

ระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปหาราโบล
ที่มีสายอากาศเฮลิคซ์เป็นค้วป้อนสัญญาณ

THE PARABOLOIDAL REFLECTOR ANTENNA SYSTEM
WITH HELIX FEED



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2530

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
Abstract	
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 ระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา	3
1.3 การวิเคราะห์กำลังขยาย	4
บทที่ 2. ระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา	6
2.1 โครงสร้างของระบบสายอากาศ	6
2.2 คุณสมบัติของจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา	7
2.3 คุณสมบัติของสายอากาศเซลิคซ์	12
2.4 การพิจารณาออกแบบสายอากาศเซลิคซ์เพื่อป้อนสัญญาณให้กับ จานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา	14
บทที่ 3. การวิเคราะห์กำลังขยายของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อน รูปพาราโบลา	18
3.1 หลักการวิเคราะห์กำลังขยายของระบบสายอากาศให้มี กำลังขยายสูงสุด	18
3.2 การกระจายของกระแสที่อะเพอเจอร์ของสายอากาศเซลิคซ์	20
3.3 แพทเทิร์นของสายอากาศเซลิคซ์	24
3.4 แพทเทิร์นของระบบสายอากาศ	31
3.5 กำลังขยายสูงสุดของระบบสายอากาศ	38
บทที่ 4. การทดสอบคุณสมบัติของระบบสายอากาศ	40
4.1 การวัดความกว้างแถบความถี่ในการใช้งานของสายอากาศ เซลิคซ์ในแกลกเทียลโหมด	40
4.2 การแมทชิ่งระหว่างระบบสายอากาศกับสายส่ง	42
4.3 การวัดแพทเทิร์นของสายอากาศเซลิคซ์	55

	หน้า
4.4 การวัดกำลังขยายของระบบสายอากาศ	64
4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	72
บทที่ 5. บทสรุป	75
กิตติกรรมประกาศ	78
เอกสารอ้างอิง	79



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการพิจารณาออกแบบระบบสายอากาศเพื่อให้ได้กำลังขยายสูงสำหรับการสื่อสารระยะไกล จึงได้นำระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลามาพิจารณาให้มีกำลังขยายสูงสุดโดยวิธีของ Lo และ Gilbert และนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ระบบสายอากาศที่ใช้ประกอบด้วยจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๔.๔๗ เมตร และมีสายอากาศเฮลิคซ์ที่ประกอบด้วยบราวด์เพลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑ เมตร ซึ่งออกแบบที่ความถี่ ๓๐๐ MHz และมีการแผ่พลังงานในแอกเซียลโหมคเป็นควมมือนสัญญาณในวางอยู่ที่จุดโฟกัสของจานสะท้อนคลื่น สายอากาศเฮลิคซ์ได้ออกแบบให้มีจำนวน ๓ รอบ ทำให้มีแพทเทิร์นของการแผ่พลังงานที่แผ่ออกไปยังจานสะท้อนคลื่นมีความกว้างลำ ๑๐ dB เพื่อลดการล้นออกไปของพลังงานที่ขอบจานสะท้อนคลื่นให้น้อยที่สุด จำนวนรอบของสายอากาศเฮลิคซ์ได้นำมาใช้กำหนดจำนวนเบสิสฟังก์ชัน และนำไปหาการกระจายของสนามที่อะเพอเจอร์ของสายอากาศเฮลิคซ์ตามหลักการของ Lo และ Gilbert และได้คำนวณหาแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกไปจากสายอากาศเฮลิคซ์และแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกไปจากระบบสายอากาศ รวมทั้งค่ากำลังขยายสูงสุดของระบบสายอากาศ และนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ผลการทดลองที่ความถี่ 280 MHz สามารถวัดค่ากำลังขยายได้ค่ามากที่สุดเท่ากับ 24.33 dBa ซึ่งน้อยกว่าผลที่ได้จากการคำนวณ 2.34 dB

Abstracts

In this thesis, an antenna system is determined on designing to have maximum gain for long distance communication. The optimum of the directive gain of the parabolic antenna system is determined by the principle of Lo and Gilbert and compared with the experimental result. The antenna system consists of 4.57 meters in diameter of a paraboloidal reflector and an axial mode helical antenna with a 1-meter-diameter ground plane. The helical antenna is designed at frequency 300 MHz as a feed, located at the focal point of the reflector. To reduce the edge spillover, the helix is designed to have 3 turns for 10 dB beamwidth of radiation pattern. The number of turns of the helix used to specify the number of basis functions and calculated the current distribution on the aperture of the helix in the principle of Lo and Gilbert. The power patterns of the helical antenna and the antenna system are calculated and compared with the experimental result. The measured directive gain at frequency 280 MHz is 24.33 dBa which is less than that of the calculated result about 2.34 dB.

1.1 ความเป็นมา

ระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการสื่อสารโทรคมนาคมในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งการใช้งานในระบบเรดาร์เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กัน เนื่องจากระบบสายอากาศดังกล่าวมีกำลังขยายสูงสามารถเลือกออกแบบตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) แบบใดแบบหนึ่ง เพื่อให้ได้รูปแบบของการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานตามที่ต้องการได้ ตัวอย่างของการใช้งานของสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นได้แก่ การติดต่อสื่อสารที่มีระยะทางห่างกันมาก ๆ ตั้งแต่ 160-200 กม. จนถึง 1120 กม. ก็สามารถจะใช้ระบบการสื่อสารที่อาศัยการสแคทเตอร์ (Scatter) ของคลื่นในย่านความถี่ 50-5000 MHz จากบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Scattering System) ได้โดยไม่ต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (Repeater Station) ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายลงเป็นอย่างมาก ในระบบการสื่อสารแบบนี้จะต้องใช้สายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 3.6 ถึง 36.5 เมตรมีกำลังขยาย (Gain) สูงและเครื่องส่งต้องมีกำลังส่งตั้งแต่ 1 ถึง 50 KW เนื่องจากในระหว่างที่คลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศจะมีพลังงานสูญหายไปเป็นจำนวนมาก [1]

อนึ่ง ในปัจจุบันการสื่อสารด้วยดาวเทียมซึ่งมีระยะห่างไกลมากกำลังเข้ามามีบทบาทในการส่งข้อมูลข่าวสารรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่นสามารถใช้การสื่อสารดาวเทียมในรูปแบบของการส่งสัญญาณเสียงหรือโทรพิมพ์ (Telex) หรือใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์จากสถานีถ่ายทอดไปยังบ้านเรือนต่าง ๆ โดยตรง หรือถ่ายทอดไปยังประเทศต่าง ๆ ที่อยู่ไปอีกซีกโลกหนึ่ง ตลอดจนใช้ในการสำรวจทรัพยากรต่าง ๆ ก็ได้ส่งสัญญาณภาพถ่ายต่าง ๆ ลงมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์บนภาคพื้นดิน เป็นต้น ในการรับส่งสัญญาณดาวเทียมที่กล่าวมาก็จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นที่มีกำลังขยายสูงทั้งสิ้น [2] - [5]

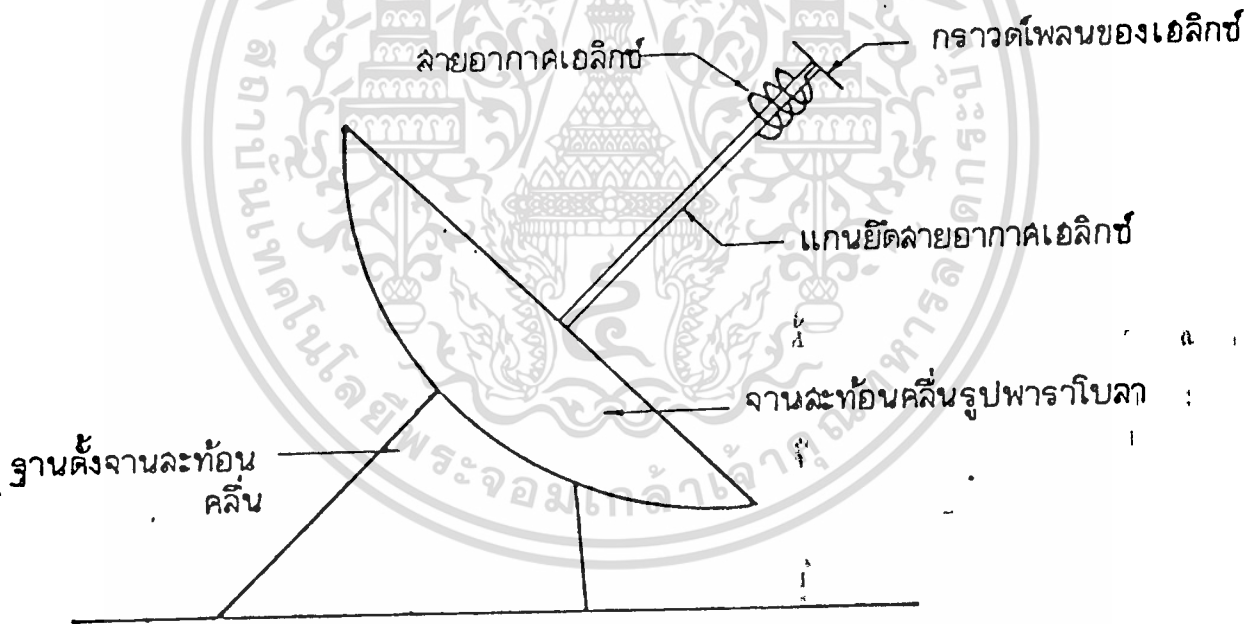
อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่เรดาร์ที่นำไปใช้ในการค้นหาเป้าหมาย เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ก็มักจะใช้สายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปหาราโบลากับคลื่นที่มีความถี่อยู่ในย่านไมโครเวฟกันเป็นส่วนใหญ่ [6] เนื่องจากสายอากาศแบบนี้จะมีขนาดของอะพอร์เจอร์ (Aperture) ของจานสะท้อนคลื่นที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ทำให้ลำคลื่นที่แผ่ออกไปมีความกว้างลำที่แคบ (Narrow Beamwidths) และมีกำลังขยายสูง สามารถใช้กวาด (Scanned) ค้นหาเป้าหมายและแยกแยะเป้าหมายที่อยู่ใกล้ ๆ กันได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นก็จะเห็นได้ว่า สายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นได้เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาทางการสื่อสารเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการสื่อสารติดต่อกันในระยะทางไกลมาก ๆ และในระบบเรดาร์ที่จะต้องใช้ลักษณะของลำคลื่นที่แคบมากก็ได้อาศัยประโยชน์จากคุณสมบัติของสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่น ซึ่งก็ได้มีผู้ที่ทำการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศดังกล่าวไว้เป็นจำนวนมาก เพื่อศึกษาคุณสมบัติเฉพาะบางอย่าง หรือในด้านการพัฒนาให้ระบบสายอากาศดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด อย่างไรก็ตามกำลังขยายของสายอากาศ (Gain) จะเป็นพารามิเตอร์ตัวแรกที่เราพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ [7] โดยในการออกแบบสายอากาศ เราจะต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบสายอากาศนั้น ๆ ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังขยายสูงสุด สำหรับกำลังขยายของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของจานสะท้อนคลื่นและคุณสมบัติของตัวป้อนสัญญาณ สำหรับตัวจานสะท้อนคลื่นจะมีคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาด ซึ่งจะแตกต่างกันไปสำหรับจานสะท้อนคลื่นแบบหนึ่ง ส่วนตัวป้อนสัญญาณก็จะพิจารณาถึงชนิดของตัวป้อนสัญญาณ และการออกแบบให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับจานสะท้อนคลื่น ในรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะขอเสนอการพิจารณากำลังขยายของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปหาราโบลามีสายอากาศเซลิคซ์เป็นตัวป้อนสัญญาณวางอยู่ที่จุดโฟกัสของจานสะท้อนคลื่นดังกล่าว ให้มีค่าสูงสุดโดยอาศัยหลักการของ Lo และ Gilbert [10] ซึ่งก่อนที่เข้าสู่การพิจารณาหลักการดังกล่าว เราจะต้องทราบถึงคุณสมบัติของระบบตลอดจนข้อพิจารณาในการออกแบบส่วนต่าง ๆ ของระบบอันได้แก่ ตัวจานสะท้อนคลื่น และสายอากาศเซลิคซ์ที่ใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณ โดยจะแยกกล่าวถึงระบบสายอากาศจานสะท้อนคลื่นรูปหาราโบลามีสายอากาศ

เฮลิคซ์ และการพิจารณาออกแบบสายอากาศเฮลิคซ์ให้เหมาะสมสำหรับป้อนสัญญาณให้กับ จานสะท้อนคลื่นที่ได้ออกแบบไว้แล้วไว้ในหัวข้อต่อไปและในบทที่ 2 ส่วนรายละเอียด ของหลักการที่ใช้พิจารณาข้างขยายให้มีความสูงที่สุดจะกล่าวไว้ในบทที่ 3

1.2 ระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา

ระบบของสายอากาศที่จะพิจารณาในบทวิทยานิพนธ์นี้ จะประกอบด้วยจาน สะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา (Paraboloidal Reflector) ที่มีสายอากาศเฮลิคซ์ ประกอบกับกราวด์เพลน (Ground Plane) เป็นตัวป้อนสัญญาณวางอยู่ที่จุดโฟกัส ดังรูป ที่ 1.1 จานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาเป็นจานสะท้อนคลื่นที่มีขนาดใหญ่ มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.1 แสดงระบบสายอากาศที่ประกอบด้วยจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเฮลิคซ์เป็นตัวป้อนสัญญาณ

ปานกลาง ค่าโคเรคทีวิตี (directivity) ของระบบสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของค่าโคเรคทีวิตีของตัวป้อนสัญญาณ และอัตราส่วนของความยาวโฟกัสของจานสะท้อนคลื่นกับ

เส้นผ่าศูนย์กลางของจานสะท้อนคลื่น

สำหรับสายอากาศเฮลิคซ์ที่ใช้เป็นตัวบ้อนสัญญาณได้ออกแบบที่ความถี่ 300 MHz และให้มีการแผ่พลังงานในแอกเซียลโหมด (Axial Mode) มีความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) ของการใช้งานประมาณ $3/4$ ถึง $4/3$ เท่าของความถี่ที่ออกแบบ และสะดวกในการบ้อนสัญญาณด้วยสายโคแอกเซียล [8] ในโหมดนี้สายอากาศเฮลิคซ์จะมีเส้นรอบวงประมาณ 1 เท่าของความยาวคลื่นและมีมุมเอียงอยู่ในช่วง 12 - 15 องศา และจะแผ่พลังงานออกไปมากที่สุดทิศทางเดียวกับแกนของสายอากาศซึ่งจัดเป็นลักษณะของสายอากาศที่มีลำแบบเอนด์ไฟร์ (End-Fire Beam Antenna) ค่าของไดเรกทิวิตี (Directivity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงในขณะที่เฮลิคซ์มีจำนวนรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบทำให้มุมของการแผ่พลังงาน (Beamwidth) แคบลง สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกไปก็จะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบวงกลม (Circular Polarized) ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติที่ดีเมื่อนำมาใช้ร่วมกับจานสะท้อนคลื่น เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ไปตกกระทบกับจานสะท้อนคลื่นจะมีทิศของโพลาไรเซชันต่างกับสนามไฟฟ้าที่สะท้อนออกไปจากจานสะท้อนคลื่น จึงทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อต้าน (Interaction) กันในขณะที่สนามทั้งสองเดินทางสวนกัน [9]

1.3 การวิเคราะห์การแผ่ขยาย

กำลังขยายนับว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการออกแบบสายอากาศ โดยทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นที่มีขนาดใหญ่ สำหรับกำลังขยายของสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปหาราไบล่า จะมีองค์ประกอบที่ขึ้นอยู่กับตัวจานสะท้อนคลื่นและตัวบ้อนสัญญาณ สายอากาศแบบนี้จะมีประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองประมาณ 65 % และที่ได้จากการคำนวณประมาณ 74 % โดยกำหนดให้ตัวบ้อนสัญญาณวางอยู่ที่จุดโฟกัสของจานสะท้อนคลื่น และพลังงานที่แผ่ออกไปจะต้องมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ขอบจานสะท้อนคลื่นน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่บริเวณกลางจานสะท้อนคลื่น 10 dB เพื่อให้แพทเทิร์น (Pattern) ของสนามไฟฟ้าที่กระจายออกไปจากจานสะท้อนคลื่นมีลักษณะเป็นโอบเดี่ยว (Main Lobe) และมีโอบข้าง (Side Lobe) น้อยที่สุด นอกจากนี้ ลำคลื่นของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกไปจากตัวบ้อนสัญญาณและ

ตกกระทบบนจานสะท้อนคลื่นจะต้องไม่มีปฏิกิริยาต่อต้านกับลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากจานสะท้อนคลื่น และการขวางกั้นเนื่องจากอะพอร์เจอร์ของตัวบ็อนสัญญาณ (Aperture Blockage) จะต้องมีผลน้อยที่สุด

อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบสายอากาศดังกล่าวไว้เป็นจำนวนมาก การเพิ่มกำลังขยายโดยวิธีหาความเหมาะสมของการกระจายสนามไฟฟ้าที่อะพอร์เจอร์ของจานสะท้อนคลื่นได้กระทำกันอย่างแพร่หลายต่อมา Lo และ Gilbert ได้หาวิธีเพิ่มกำลังขยายของสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาให้มีค่าสูงสุด โดยกำหนดให้การกระจายของสนามไฟฟ้าที่อะพอร์เจอร์ของตัวบ็อนสัญญาณอยู่ในรูปของสแตนด์การ์ดเฮอริทีเซียน (Standard Hermitian) และการกำหนดเบสิสฟังก์ชัน (Basis Function) ที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดโซลูชัน (Solution) ที่ดีที่สุดสำหรับตัวบ็อนสัญญาณแบบใดแบบหนึ่งและมีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่กำหนดไว้

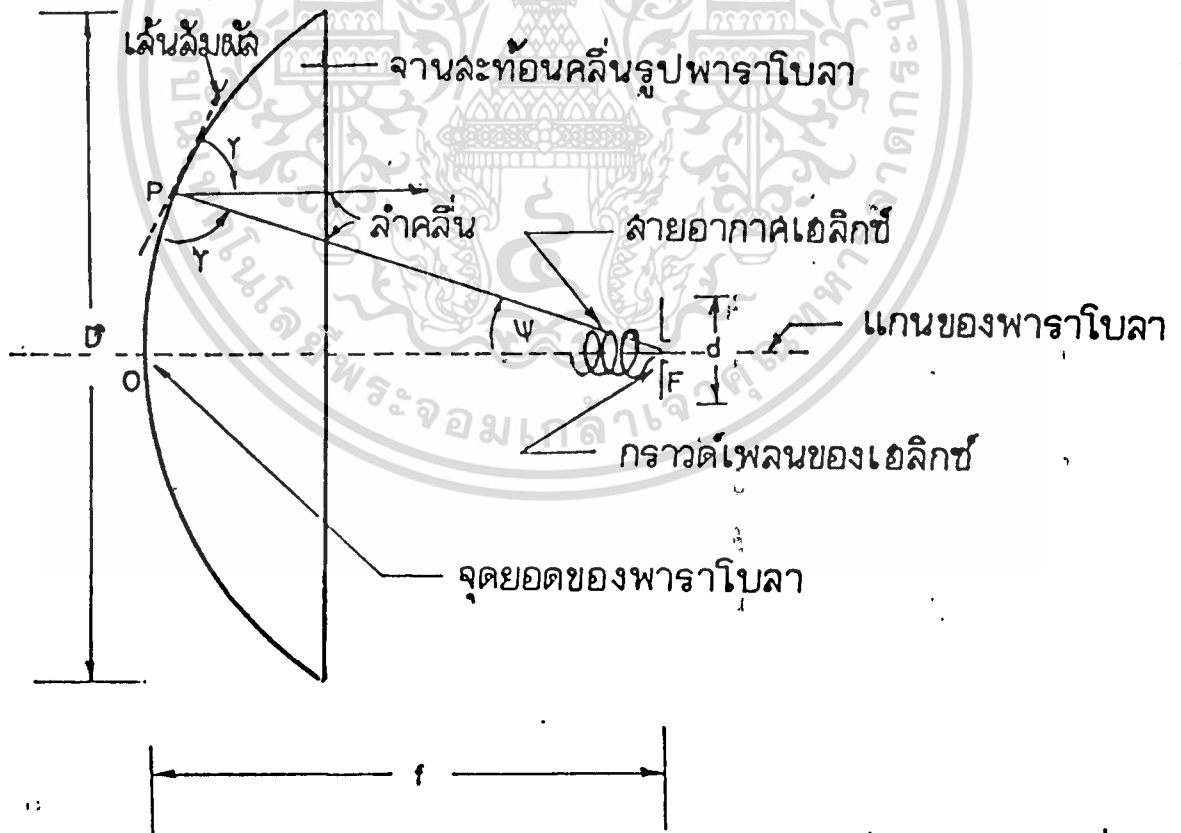
วิธีของ Lo และ Gilbert จะนำมาใช้ในการหาค่ากำลังขยายสูงสุดของระบบสายอากาศที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.2 โดยได้ออกแบบสายอากาศเฮลิคซ์ในแอกเซียลโหมดที่มีความถี่ 300 MHz ประกอบด้วยกราวด์เพลนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร วางอยู่ที่จุดโฟกัสของจานสะท้อนคลื่นที่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.57 เมตร สายอากาศเฮลิคซ์ได้ออกแบบให้มีจำนวน 3 รอบ เพื่อให้ความกว้างลำของไพรมารีแพทเทิร์น (primary Pattern) เป็น 10 dB (10 dB beamwidth) เพื่อไม่ให้เกิดการล้นออกไปของพลังงานที่ขอบจาน (Spillover) และจากวิธีดังกล่าวเราสามารถคำนวณค่ากำลังขยายสูงสุดของระบบสายอากาศนี้ได้ 27.00 dBa ที่ความถี่ 300 MHz เมื่อใช้จำนวนเบสิสฟังก์ชัน = 3 และจากการทดสอบวัดค่ากำลังขยายสูงสุดของระบบสายอากาศที่ความถี่ 280 MHz พบว่ากำลังขยายสูงสุดมีค่าเท่ากับ 24.33 dBa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจะน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ 2.34 dB

บทที่ 2

ระบบสายอากาศแบบจวนสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา

2.1 โครงสร้างของระบบสายอากาศ

โครงสร้างของระบบสายอากาศที่พิจารณาประกอบด้วยจวนสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเฮลิคซ์ประกอบด้วยกราวด์เพลนเป็นตัวป้อนสัญญาณวางอยู่ที่จุดโฟกัสที่จุด F ของจวนสะท้อนคลื่นดังรูป 2.1 จุดยอดของพาราโบลา (Vertex) คือจุดที่แกนของพาราโบลาตัดกับส่วนโค้ง (Curve) ของพาราโบลาที่จุด O ด้านปลายเปิดของพาราโบลาที่อยู่ตรงข้ามกับจุดยอดเรียกว่าอะพอกเจอร์ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ D และระยะทางจากจุดยอดไปยังจุดโฟกัส F ก็คือความยาวโฟกัส f อัตราส่วนของความยาวโฟกัสกับขนาดของอะพอกเจอร์ คือ อัตราส่วนของ f/D นับว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการพิจารณากำลังขยายของระบบสายอากาศแบบจวนสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศแบบจวนสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเฮลิคซ์เป็นตัวป้อนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากจะมีผลต่อการขวางกันของอะโพเจออร์

สายอากาศเฮลิคซ์ที่ใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณได้ออกแบบให้มีการแผ่พลังงานใน แอกเซียลโหมค จะมีลักษณะเป็นขดลวดตัวนำที่ขดเป็นเกลียวประกบอยู่กับแผ่นโลหะตัวนำ ที่เรียบเรียกว่ากราวด์เพลน กราวด์เพลนนี้จะตั้งฉากกับแกนของเฮลิคซ์ที่จุดป้อนสัญญาณ (Feed Point) และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคซ์ที่มีการแผ่พลังงานในโหมคนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ, เส้นรอบวงของเฮลิคซ์, ระยะห่างระหว่างรอบ และมุมเอียงของเฮลิคซ์ สายอากาศเฮลิคซ์นี้จะวางตำแหน่งกราวด์เพลนอยู่ที่ จุดโฟกัสของจานสะท้อนคลื่น และมีแนวแกนทับกับแนวแกนของพาราโบลา ลำคลื่น (Ray) ที่แผ่ออกไปจากสายอากาศเฮลิคซ์จะทำมุม ψ กับแกนของพาราโบลา จุด P เป็นจุดที่ ลำคลื่นมาตกกระทบบนผิวของพาราโบลา และจะตั้งฉากกับเส้นสัมผัสที่ลากเป็นเส้นประที่ จุดนั้น จากกฎของการสะท้อนคลื่นก็จะพบว่าจะมีลำคลื่นสะท้อนออกไปจากจุด P และทำ มุมกับเส้นสัมผัสเท่ากับมุมที่ลำคลื่นที่มาตกกระทบบนเส้นสัมผัสที่จุด P นั่นคือ ลำคลื่น ที่สะท้อนออกไปจะขนานกับแกนของพาราโบลา ในทางกลับกันลำคลื่นที่ขนานกับแกนของ พาราโบลาเมื่อมาตกกระทบบนผิวจานก็จะสะท้อนไปรวมกันที่จุดโฟกัสของจานสะท้อนคลื่น

2.2 คุณสมบัติของจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา

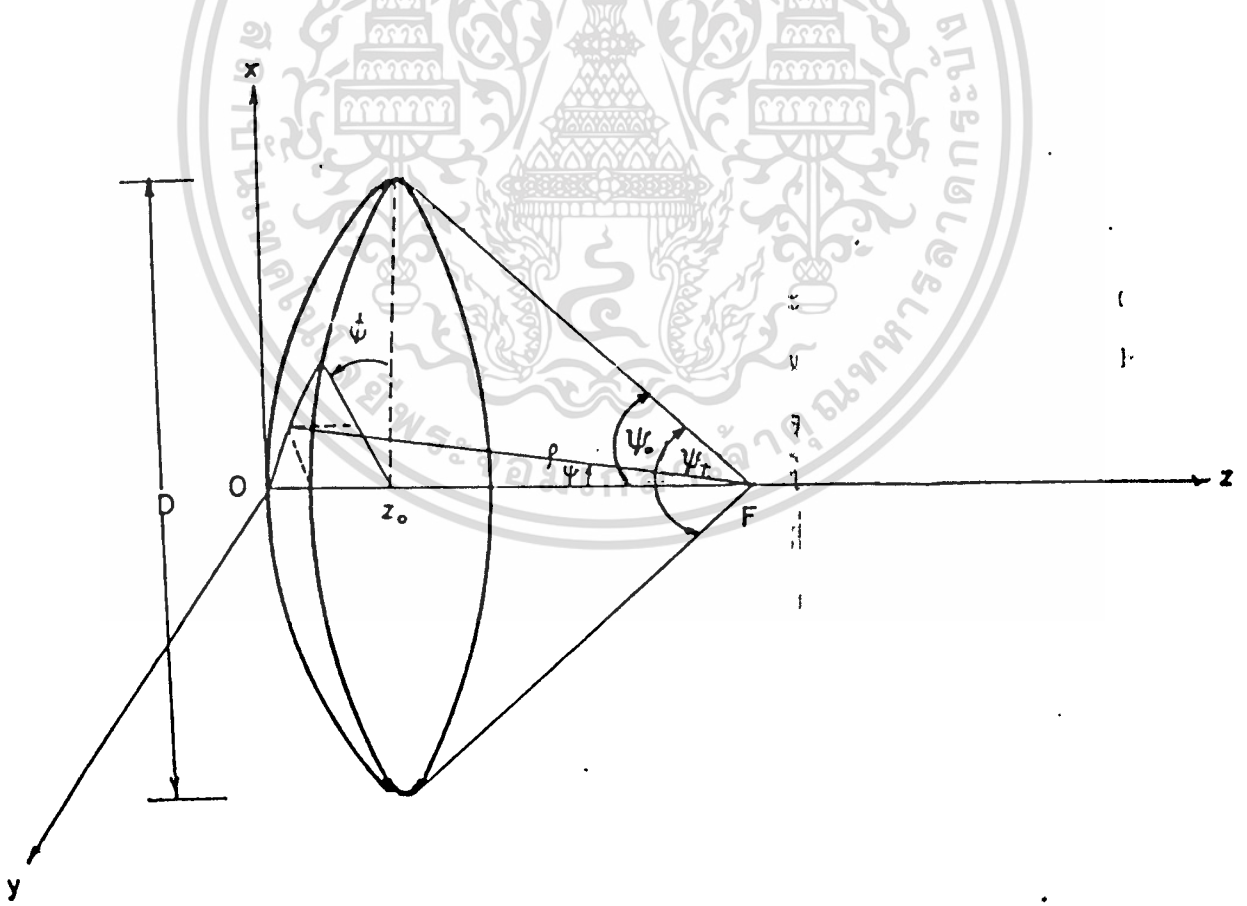
ผิวของจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาคตามรูปที่ 2.2 เกิดจากการหมุนของรูปทรง พาราโบลารอบ z แกน z ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (cartesian coordinate) ซึ่ง รูปทรงของพาราโบลาก็ได้จะมีลักษณะที่สมมาตรกับแกน x และมีจุดยอด (Vertex) อยู่ที่จุด O (จุดกำเนิด) พาราโบลามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D และมีจุดโฟกัสอยู่ที่จุด F , ρ เป็นลำคลื่นที่แผ่ออกมาจากจุด F ไปยังจุดใด ๆ บนผิวของพาราโบลาและจะทำมุม ψ กับแกน z ที่จุด F และระยะห่างระหว่าง ρ กับแกน z จะทำมุม ϕ กับแกน x , z_0 เป็นจุดตัดของแกน z กับระยะห่างของอะโพเจออร์ของพาราโบลา สมการของ พาราโบลาในพิกัดคาร์ทีเซียน คือ

$$x^2 + y^2 = 4fz \tag{2.1}$$

เมื่อ $f = OF$ เป็นความยาวโฟกัสของพาราโบลา

ในการแสดงความสัมพันธ์ของลำคลื่นที่แผ่กระจายออกจากตัวบ่อนสัญญาณไปยังจานสะท้อนคลื่น เราจะนำจานสะท้อนคลื่นไปพิจารณาในพิกัดทรงกลม (Spherical Coordinate) ρ, ψ, ϕ ที่มีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดโฟกัสที่จุด F และมีแกนของพาราโบล่าอยู่ในแนวของแกน z ลำคลื่นที่แผ่ออกไปจากจุด F ไปยังขอบจานสะท้อนคลื่นจะหักมุม ψ_0 กับแกน z และมุม ψ_T จะเป็นมุมที่รองรับลำคลื่นที่แผ่ออกไปจากจุดโฟกัสไปยังขอบจานสะท้อนคลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\psi_0$ และสามารถหาความสัมพันธ์ของลำคลื่นที่มาตกกระทบบนผิวของจานสะท้อนคลื่นกับลำคลื่นที่สะท้อนออกไปได้ โดยพิจารณาทางเดินของลำคลื่นจากกฎการเดินทางของคลื่นแสง (Optical path) จากจุด F ไปยังอะพอเจอร์ของจานสะท้อนคลื่นได้ดังนี้

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \psi} = f \frac{\sec^2(\psi)}{2} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 แสดงผิวของพาราโบล่าที่เกิดจากการหมุนของรูปพาราโบลารอบแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาคี่นจากจุดโฟกัสที่มาตกกระทบกับผิวหาราโบล่าที่จุด (x, z) . เมื่อหาราโบล่าอยู่ในระนาบ $y = 0$ ตามรูปที่ 2.3 ซึ่งลาคี่นดังกล่าวจะห่ามุม α_1 กับเส้นปรกติที่ตั้งฉากกับเส้นลัมผัส QP ที่จุด P และจะมีลาคี่นที่สะท้อนออกไปจากจุดนั้นห่ามุม β_1 กับเส้นปรกติ เส้นลัมผัส QP จะห่ามุม α_1 กับลาคี่นที่มาตกกระทบและมีค่าเท่ากับมุม FQP เราสามารถหาความชันที่จุดใด ๆ บนผิว ของจานสะท้อนคี่นได้โดยการหาอนุพันธ์ (differentiate) ของสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$\frac{dx}{dz} = \frac{2f}{x} = \tan \alpha_1. \quad (2.3)$$

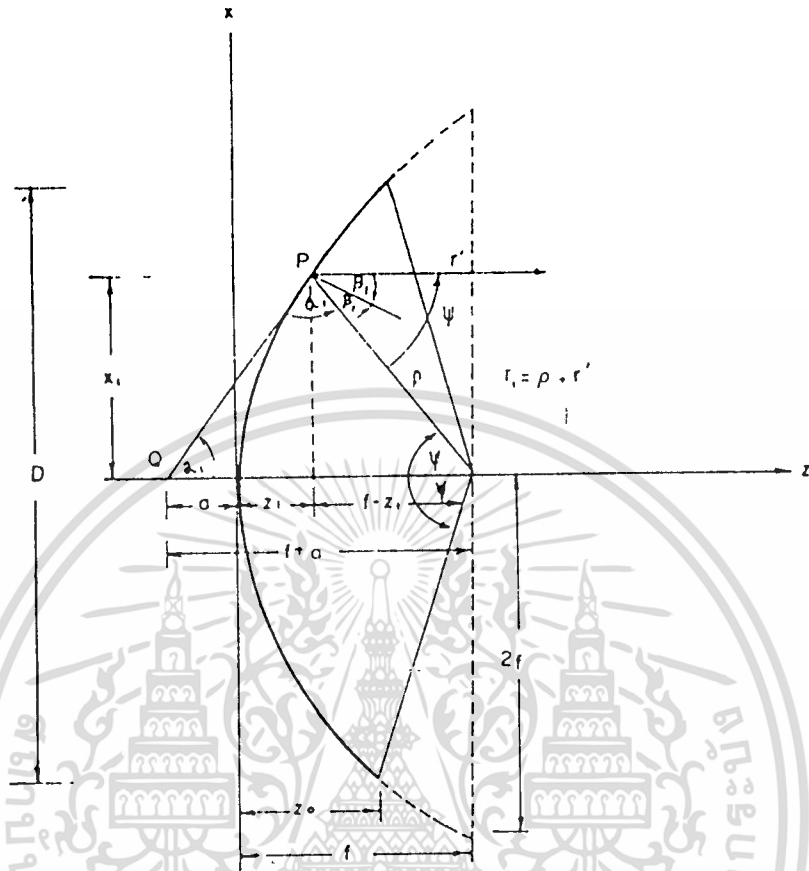
เส้นลัมผัสที่ลากจากจุด (P) มาดัดกับแกน z ที่จุด Q ทางด้านหลังของจุดยอดของจานสะท้อนคี่นหาได้จาก

$$a + z_1 = \frac{x_1}{\tan \alpha_1} = \frac{x_1^2}{2f} = \frac{4fz_1}{2f} = 2z_1 \quad (2.4)$$

หรือ

$$a = z_1 \quad (2.5)$$

- เมื่อ z_1 เป็นระยะทางจากจุดยอดของหาราโบล่ามายังจุดที่มีเส้นลากตั้งฉากจากแกน z ไปยังจุด P
 a เป็นระยะทางจากจุดยอดของหาราโบล่าไปยังจุด Q



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทางเรขาคณิตของรูปหาราโบล

นั่นคือเราจะสามารถหาความยาวของล้าเส้นจากจุดโฟกัสมายังจุดใด ๆ บนหาราโบลได้จาก

$$\rho = \left[(f - z_1)^2 + x_1^2 \right]^{1/2} = (f^2 - 2fz_1 + z_1^2 + 4fz_1)^{1/2} = f + z_1 \quad (2.6)$$

เมื่อ x_1 เป็นความยาวของเส้นที่ลากจากจุด P มาตั้งฉากกับแกน z

และระยะ ρ นี้ จะมีความยาวเท่ากับระยะทางจากจุดโฟกัสไปยังจุดตัดของเส้นสัมผัสกับแกน z ฉะนั้น $\triangle PQF$ จะเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่วและจะมีมุม \widehat{QPF} เท่ากับมุม \widehat{FQP} และเราสามารถหามุมที่ล้าเส้นมาตกกระทบบที่จานสะท้อนคลื่นได้ดังนี้

$$\beta_i = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 = \frac{1}{2} (\pi - 2\alpha_1) = \frac{\psi}{2} \quad (2.7)$$

จากกฎของสเนลล์ (Snell's Law) มุมที่ลำคลื่นมาตกกระทบจะเท่ากับมุมที่ลำคลื่นสะท้อนออกไป ฉะนั้นมุมที่อยู่ระหว่างลำคลื่นที่มาตกกระทบกับลำคลื่นที่สะท้อนออกไปก็จะเท่ากับมุมระหว่างลำคลื่นที่มาตกกระทบทำกับแกน z ที่จุดโฟกัส ดังนั้นลำคลื่นที่สะท้อนออกไปก็จะขนานกับแกน x เมื่อรวมความยาวของลำคลื่นทั้งหมดจากจุดโฟกัสไปยังจานสะท้อนคลื่นและลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากจานสะท้อนคลื่นจนถึงระยะ $z = f$ จะได้

$$r_1 = \rho + (f - z_1) = 2f \quad (2.8)$$

นั่นคือความยาวของ r_1 ไม่ขึ้นกับตำแหน่งของจุดสะท้อนและทิศทางที่ลำคลื่นสะท้อนออกไปก็ไม่ขึ้นกับตำแหน่งของจุดสะท้อนด้วยลำคลื่นทั้งหมดที่ออกไปจากจุดโฟกัสเมื่อตกกระทบที่ผิวของจานสะท้อนคลื่นและสะท้อนออกไปแล้วจะมีทิศทางเดียวกัน (ขนานกับแกน z) และมีความยาว r_1 ที่ระยะ $z = f$ เท่ากัน

อนึ่งมุมที่รองรับลำคลื่นจากจุดโฟกัสไปยังจานสะท้อนคลื่นกับแกน z คือ

$$\tan \psi = \frac{x_1}{f - z_1} \quad (2.9)$$

และกำหนดให้มุม ψ_T เป็นมุมทั้งหมดที่รองรับลำคลื่นจากจุดโฟกัสไปยังขอบของจานสะท้อนคลื่น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลาง d ดังนี้

$$\psi_T = 2\psi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{d/2}{f - d/2\sqrt{16}} \right) = 2 \tan^{-1} \left[\frac{1/2(f/d)}{(f/d)^2 - 1/16} \right] \quad (2.10)$$

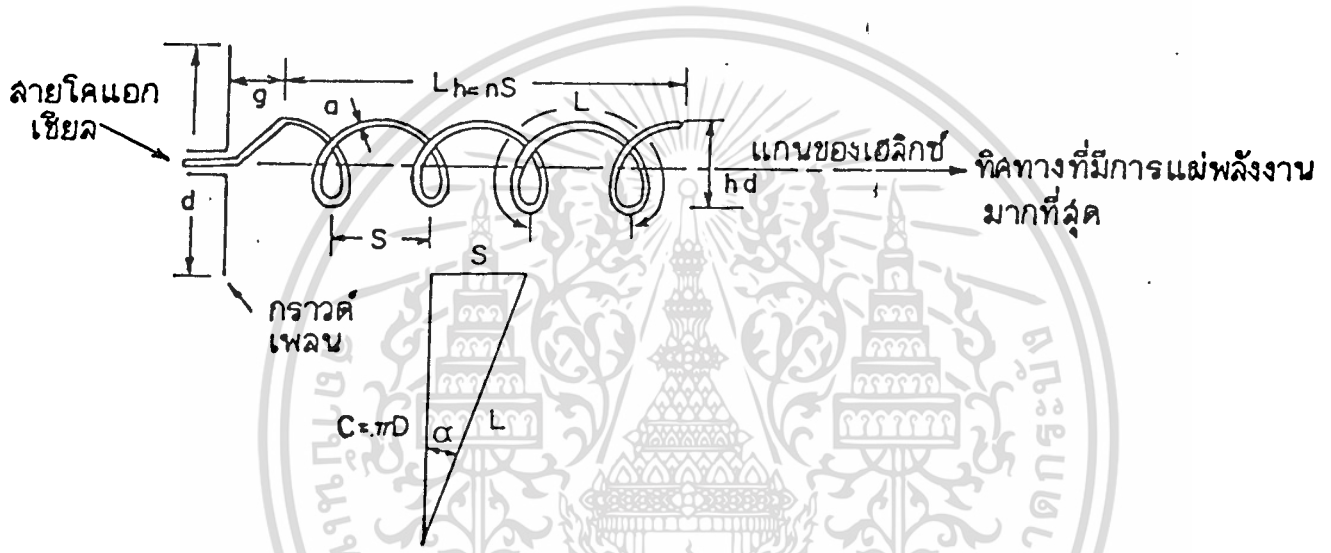
เมื่อ ψ_0 เป็นมุมที่รองรับลำคลื่นจากจุดโฟกัสไปยังขอบของจานสะท้อนคลื่นกับแกน z

2.3 คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคซ์

2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคซ์

สายอากาศเฮลิคซ์ในแอกเซียลโหมดมีโครงสร้างดังแสดงให้เห็นในรูปที่

2.4 จะประกอบด้วยสายโคแอกเซียล (Coaxial-line) และกราวด์เพลน (Ground-



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของสายอากาศเฮลิคซ์

plane) สายอากาศเฮลิคซ์ในโหมดนี้จะมีขนาดของเส้นรอบวงประมาณ 1 เท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ออกแบบ มีมุมเอียง (Pitch Angle) อยู่ในช่วง 12 ถึง 15 องศา แต่ในการออกแบบทั่วไปพบว่ามุมเอียงที่มีขนาด 14 องศา มีความเหมาะสมที่สุด และขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.4 คือ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง hd , ความยาวของเส้นรอบวง C , ระยะระหว่างรอบ S , ความยาวต่อ 1 รอบ L , มุมเอียง α , ความยาวของแกน L_h , ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำที่ใช้ขดเป็นเฮลิคซ์ a , ระยะห่างจากกราวด์เพลนถึงจุดที่เริ่มขดเป็นเฮลิคซ์ g และเส้นผ่าศูนย์กลางของกราวด์เพลน d สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่แสดงอยู่ในเทอมของความยาวคลื่นในบรรยากาศ (Free Space) ที่ความถี่ที่ใช้ออกแบบ (Center Frequency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

ขนาดของเส้นรอบวง : $C = 1 \lambda$

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง : $h_d = 0.32 \lambda$

ระยะห่างระหว่างรอบ : $S = 0.22 \lambda$

เส้นผ่าศูนย์กลางของกราวด์เพลน : $d \geq 0.8 \lambda$

เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ขด : $a = 0.02 \lambda$

ระยะห่างจากกราวด์เพลนถึงจุดที่เริ่มขดเป็น (เฮลิคซ์) : $g = S/2 = 0.11 \lambda$

มุมเอียง : $\alpha = 12 - 15$ องศา (2.11)

2.3.2 คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคซ์

สายอากาศเฮลิคซ์ที่ออกแบบในเอกเซียลโหมด จะมีช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ตั้งแต่ 3/4 ถึง 4/3 เท่าของความถี่ที่ใช้ออกแบบและจะมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power Beamwidth) ดังนี้

$$BW = \frac{52}{\frac{C}{\lambda} \sqrt{\frac{ns}{\lambda}}} \text{ deg} \quad (2.12)$$

เมื่อ BW^i = มุมกว้างของลำคลื่นที่แผ่ออกไปเมื่อวัดจากจุดที่มีพลังงานต่ำลงมาจากจุดยอด 3 dB

C = เส้นรอบวงของเฮลิคซ์

n = จำนวนรอบของเฮลิคซ์

0

และจะมีค่ากำลังขยายโดยประมาณของสายอากาศเฮลิคซ์ที่หาได้จากแพทเทิร์น (Power Pattern) เมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายพลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Source) ดังนี้ [8]

$$\text{Gain} = 11.8 + 10 \log_{10} \left[\left(\frac{C}{\lambda} \right)^2 \frac{ns}{\lambda} \right] \text{ dB} \quad (2.13)$$

แบบหลังงานที่แผ่ออกไปจากสายอากาศเฮลิคซ์จะมีโพลาริเซชันเป็นแบบวงกลม (Circular Polarization) ซึ่งจะมีอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio) เท่ากับ

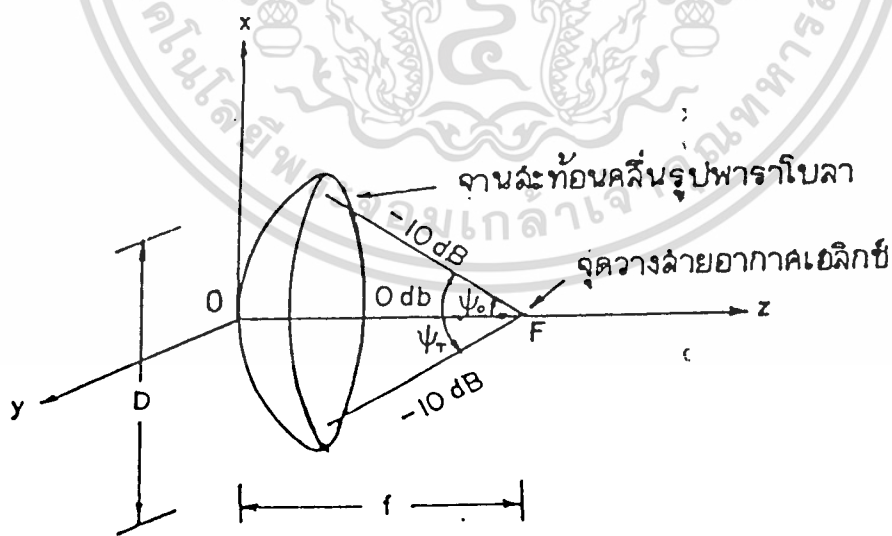
$$AR = \frac{2n + 1}{2n} \quad (2.14)$$

และจะหาค่าความต้านทานที่ขั้ว (Terminal Resistance) R ได้จาก

$$R = \frac{140C}{\lambda} \Omega \quad (2.15)$$

2.4 การพิจารณาออกแบบสายอากาศเฮลิคซ์เพื่อป้อนสัญญาณให้กับจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลา

เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (2.12) จะเห็นว่าค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะเป็นสัดส่วนกลับกับจำนวนรอบของเฮลิคซ์ ฉะนั้นเมื่อย้อนกลับไปพิจารณาคุณสมบัติของจานสะท้อนคลื่นจากหัวข้อ 2.2 แล้ว เราจำเป็นต้องออกแบบสายอากาศเฮลิคซ์ให้มีความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการรับพลังงานที่ขอบจาน



รูปที่ 2.5 แสดงการรับพลังงานของจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเฮลิคซ์

สะท้อนคลื่นน้อยกว่าพลังงานที่รับได้ตรงบริเวณศูนย์กลางของจานสะท้อนคลื่น 10 dB (The Edge Spillover is 10 dB) ซึ่งจะหาให้แอมพลิจูดของโหลบข้างและโหลบหลังลดลงน้อยที่สุดเพื่อให้ได้กำลังขยายมากที่สุด และสำหรับการกระจายของสนามที่เหมาะสม โหลบข้างควรมีขนาดของแอมพลิจูดน้อยกว่า 20 dB (20 dB down) ฉะนั้นเราจะต้องออกแบบสายอากาศเซลิคซ์ให้มีจำนวนรอบที่เหมาะสมที่จะหาให้ความกว้างลำมีขนาดเท่ากับมุม ψ_T ตามรูปที่ 2.5 ซึ่งสำหรับจานสะท้อนคลื่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.57 เมตร มีความยาวโฟกัส 2.76 เมตร และมีค่า f/D เท่ากับ 0.604 ที่ใช้ในการทดลอง จะมีค่าของมุม ψ_T ที่รองรับจานสะท้อนคลื่นตามสมการที่ (2.10) เท่ากับ 89.94 องศา ค่าของมุม ψ_T นี้จะนำไปคำนวณหาจำนวนรอบของสายอากาศเซลิคซ์ โดยเราจะพิจารณาจากเทปเปอร์ (Taper) ของการกระจายสนามซึ่งเทปเปอร์แรกที่เราพิจารณาได้แก่ ความลาดลงของขอบ (Edge taper) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเข้มของพลังงานที่ขอบของจานสะท้อนคลื่นกับความเข้มของพลังงานที่ตรงกลางของจานสะท้อนคลื่นที่แสดงในหน่วยของเดซิเบลเป็นดังนี้ [11]

$$\tau_1 = 40 \log \left(\frac{\cos \beta}{2} \right) \quad (2.16)$$

เมื่อ τ_1 เป็นความลาดลงของขอบ และ

$$\beta = \psi_T / 2 = \psi_0$$

และเทปเปอร์ (Taper) อันเนื่องมาจากการกระจายในโพรมารีแพทเทิร์น (primary pattern) ของสายอากาศเซลิคซ์ในหน่วยของเดซิเบลจะหาได้จาก

$$\tau_2 = -12 \left(\frac{\beta}{BW} \right)^2 \quad (2.17)$$

เมื่อ BW เป็นความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศเซลิคซ์

ผลรวมของเทปเปอร์ τ_1 และ τ_2 จะมีความสัมพันธ์กับแอมพลิจูดของโหลบข้างตามค่าร่างที่ 2.1 ดังนี้

$\tau_1 + \tau_2$ เดซิเบล	แอมพลิจูดของโหนดข้าง เดซิเบล
-6	-20
-11	-25
-14.5	-30
-17.5	-35

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของเทปเปอร์กับขนาดของโหนดข้าง

ฉะนั้น จากสมการ(2.16)เมื่อแทนค่า β จะได้

$$\begin{aligned}\tau_1 &= 40 \log (\cos (44.97 / 2)) \\ &= -1.37 \text{ dB}\end{aligned}$$

และเมื่อต้องการระดับของโหนดข้าง -20 dB ($-20 \text{ dB side lobes}$) เราก็จะได้ผลรวมของเทปเปอร์ ($\tau_1 + \tau_2$) จากตารางที่ 2.1 เท่ากับ -6 dB ฉะนั้นเราก็จะได้ค่าของ $\tau_2 = -6 + 1.37 = -4.63 \text{ dB}$ เมื่อนำค่า τ_1 และ τ_2 ไปแทนลงในสมการที่ (2.17) และจัดรูปใหม่ เราก็จะสามารถหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของแบบรูปพลังงานที่แผ่ออกไปจากสายอากาศเซลิซซ์ได้ดังนี้

$$BW = \sqrt{(44.97)^2 \times 12 / 4.63} = 72.38 \text{ องศา}$$

และเราก็สามารถคำนวณหาจำนวนรอบของสายอากาศเซลิซซ์ได้จากสมการที่ (2.12) ซึ่งเมื่อกำหนดค่า $C = 1.0 \lambda$ และ $S = 0.22 \lambda$ และจัดรูปใหม่ เราก็จะได้จำนวนรอบของเซลิซซ์ที่มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (BW) = 72.38 องศาได้ ดังนี้



$$n = \frac{12290}{7238^2} = 2.3 \text{ รอบ} \quad (2.18)$$

แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศเฮลิคซ์จะต้องมีจำนวนรอบอย่างน้อย 3 รอบ จึงจะสามารถแผ่พลังงานออกไปได้ [8] ฉะนั้นเราจะกำหนดให้เฮลิคซ์มีจำนวนรอบ = 3 ซึ่งจะเป็นการลดขนาดของโพลข้างลงด้วย ดังนั้นเราจะสามารถออกแบบสายอากาศเฮลิคซ์ ตามความถี่ที่กำหนด (300 MHz) โดยจะกำหนดให้มีมุมเอียง 12 องศา และมีความยาวของเส้นรอบวง = 1.00 เมตร จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามสมการที่ 2.11 ดังนี้

- ขนาดของเส้นรอบวง : $C = 1.0$ เมตร
- ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง : $h_a = 0.32$ เมตร
- ระยะห่างระหว่างรอบ : $S = 0.22$ เมตร
- เส้นผ่าศูนย์กลางของกราวด์เพลน : $d = 1.0$ เมตร
- เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ขด : $a = 0.02$ เมตร
- ระยะห่างจากกราวด์เพลนถึงจุดที่เริ่มขดเป็นเฮลิคซ์ : $g = 0.11$ เมตร
- จำนวนรอบ : $n = 3$ รอบ (2.19)

เนื่องจากสายอากาศเฮลิคซ์ในแอกเซียลโหมดจะมีความกว้างของแถบความถี่อยู่ในช่วง $3/4$ ถึง $4/3$ เท่าของความถี่ที่ใช้ออกแบบ ฉะนั้นเราจะสามารถคำนวณหาความกว้างแถบความถี่ในการใช้งานของสายอากาศเฮลิคซ์ได้ดังนี้

ที่ความถี่จำกัดแถบล่าง (Low Frequency Limit)

$$f = \frac{3}{4} \times 300 = 225 \text{ MHz} \quad (2.20)$$

ที่ความถี่จำกัดแถบบน (High Frequency Limit)

$$f = \frac{4}{3} \times 300 = 400 \text{ MHz} \quad (2.21)$$

ฉะนั้นสายอากาศเฮลิคซ์จะมีความกว้างแถบของใช้งานอยู่ในช่วง 225-400 MHz

บทที่ 3

การวิเคราะห์กำลังขยายของระบบสายอากาศ

3.1 หลักการในการวิเคราะห์กำลังขยายของระบบสายอากาศให้มีกำลังขยายสูงสุด ในการวิเคราะห์กำลังขยายของระบบสายอากาศจะใช้หลักการของ Lo และ Gilbert [10] โดยกำหนดให้ตัวป้อนสัญญาณมีการกระจายกระแสที่อะเพอเจอร์อยู่ในรูปของ N เบสิสฟังก์ชัน $\{\phi_n\}$ ดังนี้

$$f(\rho, \psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \phi_n(\rho, \psi) \quad (3.1)$$

เมื่อ a_n เป็นเสถียรสัมประสิทธิ์ที่จะทำให้กำลังขยายของสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นมีค่ามากที่สุด, ρ_1 เป็นระยะทางจากจุดศูนย์กลางของอะเพอเจอร์ของจานสะท้อนคลื่นไปยังจุดใด ๆ บนอะเพอเจอร์นั้น เราสามารถคำนวณจากสนามสเกลลาไกล (Scalar far field) ของตัวป้อนสัญญาณได้จาก

$$E_{\text{feed}}(\vec{\rho}) = \frac{j\alpha(1+\cos\psi)}{2\rho} e^{-jk\rho} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n a_n \frac{J_{2n+1}(k\alpha \sin\psi)}{\sin\psi} \quad (3.2)$$

เมื่อ $\vec{\rho}(r, \pi - \psi, \phi)$ เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) ของจุด P บนจานสะท้อนคลื่นเมื่อตัวป้อนสัญญาณวางอยู่ที่จุดกำเนิด, α เป็นรัศมีของตัวป้อนสัญญาณ, k เป็นเวฟัมเบอร์ (Wave number) และ $J_m[\cdot]$ เป็นเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) ลำดับที่ m และสนามไกลของสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นที่มีรัศมีของอะเพอเจอร์ : A , ความยาวโฟกัส : f และ F -number: $F (f/2A)$ ที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของจานสะท้อนคลื่นออกไปเป็นระยะทาง $r = (r, \theta, \phi)$ เมื่อจุดศูนย์กลางของอะเพอเจอร์ของจานสะท้อนคลื่นวางอยู่ที่จุดกำเนิดจะสามารถหาได้จาก

$$E(\vec{r}) = \langle aV(\theta) \rangle \quad (3.3)$$

เมื่อ $\langle a$ เป็นโรวเวกเตอร์ (row vector) : $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{n-1})$ และ $V(\theta) \rangle$ เป็นคอลัมน์เวกเตอร์ (Column Vector) ซึ่งมีสมาชิกตัวที่ n เป็นดังนี้

$$V_n(\theta) = (-1)^{n+1} k\alpha A e^{-jk(f+z_0+r)} (1+\cos\theta)$$

$$\int_0^1 \frac{J_{2n+1} \left[\frac{k\alpha(\xi/2F)}{1+(\xi/4F)} \right] J_0[\xi kA \sin\theta] d\xi}{1+(\xi/4F) k\alpha(\xi/2F)} \quad (3.4)$$

เมื่อ z_0 เป็นความลึกของจานสะท้อนคลื่น ตามนิยามของโคเรคทีวิตีจะได้กำลังขยายตามแนวแกนคือ

$$G = 4\pi \frac{\langle a D a^* \rangle}{\langle a B a^* \rangle} \quad (3.5)$$

เมื่อ D เป็นเทอร์มิเขียนเมตริกซ์ (Hermitian Matrix) ขนาด $N \times N$ และมีสมาชิก $D_{ij} = V_i^*(0) V_j(0)$ ซึ่ง $V_i(0)$ หาได้จากสมการที่ (3.4) เมื่อ $\theta = 0^\circ$; B เป็นเทอร์มิเขียนเมตริกซ์ขนาด $N \times N$ ซึ่งมีสมาชิกต่าง ๆ ดังนี้

$$B_{ij} = (-1)^{|i+j|} \alpha^2 \int_0^{\pi/2} \frac{(1+\cos^2\psi) J_{2+i}(k\alpha \sin\psi)}{\sin\psi} J_{2+j-1}(k\alpha \sin\psi) d\psi \quad (3.6)$$

และเครื่องหมาย * แสดงคอนจูเกตเชิงซ้อน (complex conjugate)

ในสมการที่ (3.5) $\langle a D a^* \rangle$ เป็นความเข้มของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยสเตเดียนที่อยู่บนแนวแกนของสายอากาศ $\langle a B a^* \rangle$ เป็นผลรวมของพลังงานทั้งหมดที่กระจายออกไปจากตัวป้อนสัญญาณ

สำหรับโซลูชันที่เหมาะสมของ $a \rangle$ ที่ทำให้ G มีค่ามากที่สุดคือ

$$a \rangle = B^{-1} V(0) \rangle \quad (3.7)$$

และทำให้ได้ค่ากำลังขยายสูงสุดดังนี้

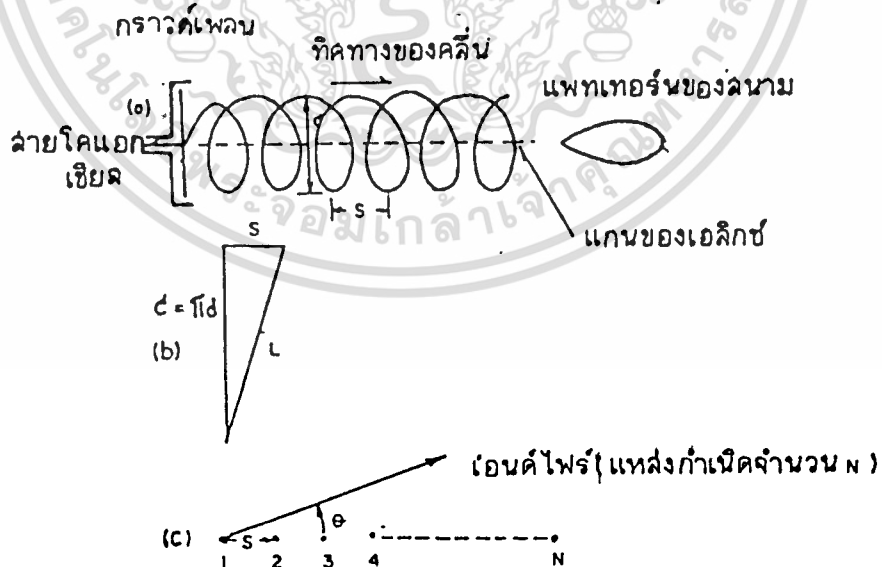
$$G_{\max} = \left| \langle v(0) B^{-1} v(0) \rangle \right|$$

$$= 64F^2 \pi (A/\lambda)^2 g_{\max} \quad (3.8)$$

ในสมการ (3.7) และ (3.8), B^{-1} หมายถึง อินเวอร์สเมตริกซ์ของเมตริกซ์ B ซึ่งในการคำนวณหาค่าอัตราขยายสูงสุดในสมการ (3.8) เราจะต้องหาค่า $\langle a \rangle$ ของระบบที่เกิดจากตัวบ่อนสัญญาณเสียก่อน

3.2 การกระจายของกระแสที่อะเพอเจอร์ของสายอากาศเฮลิคซ์

สำหรับสายอากาศเฮลิคซ์ที่ใช้เป็นตัวบ่อนสัญญาณในแอกเซียลโหมดนั้นสามารถที่จะพิจารณาแบบสนามได้เหมือนกับสายอากาศแถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (End-Fire array) ที่ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่มีจำนวนเท่ากับ N (N Isotropic sources) [12] ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแต่ละแหล่งกำเนิดจะแทนเฮลิคซ์จำนวน 1 รอบ แหล่งกำเนิดดังกล่าวจะกระตุ้นให้เกิดแอมพลิจูดเชิงซ้อน (Complex Amplitude) ที่มีสมาชิก (elements) ต่าง ๆ คือ $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ [13] ดังนั้นเราก็สามารถที่จะกำหนดจำนวนเบสิสฟังก์ชันในสมการที่ (3.1) ด้วยจำนวนรอบของเฮลิคซ์ที่หาได้ในหัวข้อ 2.4



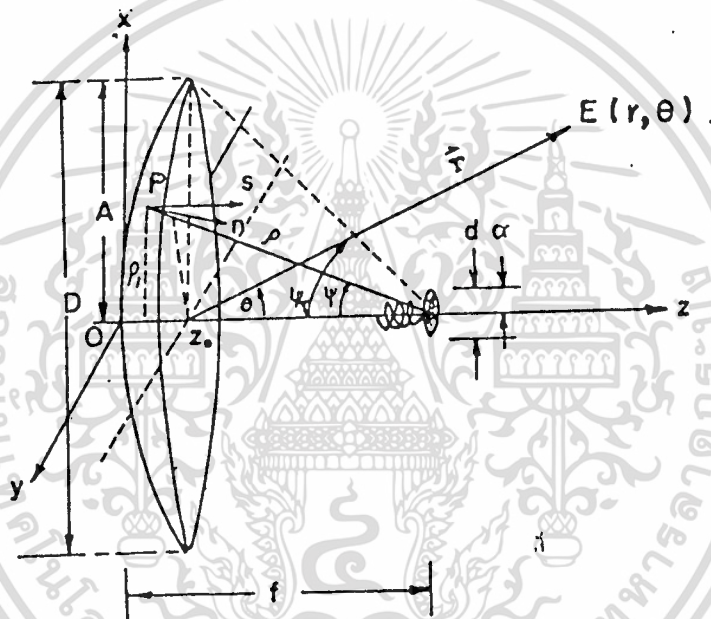
รูปที่ 3.1 (a) และ (b) แสดงขนาดของสายอากาศเฮลิคซ์ (c) แถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์

และจะทำให้มีการกระจายของกระแสที่อะโพเจอร์ตามสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$f(\rho, \psi) = \sum_{n=0}^2 \sigma_n \phi_n(\rho, \psi) \quad (3.9)$$

เมื่อ $n = 0, 1, 2$

3.2.1 การหาค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของแอมพลิจูดเชิงซ้อน (a_n)



รูปที่ 3.2 แสดงการจัดระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเฮลิคซ์เป็นตัวป้อนสัญญาณ

โดยการแทนค่า ρ จากสมการ (2.2) ลงในสมการ (2.6) และจัดรูปใหม่เราจะได้

$$z_1 = \left(\frac{2}{1 + \cos \psi} - 1 \right) f \quad (3.10)$$

เมื่อแทนค่า $\psi = 44.97$ และ $f = 2.76$ เมตร ลงใน 3.10 เราจะได้ z_0 ตามรูปที่ 3.2 ดังนี้

$$z_0 = z_1 = \left(\frac{2}{1 + \cos 44.97} - 1 \right) * 2.76$$

$$= 0.4735 \text{ เมตร} \quad (3.11)$$

และสำหรับค่า r เมื่อ $\theta = 0^\circ$ จะมีค่าเป็น

$$r = f - z_0 = 2.2865 \text{ เมตร} \quad (3.12)$$

เมื่อแทนค่า z_0 จากสมการ (3.11) และ r จากสมการ (3.12) และค่า f ลงใน (3.4) โดยที่ θ มีค่าเท่ากับ 0° เราจะได้

$$V_n(0) = (-1)^{n+1} \frac{kaAe^{-5.52jk}}{2} \int_0^r \frac{J_{2n+1} \left[\frac{ka(\xi/2F)}{1 + (\xi/4F)^2} \right]}{1 + (\xi/4F)^2} \frac{ka(\xi/2F)}{ka(\xi/2F)} d\xi \quad (3.13)$$

เมื่อ $n = 0, 1, 2$

$$F = 0.604$$

α : รัศมีของกราวด์เพลนของเซลิคซ์

A : รัศมีของจานสะท้อนคลื่น

และเราก็สามารถที่จะหาค่าของสมาชิก $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ จากสมการที่ (3.7) ได้ดังนี้

$$\sigma_i = \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 B^{ij} v_j(0) \quad (3.14)$$

ค่า $v_j(0)$ หาได้จากสมการที่ (3.13) และ B^{ij} คือค่าของสมาชิกต่าง ๆ ในอินเวอร์สเมตริกซ์ (Inverse Matrix) B ซึ่งจะมีค่าของสมาชิกต่าง ๆ ตามสมการที่ (3.6)

3.2.2 เบสิสฟังก์ชันสำหรับสายอากาศเฮลิคซ์

สำหรับสายอากาศเฮลิคซ์ในแอคเซียลโหมดที่มีการแผ่พลังงานที่มีลาแบบเอ-
ไพร์จะมีลำคลื่น (Main beam) ที่แผ่ออกไปตามทิศของแนวแกนที่ตั้งฉากกับกราวด์เพลน
ของเฮลิคซ์ที่มีอะเพอเจอร์เป็นวงกลมและสมมาตรกับแกนของระบบสายอากาศ และจะ
เลือกเซอร์ไกต์ โพลีโนเมียลส์ (Zernike polynomials) เป็นเบสิสฟังก์ชันดังนี้

$$\phi_i(\rho, \psi) = \sum_{m=0}^i \frac{(-1)^i (2i-m)! \rho_1^{2(i-m)}}{m! [(i-m)!]^2} \quad (3.15)$$

จากรูปที่ 3.2 จะได้ว่า

$$\rho_1 = \rho \sin \psi \quad (3.16)$$

ซึ่ง ρ มีค่าตามสมการที่ (2.2) และเมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.16) จะได้

$$\rho_1 = \frac{2f \sin \psi}{1 + \cos \psi} \quad (3.17)$$

แทนค่า ρ_1 จาก (3.17) ลงใน (3.15) จะได้

$$\phi_i(\psi) = \sum_{m=0}^i \frac{(-1)^i (2i-m)! \left(\frac{2f \sin \psi}{1 + \cos \psi}\right)^{2(i-m)}}{m! [(i-m)!]^2} \quad (3.18)$$

เราสามารถหาการกระจายกระแสที่อะเพอเจอร์ของเฮลิคซ์ที่ขดจำนวน 3
รอบ ได้จากสมการที่ (3.1) โดยแทนค่า σ_i จากสมการที่ (3.14) และค่า $\phi_i(\psi)$
จากสมการที่ (3.18) จะได้

$$f(\psi) = \sum_{i=0}^2 \sigma_i \phi_i(\psi) \quad (3.19)$$

3.3 แพทเทิร์นของสายอากาศเฮลิคซ์

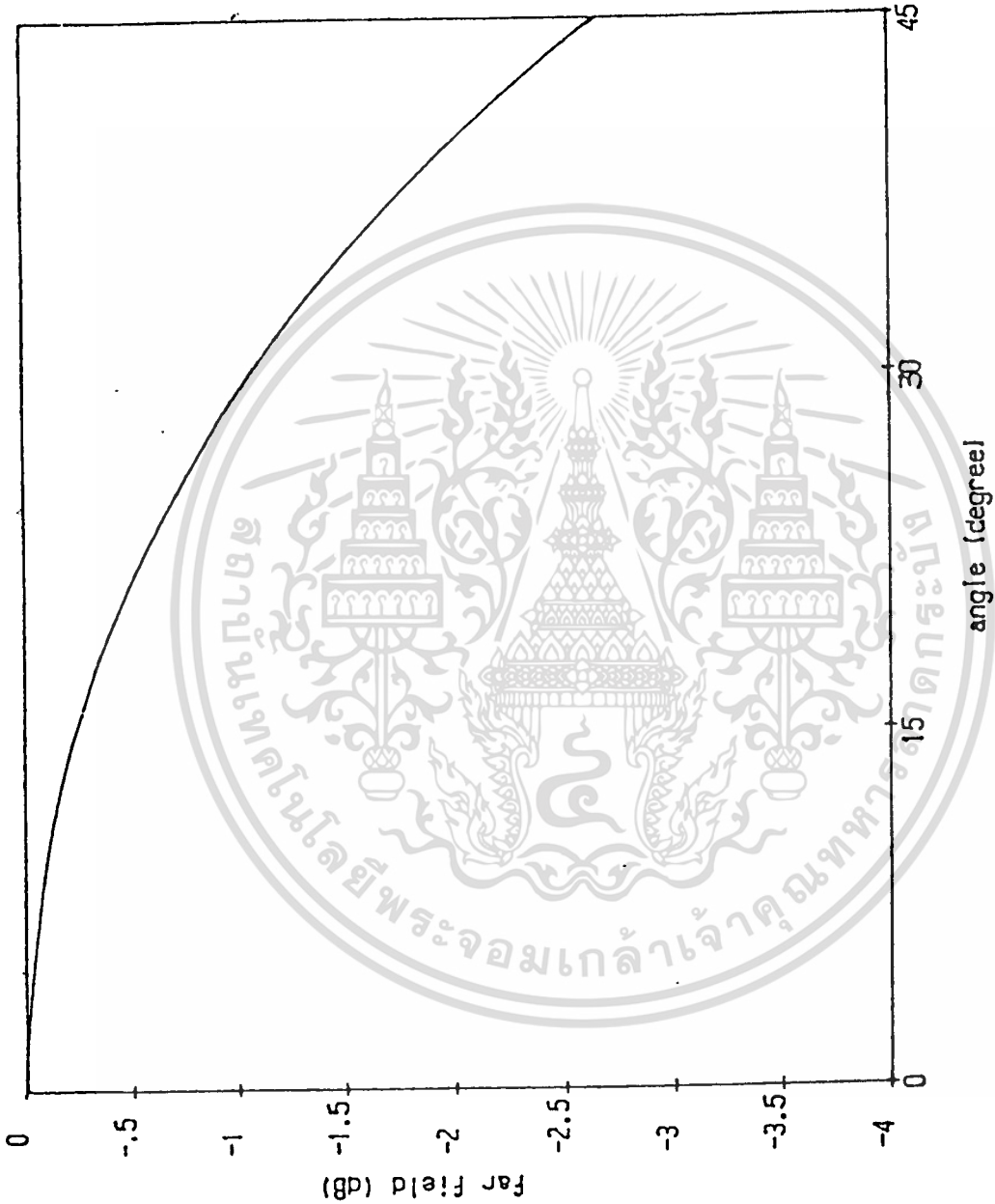
เราสามารถคำนวณหาแบบรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคซ์ที่มีจำนวนรอบ = 3 ได้โดยการแทนค่า ρ จากสมการ (2.2) ลงในสมการที่ (3.2) และจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$E_{\text{helix}}(\psi) = \frac{j\alpha(1+\cos\psi)^2 e^{-jk(2f/(1+\cos\psi))}}{4f} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \sigma_n \frac{J_{2n+1}[k\alpha \sin\psi]}{\sin\psi} \quad (3.20)$$

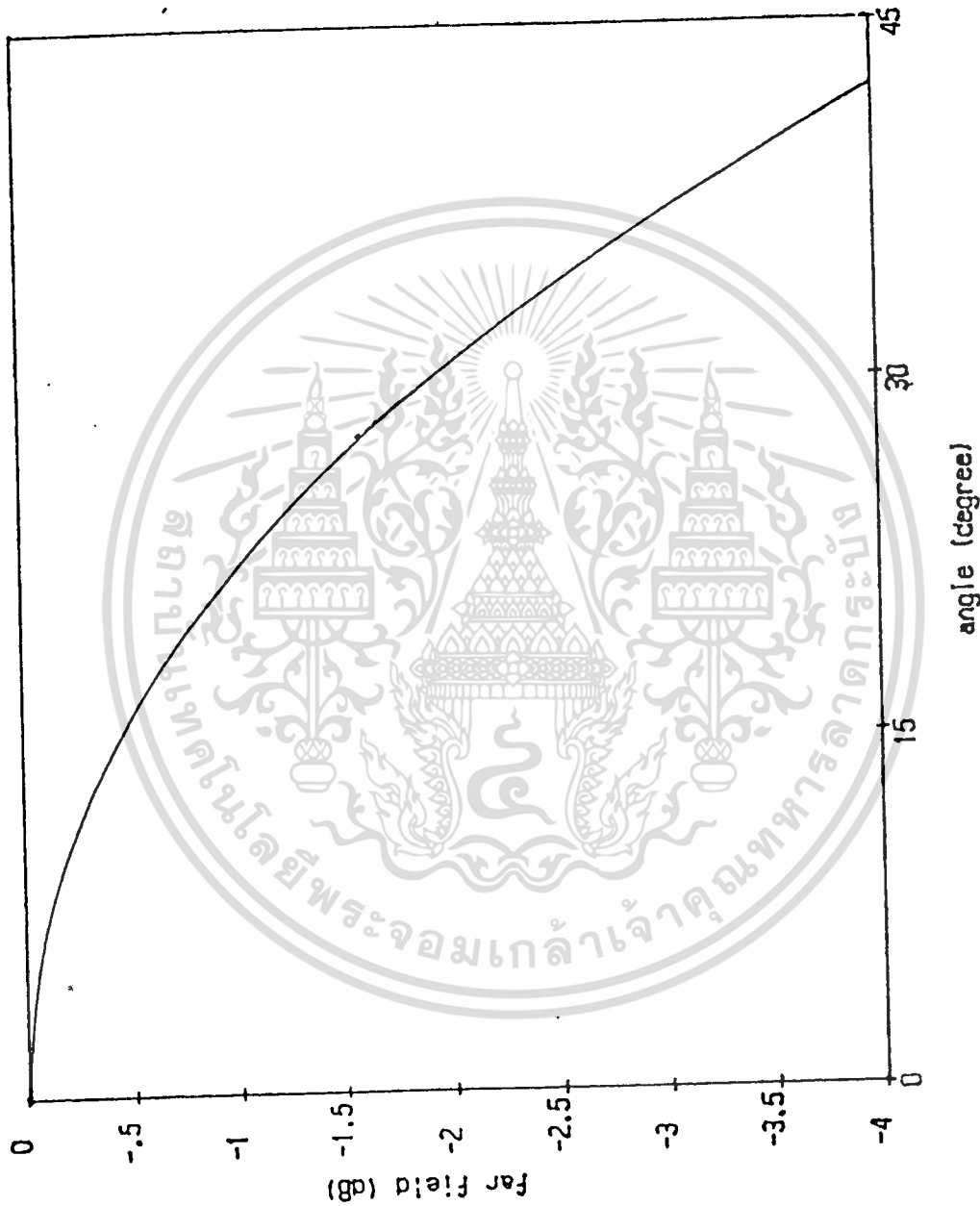
เมื่อ E_{helix} เป็นแบบรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคซ์
และ σ_n สามารถหาได้จากสมการที่ (3.14)

สมการ (3.20) แสดงให้เห็นว่าแบบรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคซ์เป็นฟังก์ชันของมุม ψ และจะแตกต่างไปจากแบบรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคซ์ที่ไม่ได้วางอยู่หน้าจานสะท้อนคลื่น เนื่องจากสายอากาศเฮลิคซ์ที่วางอยู่หน้าจานสะท้อนคลื่นจะมีปฏิกิริยากับคลื่นที่สะท้อนออกมาจากจานสะท้อนคลื่น และตามสมการที่ (3.20) สามารถแสดงผลการคำนวณหาแบบรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคซ์ที่นอร์มอลไรซ์ด้วยค่าสูงสุดที่มุม 0 องศา ที่ความถี่ 240 MHz, 280 MHz, 300 MHz, 350 MHz, 390 MHz และ 400 MHz ได้ตามรูปที่ 3.3 - 3.8 ตามลำดับ

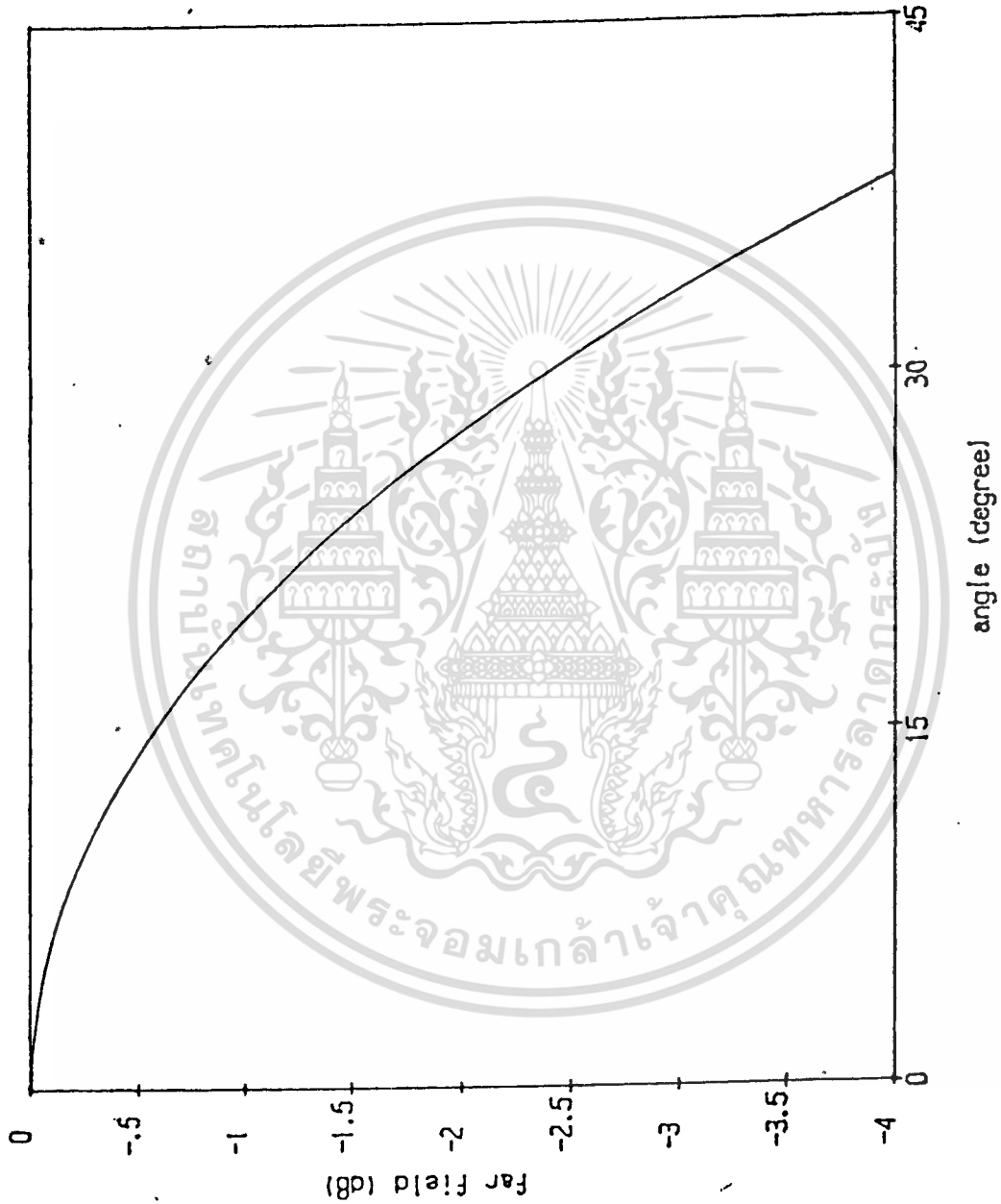
ir



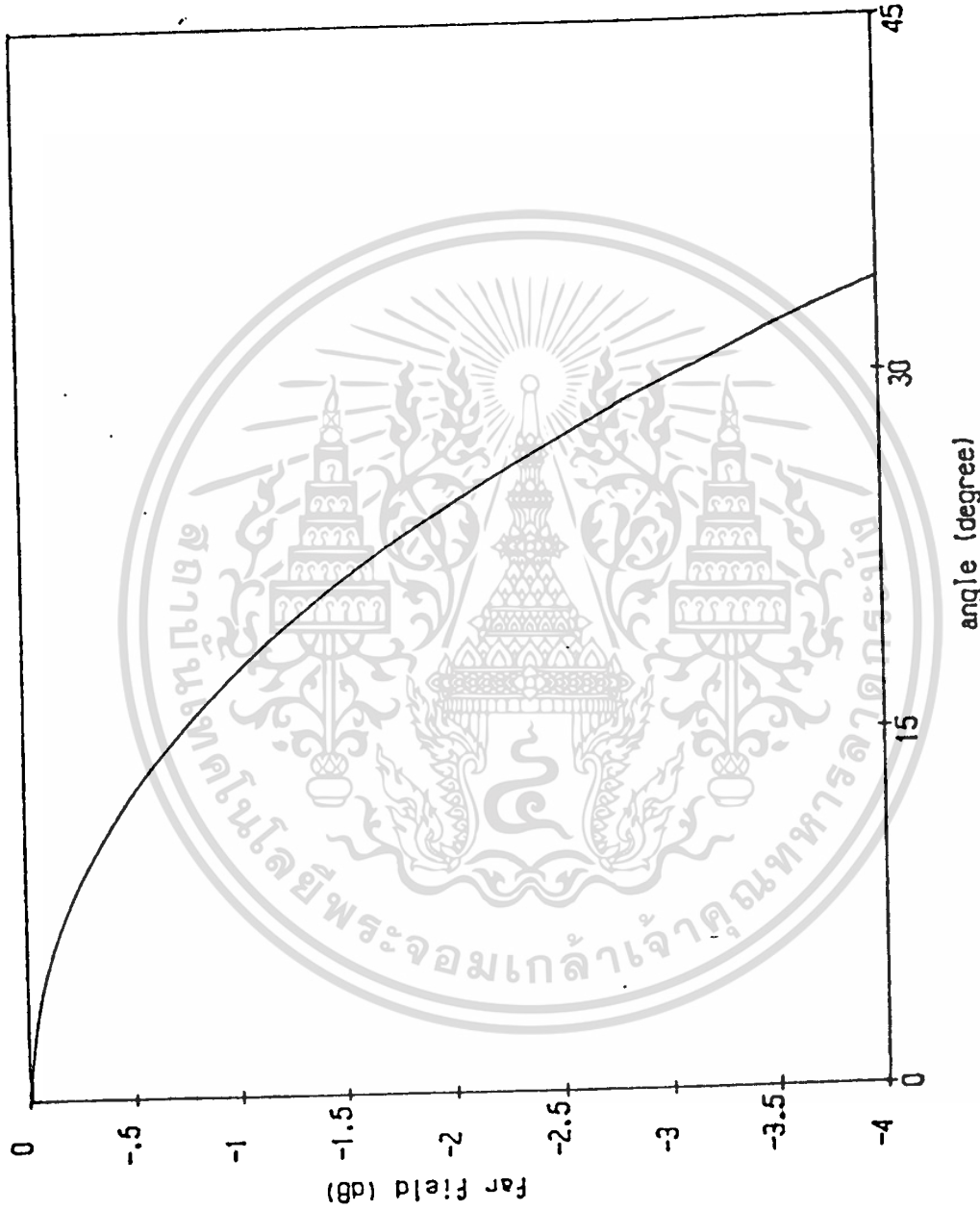
รูปที่ 3.3 แสดงรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคัลเมื่อกราวด์เพลนของเฮลิคัลมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 λ งานสะท้อนคลื่นมีความยาวโฟกัส 2.70 เมตร ที่ความถี่ 240 MHz และมีมุม ψ อยู่ในช่วง 0° ถึง 45°



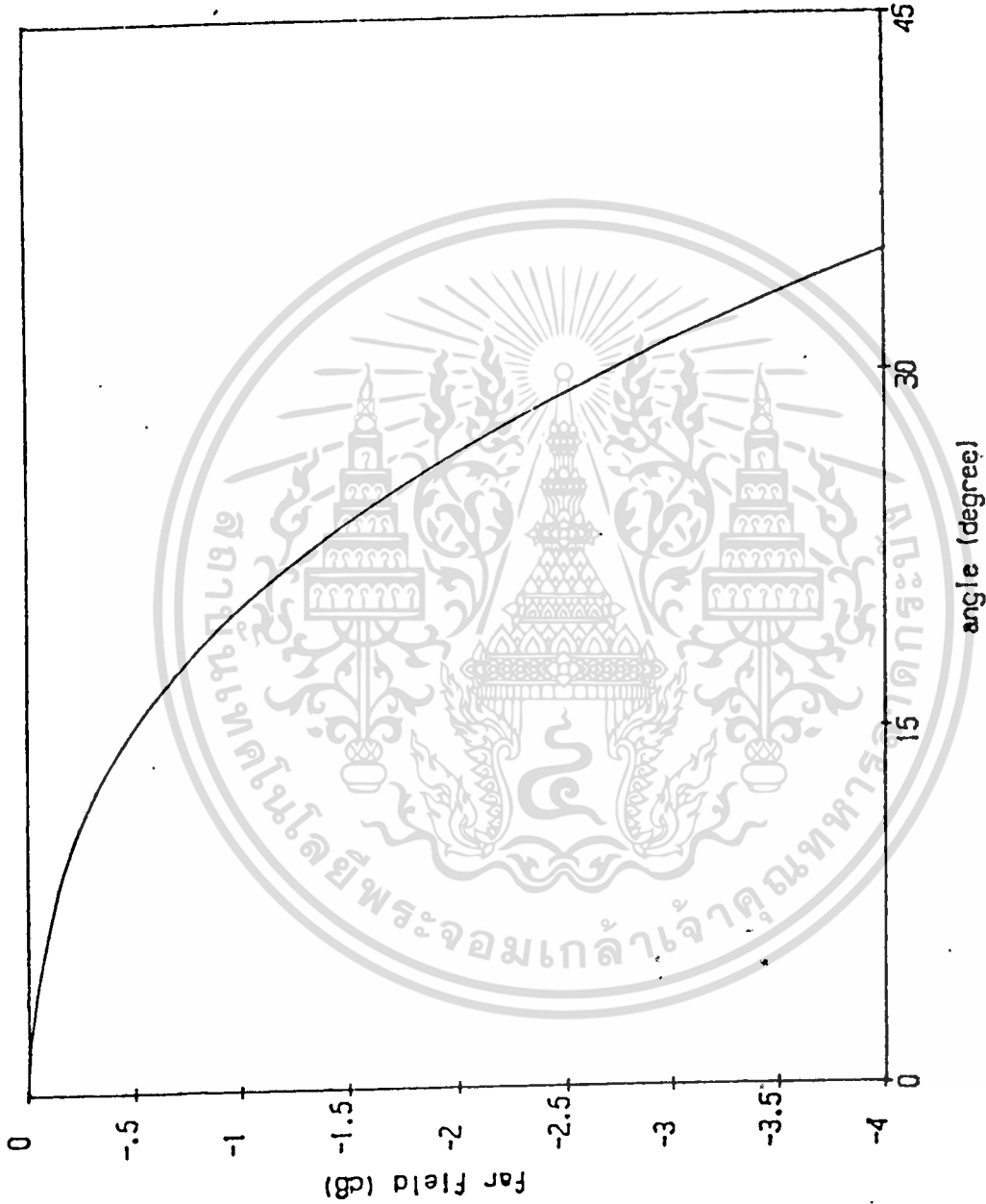
รูปที่ 3.4 แสดงรูปสนามไกลของสายอากาศเซลิคซ์เมื่อกราวด์เพลนของเซลิคซ์มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.93 λ งานสะท้อนกลับมีความยาวโฟกัส 2.70 เมตร ที่ความถี่ 280 MHz และมีมุม ψ อยู่ในช่วง 0° ถึง 45°



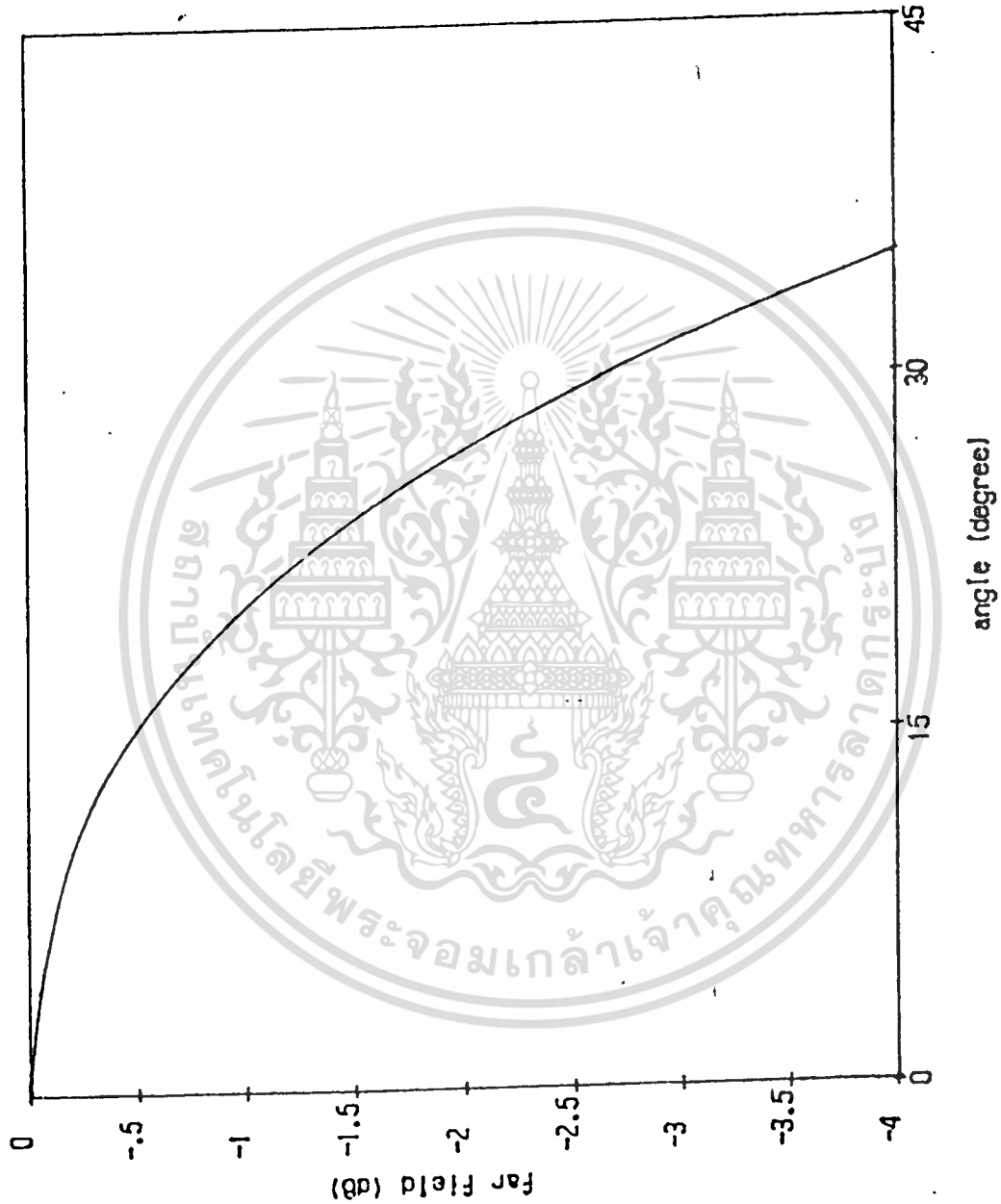
รูปที่ 3.5 แสดงรูปสนามไกลของสายอากาศสี่เหลี่ยมของแชนเนลที่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 λ งานสะท้อนคลื่นมีความยาวโฟกัส 2.70 เมตร ที่ความถี่ 300 MHz และมีมุม ψ อยู่ในช่วง 0° ถึง 45°



รูปที่ 3.6 แสดงรูปสนามไกลของสายอากาศชนิดฮอร์นเมื่อกรวดเคลื่อนของเขลิทซ์มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.17 λ จากสะท้อนคลื่นมีความยาวรัศมี 2.70 เมตร ที่ความถี่ 350 MHz และมีมุม ψ อยู่ในช่วง 0° ถึง 45°



รูปที่ 3.7 แสดงรูปสนามไกลของสายอากาศเซลิคซ์เมื่อกราวด์เพลนของเซลิคซ์มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.32 λ จานสะท้อนคลื่นมีความยาวโฟกัส 2.70 เมตร ที่ความถี่ 390 MHz และมีมุม ψ อยู่ในช่วง 0° ถึง 45°



รูปที่ 3.8 แสดงรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคัมเมื่อกราวด์เพลนของเฮลิคัมมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.33 λ จานสะท้อนคลื่นมีความยาวโฟกัส 2.70 เมตร ที่ความถี่ 400 MHz และมุม ψ อยู่ในช่วง 0° ถึง 45°

3.4 แพทเทิร์นของระบบสายอากาศ

พิจารณาตามรูปที่ 3.2 แพทเทิร์นของระบบสายอากาศจะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของจานสะท้อนคลื่นออกไปเมื่อ มีค่ามาก ๆ และอาจถือได้ว่าเป็นระยะทางดังกล่าว $r \rightarrow \infty$ จะนับค่า $V_n(\theta)$ จากสมการที่ (3.4) จะลดรูปเป็น

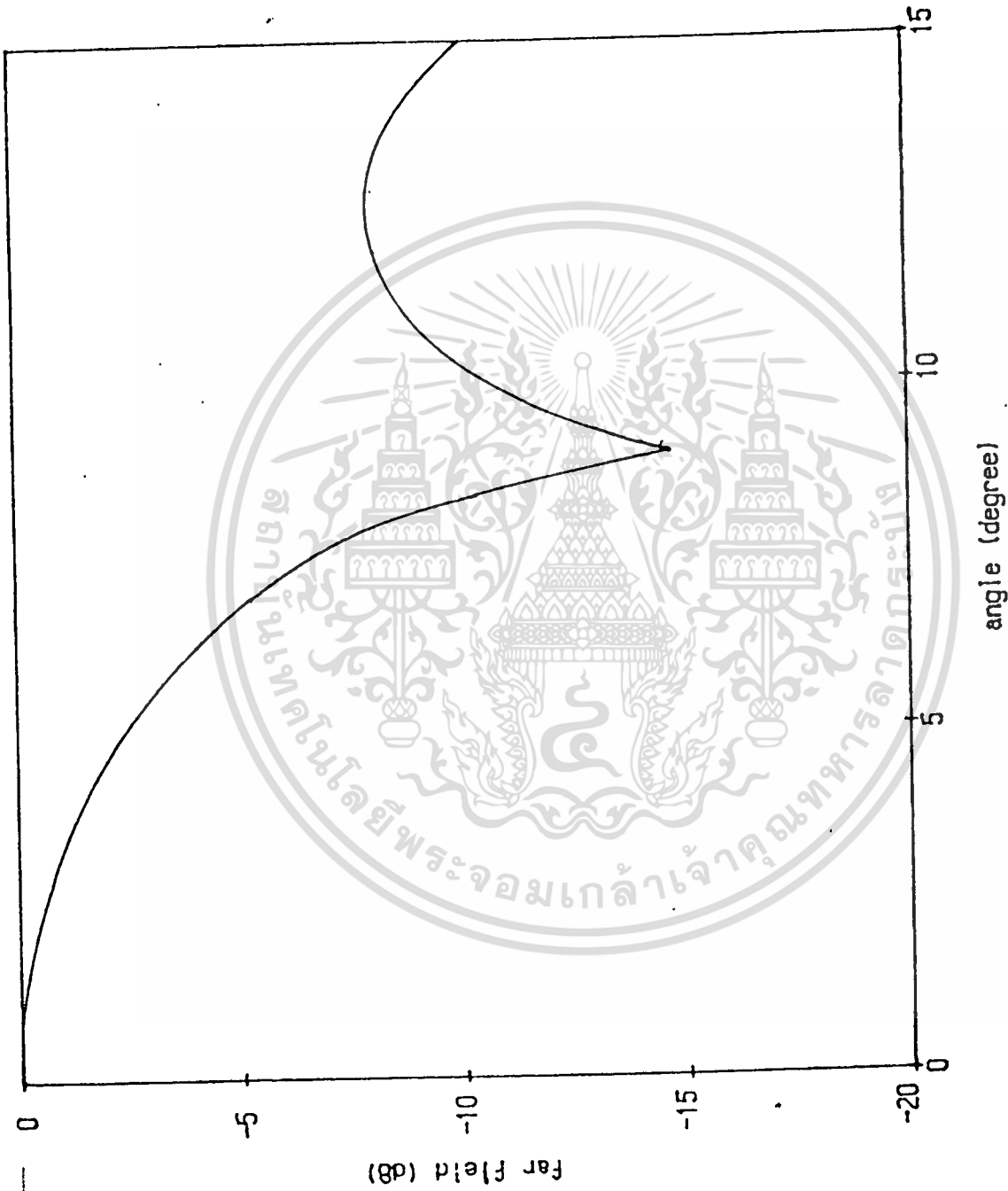
$$V_n(\theta) = (-1)^{n+1} kaA(1 + \cos\theta)$$

$$\int_0^1 \frac{J_{2n+1} \left[\frac{ka(\xi/2f)}{1 + (\xi/4f)} \right] J_0(\xi ka \sin\theta) d\xi}{1 + (\xi/4F)^2 ka(\xi/2F)} \quad (3.21)$$

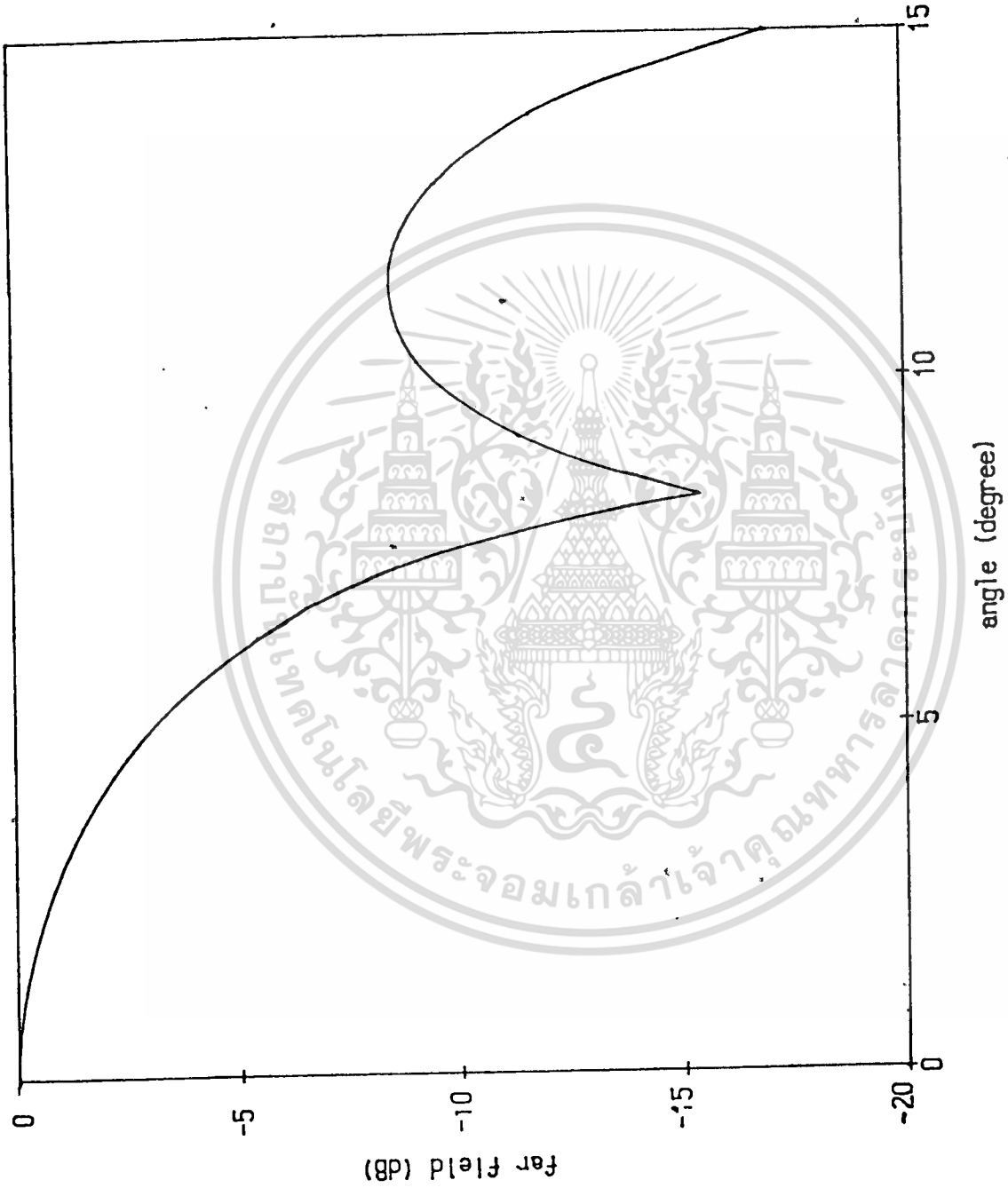
และค่าของแอมพลิจูดเชิงซ้อนที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดสนามไกลสามารถหาได้จากสมการที่ (3.4) โดยที่ $V_n(0)$ มีค่าตามสมการที่ (3.21) ซึ่งเมื่อแทนค่าของแอมพลิจูดเชิงซ้อนและค่า $V_n(0)$ จากสมการที่ 3.21 ลงในสมการที่ (3.3) เราก็จะได้สนามไกลของระบบสายอากาศที่ขึ้นกับค่าของมุม θ เพียงอย่างเดียวดังนี้

$$E(\theta) = \langle aV_n(\theta) \rangle \quad (3.22)$$

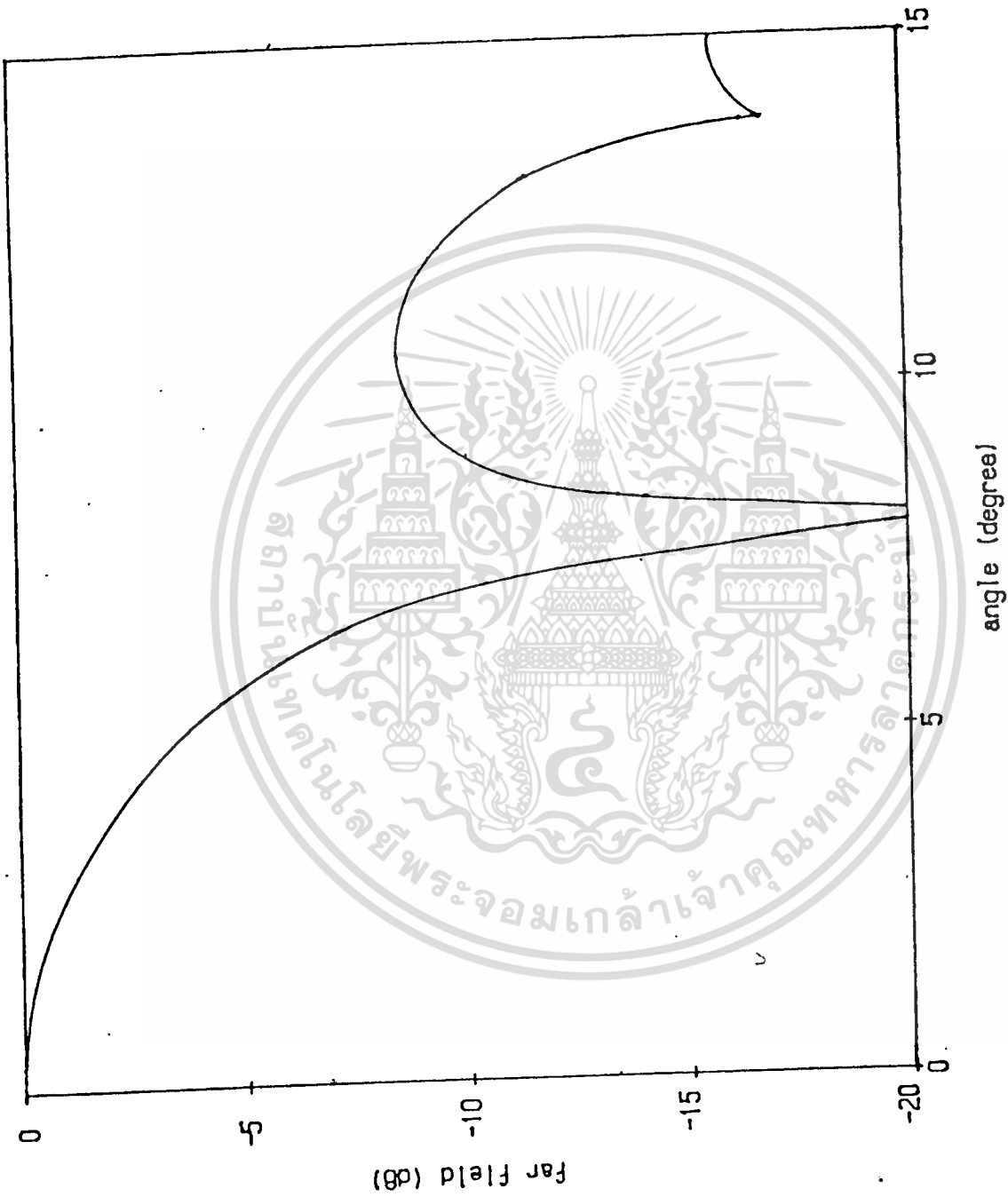
รูปที่ 3.9 - 3.14 แสดงนอร์มอลไรซ์แพทเทิร์นของระบบสายอากาศที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.22 เมื่อนอร์มอลไรซ์ด้วยค่าสูงสุดที่มุม 0 องศา ที่ความถี่ 240 MHz, 280 MHz, 350 MHz, 390 MHz และ 400 MHz ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 แสดงแบบรูปสนามไกลของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลามีสายอากาศเซ็กซ์ เป็นตัวบับนสัญญาณที่ความถี่ 240 MHz

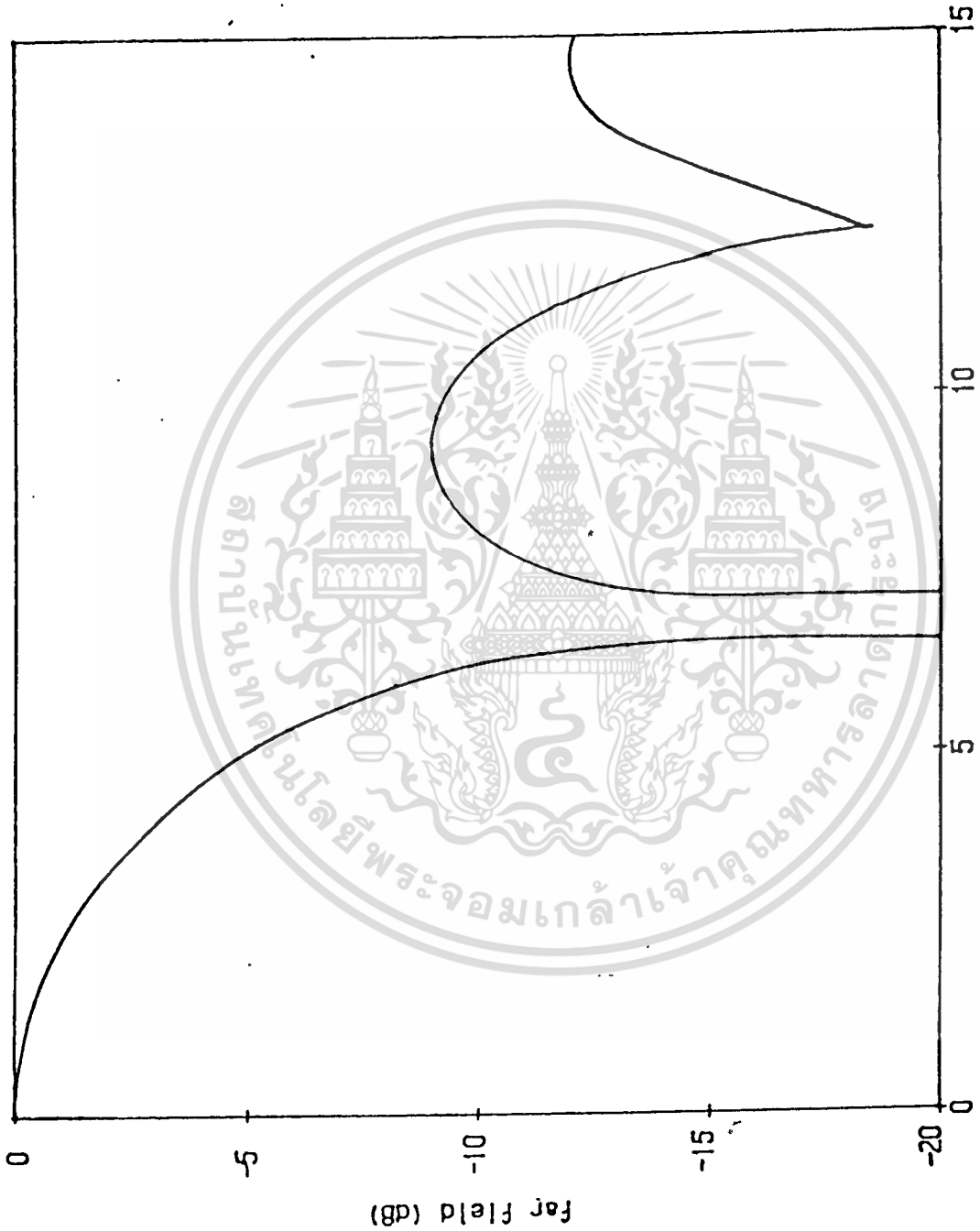


รูปที่ 3.10 แสดงแบบรูปสนามไกลของระบบแผ่ยอดกาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลามีสายอากาศเฮลิคซ์ เป็นตัวป้อนสัญญาณที่ความถี่ 280 MHz

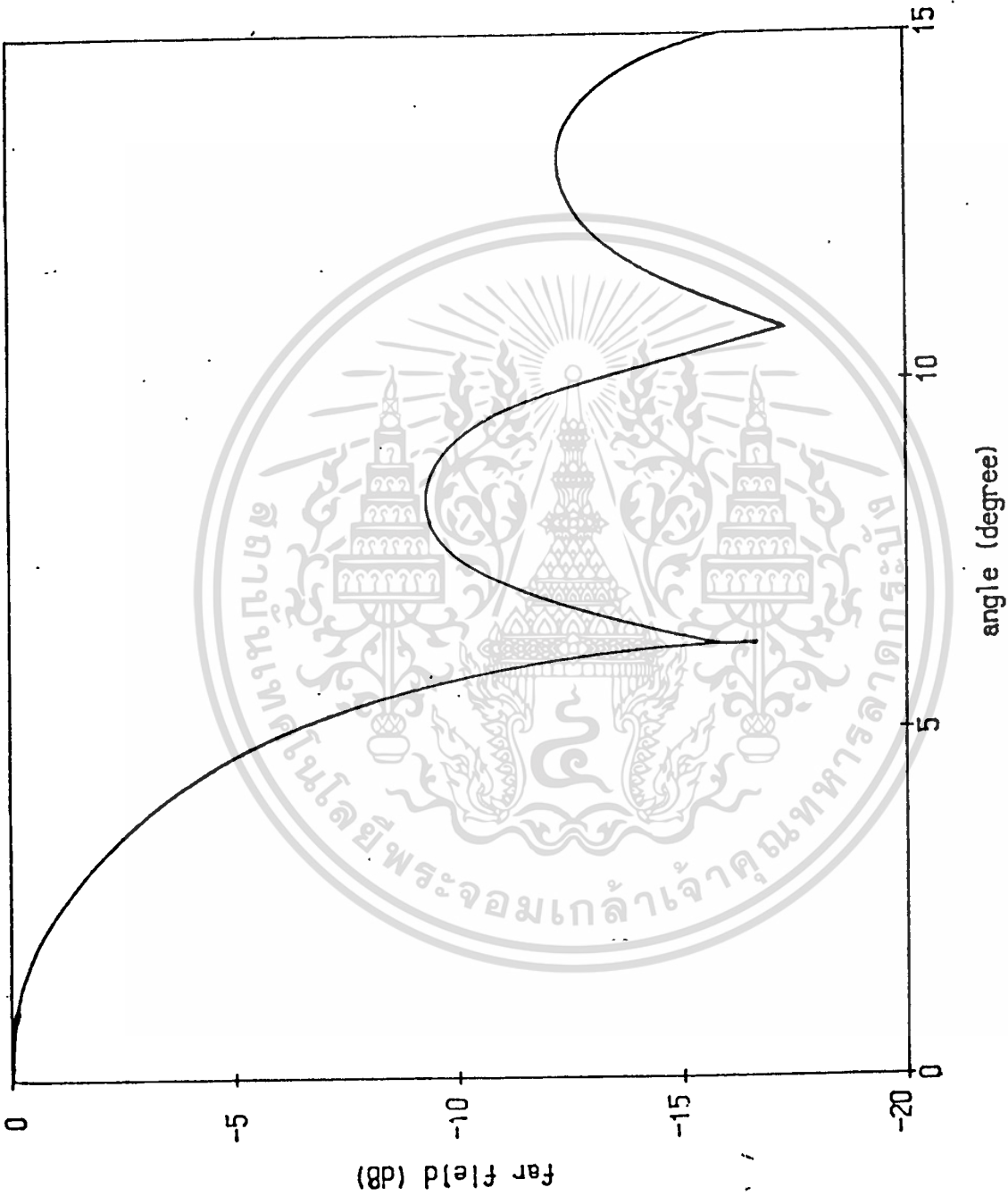


รูปที่ 3.1.1 แสดงแบบรูปสนามไกลของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเชิงลิทซ์ เป็นตัวป้อนสัญญาณที่ความถี่ 300 MHz

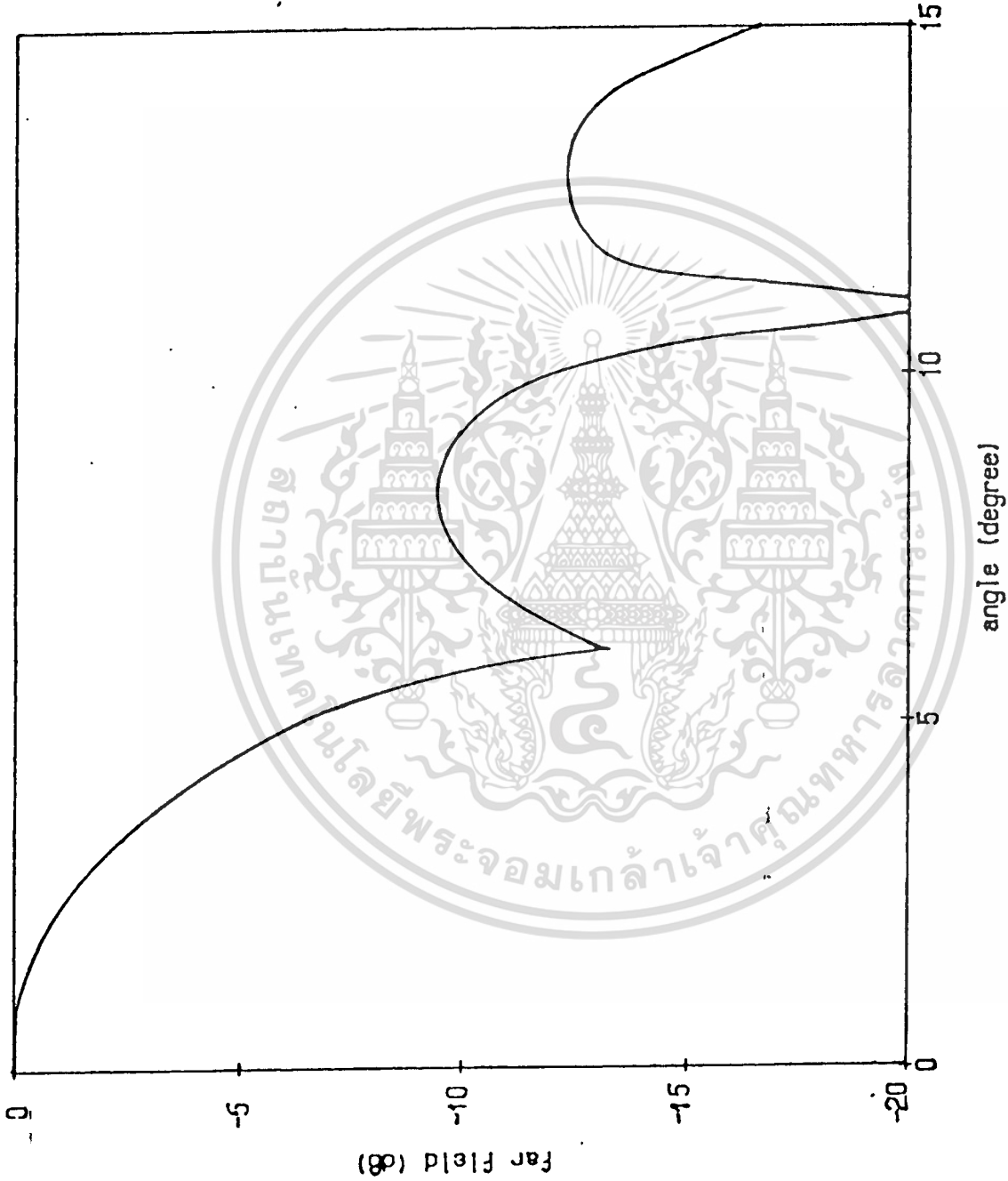
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงแบบรูปสนามไกลของระบบสายอากาศแบบจาส์ทอนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเซลล์
เป็นคิ้วไอออนัลที่ความถี่ 350 MHz



รูปที่ 3.13 แสดงแบบรูปสนามไกลของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเชิงลิทซ์ เป็นตัวป้อนสัญญาณที่ความถี่ 390 MHz



รูปที่ 3.14 แสดงแบบรูปสนามไกลของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเซลิคซ์ เป็นตัวป้อนสัญญาณที่ความถี่ 400 MHz

3.5 กำลังขยายสูงสุดของระบบสายอากาศ

ในหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้นได้กล่าวถึงการกระจายของกระแสที่อะเพอเจอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเหล็ก ที่ถูกกำหนดโดยเบสิสฟังก์ชันที่ถ่วงด้วยโซลูชันของแอมพลิจูดเชิงซ้อนที่ตีที่สุด รวมทั้งการคำนวณหาแบบรูปสนามไกลของสายอากาศเหล็ก และของระบบสายอากาศที่พิจารณาโดยอาศัยโซลูชันดังกล่าว ในหัวข้อนี้ก็จะได้พิจารณาถึงกำลังขยายสูงสุดของระบบสายอากาศที่นำมาพิจารณา

จากสมการที่ (3.8) เราจะแทนสมาชิกของ $V(0)$ และ B^{-1} และเขียนใหม่เมื่อใช้จำนวนเบสิสฟังก์ชันเท่ากับ 3 ดังนี้

$$G_{\max} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 V_i(0) \beta^{ij} V_j^*(0) \quad (3.23)$$

$$= 64 F^2 \pi \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2 g_{\max}$$

เมื่อ $g_{\max} = \left| \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 u_i(0) c^{ij} u_j^*(0) \right| \quad (3.24)$

โดยที่

$$u_n(0) = \frac{1}{W} V_n(0) = (-1)^{n+1-jk(f+z_0+r)} e^{-jk(f+z_0+r)}$$

$$\int_0^1 \frac{J_{2n+1} \left[\frac{k\alpha(\xi/2F)}{1+(\xi/4F)} \right]}{2F + (\xi/4F)^2 \cdot k\alpha\xi} d\xi \quad (3.25)$$

และ $W = 8F \frac{\pi \cdot A}{\lambda} \quad (3.26)$

ที่

c^{ij} เป็นสมาชิกในอินเวอร์สเมตริกส์ C^{-1} ซึ่งค่าของสมาชิกใน C หาได้

จาก

$$C_{ij} = \frac{1}{\sigma^2 \pi} B_{ij} \quad (3.27)$$

ค่า g_{max} ในสมการที่ 3.24 จะขึ้นอยู่กับรัศมีของกราวด์เพลนของเซลิคซ์, ค่าเวฟนัมเบอร์ (F) ของจานสะท้อนคลื่นและความยาวคลื่น λ

ค่ากำลังขยายและค่า g_{max} ตามสมการที่ (3.23) และ (3.24) สามารถคำนวณได้ผลตามตารางที่ 3.1 โดยที่ค่ากำลังขยายนั้นเป็นค่าที่เทียบกับ $\lambda/2$ โดโพล ซึ่งมีกำลังขยาย 2.15 dB แล้ว

ความถี่ (MHz)	ความยาวคลื่น (λ) (m)	เส้นผ่าศูนย์กลางของกราวด์เพลน ($2a$)	เส้นผ่าศูนย์กลางของจานสะท้อนคลื่น	g_{max}	Gain (dBd)
240	1.25	0.80 λ	3.81 λ	0.6325	26.13
280	1.07	0.93 λ	4.27 λ	0.5696	26.67
300	1.00	1.00 λ	4.57 λ	0.5368	27.00
350	0.86	1.17 λ	5.33 λ	0.4606	27.67
390	0.76	1.32 λ	6.01 λ	0.3985	28.08
400	0.75	1.33 λ	6.09 λ	0.3946	28.16

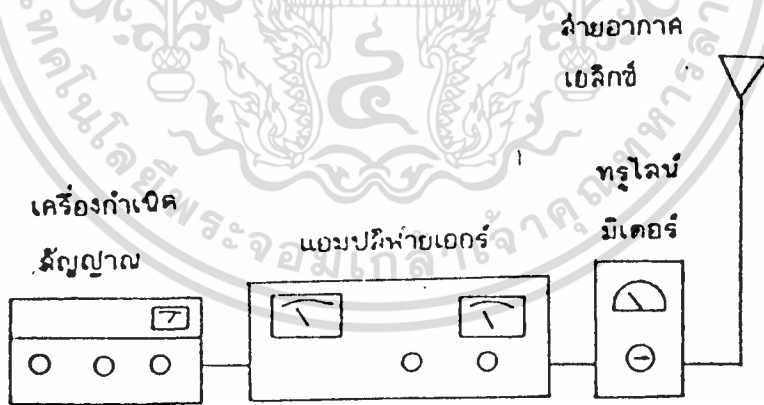
ตารางที่ 3.1 แสดงผลการคำนวณกำลังขยายและค่า g_{max} ของระบบสายอากาศที่พิจารณา

บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติของระบบสายอากาศ

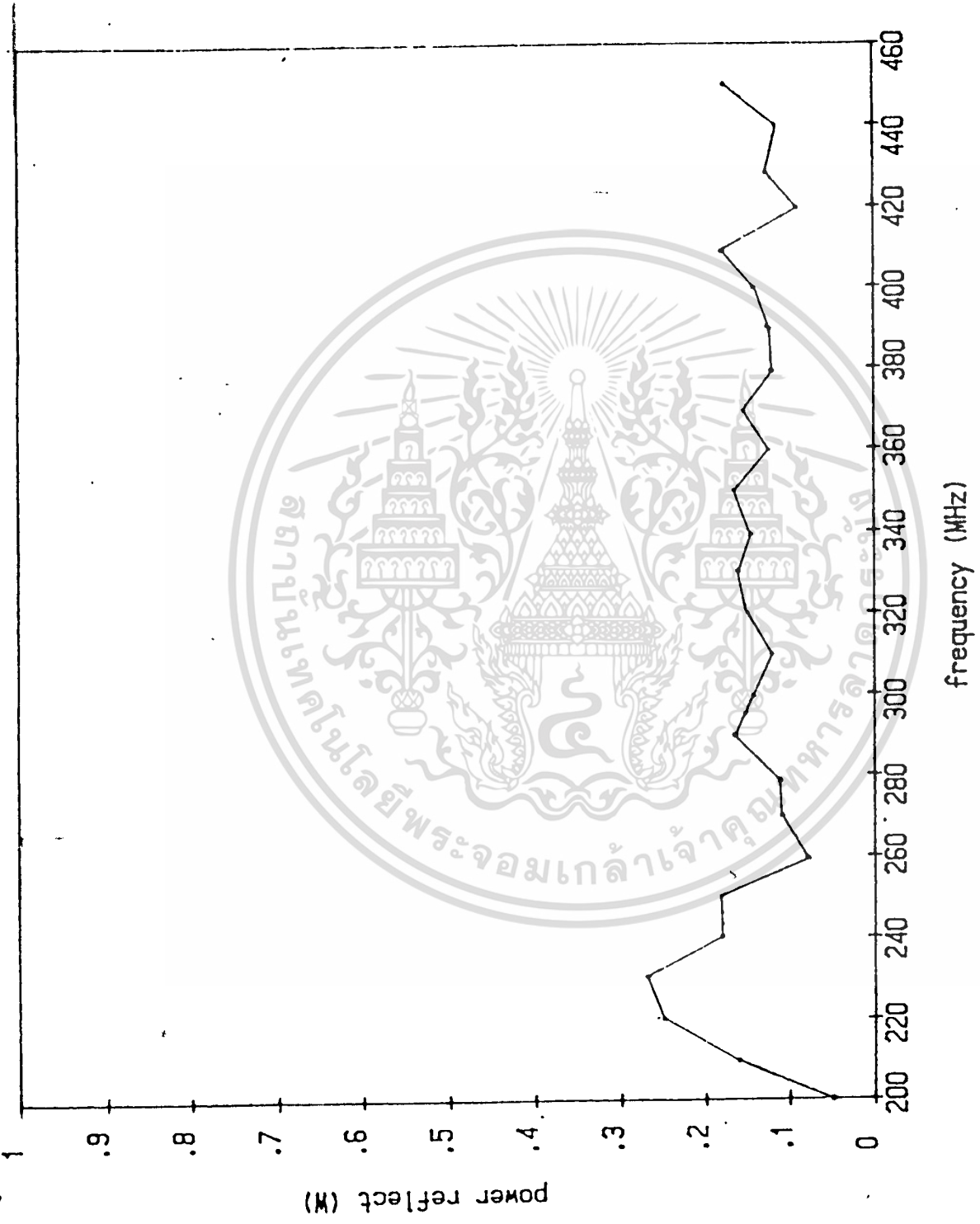
4.1 การวัดความกว้างแถบความถี่ในการใช้งานของสายอากาศเฮลิคซ์ ในแอกเซียลโหมด

ในการวัดความกว้างแถบความถี่ในการใช้งานของสายอากาศเฮลิคซ์ในแอกเซียลโหมดนั้น สามารถวัดได้โดยการวัดอิมพีแดนซ์หรือวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับหรือวัดค่า VSWR ของสายอากาศเฮลิคซ์อย่างใดอย่างหนึ่ง แล้วดูการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ตามความถี่ที่เปลี่ยนไป เพื่อพิจารณาความกว้างแถบความถี่ในการใช้งานของสายอากาศเฮลิคซ์ ซึ่งสำหรับการแผ่พลังงานออกไปในแอกเซียลโหมดของสายอากาศเฮลิคซ์ก็จะมีค่าที่วัดได้เปลี่ยนแปลงอยู่ในระหว่างช่วงหนึ่งในขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป เมื่อเปลี่ยนความถี่ไปจนไม่มีการแผ่พลังงานในโหมดนี้แล้วค่าที่วัดได้ก็จะไม่อยู่ในช่วงดังกล่าว ในการวัดที่จะกล่าวต่อไปนี้จะใช้วิธีวัดโดยใช้การวัดขนาดของพลังงานที่สะท้อนกลับในขณะที่ความถี่เปลี่ยนไปของสายอากาศเฮลิคซ์ที่ไม่มีการแผ่ซึ่ง โดยใช้ทรูไลน์มิเตอร์ (Thru Line Meter) ซึ่งมีการจัดเครื่องมือวัดดังรูปที่ 4.1 ดังนี้



รูป 4.1 แสดงการจัดเครื่องมือในการวัดความกว้างแถบความถี่ใช้งานของสายอากาศเฮลิคซ์ในแอกเซียลโหมด

ผลจากการวัดพลังงานที่สะท้อนกลับในขณะที่มีพลังงานที่ส่งออกไปปรับให้มีขนาด 1 W ในทุกความถี่ที่เปลี่ยนไปตั้งแต่ 200 ถึง 450 MHz แสดงดังกราฟรูปที่ 4.2



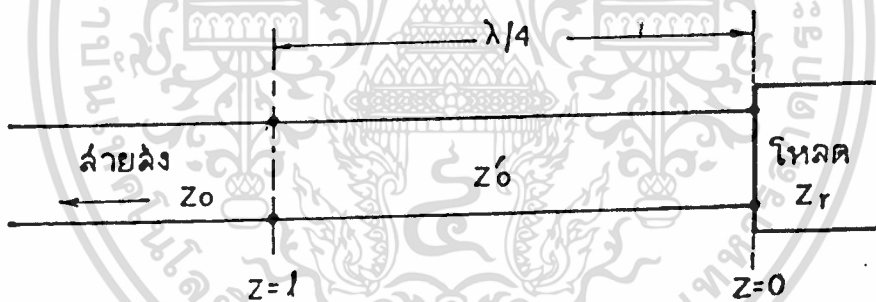
รูป 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปกับขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับ เมื่อปรับให้ขนาดของพลังงานที่ส่งออกไปในทุกความถี่มีค่า 1 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูป 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่สะท้อนกลับตามความถี่ที่เปลี่ยนไปมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 260 ถึง 410 MHz นั่นคือสายอากาศเฮลิคซ์ที่ออกแบบไว้จะมีความกว้างแถบความถี่ของการใช้งานอยู่ในช่วง 260 - 410 MHz

4.2 การแมทชิ่งระหว่างระบบสายอากาศกับสายส่ง

การแมทชิ่ง (Matching) สายอากาศกับสายส่งนั้น เราสามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีที่เลือกมาใช้จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Reflection Coefficient) ที่ต่ำและสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่กว้าง รวมทั้งจะต้องมีส่วนประกอบที่กระต๊อคสามารถนำไปประกอบกับระบบสายอากาศ และนำไปใช้งานได้อย่างสะดวก สำหรับวิธีแมทชิ่งที่เลือกมาใช้สำหรับสายอากาศเฮลิคซ์กับสายส่งคือ ควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Quarter Wave Transformers) หรือ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์ ซึ่งเป็นการแมทชิ่งโดยวิธีแทรกส่วนที่เป็นแมทชิ่งที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ เข้าไประหว่าง



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของควอเตอร์เวฟ ทรานส์ฟอร์มเมอร์

สายส่งและโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ต่างกัน ทรานส์ฟอร์มเมอร์แบบนี้จะมีโครงสร้างตามรูปที่ 4.3 ซึ่งจะมีอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) Z_0 เป็นลักษณะกลับกับ โหลดอิมพีแดนซ์ (Load Impedance) Z_r ตามสมการที่ 4.1 ดังนี้ [14]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z_0'}{Z_r}} \quad (4.1)$$

เมื่อ Z_0 เป็นอิมพีแดนซ์คุณสมบัตินี้ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

Z'_0 เป็นอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์

จากสมการที่ (4.1) เมื่อจัดรูปใหม่จะได้ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็น

$$Z'_0 = \sqrt{Z_r Z_0} \tag{4.2}$$

โดยทั่ว ๆ ไปโหลดอิมพีแดนซ์จะมีค่าที่อยู่ในรูปของเชิงซ้อน (Complex) มากกว่าค่าที่อยู่ในรูปของค่าจริง จุดที่จะเป็นค่าจริงจะเกิดขึ้นเฉพาะจุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ต่ำสุดหรือสูงสุดตลอดความยาวของวงจรที่จะทำการแมทช์นั้น ถ้าต้องการแปลงค่าจริงของโหลดอิมพีแดนซ์ไปหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ เราจะต้องเลือกจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดหรือสูงสุดจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดอ้างอิงเสียก่อน

ในกรณีที่เลือกจุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดเป็นจุดอ้างอิงจะมีค่าของโหลดอิมพีแดนซ์ที่จุดนั้นดังนี้

$$Z_{min} = \frac{Z_0}{r_1} \tag{4.3}$$

เมื่อ Z_{min} เป็นค่าของโหลดอิมพีแดนซ์ตรงจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด
 r_1 เป็น VSWR ที่เกิดขึ้นที่จุดที่จะทำการแมทช์ซึ่ง

และเมื่อแทนค่าโหลดอิมพีแดนซ์จากสมการ (4.3) ลงใน (4.2) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์ ดังนี้

$$Z'_0 = \sqrt{Z_{min} Z_0} = \frac{Z_0}{\sqrt{r_1}} \tag{4.4}$$

ในกรณีที่เลือกจุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเป็นจุดอ้างอิง เราจะได้ค่าของโหลดอิมพีแดนซ์ที่จุดนั้นดังนี้

$$Z_{\max} = r_1 Z_0 \quad (4.5)$$

และโดยการแทนค่าโวลจิมพีแดนซ์จากสมการที่ (4.5) ลงในสมการที่ (4.2) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ $\lambda/4$ ทราన్ส์ฟอร์มเมอร์ เป็น

$$Z'_0 = \sqrt{Z_{\max} Z_0} = \sqrt{r_1} Z_0 \quad (4.6)$$

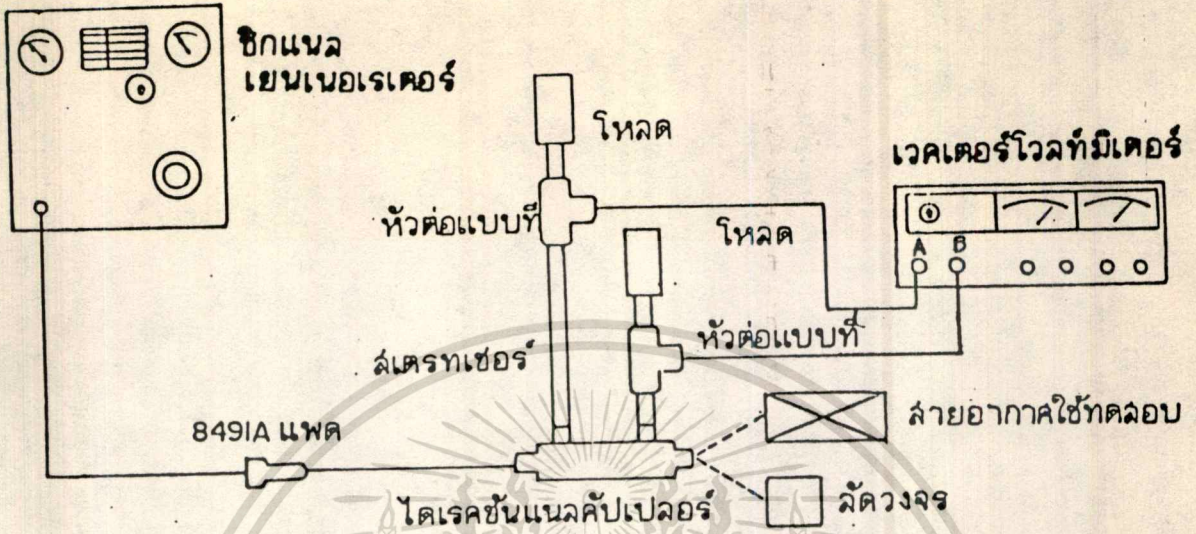
ดังนั้นเมื่อเรารู้ค่าของโวลจิมพีแดนซ์ และกำหนดค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายส่ง เราก็สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ $\lambda/4$ ทราన్ส์ฟอร์มเมอร์ได้ ซึ่งในการทดสอบนี้จะเลือกใช้สายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติเท่ากับ 50 โอห์ม ส่วนโวลจิมพีแดนซ์จะทราบได้จากการวัดซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

4.2.1 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศ

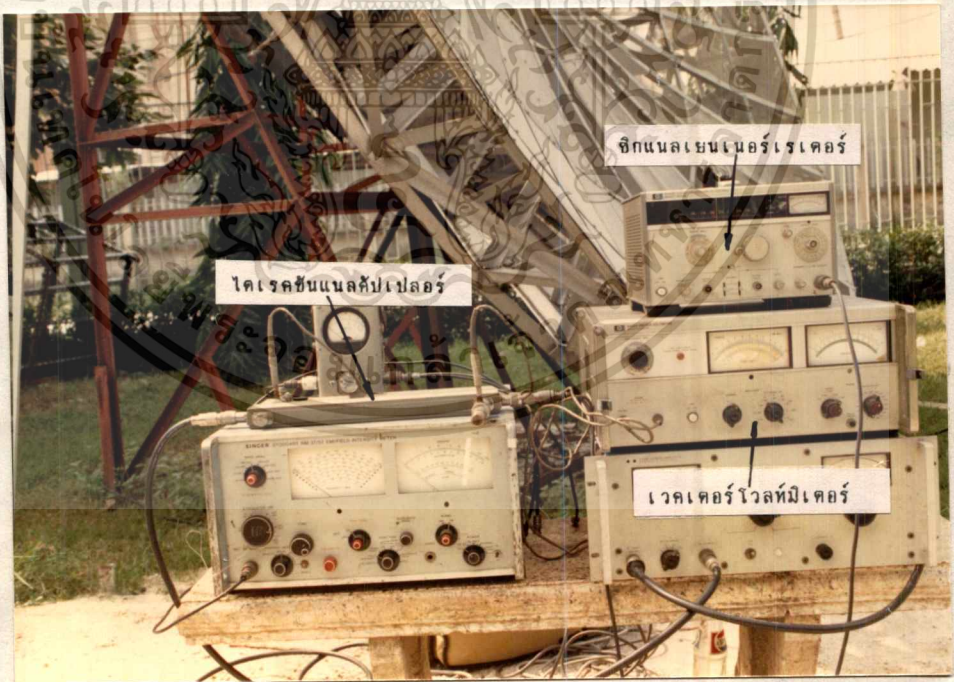
การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะใช้วิธีวัดศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศและศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณที่สะท้อนกลับและเฟสของสัญญาณทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาค่าของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในแต่ละความถี่ ในการวัดโดยวิธีนี้จะอาศัยเครื่องมือในการวัดดังนี้

1. เวกเตอร์โวลท์มิเตอร์ (Vector Voltmeter)
2. ซิกแนล เชนเนอร์เรเตอร์ (Signal Generator)
3. ไดเรกชันแนล คัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler)

ในการวัดจะจัดเครื่องมือต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.4 และเมื่อพิจารณาตามรูป สัญญาณที่ออกมาจากซิกแนลเชนเนอร์เรเตอร์ที่ผ่านไปยังโหลดจะมีคลื่นนิ่งเกิดขึ้นระหว่างคลื่นที่ส่งออกไปและคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากโหลด ซึ่งเราจะเอาสัญญาณทั้งสองนี้มาวัดขนาด และเฟสโดยในขณะที่ส่งสัญญาณออกไปจากซิกแนลเชนเนอร์เรเตอร์จะผ่านไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ดึงเอาสัญญาณในทิศทางที่ต้องการออก ใกล้เคียงคือที่ A สัญญาณจากซิกแนลเชนเนอร์เรเตอร์จะส่งผ่านไปยังจุดทดสอบและเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์เพื่ออ่านค่าของขนาดของสัญญาณที่พอร์ท A สัญญาณที่สะท้อนกลับจากจุดทดสอบจะผ่านเข้าทางจุด B ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ และส่งไปยังเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์เพื่ออ่านขนาดของ



รูปที่ 4.4 แสดงการจัดเครื่องมือในการวัดเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณจากสายอากาศโดยใช้เวคเตอร์โวลท์มิเตอร์และไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของการจัดเครื่องมือในการวัดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยใช้เวคเตอร์โวลท์มิเตอร์และไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณและเฟสที่พอร์ท B ถ้าที่จุดทดสอบไม่มีโหลดก็จะมีคลื่นสะท้อนกลับมาและจะเกิดคลื่นนิ่งขึ้นภายในสายส่ง ขนาดของสัญญาณที่ A จะต้องมีค่ามากที่สุด คือมีขนาดเท่ากับ 1 ฉะนั้นเมื่อเริ่มทำการวัดจะต้องเอาโหลดออก และปรับให้ขนาดของสัญญาณที่พอร์ท A เป็น 1 เสียก่อน เมื่อค้อโหลดเข้ากับแบบแล้วขนาดของสัญญาณดังกล่าวจะน้อยกว่า 1 เนื่องจากมีการหักล้างกันของคลื่นที่สะท้อนกลับมา และเมื่อทำการลัดวงจร (Short Circuit) ที่จุดทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่อ่านได้จากเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์ จะมีค่าเป็น $1/180^\circ$ ดังนั้นในการวัดสำหรับแต่ละความถี่ที่เราจะปรับความถี่ที่ต้องการ จากซิกแนลเจนเนอเรเตอร์เรเตอร์แล้วปรับขนาดสัญญาณที่ A ให้มีขนาดเป็น 1 ในขณะที่ยังไม่ได้ต่อระบบสายอากาศที่จุดทดสอบ เมื่อต่อระบบสายอากาศโดยนำจุดป้อนสัญญาณมาต่อกับจุดทดสอบแล้ว จึงอ่านค่าของสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Γ_m) และเฟส (θ_m) ของสัญญาณจากมิเตอร์ของเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์หลังจากนั้นก็ทำการลัดวงจรที่จุดทดสอบแล้ว อ่านค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Γ_{sc}) และเฟส (θ_{sc}) ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่แท้จริงของสายอากาศจากเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์หาได้จากอัตราส่วนของสัญญาณที่สะท้อนกลับในขณะที่มีสายอากาศต่ออยู่กับขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับขณะที่ลัดวงจรอยู่ที่นั้น คือ

$$\Gamma = \frac{V_{ont}}{V_{sc}} \quad (4.7)$$

หมายเหตุ

- เมื่อ V_{ont} เป็นศักดาไฟฟ้าของสัญญาณที่สะท้อนกลับในขณะที่มีสายอากาศต่ออยู่
- V_{sc} เป็นศักดาไฟฟ้าของสัญญาณที่สะท้อนกลับในขณะที่ลัดวงจร

แต่จากทฤษฎีของสายส่ง [14] จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของคลื่นที่ส่งไปและสะท้อนกลับมาจากจุดทดสอบดังนี้คือ

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} \quad (4.8)$$

- เมื่อ V_{inc} เป็นขนาดของคลื่นที่ไปตกกระทบ
- V_{ref} เป็นขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับมา

ฉะนั้นจาก (4.7) และ (4.8) เราจะได้ความสัมพันธ์ใหม่ ดังนี้

$$V_{ant} = \Gamma_{ant} \cdot V_{inc} \tag{4.9}$$

และ $V_{sc} = \Gamma_{sc} \cdot V_{inc} \tag{4.10}$

เมื่อ V_{inc} เป็นศักดาไฟฟ้าของสัญญาณที่ส่งออกไปจากชิคแนลเลนเนอร์เรเตอร์
 Γ_{ant} เป็นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนเมื่อมีสายอากาศต่ออยู่ที่จุดทดสอบ
 Γ_{sc} เป็นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนเมื่อทำการลัดวงจรอยู่ที่จุดทดสอบ
โดยการแทนค่า V_{ant} จาก (4.9) และ V_{sc} จาก (4.10) ลงใน (4.7) และจัด
รูปใหม่จะได้

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{ont}}{\Gamma_{sc}} \tag{4.11}$$

แต่ในการวัดด้วยเวคเตอร์โวลท์มิเตอร์หว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน โดยทั่ว ๆ
ไปจะอยู่ในรูปของเชิงซ้อนและสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{ont} \angle \theta_{ont}}{\Gamma_{sc} \angle \theta_{sc}} = \frac{\Gamma_{ont}}{\Gamma_{sc}} \angle (\theta_{ont} - \theta_{sc}) \tag{4.12}$$

เมื่อ θ_{ont} เป็นเฟสของสัญญาณ ณ จุดทำการวัดเมื่อมีสายอากาศต่ออยู่ที่จุดทดสอบ
 θ_{sc} เป็นเฟสของสัญญาณ ณ จุดที่ทำการวัดเมื่อลัดวงจรอยู่ที่จุดทดสอบ

อย่างไรก็ตาม θ_{sc} ในสมการที่ (4.11) ที่อ่านได้จากเวคเตอร์โวลท์มิเตอร์ที่ใช้
(8405A) ในขณะที่ทำการลัดวงจร ณ จุดทดสอบเป็นค่าที่เทียบกับมุม 180° แต่ในการนำ
ไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาอิมพีแดนซ์จะต้องใช้ค่ามุมที่เทียบกับมุม 0° ฉะนั้นเราจะต้อง
แปลงค่ามุม θ_{sc} ที่อ่านได้จากเวคเตอร์โวลท์มิเตอร์ไปเทียบกับมุม 0° และเขียนสมการ
(4.12) ใหม่ได้ดังนี้

$$\Gamma = \Gamma \angle \theta = \begin{cases} \frac{\Gamma_{ont}}{\Gamma_{sc}} \angle \theta_1 & \text{เมื่อ } \theta_{sc} < 180^\circ \\ \frac{\Gamma_{ont}}{\Gamma_{sc}} \angle \theta_2 & \text{เมื่อ } \theta_{sc} > 180^\circ \end{cases} \quad (4.13)$$

โดยที่ $\theta = \theta_{ont} - \theta_{sc}$

$$\theta_1 = \theta_{ont} - (180^\circ - \theta_{sc})$$

$$\theta_2 = \theta_{ont} - (\theta_{sc} - 180^\circ)$$

โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนและอิมพีแดนซ์ [14] เราสามารถหาค่าของอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$\bar{z} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (4.14)$$

โดยที่ \bar{z} เป็นนอร์มอลไรซ์อิมพีแดนซ์ซึ่งจะมีค่า

$$\bar{z} = \frac{Z(z)}{Z_0} \quad (4.15)$$

เมื่อ $z(z)$ เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศที่จุด z

Z_0 เป็นอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายส่ง

เมื่อแทนค่า Γ จากสมการที่ (4.12) ลงใน (4.13) จะได้

$$\bar{z} = \frac{1 + (\Gamma \cos \theta + j \Gamma \sin \theta)}{1 - (\Gamma \cos \theta + j \Gamma \sin \theta)} \quad (4.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่วัดได้เมื่อต่อสายอากาศอยู่ที่จุดทดสอบ และเมื่อสัควจรอยู่ที่จุดทดสอบจะนำมาคำนวณเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศ ตามสมการที่ (4.16) โดยในการวัดและคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศที่ความถี่ 240 - 400 MHz และอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่า 50 โอห์ม แต่เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ตามสมการที่ 4.16 เป็นผลรวมของอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ใช้ซึ่งมีความยาว 4.27 เมตร กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศ ดังนั้นถ้าเรากำหนดให้ที่จุด $Z = 0$ เป็นจุดป้อนสัญญาณของระบบสายอากาศเราจะได้ว่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ในระยะห่างออกไปจากจุดป้อนสัญญาณเป็นระยะ $Z = 1$ จะมีค่าดังนี้

$$z(-l) = z_0 \frac{(z_L + jz_0 \tan \beta l)}{(z_0 + jz_L \tan \beta l)} \quad (4.17)$$

เมื่อ l เป็นความยาวของสายส่งจากโหลดไปยังจุดทดสอบ

z_L เป็นอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศ

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ โดยที่ λ_g เป็นความยาวคลื่นในสายโคแอกเซียลที่ใช้ ($RG8/U$) ซึ่งความเร็วของการเดินทางของคลื่นภายในสายจะมีค่าเป็น $1/\epsilon_r$ ($= 0.67$, $\epsilon_r = 2.23$) เท่าของความเร็วแสง และ λ_g ก็จะมีค่าเป็น 0.67 เท่าของ λ ในบรรยากาศ

และเราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศได้จากสมการ (4.17) ดังนี้

$$z_L = z_0 \frac{(z - j \tan \beta l)}{(1 - j z \tan \beta l)} \quad (4.18)$$

และผลจากการวัดด้วยเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์ เราจะสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศที่ใช้สายโคแอกเซียลเบอร์ RG8/U ซึ่งมีอิมพีแดนซ์คุณสมบัติเท่ากับ 50 โอห์มต่อไปยังจุดทดสอบยาว 4.27 เมตร ได้ตามตารางที่ 4.1

ข้อมูลที่ี้จากการวัด					อิมพีแดนซ์			
ค้วมเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์								
ความถี่ (MHz)	θ (sc) (องศา)	Γ (sc)	θ (m) (องศา)	Γ (m)	Z_L	θ (องศา)	\bar{R}	\bar{X}
240	18	.77	-120	.47	1.2238	40.00	0.9371	0.7870
250	132	.75	5	.53	0.6563	26.14	0.5891	-0.2893
260	-170	.72	40	.565	2.9814	26.24	2.6737	1.3191
270	-112	.7	78	.48	0.2188	18.94	0.2070	0.0710
280	-55	.73	119	.45	2.4971	48.31	1.6601	-1.8653
290	-6	.75	180	.39	0.6730	51.16	0.4218	0.5244
300	30	.73	-132	.46	1.0085	59.05	0.5181	-0.8652
310	72	.69	-90	.92	1.5388	63.46	0.6869	1.3769
320	121	.67	-50	.37	0.4436	42.22	0.3284	-0.2982
330	175	.69	0	.45	4.3318	20.33	4.0616	1.5059
340	-130	.71	35	.48	0.2790	31.08	0.2389	0.1441
350	-82	.72	70	.4	1.8198	38.35	1.4268	-1.1296
360	-40	.74	128	.29	0.8056	40.10	0.6160	0.5190
370	0	.71	-160	.31	0.9049	43.24	0.6590	-0.6202
380	50	.68	-120	.42	1.7522	56.58	0.9644	1.4629
390	98	.65	-80	.43	0.3201	47.46	0.2163	-0.2359
400	16	.63	-50	.52	0.6551	0.32	0.6551	-0.0037

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดและผลการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศที่ความถี่ 240 - 400 MHz

และค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศตามสมการที่ (4.15) ที่ความถี่ 300 MHz คือ

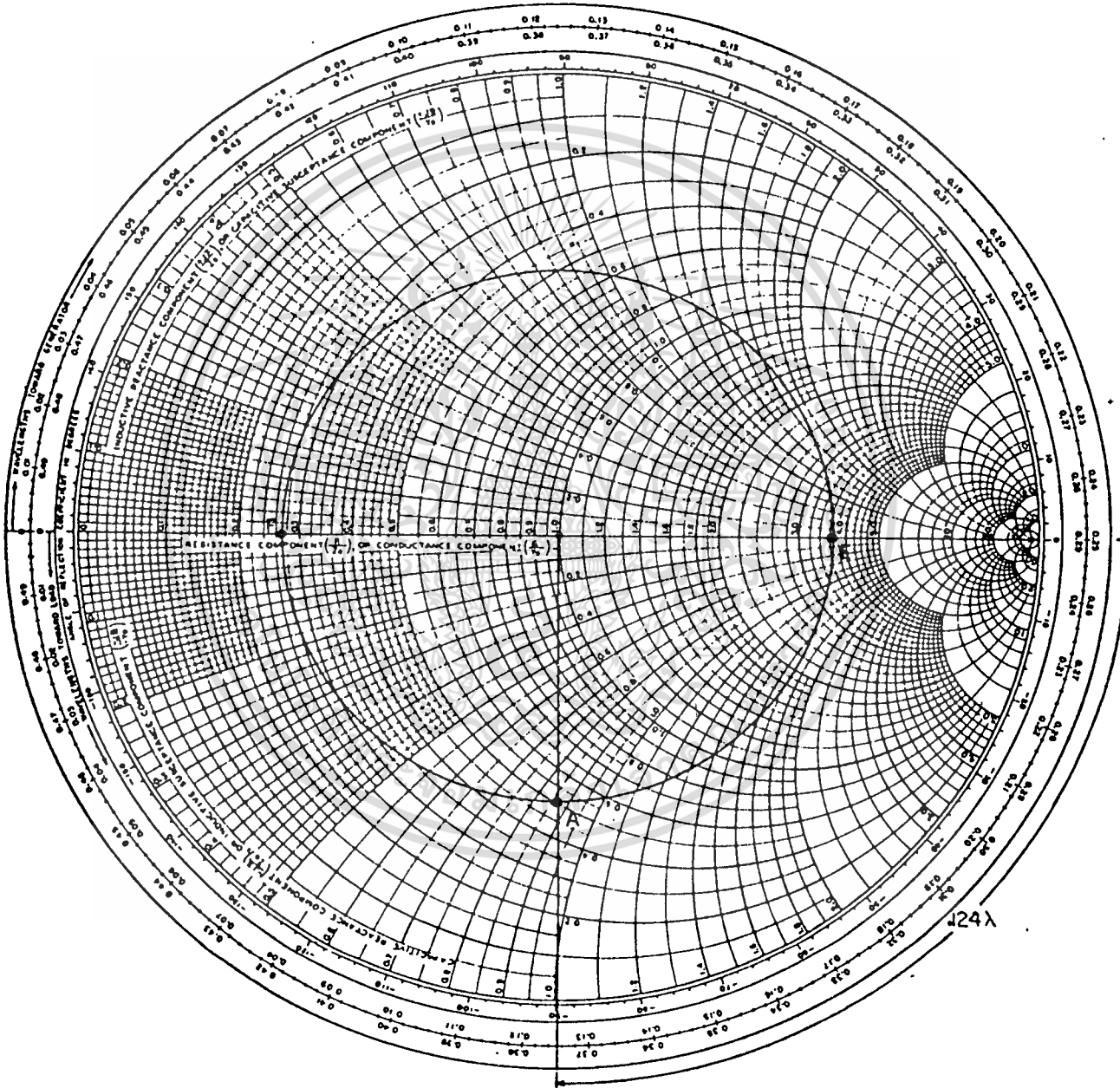
$$Z(z) = 50 (0.52 - j 0.87) \quad (4.19)$$

$$= 26 - j 43.5 \Omega$$

4.2.2 การออกแบบ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์

ในการออกแบบ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์ เราจะเลือกจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงเป็นจุดอ้างอิง เนื่องจากเป็นจุดที่อยู่ใกล้โหนดมากที่สุด ซึ่งจะต้องหาค่าแห่งและอิมพีแดนซ์

ที่จุดอ้างอิงโดยการนอร์มอลไรซ์ค่า Z_L ในสมการที่ (4.19) ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม จะพบว่าค่าของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอยู่ที่จุด A บน



รูปที่ 4.4 แสดงการหาจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุดบนสมิทชาร์ท

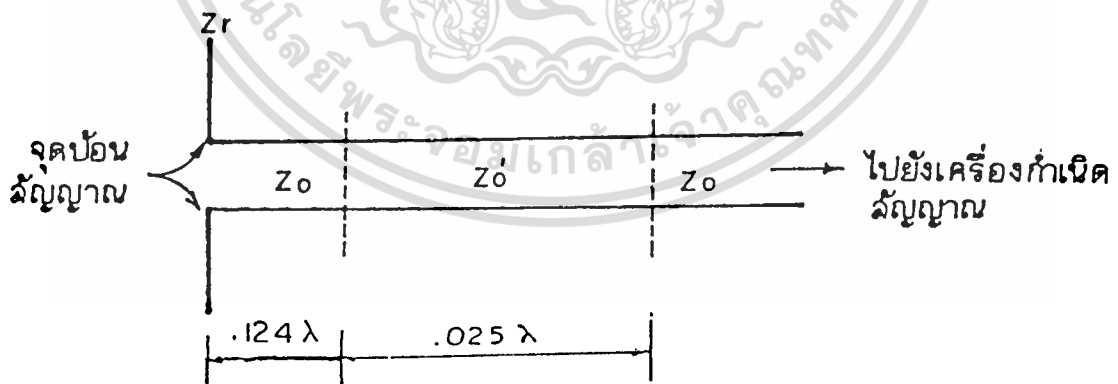
เส้นรอบวง AEF บนสมิททชาร์ท (Smith Chart) ตามรูปที่ 4.6 จุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าอิมพีแดนซ์อยู่ที่จุด E ซึ่งมีค่า

$$\begin{aligned}
 Z_{max} &= 50 (3.64 + j0) \\
 &= 182 \ \Omega
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

เมื่อแทนค่า Z_{max} จาก (4.20) ลงใน (4.6) จะได้อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์ดังนี้

$$Z'_0 = \sqrt{182 \times 50} = 95.39 \ \Omega
 \tag{4.21}$$

และส่วนปลายสุดของ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์จะอยู่ห่างจากจุดบ่อนสัญญาณของสายอากาศออกไปเป็นระยะทางเท่ากับส่วนโค้ง AE ซึ่งเท่ากับ $.124 \lambda$ ดังนั้นสำหรับการวางรูปแบบของการแมทชิงระหว่างระบบสายอากาศกับสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ 50 โอห์ม โดยมี $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นส่วนของแมทชิงจะได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงการแมทชิงระหว่างระบบสายอากาศกับสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ 50 โอห์มด้วย $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์มเมอร์

เราจะสร้างส่วนที่เป็น $\lambda/4$ ทรานส์ฟอเมอร์เป็นสายโคแอกเซียล ซึ่งมีอิมพีแดนซ์
คุณสมบัติตามสมการที่ (4.21) จากสมการอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายโคแอกเซียล [16]
เราได้ว่า

$$Z_0' = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (4.22)$$

เมื่อ Z_0' เป็นอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอเมอร์
 ϵ_r เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Dielectric Constant)
ของตัวกลางระหว่างตัวนำชั้นในและตัวนำชั้นนอก
 a เป็นรัศมีของตัวนำชั้นใน
 b เป็นรัศมีของตัวนำชั้นนอก

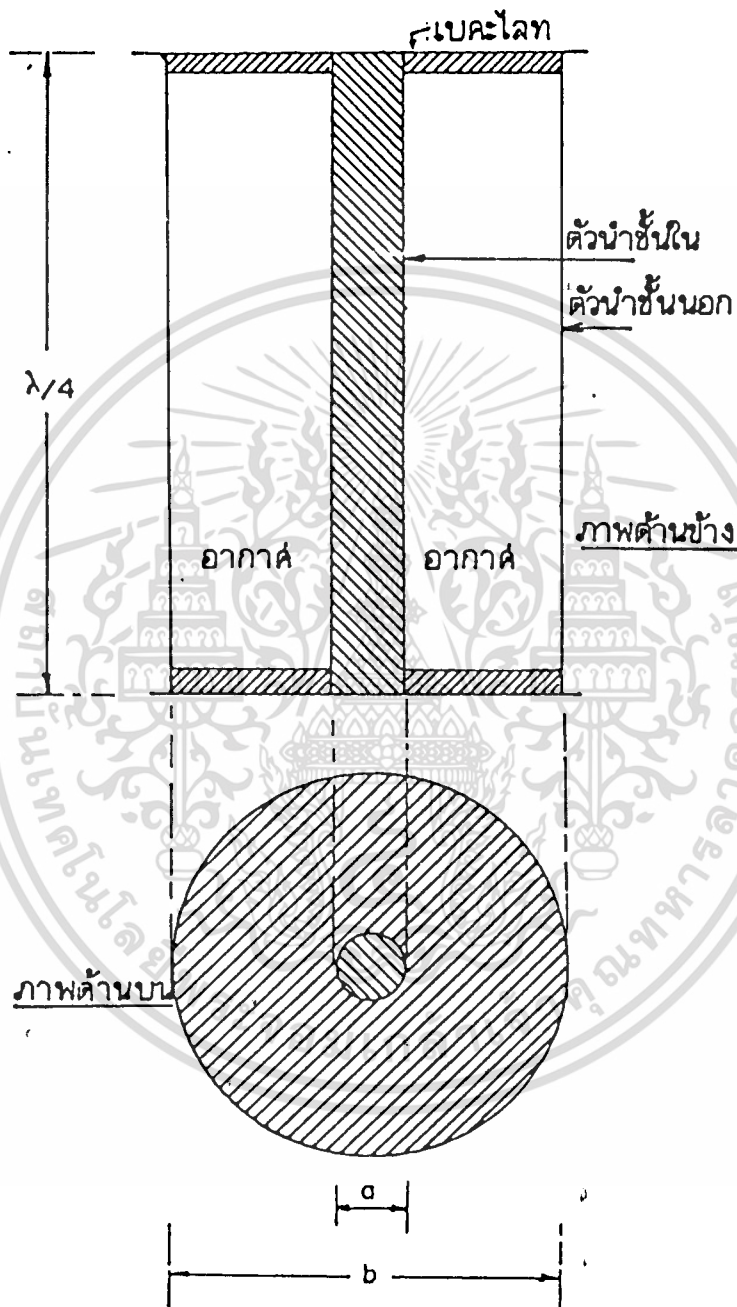
และเมื่อกำหนดให้ที่ว่างระหว่างตัวนำชั้นในและตัวกลางชั้นนอกเป็นอากาศค่า ϵ_r
จะเท่ากับ 1 ฉะนั้นสมการที่ (4.22) จะลดรูปเป็น

$$Z_0' = 60 \ln \frac{b}{a} \quad (4.23)$$

เมื่อใช้ตัวนำชั้นนอกเป็นท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.051 เมตร (2 นิ้ว)
เราจะคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำชั้นในได้จากสมการ (4.23) โดยแทนค่า Z_0
จาก (4.21) แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$a = 0.051 \cdot (95.39/60) = .01 \text{ เมตร}$$

$\lambda/4$ ทรานส์ฟอเมอร์ที่สร้างเสร็จแล้วจะมีความยาว 25 ซม. (ที่ความถี่ 300 MHz)



รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างของ $\lambda/4$ ทรานส์ฟอร์เมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตัวนำชั้นในสร้างด้วยแท่งทองเหลืองกลึงจนได้ขนาดที่ต้องการ และนำไปยึดกับท่ออลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.051 เมตร ด้วยแผ่นเบเคะไลท (Bakelite) ดังรูปที่ 4.8 และได้นำไปประกอบกับระบบสายอากาศที่จุดบ่อนสัญญาณของสายอากาศเฮลิคซ์

4.2 การวัดแพทเทอรันของสายอากาศเฮลิคซ์

การวัดแพทเทอรันของระบบสายอากาศเป็นการวัดความเข้มของสนามที่อยู่ห่างจากระบบสายอากาศออกไปเป็นระยะทางหนึ่งและระยะทางดังกล่าวจะหามุมต่าง ๆ กับแกนของระบบสายอากาศ สำหรับแบบรูปสนามไกล (Far Field Pattern) จะต้องมีระยะห่างจากสายอากาศที่จะวัดแพทเทอรันและสายอากาศส่งเป็นระยะทางดังนี้ [15]

$$r_{min} = \frac{2 \cdot A^2}{\lambda} \quad (4.24)$$

เมื่อ r_{min} เป็นระยะทางห่างจากสายอากาศที่จะวัดแบบรูปสนามไกล
A เป็นขนาดของอะเพอเจอร์ของสายอากาศที่จะวัด

ฉะนั้นตามสมการที่ (4.24) ระยะทางที่จะวัดแพทเทอรันของสายอากาศที่ความถี่ 300 MHz จะต้องมีมากกว่าหรือเท่ากับ 41.77 เมตร และในการวัดจะใช้เครื่องมือในการวัดดังนี้

1. อิกเนลเยนเนอร์เรเตอร์
2. เครื่องวัดความแรงของสัญญาณ (Field Strength Meter)
3. สายอากาศไดโพล (Standard Dipole)

สำหรับการวัดแบบรูปสนามไกลของสายอากาศเฮลิคซ์จะแสดงแผนผังในการจัดอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยสังเขปตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนผังการจุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวัดแพทเทิร์นของสายอากาศเฮลิคัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูป (4.9) เมื่อปรับสัญญาณจากซิกแนลเยนเนอเรเตอร์ตามความถี่ที่ต้องการแล้วป้อนให้สายอากาศโคโพลที่ใช้เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังสายอากาศเฮลิคซ์ ซึ่งปรับความยาวที่ความถี่เดียวกัน และอยู่ห่างออกไปเป็นระยะทาง 55 เมตร สัญญาณที่สายอากาศเฮลิคซ์รับได้จะถูกส่งไปยังเครื่องวัดความแรงของสัญญาณ เพื่ออ่านและบันทึกผลการวัด สายอากาศเฮลิคซ์ยึดติดกับแกนในแนวตั้งที่สามารถหมุนได้รอบแกนนั้น เมื่อเริ่มทำการวัดจะตั้งให้สายอากาศเฮลิคซ์หันหน้าเข้าหาสายอากาศโคโพล ซึ่งแนวแกนของสายอากาศเฮลิคซ์จะอยู่ในแนวเดียวกับแกนของโคโพล ซึ่งจะถือเอาเป็นแนวอ้างอิง และจะถือว่าแนวแกนของสายอากาศเฮลิคซ์ทำมุม 0° กับแนวอ้างอิงนี้ และในการวัดที่ความถี่หนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนทิศทางของสายอากาศเฮลิคซ์ไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ครั้งละ 5 องศาจากแนวอ้างอิงจนครบรอบ แต่ครั้งจะบันทึกมุมที่แนวแกนของสายอากาศเฮลิคซ์ที่ทำกับแนวแกนอ้างอิงและความแรงของสัญญาณที่สายอากาศเฮลิคซ์รับได้ แต่เนื่องจากสายอากาศเฮลิคซ์มีโพลาริซชันของสนามเป็นแบบวงกลม ฉะนั้นในการส่งสัญญาณที่สายอากาศโคโพลจะต้องส่งสัญญาณเมื่อโคโพลอยู่ในแนวตั้ง (Vertical) ครั้งหนึ่งและรับสัญญาณเมื่อโคโพลอยู่ในแนวนอน (Horizontal) ครั้งหนึ่งสำหรับการวัดที่มุมหนึ่ง ๆ และนำมาหาค่าผลรวมจากเวกเตอร์ของสนามทั้งสอง ดังนี้

$$E(\theta) = \sqrt{|\vec{E}_{\text{ver}}(\theta)|^2 + |\vec{E}_{\text{Hor}}(\theta)|^2} \quad (4.25)$$

เมื่อ θ เป็นมุมที่แนวแกนของสายอากาศเฮลิคซ์ทำกับแนวอ้างอิง

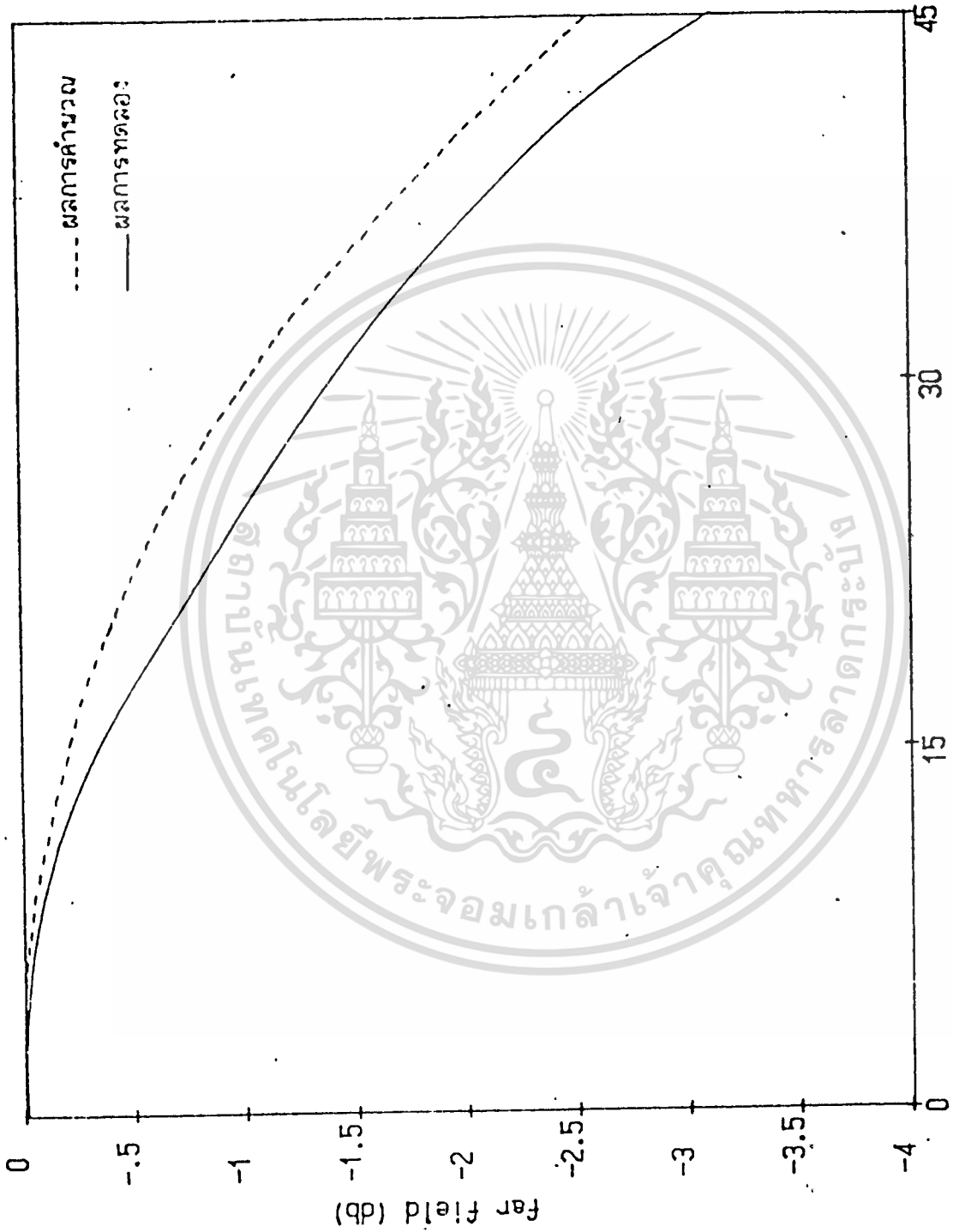
$|\vec{E}_{\text{ver}}(\theta)|$ เป็นความแรงของสนามที่ใช้สายอากาศเฮลิคซ์รับได้เมื่อโคโพลอยู่ในแนวตั้งที่มุม θ

$|\vec{E}_{\text{Hor}}(\theta)|$ เป็นความแรงของสนามที่ใช้สายอากาศเฮลิคซ์รับได้เมื่อโคโพลอยู่ในแนวนอนที่มุม θ

$E(\theta)$ เป็นผลรวมของสนามไฟฟ้าที่มุม θ

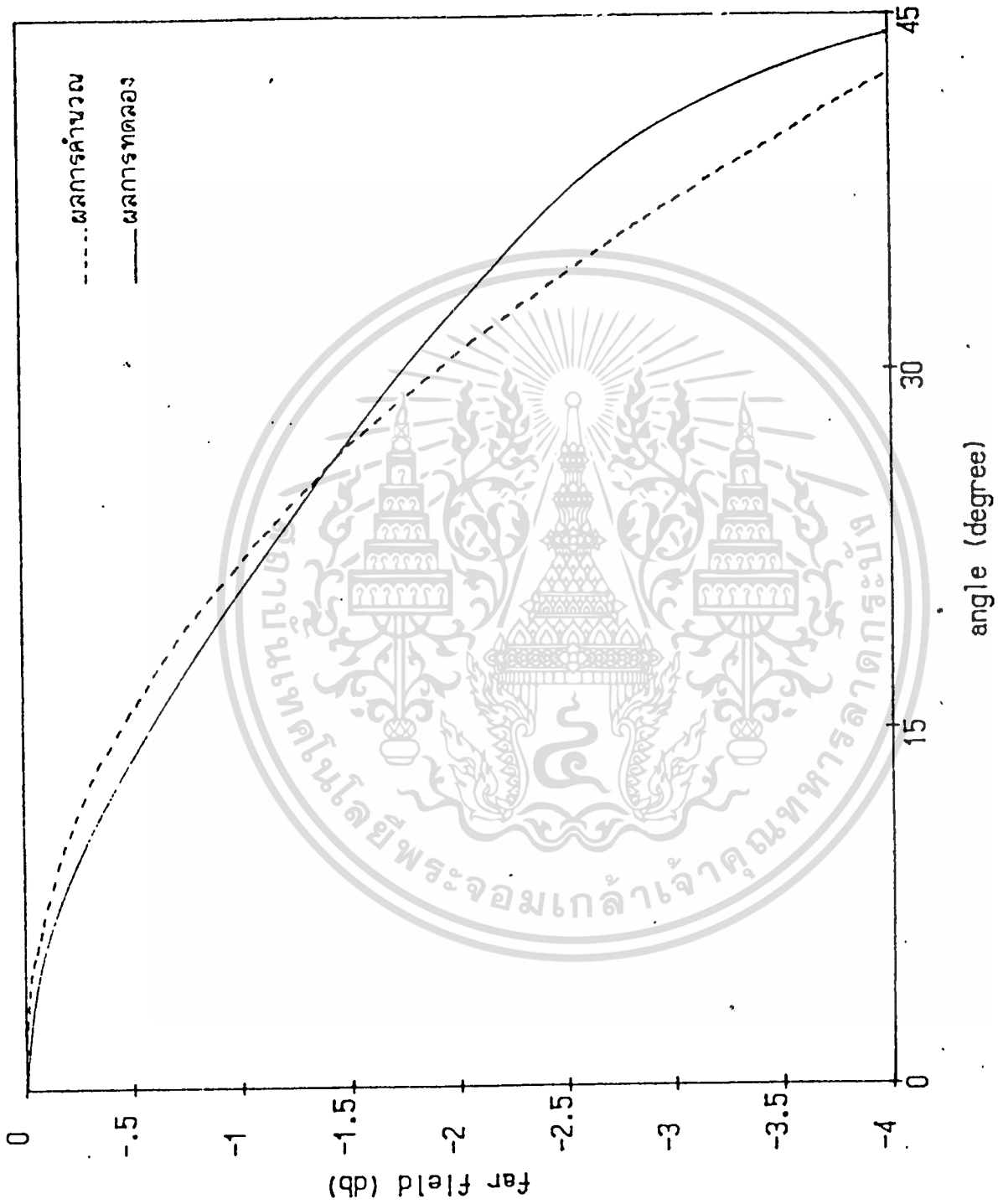
ค่าของสนามไฟฟ้าตามสมการที่ (4.25) เมื่อนำมาพลอต (plot) จะได้รูปร่างของนอร์มอลไรซ์แพทเทิร์นของสายอากาศเฮลิคซ์ที่นอร์มอลไรซ์ด้วยค่าสูงสุดที่มุม 0 องศา ที่ความถี่ 240 MHz, 280 MHz, 300 MHz, 390 MHz, และ 400 MHz ดังรูปที่

4.10 - 4.15 ตามลำดับ

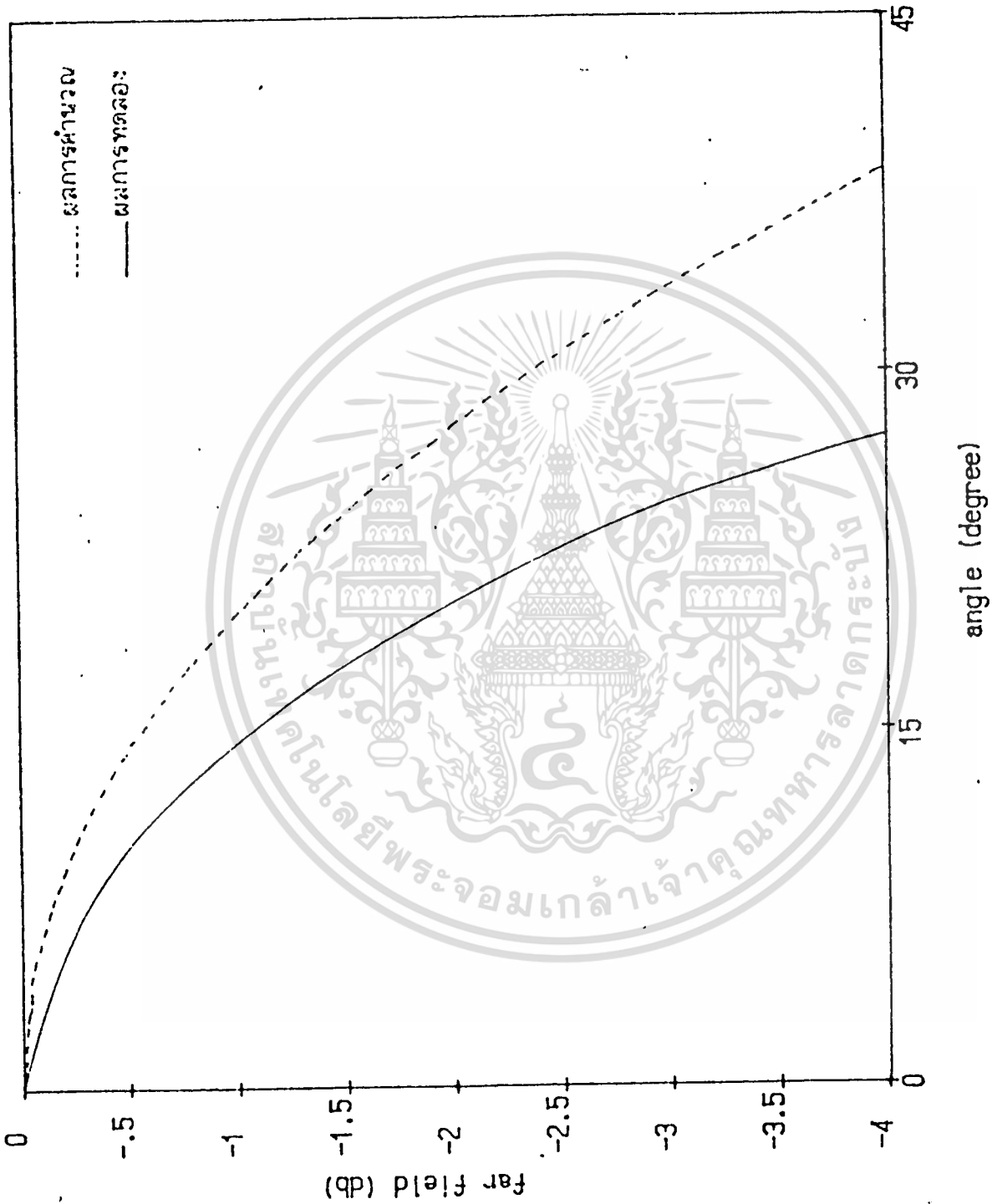


รูปที่ 4.10 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าของสายอากาศ 3 รอม และมีกราด์เพลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8λ ที่ความถี่ 240 MHz

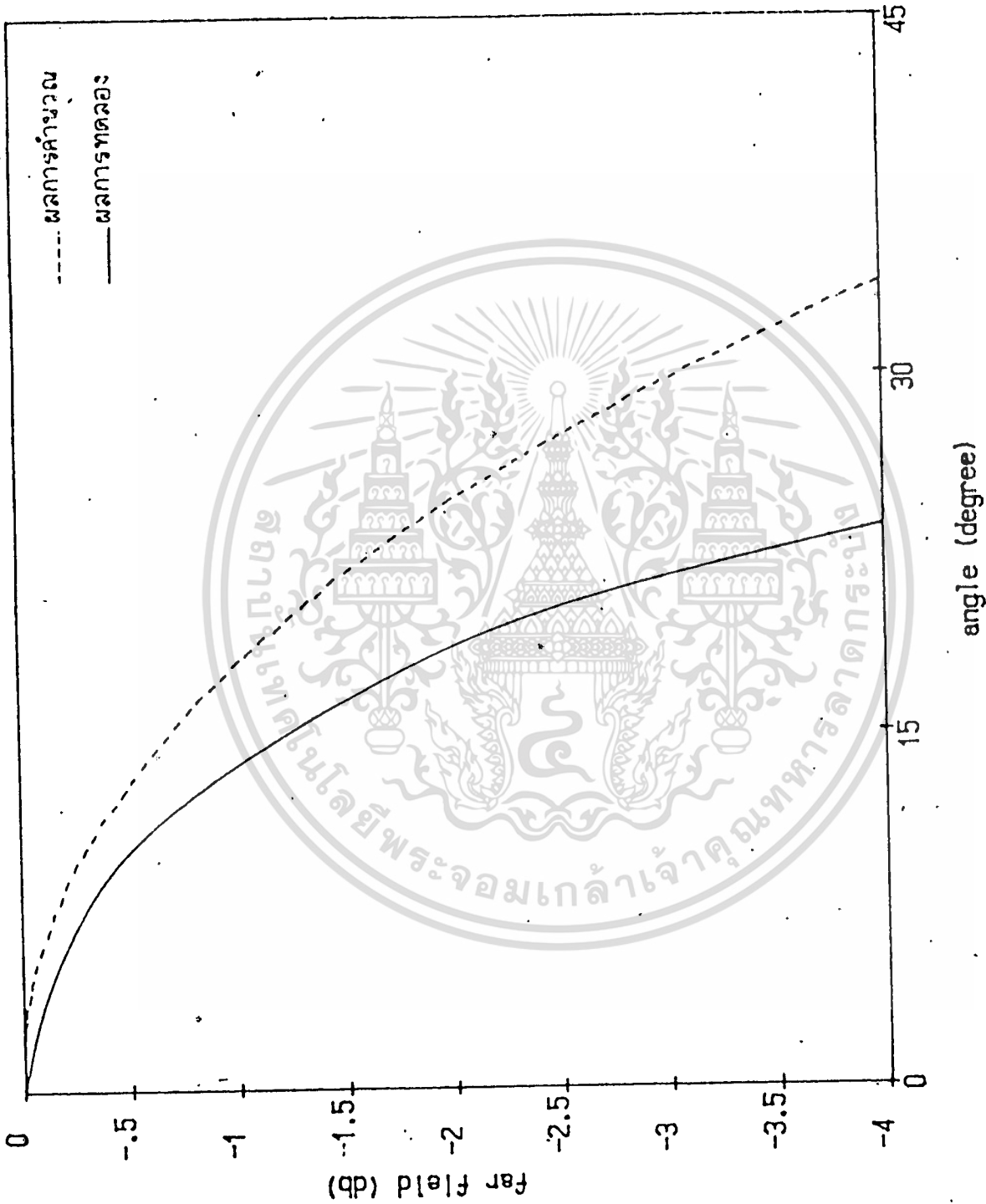
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



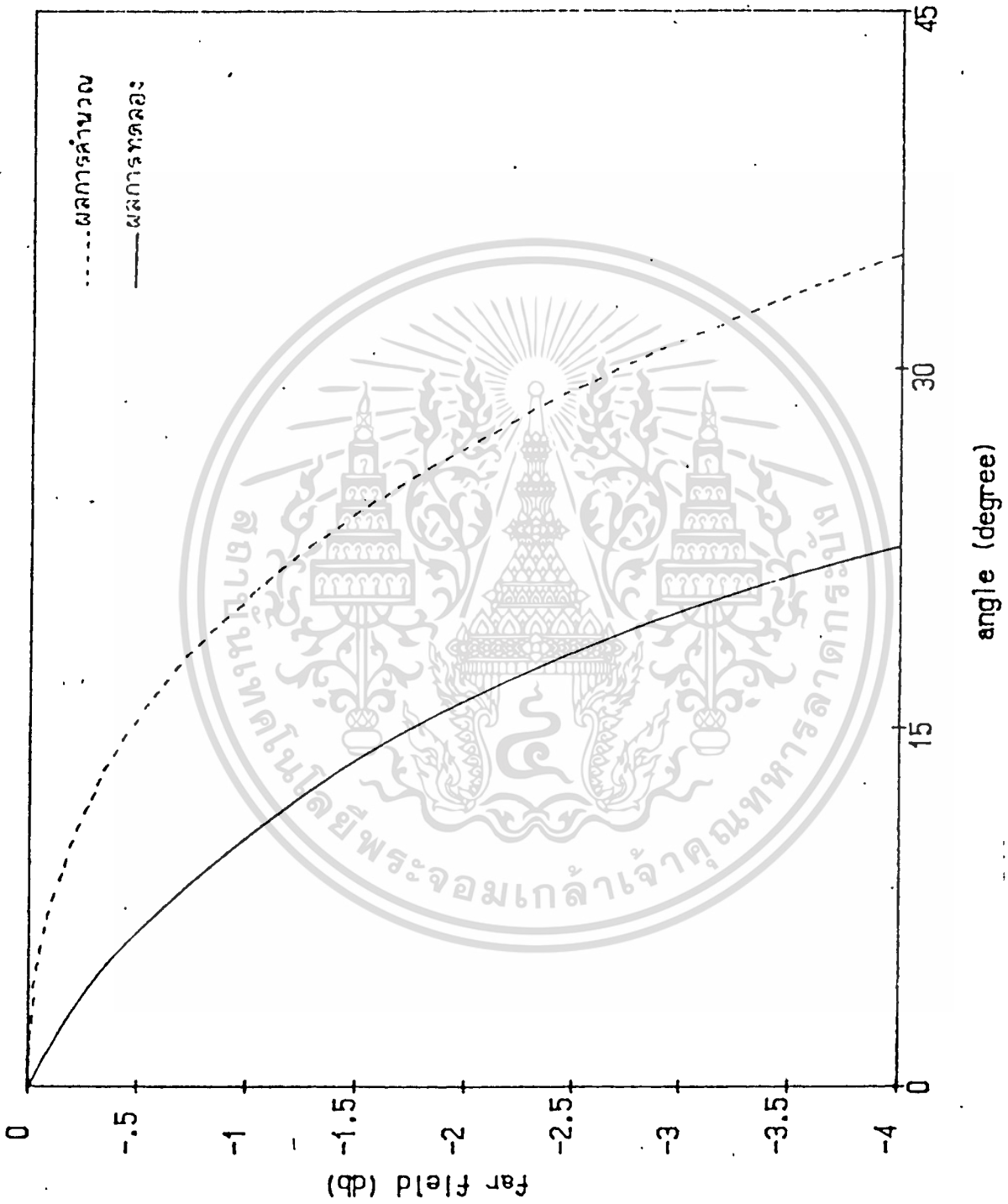
รูปที่ 4.11 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าของสายอากาศสี่เหลี่ยม 3 รอบ และมีกรวด์เพลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.93λ ที่ความถี่ 280 MHz



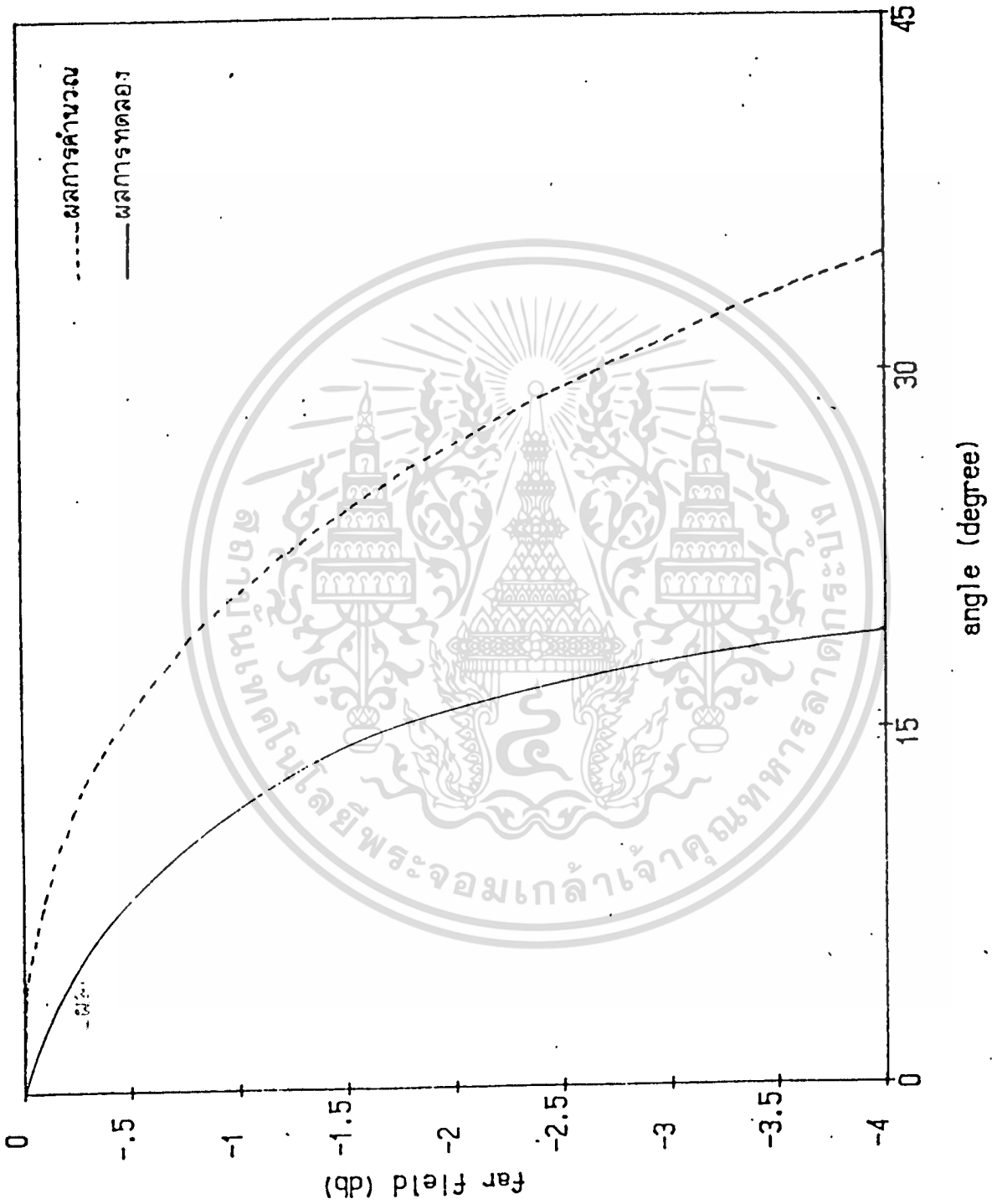
รูปที่ 4.12. แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าของสายอากาศชนิดที่ขดจำนวน 3 รอบ และมีกราวด์เพลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0λ ที่ความถี่ 300 MHz



รูปที่ 4.13 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าของสายอากาศเซลิคซ์ที่ขนาดจนวน 3 รอบ และมีกราวด์เพลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.17λ ที่ความถี่ 350 MHz



รูปที่ 4.14 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าของสายอากาศ 3 เวกเตอร์ที่ขนาด 3 รอบ และมีกราดเฟลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3λ ที่ความถี่ 390 MHz

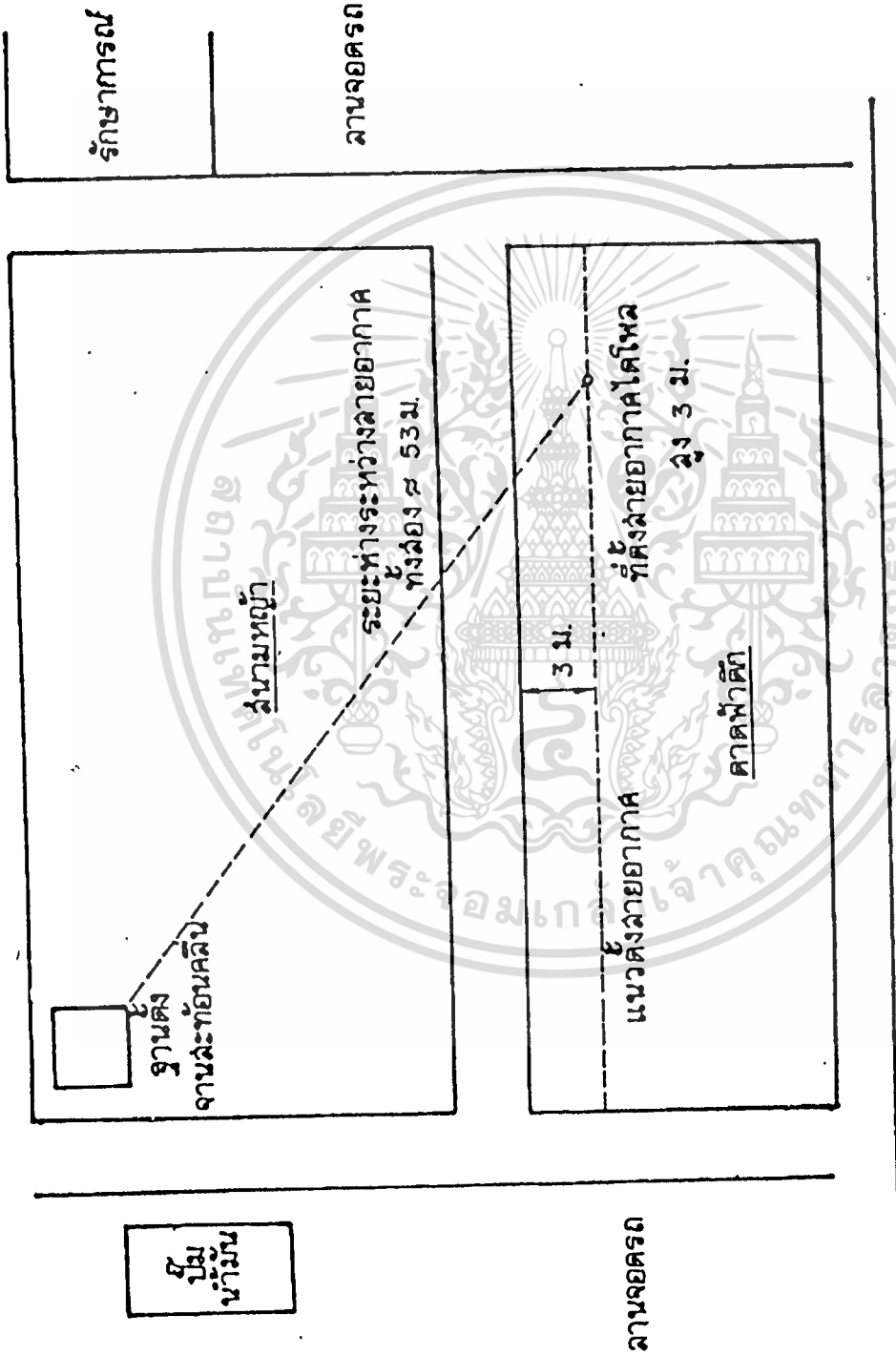


รูปที่ 4.15 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าของสายอากาศ 3 รอบ และมีกราด์เฟลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.33λ ที่ความถี่ 400 MHz

4.3 การวัดกำลังขยายของระบบสายอากาศ

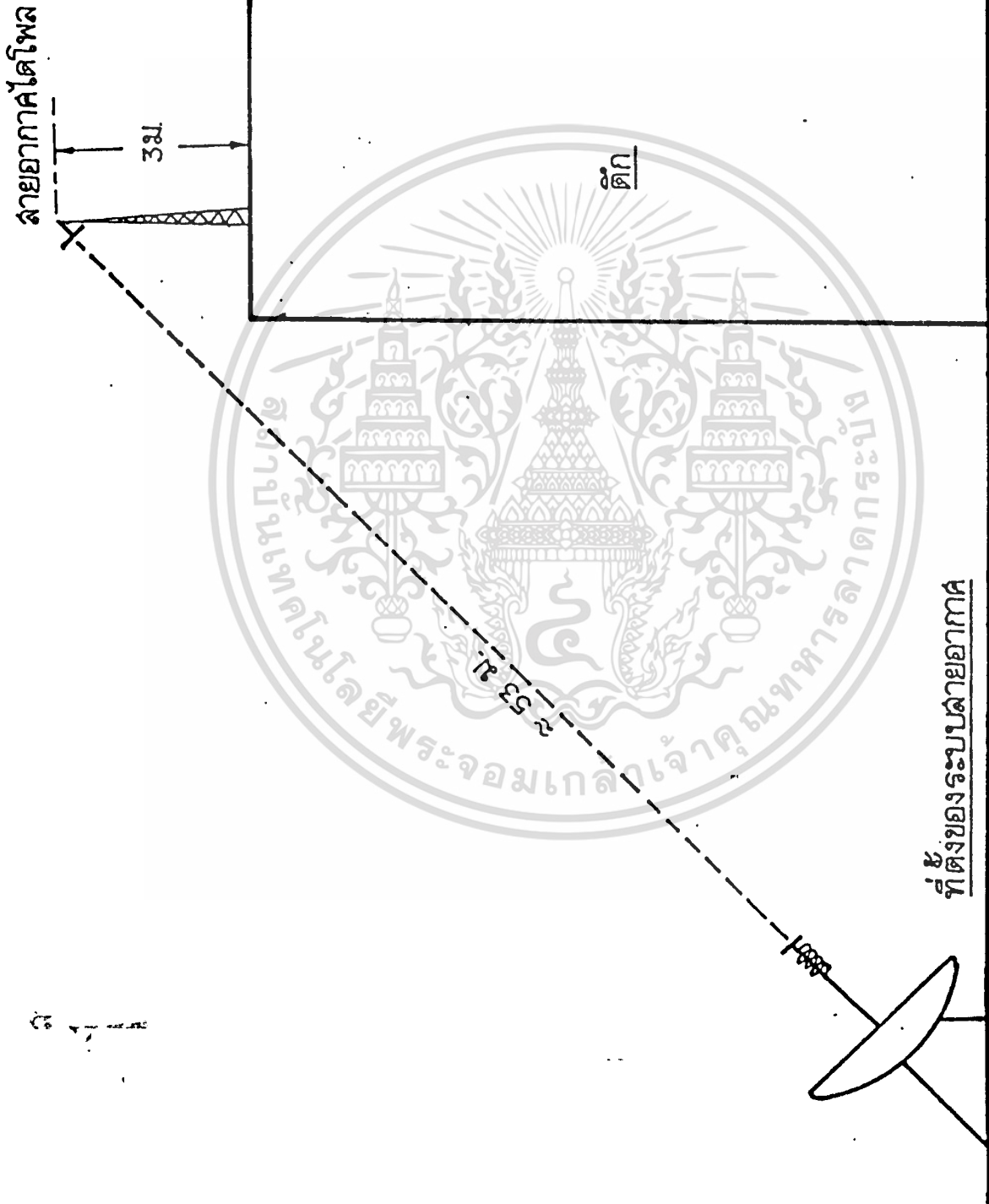
ในการวัดกำลังขยายของระบบสายอากาศนั้นเป็นการวัดความเข้มของสนามที่สายอากาศที่จะใช้ทำการวัดรับได้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับความเข้มของสนามที่สายอากาศโคโพลครึ่งความยาวคลื่น (Halfwave-Dipole) รับได้ โดยที่สายอากาศที่ใช้ส่งจะอยู่ห่างจากสายอากาศที่จะวัดและสายอากาศ $\lambda/2$ โคโพลเป็นระยะทางเท่ากันและเป็นระยะทางที่มากกว่าหรือเท่ากับระยะ r_{min} ตามสมการที่ (4.24) และสายอากาศรับและส่งจะมีระนาบของอะโพเจอร์ที่ขนานกันและมีเส้นที่ฉากตั้งฉากกับอะโพเจอร์อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ทำการติดตั้งและวัดกำลังขยายมีจำกัด ฉะนั้นการติดตั้งสายอากาศเพื่อวัดกำลังขยายก็จะจัดตามแผนผังในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งเป็นผังที่แสดงทางด้านบนและด้านข้างโดยสังเขปตามลำดับ และในการวัดจะใช้เครื่องมือวัดดังนี้

1. $\lambda/2$ โคโพล 2 ชุด
2. ซิกแนลเจนเนอเรเตอร์
3. เครื่องวัดความแรงของสัญญาณ



รูปที่ 4.16 แผนผังด้านบนแสดงการติดตั้งสายอากาศเพื่อรอกำส่งขยายโดยส่งแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แผนผังด้านข้างแสดงการติดตั้งสายอากาศเพื่อรับส่งสัญญาณวิทยุโดยส่งแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



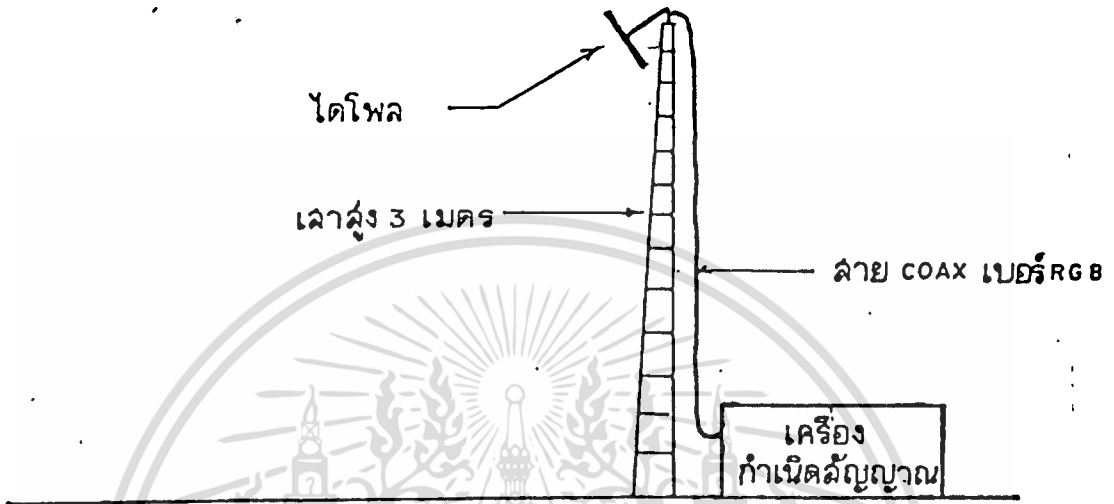
รูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายที่ตั้งของระบบสายอากาศ



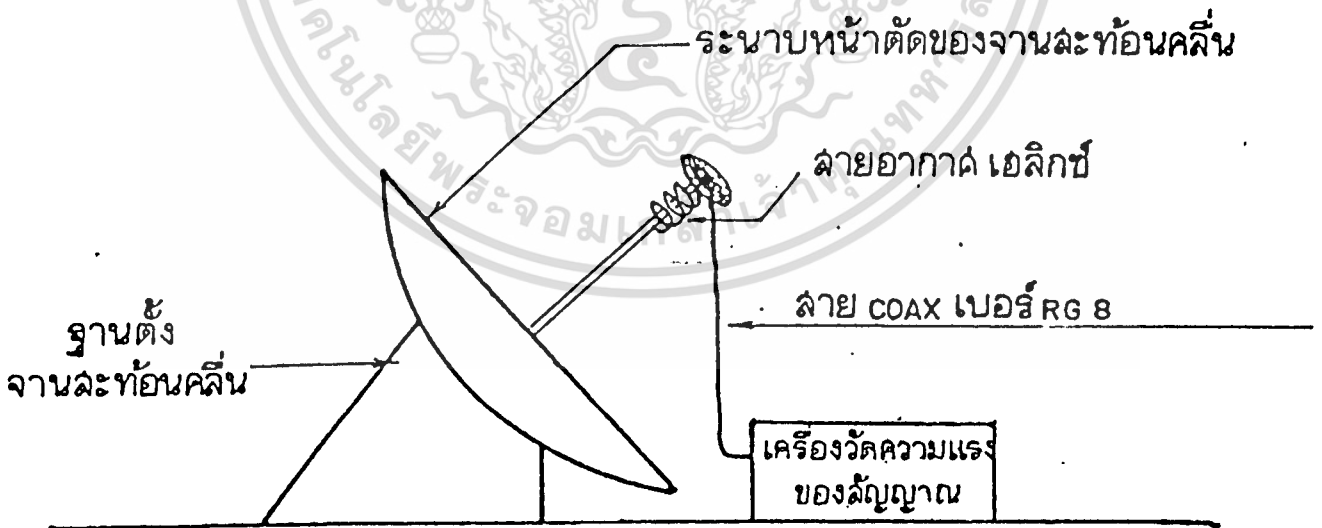
รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายที่ตั้งของสายอากาศโคโหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถแสดงภาพการจับอุปกรณ์ที่สายอากาศส่งและสายอากาศรับดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

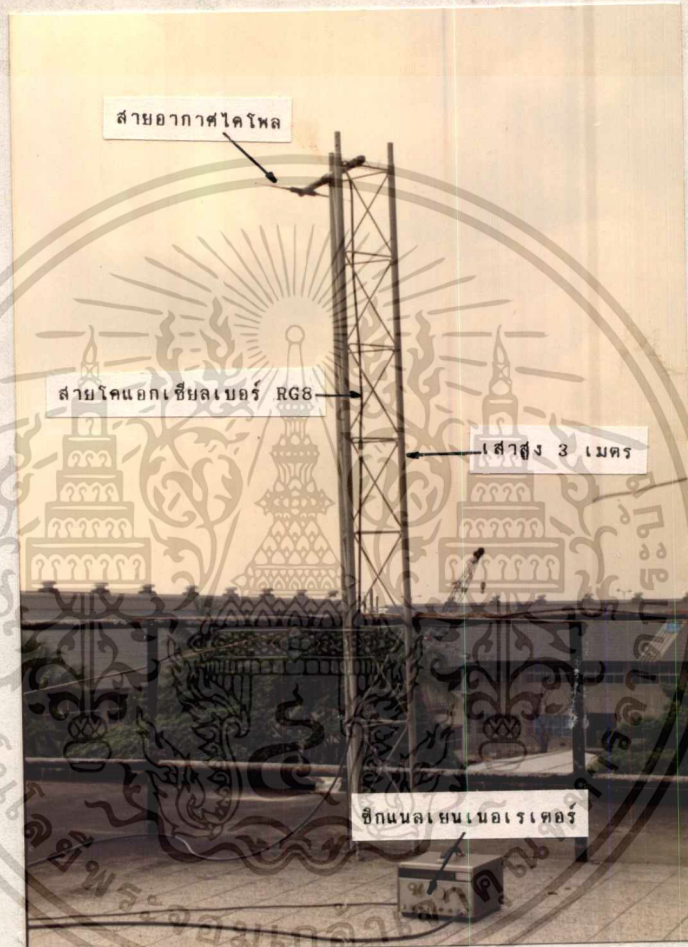


รูปที่ 4.20 แสดงการจัดเครื่องมือที่สายอากาศที่ใช้เป็นตัวส่ง

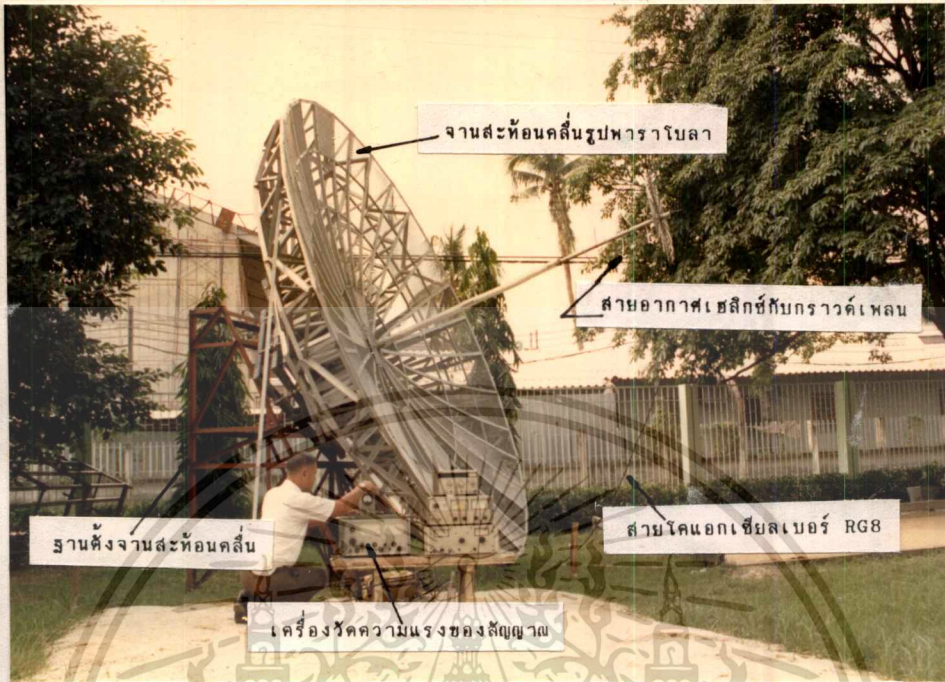


รูปที่ 4.21 แสดงการจัดเครื่องมือที่สายอากาศที่ใช้เป็นตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงภาพถ่ายการวัดเครื่องมือที่สายอากาศที่ใช้เป็นตัวส่ง



รูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายการจักระเบียงมือที่สายอากาศที่ใช้เป็นตัวรับ

เนื่องจากเครื่องวัดความแรงของสัญญาณมีข้อบกพร่องไม่สามารถวัดได้ที่ความถี่ 225 MHz ฉะนั้นในการวัดกำลังขยายจะเริ่มวัดตั้งแต่ความถี่ 240 MHz ไปจนถึงความถี่ 400 MHz โดยจะเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 MHz ที่ความถี่หนึ่ง ๆ จะปรับความยาวของ $\lambda/2$ โคโพล ซึ่งใช้เป็นตัวส่งสัญญาณจากชิคแนลเยนเนอเรเตอร์ ในรูปที่ 4.22 โดยใช้ไม้บรรทัดวัดความถี่ที่ปรับที่ความถี่เดียวกัน สัญญาณจะส่งออกไปยังระบบสายอากาศที่จะวัดกำลังขยาย และส่งสัญญาณผ่านสายส่งไปยังเครื่องวัดความเข้มของสัญญาณที่ปรับให้รับความถี่เดียวกันและบันทึกผลการทดสอบไว้ และเนื่องจากระบบสายอากาศที่ใช้วัดมีโพลารไรซ์เป็นแบบวงกลม ฉะนั้นในการทดสอบที่ความถี่หนึ่ง ๆ จะทดสอบเมื่อโคโพลอยู่ ในแนวอนครั้งหนึ่งและอยู่ในแนวตั้งอีกครั้งหนึ่ง กำลังขยายที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของความเข้มของสัญญาณที่สายอากาศโคโพลรับได้ที่ความถี่เดียวกันในแนวตั้ง และแนวอน ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระบบสายอากาศรับได้จะนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยโดยใช้สมการที่ (4.25) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศ $\lambda/2$ โคโพลแล้วจะได้ผลตามตารางที่ 4.2

ความถี่ MHz	ความเข้มของสัญญาณที่สายอากาศแบบจานสี่เหลี่ยม		ความเข้มของสัญญาณที่สายอากาศโตนโตน 2** ฟุต		ความเข้มของสัญญาณที่สายอากาศโตนโตน 1* ฟุต		GAIN ของสายอากาศแบบจานสี่เหลี่ยม เมื่อเทียบกับโตนโตน 2** (dB _d)		GAIN เอลฟ์ของระบบสายอากาศเมื่อเทียบกับ $\sqrt{2}$ โตนโตน (dB _d)
	เมื่อโตนโตน 1* อยู่ในแนว Vertical	เมื่อโตนโตน 1* อยู่ในแนว Horizontal	เมื่อโตนโตน 1* อยู่ในแนว Vertical	เมื่อโตนโตน 1* อยู่ในแนว Horizontal	เมื่อโตนโตน 2* อยู่ในแนว Vertical	เมื่อโตนโตน 2* อยู่ในแนว Horizontal	เมื่อโตนโตน 2* อยู่ในแนว Vertical	เมื่อโตนโตน 2* อยู่ในแนว Horizontal	
240	-54	-57.5	-65	-66	11	6.5	12.78		
250	-57.5	-60	-64	-69	6.5	9	11.10		
260	-65	-57.5	-65.5	-70	0.5	12.5	14.09		
270	-59	-55	-66	-65	7	10	12.21		
280	-60.5	-58	-70	-80	10.4	22	24.33		
290	-63	-63	-72	-78	10.0	15	18.03		
300	-64.5	-63	-78.5	-77.5	14.0	14.5	20.45		
310	-66	-64	-74	-74	8.0	10.0	12.80		
320	-64.5	-62	-78.5	-74	14.0	12.0	18.44		
330	-64	-62.5	-75	-71	11.0	8.5	13.90		
340	-64	-63.5	-76	-70	12.0	6.5	13.65		
350	-65	-65.5	-76	-72	11.0	6.5	12.78		
360	-64.5	-66	-79	-76	13.5	6.0	13.87		
370	-67	-64	-77.5	-72.5	10.5	9.5	12.85		
380	-68.5	-65.5	-78	-78.5	9.5	12.0	10.69		
390	-74	-66.5	-75.5	-87.5	1.4	21.0	21.10		
400	-79.5	-67.5	-87.5	-76.5	8.0	9.0	12.04		

หมายเหตุ * โตนโตน 1 เป็นสายอากาศที่ติดตั้ง
 ** โตนโตน 2 เป็นสายอากาศที่ใช้รับ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดกำลังขยายของระบบสายอากาศแบบจานสี่เหลี่ยม

ที่ความถี่ 240 - 400 MHz

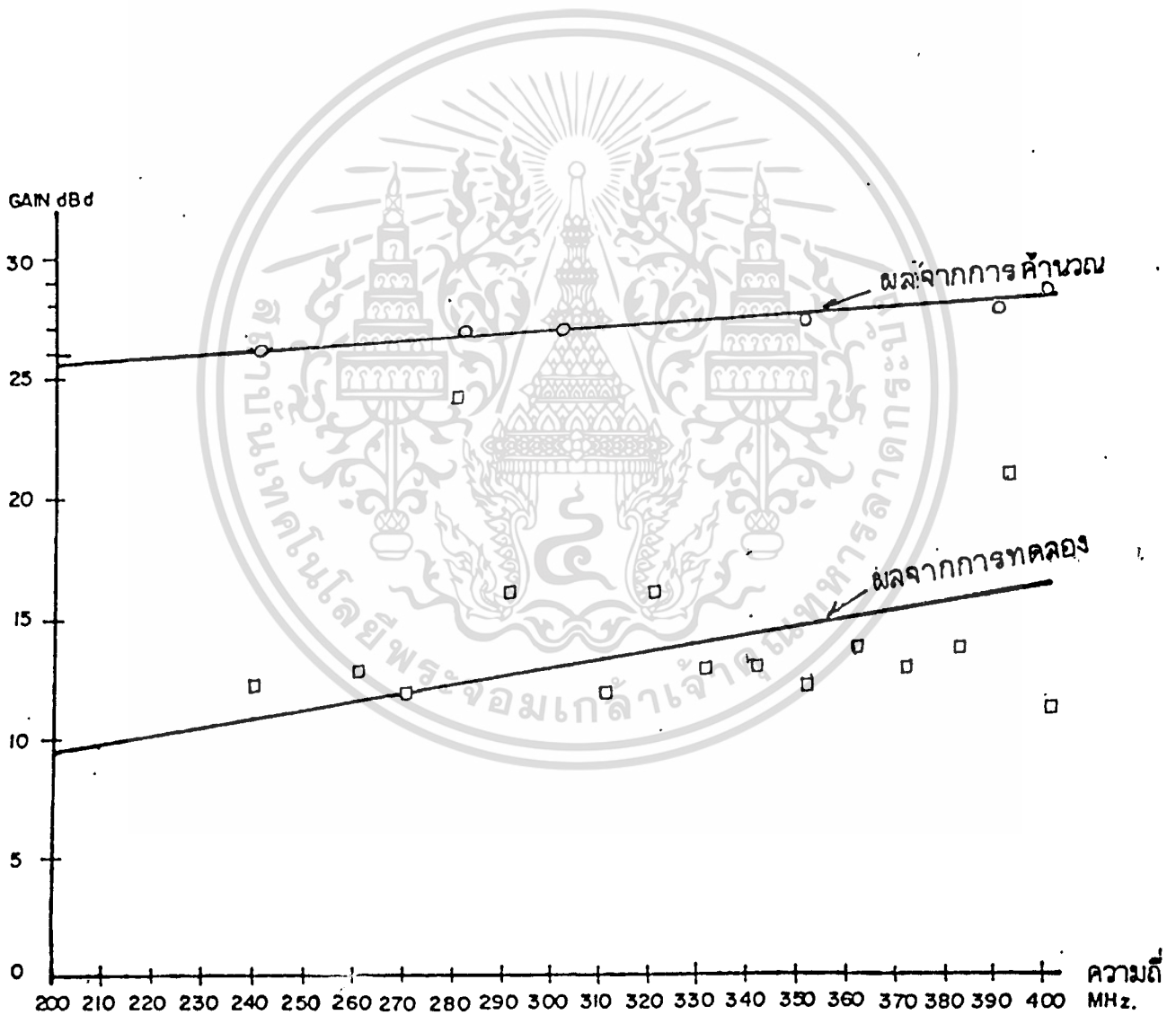
4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

สำหรับในการวิเคราะห์เปรียบเทียบหารามิเตอร์ต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากผลการคำนวณทางทฤษฎีและค่าที่ได้จากผลการทดลองนั้น เราไม่สามารถที่จะนำมาเปรียบเทียบกันได้ตลอดความถี่ เนื่องจากในการคำนวณทางทฤษฎีนั้นได้อาศัยทฤษฎีที่สามารถคำนวณให้ระบบสายอากาศที่พิจารณามีกำลังขยายสูงสุดในทุก ๆ ความถี่ตลอดย่านความถี่ใช้งานและถือว่าระบบสายอากาศดังกล่าวอยู่ในตัวกลางอิสระไม่มีการสแคทเทอ์เกิดขึ้นในขณะที่คลื่นเดินทางผ่านบรรยากาศไป แต่สำหรับในการทดลองนั้นระบบสายอากาศไม่ได้อยู่ในตัวกลางอิสระ ฐานที่ตั้งของระบบสายอากาศมีความสูงไม่เพียงพอทำให้ระบบสายอากาศอยู่ใกล้พื้นดินเกินไป นอกจากนี้ยังมีอาคารและสิ่งก่อสร้างอื่น ๆ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้เนื่องจากมีพื้นที่จำกัด สิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ และลักษณะที่ตั้งของระบบสายอากาศดังกล่าวจะทำให้เกิดการสแคทเทอ์ได้ ฉะนั้นในการเปรียบเทียบหารามิเตอร์ต่าง ๆ ก็ไม่สามารถกระทำได้ตลอดย่านความถี่ใช้งาน จึงได้ยึดถือเอาผลการทดลองที่ความถี่ที่มีค่ากำลังขยายซึ่งเป็นค่าหารามิเตอร์ที่ดีที่สุดมาทำการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้มากที่สุด และได้เลือกเอาความถี่อื่น ๆ มาเพื่อใช้พิจารณาคุณสมบัติอย่างอื่น ประกอบด้วยกำลังขยายของระบบสายอากาศที่ได้จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 กำลังขยายจะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ 280 MHz และที่ความถี่ 390 MHz จะมีค่ามากเป็นอันดับรองลงมาค่ากำลังขยายที่ความถี่ดังกล่าวเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังขยายที่คำนวณได้ตามตารางที่ 3.1 จะได้ผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ความถี่ (MHz)	กำลังขยายที่ได้ จากการคำนวณ (dBa)	กำลังขยายที่ได้ จากการทดลอง (dBa)
280	26.67	24.33
390	28.08	21.10

ตารางที่ 4.3 แสดงกำลังขยายที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลอง

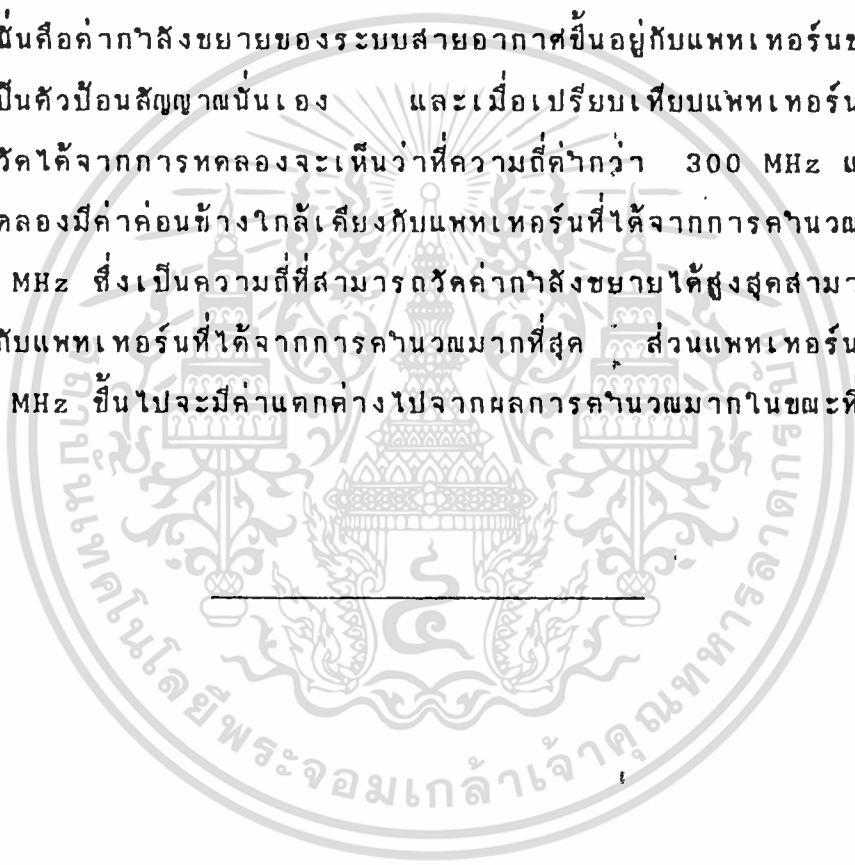
ตามตารางที่ 4.3 ค่ากำลังขยายที่คำนวณได้ที่ความถี่ 280 MHz และ 390 MHz จะมากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง 2.34 dB และ 6.98 dB ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจากกำลังขยายที่คำนวณได้กับความถี่จะเห็นได้ว่ากำลังขยายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งประมาณค่าโดยใช้เส้นตรง (Least Square) ตามตารางในรูป 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขยายกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังขยายที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่นี้ จะมีความสัมพันธ์กับแพทเทิร์นของระบบสายอากาศ โดยเมื่อพิจารณาแพทเทิร์นปฐมภูมิที่แผ่ออกไปจากสายอากาศหลักซึ่งได้ผลจากการคำนวณ ตามรูปที่ 3.4 - 3.9 และที่ได้จากการทดลองตามรูปที่ 4.10 - 4.15 จะเห็นได้ว่าแพทเทิร์นมีความกว้างลำน้อยลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ส่วนแพทเทิร์นทุติยภูมิ (Secondary Pattern) ที่แผ่ออกไปจากงานสะท้อนคลื่นก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งจะสังเกตได้จากรูปที่ 3.10 - 3.15 ลักษณะเช่นนี้ทำให้ค่าไดเรกทิวิตี (Directivity) และกำลังขยายของระบบสายอากาศเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น [16] นั่นคือค่ากำลังขยายของระบบสายอากาศขึ้นอยู่กับแพทเทิร์นของสายอากาศหลักที่ใช้เป็นตัวบ่อนสัญญาณนั่นเอง และเมื่อเปรียบเทียบแพทเทิร์นที่คำนวณได้กับแพทเทิร์นที่วัดได้จากการทดลองจะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำกว่า 300 MHz แพทเทิร์นที่วัดได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับแพทเทิร์นที่ได้จากการคำนวณ โดยเฉพาะที่ความถี่ 280 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สามารถวัดค่ากำลังขยายได้สูงสุดสามารถวัดแพทเทิร์นได้ใกล้เคียงกับแพทเทิร์นที่ได้จากการคำนวณมากที่สุด ส่วนแพทเทิร์นที่วัดได้ตั้งแต่ความถี่ 300 MHz ขึ้นไปจะมีค่าแตกต่างไปจากผลการคำนวณมากในขณะที่ความถี่สูงขึ้น



บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบสายอากาศสำหรับการสื่อสารระยะไกล ระบบสายอากาศประกอบด้วยจานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาที่มีสายอากาศเซลิคซ์เป็นตัวบ่อนสัญญาณวางอยู่ที่จุดโฟกัส ทำให้ได้อัตราขยายของสายอากาศสูงซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการสื่อสารระยะไกล จานสะท้อนคลื่นที่ใช้พิจารณาามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.57 เมตร และได้ใช้สายอากาศเซลิคซ์ที่ประกอบกับกราวด์เพลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ซึ่งมีการแผ่พลังงานในแอกเซียลโหมคเป็นตัวบ่อนสัญญาณ โดยได้ออกแบบที่ความถี่ 300 MHz จานสะท้อนคลื่นได้ถูกนำมาพิจารณาคุณสมบัติของการสะท้อนคลื่น โดยพิจารณาจากสมการของพาราโบลาและได้ความสัมพันธ์ของลำคลื่นที่มากตกกระทบที่ผิวจานสะท้อนคลื่นกับลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากจานสะท้อนคลื่น จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า ลำคลื่นที่เดินทางออกมาจากจุดโฟกัสเมื่อไปตกกระทบที่จุดใด ๆ บนจานสะท้อนคลื่นจะทำให้มีลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากจานสะท้อนคลื่นที่มีทิศทางขนานกับแนวแกนของจานสะท้อนคลื่น และผลรวมของระยะทางของลำคลื่นจากจุดโฟกัสที่ไปตกกระทบที่ผิวจานและสะท้อนออกไปยังระนาบใดระนาบหนึ่งจะเท่ากัน นอกจากนี้ยังได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความยาวโฟกัสกับเส้นผ่าศูนย์กลางของจานสะท้อนคลื่นกับมุมที่รองรับลำคลื่นจากจุดโฟกัสไปยังขอบจานสะท้อนคลื่น มุมดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับความกว้างลำของสัญญาณที่แผ่ออกไปจากสายอากาศเซลิคซ์ ซึ่งจะต้องมีความกว้างลำ 10 dB (10 dB Beamwidth) ที่จะบ่อนให้กับจานสะท้อนคลื่น และได้คำนวณหาความกว้างลำครึ่งกำลังของสายอากาศเซลิคซ์โดยพิจารณาจากเทปเปอร์ของสัญญาณที่กระจายอยู่ที่ระนาบของอะเพอเจอร์ และการกำหนดขนาดแอมพลิจูดของโหลบข้างและได้คำนวณหาจำนวนรอบของสายอากาศเซลิคซ์จากความกว้างลำครึ่งกำลังได้จำนวน 3 รอบ

อย่างไรก็ตามสำหรับสายอากาศเซลิคซ์ที่มีการแผ่พลังงานออกไปในแอกเซียลโหมคนั้น ก็ได้พิจารณาให้มีการแผ่กระจายสนามออกไปเหมือนกับสายอากาศแกลวาล์บบนแบบเอนด์ไฟร์ที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไอโซโทรปิกที่มีจำนวนแหล่งกำเนิดเท่ากับ N เราจะพบว่าสายอากาศเซลิคซ์จะกระตุ้นให้เกิดแอมพลิจูดเชิงซ้อนที่มีจำนวนสมาชิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

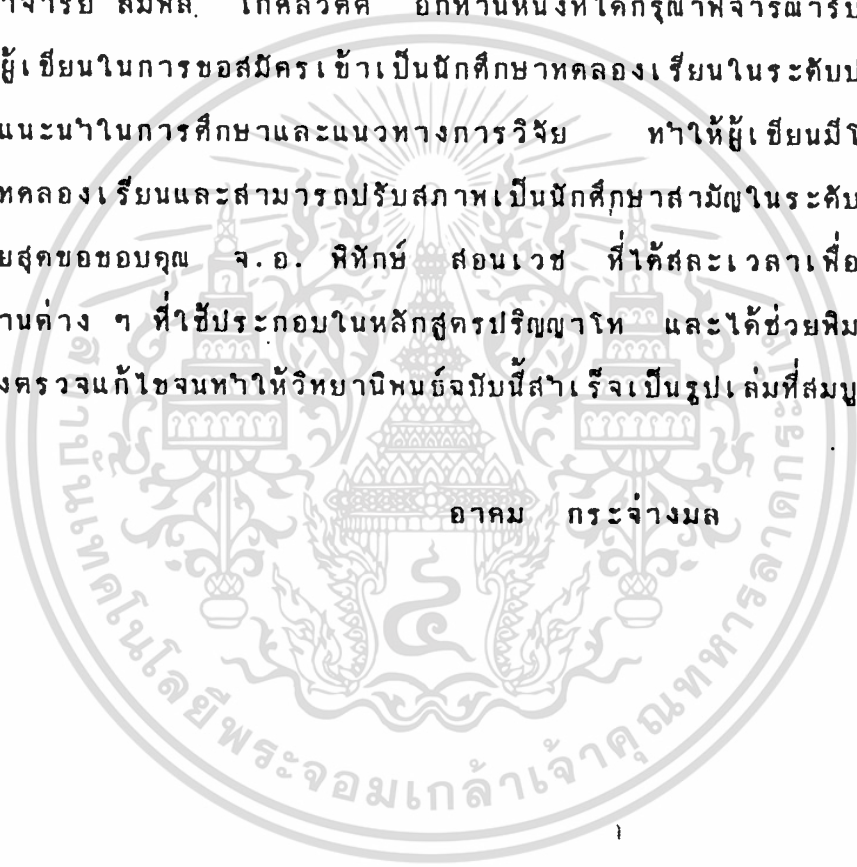
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จำนวนเบสส์ฟังก์ชัน) เท่ากับจำนวนรอบของสายอากาศเฮลิคซ์และได้ใช้หลักการของ Lo และ Gilbert เพื่อพิจารณาโซลูชันที่เหมาะสมของเบสส์ฟังก์ชันดังกล่าว ทำให้ได้ การกระจายของกระแสที่อะเพอร์เจอร์ของจานสะท้อนคลื่นที่เหมาะสมและค่ากำลังขยาย สูงสุดของระบบสายอากาศ รวมทั้งได้คำนวณหาแพทเทิร์นของสายอากาศเฮลิคซ์และ แพทเทิร์นของระบบสายอากาศจากหลักการดังกล่าวด้วย ผลจากการคำนวณที่ความถี่ 240, 280, 300, 350, 390 และ 400 MHz จะได้ค่ากำลังขยาย 26.13, 26.67, 27.00, 27.67, 28.08 และ 28.16 dBa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความกว้าง ลำของสายอากาศเฮลิคซ์และความกว้างลำของระบบสายอากาศตามความถี่ที่เปลี่ยนไป พบว่า ความกว้างลำของสายอากาศเฮลิคซ์น้อยลงในขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ ความกว้างลำของระบบสายอากาศ และในขณะเดียวกันความกว้างลำของระบบสาย อากาศ ก็จะน้อยกว่าความกว้างลำของสายอากาศเฮลิคซ์ ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่า จานสะท้อนคลื่นรูปพาราโบลาและความถี่ที่สูงขึ้นทำให้ค่าโคเรคทีวิตีของระบบสายอากาศ สูงขึ้น ซึ่งเมื่อนำแพทเทิร์นของสายอากาศเฮลิคซ์ที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับ แพทเทิร์นที่ได้จากการทดลองพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกัน

สำหรับค่ากำลังขยายที่เป็นพารามิเตอร์ที่พิจารณาได้นั้นกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่ากำลังขยายกับความถี่ที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลที่ ได้จากการทดลองที่ความถี่ 240, 280, 300, 350, 390 และ 400 MHz พบว่า กำลังขยายมีค่ามากขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่กราฟเฉลี่ยของกำลังขยายที่ได้จากการ ทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังขยายที่ได้จาก การทดลอง ซึ่งมีค่า 24.33 และ 21.10 dBa และค่ากำลังขยายที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งมีค่า 26.67 และ 28.08 dBa ที่ความถี่ 280 และ 390 MHz ตามลำดับ จะเห็น ว่ากำลังขยายที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า 2.34 และ 6.98 dB ตามลำดับ ส่วนที่ ความถี่อื่นค่ากำลังขยายที่ได้จากการทดลอง และค่ากำลังขยายที่ได้จากการคำนวณจะมี แตกต่างกันมาก ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังขยายที่ 280 MHz แสดงให้เห็นว่ามีการลดทอนของสัญญาณในระบบสายอากาศยุคนี้ที่สุดที่ความถี่นี้ ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากความถี่ที่ออกแบบคือ 300 MHz ข้อผิดพลาดนี้อาจเป็นสาเหตุเนื่อง มาจากการสร้างส่วนต่าง ๆ ภายในระบบซึ่งทำให้ได้ความถี่ตรงสูงค่อนข้างยาก ซึ่ง

กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. จเร สุรวิทย์ปัญญา ซึ่งเป็นอาจารย์
 ที่ปรึกษาเป็นอย่างดี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาและแนวทางในการค้นคว้าวิจัย
 รวมทั้งยังได้ช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ทำการค้นคว้าวิจัยอย่างเต็มกำลัง
 ความสามารถ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินไปได้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอ
 ขอบพระคุณ อาจารย์ สมพล โกศลวิทย์ อีกท่านหนึ่งที่ได้กรุณาพิจารณารับเป็นอาจารย์
 ที่ปรึกษาให้กับผู้เขียนในการขอสมัครเข้าเป็นนักศึกษาทดลองเรียนในระดับปริญญาโทและ
 ได้กรุณาให้คำแนะนำในการศึกษาและแนวทางการวิจัย ทำให้ผู้เขียนมีโอกาสดำเนิน
 ศึกษาในระดับทดลองเรียนและสามารถปรับสภาพเป็นนักศึกษาสามัญในระดับปริญญาโทได้
 หายสุดขอขอบคุณ จ.อ. พิทักษ์ สอนเวช ที่ได้สละเวลาเพื่อช่วยเหลือใน
 การพิมพ์รายงานต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบในหลักสูตรปริญญาโท และได้ช่วยพิมพ์วิทยานิพนธ์
 ฉบับนี้ รวมทั้งตรวจแก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์ได้



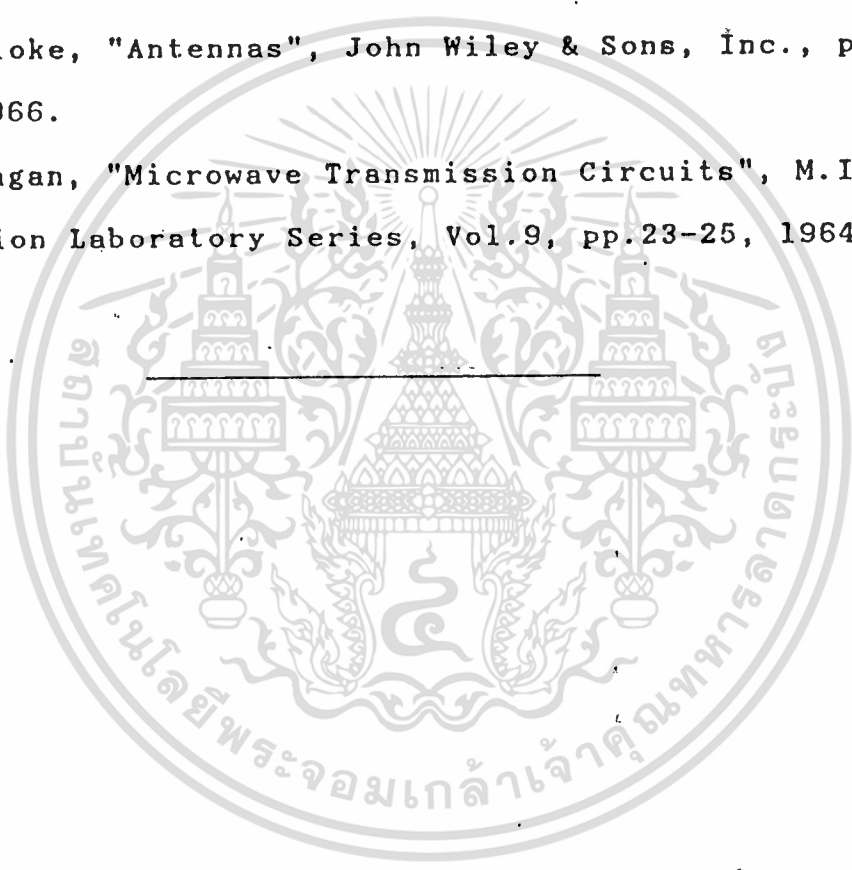
อาคม กระจำนง

๗ ๕
๕

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.P. Philip, "Communication System Design", McGraw-Hill Book Company, New York, Chap 1,11,12, 1972.
- [2] W.T.T. Prince, "Sattelite telecommunications in the Civil environment", Communication & Broadcasting, Vol.7, No.2 pp.11-14, Feb.1982.
- [3] B.R. Ackrouyed, "Sattelite Communications, Project UNIVERSE and local area networks", Communication & Broadcasting, Vol.8 No.2, pp. 3-8, Feb.1983.
- [4] J.M.C. Scott, "A Transportable Satellite earth station for television outside broadcast contributions", Communication & broadcasting, Vol.8, No.3, pp.17-19, July 1983.
- [5] B.R.Ackrouyed, "TV distribution by satellite", Communication & Broadcasting, Vol.9, No.3, pp.9-16, Feb. 1985.
- [6] I.M. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill Book Company, New York, PP.260, 1982.
- [7] S. Silver, "Microwave Antenna Theory And Design", McGraw-Hill Book Company, Inc., Chap 12, 1949.
- [8] L. Winner, "Helical Beam Antenna," Communication, No.9, Vol:29, pp.6-7, 1967.
- [9] J.D. Kraus, "Antennas", McGraw-Hill Book Company, New York, pp.341, 1950.
- [10] R.A. Gilbert, Y.T. Lo, "Maximization of The Directive Gain of a Parabolic Reflector Antenna", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.AP-33, No.4; PP.459-462, April 1985.
- [11] V.L. Blake, "Antennas", John Wiley & Sons, Inc. pp.265-270, 1966.

- [12] J.D. Kraus, "Electromagnetics", McGraw-Hill, Inc., Chap 14, 1973.
- [13] F.I Tseng and D.K. Cheng, "Gain Optimization For Arbitrary Antenna Arrays", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-13, pp.973-979, November 1965.
- [14] S. Silver, "Microwave Antenna Theory and Design", M.I.T. Radiation Laboratory Series, Vol.12 pp.26-29, 1964.
- [15] V.L. Bloke, "Antennas", John Wiley & Sons, Inc., pp. 122, 1966.
- [16] L.G. Ragan, "Microwave Transmission Circuits", M.I.T. Radiation Laboratory Series, Vol.9, pp.23-25, 1964.



[15] J.