*B
122 A0=SQR((COS(X)-COS(Z))^2+SIN
(Z)^2)
123 Y=B2*A
124 C=SIN(Y)/Y
125 W=A0*C
126 R=W*P
127 DRAW R*COS(T),R*SIN(T)
128 NEXT T
129 BEEP
130 NEXT E
131 BEEP
132 BEEP
133 BEEP
134 END

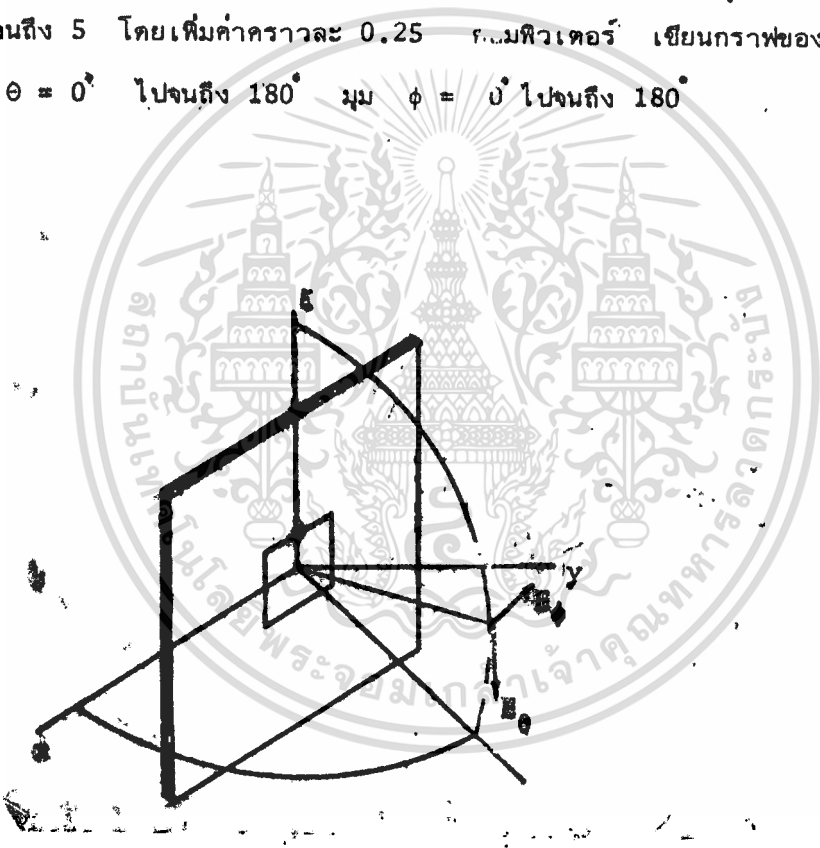
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการให้ข้อมูลการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- K = ขนาดของความกว้างยาวของตัวสายอากาศเป็น เซนติเมตร
 Y = สเตลแพคเตอร์ 1, 2, 3.
 E = เปอมิทริวิตีของสารไดอิเล็กทริก $\epsilon_r \approx 3-5$ (4.75-5เป็นค่าใช้งาน)
 L = ความยาวคลื่นในอากาศ $\lambda_0 = 3.333$ เซนติเมตร
 L₁ = ความยาวคลื่นในไดอิเล็กทริก $\lambda = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$
 R = กระจายการแผ่คลื่น

การคำนวณ โดยเริ่มให้เปลี่ยนค่าเปอมิทริวิตีของสารไดอิเล็กทริก เปลี่ยนแปลง จาก 4 ไปจนถึง 5 โดยเพิ่มค่าคราวละ 0.25 คมพิวเตอร์ เขียนกราฟของก่าร์แผ่คลื่น เริ่มจากมุม $\theta = 0^\circ$ ไปจนถึง 180° มุม $\phi = 0^\circ$ ไปจนถึง 180°



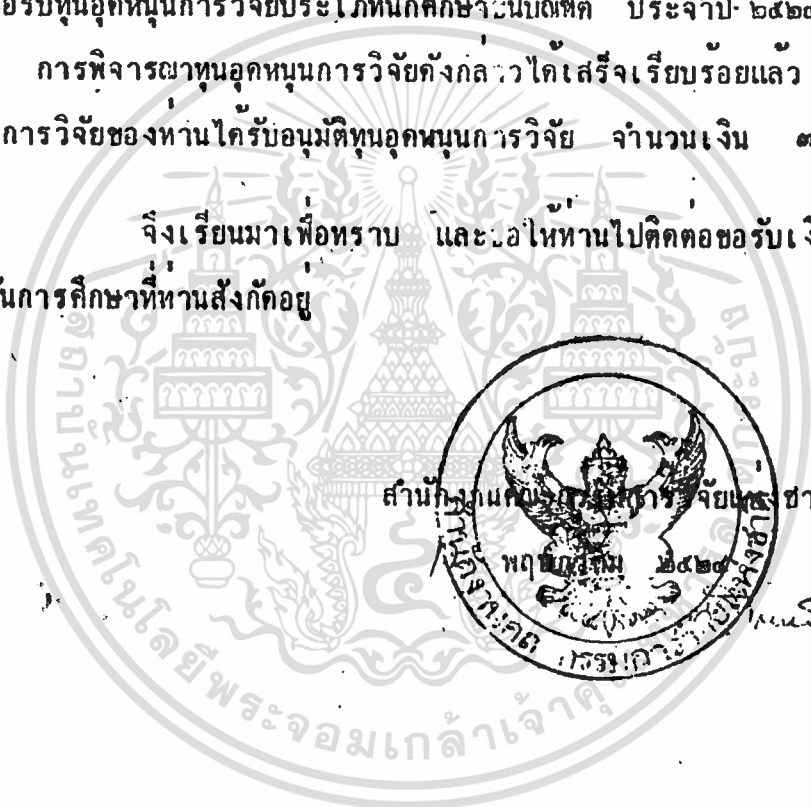
รูปที่ 1.1 แสดงโคออดิเนตการวางตำแหน่งสายอากาศ

ถึง นายธีระศิลป์ ทุนวิภาค

ตามที่ท่านได้เสนอโครงการวิจัยเรื่อง **สายอากาศไมโครสตริบและสายอากาศที่อาศัยหลักการไมโครสตริบ**

เพื่อขอรับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทนักศึกษาชั้นบัณฑิต ประจำปี ๒๕๒๓ นั้น
บัดนี้ การพิจารณาทุนอุดหนุนการวิจัยดังกล่าวได้เสร็จเรียบร้อยแล้ว ปรากฏว่า
โครงการวิจัยของท่านได้รับอนุมัติทุนอุดหนุนการวิจัย จำนวนเงิน ๓,๕๐๐.- บาท

จึงเรียนมาเพื่อทราบ และขอให้ท่านไปติดต่อขอรับเงินทุนดังกล่าวได้ที่
สถาบันการศึกษาที่ท่านสังกัดอยู่



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
พฤษภาคม ๒๕๒๓
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ และ โสภณวิทยา

[Handwritten signature]

กองส่งเสริมการวิจัย

โทร. ๕๑๘๒๒๘๘