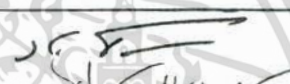







สำนักบัณฑิตศึกษา
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
 แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์
 สำหรับนักศึกษาระดับมหาบัณฑิต

ชื่อนักศึกษา นายวิวัฒน์ วิมลเศรษฐ์ เลขประจำตัว ๒๑-๐๐๓๐
 หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศเกลียวเป็นแผงหลายเบย์ สำหรับวิทยุกระจายเสียงระบบ เอฟ เอ็ม
 MULTI BAY HELICAL ARRAY FOR FM BROADCASTING SYSTEM

ชื่ออาจารย์ผู้สอบสัมภาษณ์	ลายมือชื่อ	ผลการสอบ
ยศ.ดร. สุธี อักษรกิตติ		ผ่าน
อ.ณรงค์ เหมกรณ		ผ่าน
อ.สมผล โกศลวิตร		ผ่าน
ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์		ผ่าน
ดร.กาญจน์ บริน		ผ่าน
ดร.สุทรพรคน รัชพลเม็อง		ผ่าน

วัน - เดือน - ปี ที่สอบ... พฤศจิกายน ๒๕๒๖... เวลา... ๑๐:๐๐ น. สถานที่ ห้อง ๕-๓๐๔



คณะกรรมการคณาจารย์บัณฑิตศึกษา

๖๐๙๒๑๑

สายอากาศเกลียวเป็นแผงหลาย เบย์
สำหรับวิทยุกระจายเสียงระบบ เอฟ เอ็ม

MULTI-BAY HELICAL ANTENNA ARRAY FOR FM
BROADCASTING SYSTEM

นายวิวัฒน์ วิมลเศรษฐ์
MR. WIWAT WIMONSATE

อาจารย์ที่ปรึกษา : สุธี อักษรกิตติ วค.ด. (วิศวกรรมศาสตร์)
: SUTHI AKSORNKITTI Ph.D. (Electrical Engineering)

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2526

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
บทที่ 1 บทนำ	3
1.1 ปัญหาที่มาของวิทยานิพนธ์	3
1.2 ความเป็นมาของสายอากาศเกลียว	3
1.3 แนวทางการทำวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีของสายอากาศเกลียว 1-2 รอบขนาดเล็ก	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ลักษณะของสายอากาศเกลียวและการตั้งแกนอ้างอิง	6
2.3 ลมการทั่วไปของคylinder เตอร์แม่เหล็ก	8
2.4 ลนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแรงแบบสม่ำเสมอ	9
2.5 ลนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแรงแบบสามเหลี่ยม	21
2.6 ลนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแรงแบบ sinusoidal	33
2.7 เงื่อนไขการเกิด circular polarization	44
2.8 ความถี่ของสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก	54
2.9 Transform model ของสายอากาศเกลียว	57
2.10 สรุป	60
บทที่ 3 การสร้างและการวัดทดลองสายอากาศเกลียว	61
3.1 บทนำ	61
3.2 การออกแบบและสร้างสายอากาศเกลียว 1 $\frac{1}{2}$ รอบ เพื่อการวัดทดลอง	61
3.3 การวัดทดลองค่าความถี่ของสายอากาศเกลียวและผลการวัดทดลอง	64
3.4 การวัดทดลองกระแสการแผ่คลื่น	67
3.5 ผลการวัดทดลองกระแสการแผ่คลื่น	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.6 สรุปรูป	86
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างระบบสายอากาศเกลียวสำหรับงานวิทยุกระจายเสียง	87
4.1 บทนำ	87
4.2 การออกแบบและการสร้างระบบสายอากาศ	87
4.3 การสัดแอร์เรย์ของระบบสายอากาศเกลียวขนาดเล็กรูป 4 เบบี	92
4.4 การทดสอบและการติดตั้ง	95
4.5 สรุปรูป	97
บทที่ 5 วิจัยและสรุปรูป	104
กิตติกรรมประกาศ	105
เอกสารอ้างอิง	106
ภาคผนวกที่ 1	107
ภาคผนวกที่ 2	108



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่แผ่ออกจากสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นและมีจำนวนรอบน้อย โดยกำหนดให้การแจกแจงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในลวดตัวนำเป็นแบบสม่ำเสมอ แบบสามเหลี่ยม และแบบ sinusoidal ตามลำดับ จากนั้น ได้ทำการสร้างสายอากาศแบบนี้ขึ้นจำนวน 4 ชุด โดยกำหนดให้ความยาวของลวดสายอากาศคงที่ แต่เปลี่ยนมุมบิด เป็นมุม 5, 10, 15 และ 20 องศา ตามลำดับ และทำการวัดทดสอบกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเหล่านี้ที่ความถี่ตั้งแต่ 85 MHz ถึง 200 MHz ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและการทดลองนี้ สามารถนำไปใช้ออกแบบและสร้างระบบสายอากาศเกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็ก พร้อมระบบปรับจูน สำหรับเป็นสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงของสถานีวิทยุกระจายเสียง อล. ระบบ FM ซึ่งออกอากาศด้วยกำลังส่ง 10 kW ระบบสายอากาศที่ออกแบบสร้างนี้ ประกอบด้วยสายอากาศเกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็กต่อเรียงกันเป็นแผง 4 ตัว ความถี่ของสายอากาศประมาณ 50 MHz และสายอากาศสามารถกระจายคลื่นเป็นแบบ circular polarization

Abstract

This thesis presents the method of analyzing the radiation properties of a few turn helical antenna by assuming that current distribution along the helical conductor is uniform, triangular, and sinusoidal, respectively. Knowledge of current distribution is used in calculating terminal impedance of the antenna by microcomputer. Patterns of radiation are measured from four sets of one and half turn helical antenna which have the same one turn length but differed in pitch angle. The chosen pitch angles are 5° , 10° , 15° and 20° respectively. Measuring pattern frequencies are from 85 MHz to 200 MHz. Datas acquired from both theoretical and experimental study are used in designing and constructing system of one and half turn small helical antenna together with matching system. The designed antenna system comprised of four one and half turn small helical antenna connected in array. The antenna has terminal impedance of fifty ohms and radiates wave of circular polarization. This antenna is installed at the royal FM radio broadcasting station which broadcasts with 10 kW. maximum power.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1บทนำ

1.1 ปัญหาที่มาของวิทยานิพนธ์

เนื่องจากพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ได้ทรงมีพระราชประสงค์ที่จะให้พัฒนาสายอากาศสำหรับใช้ส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ FM ความถี่ 104 MHz ใช้งาน ณ สถานีวิทยุ อส. โดยกำหนดให้สามารถทานกำลัง เครื่องส่งได้ถึง 10 kW. มีค่าทวิกำลังมากพอสมควร และออกอากาศได้ในลักษณะคลื่นเป็น circular polarization จึงได้พยายามคิดค้นหาสายอากาศที่เหมาะสมเพื่อใช้กับงานนี้ และพบว่าสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก น่าจะมีคุณสมบัตินำมาใช้ได้ แต่เนื่องจากผลงานเท่าที่ค้นพบเกี่ยวกับสายอากาศเกลียวขนาดเล็กมีบันทึกไว้น้อยมาก โดยเฉพาะสายอากาศเกลียวที่มีจำนวนรอบน้อย ๆ นอกจากนี้ยังขาดรายละเอียดทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลอง ดังนั้น ดร. ลุธิ์ อักษรกิตติ จึงได้มอบหมายให้เป็นหัวข้อการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ซึ่งหากทำได้สำเร็จก็จะทำให้เรchner ถึงเทคโนโลยีขั้นสูงในการออกแบบสร้างสายอากาศที่สามารถทานกำลังสูง ๆ และช่วยประหยัดเงินตราในการสั่งซื้อสายอากาศกำลังสูงจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมาก

1.2 ความเป็นมาของสายอากาศเกลียว

1.2.1 ในปี ค.ศ. 1947 H.A. Wheeler ได้รายงานว่ สายอากาศเกลียวที่ประกอบด้วยขดลวดหลายรอบและมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นนั้น สามารถกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นกระลวนรูปโดนัท [1] นอกจากนี้ ถ้าปรับเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศกับระยะห่างระหว่างรอบของสายอากาศให้พอเหมาะ คลื่นที่กระจายออกจากสายอากาศจะเป็น circular polarization Frequency bandwidth ของสายอากาศแบบนี้ค่อนข้างแคบ

1.2.2 ต่อมาในปี ค.ศ. 1949 J.D. Kraus ได้แสดงให้เห็นว่า สายอากาศเกลียวนั้น นอกจากจะสามารถกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวตั้งฉากกับแกนของสายอากาศเป็นกระลวนรูปโดนัทแล้ว สายอากาศนี้ยังสามารถกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวแกนของสายอากาศได้อีกด้วย ถ้าสายอากาศนั้นมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น [2] และเมื่อใช้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อรู้เห็นไปใช้จะโยชน์ตนที่ใครก็ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้ติดต่อสื่อสารระหว่างคู่สถานี

1.3 แนวทางการทำวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 วิเคราะห์ล่ายอากาศเคลื่อนยวขนาดเล็ก ที่มีจำนวนรอบน้อยทางทฤษฎีโดยกำหนดให้การแฉงรูปของกระแสไฟฟ้าในลวดล่ายอากาศเป็นแบบลุ่ม่าเลมอ แบบลุ่ม่าเหลี่ยม และ Sunusoidal เพื่อหากระแสลุ่มการแผ่คลื่น และค่าความผืนของล่ายอากาศ ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีนี้ต้องอาศัย Numerical Integration โดยเครื่อง computer
- 1.3.2 ลุ่มาล่ายอากาศเพื่อการทดลองวัดหาคูลลุ่มบัติการกระจายคลื่น และความผืนของล่ายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี และพิจารณาว่าเอาผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบล่ายอากาศเพื่อใช้งานจริงต่อไป
- 1.3.3 เนื่องจากล่ายอากาศที่จะลุ่มาลุ่มนั้น ต้องมีขนาดใหญ่มาก เพราะเป็นล่ายอากาศที่ทำเป็นแผงเพื่อให้มีค่าทริก้าลุ่มลุ่มลุ่ม และต้องลุ่มารถทานกำลังลุ่มสูงได้ด้วย ดังนั้น จะต้องพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมในการป้อนกำลังงานเข้าล่ายอากาศทั้งชุดได้ และขณะเดียวกันต้องพัฒนาระบบการปรับลุ่มล่ายอากาศให้ match กับล่ายลุ่มที่มีขนาดค่าความผืนลุ่ม่าเพาะ 50 Ω ได้
- 1.3.4 ทำการออกแบบลุ่มาลุ่มและทดลองลุ่มาล่ายอากาศตัวจริง โดยอาศัยความรู้และข้อมูลที่ได้จากหัวข้อ 1.3.1, 1.3.2 และ 1.3.3 แล้วนำไปติดตั้ง ณ สถานีวิทยุ อล. และทำการวัดทดลองคูลลุ่มบัติของล่ายอากาศในสภาพใช้งานจริง

บทที่ 2

ทฤษฎีของลำอากาศเกลียว 1-2 รอบขนาดเล็ก

2.1 บทนำ

ในปี ค.ศ. 1947 H.A. Wheeler ได้รายงานไว้ว่า ลำอากาศเกลียวที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นนั้น สามารถออกแบบให้กระจายคลื่นเป็น circular polarization โดยมีกระบวนการแผ่คลื่นเป็นวงกลมในระนาบตั้งฉากกับแนวแกนของลำอากาศ และเป็นรูปโตนท์ในระนาบผ่านตามแนวแกนของลำอากาศ [1] ในการวิเคราะห์การเกิด circular polarization นั้น Wheeler ได้เปรียบเทียบให้แต่ละรอบของลำอากาศเกลียวขนาดเล็กเป็นเสมือนหนึ่งประกอบด้วยลำอากาศห้วงและลำอากาศ dipole โดยที่ลำอากาศห้วงมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัดของลำอากาศเกลียว ส่วนลำอากาศ dipole มีความยาวเท่ากับระยะห่างระหว่างรอบของลำอากาศเกลียว และวางตัวในแนวแกนของลำอากาศห้วงในลักษณะที่ลมมาตรงกับระนาบของลำอากาศห้วง สนามไฟฟ้าที่เกิดจากลำอากาศทั้งสองชนิดมีกระบวนการแผ่คลื่นเป็นรูปวงกลมในระนาบที่บรรจุลำอากาศห้วง และเป็นรูปโตนท์ในระนาบผ่านตามแนวลำอากาศ dipole จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกันทั้งสองกรณีสรุปได้ว่า ลำอากาศสามารถกระจายคลื่นเป็น circular polarization ได้โดยการปรับเส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัดและระยะห่างระหว่างรอบของลำอากาศเกลียวให้พอเหมาะตามสมการ

$$C^2 = 2 S \lambda \tag{2.1}$$

C เป็นเส้นรอบวงของหน้าตัดลำอากาศเกลียว S เป็นระยะห่างระหว่างรอบของลำอากาศเกลียว และ λ เป็นความยาวคลื่นที่ใช้งาน

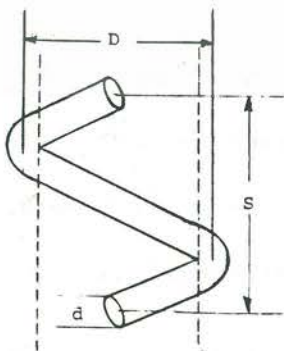
ต่อมาในปี ค.ศ. 1949 J.D. Kraus [2] ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายคลื่นของลำอากาศเกลียวขนาดเล็กจำนวนหลายรอบ โดยกำหนดให้กระแสแล้ไฟฟ้าที่ไหลในลวดตัวนำลำอากาศเป็นแบบลุ่ม้าเลื่อม ผลการวิเคราะห์แสดงว่า สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากลำอากาศเกลียวมีกระบวนการเป็นรูปโตนท์ในระนาบผ่านแนวแกนของลำอากาศต่อเมื่อความยาว 1 รอบของลำอากาศ มีค่าน้อยกว่า 0.5 เท่าของความยาวคลื่นโดยประมาณ และการแผ่คลื่นของลำอากาศเกลียวเป็นได้ทั้งแบบ elliptical polarization และ circular polarization นอกจากนี้ Kraus ยังได้พบว่า เมื่อลำอากาศยาวเกินกว่าหนึ่งความยาวคลื่น การกระจายคลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นแบบอื่นได้ ซึ่งการกระจายคลื่นจะไม่เท่ากันทุกทิศทางอีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลียวมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับความยาวคลื่น สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจกลำอวกาศจะมีความเข้มสูงที่สุดในแนวแกนของลำอวกาศ เมื่อใช้ลำอวกาศแบบนี้กับกราวด์เพลน ลำอวกาศก็จะกระจายคลื่นไปในทิศทางเดียว ทำให้เป็นลำอวกาศที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ติดต่อสื่อสารระหว่างคู่สถานี

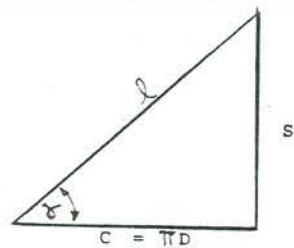
ผลงานของ Wheeler และ Kraus ตามที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการศึกษาลำอวกาศเกลียวขนาดเล็กที่มีจำนวนหลายรอบ ส่วนลำอวกาศเกลียวขนาดเล็กที่มีจำนวนรอบน้อยนั้น รายงานทั้งสองฉบับได้กล่าวถึงเพียงเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้ ผู้ทำวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการศึกษาค้นสมบัติของลำอวกาศเกลียวขนาดเล็กที่มีจำนวนรอบน้อยทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลอง ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2 ลักษณะของลำอวกาศเกลียวและการตั้งแกนอ้างอิง

ลำอวกาศเกลียวที่ทำการวิจัยนี้ (รูปที่ 2.1 ก) มีลักษณะเป็นหลอดตัวนำที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง d นำมาขดเป็นวงรอบทรงกระบอกกลม โดยให้แต่ละวงห่างกันเป็นระยะ S เส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัดของขดลวดแต่ละวงมีค่า D เมื่อวัดจากเส้นแกนกลางของหลอดตัวนำ เส้นรอบวงหน้าตัดของขดลวดจึงมีค่า $C = \pi D$ หลอดตัวนำที่ขดเป็นเกลียว 1 รอบจะมีความยาว L เมื่อวัดตามเส้นแกนกลางของหลอดตัวนำ เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L , C และ S ได้ในลักษณะของรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉากเป็น L และมีด้านประกอบมุมฉากเป็น C และ S มุมที่เกิดจาก L และ C เรียกว่า มุมบิดของลำอวกาศเกลียว เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ γ (รูปที่ 2.1 ข)



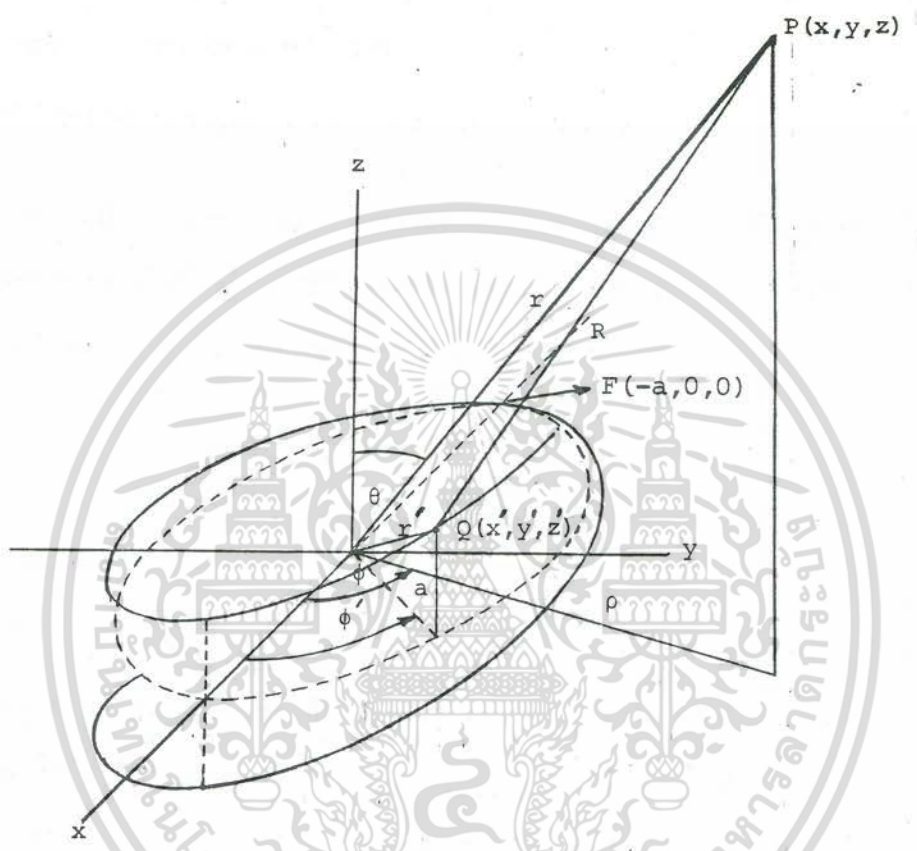
รูปที่ 2.1 ก ลักษณะของลำอวกาศเกลียว 1 รอบ



รูปที่ 2.1 ข สามเหลี่ยมที่มีด้านทั้งสามประกอบด้วย S , C , และ L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.1 ซึ่งส่วนประกอบของลำอวกาศเกลียวให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เรต้องการเทียบค่าของล่ายอากาศ์เกลียวกับความยาวคลื่น เราจะใช้สัญลักษณ์เป็น λ, S_λ และ C_λ โดยมีความหมายว่า $\lambda = \ell/\lambda$, $S_\lambda = S/\lambda$, และ $C_\lambda = C/\lambda$ ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 การตั้งแกนอ้างอิง เพื่อการคำนวณระยะห่างสามมไฟฟ้าที่แผ่ออกจากล่ายอากาศ์เกลียวขนาดเล็ก

รูปที่ 2.2 แสดงล่ายอากาศ์เกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบที่วางตัวอยู่ในระบบแกนทรงสี่เหลี่ยม โดยให้จุดบ่อนสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นจุดแบ่งครึ่งความยาวของล่ายอากาศ์เกลียวนั้น อยู่ที่จุด $(-a, 0, 0)$ การตัดวางล่ายอากาศ์ในลักษณะนี้จะทำให้ ระยะห่างระหว่างรอบ S ของล่ายอากาศ์ถูกแบ่งอย่างสมมาตรตามแกน z โดยระนาบ xy ลมการทางคณิตศาสตร์ของจุดที่อยู่บนล่ายอากาศ์เกลียวในเทอมของตัวแปร α คือ

$$\begin{aligned} x' &= -a \cos \alpha \\ y' &= -a \sin \alpha \\ z' &= \frac{S \alpha}{2\pi} \end{aligned} \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\alpha = \phi' - \pi$ มีค่าระหว่าง $-\pi$ ถึง π ; m เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับจำนวนรอบของสายอากาศเกลียว ในกรณีของสายอากาศเกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบ m จะมีค่า $3/2$ a เป็นรัศมีของวงกลมหน้าตัดสายอากาศเกลียว มีค่าเท่ากับ $D/2$

2.3 สมการทั่วไปของศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กของสายอากาศเกลียว

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศเกลียวนั้น สามารถคำนวณได้จากศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในลวดตัวนำที่เป็นสายอากาศ ในระบบแกนอ้างอิงทรงสี่เหลี่ยม ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก \bar{A} ของสายอากาศเกลียวหาได้จากสมการ [3]

$$\bar{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{I(x', y', z') e^{i\omega(t - \frac{R}{c})}}{R} dL \quad (2.3)$$

โดย $I(x', y', z')$ เป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในลวดตัวนำ R เป็นระยะทางระหว่างจุดบนสายอากาศเกลียว (จุด $P(x', y', z')$) และจุดที่ต้องการหาศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก dL เป็นดิฟเฟอเรนเชียลเวกเตอร์ของความยาวสายอากาศ μ_0 เป็น permeability ของสุญญากาศ t เป็นเวลา และ ω เป็น angular frequency ของสัญญาณไฟฟ้า

โดยการให้ระบบแกนอ้างอิงทรงกระบอกและสมการที่ (2.2) R และ dL สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$R = \left[\rho^2 + a^2 + 2a\rho\cos(\phi - \alpha) + \left(z - \frac{S\alpha}{2\pi}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

$$dL = -a\sin(\phi - \alpha)d\alpha\hat{\rho} - a\cos(\phi - \alpha)d\alpha\hat{\phi} + \frac{S}{2\pi}d\alpha\hat{z} \quad (2.5)$$

$\hat{\rho}$, $\hat{\phi}$ และ \hat{z} เป็น unit vector ของแกน ρ , ϕ และ z ตามลำดับ

สมการ (2.3) นั้น เป็นสมการที่ซับซ้อนมาก ยากต่อการอินทิเกรตออกมาเป็น analytic solution โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการหาศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กที่จุดซึ่งอยู่ใกล้กับตัวสายอากาศมาก ๆ แต่ในกรณีที่จุดซึ่งต้องการหาศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กอยู่ไกลจากตัวสายอากาศมาก ๆ ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนลิขสิทธิ์อื่นใด ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อที่ปรึกษาทางวิชาการ โทร. 0-2562-2562 หรือ 0-2562-2562

\bar{A} ก็สามารถคำนวณอย่างประมาณได้ โดยการเขียน R ในรูปของอนุกรม Taylor

$$R = r \left[1 + \frac{a \cos(\phi - \alpha)}{r^2} - \frac{S z \alpha}{2\pi r^2} + \frac{a^2}{r^2} + \left(\frac{S \alpha}{2\pi r} \right)^2 - \frac{1}{8} \left[\frac{2a \cos(\phi - \alpha)}{r^2} - \frac{S z \alpha}{2\pi r^2} + \frac{a^2}{r^2} + \left(\frac{S \alpha}{2\pi r} \right)^2 \right]^2 + \dots \right] \quad (2.6)$$

แทนค่า $\rho = r \sin \theta$ และ $z = r \cos \theta$ ลงในสมการ 2.6 จะได้

$$R = r \left[1 + \frac{a \sin \theta \cos(\phi - \alpha)}{r} - \left(\frac{S \cos \theta}{2\pi r} \right) \alpha + \frac{a^2}{r^2} + \left(\frac{S \alpha}{2\pi r} \right)^2 \dots \right] \quad (2.7)$$

เนื่องจาก r มีค่ามาก เทอมที่หารด้วย r ที่มีกำลังมากกว่า 1 ขึ้นไปจึงมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ 3 เทอมแรก ดังนั้น สำหรับเฟสเทอม เราจึงใช้เพียง 3 เทอมแรกในการคำนวณและประมาณ $R = r$ ในกรณีของระยะทาง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถเขียนสมการ (2.3) อย่างประมาณได้ว่า

$$\bar{A} = \frac{\mu_0 e^{i\omega(t - \frac{r}{c})}}{4\pi r} \int_{-\pi}^{\pi} I(\alpha) e^{-i [C_\lambda \sin \theta \cos(\phi - \alpha) - (S_\lambda \cos \theta) \alpha]} dL \quad (2.8)$$

เมื่อขยายเทอม $\exp [-i C_\lambda \sin \theta \cos(\phi - \alpha)]$ ในรูปของอนุกรม Fourier Bessel สมการ 2.8 ก็กลายเป็น

$$\bar{A} = \frac{\mu_0 e^{i\omega(t - \frac{r}{c})}}{4\pi r} \int_{-\pi}^{\pi} I(\alpha) \left[J_0(C_\lambda \sin \theta) + \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin \theta) \cos n(\phi - \alpha) \right] e^{i(S_\lambda \cos \theta) \alpha} dL \quad (2.9)$$

2.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในลวดตัวนำมีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ $I(\alpha) = I_0$ สมการ ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (2.9) ก็จะเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางธุรกิจ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{A} = \frac{\mu_0 |I|}{4\pi r} \int_{-\pi}^{\pi} \left[J_0(C_\lambda \sin\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \cos n(\phi - \alpha) \right] e^{i(S_\lambda \cos\theta)} dL \quad (2.10)$$

$$|I| = I_0 e^{i\omega(t - \frac{r}{c})}$$

แทน dL จากสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.10) แล้วอินทิเกรตก็จะได้องค์ประกอบ
ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กคือ

$$A_\phi = -\frac{\mu_0 a J_0(C_\lambda \sin\theta) |I|}{4\pi r} \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 1)] e^{i\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta - 1)} - \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 1)] e^{-i\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta + 1)} \right] - \frac{\mu_0 a |I|}{4\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)] e^{i(1-n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta + n - 1)} - \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)] e^{-i(1+n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)] e^{i(1+n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} - \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)] e^{-i(1+n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} \right] \quad (2.11)$$

$$A_\phi = -\frac{\mu_0 a J_0(C_\lambda \sin\theta) |I|}{4\pi r} \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 1)] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 1)} + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 1)] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 1)} \right] - \frac{\mu_0 a |I|}{4\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)] e^{i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)] e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)] e^{i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \left. \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta+n+1)]e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta+n+1)} \right] \dots \dots \dots (2.12)$$

$$A_z = \frac{\mu_0 S J_0 (C_\lambda \sin\theta) \sin(m\pi S_\lambda \cos\theta) |I|}{4\pi^2 r S_\lambda \cos\theta} + \frac{\mu_0 S |I|}{4\pi^2 r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta)$$

$$\left[\frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta-n)]e^{i n\phi}}{(S_\lambda \cos\theta-n)} + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta+n)]e^{-i n\phi}}{(S_\lambda \cos\theta+n)} \right] \dots (2.13)$$

สนามแม่เหล็กที่แผ่ออกจากสายอากาศเกลียวนั้น สามารถคำนวณได้จากศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กตามสมการ $\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A}$ ในระบบแกนอ้างอิงทรงกลม สนามแม่เหล็กที่ได้ประกอบด้วยองค์ประกอบ H_r, H_θ และ H_ϕ ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$H_\theta = -\frac{i\beta a J_0 (C_\lambda \sin\theta) |I|}{4\pi r} \left[\frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta-1)]e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta-1)} + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta+1)]e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta+1)} \right] - \frac{i\beta a |I|}{4\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \left[\frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta-n+1)]e^{i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta-n+1)} + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta+n-1)]e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta+n-1)} + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta-n-1)]e^{i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta-n-1)} + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta+n+1)]e^{-i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta+n+1)} \right] \dots \dots \dots (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 H_\phi &= \frac{\beta a J_0 (C_\lambda \sin \theta) \cos \theta |I|}{4\pi r} \left[\frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta - 1)] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - 1)} \right. \\
 &= \left. \frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta + 1)] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + 1)} \right] + \frac{\beta a \cos \theta |I|}{4\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n (C_\lambda \sin \theta) \\
 &\quad \left[\frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta + n - 1)] e^{i(1-n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n - 1)} - \frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta - n + 1)] e^{-i(1-n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n + 1)} \right. \\
 &\quad + \left. \frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta - n - 1)] e^{i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n - 1)} - \frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta + n + 1)] e^{-i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n + 1)} \right] \\
 &\quad + \frac{i\beta S J_0 (C_\lambda \sin \theta) \sin \theta \sin (m\pi S_\lambda \cos \theta) |I|}{4\pi^2 r S_\lambda \cos \theta} \\
 &\quad + \frac{i\beta S \sin \theta |I|}{4\pi^2 r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n (C_\lambda \sin \theta) \left[\frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta - n)] e^{in\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n)} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta + n)] e^{-in\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n)} \right] \tag{2.15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_r &= -\frac{aS_\lambda \sin \theta J_0 (C_\lambda \sin \theta) |I|}{4\pi r^2} \left[\frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta - 1)]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right. \\
 &\quad - \left. \frac{m\pi \cos [m\pi (S_\lambda \cos \theta - 1)]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)} \right] e^{i\phi} + \left[\frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta + 1)]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right. \\
 &\quad - \left. \frac{m\pi \cos [m\pi (S_\lambda \cos \theta + 1)]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)} \right] e^{-i\phi} + \frac{aC_\lambda \cos \theta J_1 (C_\lambda \sin \theta) |I|}{4\pi r^2} \\
 &\quad \left[\frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta - 1)] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - 1)} + \frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta + 1)] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + 1)} \right] \\
 &\quad - \frac{aS_\lambda \sin \theta |I|}{4\pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n (C_\lambda \sin \theta) \left[\frac{\sin [m\pi (S_\lambda \cos \theta - n + 1)]}{(S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2} \right.
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการใช้ในเฉพาะกรณีเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& - \frac{m\pi \cos [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)]}{(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} \Big] e^{i(n-1)\phi} + \left[\frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)]}{(S_\lambda \cos\theta + n - 1)^2} \right. \\
& - \frac{m\pi \cos [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)]}{(S_\lambda \cos\theta + n - 1)} \Big] e^{-i(n-1)\phi} + \left[\frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)]}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)^2} \right. \\
& - \frac{m\pi \cos [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)]}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} \Big] e^{i(n+1)\phi} + \left[\frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)]}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)^2} \right. \\
& - \frac{m\pi \cos [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)]}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} \Big] e^{-i(n+1)\phi} - \frac{aC_\lambda \cos\theta |I|}{4\pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n \\
& \left[\frac{J_{n-1}(C_\lambda \sin\theta)}{2} - \frac{J_{n+1}(C_\lambda \sin\theta)}{2} \right] \left[\frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)] e^{i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} \right. \\
& + \frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)] e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n - 1)} + \frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)] e^{i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} \\
& + \left. \frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)] e^{-i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} \right] \\
& - \frac{a \cot\theta |I|}{4\pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \left[\frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)] e^{i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} \right. \\
& + \frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)] e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n - 1)} + \frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)] e^{i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} \\
& + \left. \frac{\sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)] e^{-i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} \right] + \frac{a \cot\theta |I|}{4\pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \\
& \left[\frac{(1-n) \sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)] e^{i(1-n)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n - 1)} \right. \\
& + \frac{(1-n) \sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)] e^{-i(1-n)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} \\
& + \left. \frac{(1+n) \sin [m\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)] e^{i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} \right]
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & + \frac{(1+n) \sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)] e^{-i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} \\
 & + \frac{iS|I|}{4\pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \left[\frac{n \sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - n)] e^{in\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n)} \right. \\
 & \left. + \frac{n \sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + n)] e^{-in\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n)} \right] \quad (2.16)
 \end{aligned}$$

β เป็น wave number มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$

เนื่องจาก H_r แปรตาม $1/r^2$ H_r จึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อ r มีค่ามากสนามแม่เหล็กที่จุดซึ่งอยู่ไกลจากสายอากาศ จึงมีเพียงองค์ประกอบ H_θ และ H_ϕ เท่านั้น สำหรับความเข้มสนามไฟฟ้ารอบสายอากาศนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_\theta = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2} H_\phi \quad (2.17)$$

$$E_\phi = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2} H_\theta \quad (2.18)$$

โดย $\left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2}$ มีค่า 120π , ϵ_0 เป็น permittivity ของสุญญากาศ

เมื่อแทนสมการ (2.14) และสมการ (2.15) ลงในสมการ (2.17) และสมการ (2.18)

แล้ว เราก็จะได้สมการของ E_θ และ E_ϕ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 E_\theta = & \frac{i 30C_\lambda J_0(C_\lambda \sin\theta) \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 1)] e^{i\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta - 1)} \right. \\
 & \left. - \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 1)] e^{-i\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta + 1)} \right] + \frac{i30C_\lambda \cos\theta |I|}{r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \\
 & \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)] e^{i(1-n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta + n - 1)} \right. \\
 & \left. - \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)] e^{-i(1-n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} \right]
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)] e^{i(1+n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} - \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)] e^{-i(1+n)\phi}}{i(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} \\
 & + \frac{i60S_\lambda \sin\theta J_0(C_\lambda \sin\theta) |I|}{\lambda r} \left[\frac{\sin(m\pi S_\lambda \cos\theta)}{S_\lambda \cos\theta} \right] \\
 & + \frac{i60S_\lambda \sin\theta |I|}{\lambda r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \left[\frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta - n)] e^{in\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n)} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta + n)] e^{-in\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n)} \right] \tag{2.19}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_\phi = & \frac{-i30C_\lambda J_0(C_\lambda \sin\theta) |I|}{r} \left[\frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta - 1)] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 1)} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin[m\pi(S_\lambda \cos\theta + 1)] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 1)} \right] - \frac{i30C_\lambda |I|}{r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \\
 & \left[\frac{\sin|m\pi(S_\lambda \cos\theta - n + 1)| e^{i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n + 1)} + \frac{\sin|m\pi(S_\lambda \cos\theta + n - 1)| e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n - 1)} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin|m\pi(S_\lambda \cos\theta - n - 1)| e^{i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)} + \frac{\sin|m\pi(S_\lambda \cos\theta + n + 1)| e^{-i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)} \right] \tag{2.20}
 \end{aligned}$$

โดยที่ $J_0(C_\lambda \sin\theta)$ และ $J_n(C_\lambda \sin\theta)$ เป็นอนุกรม Bessel อันดับที่ 0 และอันดับที่ n ซึ่งมีรูปอนุกรมดังนี้

$$J_0(C_\lambda \sin\theta) = 1 - \frac{(C_\lambda \sin\theta)^2}{2^2} + \frac{(C_\lambda \sin\theta)^4}{2^2 \cdot 4^2} \tag{2.21}$$

$$J_n(C_\lambda \sin\theta) = \frac{(C_\lambda \sin\theta)^n}{2^n \Gamma(n+1)} \left[1 - \frac{(C_\lambda \sin\theta)^2}{2(2n+2)} + \frac{(C_\lambda \sin\theta)^4}{2 \cdot 4(2n+2)(2n+4)} - \dots \right] \tag{2.22}$$

$\Gamma(n+1)$ เป็นแกมมาฟังก์ชันซึ่งมีค่าเท่ากับ $n!$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่สายอากาศเกลียวมีขนาดเล็ก $C_\lambda \ll 1$ เราจะประมาณได้ว่า $J_0(C_\lambda \sin\theta) \approx 1$ และ $J_1(C_\lambda \sin\theta) \approx \frac{C_\lambda \sin\theta}{2}$ ส่วนเทอม $J_n(C_\lambda \sin\theta)$ ที่ $n > 1$ นั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้น สำหรับกรณี ที่สายอากาศมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น กระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศจะมีลักษณะตาม สมการ

$$\begin{aligned}
 E_\theta = & \frac{30C_\lambda \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 1)] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 1)} - \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 1)] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 1)} \right] \\
 & - \frac{i15C_\lambda^2 \sin\theta \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 2)] e^{i2\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 2)} \right. \\
 & \left. - \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 2)] e^{-i2\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 2)} \right] + \frac{i60S_\lambda \sin\theta \sin[\pi S_\lambda \cos\theta] |I|}{r S_\lambda \cos\theta} \\
 & + \frac{30S_\lambda C_\lambda \sin^2\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 1)] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 1)} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 1)] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 1)} \right] \quad (2.23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_\phi = & - \frac{i30C_\lambda |I|}{r} \left[\frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 1)] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 1)} + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 1)] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 1)} \right] \\
 & - \frac{15C_\lambda^2 \sin\theta |I|}{r} \left[\frac{2\sin[\pi S_\lambda \cos\theta]}{S_\lambda \cos\theta} + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta - 2)] e^{i2\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 2)} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin[\pi(S_\lambda \cos\theta + 2)] e^{-i2\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 2)} \right] \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

จากสมการ (2.23) และ (2.24) จะได้สมการกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศใน ระนาบ xz , yz และ xy ดังนี้

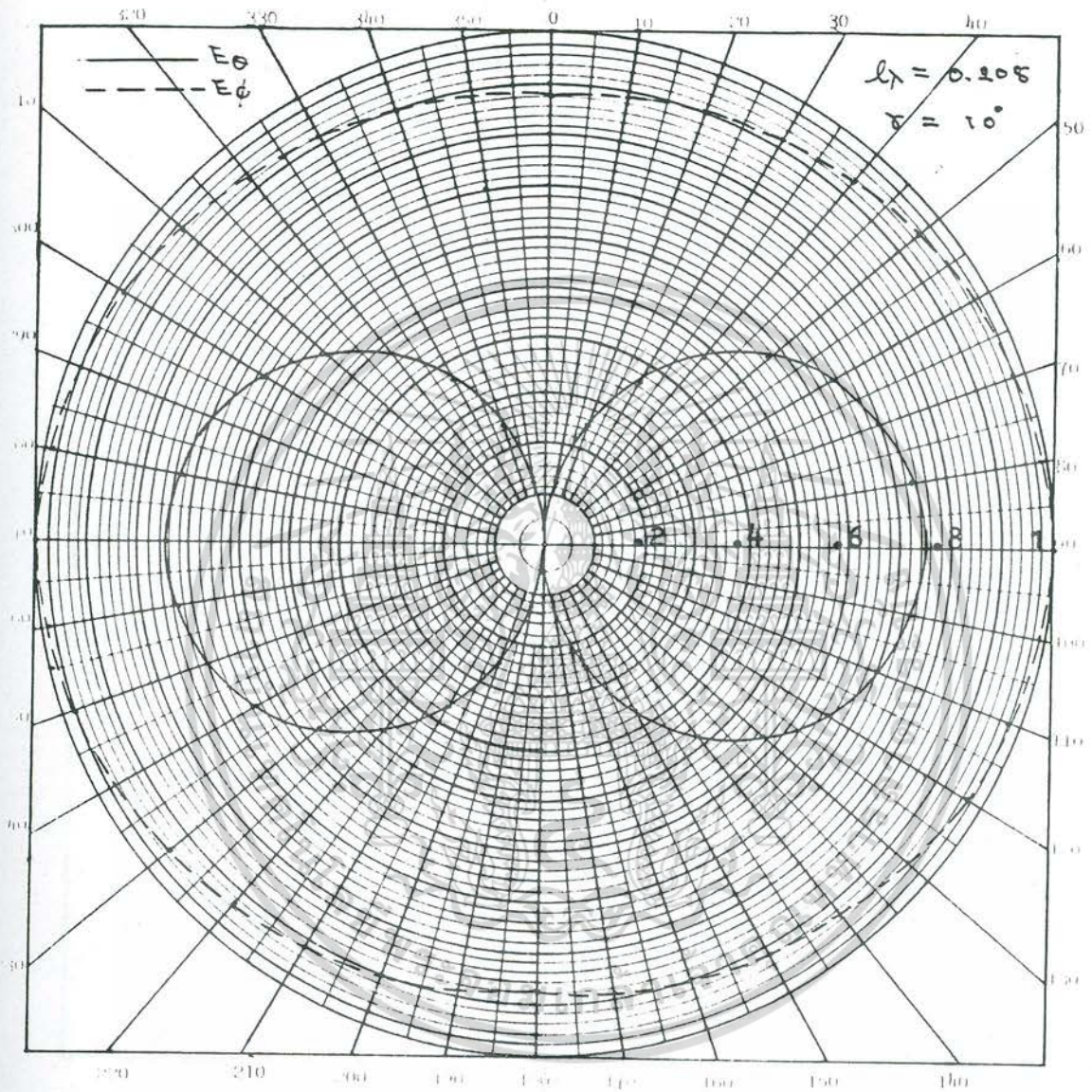
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_{\theta} |_{xz} = & \frac{30C_{\lambda} \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 1)} - \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 1)} \right] \\
 & - \frac{i15C_{\lambda}^2 \sin\theta \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 2)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 2)} - \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 2)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 2)} \right] \\
 & + \frac{i60S_{\lambda} \sin\theta \sin[m\pi S_{\lambda} \cos\theta] |I|}{r S_{\lambda} \cos\theta} + \frac{30S_{\lambda} C_{\lambda} \sin^2\theta |I|}{r} \\
 & \left[\frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 1)} + \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 1)} \right] \quad (2.25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{\phi} |_{xz} = & - \frac{i30C_{\lambda} |I|}{r} \left[\frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 1)} + \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 1)} \right] \\
 & - \frac{15C_{\lambda}^2 \sin\theta |I|}{r} \left[\frac{2\sin(m\pi S_{\lambda} \cos\theta)}{S_{\lambda} \cos\theta} + \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 2)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 2)} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 2)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 2)} \right] \quad (2.26)
 \end{aligned}$$

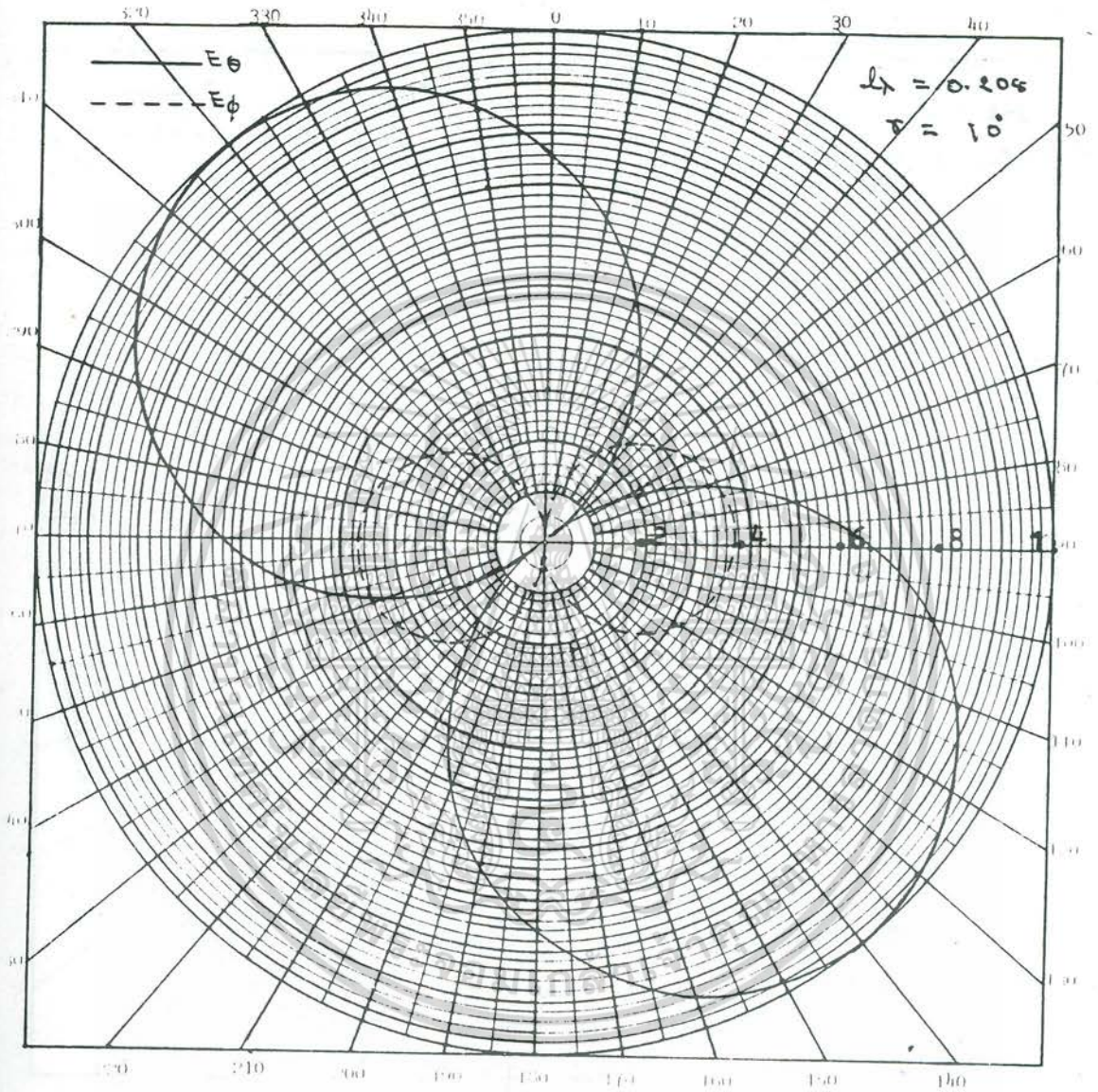
$$\begin{aligned}
 E_{\theta} |_{yz} = & \frac{i30C_{\lambda} \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 1)} + \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 1)} \right] \\
 & + \frac{i15C_{\lambda}^2 \sin\theta \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 2)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 2)} - \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 2)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 2)} \right] \\
 & + \frac{i60S_{\lambda} \sin\theta \sin(m\pi S_{\lambda} \cos\theta) |I|}{r S_{\lambda} \cos\theta} + \frac{i30S_{\lambda} C_{\lambda} \sin^2\theta |I|}{r} \\
 & \left[\frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta - 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta - 1)} - \frac{\sin[m\pi(S_{\lambda} \cos\theta + 1)]}{(S_{\lambda} \cos\theta + 1)} \right] \quad (2.27)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

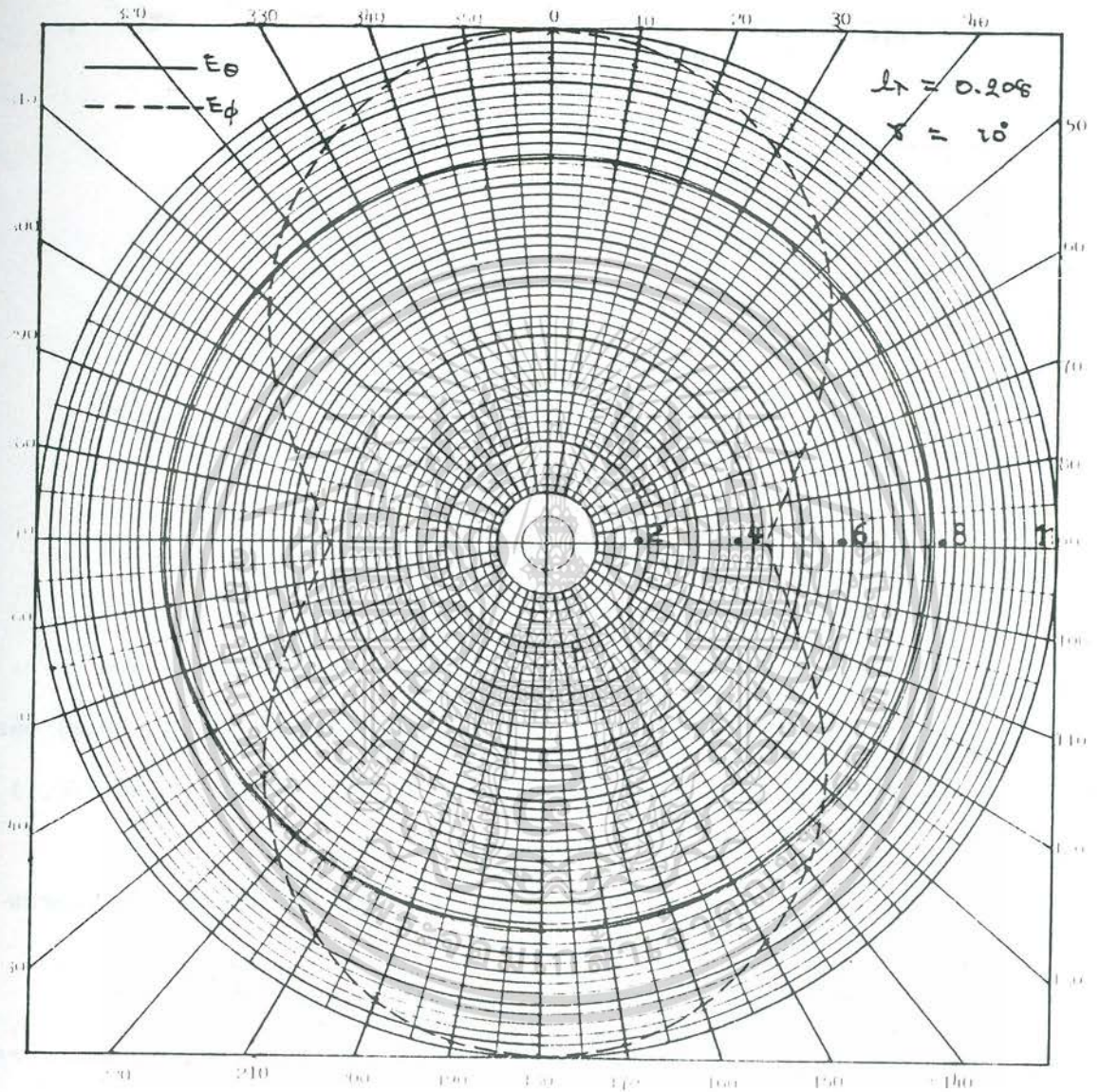


รูปที่ 2.3 ก กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xz
ตามสมการ (2.25) และสมการ (2.26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ข กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ yz
ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบตามสมการ (2.27) และ
สมการ (2.28)



รูปที่ 2.3 ค กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xy ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบตามสมการ (2.29) และสมการ (2.30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\phi|yz} = \frac{30C_{\lambda}|I|}{r} \left[\frac{\sin[\pi(S_{\lambda}\cos\theta-1)]}{(S_{\lambda}\cos\theta-1)} - \frac{\sin[\pi(S_{\lambda}\cos\theta+1)]}{(S_{\lambda}\cos\theta+1)} \right] - \frac{15C_{\lambda}^2\sin\theta|I|}{r} \left[\frac{2\sin(\pi S_{\lambda}\cos\theta)}{S_{\lambda}\cos\theta} - \frac{\sin[\pi(S_{\lambda}\cos\theta-2)]}{(S_{\lambda}\cos\theta-2)} - \frac{\sin[\pi(S_{\lambda}\cos\theta+2)]}{(S_{\lambda}\cos\theta+2)} \right] \quad (2.28)$$

$$E_{\theta|xy} = \frac{i60\pi S_{\lambda}|I|}{r} + \frac{60S_{\lambda}C_{\lambda}|I| \sin\pi\cos\phi}{r} \quad (2.29)$$

$$E_{\phi|xy} = \frac{i60C_{\lambda}|I| \sin\pi\cos\phi}{r} - \frac{15C_{\lambda}^2|I|}{r} [2\pi + 2\sin(2\pi)\cos 2\phi] \quad (2.30)$$

รูปที่ 2.3ก, 2.3ข และ 2.3ค แสดงให้เห็นกระสวนการแผ่คลื่นในระนาบ xz, yz และ xy 1½ รอบ ($m = 3/2$) ที่ความถี่ 104 MHz ตามสมการ (2.25), (2.26), (2.27), (2.28), (2.29) และ (2.30) โดยกำหนดให้ค่า C และ S ในสมการมีค่าเท่ากับ 0.5907 ม. และ 0.1042 ม. ตามลำดับ

2.5 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม

กระแสไฟฟ้าที่มีการแจกแจงเป็นแบบสามเหลี่ยมนั้น หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่มีการแจกแจงตาม

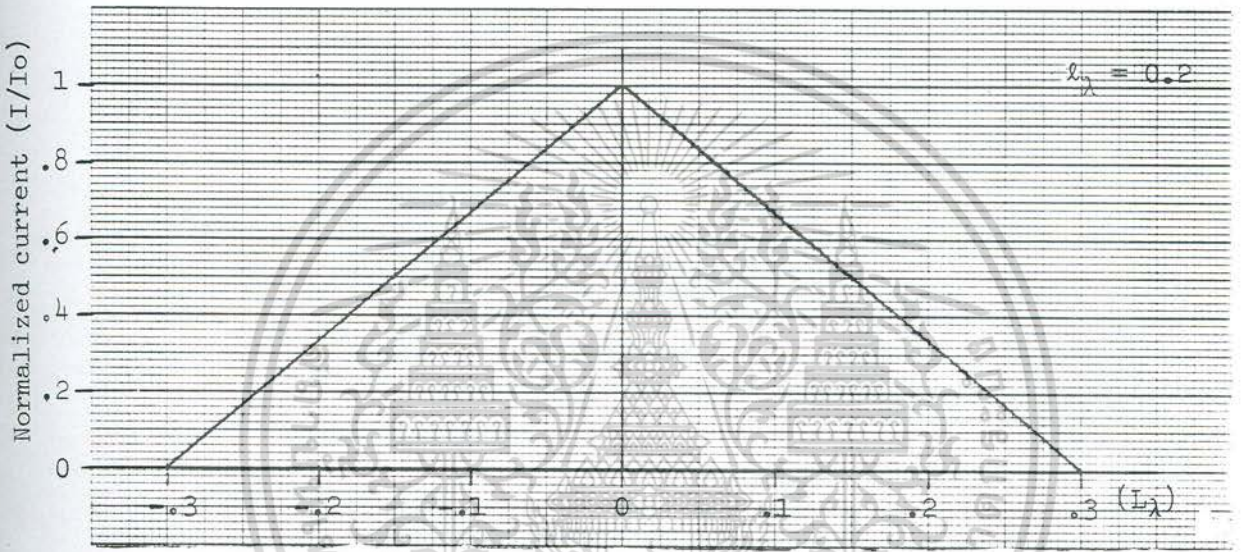
สมการ

$$I = \begin{cases} \frac{2I_0}{L} \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] & \alpha > 0 \\ \frac{2I_0}{L} \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] & \alpha < 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

โดย L เป็นความยาวของตัวนำที่ทำเป็นสายอากาศ และ l เป็นความยาวของตัวนำที่ขดเป็นสายอากาศเกลียว 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 เป็นกราฟตัวอย่างของกระแสไฟฟ้าที่มีการแจกแจงแบบสามเหลี่ยมของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ที่มีมุมบิด 10 องศาและมีความยาว 1 รอบ เท่ากับ 0.2 เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแกนนอนของรูปเป็นแกนความยาวของสายอากาศ โดยจุดศูนย์เป็นจุดบ่อนกำลังไฟฟ้า ส่วนแกนตั้งเป็นค่านอร์มอลไลซ์ของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการแจกแจงของกระแสไฟฟ้าแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ลวดตัวนำสั้นกว่าความยาวคลื่นมาก

เมื่อแทนสมการ (2.31) ลงในสมการ (2.9) แล้วทำการอินทิเกรต ก็จะได้สมการองค์ประกอบศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กในระบบแกนอ้างอิงทรงกระบอกดังนี้

$$A_{\rho} = \frac{\mu_0 a l J_0(C_{\lambda} \sin \theta) |I|}{2\pi^2 L r} \left[\frac{\sin^2 [(S_{\lambda} \cos \theta + 1) m \pi / 2] e^{-i\phi}}{i(S_{\lambda} \cos \theta + 1)^2} - \frac{\sin^2 [(S_{\lambda} \cos \theta - 1) m \pi / 2] e^{i\phi}}{i(S_{\lambda} \cos \theta - 1)^2} \right] + \frac{\mu_0 a l |I|}{2\pi^2 L r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_{\lambda} \sin \theta) \frac{\sin^2 [(S_{\lambda} \cos \theta - n + 1) m \pi / 2] e^{-i(1-n)\phi}}{i(S_{\lambda} \cos \theta - n + 1)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n - 1)m\pi/2] e^{i(1-n)\phi}}{i(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} \\
 & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n + 1)m\pi/2] e^{-i(1+n)\phi}}{i(S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2} \\
 & - \left. \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n - 1)m\pi/2] e^{i(1+n)\phi}}{i(S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2} \right] \dots (2.32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_\phi = & \frac{\mu_o a l J_o (C_\lambda \sin \theta) |I|}{2\pi^2 L r} \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)m\pi/2] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right. \\
 & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)m\pi/2] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \left. - \frac{\mu_o a l |I|}{2\pi^2 L r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n (C_\lambda \sin \theta) \right. \\
 & \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n + 1)m\pi/2] e^{i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2} \right. \\
 & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n - 1)m\pi/2] e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} \\
 & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n - 1)m\pi/2] e^{i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2} \\
 & \left. \left. + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n + 1)m\pi/2] e^{-i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2} \right] \right] \dots (2.33)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_z = & \frac{\mu_o S l J_o (C_\lambda \sin \theta) |I|}{2\pi^3 L r} \left[\frac{\sin^2 (m\pi S_\lambda \cos \theta) / 2}{(S_\lambda \cos \theta)^2} \right] \\
 & + \frac{\mu_o S l |I|}{2\pi^3 L r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n (C_\lambda \sin \theta) \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n)m\pi/2] e^{in\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n)^2} \right]
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n)\pi/2] e^{-in\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n)^2} \quad (2.34)$$

จากสมการของศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กที่ได้นี้ เราจะสามารถหาสมการของสนามแม่เหล็กที่ระยะไกลจากสายอากาศในระบบแกนอ้างอิงทรงกลมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} H_r = & \frac{a l S_\lambda \sin \theta J_0(C_\lambda \sin \theta) |I|}{2\pi^2 l r^2} \left[\frac{m\pi \sin [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi]}{2(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right. \\ & - \frac{2\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^3} e^{i\phi} + \frac{m\pi \sin [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi]}{2(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \\ & - \left. \frac{2\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^3} e^{-i\phi} \right] + \frac{a l C_\lambda \cos \theta J_1(C_\lambda \sin \theta) |I|}{2\pi^2 l r^2} \\ & \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi/2] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi/2] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] \\ & + \frac{a l S_\lambda \sin \theta |I|}{2\pi^2 l r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin \theta) \left[\frac{m\pi \sin [(S_\lambda \cos \theta - n + 1)\pi]}{2(S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2} \right. \\ & - \frac{2\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n + 1)\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - n + 1)^3} e^{i(n-1)\phi} + \frac{m\pi \sin [(S_\lambda \cos \theta + n - 1)\pi]}{2(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} \\ & - \left. \frac{2\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n - 1)\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^3} e^{-i(n-1)\phi} \right] \\ & + \left[\frac{m\pi \sin [(S_\lambda \cos \theta - n - 1)\pi]}{2(S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2} - \frac{2\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n - 1)\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - n - 1)^3} \right] e^{i(n+1)\phi} \\ & + \left[\frac{m\pi \sin [(S_\lambda \cos \theta + n + 1)\pi]}{2(S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2} - \frac{2\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n + 1)\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + n + 1)^3} \right] e^{-i(n+1)\phi} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& - \frac{a l C_\lambda \cos \theta |I|}{2 \pi^2 L r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n \left[\frac{J_{n-1}(C_\lambda \sin \theta) - J_{n+1}(C_\lambda \sin \theta)}{2} \right] \\
& \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n + 1) m \pi / 2] e^{i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2} \right. \\
& + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n - 1) m \pi / 2] e^{-i(n-1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} \\
& + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n - 1) m \pi / 2] e^{i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2} \\
& \left. + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n + 1) m \pi / 2] e^{-i(n+1)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2} \right] \\
& - \frac{a l n \cot \theta |I|}{2 \pi^2 L r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin \theta) \\
& \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n - 1) m \pi / 2] e^{i(1-n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} \right. \\
& + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n + 1) m \pi / 2] e^{-i(1-n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2} \\
& - \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n - 1) m \pi / 2] e^{i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2} \\
& \left. - \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n + 1) m \pi / 2] e^{-i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2} \right]
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & + \frac{iS_0 n |I|}{2\pi^3 Lr^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C \sin \theta) \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - n)^2} e^{in\phi} \right. \\
 & \left. - \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + n)^2} e^{-in\phi} \right] \quad (2.35)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_\theta = & \frac{-i\beta a l J_0(C_\lambda \sin \theta) |I|}{2\pi^2 Lr} \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} e^{i\phi} \right. \\
 & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} e^{-i\phi} \left. - \frac{i\beta a l |I|}{2\pi^2 Lr} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin \theta) \right. \\
 & \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n + 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2} e^{i(n-1)\phi} \right. \\
 & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n - 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} e^{-i(n-1)\phi} \\
 & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - n - 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2} e^{i(n+1)\phi} \\
 & \left. \left. + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n + 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2} e^{-i(n+1)\phi} \right] \right] \quad (2.36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_\phi = & \frac{\beta a l J_0(C_\lambda \sin \theta) \cos \theta |I|}{2\pi^2 Lr} \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} e^{i\phi} \right. \\
 & \left. - \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} e^{-i\phi} \right] + \frac{\beta a l \cos \theta |I|}{2\pi^2 Lr} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin \theta) \\
 & \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + n - 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} e^{i(1-n)\phi} \right.
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& - \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta - n + 1)m\pi/2] e^{-i(1-n)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n + 1)^2} \\
& + \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta - n - 1)m\pi/2] e^{i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n - 1)^2} \\
& - \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta + n + 1)m\pi/2] e^{-i(1+n)\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n + 1)^2} \\
& + \frac{i\beta S_\lambda \sin\theta J_0(C_\lambda \sin\theta) |I|}{2\pi^3 L r} \left[\frac{\sin^2[(m\pi S_\lambda \cos\theta)/2]}{(S_\lambda \cos\theta)^2} \right] \\
& + \frac{i\beta S_\lambda \sin\theta |I|}{2\pi^3 L r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin\theta) \left[\frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta - n)m\pi/2] e^{in\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - n)^2} \right. \\
& \left. + \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta + n)m\pi/2] e^{-in\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + n)^2} \right] \tag{2.37}
\end{aligned}$$

สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศเกลียว หาได้จากสมการ (2.17) และ (2.18) ซึ่งในกรณีที่สายอากาศมีขนาดเล็ก ($C_\lambda \ll 1$) เราจะได้สมการของสนามไฟฟ้าในระบบแกนอ้างอิงทรงกลม

$$\begin{aligned}
E_\theta = & \frac{60C_\lambda \ell \cos\theta |I|}{\pi L r} \left[\frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta - 1)m\pi/2] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 1)^2} \right. \\
& - \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta + 1)m\pi/2] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 1)^2} \left. \right] + \frac{i30C_\lambda^2 \ell \cos\theta \sin\theta |I|}{\pi L r} \\
& \left[\frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta - 2)m\pi/2] e^{i2\phi}}{(S_\lambda \cos\theta - 2)^2} - \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta + 2)m\pi/2] e^{-i2\phi}}{(S_\lambda \cos\theta + 2)^2} \right] \\
& + \frac{i120S_\lambda \ell \sin\theta |I|}{\pi L r} \left[\frac{\sin^2[(m\pi S_\lambda \cos\theta)/2]}{(S_\lambda \cos\theta)^2} \right] + \frac{60S_\lambda C_\lambda \ell \sin^2\theta |I|}{\pi L r}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)m\pi/2] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)m\pi/2] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] \dots (2.38)$$

$$\begin{aligned} E_\phi = & - \frac{i60C_\lambda \ell |I|}{\pi L r} \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)m\pi/2] e^{i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right. \\ & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)m\pi/2] e^{-i\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \left. \right] - \frac{30C_\lambda^2 \ell \sin \theta |I|}{\pi L r} \left[\frac{2 \sin^2 [(m\pi S_\lambda \cos \theta / 2)]}{(S_\lambda \cos \theta)^2} \right. \\ & + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 2)m\pi/2] e^{i2\phi}}{(S_\lambda \cos \theta - 2)^2} \\ & \left. + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 2)m\pi/2] e^{-i2\phi}}{(S_\lambda \cos \theta + 2)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.39)$$

บนระนาบ xz , yz และ xy กระแสการแผ่คลื่นมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} E_{\theta|_{xz}} = & \frac{60C_\lambda \ell \cos \theta |I|}{\pi L r} \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right. \\ & - \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \left. \right] + \frac{i30C_\lambda^2 \ell \cos \theta \sin \theta |I|}{\pi L r} \\ & \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 2)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - 2)^2} - \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 2)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + 2)^2} \right] \\ & + \frac{i120S_\lambda \ell \sin \theta |I|}{\pi L r} \left[\frac{\sin^2 [(m\pi S_\lambda \cos \theta / 2)]}{(S_\lambda \cos \theta)^2} \right] + \frac{60S_\lambda C_\lambda \ell \sin^2 \theta |I|}{\pi L r} \\ & \left[\frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta - 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2} + \frac{\sin^2 [(S_\lambda \cos \theta + 1)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.40)$$

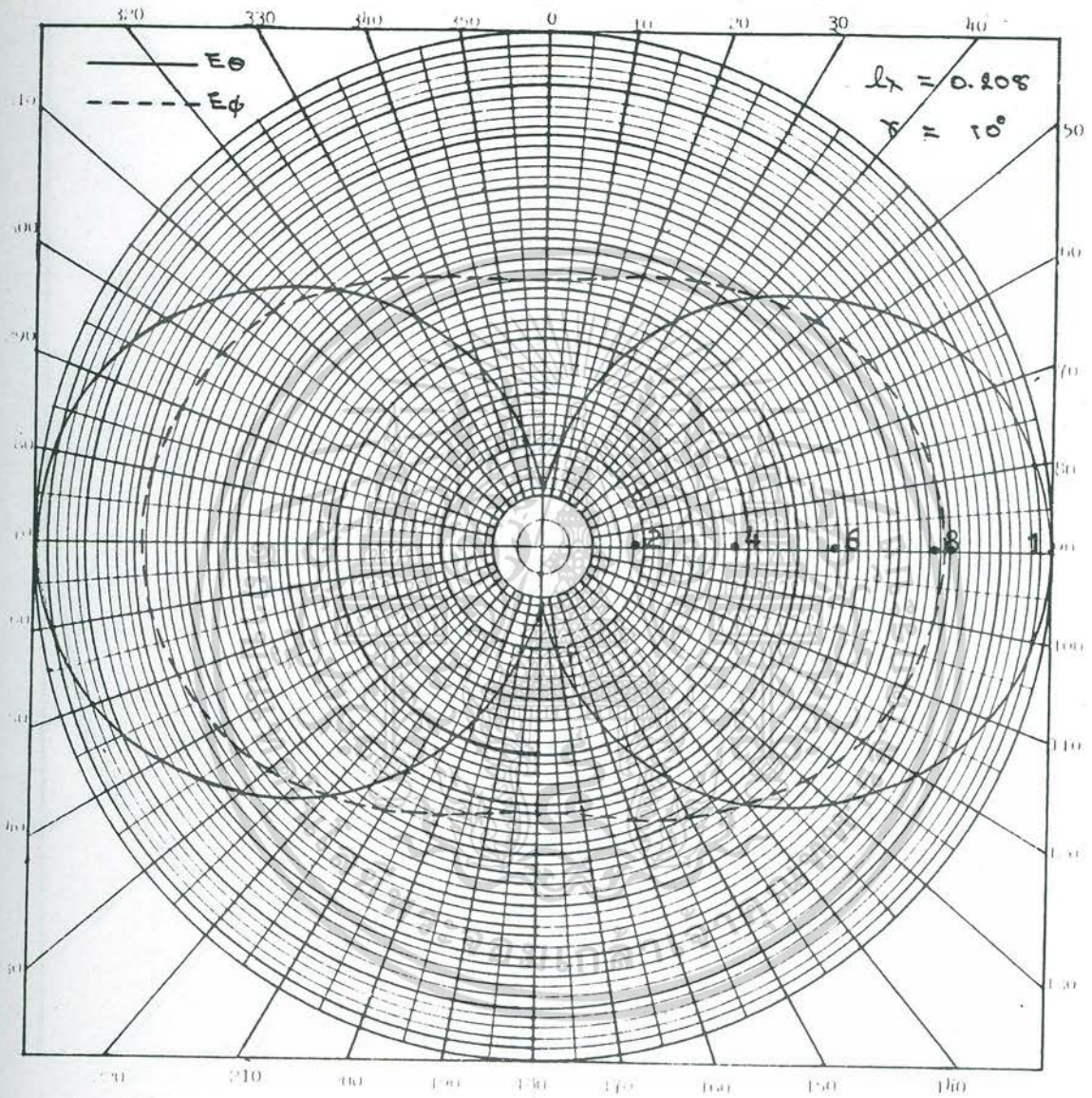
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_{\phi|xz} = & -\frac{i60C_{\lambda}\ell|I|}{\pi Lr} \left[\frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta-1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta-1)^2} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta+1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta+1)^2} \right] - \frac{30C_{\lambda}^2\ell\sin\theta|I|}{\pi Lr} \\
 & \left[\frac{2\sin^2(m\pi S_{\lambda}\cos\theta/2)}{(S_{\lambda}\cos\theta)^2} + \frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta-2)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta-2)^2} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta+2)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta+2)^2} \right] \quad (2.41)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{\theta|yz} = & \frac{i60C_{\lambda}\ell\cos\theta|I|}{\pi Lr} \left[\frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta-1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta-1)^2} \right. \\
 & \left. + \frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta+1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta+1)^2} \right] - \frac{i30C_{\lambda}^2\ell\cos\theta\sin\theta|I|}{\pi Lr} \\
 & \left[\frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta-2)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta-2)^2} - \frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta+2)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta+2)^2} \right] \\
 & + \frac{i120S_{\lambda}\ell\sin\theta|I|}{\pi Lr} \left[\frac{\sin^2[m\pi S_{\lambda}\cos\theta/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta)^2} \right] + \frac{i60S_{\lambda}C_{\lambda}\ell\sin^2\theta|I|}{\pi Lr} \\
 & \left[\frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta-1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta-1)^2} - \frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta+1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta+1)^2} \right] \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{\phi|yz} = & \frac{60C_{\lambda}\ell|I|}{\pi Lr} \left[\frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta-1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta-1)^2} - \frac{\sin^2[(S_{\lambda}\cos\theta+1)m\pi/2]}{(S_{\lambda}\cos\theta+1)^2} \right] \\
 & - \frac{30C_{\lambda}^2\ell\sin\theta|I|}{\pi Lr} \left[\frac{2\sin^2(m\pi S_{\lambda}\cos\theta/2)}{(S_{\lambda}\cos\theta)^2} \right]
 \end{aligned}$$

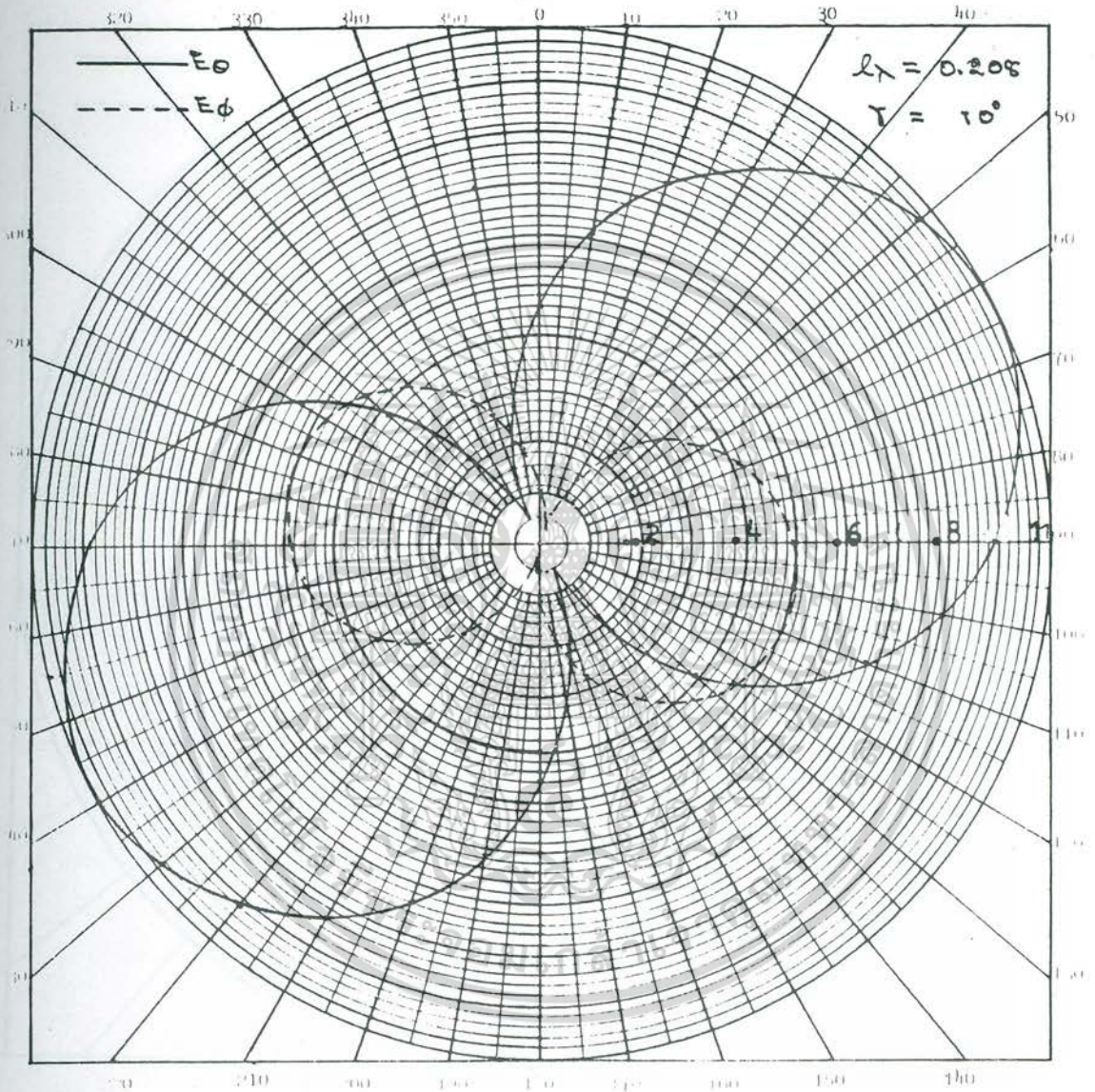
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ก กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xz

ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ตามสมการ (2.40)

และสมการ (2.41)

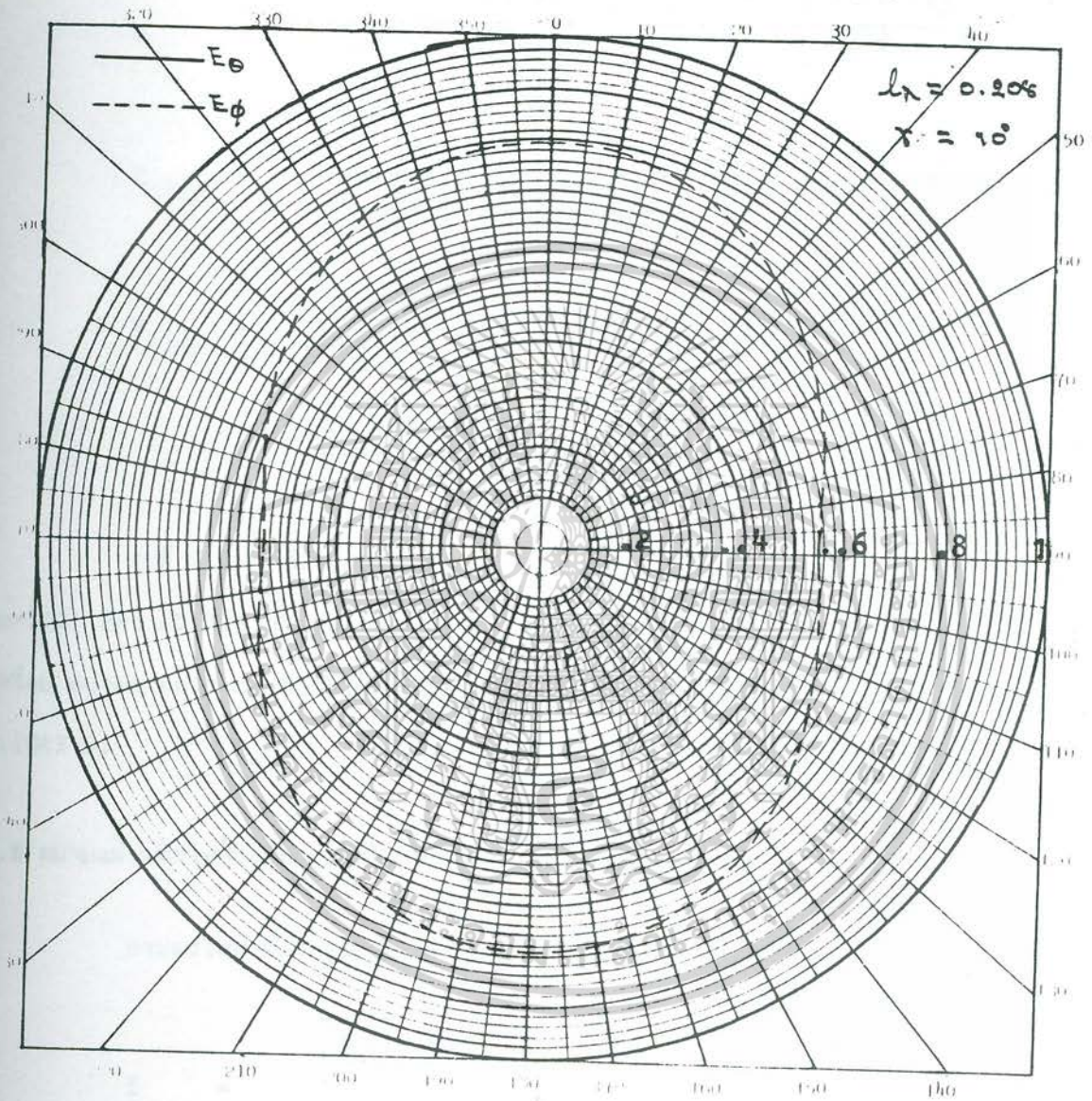


รูปที่ 2.5 ข กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ yz

ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ตามสมการ (2.42)

และสมการ (2.43)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ค กระสวนการแผ่คลื่น ในระนาบ xy
 ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ตามสมการ (2.44)
 และสมการ (2.45)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \begin{aligned} & - \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta - 2)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos\theta - 2)^2} - \frac{\sin^2[(S_\lambda \cos\theta + 2)m\pi/2]}{(S_\lambda \cos\theta + 2)^2} \end{aligned} \right] \quad (2.43)$$

$$E_\theta|_{xy} = \frac{i30(m\pi)^2 S_\lambda \ell |I|}{\pi L r} + \frac{120 S_\lambda C_\lambda \ell |I|}{\pi L r} \left[\sin^2 m\pi/2 \right] \cos\phi \quad (2.44)$$

$$E_\phi|_{xy} = \frac{-i120 C_\lambda \ell |I| \left[\sin^2 m\pi/2 \right] \cos\phi}{\pi L r} - \frac{30 C_\lambda^2 \ell |I|}{\pi L r} \left[\frac{(m\pi)^2}{2} + \frac{\sin^2(m\pi) \cos(2\phi)}{2} \right] \quad (2.45)$$

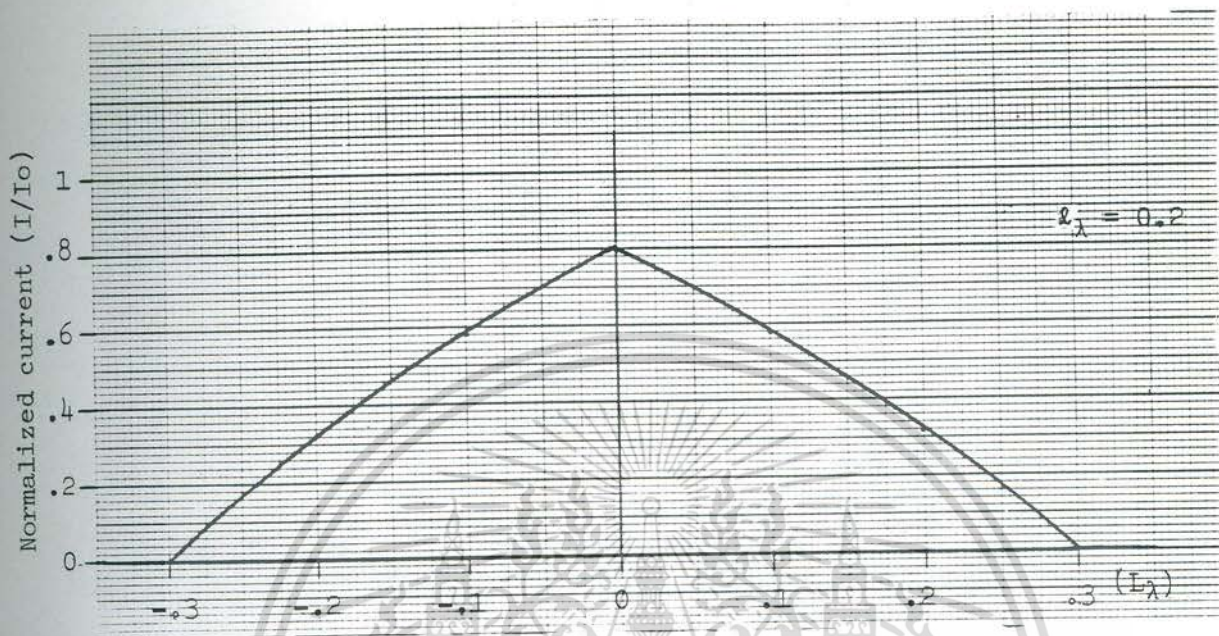
รูปที่ 2.5 ก, 2.5 ข, 2.5 ค. เป็นกระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ($m=3/2$) ที่ความถี่ 10^4 MHz บนระนาบ xz , yz , และ xy เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแรงแบบสามเหลี่ยม ขนาดสายอากาศเกลียวที่ให้ค่าวนคือ $\ell = 0.6$ ม. $L = 0.9$ ม. $C = 0.5907$ ม. $S = 0.1042$ ม.

2.6 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแรงแบบ Sinusoidal

กระแสไฟฟ้าที่แรงแบบ Sinusoidal นั้น มีลักษณะตามสมการ

$$I = \begin{cases} I_0 \sin \left[\beta \left(\frac{L}{2} - \frac{\ell \alpha}{2\pi} \right) \right] & \alpha > 0 \\ I_0 \sin \left[\beta \left(\frac{L}{2} + \frac{\ell \alpha}{2\pi} \right) \right] & \alpha < 0 \end{cases} \quad (2.46)$$

รูปที่ 2.6 เป็นกราฟตัวอย่างกระแสไฟฟ้าที่มีการแรงแบบ Sinusoidal ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ที่มีความยาว 1 รอบเท่ากับ 0.2λ และความยาวทั้งหมดเท่ากับ 0.3λ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการแจกแจงรูปกระแสไฟฟ้าแบบ sinusoidal
ในกรณีที่ลวดตัวนำสายอากาศมี ความยาว 1 รอบเท่ากับ 0.2 λ

เมื่อแทนสมการ (2.46) ลงในสมการ (2.9) แล้วทำการอินทิเกรต ก็จะได้องค์ประกอบ
ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กในระบบแกนอ้างอิงทรงกระบอกดังนี้

$$\begin{aligned}
 A_{\rho} = & \frac{a\mu_0 J_0 (C_{\lambda} \sin\theta) \ell_{\beta} |I|}{4\pi r} \left[\frac{\cos\pi L_{\lambda} - \cos[(S_{\lambda} \cos\theta - 1)\pi]}{i[\ell_{\lambda}^2 - (S_{\lambda} \cos\theta - 1)^2]} e^{i\phi} \right. \\
 & - \left. \frac{\cos\pi L_{\lambda} - \cos[(S_{\lambda} \cos\theta + 1)\pi]}{i[\ell_{\lambda}^2 - (S_{\lambda} \cos\theta + 1)^2]} e^{-i\phi} \right] \\
 & + \frac{a\mu_0 \ell_{\lambda} |I|}{4\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_{\lambda} \sin\theta) \\
 & \left[\frac{\cos\pi L_{\lambda} - \cos[(S_{\lambda} \cos\theta + n - 1)\pi]}{i[\ell_{\lambda}^2 - (S_{\lambda} \cos\theta + n - 1)^2]} e^{i(1-n)\phi} \right]
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& - \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - n + 1) m \pi]}{i [\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2]} \right] e^{-i(1-n)\phi} \\
& + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - n - 1) m \pi]}{i [\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2]} \right] e^{i(1+n)\phi} \\
& - \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + n + 1) m \pi]}{i [\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2]} \right] e^{-i(1+n)\phi}
\end{aligned} \quad \dots (2.47)$$

$$\begin{aligned}
A_\phi = & \frac{a \mu_0 J_0 (C_\lambda \sin \theta) \ell_\lambda |I|}{4 \pi r} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - 1) m \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right] e^{i\phi} \\
& + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + 1) m \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] e^{-i\phi} \\
& + \frac{a \mu_0 \ell_\lambda |I|}{4 \pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n(C_\lambda \sin \theta) \\
& \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - n + 1) m \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - n + 1)^2} \right] e^{i(n-1)\phi} \\
& + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + n - 1) m \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + n - 1)^2} \right] e^{-i(n-1)\phi} \\
& + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - n - 1) m \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - n - 1)^2} \right] e^{i(n+1)\phi} \\
& + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + n + 1) m \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + n + 1)^2} \right] e^{i(n+1)\phi}
\end{aligned} \quad \dots (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
A_z &= \frac{\mu_0 S J_0 (C_\lambda \sin \theta) \ell_\lambda |I|}{4\pi r^2} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (\pi S_\lambda \cos \theta)}{(S_\lambda \cos \theta)^2 - \ell_\lambda^2} \right] \\
&+ \frac{\mu_0 S |I| \ell_\lambda}{4\pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n J_n (C_\lambda \sin \theta) \\
&\left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - n)\pi]}{(S_\lambda \cos \theta - n)^2 - \ell_\lambda^2} \right] e^{in\phi} \\
&+ \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + n)\pi]}{(S_\lambda \cos \theta + n)^2 - \ell_\lambda^2} \right] e^{-in\phi} \quad .(2.49)
\end{aligned}$$

เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็ก ($C_\lambda \ll 1$) สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ระยะไกลในระบบแกนอ้างอิงทรงกลมมีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
H_r &= \frac{-a S_\lambda \ell_\lambda \sin \theta |I|}{4\pi r^2} \left[\frac{2(S_\lambda \cos \theta - 1) (\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi])}{[\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2]^2} \right. \\
&+ \left. \frac{\pi S_\lambda \sin [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right] e^{i\phi} \\
&+ \left[\frac{2(S_\lambda \cos \theta + 1) (\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi])}{[\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2]^2} \right. \\
&+ \left. \frac{\pi S_\lambda \sin [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] e^{-i\phi} - \frac{a_\lambda C_\lambda^2 \ell_\lambda \cos \theta \sin \theta |I|}{8\pi r^2} \\
&\left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right] e^{i\phi} \\
&+ \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] e^{-i\phi}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& + \frac{iaC_\lambda S_\lambda \sin^2 \theta \ell_\lambda |I|}{8\pi r^2} \left[2 \left[\frac{S_\lambda \cos \theta [\cos \pi L_\lambda - \cos (\pi \pi S_\lambda \cos \theta)]}{[\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta)^2]^2} \right. \right. \\
& + \left. \frac{\pi \pi \sin (\pi \pi S_\lambda \cos \theta)}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta)^2} \right] + \left[\frac{2(S_\lambda \cos \theta - 2)(\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - 2)\pi \pi])}{[\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 2)^2]^2} \right. \\
& + \left. \frac{\pi \pi \sin [(S_\lambda \cos \theta - 2)\pi \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 2)^2} \right] e^{i2\phi} + \left[\frac{\pi \pi \sin [(S_\lambda \cos \theta + 2)\pi \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 2)^2} \right. \\
& + \left. \frac{2(S_\lambda \cos \theta + 2)(\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + 2)\pi \pi])}{[\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 2)^2]^2} \right] e^{-i2\phi} \\
& - \frac{iaC_\lambda \ell_\lambda \cos \theta |I|}{4\pi r^2} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (\pi \pi S_\lambda \cos \theta)}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta)^2} + \frac{S_\lambda C_\lambda \sin \theta |I|}{8\pi r^2} \right. \\
& \left. \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi \pi]}{(S_\lambda \cos \theta - 1)^2 - \ell_\lambda^2} \right] e^{i\phi} \right. \\
& \left. - \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi \pi]}{(S_\lambda \cos \theta + 1)^2 - \ell_\lambda^2} \right] e^{-i\phi} \right] \quad (2.50)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_\theta & = \frac{i\beta a \ell_\lambda |I|}{4\pi r} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta - 1)\pi \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right] e^{i\phi} \\
& + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos [(S_\lambda \cos \theta + 1)\pi \pi]}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] e^{-i\phi} + \frac{(C_\lambda)^2 \ell_\lambda \sin \theta |I|}{8\pi r} \\
& \left[2 \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (\pi \pi S_\lambda \cos \theta)}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta)^2} \right] + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta - 2)\pi \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 2)^2} \right] e^{i2\phi} \right. \\
& \left. + \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta + 2)\pi \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 2)^2} \right] e^{-i2\phi} \right] \quad (2.51)
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 H_\phi &= \frac{iS_\lambda C_\lambda \sin\theta |I|}{r} \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(\pi S_\lambda \cos\theta)}{(S_\lambda \cos\theta)^2 - \ell_\lambda^2} \right] \\
 &- \frac{30C_\lambda \ell_\lambda \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos\theta - 1)\pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta - 1)^2} \right] e^{i\phi} \\
 &- \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos\theta + 1)\pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta + 1)^2} \right] e^{-i\phi} \quad \dots (2.52)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_\theta &= \frac{i60S_\lambda \ell_\lambda \sin\theta |I|}{r} \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(\pi S_\lambda \cos\theta)}{(S_\lambda \cos\theta)^2 - \ell_\lambda^2} \right] \\
 &- \frac{30C_\lambda \ell_\lambda \cos\theta |I|}{r} \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos\theta - 1)\pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta - 1)^2} \right] e^{i\phi} \\
 &- \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos\theta + 1)\pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta + 1)^2} \right] e^{-i\phi} \quad (2.53)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_\phi &= - \frac{15(C_\lambda)^2 \ell_\lambda \sin\theta |I|}{r} \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(\pi S_\lambda \cos\theta)}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta)^2} \right] \\
 &+ \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos\theta - 2)\pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta - 2)^2} \right] e^{i2\phi} \\
 &+ \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos\theta + 2)\pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta + 2)^2} \right] e^{-i2\phi} \\
 &+ \frac{i30C_\lambda \ell_\lambda |I|}{r} \left[\frac{\cos\pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos\theta - 1)\pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos\theta - 1)^2} \right] e^{i\phi}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta + 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] e^{-i\phi} \quad (2.54)$$

ในระนาบ xz , yz , และ xy สนามไฟฟ้าจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$E_{\theta|xz} = \frac{i60S_\lambda \ell_\lambda \sin \theta |I|}{r} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (m \pi S_\lambda \cos \theta)}{(S_\lambda \cos \theta)^2 - \ell_\lambda^2} \right] - \frac{30C_\lambda \ell_\lambda \cos \theta |I|}{r} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta - 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} - \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta + 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] \quad (2.55)$$

$$E_{\phi|xz} = - \frac{(5CC_\lambda)^2 \ell_\lambda \sin \theta |I|}{r} \left[2 \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (m \pi S_\lambda \cos \theta)}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta)^2} \right] + \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta - 2) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 2)^2} + \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta + 2) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 2)^2} \right] + \frac{i30C_\lambda \ell_\lambda |I|}{r} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta - 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} + \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta + 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \right] \quad (2.56)$$

$$E_{\theta|yz} = \frac{i60S_\lambda \ell_\lambda \sin \theta |I|}{r} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (m \pi S_\lambda \cos \theta)}{(S_\lambda \cos \theta)^2 - \ell_\lambda^2} \right] - \frac{i30C_\lambda \ell_\lambda \cos \theta |I|}{r} \left[\frac{\cos \pi L_\lambda - \cos (S_\lambda \cos \theta - 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos \theta + 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \quad (2.57)$$

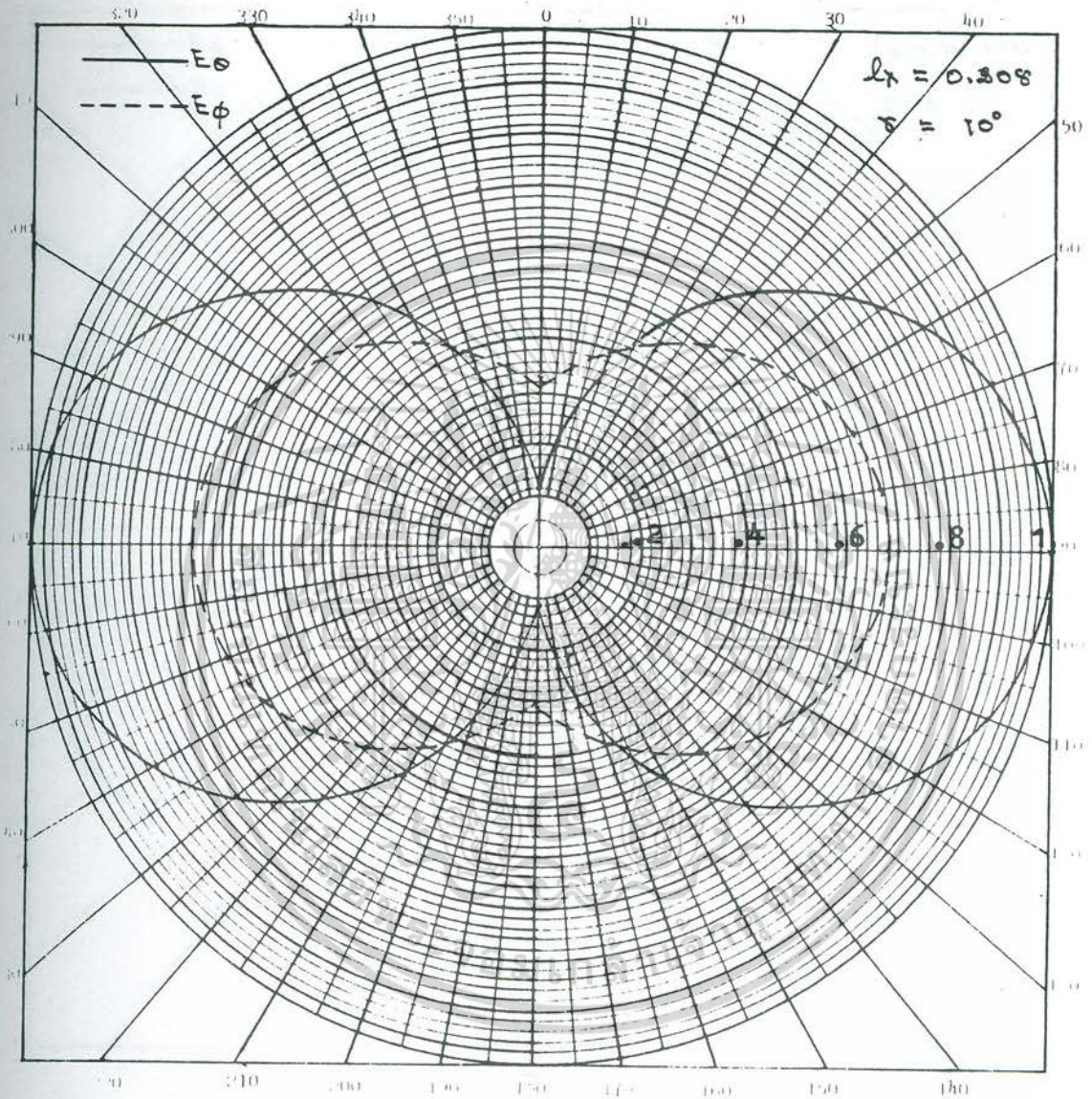
$$E_\phi|_{yz} = - \frac{30(C_\lambda)^2 \ell_\lambda \sin \theta |I|}{2r} \left[\begin{aligned} & \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos(m\pi S_\lambda \cos \theta)}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta)^2} \\ & - \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos \theta - 2) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 2)^2} \\ & - \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos \theta + 2) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 2)^2} \end{aligned} \right] \\ - \frac{30C_\lambda \ell_\lambda |I|}{r} \left[\begin{aligned} & \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos \theta - 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta - 1)^2} \\ & - \frac{\cos \pi L_\lambda - \cos(S_\lambda \cos \theta + 1) m \pi}{\ell_\lambda^2 - (S_\lambda \cos \theta + 1)^2} \end{aligned} \right] \quad (2.58)$$

$$E_\theta|_{xy} = \frac{i60S_\lambda (1 - \cos \pi L_\lambda) |I|}{\ell_\lambda r} \quad (2.59)$$

$$E_\phi|_{xy} = - \frac{15(C_\lambda)^2 |I|}{r} \left[\frac{2(\cos \pi L_\lambda - 1)}{\ell_\lambda} + \frac{2\ell_\lambda (\cos \pi L_\lambda - \cos 2m\pi) \cos 2\phi}{\ell_\lambda^2 - 4} \right] \\ + \frac{i60C_\lambda \ell_\lambda |I| (\cos \pi L_\lambda - \cos m\pi)}{r (\ell_\lambda^2 - 1)} \cos \phi \quad (2.60)$$

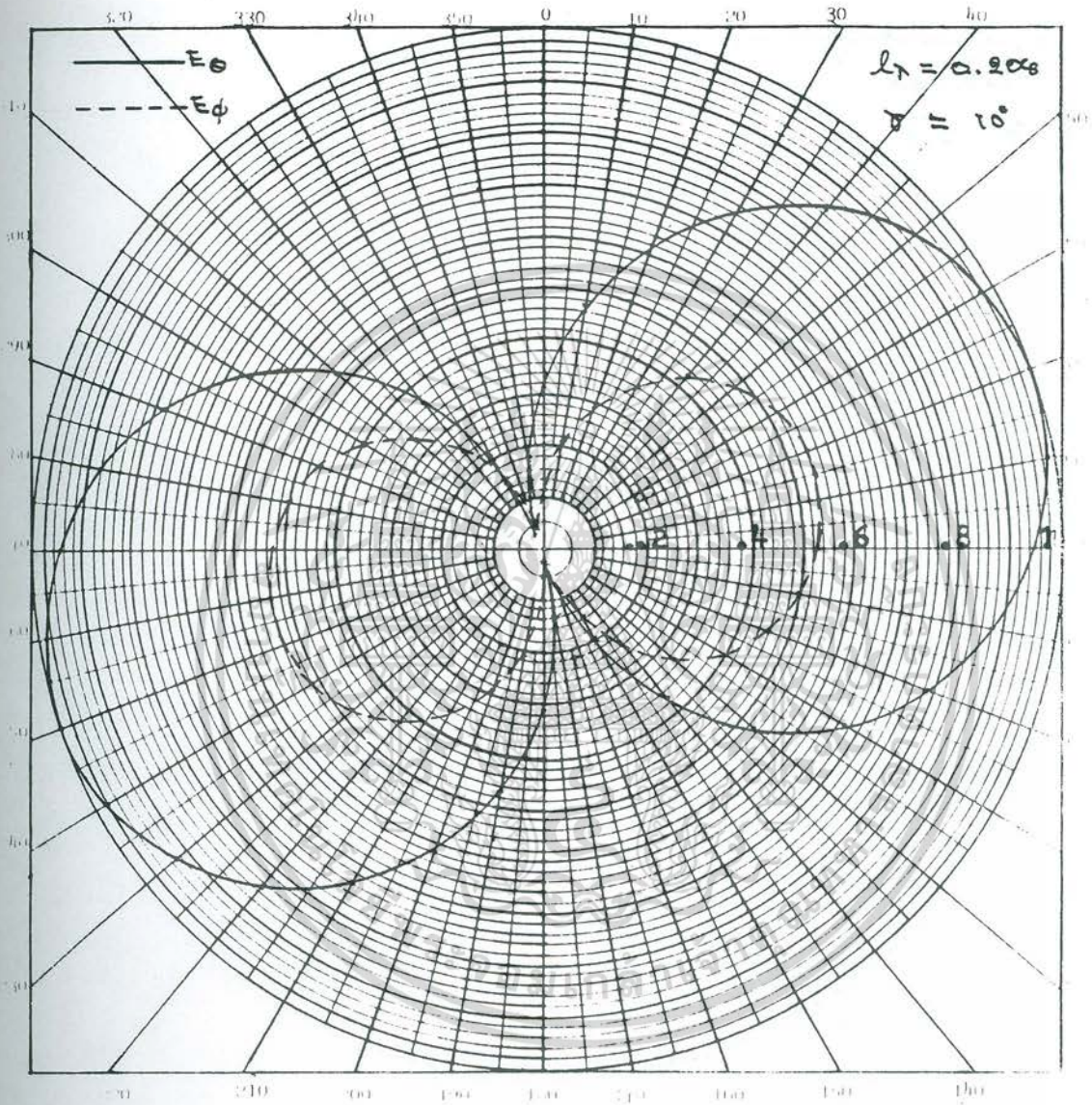
กระสวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลมีการแฉงรูปแบบ sinusoidal ในระนาบ xz, yz, และ xy นั้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ก, 2.7 ข, และ 2.7 ค ค่า C_λ , S_λ , ℓ_λ และ L_λ ที่ใช้คำนวณมีค่าเท่ากับ 0.204, 0.036, 0.208 และ 0.312 ตามลำดับ

เอกรังสีที่ส่งไปในทิศทางอื่นนอกจากทิศทางที่ตั้งใจจะส่งออกไปยังผู้รับนั้นถือว่าเป็นการรบกวนที่ไม่ควรให้มีเกิดขึ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



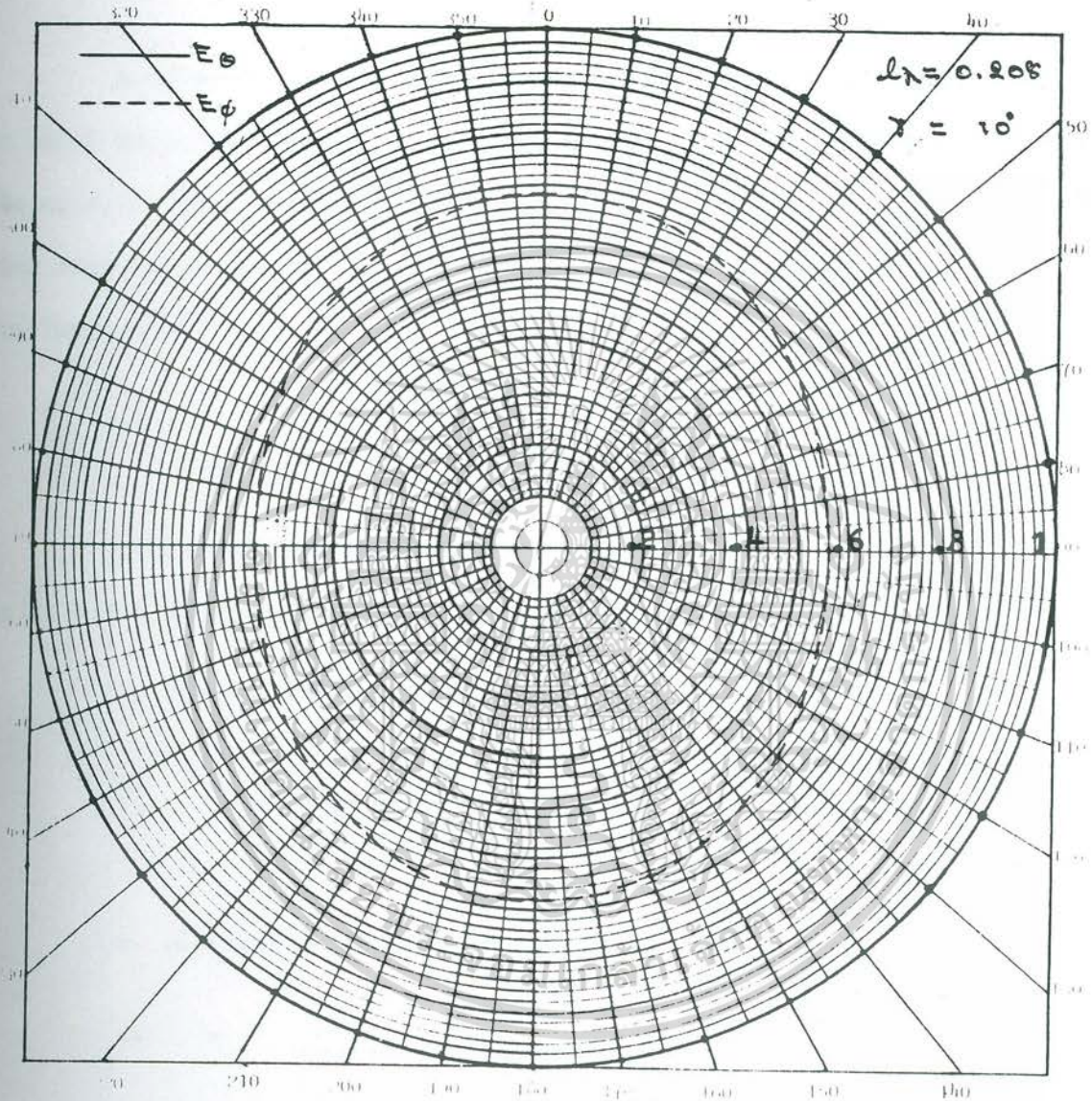
รูปที่ 2.7 ก กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xz ของ
สายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ตามสมการ (2.55) และสมการ (2.56)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ข กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ yz ของสาย
อากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ตามสมการ (2.57) และสมการ (2.58)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ค กระบวนการแผ่คลื่น ในระนาบ xy ของ
 สายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ตามสมการ (2.59) และสมการ (2.60)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เงื่อนไขของการเกิด circular polarization

สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศจะมี polarization เป็นแบบใดนั้นสามารถทราบได้จาก axial ratio (AR) ขององค์ประกอบสนามไฟฟ้า ที่สายอากาศแผ่ออก ในกรณีของสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก: สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกประกอบด้วยสนามไฟฟ้า 2 องค์ประกอบคือ E_θ และ E_ϕ ดังนั้น axial ratio ของสายอากาศเกลียวขนาดเล็กจึงเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้า ทั้งสองและสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$AR = \frac{|E_\theta|}{|E_\phi|} \quad (2.61)$$

เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบสนามไฟฟ้าของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ ขนาดเล็กในระนาบ xy สมการ AR ของสนามไฟฟ้าที่เกิด จากการแจกแจงกระแสไฟฟ้าแต่ละแบบจะเขียนได้ดังนี้

ก. เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ

$$AR = \frac{2S_\lambda}{C_\lambda^2 \sqrt{1 + \left[\frac{2 \sin m\pi \cos \phi}{m\pi C_\lambda} \right]^2}} \quad (2.62)$$

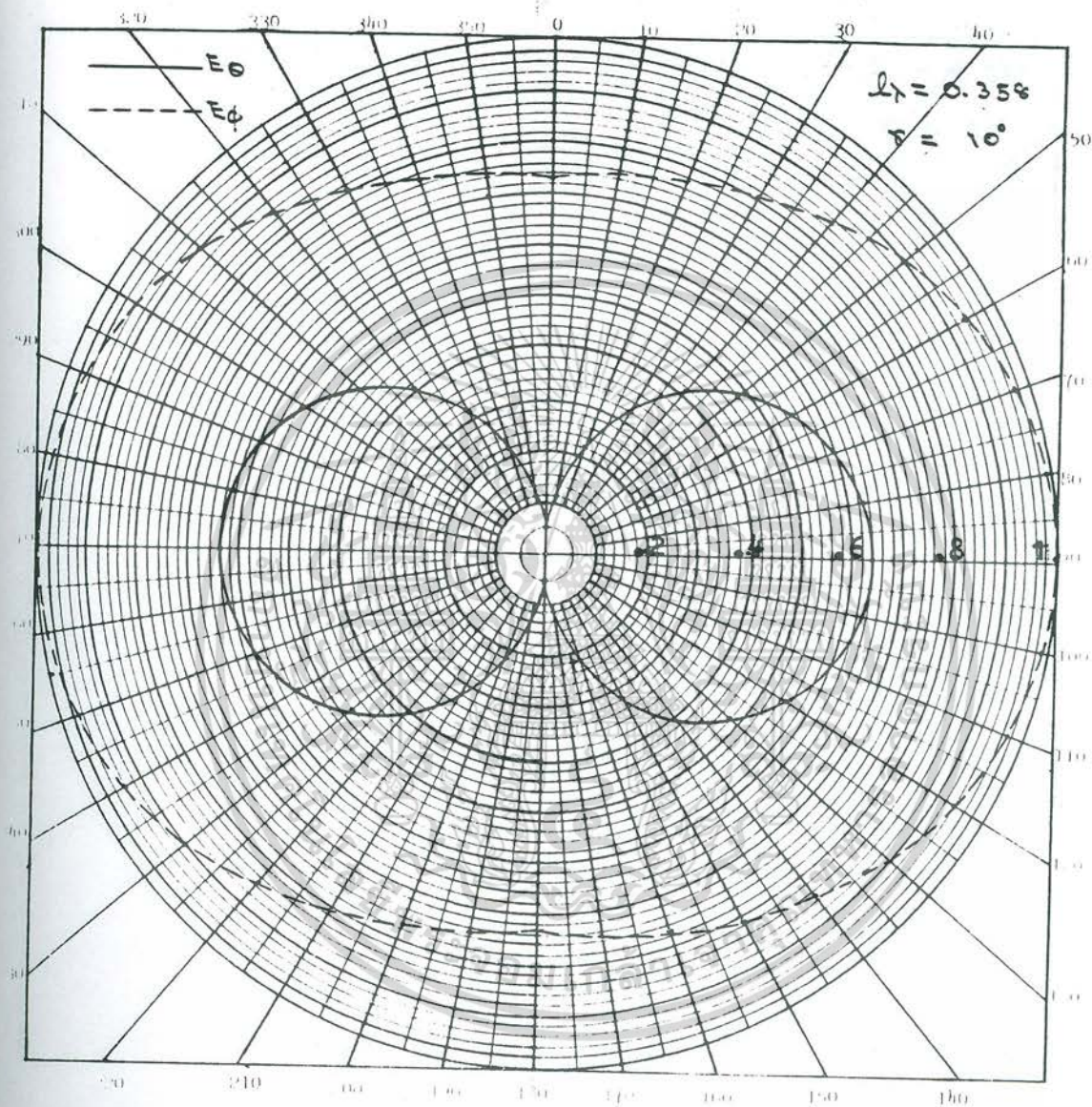
ข. เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม

$$AR = \frac{2S_\lambda}{C_\lambda^2 \sqrt{1 + \left[\frac{8 \sin^2(m\pi/2) \cos \phi}{(m\pi)^2 C_\lambda} \right]^2}} \quad (2.63)$$

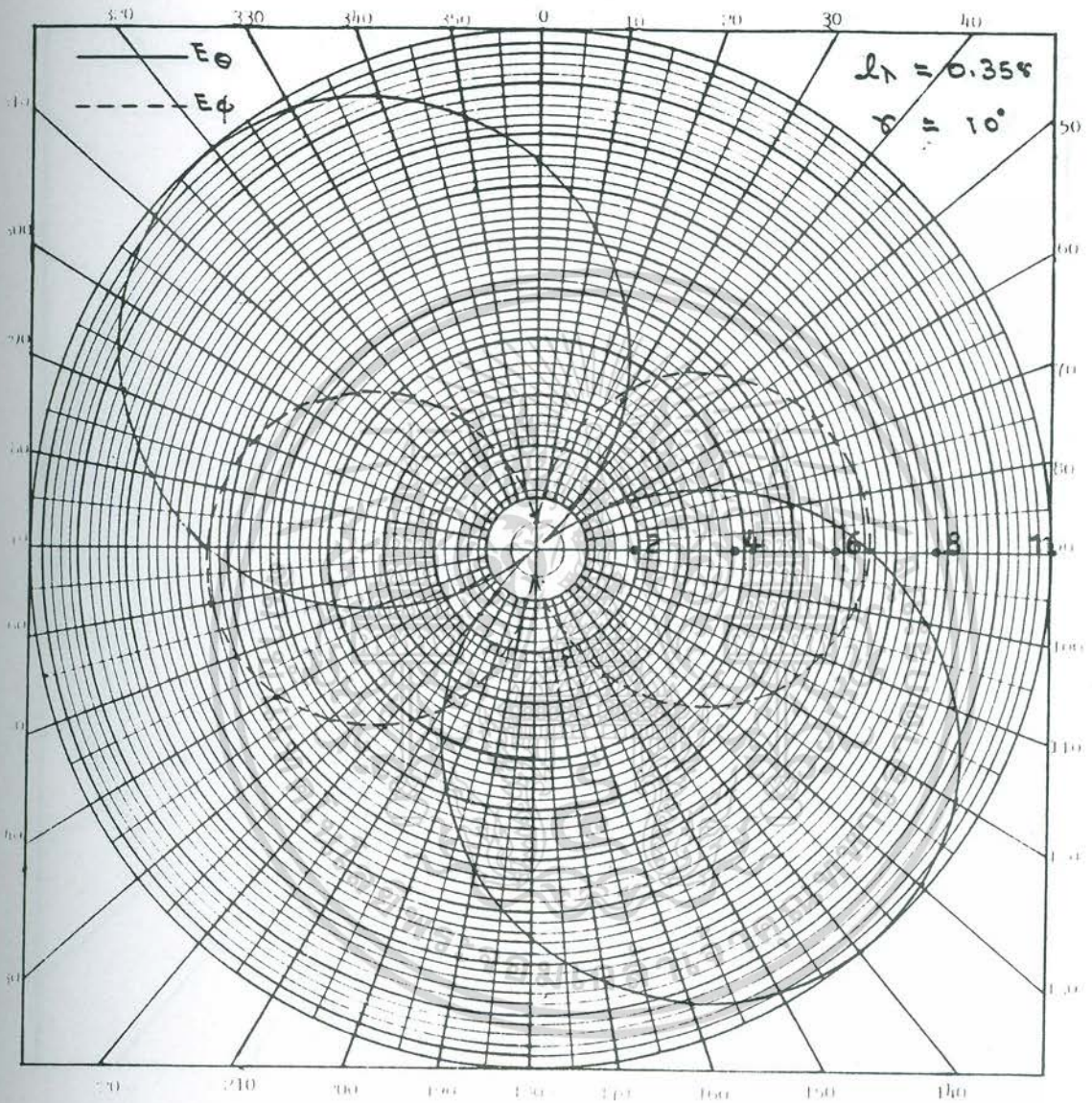
ค. เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแจกแจงแบบ sinusoidal

$$AR = \frac{2S_\lambda}{C_\lambda^2 \sqrt{1 + \left[\frac{2\ell_\lambda^2 (\cos \pi L_\lambda - \cos m\pi) \cos \phi}{C_\lambda (1 - \cos \pi L_\lambda) (\ell_\lambda^2 - 1)} \right]^2}} \quad (2.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

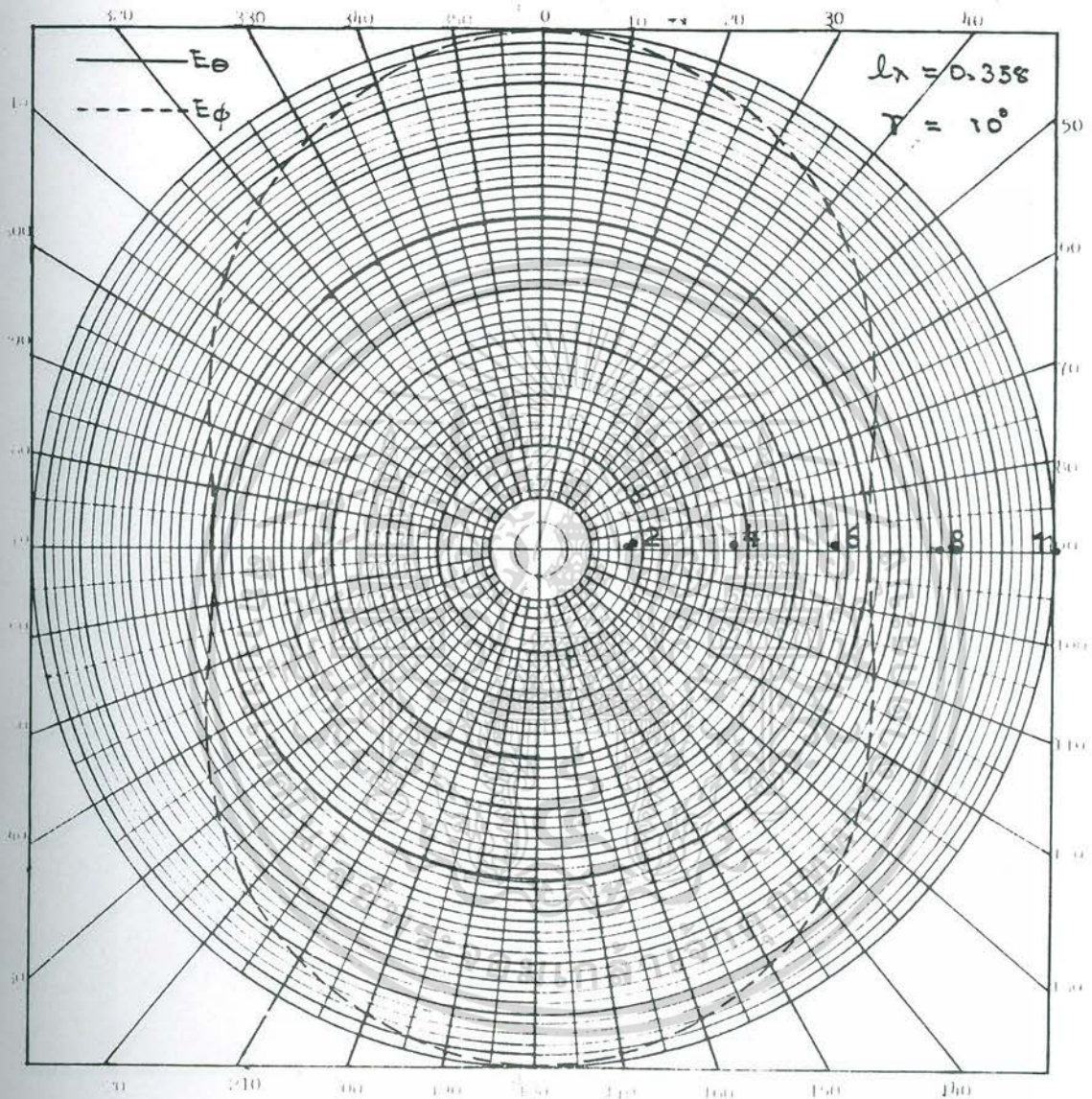


รูปที่ 2.8 ก กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xz ตามเงื่อนไข
 การเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ
 เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแฉงรูปแบบสม่ำเสมอ

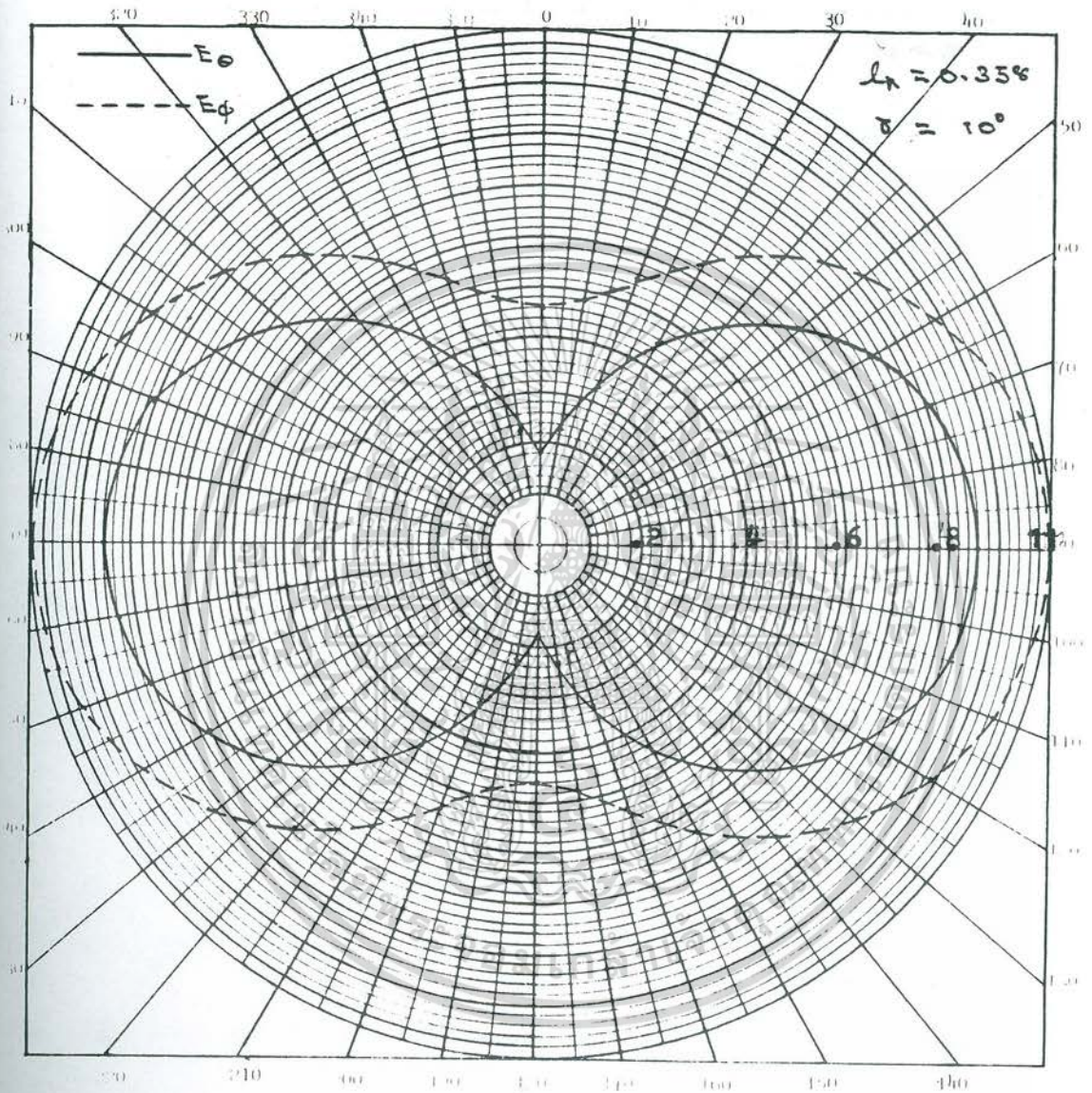


รูปที่ 2.8 ข กระบวนการแผ่คลื่น ในระนาบ yz ตามเงื่อนไข
 การเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ
 เมื่อกระแสไฟฟ้ามักการจางรูปแบบสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

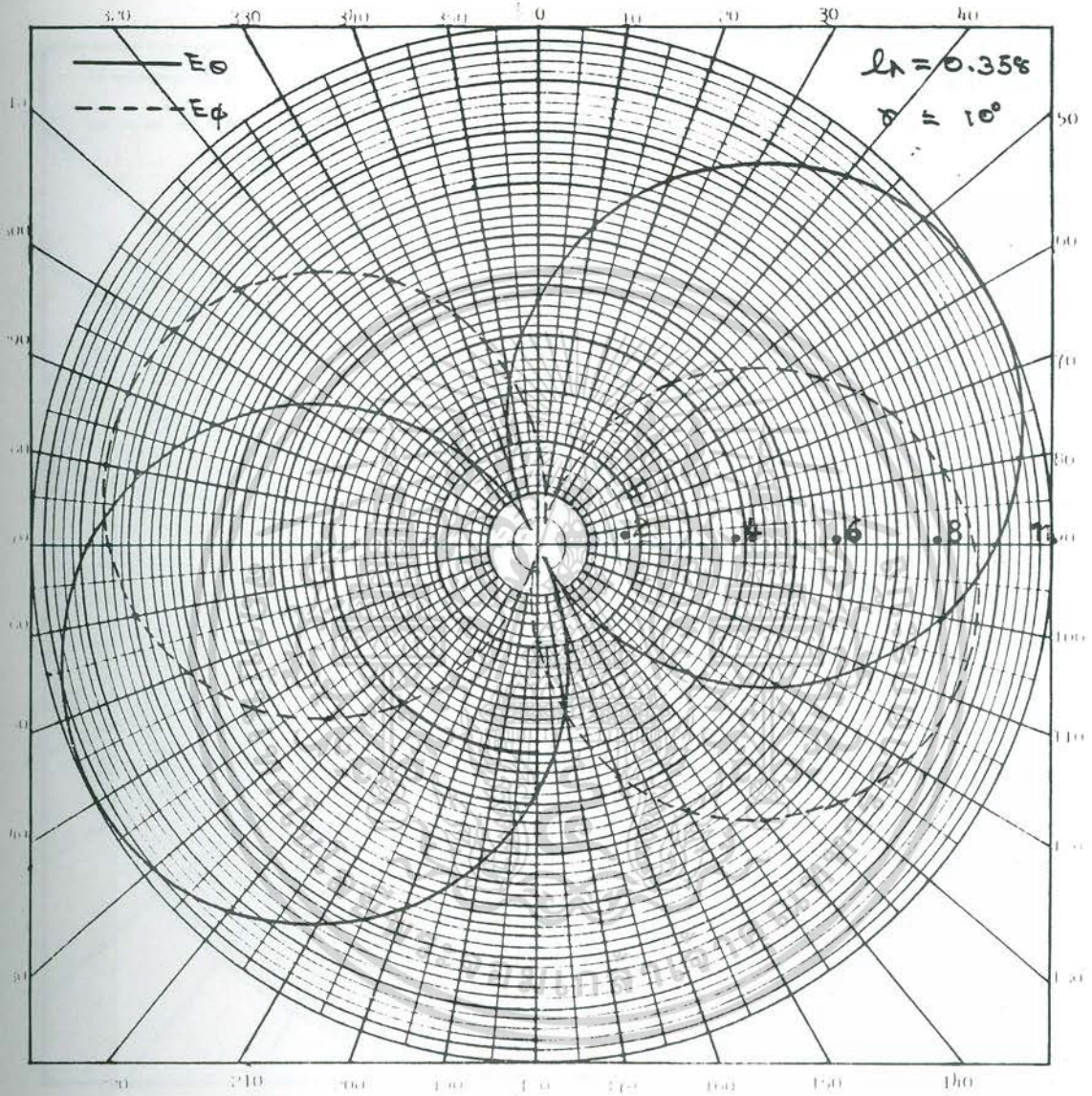


รูปที่ 2.8 ค กระสวนการแผ่คลื่นในระนาบ xy ตามเงื่อนไข
 การเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ
 เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ



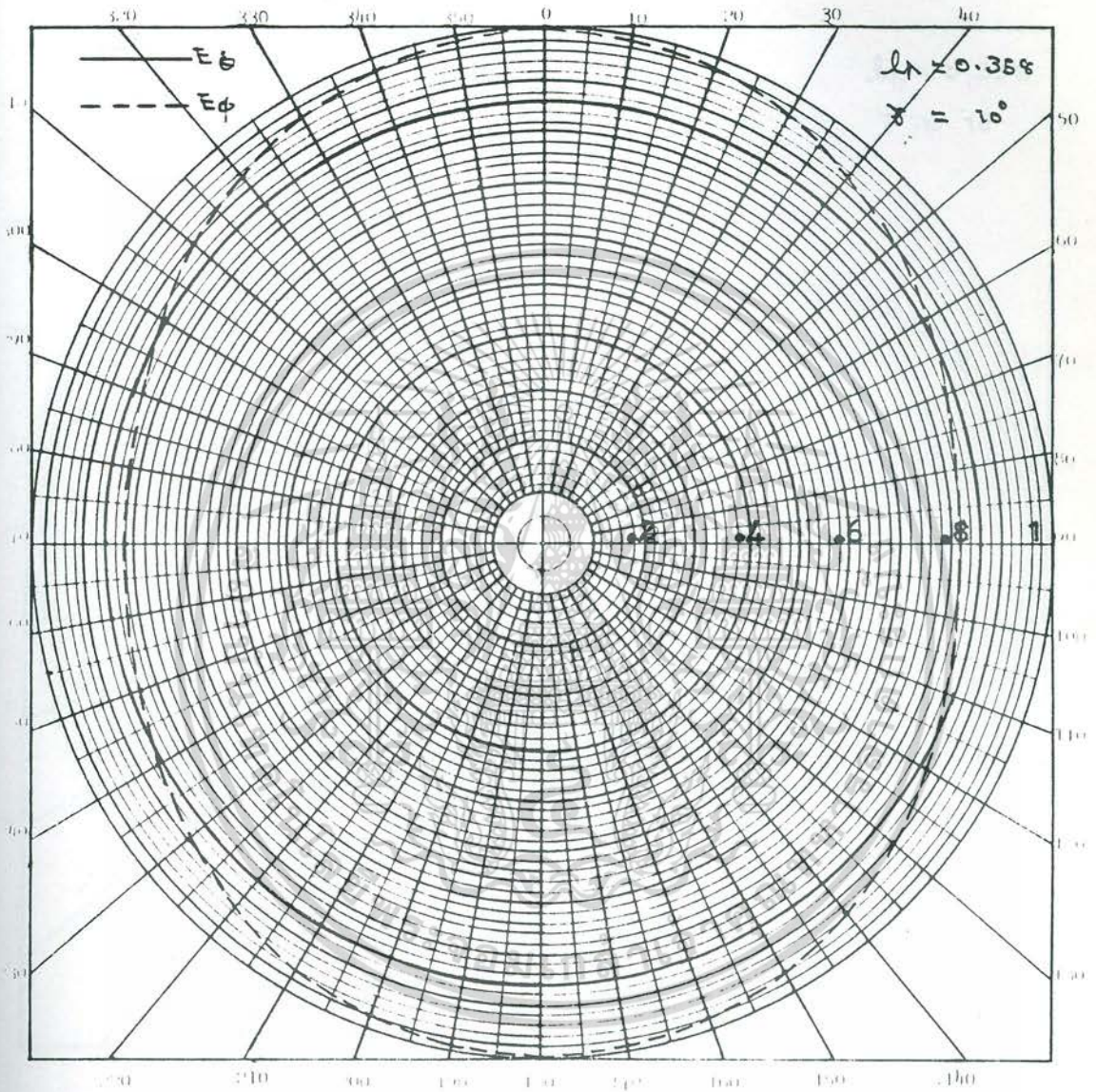
รูปที่ 2.9 ก กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xz ตามเงื่อนไข
 การเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ
 เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแฉงรูปแบบสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



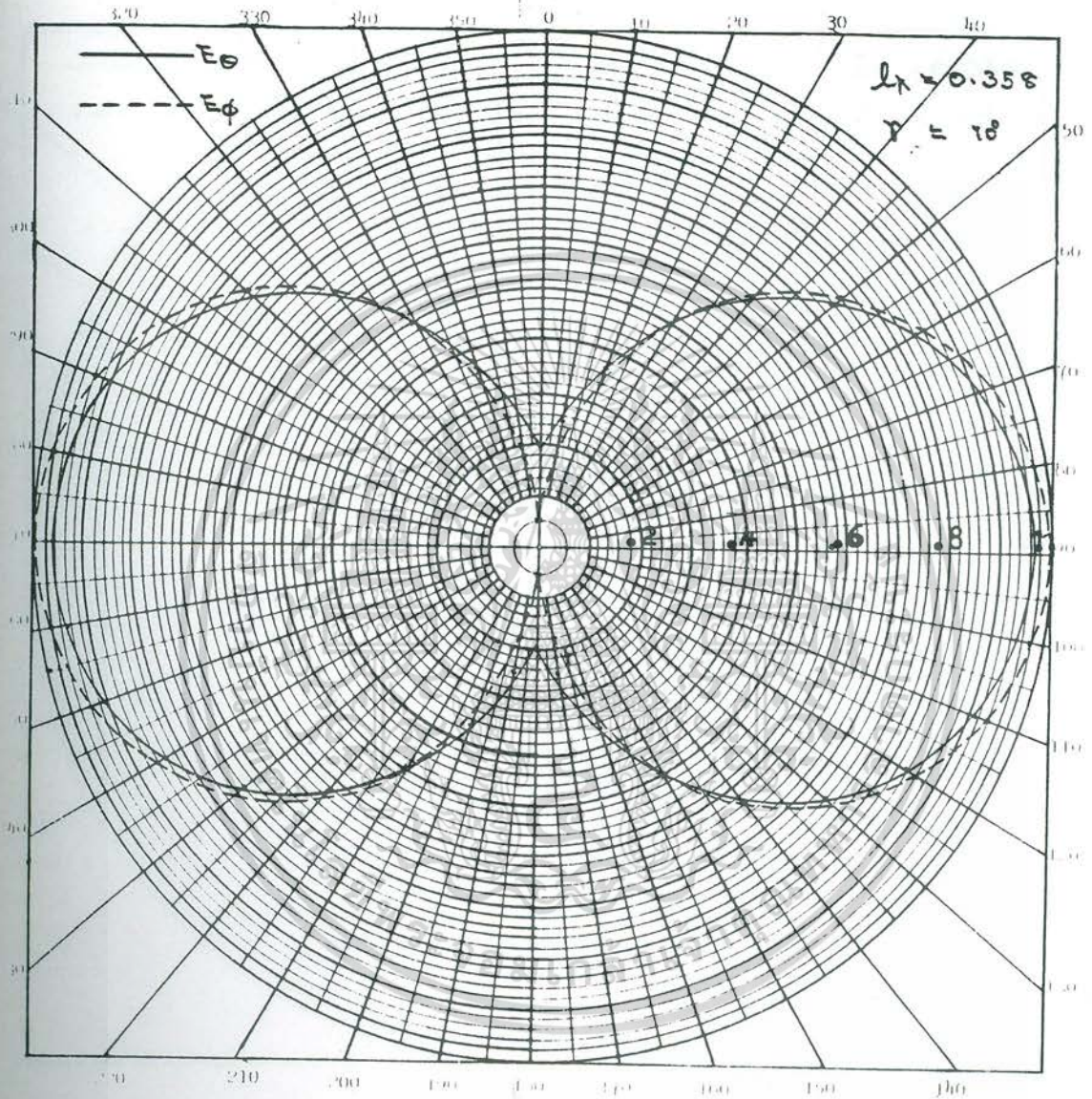
รูปที่ 2.9 ข กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ yz ตามเงื่อนไขการเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว 1½ รอบ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการ แฉงรูปแบบสาม เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

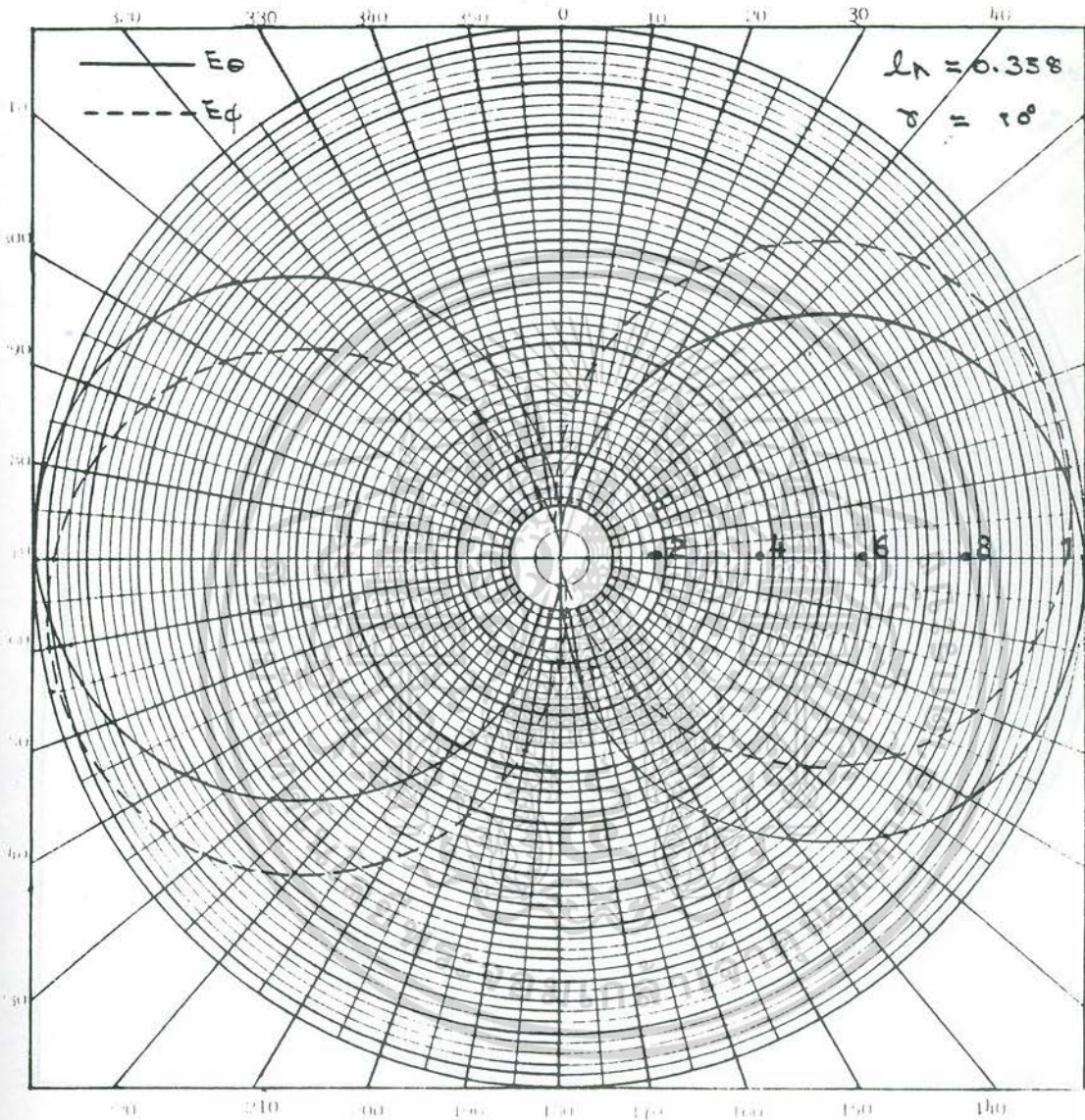


รูปที่ 2.9 ค กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xy ตามเงื่อนไขการเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการ แฉงรูปแบบสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

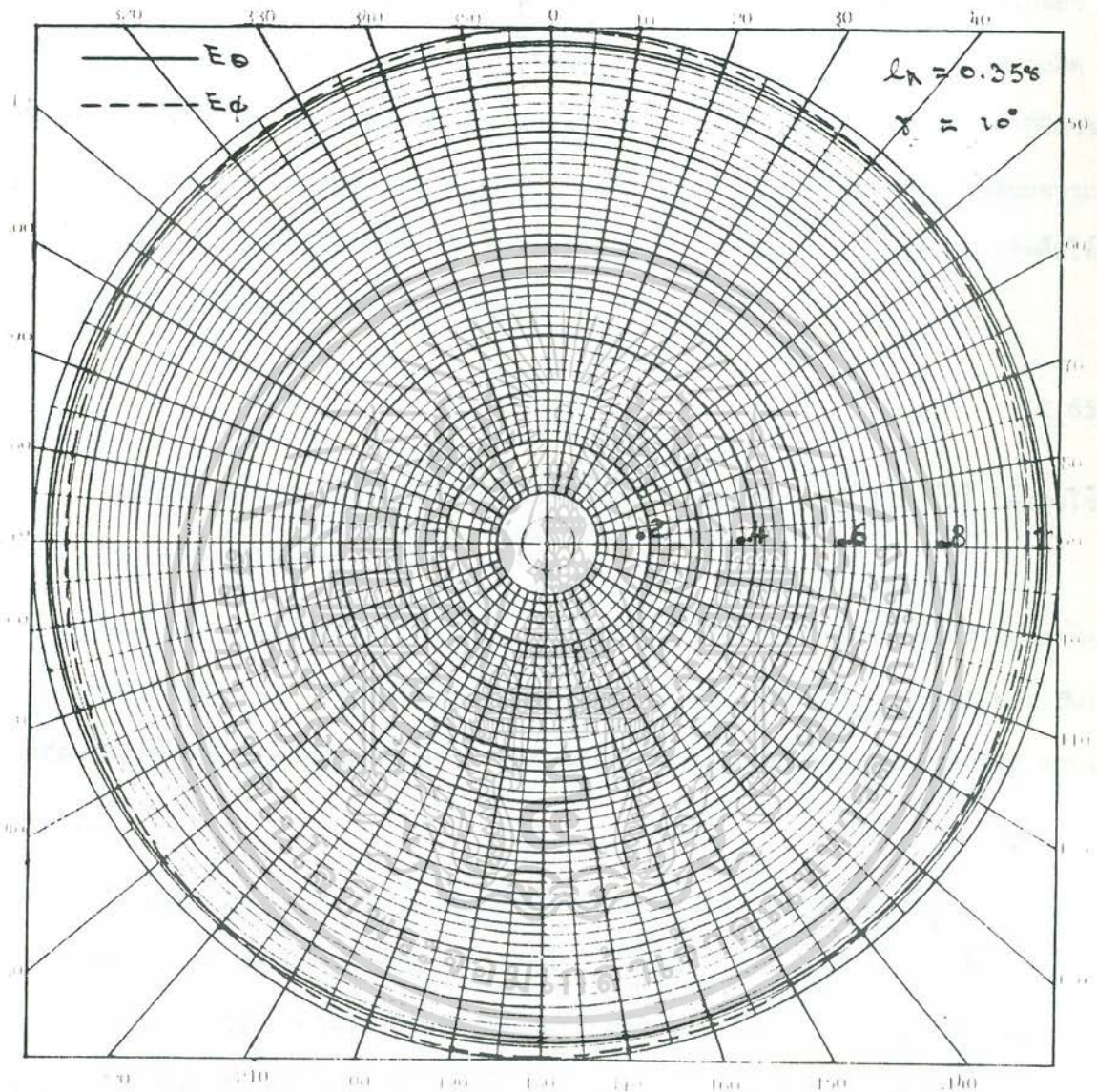


รูปที่ 2.10 ก กระบวนการแผ่คลื่นในระนาบ xz ตามเงื่อนไข
การเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ
เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการแฉงรูปแบบ sinusoidal



รูปที่ 2.10 ข กระสวนการแผ่คลื่นในระนาบ yz ตามเงื่อนไขการเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการ แจงรูปแบบ sinusoidal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ค กระสวนการแผ่คลื่นในระนาบ xy ตามเงื่อนไขการเกิด circular polarization ของสายอากาศเกลียว 1½ รอบ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการ แฉงรูปแบบ sinusoidal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.62), (2.63), และ (2.64) แสดงให้เห็นว่า AR ของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็กในระนาบ xy นั้น เปลี่ยนแปลงตามมุม ϕ แต่ถ้าจัดให้ $2S_\lambda = C_\lambda^2$ แล้ว ความผิดพลาดที่เกิดจากการตัดการเปลี่ยนแปลงตามมุม ϕ ออกไปจะมีค่าไม่เกิน 4% สำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีการแฉงรูปแบบ sinusoidal แต่สำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีการแฉงรูปแบบสม่ำเสมอและแบบสามเหลี่ยม ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีมากกว่า 13% ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่า circular polarization เกิดขึ้นได้ สำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีการแฉงรูปแบบ sinusoidal เมื่อ

$$2S_\lambda = C_\lambda^2 \quad (2.65)$$

สมการ (2.65) เป็นเงื่อนไขเดียวกับที่ Wheeler และ Kraus [1], [2] ได้ระบุไว้แล้วสำหรับสายอากาศเกลียวขนาดเล็กที่มีจำนวนรอบมาก

รูปที่ 2.8, รูปที่ 2.9, รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็กที่มีความยาวรอบเท่ากับ 0.6 และมุมบิด 10 องศา ที่ความถี่ 179.178 MHz อันเป็นความถี่ที่สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากตัวสายอากาศ มีลักษณะเป็นแบบ circular polarization ตามเงื่อนไขสมการ (2.)

เมื่อพิจารณาจากรูปทั้งสาม จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า สนามไฟฟ้าที่ได้จากการลุ่มมุติว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในลวดตัวนำสายอากาศที่มีการแฉงรูปแบบ sinusoidal (รูปที่ 2.10) นั้น มีลักษณะเป็น circular polarization ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของสายอากาศ และเกือบเป็น circular polarization ที่แนวอื่น ส่วนสนามไฟฟ้าที่ได้จากการลุ่มมุติว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในสายอากาศมีการแฉงรูปแบบเป็นแบบสม่ำเสมอ และแบบสามเหลี่ยมนั้น (รูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9) ไม่มีจุดใดที่เป็น circular polarization เลย ความแตกต่างเหล่านี้อาจเป็นเครื่องชี้ให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในลวดตัวนำสายอากาศเกลียวขนาดเล็กควรจะมีการแฉงรูปแบบ sinusoidal หรือเกือบจะเป็น sinusoidal มากกว่าที่จะมีการแฉงรูปแบบสม่ำเสมอหรือแบบสามเหลี่ยม

2.8 ความถี่ของสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก

โดยวิธี induced E.M.F. ค่าความถี่ทางเข้าของสายอากาศเกลียว จะเป็นไปตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.36)

$$Z_{in} = \frac{1}{I_0^2} \int_{-\pi}^{\pi} I_0 E_\rho d\phi - \frac{1}{I_0^2} \int_{-\pi}^{\pi} I_0 \frac{SE_z}{2\pi} d\phi \quad (2.66)$$

ในกรณีของกระแสไฟฟ้าที่มีการแจกแจงเป็นแบบ sinusoidal สมการ (2.66) จะแปรรูปเป็น

$$Z_{in} = \frac{1}{I_0^2} \int_{-\pi}^0 I_0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\phi}{2\pi} \right] \rho E_\phi d\phi + \frac{1}{I_0^2} \int_0^{\pi} I_0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\phi}{2\pi} \right] \rho E_\phi d\phi - \frac{1}{I_0^2} \int_{-\pi}^0 I_0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\phi}{2\pi} \right] \frac{SE_z}{2\pi} d\phi - \frac{1}{I_0^2} \int_0^{\pi} I_0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\phi}{2\pi} \right] \frac{SE_z}{2\pi} d\phi \quad (2.67)$$

องค์ประกอบสนามไฟฟ้า E_ϕ และ E_z มีสมการดังนี้

$$\text{Re} \left[E_\phi \right] = \frac{2I_0}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] B \cos(\phi - \alpha) d\alpha - \frac{I_0}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] D M d\alpha \quad (2.68)$$

$$\text{Im} \left[E_\phi \right] = \frac{2I_0}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] F \cos(\phi - \alpha) d\alpha - \frac{I_0}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] L M d\alpha \quad (2.69)$$

$$\text{Re} \left[E_z \right] = \frac{2I_0}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] \frac{B \cdot S}{2\pi} d\alpha$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{I_0}{4\pi\omega\epsilon} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] DN d\alpha \quad (2.70)$$

$$\text{Im}|E_z| = -\frac{2I_0}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] \cdot \frac{FS}{2\pi} d\alpha$$

$$-\frac{I_0}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\int_{-\pi}^0 \sin\beta \left[\frac{L}{2} + \frac{l\alpha}{2\pi} \right] + \int_0^{\pi} \sin\beta \left[\frac{L}{2} - \frac{l\alpha}{2\pi} \right] \right] L \cdot N d\alpha \quad (2.71)$$

$$B = \frac{\sin(\beta R)}{R^3} - \frac{\beta \cos(\beta R)}{R^2} \quad (2.72)$$

$$D = \frac{\beta^2 \sin(\beta R)}{R^3} + \frac{3\beta \cos(\beta R)}{R^4} - \frac{3\sin(\beta R)}{R^5} \quad (2.73)$$

$$F = \frac{\beta \sin(\beta R)}{R^2} + \frac{\cos(\beta R)}{R^3} \quad (2.74)$$

$$L = \frac{\beta^2 \cos(\beta R)}{R^3} - \frac{3\beta \sin(\beta R)}{R^4} - \frac{3\cos(\beta R)}{R^5} \quad (2.75)$$

$$M = \frac{aS(2\pi z - S\alpha)\sin(\phi - \alpha)}{4\pi^2} - \frac{a(2\pi z - S\alpha)^2 \cos(\phi - \alpha)}{4\pi^2} - a[\rho + a\cos(\phi - \alpha)] [a + \rho \cos(\phi - \alpha)] \quad (2.76)$$

$$N = \frac{S}{2\pi} \left[\rho^2 + a^2 + 2a\rho \cos(\phi - \alpha) \right] + \frac{a\rho(2\pi z - S\alpha)\sin(\phi - \alpha)}{2\pi} \quad (2.77)$$

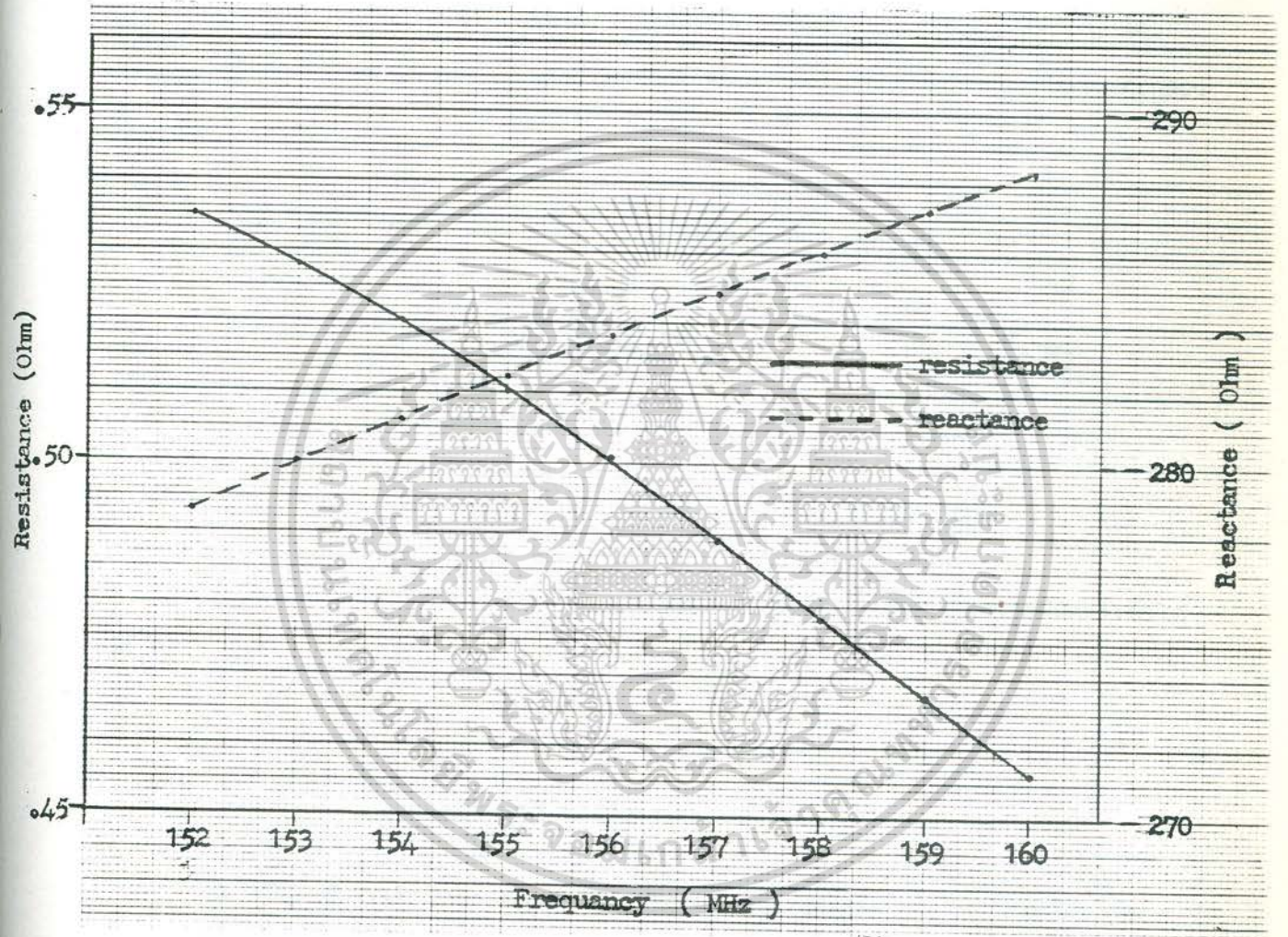
ลัมการ (2.67) นั้น ยุ่งยากต่อการอินทิเกรตมาก จึงได้เลือกใช้วิธีคำนวณด้วย HP-85

ไมโครคอมพิวเตอร์ ผลจากการคำนวณด้วยวิธีนี้ สำหรับสายอากาศเกสยาว $1 \frac{1}{2}$ รอบที่มีความยาวรอบ 0.6

ม. และมุม 0 ถึง 10 องศา ในย่านความถี่ 150 MHz ถึงความถี่ 160 MHz นั้น ปรากฏผลว่า radiation

ไม่วากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resistance อยู่ระหว่าง 0.535 Ω ถึง 0.439 Ω ส่วน reaction มีค่าระหว่าง -278.7 Ω ถึง -290.66 Ω รูปที่ 2.11 แสดงผลการคำนวณดังกล่าว



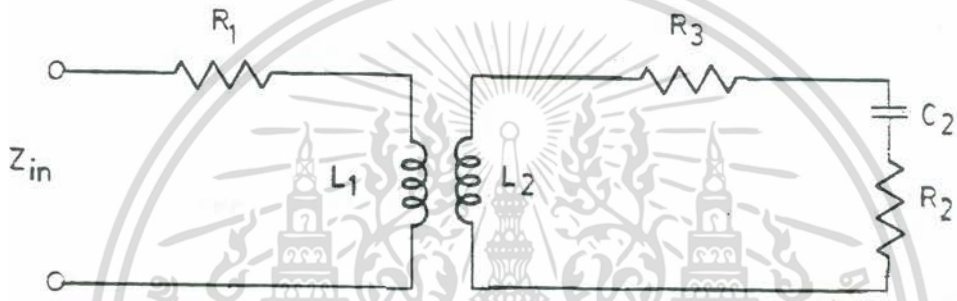
รูปที่ 2.11 ผลการคำนวณความถี่ของสายอากาศเกลียว

$\frac{1}{2}$ รอบที่ความถี่ 152 MHz ถึง 160 MHz

2.9 Transformer model ของสายอากาศเกลียว

เมื่อใช้สายอากาศห้วงขนาดเล็กในการ coupling กำลังงานวิทยุให้กับสายอากาศเกลียว สายอากาศทั้งระบบจะมีความคล้ายกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป ในการวิเคราะห์เบื้องต้นของสายอากาศระบบนี้ จะประมาณว่า สายอากาศทั้งระบบทำงานประหนึ่งหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีวงจรเคเบิลไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย R_1 และ R_3 เป็นความต้านทานที่เกิดจากวัสดุที่ใช้สร้าง ลายอากาศ L_1 เป็นค่าเหนี่ยวนำเฉพาะตัวของลายอากาศห้วง ในกรณีนี้เราได้ตัดค่า radiation resistance ของลายอากาศห้วงออก เนื่องจากมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ reactance [3] L_2, C_2 และ R_2 เป็นค่าเหนี่ยวนำเฉพาะตัว, ค่าความจุและค่าความต้านทานการแผ่คลื่นของลายอากาศเกลียว ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 วงจรเทียบเท่าของระบบลายอากาศเกลียว

เมื่อวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 2.12 จะได้สมการแสดงคุณลักษณะของค่าความผันทางเข้าได้

ดังนี้ [4]

$$Z_{in} = R_1 + iX_{L1} + \frac{k^2 X_{L1} X_{L2}}{R_2 + R_3 + i(X_{L2} + X_{C2})} \quad (2.78)$$

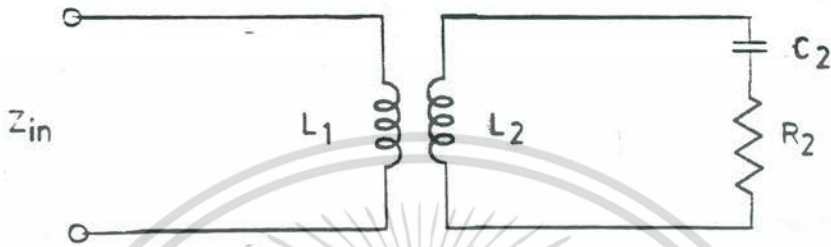
k เป็นค่าสัมประสิทธิ์การ coupling ของลายอากาศห้วงและลายอากาศเกลียว โดย

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

สำหรับค่า X_{C2} และ X_L นั้น คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [3], [6]

$$X_{C2} = -30 \left[\sin(\beta m S) \left[-\gamma + \ln(mS/28a^2) + 2Ci(\beta m S) - Ci(2\beta m S) \right] - \cos(\beta m S) \left[2Si(\beta m S) - Si(2\beta m S) \right] - 2Si(\beta m S) \right] \quad (2.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ [ln(16a/d)-2] เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า (2.80) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 วงจรเทียบเท่าของระบบสายอากาศเกลียว

เมื่อไม่คิดความสูญเสียเนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ

โดยทั่วไป R_1 และ R_3 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ ในวงจร ดังนั้นในการคำนวณจึงตัดออกได้ และถ้าสามารถเขียนวงจรใหม่ได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งอาจเขียนสมการค่าความผิทางเข้าได้เป็น

$$Z_{in} = \frac{k^2 X_{L1} X_{L2} R_2}{R_2^2 + (X_{L2} + X_{C2})^2} + iX_{L1} \left[1 - \frac{k^2 X_{L1} (X_{L2} + X_{C2})}{R_2^2 + (X_{L2} + X_{C2})^2} \right] \quad (2.81)$$

สมการที่ได้นี้ แม้จะเป็นสมการแสดงค่าความผิทางเข้าโดยประมาณของระบบสายอากาศ แต่ก็แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า สายอากาศห้วงวงกลมขนาดเล็กที่ใช้ coupling พลังงานวิทยุให้กับสายอากาศเกลียว มีผลทำให้ค่าความผิส่วนที่เป็นค่าจริงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็เปิดโอกาสให้สามารถขจัดส่วนที่เป็นค่าเสมือนออกได้ง่าย

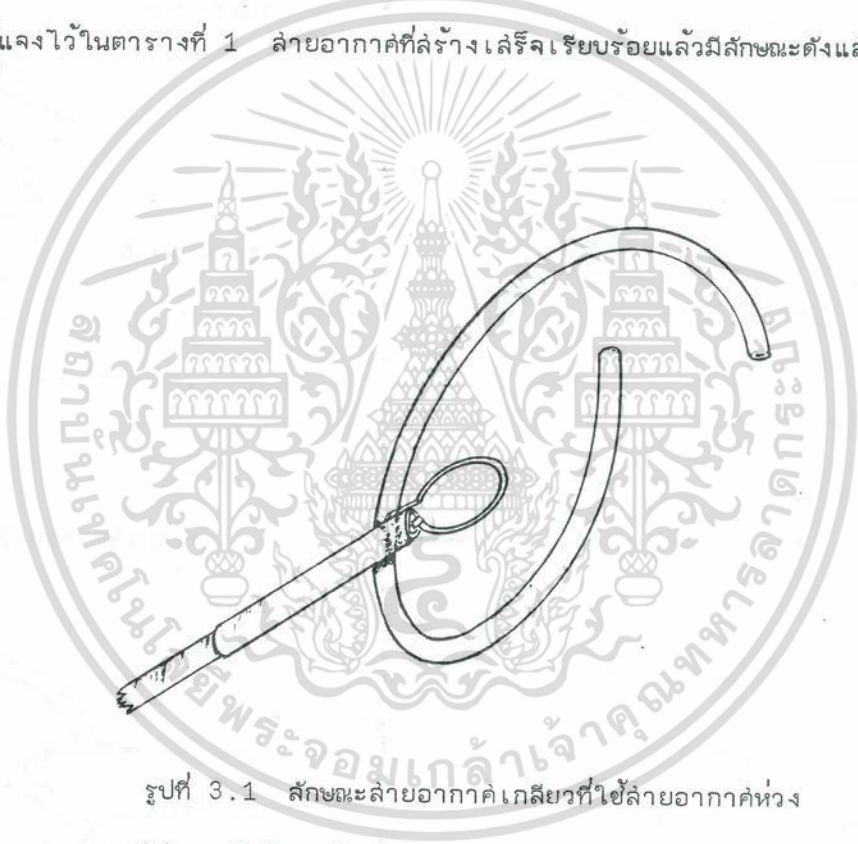
เมื่อวิเคราะห์สมการที่ 2.81 โดยละเอียดจะได้ผลสรุปว่า ค่าความผิทางเข้าของระบบสายอากาศ สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับขนาดของสายอากาศห้วง (เปลี่ยนค่า X_{L1}) หรือปรับความยาวของสายอากาศเกลียว (เปลี่ยนค่า X_{L2} , X_{C2} และ R_2) ถ้ากำหนดให้สายอากาศเกลียวมีความยาวคงที่ และปรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศห้วงให้โตขึ้น ค่าจริงและค่าเสมือนของค่าความผิจะสูงขึ้นตาม แต่ไม่สามารขจัดค่าเสมือนออกได้หมด ดังนั้นจึงไม่สามารปรับให้นำ $match$ กับสายส่งขนาด 50 วัตต์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ ในทางกลับกัน หากกำหนดให้ขนาดของสายอากาศห้วงคงที่ และปรับความยาวของสายอากาศเกลียว ให้เปลี่ยนไป ค่าความผิดก็เปลี่ยนไปด้วย วิธีการนี้อาจสามารถหาค่า เล่มือนของค่าความผิดทาง เข้าออก ได้หมด แต่ค่าจริงอาจไม่เท่ากับค่าความผิดจำเพาะของสายส่ง ดังนั้น วิธีการปรับลูนสายอากาศจึงต้อง ปรับทั้งขนาดของสายอากาศห้วงและความยาวของสายอากาศเกลียว

2.10 สรุป

ผลการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการแจกแจงของกระแสไฟฟ้าทั้งสามแบบ มีแนวโน้มที่ แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายอากาศควรจะมีการแจกแจงแบบ sinusoidal มากกว่าแบบ ลมฟ้าเล่มมอ อย่างไรก็ตามการแจกแจงของกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบใดนั้น ยังยืนยันแน่นอนลงไปไม่ได้ จนกว่าจะ ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับ transformer model ของสายอากาศเกลียวนั้น แสดงให้ เห็นถึงแนวทางในการปรับค่าความผิดของสายอากาศเกลียว เพื่อการ matching ได้เป็นอย่างดี แม้ว่า วงจรเทียบเท่าจะเป็นวงจรที่ใช้ในกรณีความถี่ต่ำก็ตาม ทฤษฎีที่นำเสนอนี้ ได้นำไปใช้ประโยชน์ในการ ออกแบบสายอากาศสำหรับงานวิทยุกระจายเสียง ซึ่งนำเสนอนี้แล้วในบทต่อไป

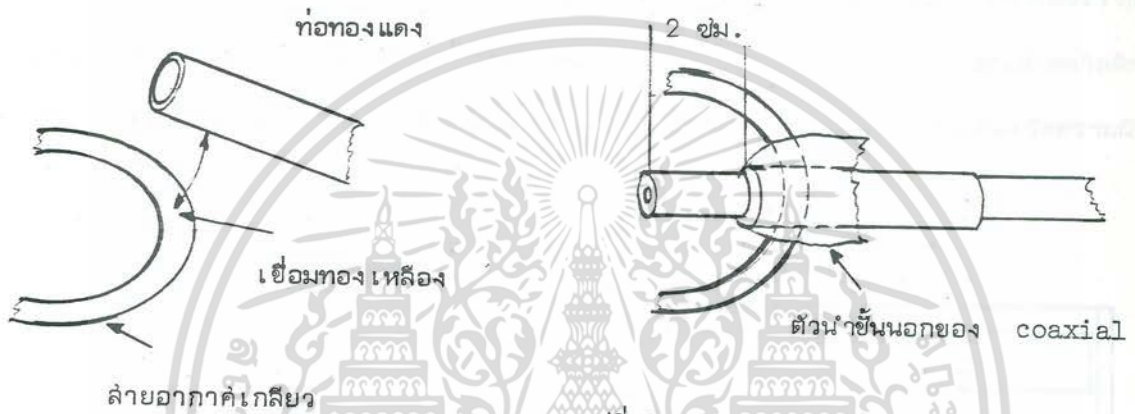
สายอากาศเกลียวที่ออกแบบนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นสายอากาศห่อ ซึ่งทำหน้าที่ coupling กำลังงานวิทยุให้กับสายอากาศเกลียว และส่วนที่เป็นสายอากาศเกลียว ซึ่งทำหน้าที่ในการรับหรือแผ่กำลังงานวิทยุ ส่วนที่เป็นสายอากาศห่อนั้น สร้างโดยการตัดท่อทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 ซม. ให้เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตามที่แจงไว้ในตารางที่ 1 ส่วนสายอากาศเกลียวนั้น ทำจากท่อทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ซม. หนา 0.2 ซม. ตัดให้เป็นสายอากาศเกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบ ตามขนาดที่แจงไว้ในตารางที่ 1 สายอากาศที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะสายอากาศเกลียวที่ใช้สายอากาศห่อ coupling กำลังงานวิทยุ

ในการประกอบสายอากาศห่อให้ติดกับสายอากาศเกลียวนั้น ทำได้โดยการใช้ท่อทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.1 ซม. ยาว 7 ซม. วางพาดสายอากาศเกลียวที่จุดกึ่งกลางความยาวสายอากาศและเชื่อมให้ติดแน่นด้วยการเชื่อมทองเหลือง จากนั้นจึงร้อยสาย coaxial ผ่านท่อทองแดงให้โผล่พ้นปลายท่อประมาณ 2.0 ซม. ลอกพลาสติกที่หุ้ม coaxial ออก แล้วปลิ้น outer conductor ที่ล่านกันเป็นร่างแห กลับไปแนบติดกับผิวนอกของท่อทองแดงและบัดกรีให้ติดสนิท จากนั้นจึงปกคลุมวนที่หุ้ม inner conductor ของ coaxial ออก สอด inner conductor นี้เข้าไปในปลายข้างหนึ่ง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายอากาศห้วง แล้วบัดกรีให้ติดสนิท ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของสายอากาศห้วงนั้นบัดกรีให้ติดกับท่อทองแดง ขั้นตอนการสร้างสายอากาศเกลียวตามที่บรรยายไว้นี้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ข ตัดปลอกหุ้ม coaxial ออก 2 ซม.

แล้วปลิ้นตัวนำชั้นนอกแนบติดกับท่อทองแดงและบัดกรีให้ให้ติดสนิท

รูปที่ 3.2 ก ติดท่อทองแดงเข้ากับตัวสายอากาศเกลียว



รูปที่ 3.2 ค ปอกฉนวนนอก

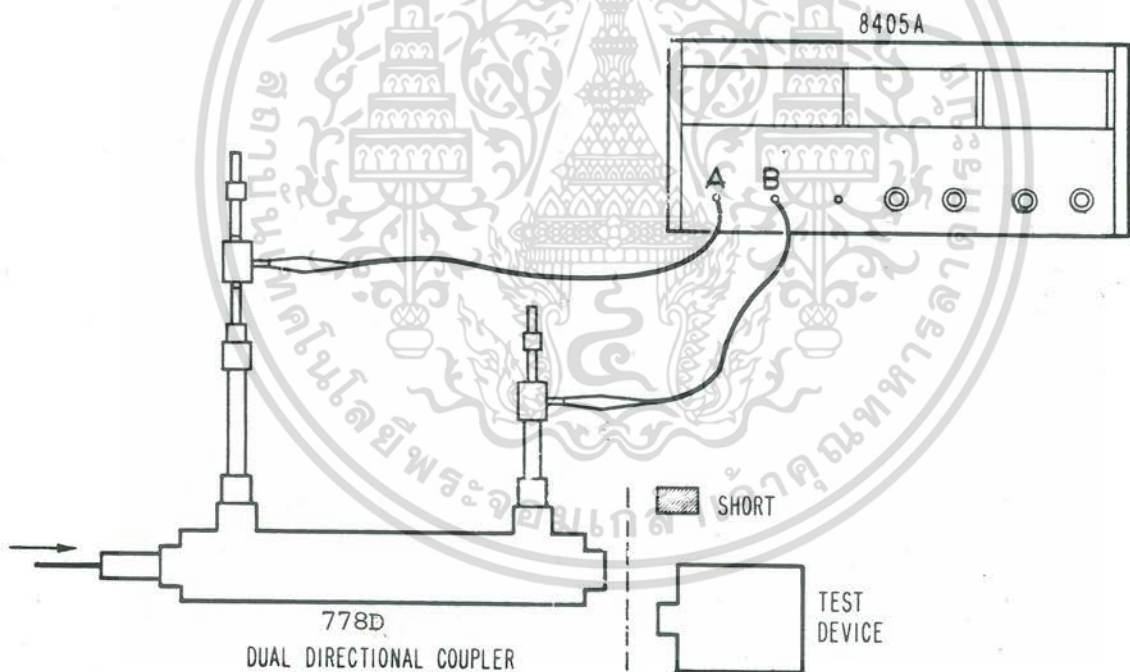
รูปที่ 3.2 ง ติดสายอากาศห้วงเข้ากับ coaxial

รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนในการสร้างสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบ

ที่ใช้สายอากาศห้วง coupling กาสังงานวิทยุ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวัดค่าความผันของสายอากาศเกลียว 1 $\frac{1}{2}$ รอบ

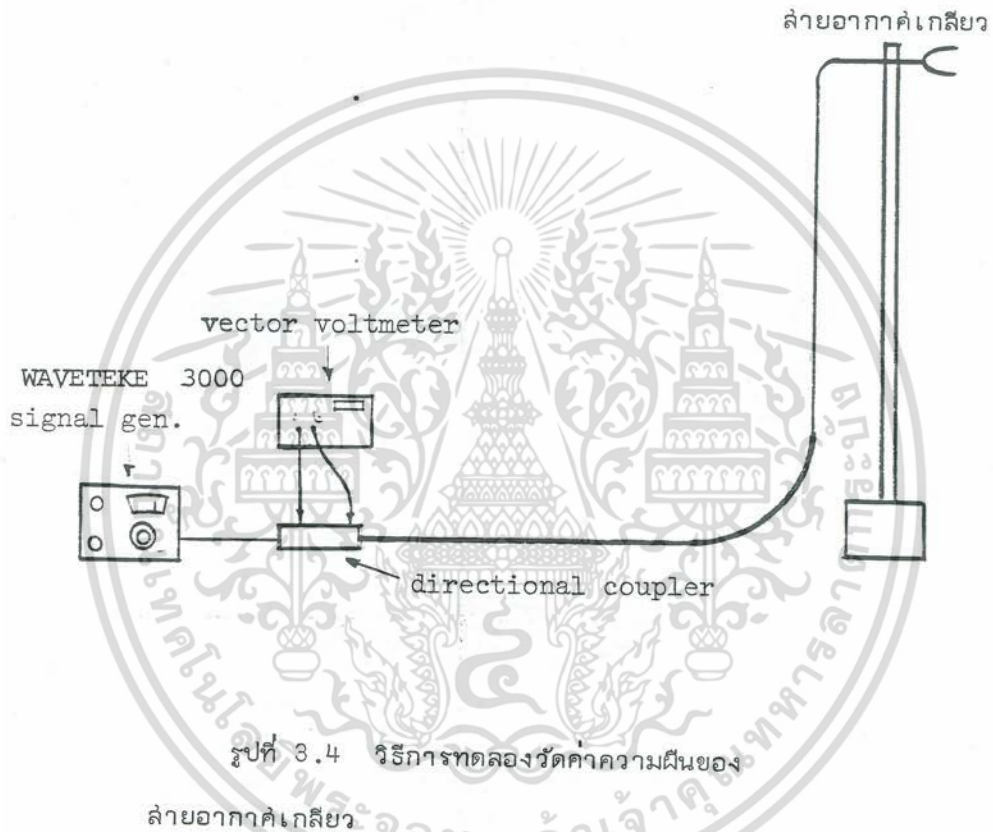
การวัดค่าความผันของสายอากาศเกลียวนั้น สามารถกระทำได้โดยใช้ vector voltmeter ประกอบกับ directional coupler รูปที่ 3.3 แสดงวิธีวัด vector voltmeter และ directional coupler สำหรับวัดค่าความผันของสายอากาศเกลียว ส่วนรูปที่ 3.4 แสดงวิธีการทดลองวัดค่าความผันของสายอากาศเกลียวด้วยเครื่องมือดังกล่าว การวัดค่าความผันกระทำในบริเวณที่โล่งที่ไม่มีวัตถุตัวนำในรัศมี 6 เมตรจากตัวสายอากาศ ตัวสายอากาศเกลียวติดไว้บนยอดเสาพลาสต์ติคสูงจากพื้นดิน 2 เมตร และอยู่ห่างจากเครื่องมือวัดในแนวราบประมาณ 4 เมตร การทดลองวัดความผัน



รูปที่ 3.3 การวัด vector voltmeter ประกอบกับ directional coupler เพื่อวัดค่าความผันของสายอากาศเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายอากาศในสภาพตั้งกล่าวข้างต้น แม้ว่าจะไม่สามารถขจัดการคับปลิงระหว่างสายอากาศกับวัตถุ
ตัวนำที่อยู่ในบริเวณข้างเคียงให้หมดไป แต่ก็สามารถลดการคับปลิงให้น้อยลงจนไม่ทำให้ผลการวัดผิดพลาด
มากจนเกินไป



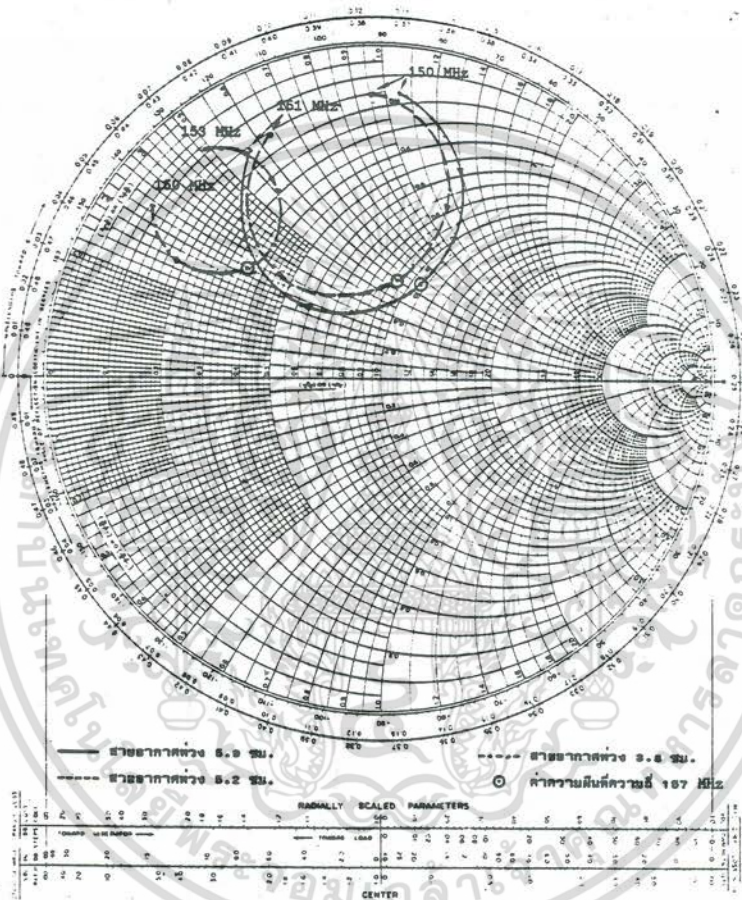
สายอากาศเคสลิยวที่ใช้ทดสอบวัดค่าความผิดนั้น เป็นสายอากาศเคสลิยว $1 \frac{1}{2}$ รอบที่มีความยาว
1 รอบ เท่ากับ 0.6 ม. มีมุมบิด 10 องศา และทดสอบด้วยการเปลี่ยนสายอากาศหุ้มให้มีความถี่
กลาง 3.8, 5.2 และ 5.9 ซม. ตามลำดับ การวัดกระทำในช่วงความถี่ตั้งแต่ 150 MHz ถึง 160
MHz ข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้นำมาเขียนเป็นกราฟใน smith chart ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SMITH CHART

TITLE ท้าความถี่สายอากาศเกลียว 10' 0.6 ม.

2 เมษายน 2526



รูปที่ 3.5 ผลการทดลองวัดค่าความถี่ของสายอากาศ

เกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบที่มีมบิต 10 องศา ความยาวรอบ 0.6 ม.

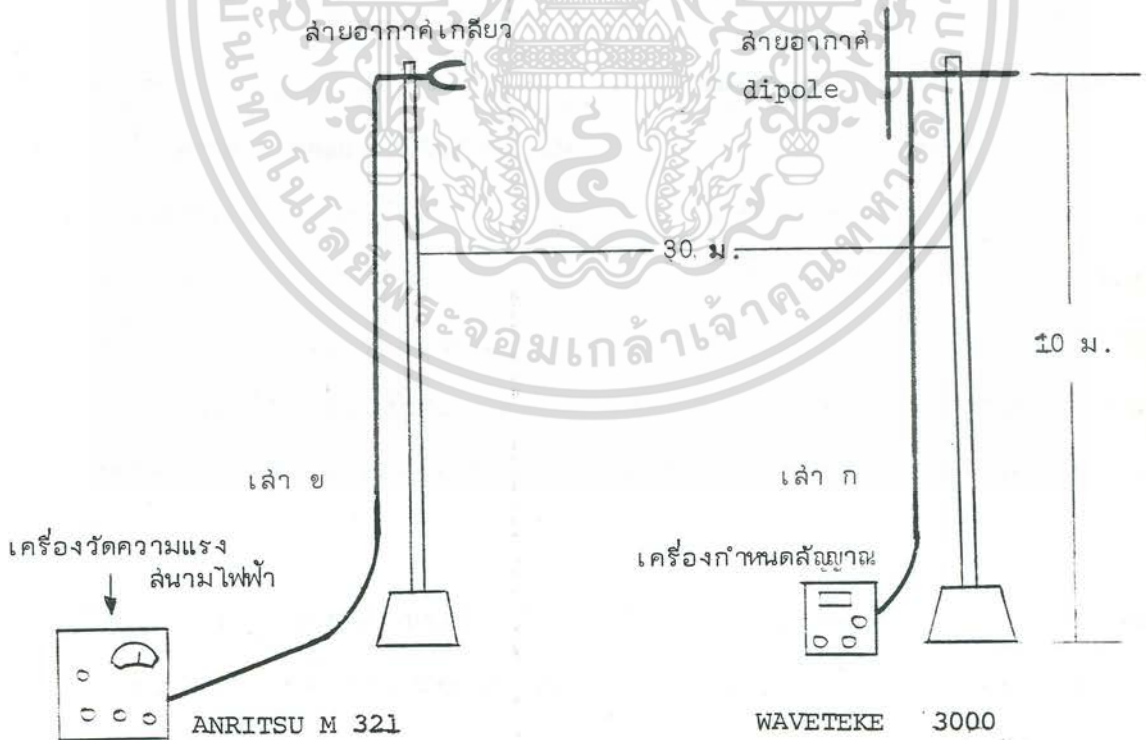
จากการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่า ความถี่ใดในช่วงความถี่ที่ทำการวัดทดลอง เช่น ที่ความถี่ 157 MHz เมื่อขนาดสายอากาศห้วงเปลี่ยนไป ค่าจริงจะเพิ่มขึ้นตามลำดับเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศห้วง ส่วนค่าเสมือนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่าจริงมาก ในทางกลับกัน ถ้าเราพิจารณากำหนดให้สายอากาศห้วงมีค่าคงที่และเปลี่ยนความถี่ ในกรณีเช่นนี้ถือได้ประหนึ่งว่า เราเปลี่ยนทั้งขนาดของสายอากาศห้วงและความยาวของสายอากาศเกลียวไปพร้อมกัน จะเห็นได้ว่าค่าจริงเปลี่ยนไปเล็กน้อย ส่วนค่าเสมือนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนค่าไปได้อย่างมาก ดังนั้นจึงแสดงว่าการเปลี่ยนความยาวของสายอากาศเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลียว มีผลอย่างมากต่อการปรับค่าความถี่ของสายอากาศ ถ้าหากเลือกใช้สายอากาศห้วงที่มีขนาดพอเหมาะ เราก็สามารถปรับค่าความถี่ของสายอากาศให้เป็นค่าจริงได้ โดยการปรับความยาวของสายอากาศเกลียว

3.4 การวัดทดสอบการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว

การจัดเครื่องมือเพื่อวัดทดสอบคุณลักษณะการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว มีลักษณะดังแสดง

ไว้ในรูปที่ 3.6 ตามรูปสายอากาศเกลียวที่ติดไว้บนยอดเสา ข นั้น ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับสัญญาณวิทยุที่ส่งมาจากสายอากาศ dipole ซึ่งติดอยู่บนยอดเสา ก สัญญาณไฟฟ้าที่สายอากาศเกลียวรับได้ จะถูกส่งไปตามสาย coaxial ที่มีความถี่จำเพาะ 50 Ω ไปเข้าเครื่องวัดความแรงส่งนามไฟฟ้า ซึ่งวางอยู่ห่างจากโคนเสา ข ประมาณ 10 เมตร ในขณะที่การวัดสายอากาศเกลียวและสายอากาศ dipole อยู่สูงจากพื้นดิน 9 เมตร เสา ก และเสา ข วางห่างกันประมาณ 30 เมตร



รูปที่ 3.6 การจัดเครื่องมือเพื่อวัดการแผ่คลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นนั้น มีลักษณะแตกต่างไปจากสายอากาศเกลียวขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ดังนั้น ในการวัดเพื่อศึกษากระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว จึงจำเป็นต้องหาวิธีเปลี่ยนขนาดของสายอากาศเกลียวให้เปลี่ยนจากสายอากาศเกลียวขนาดเล็กไปเป็นสายอากาศเกลียวขนาดใหญ่ วิธีที่ใช้ทดลองนั้น กระทำโดยการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณวิทยุ จากความถี่ต่ำไปเป็นความถี่สูง โดยใช้ความถี่วิทยุในช่วง 85 - 220 MHz โดยวิธีการนี้ ทำให้สามารถศึกษาการเปลี่ยนลักษณะของกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียวเมื่อสายอากาศเกลียวมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ไปจนกระทั่งสายอากาศเกลียวมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ในการวัดทดลองกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศแต่ละความถี่นั้น เราทำการวัดทั้ง E-plane และ H-plane และทำการวัดโดยการหมุนสายอากาศเกลียวครั้งละ 10 องศา จนครบ 360 องศา

3.5 ผลการวัดกระบวนการแผ่คลื่น

ผลการทดลองวัดกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว 2 ชุด แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 จนถึงรูปที่ 3.38 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศเกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบ เมื่อมีความยาวรอบน้อยกว่า 0.48 เท่าของความยาวคลื่นนั้น สายอากาศจะแผ่คลื่นในลักษณะที่มีความเข้มมากที่สุดใ้ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของสายอากาศ โดยมีกระบวนการแผ่คลื่นเกือบเป็นวงกลม และมีความเข้มน้อยที่สุดในแนวแกนของสายอากาศ ในระนาบที่ตัดผ่านแนวแกนของสายอากาศกระบวนการแผ่คลื่นจะเป็นรูปโดนัท แต่เมื่อความยาว 1 รอบของสายอากาศมากกว่า 0.48 เท่าของความยาวคลื่น กระบวนการแผ่คลื่นก็เริ่มเปลี่ยนไปจากรูปโดนัท จนเมื่อความยาว 1 รอบของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่น กระบวนการแผ่คลื่นก็จะเปลี่ยนไปในลักษณะที่มีความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุดใ้ในแนวแกนของสายอากาศ และมีความเข้มต่ำสุดใ้ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของสายอากาศ

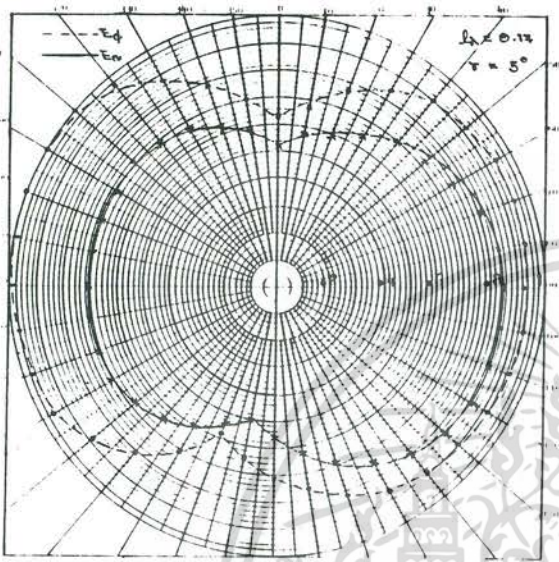
เมื่อความยาว 1 รอบของสายอากาศมีค่าน้อยกว่า 0.48 เท่าของความยาวคลื่นนั้น เราจะถือว่าสายอากาศมีขนาดเล็ก สายอากาศที่มีขนาดในช่วงดังกล่าว เหมาะสมต่อการใช้เป็นสายอากาศกระจายเสียง ระบบ FM เนื่องจากสายอากาศจะให้กระบวนการแผ่คลื่นเป็นรูปโดนัท ส่วนเมื่อความยาว 1 รอบของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่น เราจะถือว่าสายอากาศมีขนาดใหญ่ ซึ่งจากลักษณะกระบวนการแผ่คลื่น แสดงว่าสายอากาศขนาดนี้มีประโยชน์ในการใช้เป็นสายอากาศติดตั้งระหว่างคู่สถานีวิทยุสื่อสารในชั้นบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ เพราะชั้นบรรยากาศชั้นนี้ มีชั้นสูงประมาณ 10 กิโลเมตร ซึ่งมีความหนาแน่นของโมเลกุลอากาศไม่มากนัก ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 - รูปที่ 3.38

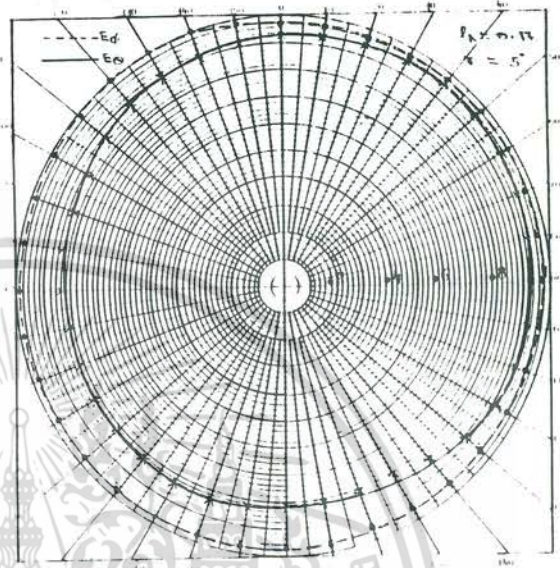
ผลการวัดกระบวนการแผ่คลื่นของลำยอากาศเคลื่อน $1 \frac{1}{2}$ รอบ

รูป ก เป็นกระบวนการแผ่คลื่นที่วัดในระนาบตัดผ่านแนวแกนลำยอากาศ (ระนาบ yz ในรูปที่ 2.2)

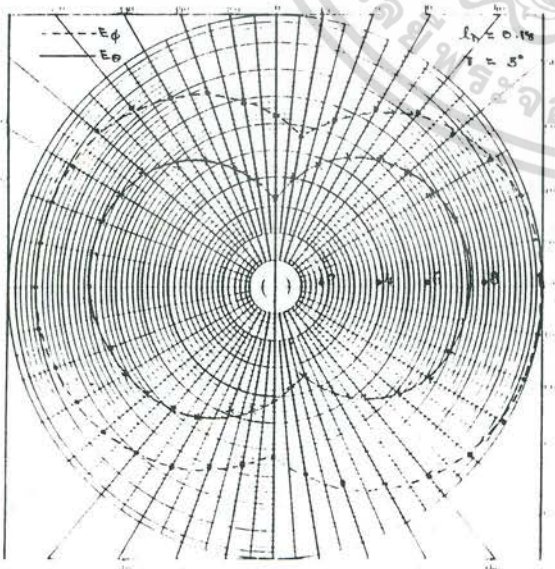
รูป ข เป็นกระบวนการแผ่คลื่นที่วัดในระนาบตัดตั้งฉากกับแนวแกนลำยอากาศ (ระนาบ xy ในรูปที่ 2.2)



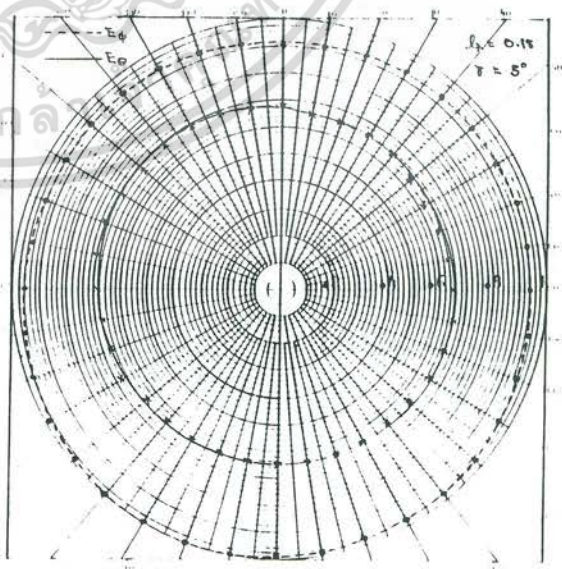
รูปที่ 3.7 ก



รูปที่ 3.7 ข

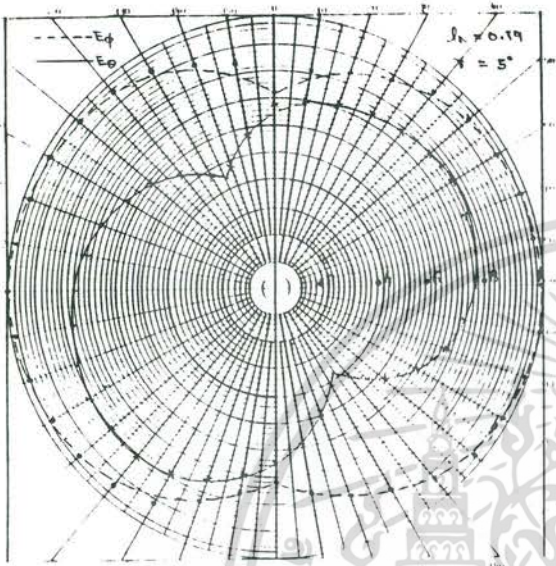


รูปที่ 3.8 ก

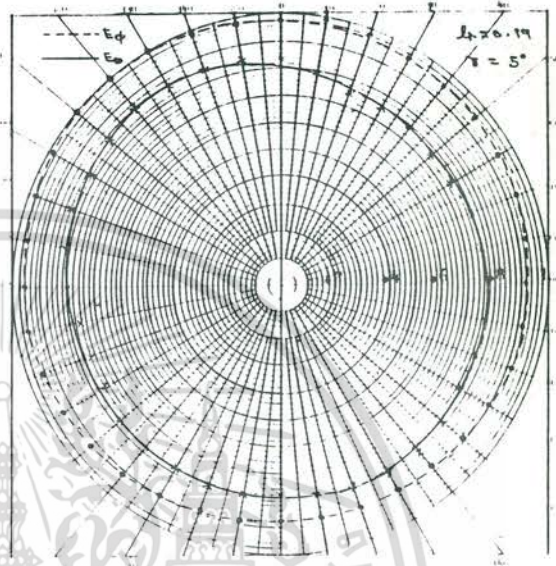


รูปที่ 3.8 ข

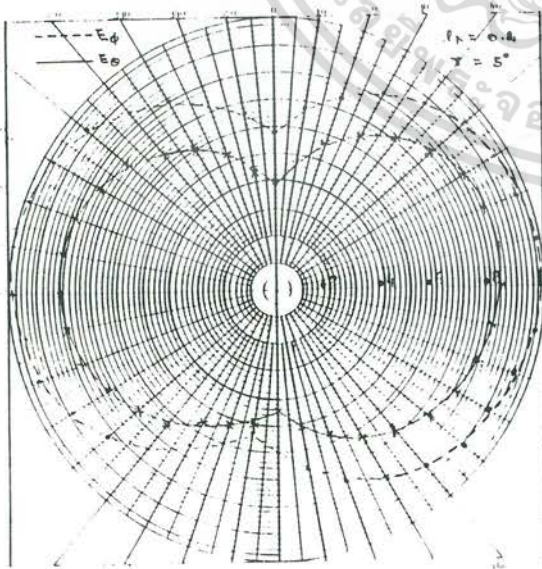
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



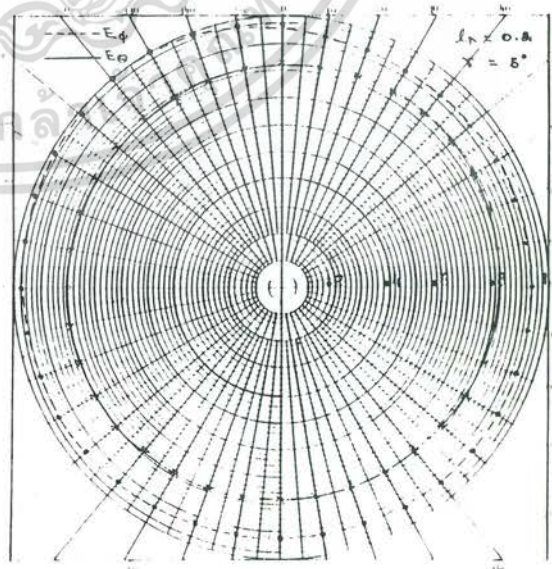
รูปที่ 3.9 ก



รูปที่ 3.9 ข

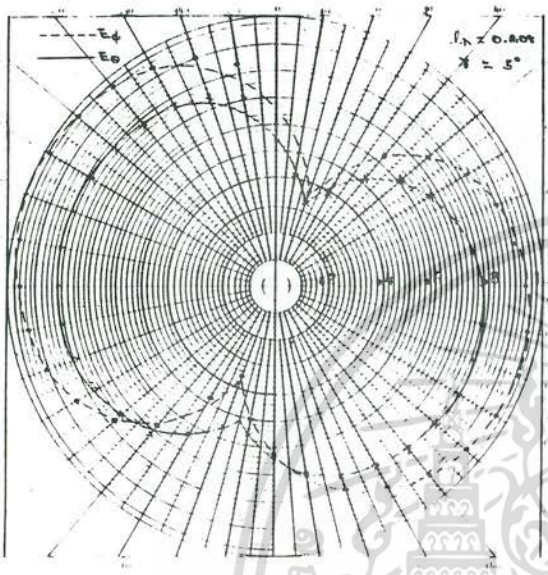


รูปที่ 3.10 ก

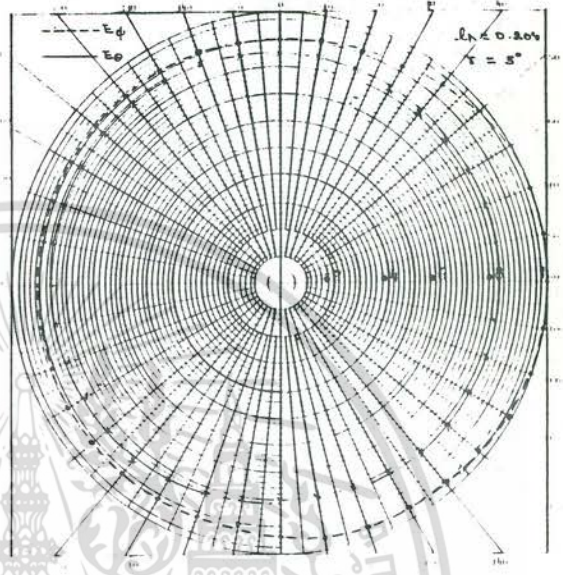


รูปที่ 3.10 ข

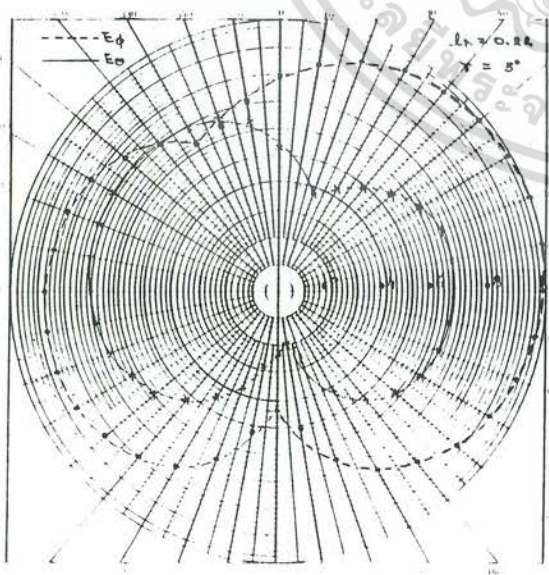
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



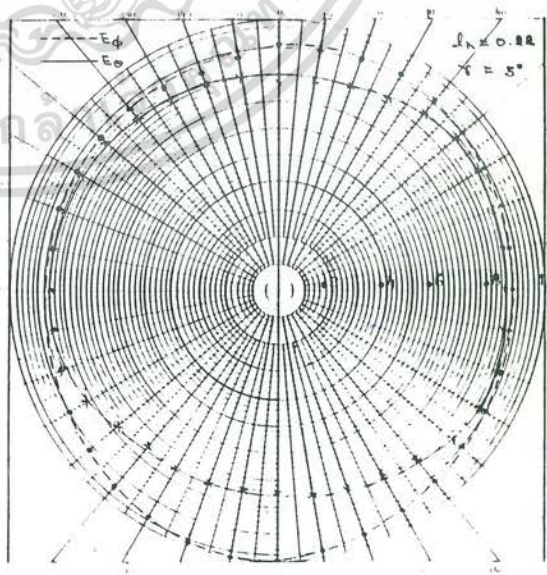
รูปที่ 3.11 ก



รูปที่ 3.11 ข

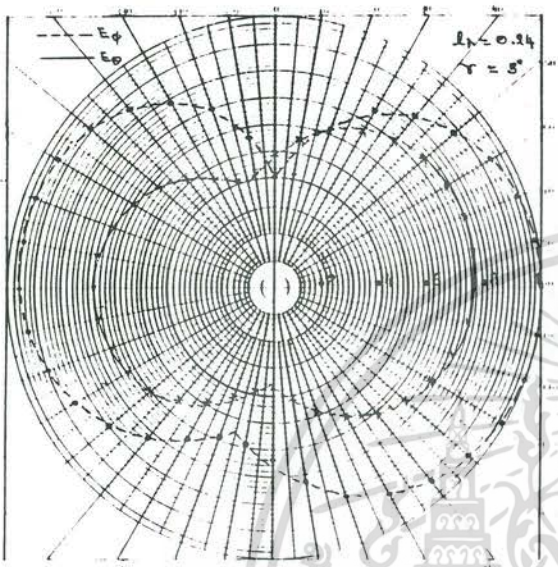


รูปที่ 3.12 ก

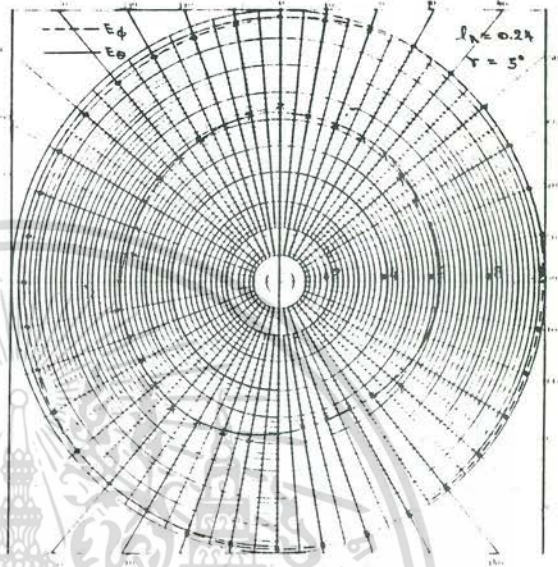


รูปที่ 3.12 ข

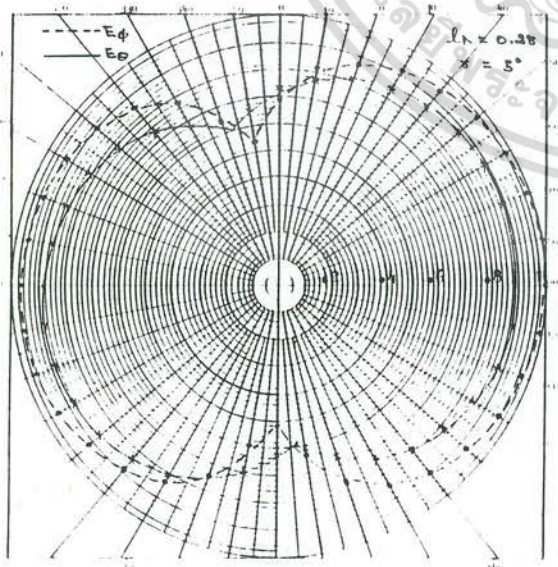
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



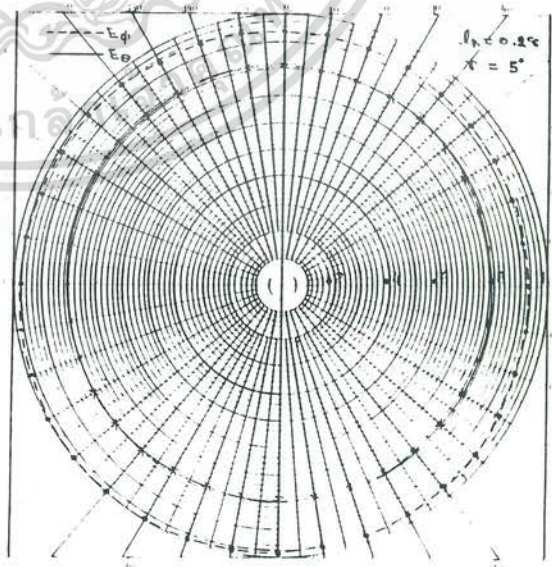
รูปที่ 3.13 ก



รูปที่ 3.13 ข

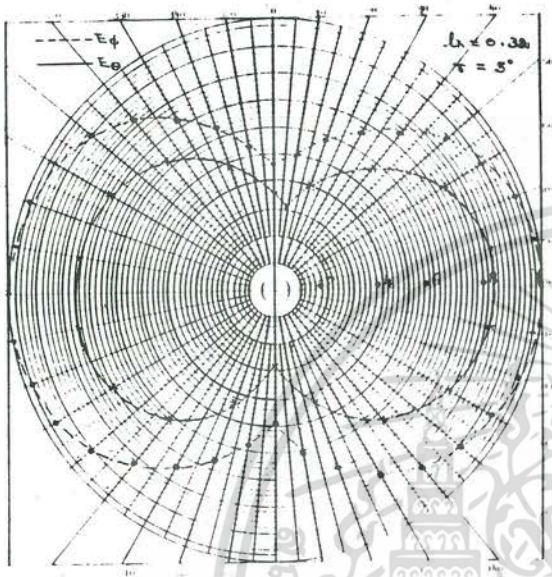


รูปที่ 3.14 ก

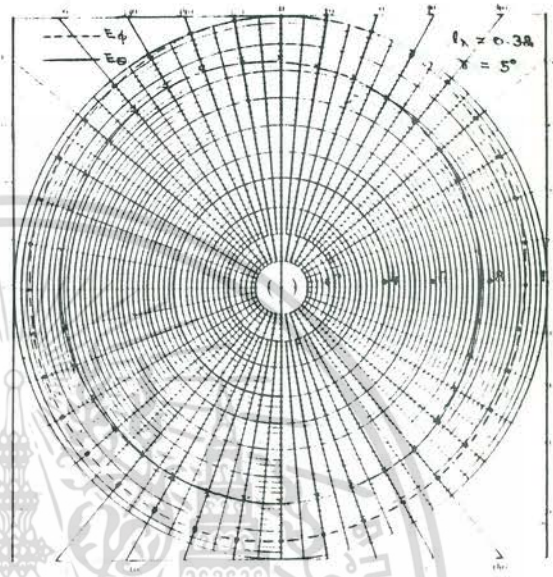


รูปที่ 3.14 ข

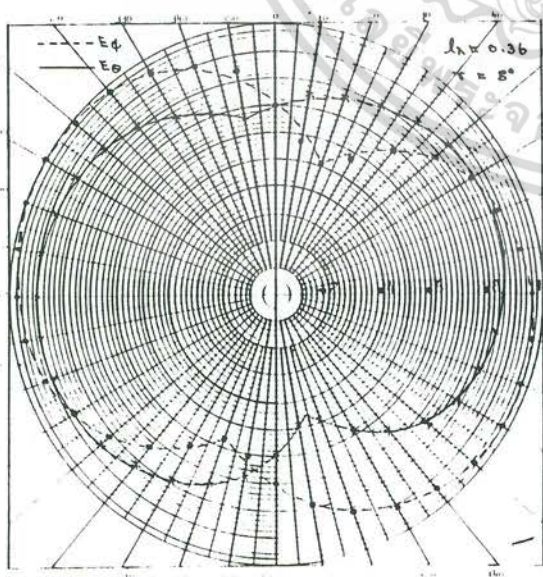
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



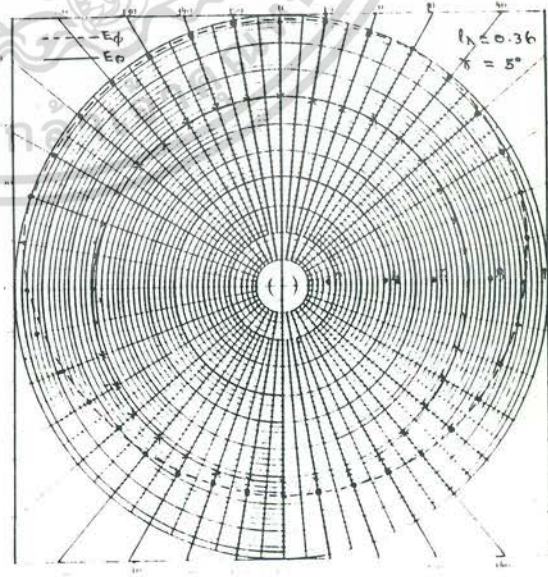
รูปที่ 3.15 ก



รูปที่ 3.15 ข

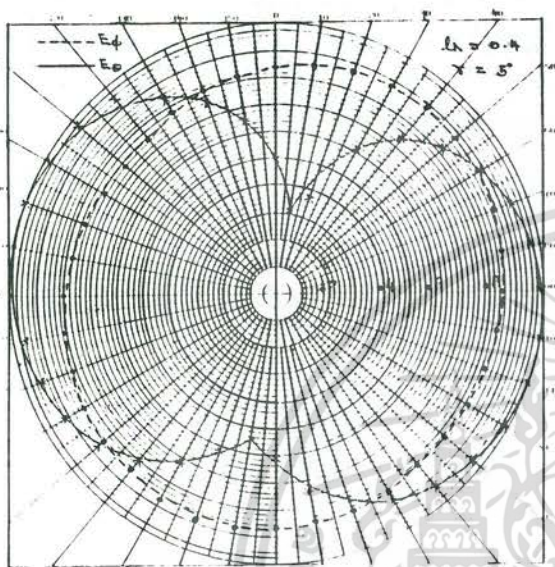


รูปที่ 3.16 ก

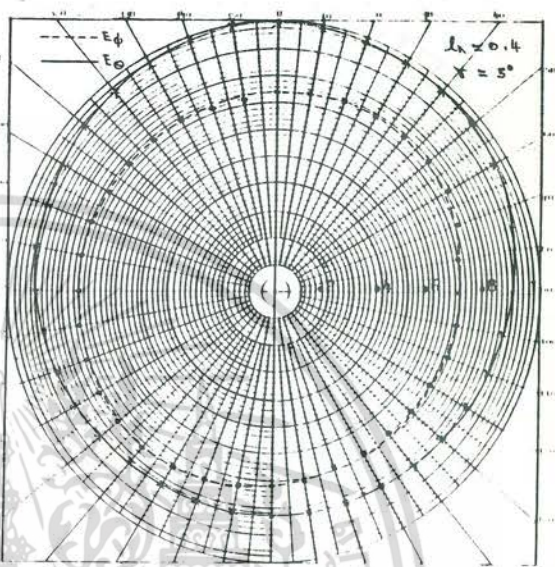


รูปที่ 3.16 ข

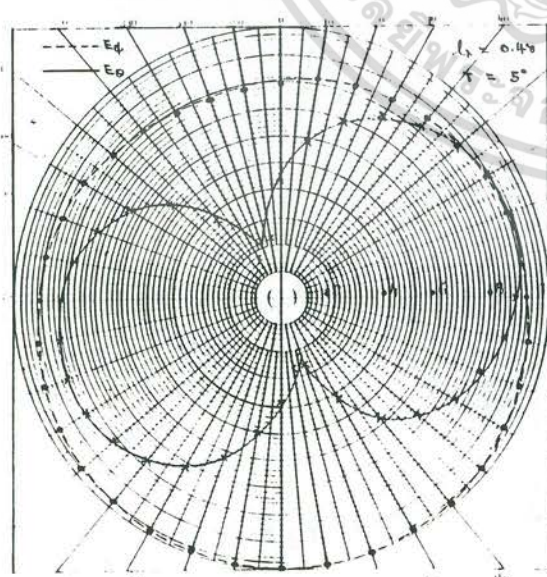
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



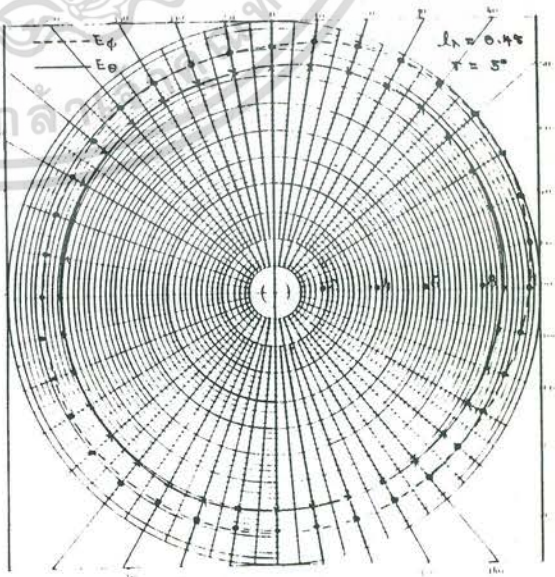
รูปที่ 3.17 ก



รูปที่ 3.17 ข

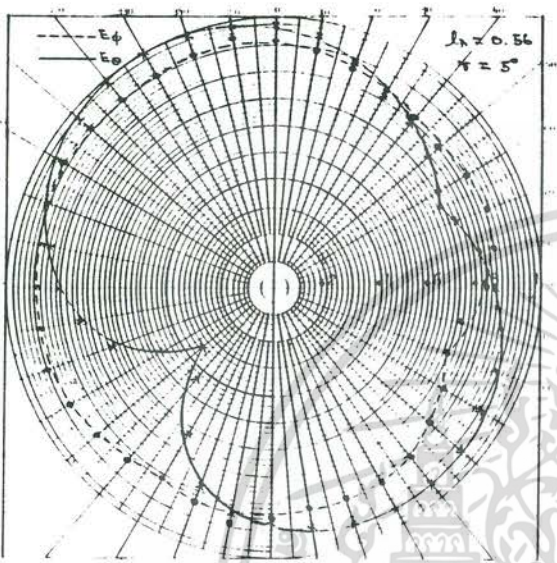


รูปที่ 3.18 ก

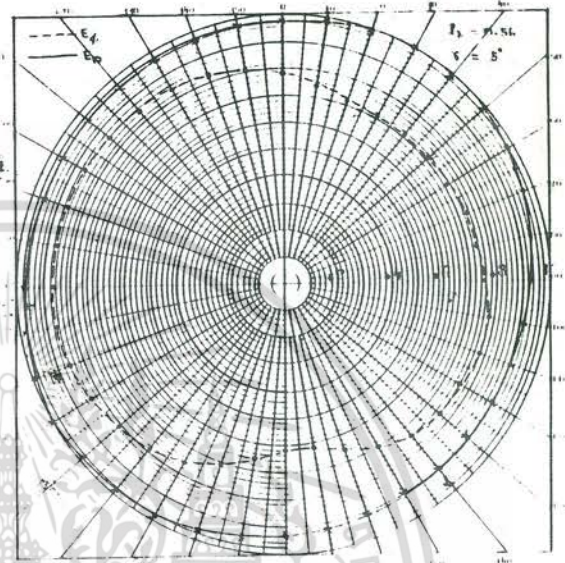


รูปที่ 3.18 ข

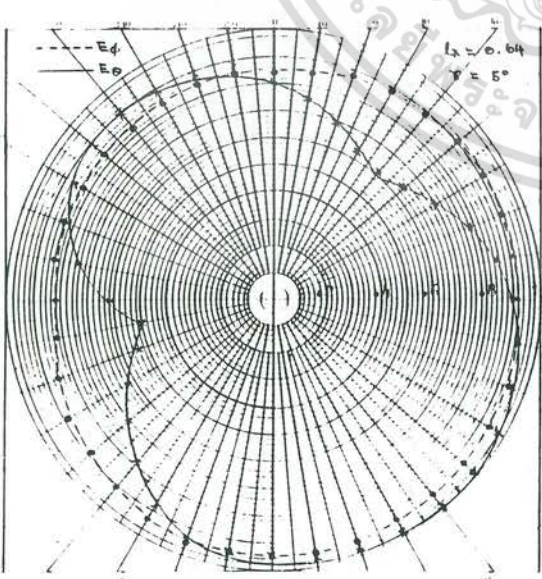
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



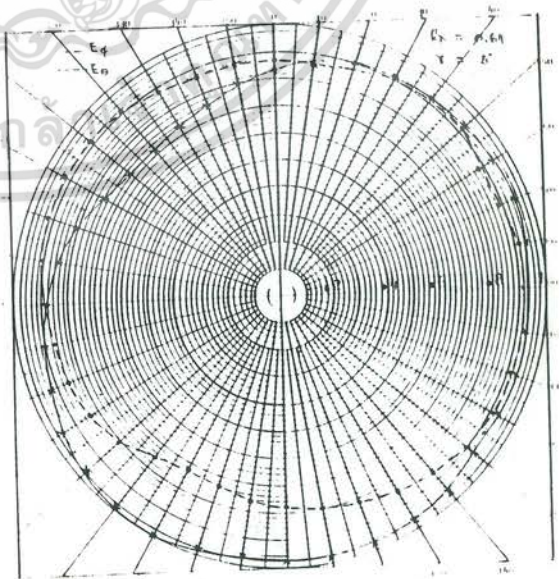
รูปที่ 3.19 ก



รูปที่ 3.19 ข

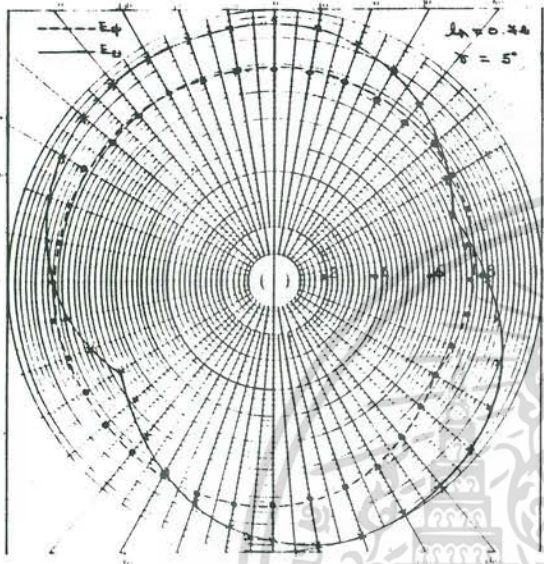


รูปที่ 3.20 ก

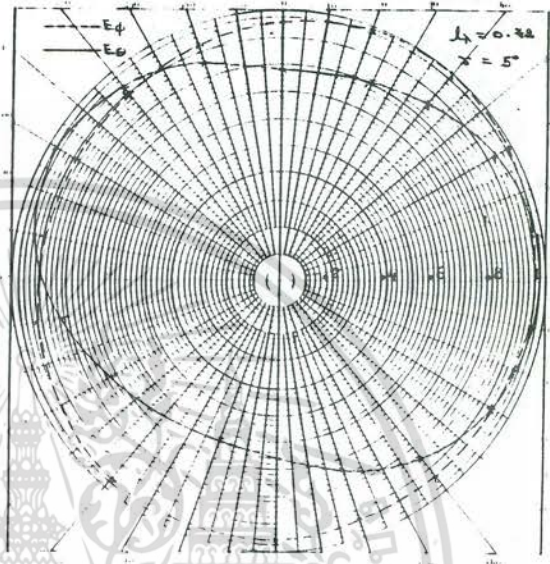


รูปที่ 3.20 ข

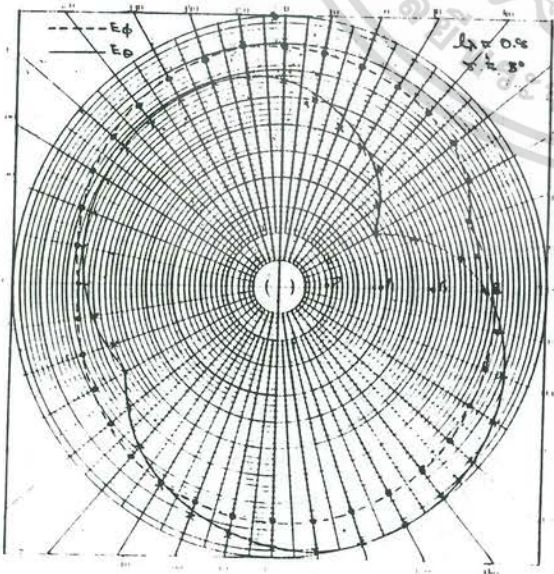
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



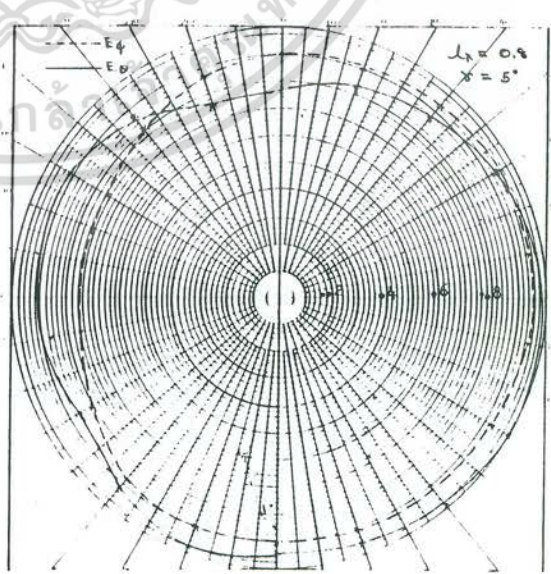
รูปที่ 3.21 ก



รูปที่ 3.21 ข

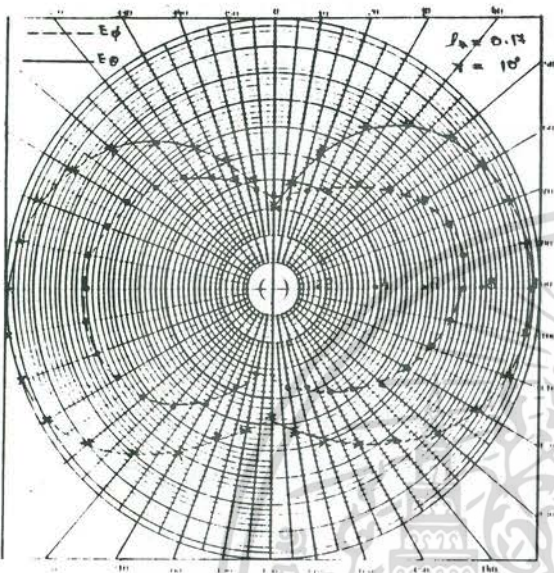


รูปที่ 3.22 ก

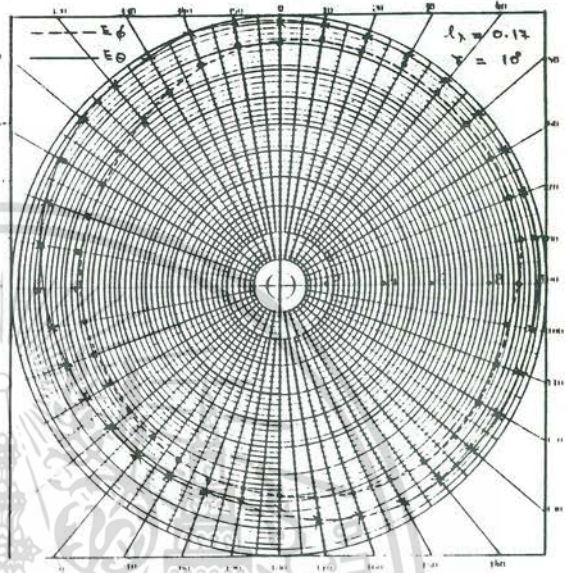


รูปที่ 3.22 ข

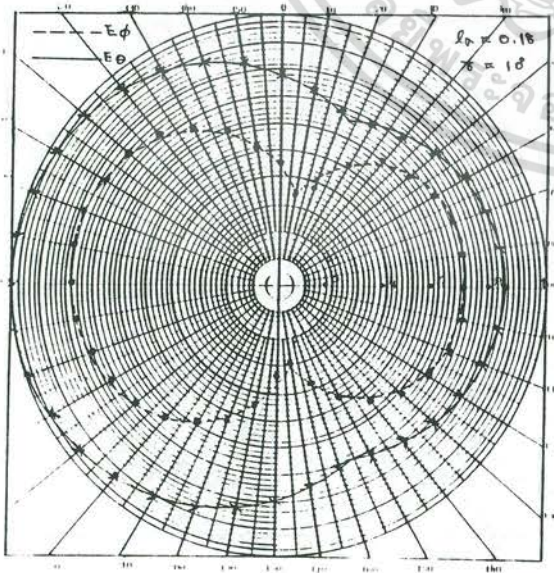
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



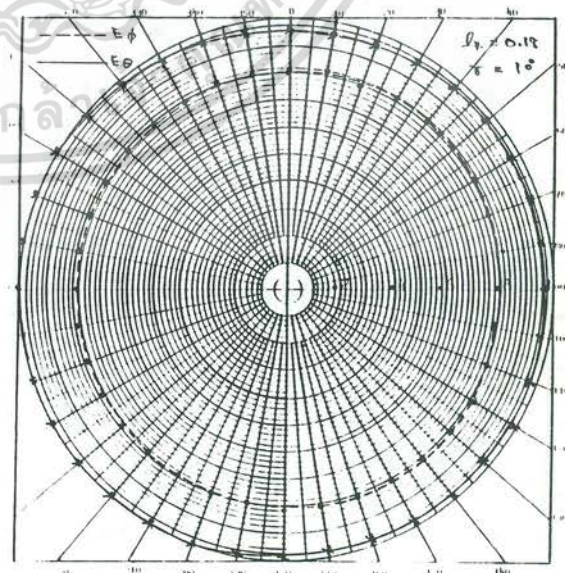
รูปที่ 3.23 ก



รูปที่ 3.23 ข

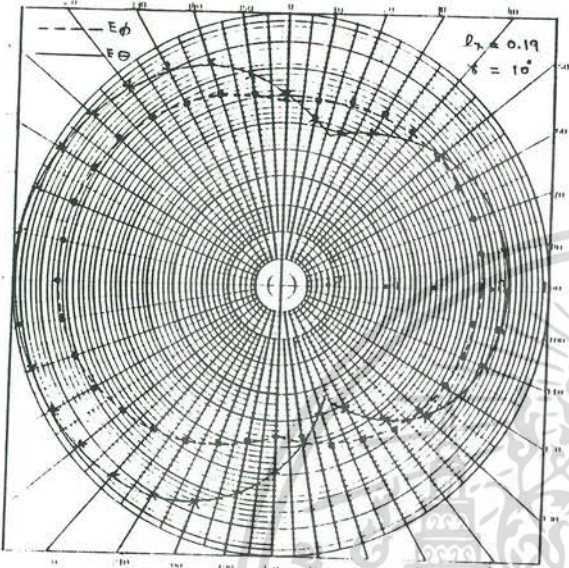


รูปที่ 3.24 ก

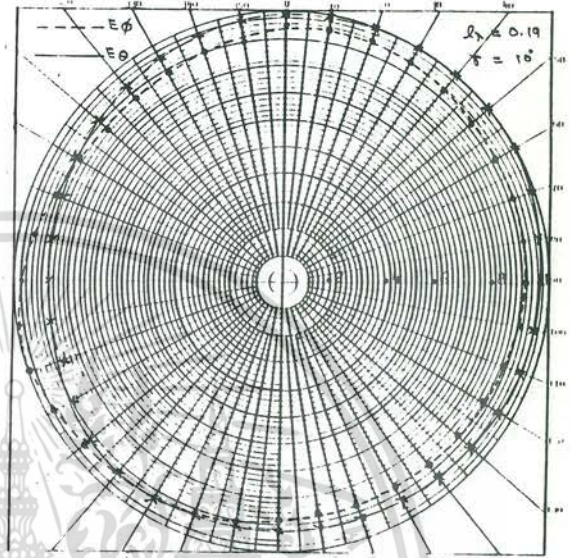


รูปที่ 3.24 ข

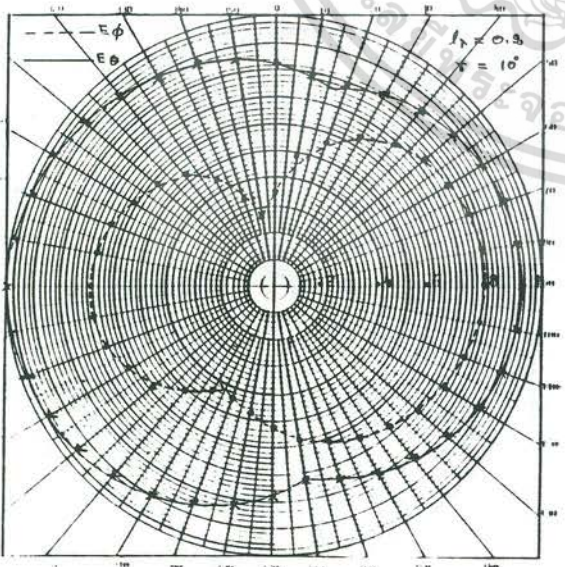
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



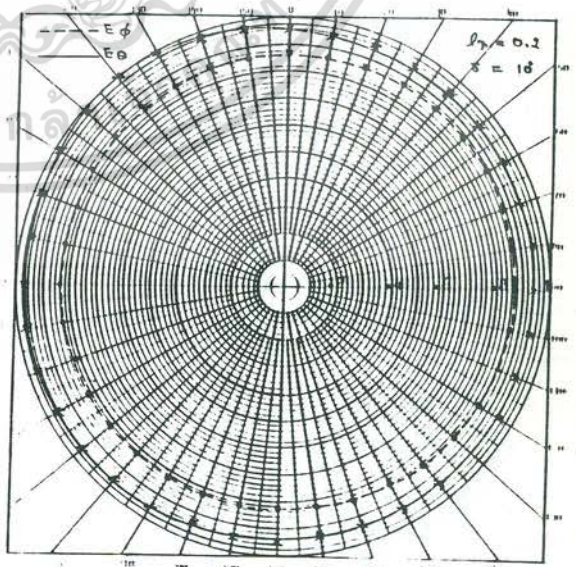
รูปที่ 3.25 ก



รูปที่ 3.25 ข

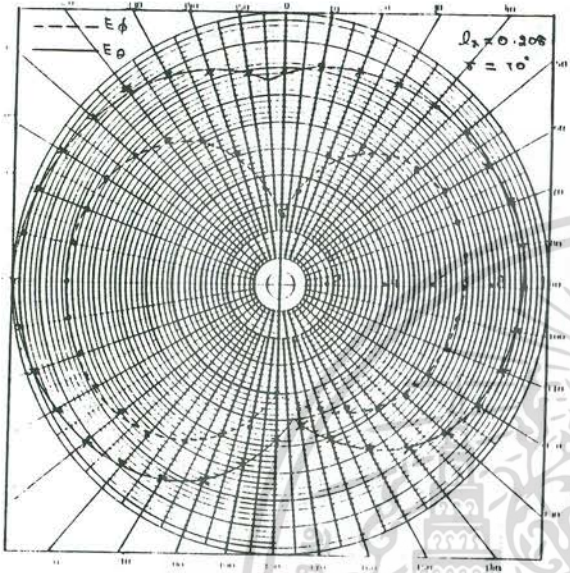


รูปที่ 3.26 ก

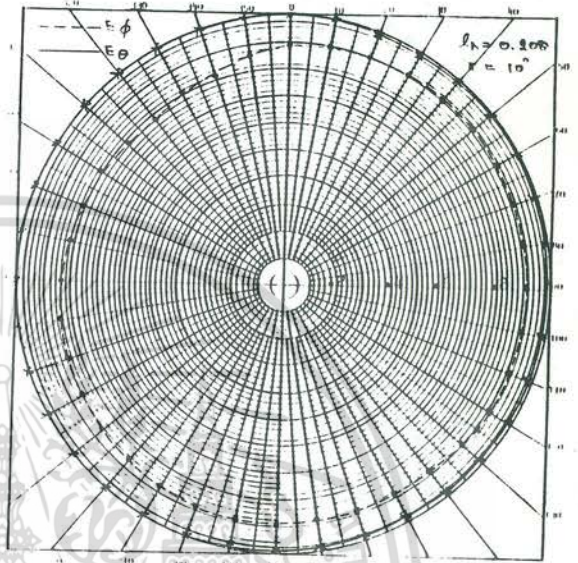


รูปที่ 3.26 ข

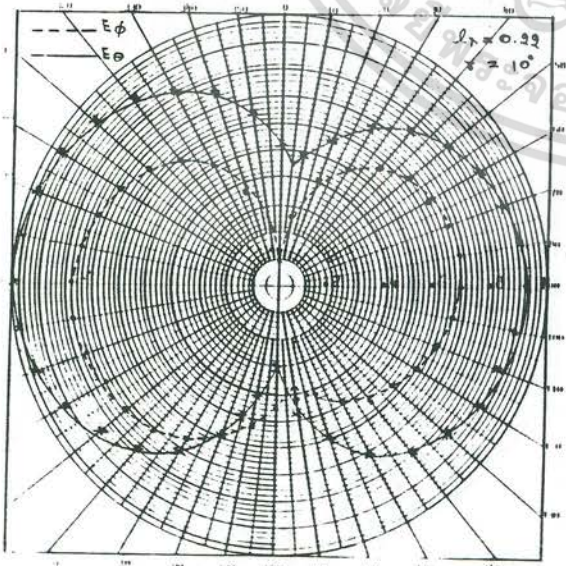
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



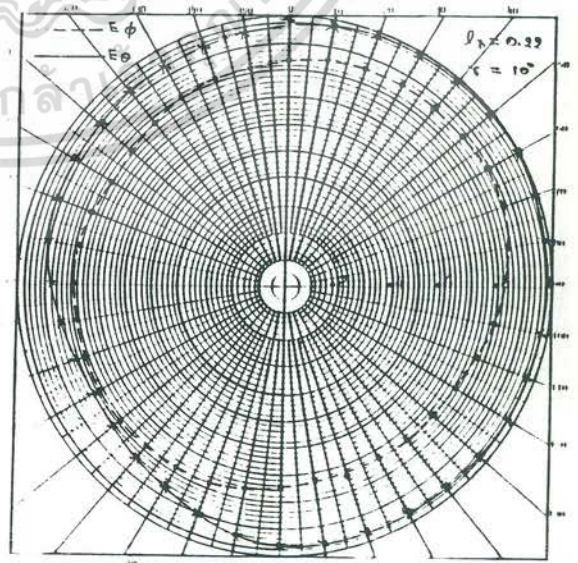
รูปที่ 3.27 ก



รูปที่ 3.27 ข

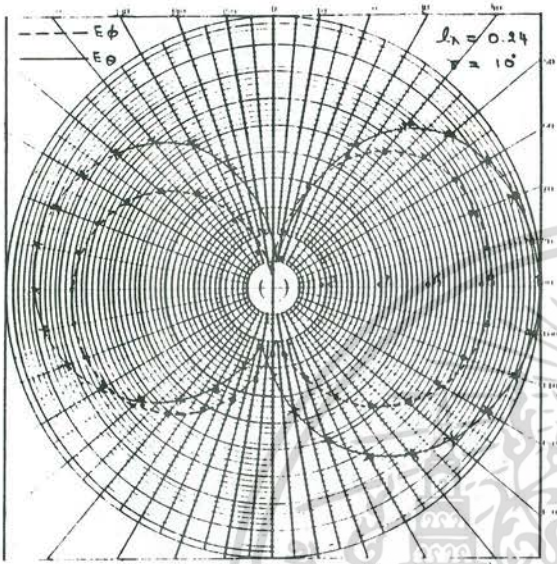


รูปที่ 3.28 ก

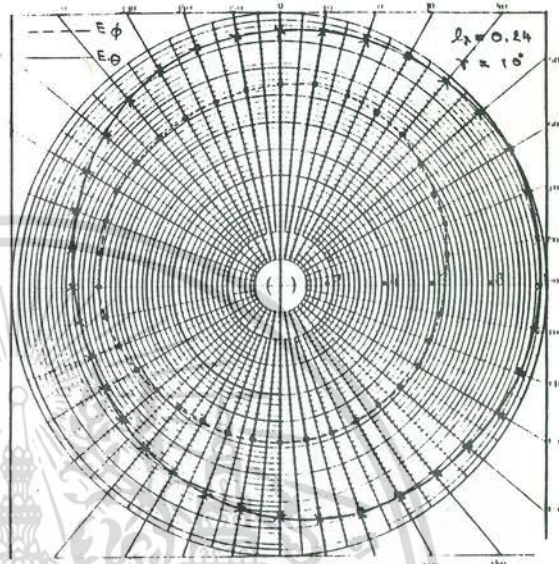


รูปที่ 3.28 ข

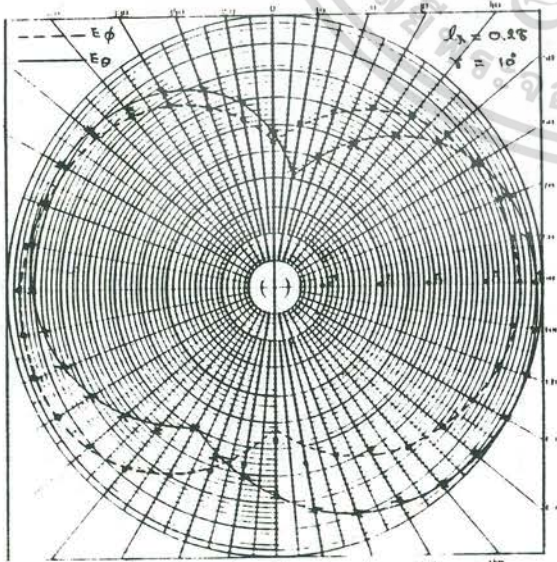
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



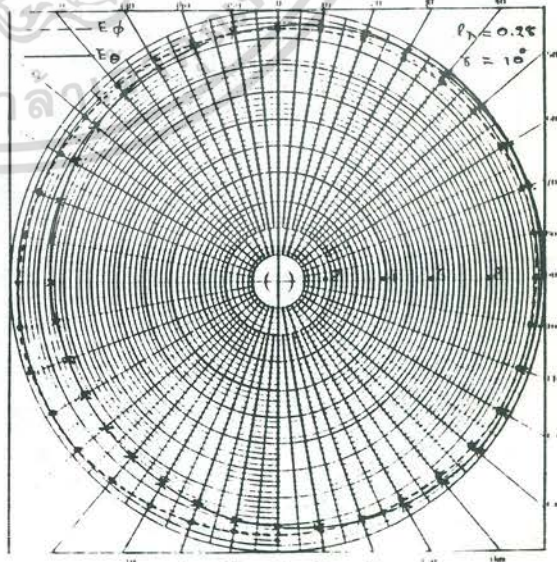
รูปที่ 3.29 ก



รูปที่ 3.29 ข

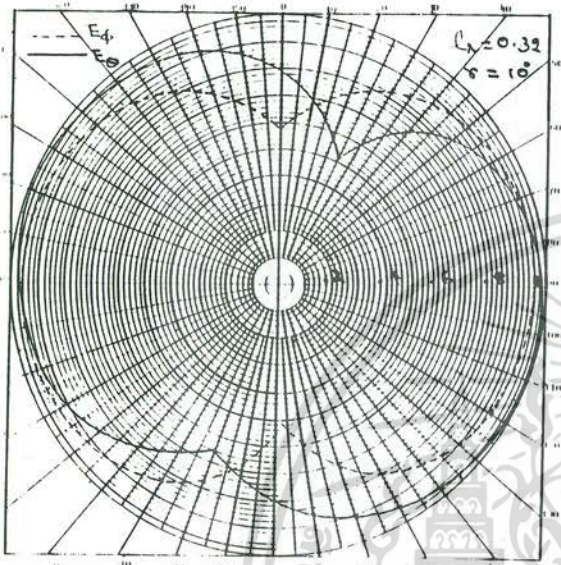


รูปที่ 3.30 ก

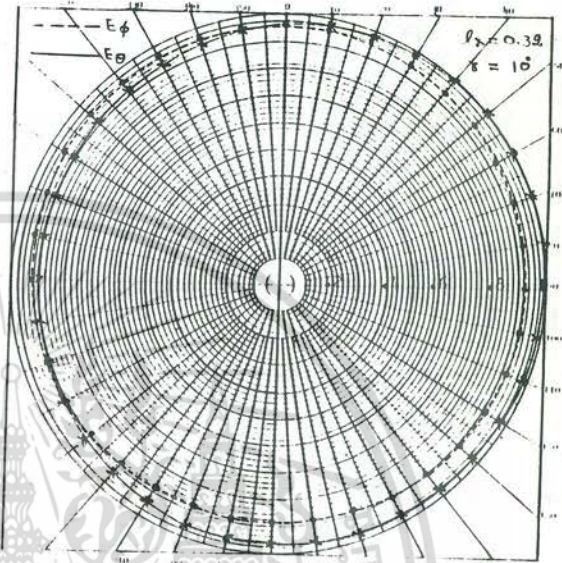


รูปที่ 3.30 ข

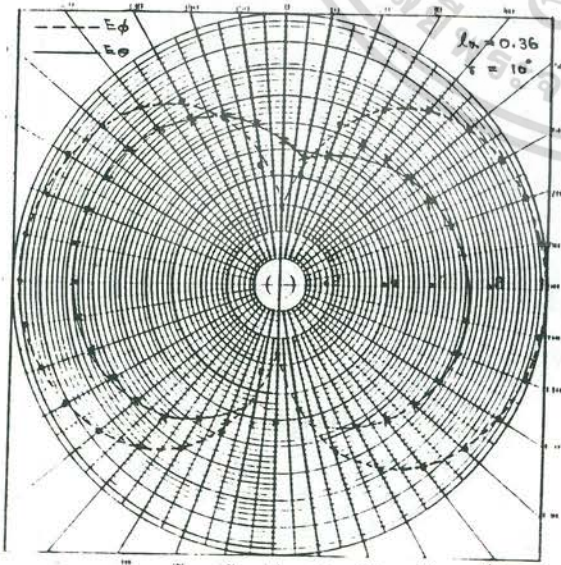
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แจกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



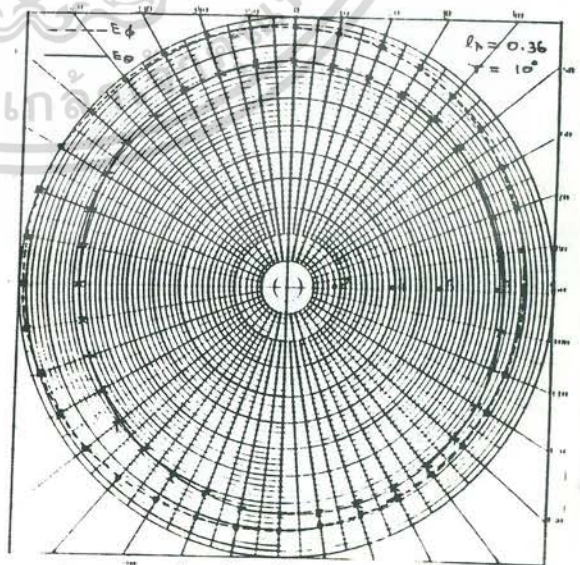
รูปที่ 3.31 ก



รูปที่ 3.31 ข

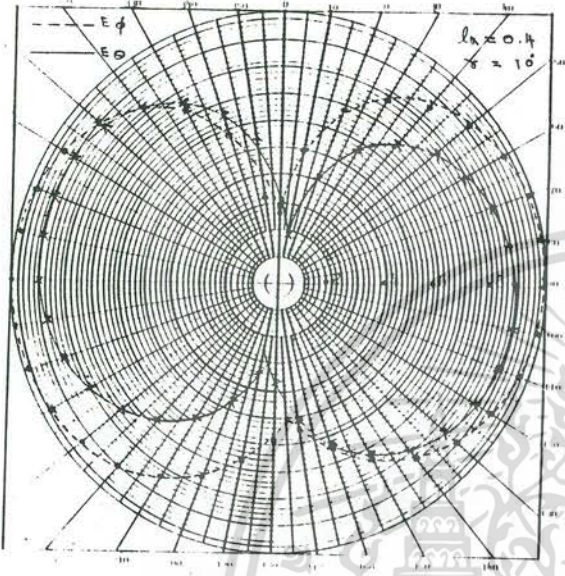


รูปที่ 3.32 ก

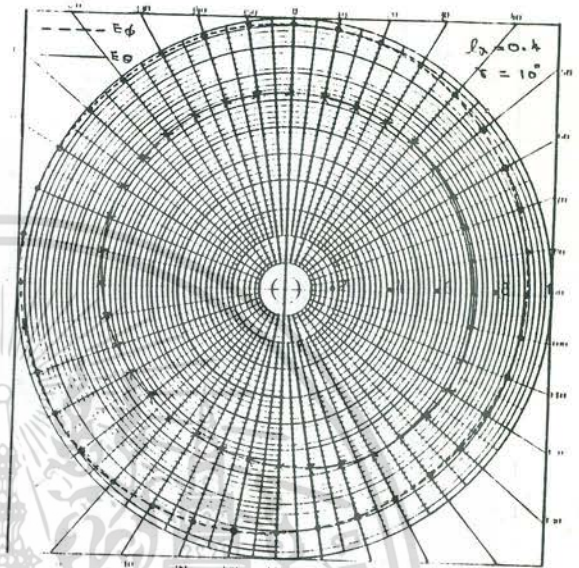


รูปที่ 3.32 ข

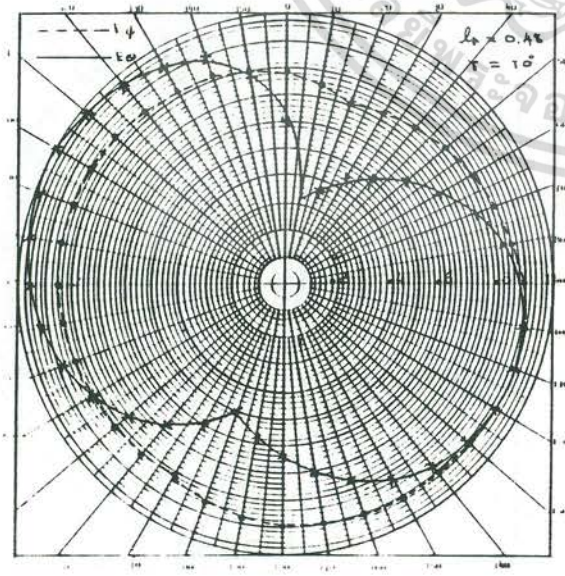
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



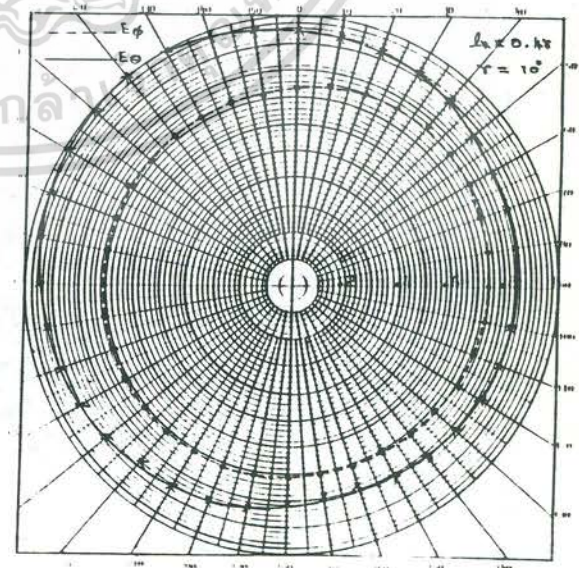
รูปที่ 3.33 ก



รูปที่ 3.33 ข

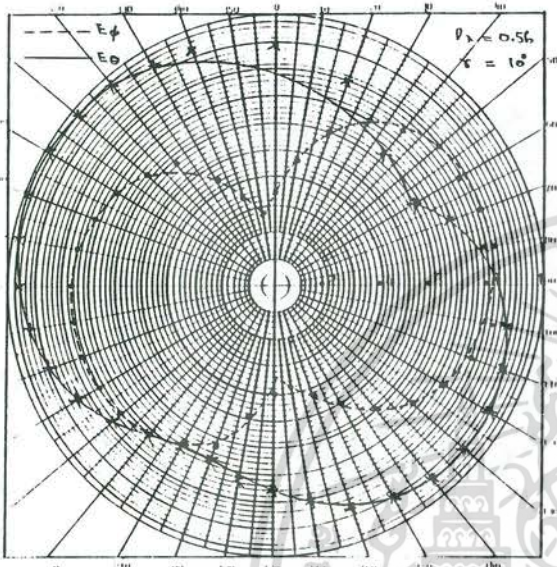


รูปที่ 3.34 ก

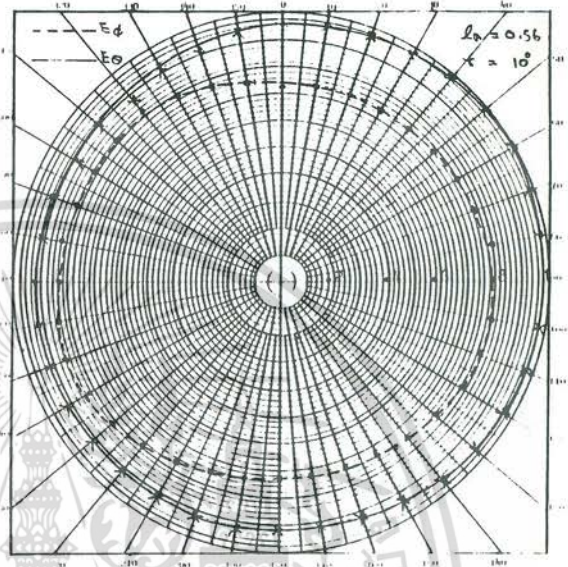


รูปที่ 3.34 ข

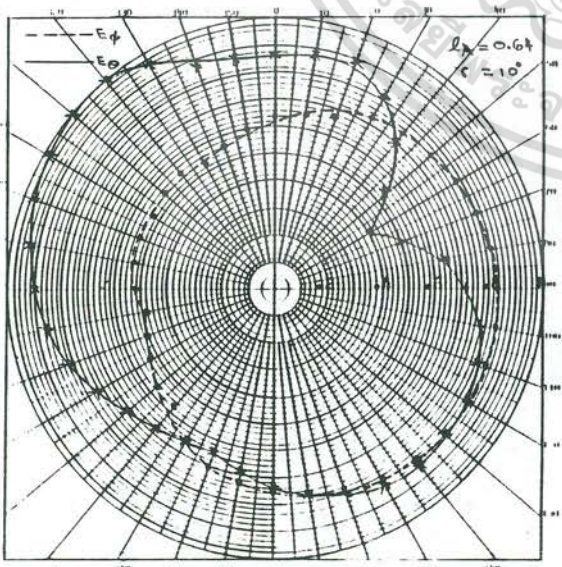
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



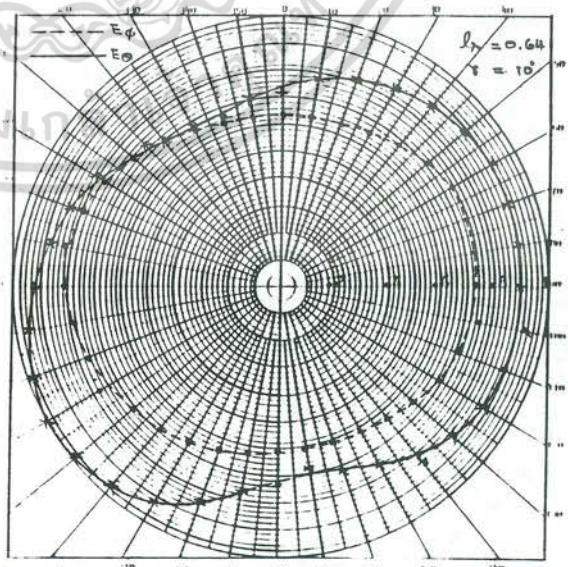
รูปที่ 3.35 ก



รูปที่ 3.35 ข

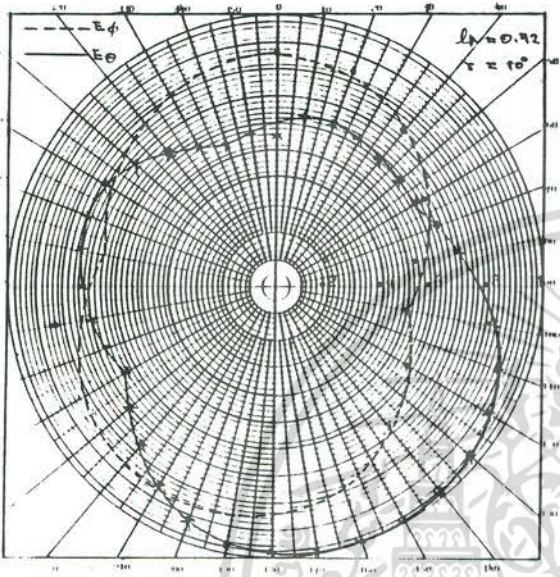


รูปที่ 3.36 ก

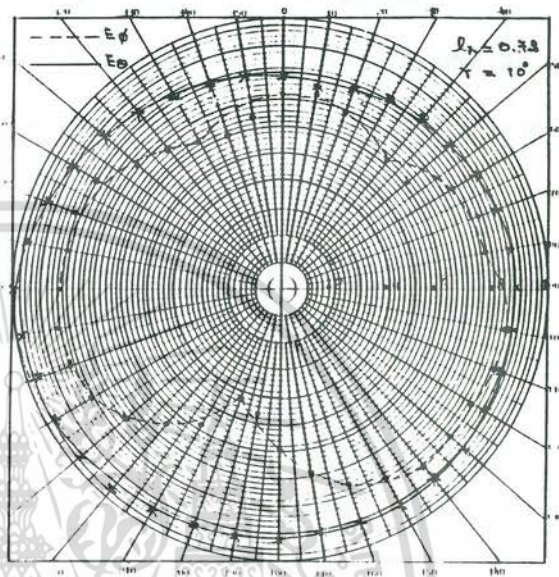


รูปที่ 3.36 ข

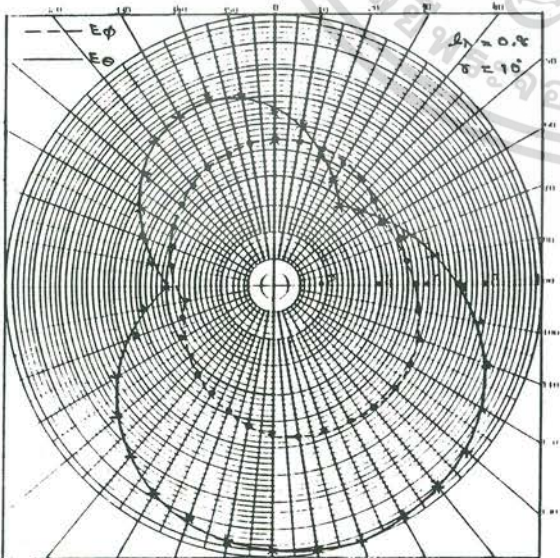
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



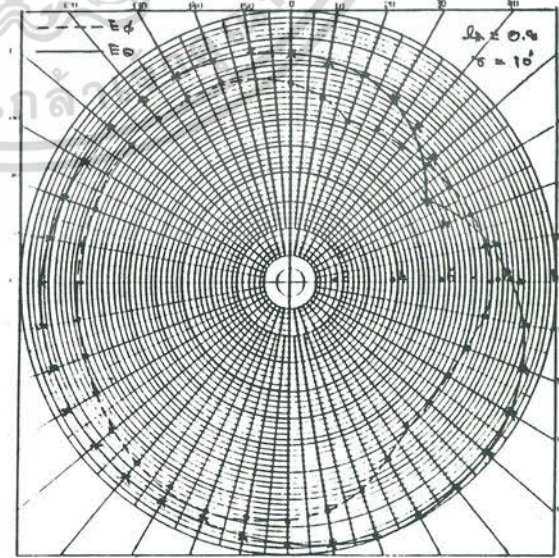
รูปที่ 3.37 ก



รูปที่ 3.37 ข



รูปที่ 3.38 ก



รูปที่ 3.38 ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 บทสรุป

ผลการทดลองที่ได้นี้ แสดงให้เห็นว่าล่ายอากาศเกลียวจะแผ่คลื่นในลักษณะเป็นรูปโตมัท เมื่อความยาว 1 รอบน้อยกว่า 0.48 เท่าของความยาวคลื่น ซึ่งเราถือว่าเป็นล่ายอากาศที่มีขนาดเล็ก ส่วนค่าความผิดของล่ายอากาศนั้น ปรับเปลี่ยนได้ด้วยวิธีการเปลี่ยนขนาดของล่ายอากาศห้วง และความยาวรอบของล่ายอากาศเกลียว ข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำไปใช้พิจารณาออกแบบระบบล่ายอากาศเกลียวสำหรับงานวิทยุกระจายเสียง ระบบ FM



บทที่ 4

การออกแบบและสร้างระบบสายอากาศเกลียวสำหรับงานวิทยุกระจายเสียง

4.1 บทนำ

สายอากาศที่สามารถแผ่คลื่นออกเป็น circular polarization และมีกระบวนการแผ่คลื่นเป็นรูปโดมทึบนั้น เป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับงานวิทยุกระจายเสียงระบบ FM ทั้งนี้เพื่อให้เครื่องรับที่อยู่รอบสายอากาศทั้งใกล้และไกล สามารถรับสัญญาณวิทยุที่ส่งออกมาจากสายอากาศได้อย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศเกลียวขนาดเล็กที่มีจำนวนรอบน้อย ทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง แสดงว่าสายอากาศเกลียวขนาดเล็กดังกล่าวมีคุณสมบัติครบตามต้องการทั้งส่งและรับ ยิ่งกว่านั้นสายอากาศแบบนี้ยังสามารถออกแบบให้มีความถี่จำเพาะใกล้เคียงกับความถี่จำเพาะของสายส่งและเครื่องส่งได้อีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงได้ทำการออกแบบและสร้างระบบสายอากาศเกลียวขนาดเล็กให้กับสถานีวิทยุกระจายเสียง อส. ระบบเอฟเอ็ม ซึ่งออกอากาศด้วยกำลังส่ง 10 kW ระบบสายอากาศที่ออกแบบและสร้างนี้ประกอบด้วยสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก $1 \frac{1}{2}$ รอบ จำนวน 4 ตัวต่อเรียงกันเป็นแผง ค่าความถี่รวมของสายอากาศสามารถปรับให้มีค่า 50 MHz เพื่อให้เข้ากับ ความถี่จำเพาะของสายส่งและเครื่องส่งโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ matching

4.2 การออกแบบและการสร้างระบบสายอากาศ

ในการออกแบบระบบสายอากาศเกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็ก สำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง อส. ระบบเอฟเอ็มนั้น สายอากาศที่ออกแบบต้องมีคุณสมบัติเบื้องต้น 4 ประการด้วยกัน คุณสมบัติประการแรก สายอากาศต้องสามารถแผ่คลื่นออกเป็น circular polarization และมีกระบวนการแผ่คลื่นเป็นรูปโดมทึบ คุณสมบัติประการที่สอง สายอากาศจะต้องสามารถทำงานได้อย่างปกติเมื่อใช้กำลังส่งออกอากาศ 10 kW คุณสมบัติประการที่สาม ความถี่ของระบบสายอากาศต้องมีค่าใกล้เคียงหรือมีค่า 50 MHz หรือสามารถ matching ให้มีค่า 50 MHz ได้โดยง่าย และประการสุดท้าย ระบบสายอากาศจะต้องแข็งแรงทนทานต่อแรงลมและการเปลี่ยนแปลงของดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี

จากข้อกำหนดทั้ง 4 ประการนี้ จึงได้เลือกออกแบบให้ระบบสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศเกลียวขนาดเล็กจำนวน 4 ตัวต่อเรียงกันเป็นแผง เพื่อให้สายอากาศแต่ละตัวรับกำลังเพียง 2.5 kW เท่านั้น การนำสายอากาศแต่ละตัวยึดติดกับ rigid coaxial ซึ่งทำหน้าที่เป็นสายส่งกำลังงานวิทยุและคัดลูนให้ แม้ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล่ายอากาศอยู่ในตำแหน่งตามต้องการ เพื่อให้กระบวนการแผ่คลื่นที่ได้เป็นรูปโดนัท ล่ายอากาศแต่ละตัวจะอยู่ห่างจากล่ายอากาศตัวข้างเคียงเป็นระยะทาง 2.88 เมตร (สถานีวิทยุ อส. ออกอากาศด้วยความถี่ 104 MHz) สำหรับค่าความถี่ของล่ายอากาศนั้น ได้ออกแบบให้ความถี่รวมของระบบล่ายอากาศมีค่าประมาณ 50 Ω เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์ matching ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างได้มาก

ขนาดของล่ายอากาศเกลียวที่ให้การแผ่คลื่นเป็น circular polarization นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C^2 = \frac{2S\lambda}{\tan \gamma} \quad (4.1)$$

$$\tan \gamma = \frac{C}{2\lambda} \quad (4.2)$$

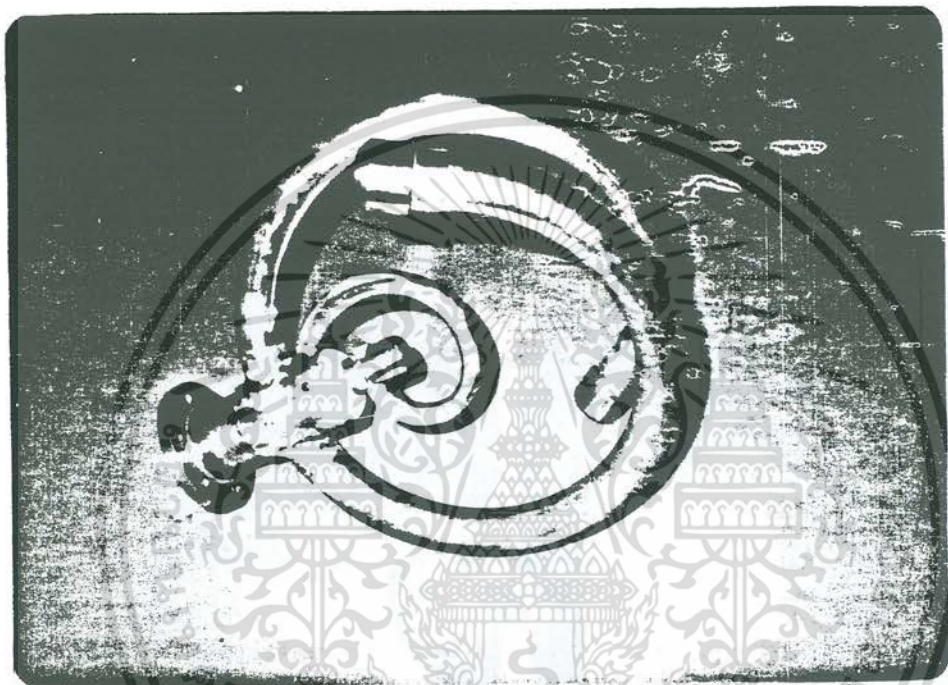
ในการออกแบบได้เลือก $\gamma = 10^\circ$ ทำให้ได้ค่า C เท่ากับ 1.015 เมตร และ S เท่ากับ 0.179 เมตร ความยาว 1 รอบของล่ายอากาศจึงเท่ากับ 0.357λ

การสร้างล่ายอากาศนั้น ใช้ท่อทองเหลืองที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.8 ซม. หนา 0.3 ซม. ตัดให้เป็นรูปล่ายอากาศเกลียวตามต้องการโดยใช้วิธีตัดเป็น ปลายทั้งสองข้างของล่ายอากาศทำเป็นเกลียวที่มีระยะเกลียว $\frac{1}{24}$ นิ้ว สำหรับลุ่มหัวปรับที่ใช้ปรับความถี่ของล่ายอากาศ ล่ายอากาศนี้เชื่อมติดสนิทเข้ากับปลายข้างหนึ่งของท่อทองเหลืองที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 5 ซม. ด้วยการเชื่อมเงิน ท่อทองเหลืองนี้เป็นท่อตัวนำชั้นนอกของสายส่งที่ทำหน้าที่เป็น feed line ปลายอีกข้างหนึ่งของท่อทองเหลืองเชื่อมติดกับหน้าแปลนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.9 ซม. หนา 1.0 ซม. และเจาะรูขนาด 0.8 ซม. ไว้ 6 รู สำหรับร้อยนอตเหล็ก stainless หน้าแปลนนี้ใช้เป็นที่ยึดล่ายอากาศให้ติดแน่นกับ power divider

ล่ายอากาศห้วงทำจากท่อทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 ซม. ตัดเป็นห้วงเกือบกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 7 ซม. ปลายข้างหนึ่งของล่ายอากาศห้วงเจาะรูขนาด 1 ซม. ไว้สำหรับร้อยเข้ากับแกนทองเหลือง ซึ่งต่อติดกับท่อชั้นในของ feed line ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของล่ายอากาศห้วงเชื่อมติดกับท่อทองเหลืองที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.35 ซม. ยาว 2.5 ซม. ในการประกอบล่ายอากาศ

ห้วงเข้ากับล่ายอากาศเกลียว ท่อทองเหลืองสั้น ๆ นี้จะลุ่มเข้ากับท่อชั้นนอกของ feed line และชั้นติดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แนนกับ feed line ด้วยนอต 3 ตัว ล่ายอากาศเกลียวที่ประกอบ เรียบร้อยแล้วจะมีลักษณะดังแสดงไว้ ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.1 ส่วนที่เห็นขาว ๆ ในรูปนั้นเป็น teflon ทำหน้าที่เป็นตัวยึดให้ท่อตัวนำชั้นในอยู่ในแนวแกนของท่อตัวนำชั้นนอก



รูปที่ 4.1 ลักษณะสายอากาศเกลียว
เมื่อประกอบเรียบร้อยแล้ว

สำหรับ rigid coaxial และ power divider นั้น ในการออกแบบต้องคำนึงถึงความถี่จำเพาะและกำลังงานสูงสุดที่ coaxial และ power divider สามารถทนได้ ความถี่จำเพาะของ coaxial power divider สามารถคำนวณได้จากสมการ [5]

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{b_1}{b_2} \quad \text{Ohms} \quad (4.3)$$

Z_0 เป็นค่าความถี่จำเพาะของ coaxial ϵ_r เป็น dielectric constant ของตัวกลาง b_1 เป็นรัศมีภายในของท่อตัวนำชั้นนอก และ b_2 เป็นรัศมีภายนอกของท่อตัวนำชั้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ ส่วนกำลังงานสูงสุดที่ coaxial และ power divider สามารถทนได้นั้น คำนวณได้จากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (4) [6]

$$P_{\max} = \frac{E_a^2 b_2^2 \sqrt{\epsilon_r}}{52.2} \log \frac{b_1}{b_2} \quad \text{Watts} \quad (4.4)$$

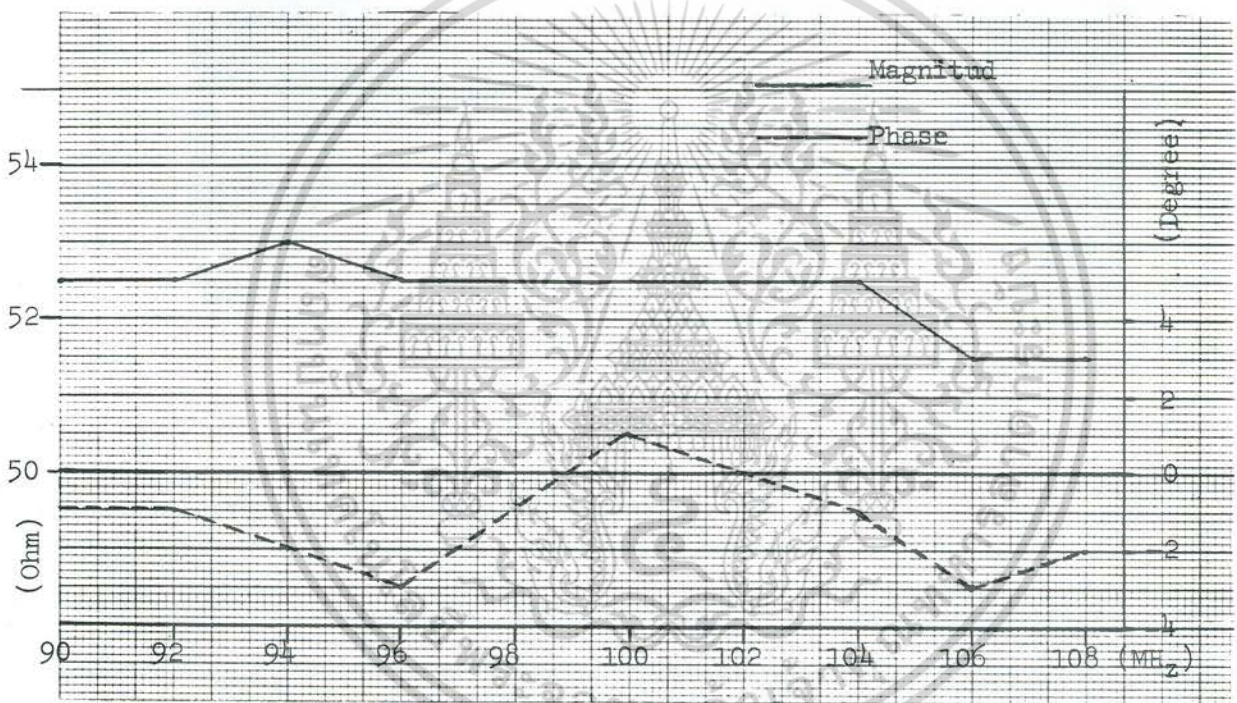
E_a เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวกลางสามารถทนได้ สำหรับอากาศ E_a มีค่า 3×10^6 Volt/m ในภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ แต่ในการคำนวณจะใช้ค่า $E_a = 2 \times 10^6$ Volt/m แทน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย power divider

ในการออกแบบ coaxial นั้น ได้เลือกออกแบบให้ coaxial แต่ละท่อนยาว 1.24 ม. ท่อชั้นนอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.62 ซม. หนา 0.15 ซม. ที่ปลายทั้งสองข้างเชื่อมติดกับหน้าแปลนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.5 ซม. หนา 1.6 ซม. หน้าแปลนนี้เข้าช่องกว้าง 0.5 ซม. ลึก 0.2 ซม. ไว้สำหรับใส่แหวนยางกันกาซรั่ว และเจาะรูขนาด 1.27 ซม. ไว้สำหรับร้อยน็อตที่ใช้ยึด coaxial หรือ power divider เข้าด้วยกัน ส่วนท่อชั้นในเป็นท่อทองเหลืองที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3.17 ซม. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ปลายทั้งสองข้างระหว่างท่อชั้นในกับท่อชั้นนอก จะมี Teflon กลม หนา 1.5 ซม. กั้นอยู่ Teflon นี้ ทำหน้าที่ยึดท่อชั้นในไว้ให้อยู่ในแนวแกนของท่อชั้นนอก และเพื่อให้อากาศไหลผ่านได้สะดวกจึงเจาะรูขนาด 0.8 ซม. ไว้ 4 รูด้วยกัน coaxial ที่ออกแบบนี้มีค่าความผิวนำเพาะ 52.5 Ω และสามารถทนกำลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 40 kW ผลการวัดความผิวนำเพาะของ coaxial ที่ความถี่ 90 MHz ถึง 108 MHz แสดงไว้ในรูปที่ 4.3

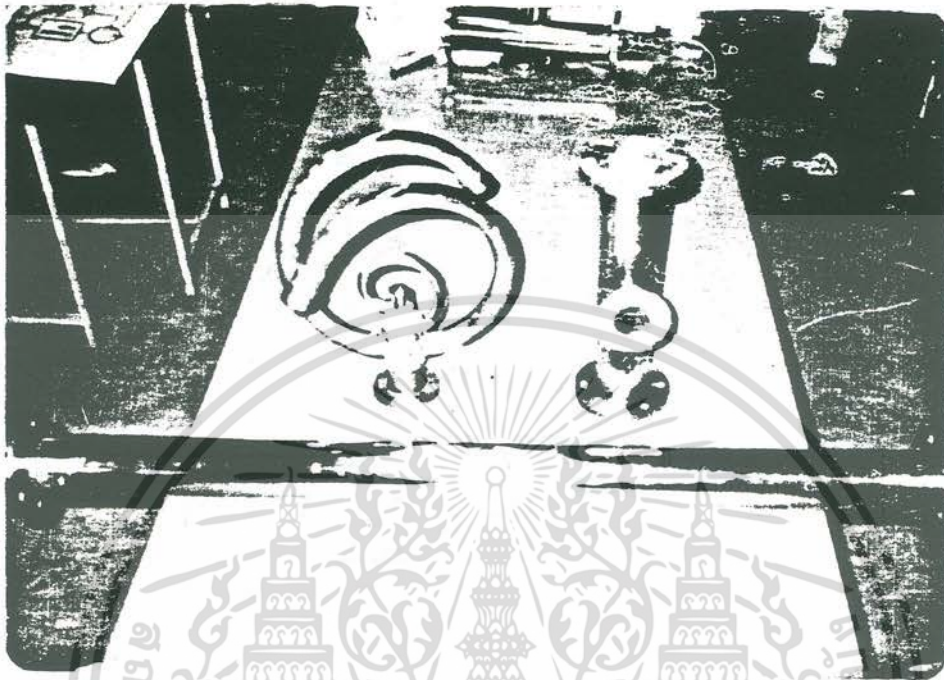


รูปที่ 4.3 ผลการวัดความผิวนำเพาะของ rigid

coaxial ที่ความถี่ 90 MHz ถึง 108 MHz

rigid coaxial ที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว มีลักษณะดังรูปถ่ายที่ 4.4 ส่วนแบบแปลนของ coaxial และ power divider นั้น แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก
power divider และ coaxial ที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว

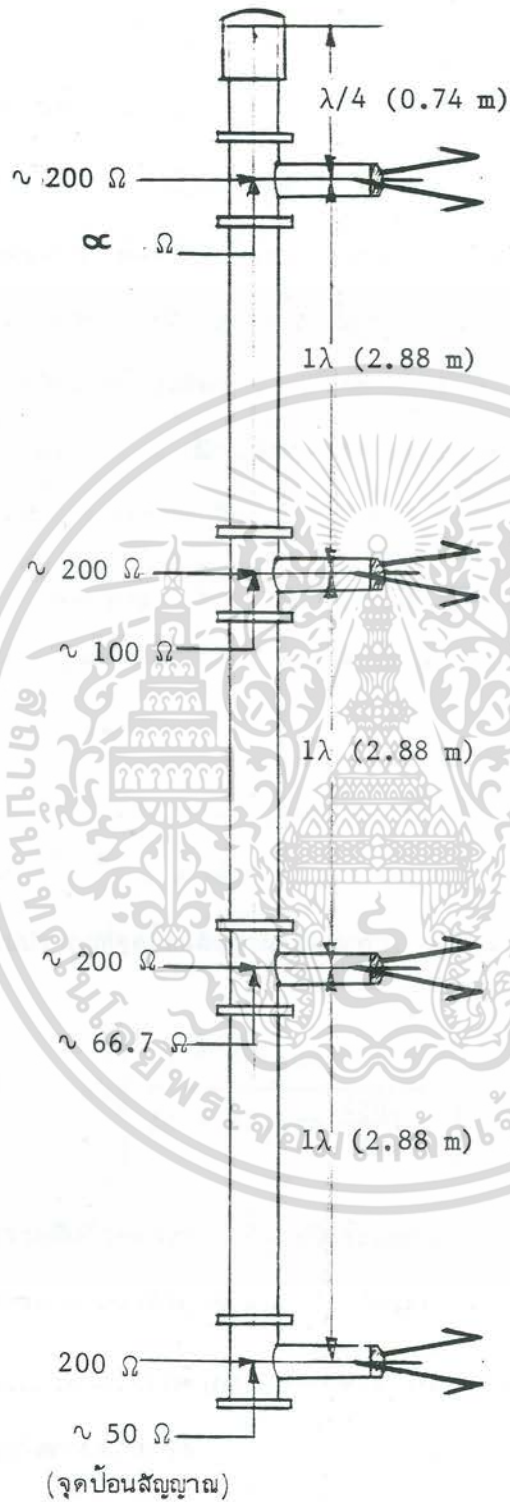
4.3 การจัดแอเรียของระบบสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก 4 เบบ์

ในการออกแบบแอเรียของระบบสายอากาศเกลียว 1½ รอบขนาดเล็ก 4 เบบ์ต่อขนานกันนั้น มีจุดมุ่งหมายให้ระบบสายอากาศมีค่าทวิกำลังพอดิวร และแผ่นสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงสุดเป็นวงกลมรอบแอเรียในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของแอเรีย ในขณะที่เดียวกันก็ใช้วิธีจัดแอเรียให้เป็นประโยชน์ในการปรับความผิดของสายอากาศให้มีค่าประมาณ 50 Ω ไปพร้อมกันด้วย

แอเรียของระบบสายอากาศเกลียวขนาดเล็กจะมีกระบวนการแผ่คลื่นในลักษณะใดนั้นพิจารณาได้จากแอเรียเฟคเตอร์ (AF) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$AF = \frac{\sin \left[\frac{4\pi d \cos \theta}{\lambda} + 2\delta \right]}{\sin \left[\frac{\pi d \cos \theta}{\lambda} + \delta \right]} \quad (4.5)$$

d เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศเบย์ข้างเคียง และ δ เป็นความต่างเฟสของกระแส
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปวาดแสดงการจัดแอเรียของระบบสาย

อากาศเกลียว 1½ รอบขนาดเล็ก 4 เบย์ต่อขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าระหว่างสายอากาศ เบย์ข้างเคียง

สมการ (4.5) แสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้าที่แอเรียแผ่ออกจะมีค่าสูงสุดในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของแอเรียตามต้องการก็ต่อเมื่อทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายอากาศแต่ละ เบย์มี เฟส เดียวกัน สำหรับแอเรียของระบบสายอากาศเกลียวขนาดเล็กที่ออกแบบ (รูป 4.5) ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการจัดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศเบย์ข้างเคียง d มีค่าเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ($d = n\lambda/2$) เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและให้แอเรียมีความยาวน้อยที่สุด จึงได้ออกแบบให้สายอากาศเกลียวขนาดเล็กแต่ละ เบย์อยู่ห่างจากสายอากาศเบย์ข้างเคียงเป็นระยะทาง 1 ความยาวคลื่น

รูปที่ 4.6 ก และรูปที่ 4.6 ข เป็นกระบวนกรแผ่คลื่นตามทฤษฎีในระนาบ xz และ yz ของแอเรียของระบบสายอากาศเกลียว $1\frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็ก 4 เบย์ ที่มีการจัดแอเรียดังรูปที่ 4.5 ในขณะที่ยังไม่ได้อัดตั้งกับโครงเหล็กยึดแอเรีย

สำหรับการปรับความถี่ของระบบสายอากาศนั้น เนื่องจากสายอากาศแต่ละ เบย์ต่อเรียงกัน อย่างขนาน ดังนั้น ถ้าปรับให้สายอากาศแต่ละ เบย์มีความถี่ 200Ω ที่ปลายหัวลูกศรในรูปที่ 4.5 ค่าความถี่ 200Ω นี้จะไปปรากฏที่จุดบ่อนสัญญาณ ดังสมการ

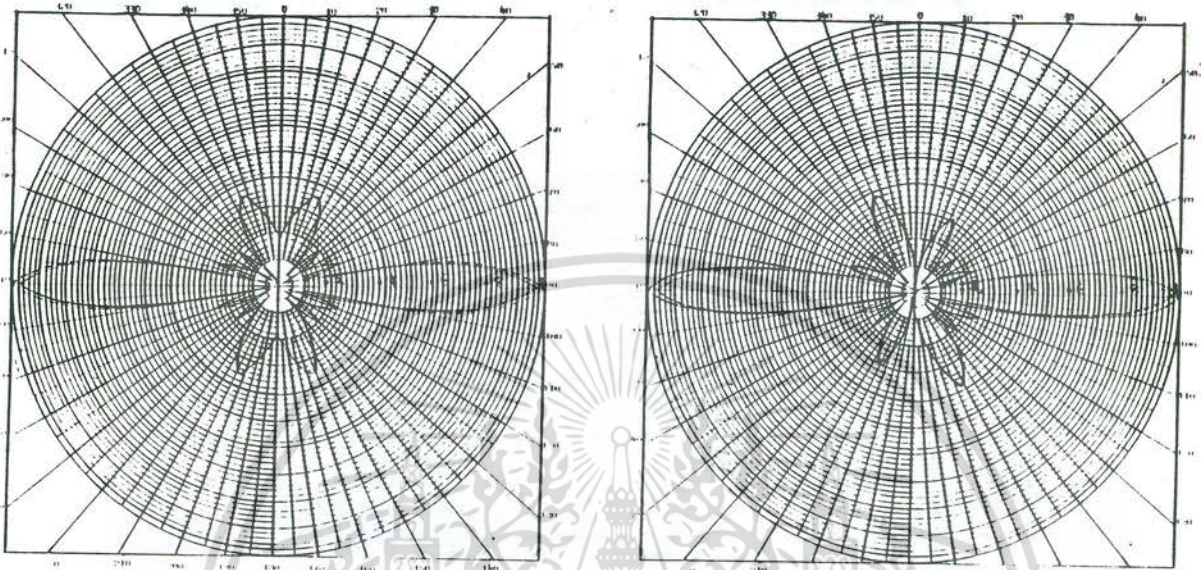
$$Z_d = Z_o \left[\frac{Z_\ell + iZ_o \tan\left(\frac{2\pi \cdot d}{\lambda}\right)}{Z_o + iZ_\ell \tan\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \right] \quad (4.6)$$

Z_d เป็นความถี่ที่วัดห่างจาก Z_ℓ เป็นระยะทาง d Z_ℓ เป็นความถี่ของสายอากาศ Z_o เป็นความถี่จำเพาะของสายส่งสัญญาณ และ d เป็นระยะระหว่างสายอากาศกับจุดที่วัดความถี่

เนื่องจากแอเรียประกอบด้วยสายอากาศ 4 เบย์ ต่อขนานกัน ดังนั้น ความถี่ของแอเรียจึงมีค่า 50Ω ที่จุดบ่อนสัญญาณตามต้องการ

ส่วนที่อยู่ยอดสุดของแอเรียนั้นเป็น short stub ที่มีความถี่เป็นอนันต์ short stub นี้ทำหน้าที่ป้องกันการแผ่สนามไฟฟ้า และปิดกั้นไม่ให้ก๊าซแรงดันสูงที่อยู่ภายในสายส่งรั่วไหลออกไปสู่ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ก

รูปที่ 4.6 ข

รูปที่ 4.6 กระบวนการแผ่คลื่นตามทฤษฎีของแอมป์สายอากาศเกลียว
 $1\frac{1}{2}$ รอบ ขนาดเล็กต่อขนานกัน 4 เบย์ ในระนาบ xz (4.6 ก) และระนาบ yz (4.6 ข)

4.4 การวัดทดลอบ

ก่อนที่จะนำสายอากาศไปติดตั้งเพื่อใช้งานจริงนั้น ได้ทำการทดลอบปรับความผืนของระบบสายอากาศที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ โดยทำการปรับความผืนของสายอากาศให้มีค่า 50Ω ที่ความถี่ 104 MHz จากนั้นจึงทำการวัดค่าความผืนของสายอากาศตั้งแต่ความถี่ 98 MHz จนถึงความถี่ 107 MHz และนำข้อมูลที่ได้นำมาเขียนเป็นกราฟใน smith chart ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 จากนั้นจึงได้นำสายอากาศไปติดตั้งที่สถานีวิทยุ อส. ก่อนที่จะทำการติดตั้งนั้นได้ทำการละอาดสายอากาศ และวัดความผืนของสายอากาศอีกครั้งหนึ่งด้วย directional wattmeter ที่ความถี่ 104 MHz VSWR ที่วัดได้มีค่า 1.05 หลังจากติดตั้งสายอากาศเข้ากับเสาเหล็กเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการวัด VSWR อีกครั้งหนึ่ง ปรากฏว่า VSWR ยังมีค่า 1.05 เท่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

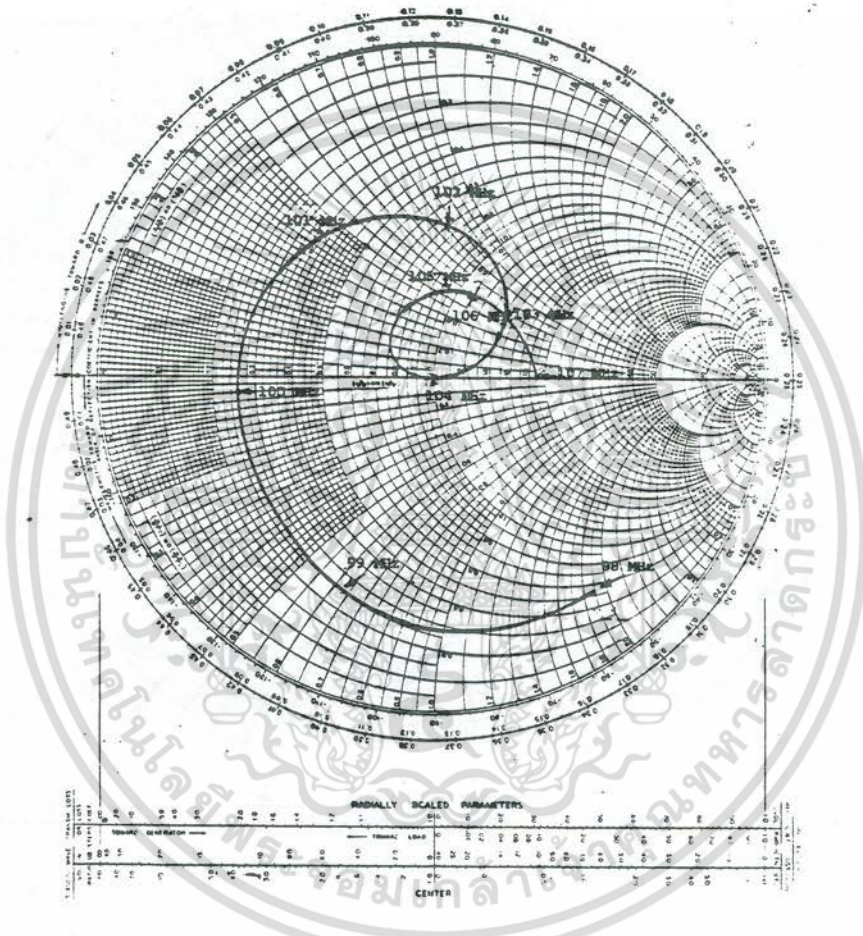
SMITH CHART

$$z = R - jX, Z_0 = \Omega$$

$$y = G - jB, Y_0 = U$$

TITLE ความถี่ของระบบสายอากาศเดี่ยว 4 ตัว

DATE 28 ธันวาคม 2525

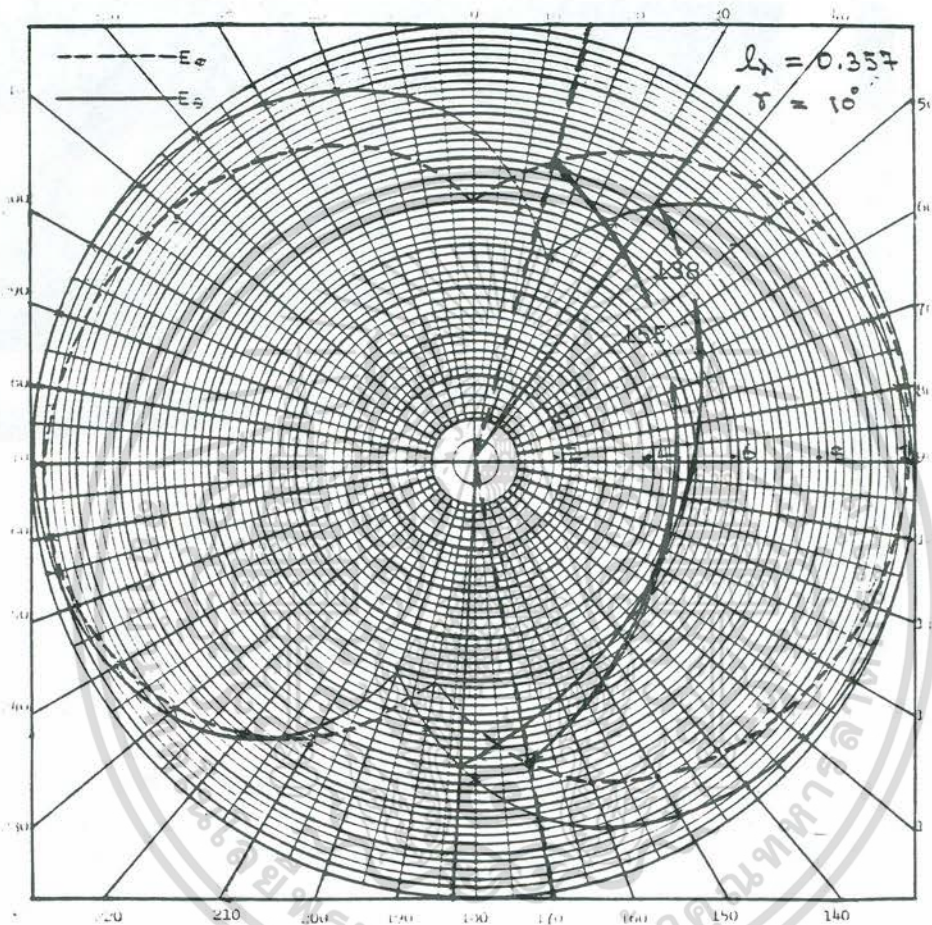


รูปที่ 4.7 ผลการวัดค่าความถี่ของระบบสายอากาศเกลียว

1 $\frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็ก 4 ตัว ที่ออกแบบให้สถานีวิทยุ อล.

สำหรับกระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศนั้น เนื่องจากสายอากาศทั้งระบบมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก จึงเป็นการสุดวิสัยที่จะทำการวัดกระบวนการแผ่คลื่นของระบบสายอากาศที่ออกแบบสร้างนี้ แต่อย่างไรก็ตาม ได้ทำการสร้างสายอากาศจำลองขึ้น 1 ตัว และทำการวัดกระบวนการแผ่คลื่นของตัวจำลอง ผลการวัดกระบวนการแผ่คลื่นที่ความถี่ 104 MHz นั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 จากรูปจะได้ axial ratio ประมาณ 1.02 ถึง 1.08 โดยประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

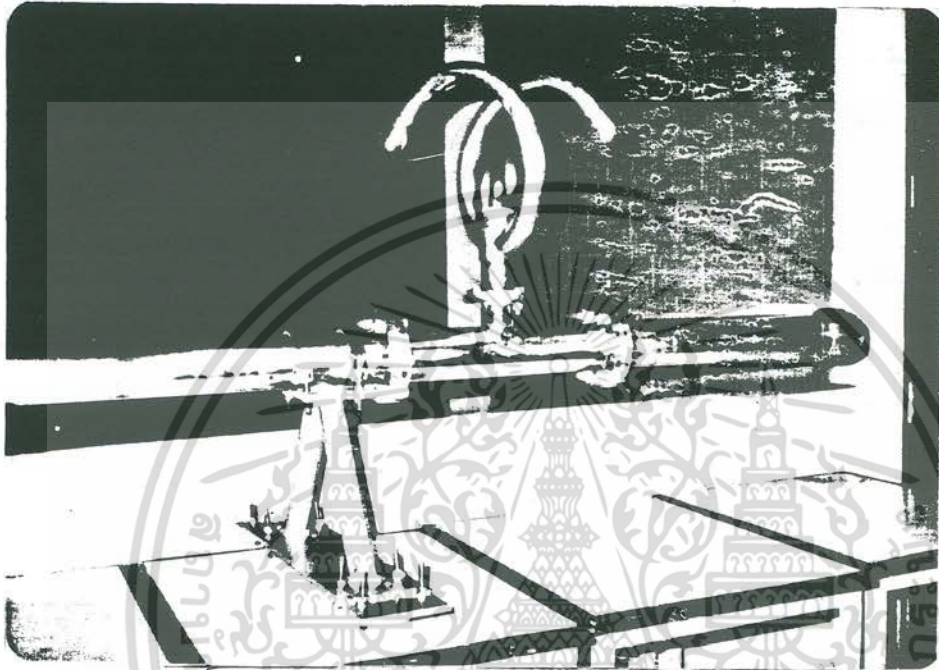


รูปที่ 4.8 กระบวนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว
ที่สร้างจำลองสายอากาศครึ่งที่ความถี่ 104 MHz

4.5 ลัรูป

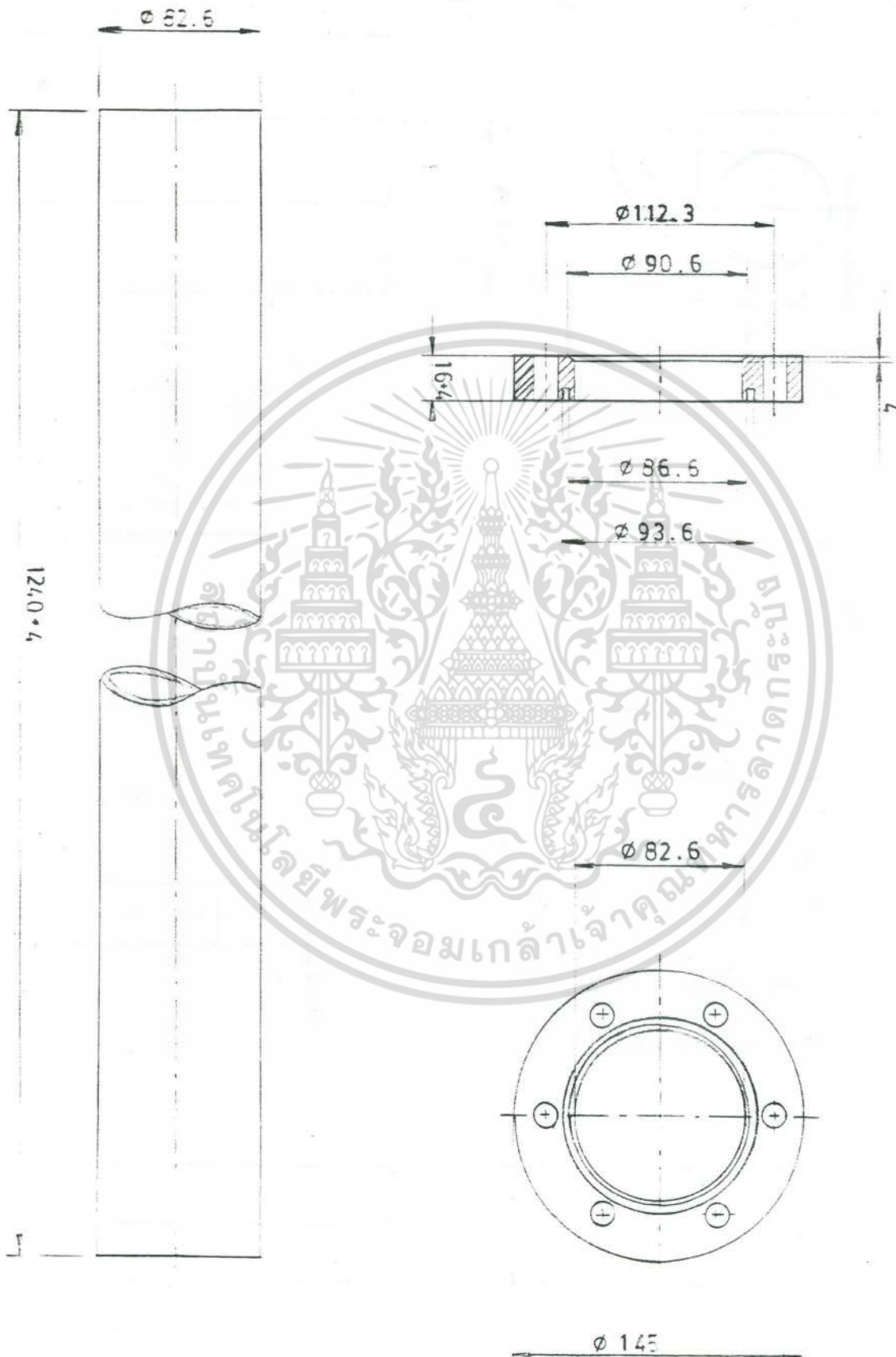
ผลจากการวัดทดสอบแสดงว่า ระบบสายอากาศเกลียวขนาดเล็กที่ออกแบบนี้ มีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้ทุกประการ ความสำเร็จนี้เป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่า ทั้งทฤษฎีและการทดลองที่ได้ศึกษามานั้น มีความถูกต้องและสามารถนำมาออกแบบสร้างระบบสายอากาศเพื่อใช้งานจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



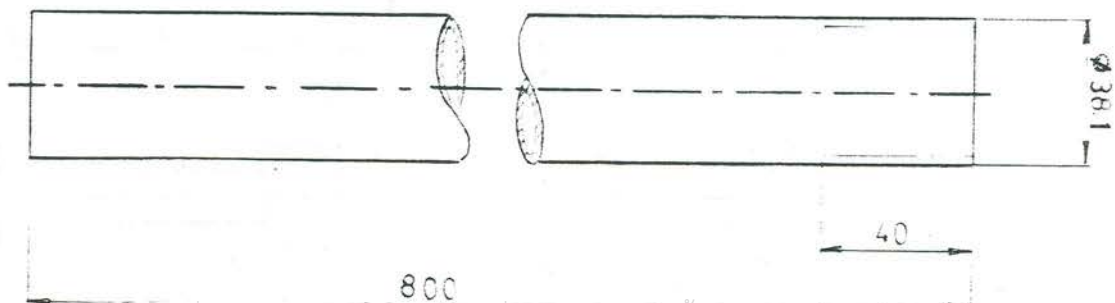
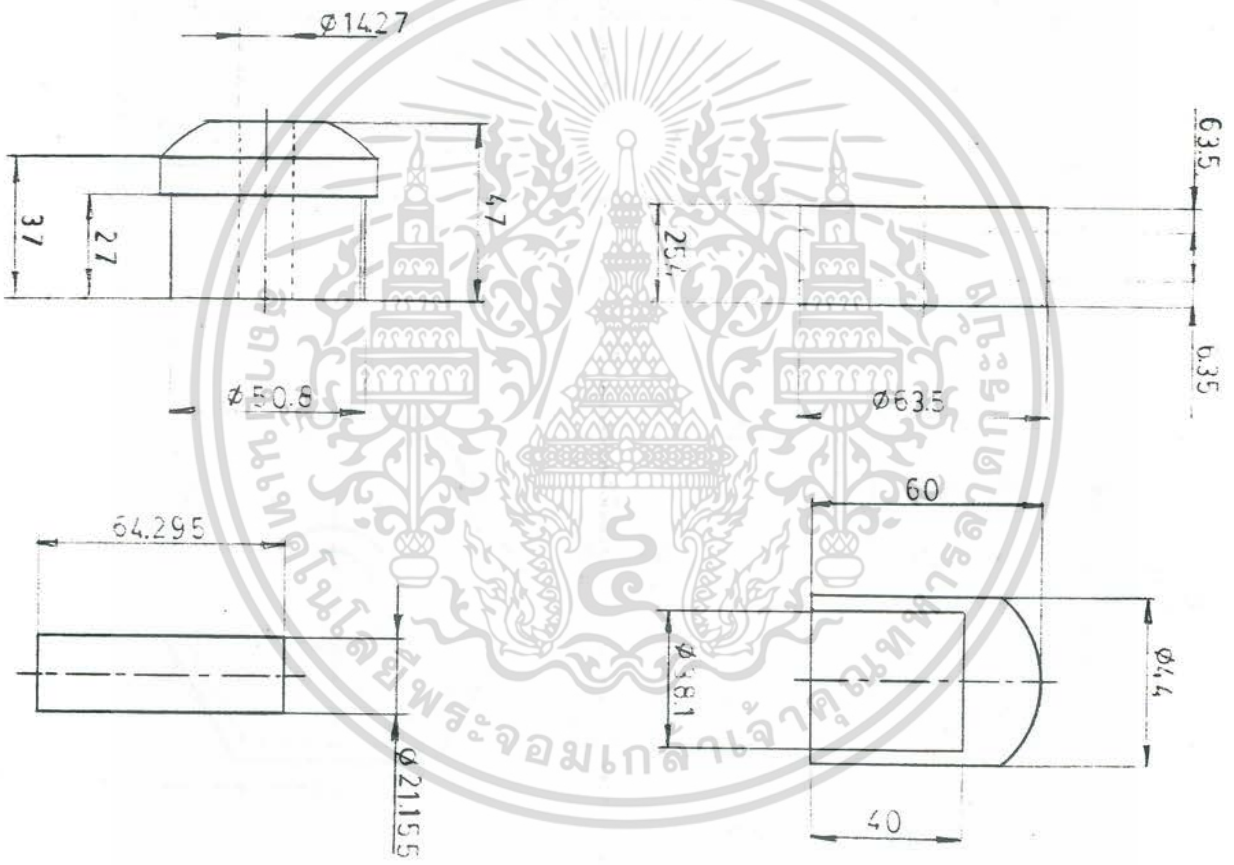
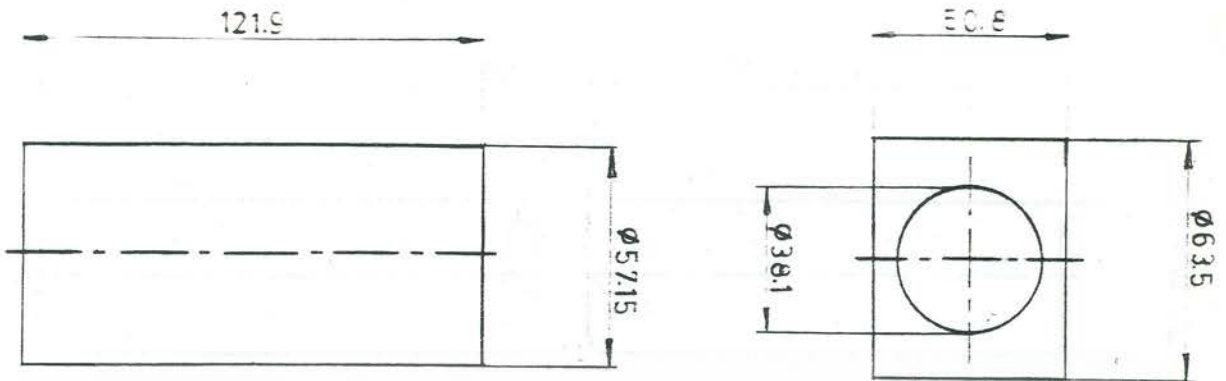
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายสายอากาศเกลียวที่ประกอบเข้ากับ
power divider และ coaxial ในลักษณะใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

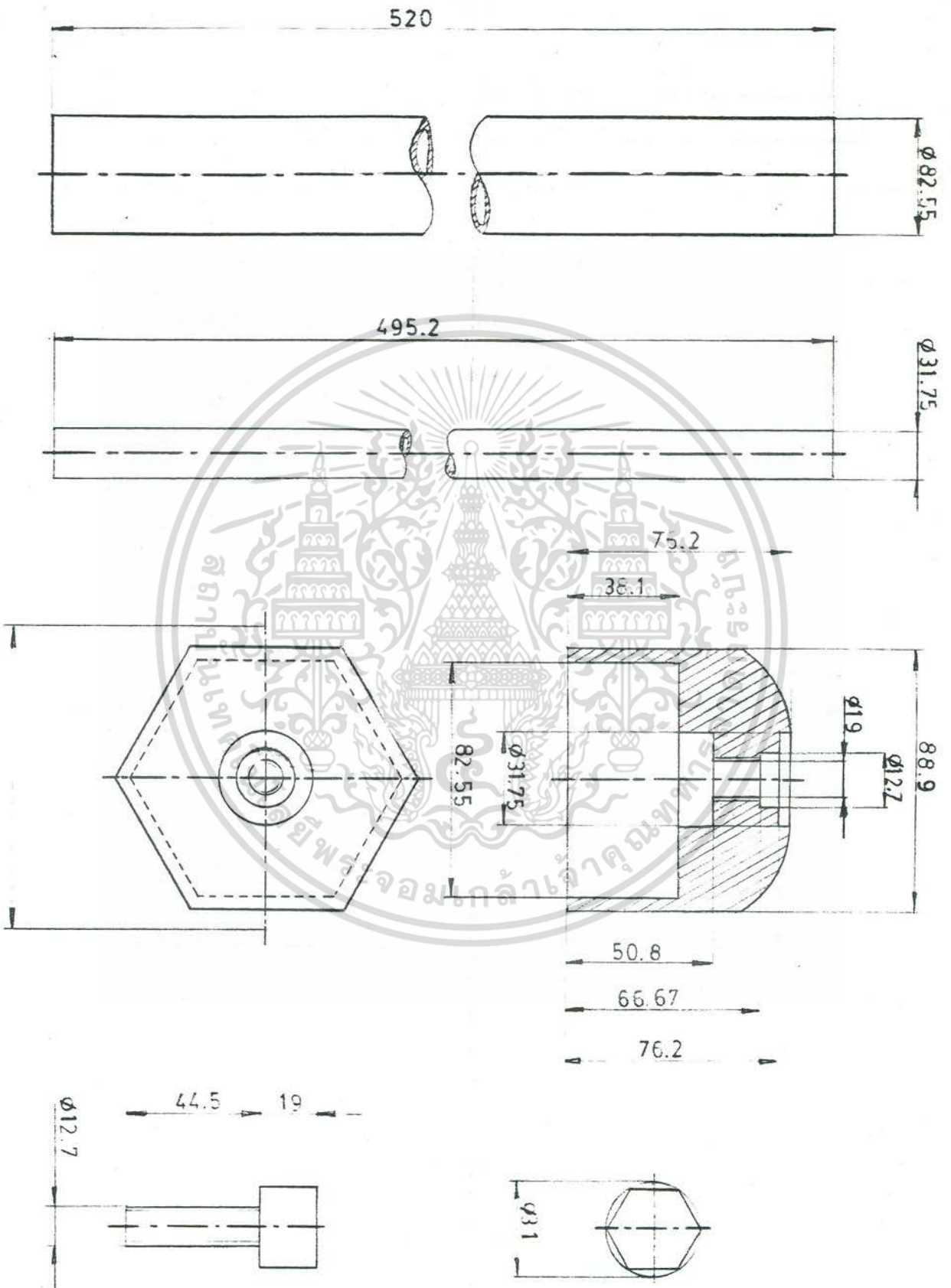


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.10 แบบแปลนของ coaxial และ power divider
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

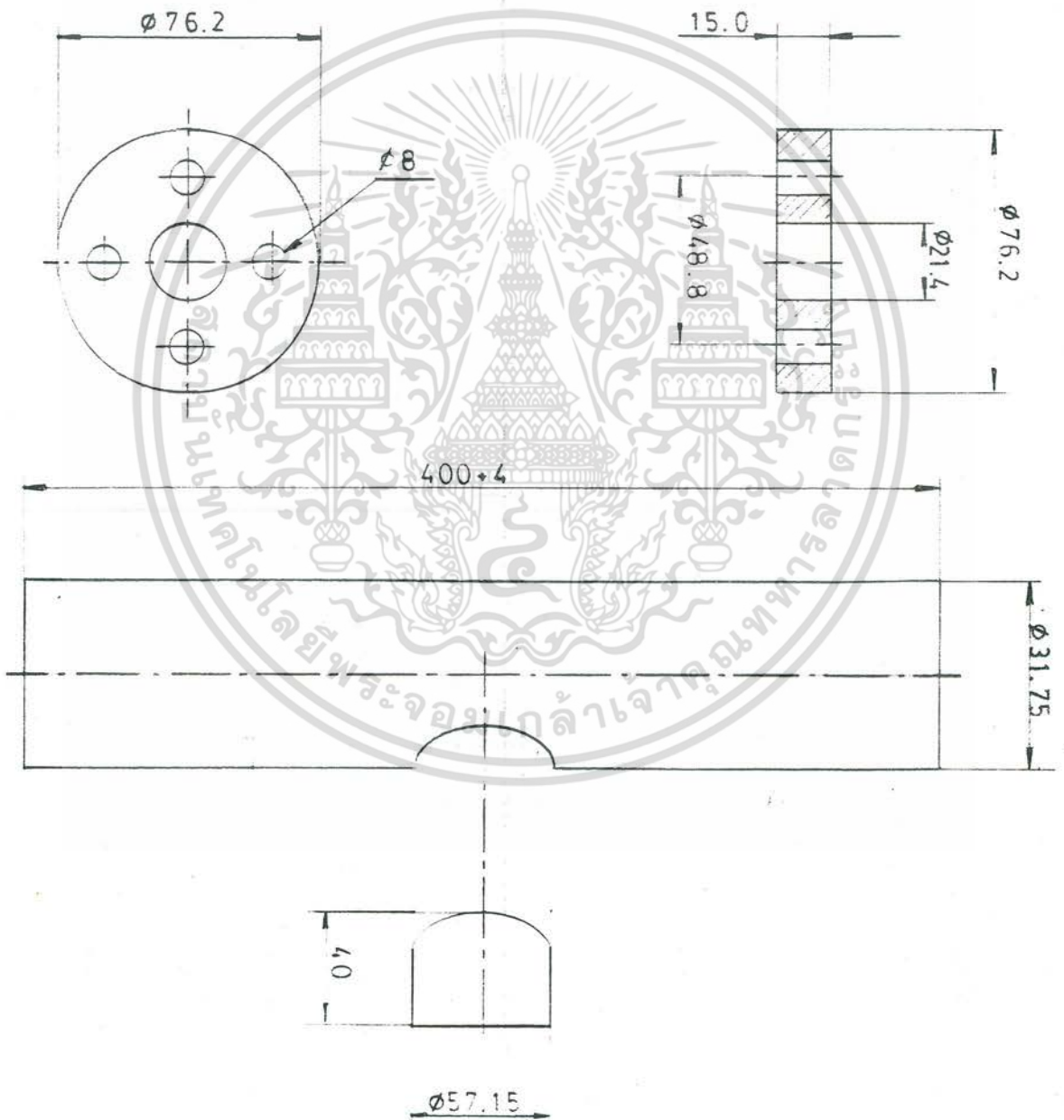
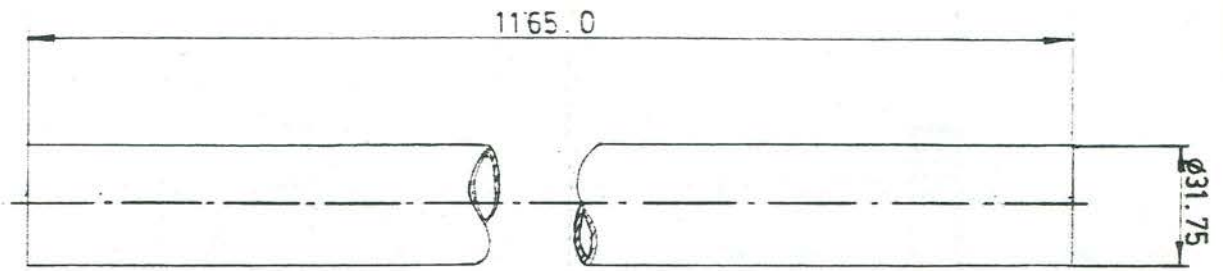
100



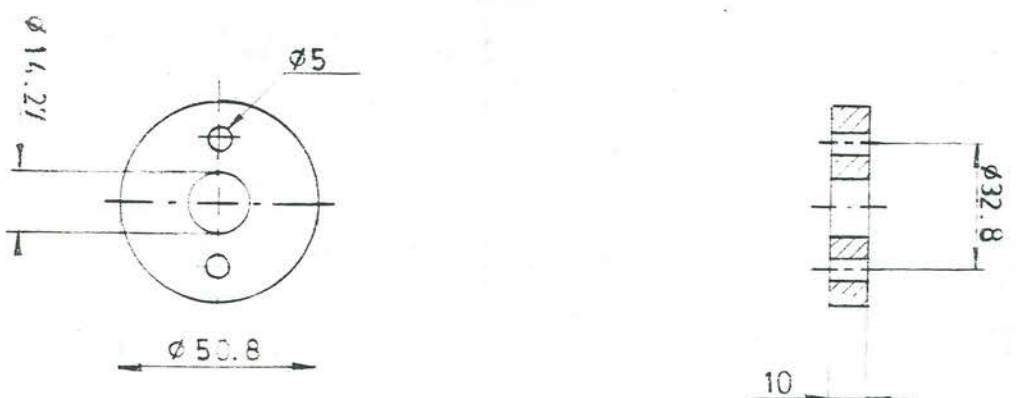
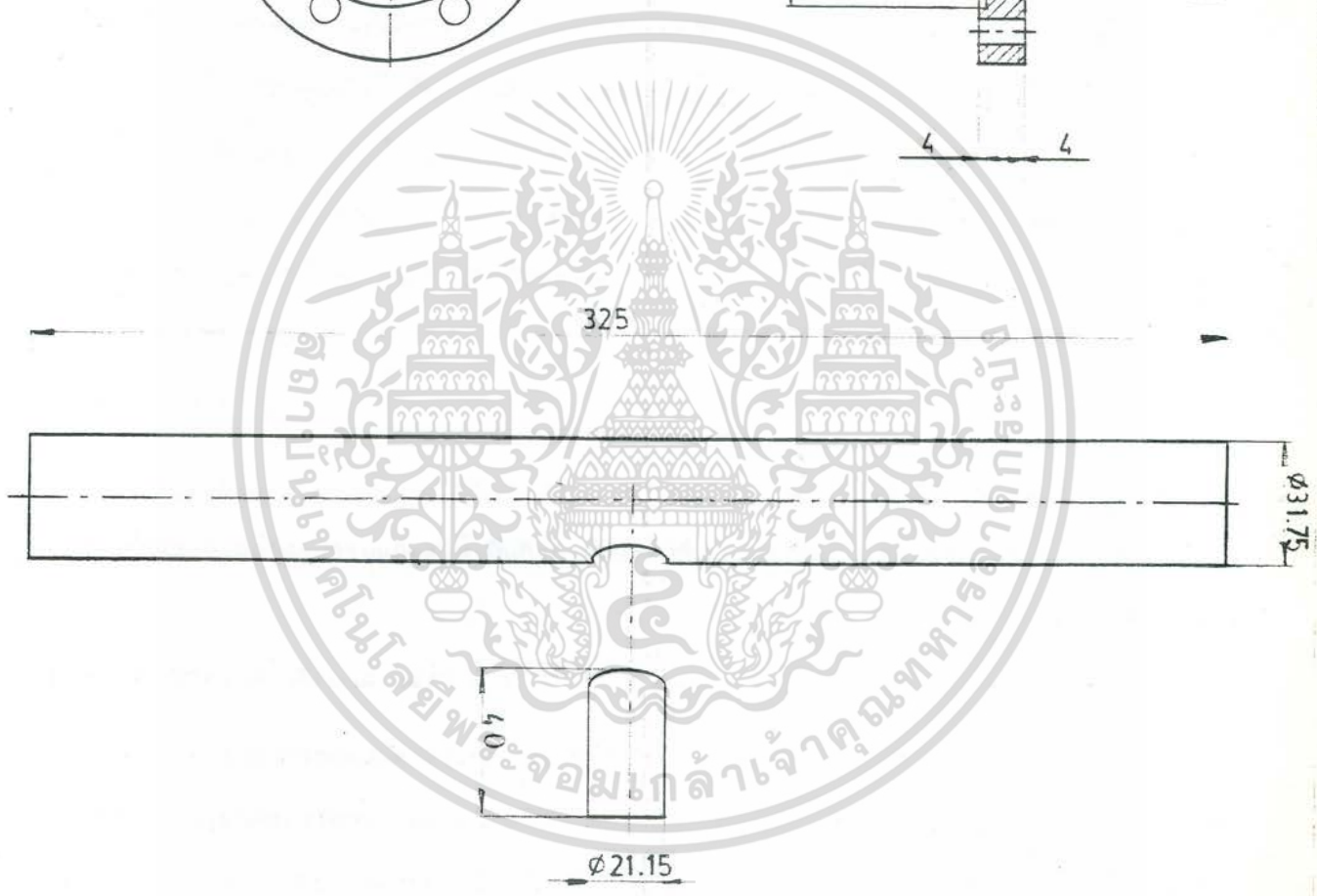
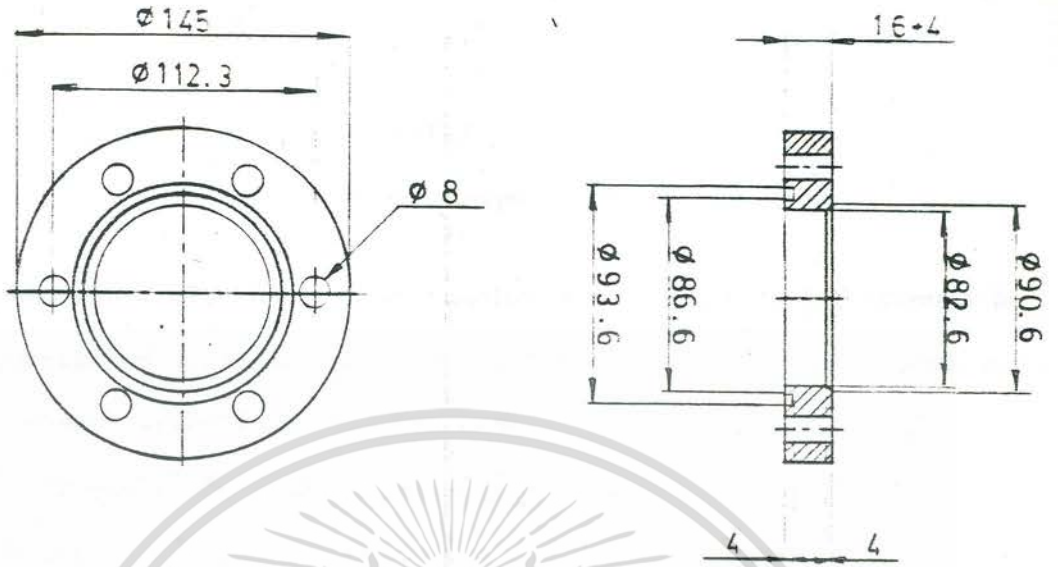
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 4.11 หน้าแบบแปลนของ coaxial และ power divider ารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.12 แบบแปลนของ coaxial และ power divider
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.14 แบบแปลนของ coaxial และ power divider
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิจารณ์และสรุป

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบกระแสส่วนการแผ่คลื่นของสายอากาศเกลียว $1 \frac{1}{2}$ รอบขนาดเล็กที่ได้จากการแจกแจงรูปกระแสไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ แบบสามเหลี่ยม และแบบ sinusoidal กับกระแสส่วนการแผ่คลื่นที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่า กระแสส่วนการแผ่คลื่นที่คำนวณจากการแจกแจงรูปกระแสไฟฟ้าเป็นแบบ sinusoidal นั้น มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าการแจกแจงรูปกระแสไฟฟ้าเป็นแบบอื่น การแจกแจงรูปกระแสไฟฟ้าแบบ sinusoidal นี้ สามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการรวมกันระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากจุดบ่อนกำลังงานกับกระแสไฟฟ้าที่สะท้อนกลับจากปลายทั้งสองของสายอากาศ ผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าทั้งสองทำให้เกิดเป็นคลื่นสถิตย์ที่มีลักษณะเป็น sinusoidal ความรู้เกี่ยวกับการแจกแจงของกระแสไฟฟ้าในตัวนำของสายอากาศนี้ ได้ถูกนำไปใช้คำนวณความถี่ของสายอากาศด้วยคอมพิวเตอร์ โดย numerical method

transformer model ของสายอากาศเกลียวที่นำเสนอมานี้ในบทที่ 2 นั้น แม้จะเป็นแบบจำลองอย่างง่าย แต่ก็สามารถแสดงให้เห็นถึงการแปรเปลี่ยนความถี่ทางเข้าของสายอากาศเกลียวตามตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และมีประโยชน์อย่างมากสำหรับเป็นแนวทางในการปรับจูนค่าความถี่ทางเข้าของระบบสายอากาศเกลียวที่ออกแบบสร้างสำหรับงานกระจายเสียง ระบบ FM ของสถานีวิทยุ อลิ.

เนื่องจากความจำกัดของเวลา ทำให้ยังมีหัวข้ออีกมากที่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ยังไม่ได้ทำการศึกษา ตัวอย่างเช่น การทดลองวัดการแจกแจงของกระแสไฟฟ้าของสายอากาศเกลียวที่มีจำนวนรอบน้อย การศึกษาวิธีทำให้สายอากาศมี bandwidth กว้างขึ้น การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับคำนวณความถี่ของสายอากาศ เป็นต้น หัวข้อเหล่านี้ ผู้ทำวิทยานิพนธ์ใคร่เสนอไว้เป็นหัวข้อวิจัยสำหรับผู้สนใจ

กิตติกรรมประกาศ

สืบเนื่องมาจากได้มีพระราชดำริจากพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว รัชสมัยผ่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี อักษรกิตติ ให้มีการวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศเกลียวขนาดเล็ก โดยมีพระราชประสงค์ที่จะนำผลที่ได้ไปประยุกต์ในการสร้างเป็นสายอากาศสำหรับงานวิทยุกระจายเสียงระบบ เอฟ เอ็ม สำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง อส. โดยกำหนดว่าสายอากาศต้องสามารถแผ่คลื่นออกรอบตัวเป็น circular polarization และมีค่าทวิกำลังพอสมควร ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในพระมหากรุณาธิคุณเป็นล้นเกล้าล้นกระหม่อมที่ได้ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ พระราชทานพระราชดำริให้มีการวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศเกลียวนี้ขึ้น

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ ดร.สุธี อักษรกิตติ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ปรึกษาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผบ.ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร กองบัญชาการทหารสูงสุด และกรมประชาสัมพันธ์ ที่ได้กรุณาให้ยืม เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลอง นายบุญเจริญ วงศ์กิติศึกษา ที่ได้ช่วยเหลืองานด้านคอมพิวเตอร์

ท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณนักศึกษาภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการทดสอบโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.A. Wheeler, "A Helical Antenna for Circular Polarization," Proc. I.R.E., vol. 35 pp. 1484-1488, Dec. 1947.
- [2] J.D. Kraus, "The Helical Antenna," Proc. I.R.E., vol 37 pp. 263-272, Mar. 1949.
- [3] E.C.Jordan and K.G.Balmain, Electromagnetic Wave and Radiating Systems, 2nd.ed. New Delhi: Prentice-Hall of India, 1979.
- [4] สินชัย อนันตปรีชา และสุธี อักษรกิตติ, "คุณสมบัติของสายอากาศห้วงห่อหุ้มและห้วงเปลือย," เล่มที่ 2 ไฟฟ้าสื่อสาร, การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 1 ของภาควิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วันที่ 29 - 30 มิถุนายน 2521.
- [5] W.E. Everitt and G.E. Anner, Communication Engineering, 3rd.ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1956.
- [6] W.L.Weeks, Antenna Engineering, New York: McGraw-Hill, 1968.
- [7] J.D. Kraus and K.R. Carver, Electromagnetics, 2nd.ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1973.
- [8] H.Jasik, Antenna Engineering Handbook, New York: McGraw-Hill, 1961.

ภาคผนวกที่ 1

ผลการวัดกระสวนการแผ่คลื่นในระนาบ yz ของสายอากาศเกลียว 1½ รอบ
ที่มีความยาวรอบ 0.357λ มุมปัด 10° การวัดกระทำที่ความถี่ 104 MHz

มุม (องศา)	E (V(dB))	Eφ (V(dB))	มุม (องศา)	E (V(dB))	Eφ (V(dB))	มุม (องศา)	E (V(dB))	Eφ (V(dB))
0	38.5	25.9	150	44.2	40.0	300	47.0	44.1
10	32.9	30.5	160	43.2	38.9	310	47.0	41.4
20	22.5	33.3	170	40.5	34.4	320	46.1	41.3
30	24.5	37.1	180	37.5	31.4	330	46.0	39.5
40	35.7	39.9	190	31.1	26.8	340	43.3	38.5
50	38.6	42.8	200	28.1	22.0	350	42.3	34.7
60	43.2	44.6	210	18.9	33.9	360	38.5	31.1
70	43.3	46.5	220	37.7	36.5			
80	46.1	46.5	230	40.3	39.5			
90	46.0	46.5	240	43.3	44.1			
100	47.0	46.5	250	44.1	44.2			
110	47.0	44.7	260	46.0	46.0			
120	47.0	42.7	270	46.1	46.0			
130	46.1	41.9	280	47.0	46.0			
140	46.0	40.8	290	47.0	44.2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 2

ผลการวัดความเข้มสนามไฟฟ้าที่ลดความเข้มสูงสุด
ของสายอากาศเกลียวที่มีมุม 5 และ 10 เทียบกับสายอากาศ
half-wave dipole ที่ความถี่ตั้งแต่ 85 MHz ถึง 400 MHz

ตาราง 1 ผลการวัดความเข้มสนามไฟฟ้าของสายอากาศเกลียว 5°

ความถี่	E_{θ} (VdB)	E_{ϕ} (VdB)	E_{dipole}	ความถี่	E_{θ} (VdB)	E_{ϕ} (VdB)	E_{dipole}
85	35	37	96	157.3	—	—	81
90	35	36	95	160	39	41	79
95	33	35	85	180	48	47	77
100	35	38	97	200	47	41	77
104	35	36	83	240	43	89	83
110	40	43	94	280	53	49	83
120	45	49	101	320	57	54	80
140	71	74	91	360	53	57	80
				400	51	47	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ผลการวัดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดของสายอากาศเกลียว 10°

ความถี่	E_θ (VdB)	E_ϕ (VdB)	E_{dipole}	ความถี่	E_θ (VdB)	E_ϕ (VdB)	E_{dipole}
85	43	37	96	160	66	64	79
90	41	37	95	180	42	39	77
95	43	39	85	200	55	43	77
100	43	41	97	240	51	48	83
104	41	35	83	280	57	57	83
110	40	37	94	320	50	67	80
120	44	43	101	360	69	57	80
140	51	50	91	400	64	59	78
157.3	78	71	81				

หมายเหตุ

จากผลการทดลองสำหรับสายอากาศเกลียวที่มีมุมบิด 10° ที่ได้นี้ เราสามารถคำนวณหา gain ของสายอากาศเทียบกับสายอากาศ half-wave dipole ที่ความถี่ 157.3 MHz มีค่า -0.9 สำหรับ E_θ และ -1.14 สำหรับ E_ϕ