สายอากาศเฟสอาร์เรย์

Phased Array Antenna

กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์

KITTICHAI PANICHPATHOMPONG

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

ISBN 974-8155-06-4

เจ้าคุณทหาร

สายอากาศเฟสอาร์เรย์

Phased Array Antenna

กิตติชัย พานิชปฐมพงศ์

KITTICHAI PANICHPATHOMPONG

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ D.ENG.

ADVISOR

ASSOC.PROF.WIWAT KIRANON D.ENG.

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

ISBN 974-8155-06-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศเฟสอาร์เรย์ (PHASED ARRAY ANTENNA)

ชื่อนักศึกษา นายกิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์ **รหัสประจำตัว** 30126-002

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์	
รศ.ถวิล พึ่งมา	
ผศ.ณรงค์ เหมกรณ์	
ผศ.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	
ผศ.สมผล โกศัลวิตร์	

ค่าระดับคะแนนรวมที่เป็นเอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ O : OUTSTANDING (ดีเยี่ยม)

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 21 มกราคม 2534 **เวลา** 10.00 น.

สถานที่สอบ ห้องประชุมคณะวิศวกรรมศาสตร์ (A-305) ตึก 6 ชั้น

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(นายชัยนิวัฒน์ ทรัพย์ไพบูลย์)

รองอธิการบดีฝ่ายกิจการ

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 24 **เดือน** มกราคม **พ.ศ.** 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศเฟสอาร์เรย์
นักศึกษา	กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์ 30.126-002
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2533

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงวิธีการออกแบบสร้างสายอากาศเฟสอาร์เรย์แบบระนาบขนาด 4x8 เอลีเมนท์ สำหรับใช้งานที่ความถี่ 915 MHz ส่วนประกอบที่สำคัญของสายอากาศเฟสอาร์เรย์นี้ มี 3 ส่วน คือ สายอากาศไดโพลขนาดยาวครึ่งความยาวคลื่น วางเรียงกันเป็นอาร์เรย์แบบระนาบ อยู่เหนือบนกราวนด์เพลน วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด และส่วนป้อนกระแสสัญญาณให้แก่สายอากาศอาร์เรย์ ซึ่งได้แก่วงจรแบ่งแยกกำลังและวงจรลดทอนสัญญาณ ข้อกำหนดในการออกแบบ คือ ให้บีมหลักของสายอากาศสามารถกวาดไปในระนาบอะซิมุธได้ ด้วยการควบคุมวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท ซึ่งทำให้บีมหลักของสายอากาศนี้ กวาดไปได้ใน 8 ทิศทาง โดยได้สังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศ ให้มีบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำในระนาบอะซิมุธนี้ ส่วนในระนาบเอลีเวชันนั้น รูปแบบการกระจายคลื่นได้ถูกสังเคราะห์เป็นแบบเชคเตอร์แพทเทิร์น พร้อมกันนี้ได้แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติ ที่สำคัญของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ที่สร้างขึ้นแล้วด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	PHASED ARRAY ANTENNA
Name	KITTICHAI PANICHPATHOMPONG
Thesis Advisor	ASSOC.PROF.DR.WIWAT KIRANON
Level of Study	MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
Academic Year	1990

ABSTRACT

In this thesis, a design and implementation of 915 MHz planar phased array antenna system are presented. The system consists of three important parts; 4×8 elements of dipole array over ground plane, PIN diode phase shifters and feeding networks. The feeding networks are divided into two parts; power dividers and attenuators. They are employed as a mean to synthesize the radiation pattern. The main beam can be scanned in 8 different directions of the azimuth plane by controlling 3 bits of phase shifters. In the azimuth plane, radiation pattern is synthesized to be a narrow beamwidth and low side lobes pattern whereas the sector pattern is synthesized in the elevation plane. The significant characteristics are calculated and tested.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ความดีอันใด ซึ่งบังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แด่
บิดา มารดา และพี่น้องของข้าพเจ้า
พร้อมทั้งขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์,
ผศ.โมไนย ไกรฤกษ์ และคุณวิชัย จิตติกรยุทธนา สำหรับคำแนะนำ
และความสนับสนุนด้านต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ทั้งหมดนี้
ขอขอบพระคุณ ผศ.สมผล โกศัลวิตร์ เป็นอย่างสูง
สำหรับความกรุณาในทุกด้าน
และนอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ อาจารย์มณฑา เทียมเมือง

คุณสุภาพ พิทักษ์สมบัติ	คุณสุรศักดิ์ ดีมานพ
คุณอดิศักดิ์ ใจดี	คุณวิชัย อุทัยวรรณ
คุณวีระ อาภรณ์สุทธิ์	คุณบัณฑิต บัวบูชา
คุณพิสิฐ วนิชชานันท์	คุณพิสุทธิ์ วงศ์สนิท
คุณต่อศักดิ์ หล่อวัฒนสิริกุล	คุณวีระชัย ติรนันท์มงคล

ที่ได้ช่วยเหลือในการประดิษฐ์และทดลองวัดสายอากาศจนสำเร็จได้ด้วยดี

กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	VIII
คำอธิบายสัญญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1-1 กล่าวนำ	1
1-2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์	2
1-3 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีสายอากาศอาร์เรย์ (Array Theory)	4
2-1 กล่าวนำ	4
2-2 สายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรง (Linear Array)	5
2-3 สายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบ (Planar Array)	7
2-4 สายอากาศเฟสอาร์เรย์ (Phased Array)	9
บทที่ 3 คุณสมบัติของสายอากาศอาร์เรย์	11
3-1 สนามลัพธ์และหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น	12
3-2 ไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศอาร์เรย์	14
3-3 อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอาร์เรย์	16
บทที่ 4 การสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศอาร์เรย์	21
4-1 กล่าวนำ	21
4-2 การสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โลบต่ำ โดยใช้เชบบีเชฟโพลีโนเมียล	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4-2-1 ขั้นตอนการออกแบบ	25
4-2-2 บีมวิดธ์และไดเร็คติวิตี้ของเชบบีเชพอาร์เรย์	26
4-3 การสังเคราะห์เชดเตอร์แพทเทิร์น โดยวิธีการแปลงของฟูเรียร์	28
บทที่ 5 วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด	31
5-1 กล่าวนำ	31
5-2 วงจรสมมูลย์ของพินไดโอด	32
5-3 วงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์	34
5-4 วงจรแมทชิ่งแบบทรานส์มิชชั่นไลน์ทรานส์ฟอร์มเมอร์	36
บทที่ 6 ส่วนป้อนกระแสสัญญาณให้สายอากาศอาร์เรย์	40
6-1 กล่าวนำ	40
6-2 วงจรแบ่งแยกกำลัง (Power Divider)	40
6-3 วงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator)	42
บทที่ 7 การคำนวณและออกแบบสร้าง	44
7-1 การคำนวณและออกแบบสายอากาศไดโพลอาร์เรย์แบบระนาบเหนือบนกราวนด์เพลน	44
7-2 การคำนวณและออกแบบสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น	46
7-2-1 การสังเคราะห์บีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ	46
7-2-2 การสังเคราะห์เชดเตอร์แพทเทิร์น	50
7-3 การคำนวณและออกแบบวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด	51
7-3-1 การคำนวณและออกแบบวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์	51
7-3-2 การคำนวณและออกแบบวงจรแมทชิ่ง	51
7-4 การคำนวณและออกแบบวงจรแบ่งแยกกำลัง	53
7-5 การคำนวณและออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณ	54
บทที่ 8 การทดลองและผลการทดลอง	59
8-1 ผลการทดสอบวงจรเลื่อนเฟส	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

8-1-1 วงจรเลื่อนเฟสขนาด 1 บิท แต่ละบิท 62

8-1-2 วงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน 65

8-2 ผลการทดสอบไดโพลอาร์เรย์เหนือบนระนาบกราวนด์เพลน 66

8-2-1 เงื่อนไขในการกำหนดทิศทางของบีมหลัก 71

8-2-2 รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ 72

8-2-3 รูปแบบการกระจายคลื่น จากการทดลอง ในสถานะที่ 5 เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ไปจากความถี่ที่ออกแบบ 82

8-2-4 การเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ ที่สถานะต่างๆ สำหรับโคออร์ดิเนตสี่เหลี่ยมผืนผ้า 90

บทที่ 9 บทสรุปและวิจารณ์ 95

9-1 ส่วนของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน 95

9-2 ส่วนของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ 96

9-2-1 รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ 97

9-2-2 รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน 100

9-2-3 เกนเปรียบเทียบของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ 101

9-3 สรุปและเสนอแนะ 101

เอกสารอ้างอิง 103

ภาคผนวก 105

ภาคผนวก ก. สนามของสายอากาศไดโพล เหนือบนกราวนด์เพลน 106

ภาคผนวก ข. อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล เหนือบนกราวนด์เพลน 108

ภาคผนวก ค. การคำนวณค่า VSWR 109

ภาคผนวก ง. ข้อมูลของพินไดโอด 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 7.1 แสดงสัมประสิทธิ์การป้อนกระแสสัญญาณของเซคเตอร์แพทเทิร์น	51
ตารางที่ 7.2 แสดงผลการคำนวณออกแบบวงจรแมทชิ่งของวงจรเลื่อนเฟส	53
ตารางที่ 7.3 แสดงค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์ ของการสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ	56
ตารางที่ 7.4 แสดงค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์ ของการสังเคราะห์แบบเซคเตอร์แพทเทิร์น	58
ตารางที่ 8.1 แสดงผลของการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ที่ความถี่ 915 MHz ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน	66
ตารางที่ 8.2 แสดงการเปลี่ยนทิศทางของบีมหลัก 8 ทิศทาง เมื่อเปลี่ยนสถานะของวงจรเลื่อนเฟส	71
ตารางที่ 8.3 แสดงสถานะของการไบอัสให้แก่พินไดโอดในวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท จำนวน 8 เอลีเมนท์ เพื่อปรับทิศทางของบีมหลักได้ 8 ทิศทาง	72
ตารางที่ 8.4 แสดงผลการวัดเกนของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ในสถานะที่ 5 เปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียว	94
ตารางที่ 9.1 แสดงการเปลี่ยนทิศทางของบีมหลัก 8 ทิศทาง เมื่อเปลี่ยนสถานะของวงจรเลื่อนเฟส(ที่สร้างขึ้นใช้งานจริง)	96
ตาราง ข.1 แสดงผลการคำนวณค่า VSWR	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงการวางอาร์เรย์ของจุดไอโซโทรปิคแบบเส้นตรง	6
รูปที่ 2.2	แสดงโครงสร้างสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	8
รูปที่ 2.3	แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเฟสอาร์เรย์	11
รูปที่ 3.1	แสดงการวางตัวของสายอากาศไดโพลจิ้ว 2 เอลีเมนท์	13
รูปที่ 3.2	แสดงตัวอย่างของหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น	15
รูปที่ 3.3	แสดงโครงข่ายไฟฟ้าสองพอร์ทที่ใช้พิจารณาในการดัปปลิ้ง	19
รูปที่ 3.4	แสดงค่ามิวช่วลอิมพีแดนซ์ของไซด์บายไซด์ไดโพลอาร์เรย์	20
รูปที่ 3.5	แสดงค่ามิวช่วลอิมพีแดนซ์ของคอลลิเนียร์ไดโพลอาร์เรย์	20
รูปที่ 4.1	แสดงค่าตัวอย่างรากของเชบบีเชฟโพลีโนเมียล อันดับศูนย์ถึงอันดับห้า	24
รูปที่ 4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ และระดับของไซด์โหลบ	27
รูปที่ 4.3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างไดเร็คติวิตี้และค่า $(L+d)/\lambda$	28
รูปที่ 5.1	แสดงลักษณะของวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด	33
รูปที่ 5.2	แสดงลักษณะและวงจรสมมูลย์ของพินไดโอด	33
รูปที่ 5.3	แสดงโครงสร้างของบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์	35
รูปที่ 5.4	แสดงการแมทชิ่งของวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด	36
รูปที่ 5.5	แสดงโครงสร้างของวงจรแมทชิ่งแบบต่างๆ	37
รูปที่ 6.1	แสดงลักษณะโครงสร้างของวงจรแบ่งแยกกำลัง	41
รูปที่ 6.2	แสดงวงจรแบ่งแยกกำลังแบบ 4 เอาท์พุท	41
รูปที่ 6.3	แสดงวงจรลดทอนสัญญาณ	42
รูปที่ 7.1	แสดงขนาดของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียว	45
รูปที่ 7.2	แสดงการวางเอลีเมนท์ของไดโพลอาร์เรย์ เหนือบนระนาบกราวนด์เพลน	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 7.3 แสดงขนาดของวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์
ที่ได้คำนวณออกแบบ 52
รูปที่ 7.4 แสดงขนาดของวงจรแบ่งแยกกำลังที่ได้คำนวณออกแบบ 53
รูปที่ 7.5 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณแบบพาย-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ 55
รูปที่ 8.1 แสดงวงจรเลื่อนเฟสขนาด 1 บิท ที่สร้างขึ้นทดลอง 60
รูปที่ 8.2 แสดงการต่อเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์สำหรับวัดการเลื่อนเฟส 60
รูปที่ 8.3 แสดงการต่อสเปคตรัมแอนนาไลเซอร์สำหรับวัดรีเทิร์นลอส 61
รูปที่ 8.4 แสดงการต่อสเปคตรัมแอนนาไลเซอร์สำหรับวัดอินเสิร์ทชันลอส 61
รูปที่ 8.5 แสดงวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท ที่สร้างขึ้นใช้งานจริง 62
รูปที่ 8.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เลื่อนไป(Phase Shift)
และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส 63
รูปที่ 8.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินเสิร์ทชันลอส(Insertion Loss)
และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส 63
รูปที่ 8.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรีเทิร์นลอส(Return Loss)
และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส 64
รูปที่ 8.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR
และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส 64
รูปที่ 8.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินเสิร์ทชันลอส(Insertion Loss)
และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน 65
รูปที่ 8.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรีเทิร์นลอส(Return Loss)
และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน 65
รูปที่ 8.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ
ความถี่ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน 66
รูปที่ 8.13 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลัง 4 เอาท์พุท และ
วงจรลดทอนสัญญาณเพื่อสังเคราะห์เซคเตอร์แพทเทิร์น
ที่นำมาใช้งานจริง 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 8.14 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลัง 8 เอาท์พุท และ
วงจรลดทอนสัญญาณเพื่อสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น
แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ ที่นำมาใช้งานจริง 68
รูปที่ 8.15 แสดงวิธีการต่อเครื่องมือสำหรับวัดรูปแบบการกระจายคลื่น 68
รูปที่ 8.16 แสดงภาพของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียวที่สร้างขึ้น 69
รูปที่ 8.17 แสดงภาพของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ที่สร้างขึ้น 69
รูปที่ 8.18 แสดงภาพของเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์สำหรับวัดการเลื่อนเฟส 70
รูปที่ 8.19 แสดงภาพของสเปคตรัมแอนนาไลเซอร์สำหรับวัดรีเทิร์นลอส 70
รูปที่ 8.20 แสดงการจัดลำดับของวงจรเลื่อนเฟสแต่ละบิท 72
รูปที่ 8.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรีเทิร์นลอส (Return Loss)
และความถี่ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์
เมื่อปรับบีมหลักไปในทิศทางต่างๆกัน 73
รูปที่ 8.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR
และความถี่ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์
เมื่อปรับบีมหลักไปในทิศทางต่างๆกัน 73
รูปที่ 8.23 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 1(ϕ=180°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 74
รูปที่ 8.24 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 2(ϕ=135°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 75
รูปที่ 8.25 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 3(ϕ=90°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 76
รูปที่ 8.26 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 4(ϕ=45°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 77
รูปที่ 8.27 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 5(ϕ=0°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 78
รูปที่ 8.28 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 6(ϕ=315°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 8.29 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 7(ϕ=270°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 80
รูปที่ 8.30 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 8(ϕ=225°)
(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี 81
รูปที่ 8.31 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ
ความถี่ 880 MHz 82
รูปที่ 8.32 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ
ความถี่ 900 MHz 83
รูปที่ 8.33 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ
ความถี่ 915 MHz 84
รูปที่ 8.34 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ
ความถี่ 920 MHz 85
รูปที่ 8.35 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน
ความถี่ 880 MHz 86
รูปที่ 8.36 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน
ความถี่ 900 MHz 87
รูปที่ 8.37 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน
ความถี่ 915 MHz 88
รูปที่ 8.38 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ
ความถี่ 920 MHz 89
รูปที่ 8.39 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 1(ϕ=180°) 90
รูปที่ 8.40 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 2(ϕ=135°) 90
รูปที่ 8.41 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 3(ϕ=90°) 91
รูปที่ 8.42 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 4(ϕ=45°) 91
รูปที่ 8.43 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 5(ϕ=0°) 92
รูปที่ 8.44 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 6(ϕ=315°) 92
รูปที่ 8.45 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 7(ϕ=270°) 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 8.46 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 8(ϕ=225°) 93
รูปที่ 8.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับสัญญาณสูงสุดของบีมกลัก และมุมของบีมหลัก ในสถานะต่างๆ ที่ความถี่ 915 MHz 94
รูปที่ 9.1 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นเปรียบเทียบที่ระยะต่างๆ 100
รูปที่ ก.1 แสดงลักษณะการวางสายอากาศไดโพลเหนือบนกราวนด์เพลน 106
รูปที่ ข.1 แสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล วางขนานอยู่เหนือบนกราวนด์เพลนสัมพันธ์กับระยะห่างจากกราวนด์เพลน 108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญญลักษณ์

AF : ตัวประกอบอาร์เรย์ (Array Factor)

a_n : สัมประสิทธิ์การป้อนกระแสสัญญาณ (Exitation Coefficient)

α : ค่าลดทอนสัญญาณ (Attenuation)

β : ความต่างเฟส (phase difference)

D_o : ไดเร็คติวิตี้ (Directivity)

D_g : ไดเร็คทีพเกน (Directive Gain)

d : ระยะห่างระหว่างแต่ละเอลีเมนท์ของอาร์เรย์

ϵ_r : เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Relative Permittivity)

ϵ_{eff} : เปอร์มิตติวิตี้ประสิทธิผล (Effective Permittivity)

f : บีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ (Beam Broadening Factor)

h : ความหนาของไมโครสตริปไลน์

k : เวฟนัมเบอร์ (Wave Number)

L : ความยาวทั้งหมดของอาร์เรย์

η : อินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance)

P_{rad} : กำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$\Delta\phi$: มุมเฟสที่เลื่อนไป (phase shift)

R_o : อัตราส่วนโวลเตจ ของเมนโหลบกับไซด์โหลบ

λ_d : ความยาวคลื่นในสารไดอิเล็คตริค

λ_o : ความยาวคลื่นในฟรีสเปซ

$T_m(z)$: เชบบีเชพโพลีโนเมียลอันดับที่ m

θ_h : ฮาล์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์ (Half Power Beamwidth)

W : ความกว้างของไมโครสตริปไลน์

Z_{NN} : เซลฟ์อิมพีแดนซ์ของเอลีเมนท์ที่ N (Self Impedance)

Z_{MN} : มิวช่วลอิมพีแดนซ์ของเอลีเมนท์ที่ MN (Mutual Impedance)

Z_o : คาร์แรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ (Characteristics Impedance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1-1 กล่าวนำ

ในระบบสายอากาศเรดาร์นั้น ต้องทำให้มีการกวาด (Scanning) บีมของสายอากาศ (Antenna Beam) เพื่อให้สามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมายได้รอบทิศทาง ซึ่งแต่ก่อนการกวาดบีมของสายอากาศทำได้โดยการหมุนสายอากาศไปรอบตัวด้วยวิธีทางกลอาศัยมอเตอร์ ต่อมาระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 (ค.ศ.1930) ได้มีการริเริ่มนำสายอากาศเฟสอาร์เรย์มาใช้กับระบบสายอากาศเรดาร์ดังกล่าว โดยทำการกวาดบีมหลักของสายอากาศด้วยวิธีทางไฟฟ้า ซึ่งมีความรวดเร็วกว่าการใช้มอเตอร์หมุนตัวสายอากาศมาก ทั้งนี้ความต้องการเบื้องต้นของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ในสมัยนั้น ก็คือนำไปใช้เป็นระบบป้องกันจรวดขีปนาวุธในสนามรบ [1] แต่ในปัจจุบันวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เป็นประโยชน์มากมาย เช่น ใช้ในระบบการค้นหาติดตามตำแหน่งของดาวเทียม รวมทั้งอากาศยานต่างๆ

โดยทั่วไปการกวาดบีมหลักของสายอากาศนั้น มีหลักการสำคัญๆอยู่ 2 หลักการ คือ ใช้วิธีการปรับเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่สายอากาศอาร์เรย์ (Phase Scanning Array) และใช้วิธีการเปลี่ยนความถี่ของกระแสที่ป้อนให้แก่สายอากาศอาร์เรย์ (Frequency Scanning Array) [2],[3] สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงเฉพาะสายอากาศเฟสอาร์เรย์ หรือสายอากาศที่มีการกวาดบีมหลัก โดยวิธีการปรับเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่ สายอากาศอาร์เรย์เท่านั้น

ส่วนประกอบของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนี้เป็นสายอากาศไดโพลขนาดยาวครึ่งความยาวคลื่น วางเรียงกันเป็นอาร์เรย์แบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหนือบนกราวนด์เพลนจำนวน 4x8 เอลีเมนท์ มีวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้ไดโอดขนาด 3 บิท จำนวน 8 เอลีเมนท์ เพื่อควบคุมการกวาดบีมหลักของสายอากาศในระนาบอะซิมุธ โดยใช้วงจรแบ่งแยกกำลังและวงจรลัดทอนสัญญาณ เพื่อควบคุมการป้อนขนาดของกระแสสัญญาณให้มีรูปแบบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายคลื่นตามที่ต้องการ

1-2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

จากที่กล่าวนำมาข้างต้น เป็นการแนะนำเกี่ยวกับหลักการและข้อดีของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ซึ่งสาระในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาการออกแบบเพื่อวิจัยหลักการเบื้องต้น ของระบบสายอากาศเรดาร์ที่ใช้การกวาดบีมด้วยวิธีทางไฟฟ้า ทั้งนี้ได้นำมาใช้เป็นประโยชน์เพื่อประกอบการอธิบายแสดงทฤษฎีของสายอากาศอาร์เรย์ และใช้เป็นอุปกรณ์ในการทดลองให้แก่นักศึกษา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มุ่งหวังที่จะให้เป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อสร้างสรรค์ให้นักศึกษา นำไปประยุกต์และพัฒนาสำหรับใช้งานในด้านการสื่อสารต่อไป

1-3 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 9 บท โดยมีบทนำอยู่ในบทที่ 1 เป็นการกล่าวแนะนำข้อดี หลักการเบื้องต้นและวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ ส่วนรายละเอียดของบทต่างๆอีก 8 บท มีดังต่อไปนี้ คือ

- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีสายอากาศอาร์เรย์ แบ่งเป็นสายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรง และสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบ เป็นการแนะนำหลักการพิจารณาลักษณะการวางตำแหน่ง และเฟสในแต่ละเอลีเมนท์ของสายอากาศอาร์เรย์ เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น โดยหัวข้อสุดท้ายเป็นเรื่องของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ซึ่งได้แสดงการปรับทิศทางของบีมหลักของสายอากาศอาร์เรย์ ด้วยการปรับเฟสของกระแสสัญญาณที่ป้อนให้แก่สายอากาศแต่ละเอลีเมนท์ โดยได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงทิศทางในการแพร่กระจายคลื่นและการเปลี่ยนแปลงเฟสของกระแสสัญญาณดังกล่าว

- บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติ ของสายอากาศอาร์เรย์ที่ควรสนใจ ได้แก่สนามลัพธ์ของสายอากาศอาร์เรย์ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการคำนวณหาสนามลัพธ์ของสายอากาศอาร์เรย์ นั่นคือค่าตัวประกอบอาร์เรย์ โดยพิจารณาจากหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น และนอกจากนี้ได้แสดงการหาค่าไดเร็คติวิตี้และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอาร์เรย์ด้วย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาเจ้าของเอกสารนี้ และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บทที่ 4 เป็นเรื่องการสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น ของสายอากาศอาร์เรย์ ได้แก่การสังเคราะห์ให้มีบีมหลักแคบ ระดับของไซด์โหลบต่ำ โดยใช้เชบบีเชฟโพลีโนเมียล และการสังเคราะห์เชคเตอร์แพทเทิร์น โดยวิธีการแปลงของฟูเรียร์ โดยกล่าวถึงเหตุผลในการใช้วิธีการดังกล่าวเพื่อการสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นตามที่ต้องการ รวมทั้งได้แสดงวิธีการในการคำนวณเอาไว้ตอนท้ายของบท

- บทที่ 5 กล่าวถึงวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด เป็นการแสดงวิธีการออกแบบส่วนประกอบของวงจรเลื่อนเฟสแบบสะท้อนโดยใช้พินไดโอด คือส่วนของวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ และส่วนของวงจรแมทชิ่งแบบทรานส์มิชชั่นไลน์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยได้กล่าวแนะนำถึงลักษณะและวงจรสมมูลย์ของพินไดโอด ไว้ในตอนต้นของบท

- บทที่ 6 เป็นเรื่องของส่วนการป้อนกระแสสัญญาณให้แก่สายอากาศอาร์เรย์ เพื่อควบคุมขนาดของกระแสที่ป้อนให้แก่สายอากาศอาร์เรย์ ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรแบ่งแยกกำลัง และวงจรลดทอนสัญญาณ

- บทที่ 7 ได้แสดงวิธีการคำนวณและออกแบบสร้าง ส่วนประกอบต่างๆของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ โดยนำทฤษฎีและวิธีการคำนวณในบทก่อนนี้มาแทนค่า พร้อมทั้งแสดงผลของการคำนวณเอาไว้ด้วย

- บทที่ 8 ได้แสดงให้เห็นถึงวิธีการทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆ ที่ควรสนใจของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ได้แก่ รูปแบบการกระจายคลื่นที่มีบีมหลักในทิศทางต่างกัน 8 ทิศทาง ตามที่ได้กำหนดไว้ในแนวความคิดเบื้องต้น รวมทั้งแสดงการวัดค่าเกน, ค่า VSWR โดยได้แสดงผลของการทดลองไว้ในรูปของกราฟและตาราง นอกจากนี้ได้แสดงผลการทดลองวัดคุณสมบัติ ของส่วนประกอบย่อยในแต่ละส่วน เพิ่มเติมเอาไว้พอสังเขป

- บทที่ 9 เป็นการสรุปและวิจารณ์ ผลของการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมด พร้อมทั้งได้เสนอแนะแนวทางในการศึกษา ให้แก่ผู้ที่สนใจจะศึกษาเรื่องสายอากาศเฟสอาร์เรย์นี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีสายอากาศอาร์เรย์
(Array Theory)

2-1 กล่าวนำ

คุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศเอลีเมนท์เดียวจะมีรูปแบบการกระจายคลื่นที่มีบีมวิดธ์ค่อนข้างกว้าง และมีเกนต่ำ แต่ในการใช้งานบางอย่าง อาจมีความต้องการสายอากาศที่มีเกนสูง วิธีการเพิ่มเกนของสายอากาศสามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของสายอากาศให้ใหญ่ขึ้น หรือใช้วิธีอื่นที่ไม่อาศัยการเพิ่มขนาดของสายอากาศให้ใหญ่ขึ้น นั่นก็คือใช้การเพิ่มจำนวนสายอากาศให้เป็นหลายๆเอลีเมนท์ โดยทำการจัดสายอากาศหลายเอลีเมนท์นี้ทั้งทางรูปร่างและทางไฟฟ้า จะทำให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสายอากาศแบบนี้มีชื่อว่า สายอากาศอาร์เรย์ (Array Antenna)

ในการหาสนามลัพธ์ของสายอากาศอาร์เรย์ ทำได้โดยการรวมสนามที่แพร่กระจายจากแต่ละเอลีเมนท์ ตามหลักการของเวกเตอร์ โดยทำให้สนามจากแต่ละเอลีเมนท์มาเสริมกัน ในทิศทางที่ต้องการให้สนามลัพธ์มีค่าสูง และมาหักล้างกันในทิศทางที่ต้องการให้สนามลัพธ์มีค่าต่ำ รูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศอาร์เรย์ สามารถควบคุมได้โดยพิจารณาจากข้อจำกัด 5 ข้อ [4] ดังต่อไปนี้คือ

1. การจัดเรียงตัวของเอลีเมนท์ในอาร์เรย์
2. ระยะห่างสัมพัทธ์ระหว่างเอลีเมนท์แต่ละตัว
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์
4. เฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์
5. รูปแบบการกระจายคลื่นสัมพัทธ์ของแต่ละเอลีเมนท์

อิทธิพลของข้อจำกัดทั้ง 5 ประการข้างต้นนี้ จะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมด แต่ส่วนที่มีผลต่อทิศทางของบีมหลักมากที่สุด ก็คือเฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทนี้จะได้แนะนำ การพิจารณา ลักษณะการวางตำแหน่ง และเฟสของสายอากาศอาร์เรย์ เพื่อให้ได้รูปแบบการกระจายคลื่นที่ดีกว่าสายอากาศเดี่ยวเอลีเมนท์เดียว โดยจะเริ่มพิจารณาจากสายอากาศหลายเอลีเมนท์แบบจุดไอโซโทรปิคก่อน จากนั้นก็จะนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบอื่นภายหลัง

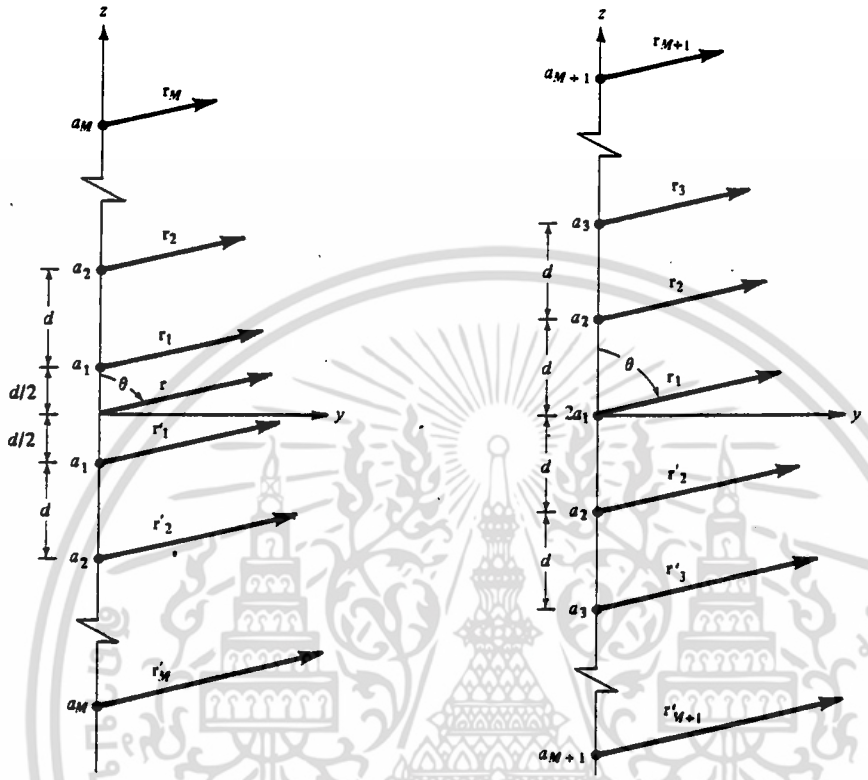
ในหัวข้อ 2-2 จะเป็นเรื่องของสายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรงที่มีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์เท่ากัน แต่มีการป้อนขนาดกระแสไม่สม่ำเสมอ ส่วนในหัวข้อ 2-3 จะเป็นเรื่องของสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบ ซึ่งเกิดจากการนำสายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรง มาเรียงกันในระนาบ 2 มิติ เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และในหัวข้อ 2-4 จะได้กล่าวถึงสายอากาศเฟสอาร์เรย์ เป็นหัวข้อสุดท้ายของบทนี้

2-2 สายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรง (Linear Array)

ในหัวข้อนี้ จะพิจารณาลักษณะของการวางสายอากาศ เป็นอาร์เรย์แบบเส้นตรง ตามรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการพิจารณากรณีของการกระจายคลื่นแบบบรอดไซด์อาร์เรย์ (Broadside Array) ที่มีระยะห่างระหว่างแต่ละเอลีเมนท์สม่ำเสมอ แต่มีการกระจายรูปแบบกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์ไม่สม่ำเสมอ เหตุที่ต้องพิจารณาถึงอาร์เรย์แบบนี้ ก็เนื่องจากในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีจุดประสงค์ในการออกแบบให้อาร์เรย์ในแนวแกนนอน 8 เอลีเมนท์ มีการกระจายรูปแบบกระแสเป็นไปตาม เชบบีเชฟโพลีโนเมียล และอาร์เรย์ในแนวแกนตั้ง 4 เอลีเมนท์ มีการกระจายรูปแบบกระแสเป็นไปตาม วิธีการแปลงของฟูเรียร์ เพื่อสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น ให้มีลักษณะเป็นแบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ และเซคเตอร์แพทเทิร์น ตามลำดับ

รูปที่ 2.1 ได้แสดงให้เห็นถึงการจัดอาร์เรย์เป็น 2 กรณี คือเมื่อจำนวนเอลีเมนท์เป็นจำนวนคู่ และจำนวนคี่ วางเรียงตัวอยู่บนแกน z อย่างสมมาตรกันเมื่อเทียบกับจุดกำเนิด โดยมีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์เท่ากับ d เมื่อสมมุติว่าขนาดของกระแสที่ป้อนให้แก่เอลีเมนท์ต่างๆ มีค่าสมมาตรกันทั้งสองด้านของจุดกำเนิดนี้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) จำนวนเอลีเมนท์เป็นจำนวนคู่ ข) จำนวนเอลีเมนท์เป็นจำนวนคี่

<u>รูปที่ 2.1</u> แสดงการวางอาร์เรย์ของจุดไอโซโทรปิคแบบเส้นตรง

คุณสมบัติเบื้องต้น ในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบนี้ ก็จะยังคงคล้ายกับสายอากาศเพียงเอลีเมนท์เดียว ที่ถูกปรับปรุงด้วยค่าตัวประกอบตัวหนึ่ง เรียกว่า<u>ตัวประกอบอาร์เรย์ (Array Factor)</u> ซึ่งรายละเอียดนั้นจะได้กล่าวแนะนำเพิ่มเติมต่อไปในบทที่ 3 แต่ในหัวข้อนี้ จะขอแสดงให้เห็นรูปลักษณะทางคณิตศาสตร์ของตัวประกอบอาร์เรย์แบบทั่วไปไว้ก่อน ดังต่อไปนี้ คือ

$$(AF)_{2M} = \sum_{n=1}^{M} a_n \cos[(2n-1)u+\beta] \qquad (2.1)$$

และ

$$(AF)_{2M+1} = \sum_{n=1}^{M+1} a_n \cos[2(n-1)u+\beta] \qquad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในที่นี้ M เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ เท่ากับจำนวนเอลีเมนท์ทั้งหมด ที่อยู่บนแกน z ในทางบวก รวมทั้งบนจุดกำเนิด (ถ้ามี) เท่านั้น

$u = (\pi d/\lambda)\cos\theta$, β เป็นความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์และ a_n เป็นสัมประสิทธ์ของการป้อนขนาดกระแส ให้แต่ละเอลีเมนท์

เป็นที่ควรสังเกตว่า สมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสมการสำหรับหาตัวประกอบอาร์เรย์ ที่มีจำนวนเอลีเมนท์เป็นจำนวนคู่ และจำนวนคี่ตามลำดับ

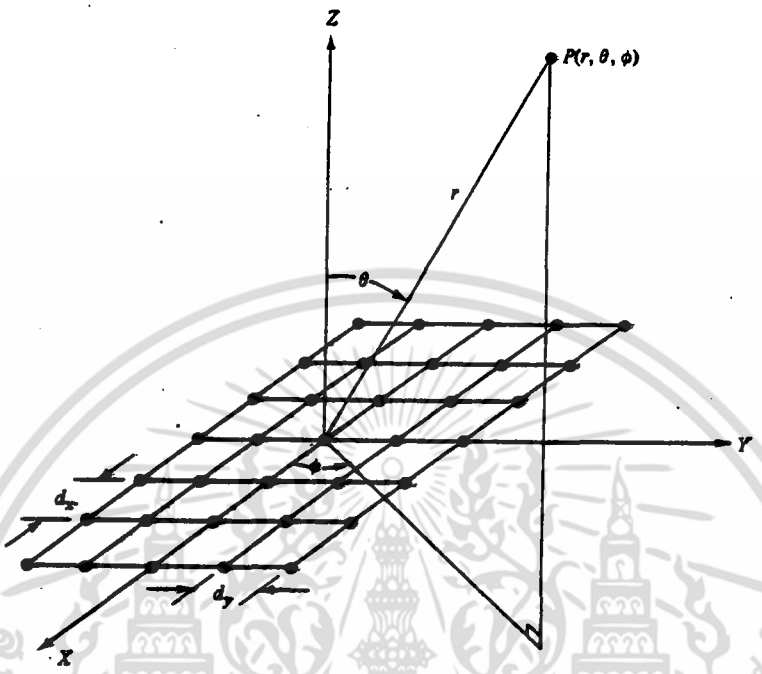
ลำดับต่อไปในการหาคุณสมบัติเบื้องต้น ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอาร์เรย์ คือจะต้องคำนวณหาค่าสัมประสิทธ์การป้อนกระแสให้แต่ละเอลีเมนท์ (a_n) จึงจะสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆ ของอาร์เรย์ได้ต่อไปอีก วิธีการในการหาค่าสัมประสิทธ์นี้มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับความต้องการในการสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 4 ในเรื่องของการสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศอาร์เรย์

2-3 สายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบ (Planar Array)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแนะนำสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบ ซึ่งก็คือการนำสายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรง มาวางเรียงกันเป็นเหมือนตารางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือจัตุรัสก็ได้ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะออกแบบสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการควบคุมลักษณะและความสมมาตรของรูปแบบการกระจายคลื่นได้ด้วย นอกเหนือจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆที่ดีอีกนั่นคือ มีระดับไซด์โหลบต่ำ และมีไดเร็คติวิตี้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้นำไปใช้เป็นสายอากาศเพื่อให้กวาดบีมหลักไปในทิศทางต่างๆ

เช่นเดียวกับสายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรง ก่อนอื่นจะต้องทราบค่าตัวประกอบอาร์เรย์ เพื่อจะวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศได้ต่อไป ให้พิจารณาจากโครงสร้างในรูปที่ 2.2 ถ้า M เป็นจำนวนของเอลีเมนท์ในแนวแกน x มีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์เท่ากับ d_x และ N เป็นจำนวนเอลีเมนท์ของอาร์เรย์ในทิศทาง y แต่ละเอลีเมนท์วางอยู่ห่างกันเท่ากับ d_y ถ้า β_x และ β_y เป็นความต่างเฟส ของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์ในแต่ละแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่ 2.2</u> แสดงโครงสร้างของสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตามลำดับ จะได้ว่าค่าตัวประกอบอาร์เรย์ของสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีค่าดังนี้

$$AF = \sum_{n=-N}^{N} I_{1n} \left[\sum_{m=-M}^{M} I_{m1} \exp\{j(m-1)X\}\right]\exp\{j(n-1)Y\} \quad (2.3)$$

โดยที่ I_{1n} และ I_{m1} เป็นสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสสัญญาณให้แต่ละเอลีเมนท์ในแต่ละแกน ถ้ากำหนดให้

$$S_{xm} = \sum_{m=-M}^{M} I_{m1} \exp\{j(m-1)X\}$$

$$= \sum_{m=-M}^{M} I_{m1} \exp\{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)\} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $$S_{yn} = \sum_{n=-N}^{N} I_{1n} \exp\{j(n-1)Y\}$$

$$= \sum_{n=-N}^{N} I_{1n} \exp\{j(n-1)(kd_y \sin\theta\sin\phi+\beta_y)\} \qquad (2.5)$$

จะได้ว่า $$\boxed{AF = S_{xm}\, S_{yn}} \qquad (2.6)$$

สมการ (2.6) แสดงให้เห็นว่าตัวประกอบอาร์เรย์ของสายอากาศอาร์เรย์แบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้เท่ากับผลคูณของตัวประกอบอาร์เรย์ในทิศทาง x และ y ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหารูปแบบการกระจายคลื่น ได้โดยอาศัยหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น ดังจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3

2-4 สายอากาศเฟสอาร์เรย์ (Phased Array)

ในสองหัวข้อที่ผ่านมา เป็นพื้นฐานเบื้องต้นของสายอากาศอาร์เรย์ที่มีทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นคงที่ เมื่อกำหนดให้ไม่มีความต่างเฟสของแต่ละเอลีเมนท์ แต่ด้วยการควบคุมเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่สายอากาศอาร์เรย์แต่ละเอลีเมนท์มีค่าแตกต่างกัน ทำให้สามารถปรับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นได้ตามต้องการ ซึ่งจะแสดงให้เข้าใจได้ด้วยสมการ (2.1) หรือ (2.2) ค่าตัวประกอบอาร์เรย์นี้ จะขึ้นอยู่กับค่าความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์ในอาร์เรย์ ตัวอย่างเช่นในกรณีของสายอากาศอาร์เรย์แบบเส้นตรงจำนวน N เอลีเมนท์ มีขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์เท่ากัน เมื่อมีความต่างเฟสระหว่างกันเท่ากับ 0 องศา คือมีเฟสเดียวกัน จะมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นตั้งฉากกับแนวสายอากาศอาร์เรย์ เรียกว่าบรอดไซด์อาร์เรย์ (Broadside Array) และเมื่อมีความต่างเฟสระหว่างกันเท่ากับ ±kd องศา จะมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ตามแนวแกนของสายอากาศอาร์เรย์เรียกว่าเอ็นด์ไฟร์อาร์เรย์ (End-Fire Array)[4] ทั้งนี้จะแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \sum_{n=1}^{N} \exp\{j(n-1)\psi\} \qquad (2.7)$$

เมื่อ $$\psi = kd\cos\theta + \beta \qquad (2.8)$$

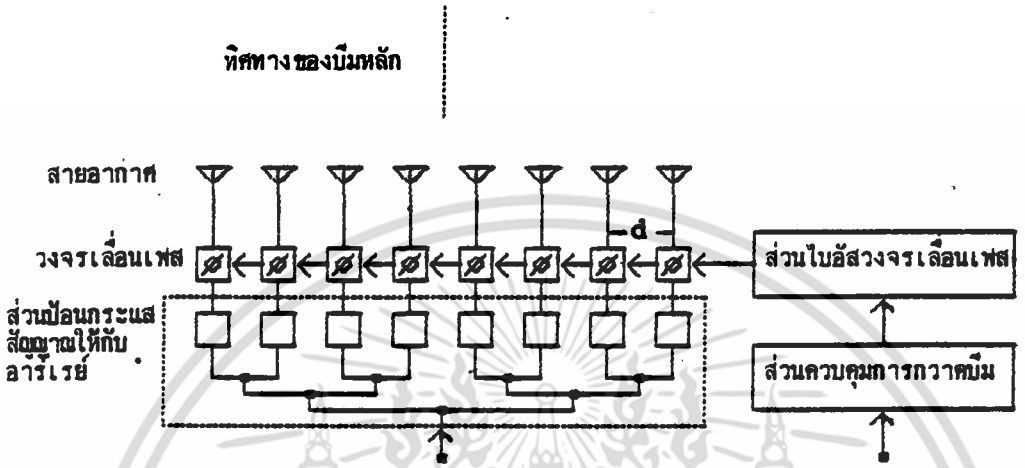
โดยที่ค่าตัวประกอบอาร์เรย์ จะมีค่าสูงสุด เมื่อค่า $\psi = 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\beta = -kd\cos\theta_o \qquad (2.9)$$

เมื่อ β เป็นความต่างเฟสของกระแสในแต่ละเอลีเมนท์ และ θ_o เป็นมุมชี้ทิศทางที่การแพร่กระจายคลื่นมีค่าสูงสุด

ดังนั้น เมื่อสามารถปรับเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่อาร์เรย์ แต่ละเอลีเมนท์ได้ ก็จะทำให้ทิศทางในการแพร่กระจายคลื่นที่มีค่าสูงสุด เปลี่ยนไปได้ตามต้องการ และนี่คือแนวความคิดในหลักการพื้นฐานของสายอากาศอาร์เรย์ที่เรียกว่าสแกนนิ่งอาร์เรย์ (Scanning Array)[2] ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีวงจรอิเลคทรอนิคส์ใช้ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของเฟส นั่นก็คือ<u>วงจรเลื่อนเฟส (Phase Shifter)</u> ที่จะได้กล่าวถึง ในบทที่ 5 ต่อไป รูปที่ 2.3 เป็นภาพประกอบของสายอากาศเฟสอาร์เรย์[9] ซึ่งจะช่วยให้เห็นภาพพจน์ตามหลักการที่กล่าวมาแล้วได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเฟสอาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
คุณสมบัติของสายอากาศอาร์เรย์

3-1 สนามลัพธ์และหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น

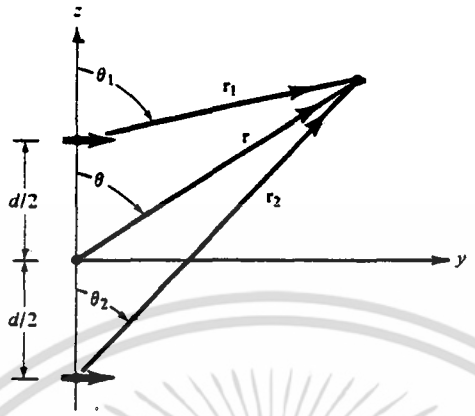
ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีสายอากาศอาร์เรย์ โดยแนะนำลักษณะและคุณสมบัติของอาร์เรย์ที่เป็นจุดไอโซโทรปิคเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยค่าตัวประกอบอาร์เรย์ สำหรับในหัวข้อนี้จะได้ กล่าวแนะนำเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวประกอบอาร์เรย์ เนื่องจากในทางปฏิบัติจริงเอลีเมนท์ของสายอากาศอาร์เรย์มิได้เป็นจุดไอโซโทรปิค เพราะว่าเอลีเมนท์แบบจุดไอโซโทรปิคนี้ จะเป็นสายอากาศในทางอุดมคติ ดังนั้นการคำนวณค่าสนามลัพธ์ของสายอากาศอาร์เรย์ที่ใช้ทำเป็นเอลีเมนท์ในทางปฏิบัติจริง จะต้องมีการคำนวณที่แตกต่างจากอาร์เรย์ของจุดไอโซโทรปิค แต่อย่างไรก็ตาม จะพบว่าตัวประกอบอาร์เรย์ของจุดไอโซโทรปิคที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังคงมีบทบาทที่สำคัญในการคำนวณหาสนามลัพธ์หรือรูปแบบการกระจายคลื่น ของสายอากาศอาร์เรย์ทั้งหลายด้วย

เพื่อแสดงให้เห็นอย่างง่ายๆ จะขอยกตัวอย่างสายอากาศไดโพลจิ๋ว (Infinitesimal Dipole) 2 เอลีเมนท์ (ไดโพลจิ๋วเป็นไดโพลที่มีความยาวน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น) วางเรียงเป็นอาร์เรย์ตามแนวนอนอยู่บนแกน z ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยไม่คำนึงถึงการคัปปลิ้งระหว่างเอลีเมนท์ทั้งสอง ค่าสนามลัพธ์ที่แพร่กระจายจากสายอากาศอาร์เรย์สองเอลีเมนท์นี้ จะเกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ที่เกิดจากสนามของสายอากาศทั้งสอง ในระนาบ y-z ซึ่งมีค่า ดังนี้ คือ

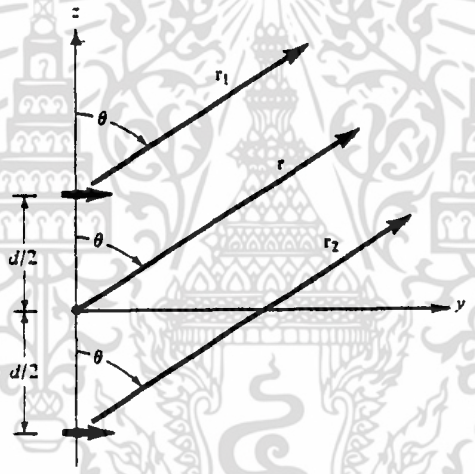
$$\vec{E}_{total} = \vec{a}_\theta \, j\eta \, \frac{kI_o}{4\pi r} \, e^{-jkr} |\cos\theta| 2\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta+\beta)\right] \qquad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) แสดงให้เห็นว่าสนามลัพธ์ของไดโพลจิ๋ว 2 เอลีเมนท์ มีค่าเท่ากับสนามของสายอากาศเอลีเมนท์เดียว ที่วางอยู่บนจุดกำเนิด คูณด้วยตัวประกอบตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบอาร์เรย์ (Array Factor) ในกรณีนี้ตัวประกอบอาร์เรย์ที่นอร์มอลไรซ์แล้ว ของไดโพลจิ๋วสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สายอากาศไดโพล 2 เอลีเมนท์



(ข) การพิจารณาสนามระยะไกล

<u>รูปที่ 3.1</u> แสดงการวางตัวของสายอากาศไดโพลจิ๋ว 2 เอลีเมนท์

เอลีเมนท์ (ที่มีขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์เท่ากัน) จะมีค่าดังนี้ คือ

$$(AF)_{normalized} = \cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta+\beta)\right] \qquad (3.2)$$

จะเห็นว่าตัวประกอบอาร์เรย์เป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กับรูปร่างของอาร์เรย์เอง รวมทั้งขึ้นอยู่กับ เฟสของการป้อนกระแสให้กับเอลีเมนท์ของอาร์เรย์ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมสนามลัพธ์ ของอาร์เรย์ได้ โดยเปลี่ยนแปลงระยะห่าง d และ/หรือ ความต่างเฟส β ระหว่างแต่ละเอลีเมนท์ เพราะฉะนั้นการหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามลัพธ์ระยะไกล หรือรูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศอาร์เรย์ใดๆ จะสรุปได้ว่ามีค่าเท่ากับ ผลคูณของสนามสายอากาศเอลีเมนท์เดียว ที่จุดอ้างอิงจุดหนึ่ง (ปกติเลือกที่จุดกำเนิด) กับค่าตัวประกอบอาร์เรย์ของจุดไอโซโทรปิค นั่นคือ

$$\vec{E}(\text{ผลลัพธ์}) = [\vec{E}(\text{สายอากาศเอลีเมนท์เดียว})]\times[\text{ตัวประกอบอาร์เรย์}] \quad (3.3)$$

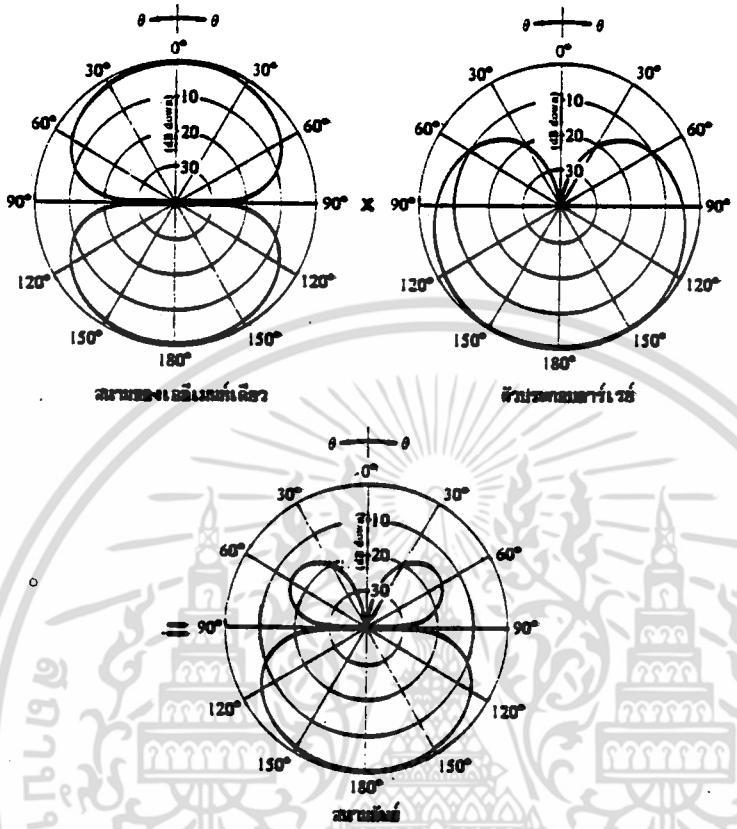
สมการที่ (3.3) นี้เรียกว่า <u>หลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น</u> (Principles of Pattern Multiplication)[4] ซึ่งหลักการนี้สามารถใช้กับสายอากาศอาร์เรย์ที่มีจำนวนเอลีเมนท์เท่าใดก็ได้ โดยที่มีสายอากาศแต่ละเอลีเมนท์เป็นชนิดเดียวกัน ทั้งนี้ไม่จำเป็นต้องมีขนาดหรือเฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์เหมือนกัน

เนื่องจากตัวประกอบอาร์เรย์ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะในการชี้ทิศทางของเอลีเมนท์ที่แพร่กระจายคลื่น ดังนั้นจึงอาจจะแทนค่าตัวประกอบอาร์เรย์ของเอลีเมนท์จริงใดๆ ด้วยตัวประกอบอาร์เรย์ของจุดไอโซโทรปิค และทำให้ค่าสนามลัพธ์ของสายอากาศอาร์เรย์ใดๆ ในสมการที่ (3.3) หาได้จากสนามของสายอากาศจริงๆเอลีเมนท์เดียว คูณกับตัวประกอบอาร์เรย์ของจุดไอโซโทรปิค เพื่อให้เข้าใจในหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่นได้ดีขึ้น จึงจะขอยกตัวอย่างพร้อมทั้งแสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ของสายอากาศไดโพลจิ๋ว 2 เอลีเมนท์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีระยะห่างระหว่างกันเท่ากับ $\lambda/4$ และมีเฟสต่างกัน +90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.2

<u>3-2 ไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศอาร์เรย์</u>

ในหัวข้อต่อไปนี้ จะเป็นการกล่าวถึง การคำนวณค่าไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศอาร์เรย์ที่มีสัมประสิทธิ์ในการป้อนกระแสสัญญาณไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นอาร์เรย์ที่ได้ใช้ออกแบบ ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ เพื่อสังเคราะห์ให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น

รูปแบบการกระจายคลื่นตามที่ต้องการ โดยก่อนที่จะทราบนิยามของไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศ จะต้องแนะนำค่าไดเร็คทีพเกน (Directive gain) ก่อน ในความหมายเกี่ยวกับวิชาสายอากาศ ได้นิยามให้ค่าไดเร็คทีพเกน เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ต่อกำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นทั้งหมด ดังสมการต่อไปนี้ คือ

$$D_g = 4\pi \frac{U}{P_{rad}} \qquad (3.4)$$

โดยในที่นี้ D_g เป็นค่าไดเร็คทีพเกน (ไม่มีหน่วย)

U เป็นความเข้มของการกระจายคลื่น (หน่วยเป็นวัตต์/มุมตัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ P_{rad} เป็นกำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นทั้งหมด (หน่วยเป็นวัตต์)

กำหนดให้ค่าของไดเร็คทีพเกน ในทิศทางที่มีค่าสูงสุด (ปกติจะเป็นทิศทางที่อยู่ทางด้านหน้าของสายอากาศ) โดยที่ค่า U ขึ้นอยู่กับมุม θ คือค่าไดเร็คติวิตี้ (Directivity) ของสายอากาศ ดังนั้นนิยามได้ว่ามุม θ ที่ทำให้ค่าไดเร็คทีพเกนมีค่าสูงสุด และเป็นมุมที่มีค่า U สูงสุด ทำให้ได้ค่าไดเร็คติวิตี้ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ (3.5) คือ

$$D_o = 4\pi\frac{U_{max}}{P_{rad}} \qquad (3.5)$$

โดยที่ D_o เป็นค่าไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
และ U_{max} เป็นความเข้มของการกระจายคลื่นสูงสุด (หน่วยเป็นวัตต์/มุมตัน)

จากสมการที่ (3.5) สามารถคำนวณหาค่า P_{rad} ได้จากการอินทิเกรตค่าความเข้มการกระจายคลื่น ซึ่งได้จากค่าตัวประกอบอาร์เรย์นั่นเอง ทำให้ได้ค่าไดเร็คติวิตี้ ของสายอากาศอาร์เรย์มีค่า [1] ดังนี้ คือ

$$D_o = \frac{\left(\sum_{k=0}^{N-1} A_k\right)^2}{\sum_{m=0}^{N-1}\sum_{p=0}^{N-1} A_m A_p \sin[(m-p)kd]/(m-p)kd} \qquad (3.6)$$

3-3 อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอาร์เรย์

ในการคำนวณหาค่า อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลเดี่ยวสามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรต หรือใช้วิธีการโมเมนท์ (Moment Method)ซึ่งจะได้เฉพาะค่าเซลฟ์อิมพีแดนซ์ (Self Impedance) ของไดโพลเท่านั้น แต่ในกรณีของสายอากาศอาร์เรย์จะต้องคำนึงถึงการคัปปลิ้งกันระหว่างสายอากาศแต่ละเอลีเมนท์ด้วย นั่นคือต้องคำนวณค่าของมิวช่วลอิมพีแดนซ์ (Mutual Impedance) รวมกันด้วย ในการคิดคำนวณค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใดๆนั้น จะต้องคำนึงถึงความถี่ที่ใช้งาน ,รูปร่างลักษณะ ,วิธีการป้อนสัญญาณ และวัตถุที่อยู่แวดล้อมสายอากาศนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของมิวช่วลคัปปลิ้ง ที่นำเข้ามาร่วมใช้พิจารณาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์หรือไดรวิ่งพ้อยนท์อิมพีแดนซ์ (Driving Point Impedance) ของเอลีเมนท์ใดๆ ในสายอากาศอาร์เรย์จำนวน N เอลีเมนท์นั้น เป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและโวลเตจ เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของกระแสและโวลเตจในโครงข่ายไฟฟ้าทั่วไป คือ

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \ldots + Z_{1N}I_N \\ V_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \ldots + Z_{2N}I_N \\ &\cdot \\ &\cdot \\ V_N &= Z_{N1}I_1 + Z_{N2}I_2 + \ldots + Z_{NN}I_N \end{aligned} \qquad (3.7)$$

โดยที่ V_N และ I_N เป็นโวลเตจและกระแส ของเอลีเมนท์ที่ N

Z_{NN} เป็นเซลฟ์อิมพีแดนซ์ของเอลีเมนท์ที่ N เมื่อเอลีเมนท์อื่นทั้งหมดเปิดวงจร (Open Circuit)

และ Z_{MN} (ในทำนองเดียวกันเท่ากับ Z_{NM}) เป็นมิวช่วลอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วทั้งสองของเอลีเมนท์ที่ M และ N

ค่าของแอ็คทีพอิมพีแดนซ์ (Active Impedance) จะเป็นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของเอลีเมนท์นั้นๆ เมื่อเอลีเมนท์อื่นทั้งหมดถูกกระตุ้น (Excited) ตัวอย่างเช่น ค่าแอ็คทีพอิมพีแดนซ์ของเอลีเมนท์ที่ 1 จากสมการที่ (3.7) จะหาได้ดังนี้ คือ

$$Z_{1,in} = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} + \left(\frac{I_2}{I_1}\right)Z_{12} + \ldots + \left(\frac{I_N}{I_1}\right)Z_{1N} \qquad (3.8)$$

จะสังเกตุได้ว่าแอ็คทีพอิมพีแดนซ์ ไม่ได้เป็นเพียงผลรวมของเซลฟ์อิมพีแดนซ์และมิวช่วลอิมพีแดนซ์เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับ ค่ากระแสของเอลีเมนท์ทั้งหมดด้วย

ในการวิเคราะห์ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสองเอลีเมนท์ โดยแทนค่าความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ เป็นแบบโครงข่ายไฟฟ้าสองพอร์ท (Two-port Network) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีความสัมพันธ์ของกระแสและโวลเตจ เช่นเดียวกับสมการที่ (3.7) คือ

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \qquad (3.9)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \qquad (3.10)$$

โดยที่ $Z_{11} = \frac{V_1}{I_1}$ เมื่อ $I_2 = 0$ เป็นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท #1 เมื่อพอร์ท #2 เปิดวงจร

$Z_{12} = \frac{V_1}{I_2}$ เมื่อ $I_1 = 0$ เป็นค่ามิวช่วลอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท #1 ที่เกิดขึ้นจากกระแสของพอร์ท #2 (เมื่อพอร์ท #1 เปิดวงจร)

$Z_{21} = \frac{V_2}{I_1}$ เมื่อ $I_2 = 0$ เป็นค่ามิวช่วลอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท #2 ที่เกิดขึ้นจากกระแสของพอร์ท #1 (เมื่อพอร์ท #2 เปิดวงจร)

$Z_{22} = \frac{V_2}{I_2}$ เมื่อ $I_1 = 0$ เป็นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท #2 เมื่อพอร์ท #1 เปิดวงจร

โดยส่วนใหญ่ของสายอากาศอาร์เรย์ จะมีคุณสมบัติอย่างหนึ่งคือมีค่าเดียวกันในสองทิศทาง (Reciprocal) ดังนี้ คือ

$$Z_{12} = Z_{21} \qquad (3.11)$$

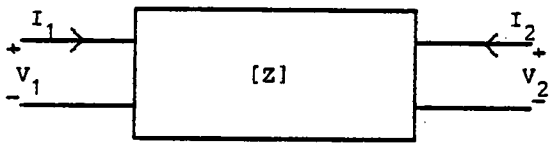
เพราะฉะนั้นในการหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศอาร์เรย์ จะมีขอบเขตของอิทธิพลต่างๆ ขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้ คือ

(ก) ชนิดของสายอากาศ

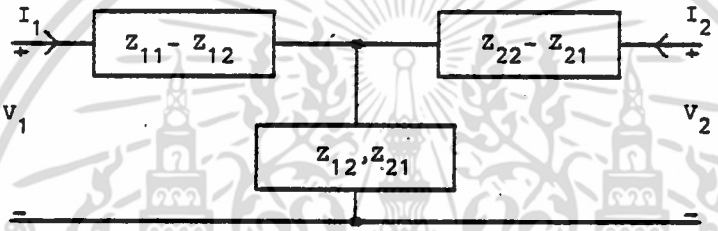
(ข) ตำแหน่งสัมพัทธ์ของเอลีเมนท์

(ค) วิธีการป้อน (Feeding) กระแสกระตุ้นให้แก่เอลีเมนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แสดงโครงข่ายไฟฟ้าสองพอร์ท



(ข) แสดงวงจรสมมูลย์แบบที

<u>รูปที่ 3.3</u> แสดงโครงข่ายไฟฟ้าสองพอร์ทที่ใช้พิจารณาการคัปปลิ้ง ระหว่างสายอากาศสองเอลีเมนท์

จากสมการที่ (3.8) จะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ที่เป็นไดรวิ่งพ้อยนท์ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเอลีเมนท์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ได้ดังนี้

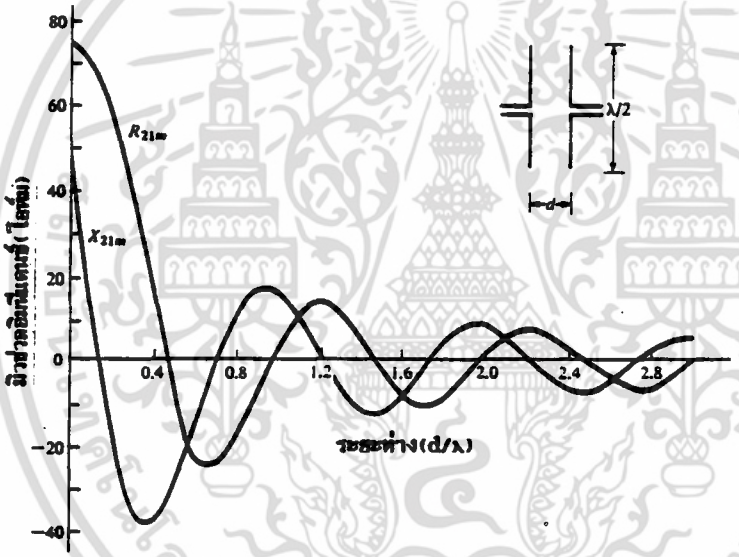
$$Z_{1d} = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} + Z_{12}\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \qquad (3.12)$$

$$Z_{2d} = \frac{V_2}{I_2} = Z_{22} + Z_{21}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \qquad (3.13)$$

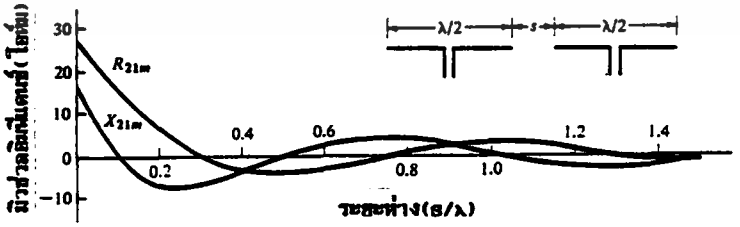
โดยที่ Z_{1d} และ Z_{2d} เป็นไดรวิ่งพ้อยนท์อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศเอลีเมนท์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์แต่ละค่า ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของกระแสที่ป้อนให้แก่สายอากาศอาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น กล่าวโดยสรุป ในตอนท้ายนี้ก็คือ การหาอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอาร์เรย์ จะต้องคำนวณค่าเซลฟ์อิมพีแดนซ์ ซึ่งในภาคผนวก ข. จะมีการแสดงค่าเซลฟ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลเหนือบนกราวนด์เพลน และคำนวณค่ามิวช่วลอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนมาก จึงได้แสดงรูปกราฟจากการคำนวณ มิวช่วลอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล ไว้ในรูปที่ 3.4 เป็นการจัดไดโพลอาร์เรย์แบบไซด์บายไซด์ (Side-by-side) และรูปที่ 3.5 เป็นการจัดไดโพลอาร์เรย์แบบคอลลิเนียร์ (Collinear)



รูปที่ 3.4 แสดงค่ามิวช่วลอิมพีแดนซ์ของไซด์บายไซด์ไดโพลอาร์เรย์



รูปที่ 3.5 แสดงค่ามิวช่วลอิมพีแดนซ์ของคอลลิเนียร์ไดโพลอาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศอาร์เรย์

4-1 กล่าวนำ

การออกแบบสร้างสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการให้สามารถกวาดบีมหลักของสายอากาศได้ตามต้องการเป็นประเด็นสำคัญ แต่เพื่อความสมบูรณ์ ของเทคโนโลยีทางด้านสายอากาศอาร์เรย์ในปัจจุบัน จึงได้ขยายประเด็น ให้มีการสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศอาร์เรย์ ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนี้เอาไว้ด้วย และโดยที่ได้กำหนดการออกแบบสายอากาศเป็นอาร์เรย์แบบระนาบ 2 มิติ จึงได้สังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นเป็นเซคเตอร์แพทเทิร์น ในแนวเอลีเวชัน และแบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โลบต่ำ ในแนวอะซิมุธ ซึ่งหลักการและรายละเอียดดังกล่าวจะรวบรวมไว้เป็นสาระภายในบทนี้ต่อไป

4-2 การสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โลบต่ำ โดยใช้เชบบีเชฟโพลีโนเมียล (Chebychev Polynomial)

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โลบต่ำ ซึ่งมีวิธีการที่สำคัญอยู่ 2 วิธี คือวิธีการใช้เชบบีเชฟโพลีโนเมียล และวิธีไลน์ซอร์สของเทเลอร์ โดยวิธีการทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกันมาก แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้วิธีการแรก ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กัน ในการออกแบบสายอากาศอาร์เรย์ นั่นคือวิธีการใช้เชบบีเชฟโพลีโนเมียล เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสสัญญาณที่ให้แก่สายอากาศอาร์เรย์มีความสัมพันธ์กับเชบบีเชฟโพลีโนเมียล จึงมีผู้เรียกสายอากาศแบบนี้ว่าเชบบีเชฟอาร์เรย์ โดยอาร์เรย์แบบนี้จะมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างกลางของยูนิฟอร์มอาร์เรย์และไบโนเมียลอาร์เรย์ นั่นคือมีบีมวิดธ์ที่แคบและมีไซด์โลบต่ำ ซึ่งเนื้อหาต่อไปจะเป็นการกล่าวถึง บรอดไซด์อาร์เรย์แบบเส้นตรง ที่มีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์เท่ากันหมด โดยระยะห่างนั้นจะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าครึ่งความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสมการ (2.1) และ (2.2) ซึ่งแสดงถึงค่าตัวประกอบอาร์เรย์ของเอลีเมนท์นั้นเกิดจาก ผลรวมของโคซายน์จำนวน M หรือ M+1 เทอม ดังนั้นโดยอาศัยความรู้ที่ว่าค่าของโคซายน์ในแต่ละเทอม สามารถเขียนเป็นอนุกรมของฟังก์ชันโคซายน์ได้ ดังนี้

$m = 0 : \cos(mu) = 1$

$m = 1 : \cos(mu) = \cos u$

$m = 2 : \cos(mu) = 2\cos^2 u - 1$

$m = 3 : \cos(mu) = 4\cos^3 u - 3\cos u$

$m = 4 : \cos(mu) = 8\cos^4 u - 8\cos^2 u + 1$

$m = 5 : \cos(mu) = 16\cos^5 u - 20\cos^3 u + 5\cos u$ (4.1)

$m = 6 : \cos(mu) = 32\cos^6 u - 48\cos^4 u + 18\cos^2 u - 1$

$m = 7 : \cos(mu) = 64\cos^7 u - 112\cos^5 u + 56\cos^3 u - 7\cos u$

$m = 8 : \cos(mu) = 128\cos^8 u - 256\cos^6 u + 160\cos^4 u - 32\cos^2 u + 1$

$m = 9 : \cos(mu) = 256\cos^9 u - 576\cos^7 u + 432\cos^5 u - 120\cos^3 u + 9\cos u$

เพราะฉะนั้น เมื่อให้ ค่า $z = \cos u$ สมการข้างบนนี้จะเขียนใหม่ได้ในลักษณะที่สัมพันธ์กับเชบบีเชฟโพลีโนเมียลได้ คือ

$m = 0 : \cos(mu) = 1 = T_0(z)$

$m = 1 : \cos(mu) = z = T_1(z)$

$m = 2 : \cos(mu) = 2z^2 - 1 = T_2(z)$

$m = 3 : \cos(mu) = 4z^3 - 3z = T_3(z)$

$m = 4 : \cos(mu) = 8z^4 - 8z^2 + 1 = T_4(z)$

$m = 5 : \cos(mu) = 16z^5 - 20z^3 + 5z = T_5(z)$ (4.2)

$m = 6 : \cos(mu) = 32z^6 - 48z^4 + 18z^2 - 1 = T_6(z)$

$m = 7 : \cos(mu) = 64z^7 - 112z^5 + 56z^3 - 7z = T_7(z)$

$m = 8 : \cos(mu) = 128z^8 - 256z^6 + 160z^4 - 32z^2 + 1 = T_8(z)$

$m = 9 : \cos(mu) = 256z^9 - 576z^7 + 432z^5 - 120z^3 + 9z = T_9(z)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า (2.1) และ (2.2) อาจคำนวณได้สะดวกขึ้น เมื่อเราอาศัยคุณสมบัติ ของเชบบีเชพโพลีโนเมียล ซึ่งมีสาระที่สำคัญ ดังต่อไปนี้ คือค่าความสัมพันธ์ระหว่างโคซายน์ฟังก์ชัน กับเชบบีเชพโพลีโนเมียล $T_m(z)$ มีค่าอยู่ระหว่าง -1 และ +1 เมื่อ $-1 \leq z \leq +1$ เนื่องจากค่า $|\cos(mu)|$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 แต่ในกรณีที่ค่า $|z| > 1$ ความสัมพันธ์ของเชบบีเชพโพลีโนเมียลจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างไฮเปอร์โบลิคโคซายน์ฟังก์ชัน

ความสัมพันธ์ดังกล่าว ของเชบบีเชพโพลีโนเมียล เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ คือ

$$T_m(z) = \cos [m \cos^{-1}(z)] \qquad -1 \leq z \leq +1 \qquad (4.3)$$

$$T_m(z) = \cosh [m \cosh^{-1}(z)] \qquad |z| > 1 \qquad (4.4)$$

นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ ของเชบบีเชพโพลีโนเมียล อยู่อีกประการหนึ่งคือคุณสมบัติในรูปสมการรีเคอร์ซีฟ (Recursive formula) ดังนี้

$$T_m(z) = 2zT_{m-1}(z) - T_{m-2}(z) \qquad (4.5)$$

สมการที่ (4.5) เป็นการหาค่าของเชพบีเชบโพลีโนเมียลได้ เมื่อทราบค่าของโพลีโนเมียลสองอันดับก่อนหน้านี้ ของค่าโพลีโนเมียลที่ต้องการหา

ค่าตัวอย่างความสัมพันธ์ของ เชบบีเชพโพลีโนเมียลหกอันดับแรก คือ ตั้งแต่ $T_0(z)$ ถึง $T_5(z)$ มีดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะที่น่าสนใจ ดังต่อไปนี้

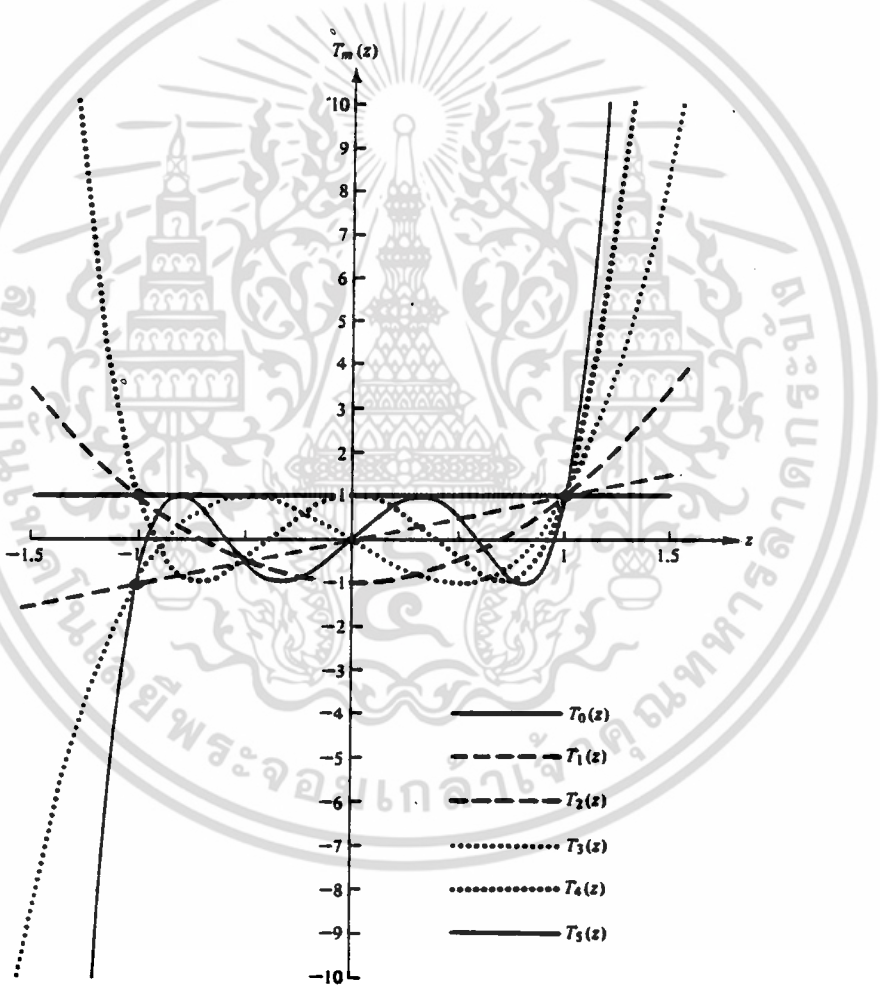
1. ค่าโพลีโนเมียลทั้งหมด ไม่ว่าอันดับใด จะต้องผ่านจุด (1,1)

2. ภายในช่วงจำกัดระหว่าง $-1 \leq z \leq +1$ ค่าของโพลีโนเมียลมีค่าอยู่ภายใน -1 ถึง +1

3. ค่ารากทั้งหมด จะปรากฏภายในช่วงจำกัด $-1 \leq z \leq +1$ ค่าสูงสุดและต่ำสุด ของโพลีโนเมียล จะมีค่า +1 และ -1 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์ เพื่อให้ได้บีมวิดธ์แคบ และไซด์โหลบต่ำ จะต้องออกแบบโดยอาศัยค่าตัวประกอบอาร์เรย์ ซึ่งจะหาได้จากผลรวมในเทอมของฟังก์ชันโคซายน์ และมีสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสสัญญาณเป็นตัวไม่ทราบค่า โดยเทียบสัมประสิทธิ์กับเชบบีเชฟโพลีโนเมียลที่เหมาะสมกัน ทั้งนี้มีข้อสังเกตคือ อันดับของโพลีโนเมียลที่เทียบกัน จะต้องมีค่าน้อยกว่าจำนวนเอลีเมนท์ทั้งหมดของอาร์เรย์เท่ากับ 1



<u>รูปที่ 4.1</u> แสดงค่าตัวอย่างรากของเชบบีเชฟโพลีโนเมียลอันดับศูนย์ถึงอันดับห้า

จากคำอธิบายที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ที่หามาได้คือค่าของกระแสสัญญาณที่ต้องป้อนให้แก่เอลีเมนท์แต่ละตัว ซึ่งค่าของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละค่านี้จะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก เหมาะที่จะใช้ได้ดีในทางปฏิบัติ ดังนั้น สายอากาศเชบบีเชฟอาร์เรย์ จึงเหมาะสมสำหรับการออกแบบเป็นสายอากาศอาร์เรย์ ที่ต้องการบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ เพราะเหตุผลที่มีค่าความแตกต่างของกระแสในแต่ละเอลีเมนท์น้อย ซึ่งต่างจากวิธีการอื่น เป็นต้นว่าวิธีการของไบโนเมียลอาร์เรย์ ที่ให้ความแตกต่างของค่ากระแส ที่จะต้องป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์มาก จึงมักเป็นปัญหาในทางปฏิบัติ โดยในการออกแบบนั้น เริ่มต้นจะต้องทราบค่า จำนวนเอลีเมนท์ของอาร์เรย์ ระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์ และที่สำคัญจะต้องทราบค่าอัตราส่วนของเมนโหลบต่อไซด์โหลบ(R_o) แล้วจึงใช้วิธีการออกแบบตามขั้นตอนซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4-2-1 ขั้นตอนการออกแบบ

วิธีการออกแบบสายอากาศบรอดไซด์อาร์เรย์ โดยการใช้เชบบีเชฟโพลีโนเมียล โดยมีจำนวนเอลีเมนท์ทั้งหมดเท่ากับ 2M หรือ 2M+1 เอลีเมนท์ มีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์เท่ากับ d และมีค่าระดับของไซด์โหลบเมื่อเทียบกับค่าสูงสุดของเมนโหลบ เท่ากับ R_o เท่า จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสสัญญาณและค่าตัวประกอบอาร์เรย์ ได้ตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. เลือกค่าตัวประกอบอาร์เรย์ที่เหมาะสม จากสมการที่ (2.1) หรือ (2.2)

2. กระจายค่าตัวประกอบอาร์เรย์ และแทนค่าฟังก์ชัน cos(mu) แต่ละค่าด้วยอนุกรมที่เหมาะสม ตามสมการที่ (4.1)

3. หาจุด $z = z_o$ ที่ทำให้ $T_m(z_o) = R_o$

4. แทนค่า $\cos(u) = z/z_o$ ลงในตัวประกอบอาร์เรย์ของขั้นตอนที่ 2 ค่าของ cos(u) ที่แทนด้วย z/z_o จะมีค่าที่ถูกต้องสำหรับกรณี $|z| \leq |z_o|$ ในขณะที่ค่านี้จะมีค่าสูงสุด คือเท่ากับ 1 เมื่อ $|z| = |z_o|$

5. หลังจากแทนค่าในขั้นตอนที่ 4 แล้วจัดรูปสมการ ระหว่างตัวประกอบอาร์เรย์ในขั้นตอนที่ 2 กับค่า $T_m(z)$ จากสมการที่ (4.2) อันดับที่ m ของ $T_m(z)$ ที่เลือกไว้ ควรเป็นจำนวนเต็มมีค่าน้อยกว่าจำนวนเอลีเมนท์ทั้งหมดของอาร์เรย์เท่ากับ 1 จากขั้นตอนนี้จะทำให้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนกระแสทั้งหมด คือ a_n ได้

6. แทนค่าลงในตัวประกอบอาร์เรย์ ตามสมการที่ (2.1) หรือ (2.2) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ จากขั้นตอนที่ 5

4-2-2 บีมวิดธ์และไดเร็คติวิตี้ของเชบบีเชฟอาร์เรย์

คุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศอาร์เรย์ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในบทที่ 3 ได้แก่สนามลัพธ์ ไดเร็คติวิตี้ และอินพุทอิมพีแดนซ์ ซึ่งในกรณีของเชบบีเชฟอาร์เรย์นี้ จะได้แสดงวิธีการคำนวณหาไดเร็คติวิตี้ รวมทั้งเพิ่มวิธีการคำนวณหาค่าฮาล์ฟเพาเวอร์บีมวิดธ์เอาไว้ในหัวข้อนี้ด้วย ส่วนคุณสมบัติอื่น คือสนามลัพธ์ ก็สามารถหาได้โดยอาศัยหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น โดยค่าตัวประกอบอาร์เรย์ ได้กล่าวเอาไว้ในตอนต้นแล้ว และสำหรับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ก็ใช้วิธีการเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในบทที่ 3

ก่อนที่จะกล่าวถึง ค่าบีมวิดธ์และไดเร็คติวิตี้ ของเชบบีเชฟอาร์เรย์ จะต้องกล่าวถึงค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ (Beam broadening factor) ก่อน ซึ่งค่านี้เป็นตัวประกอบตัวหนึ่ง ที่นำไปคำนวณประกอบเพิ่มเติมจากบีมวิดธ์และไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศอาร์เรย์ ที่มีการป้อนกระแสสัญญาณสม่ำเสมอ โดยค่านี้เป็นค่า ที่ใช้สำหรับเชบบีเชฟอาร์เรย์ขนาดใหญ่ที่มีค่าไซด์โหลบ อยู่ในช่วง -20 ถึง -60 dB ค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ดังกล่าว มีค่าดังนี้

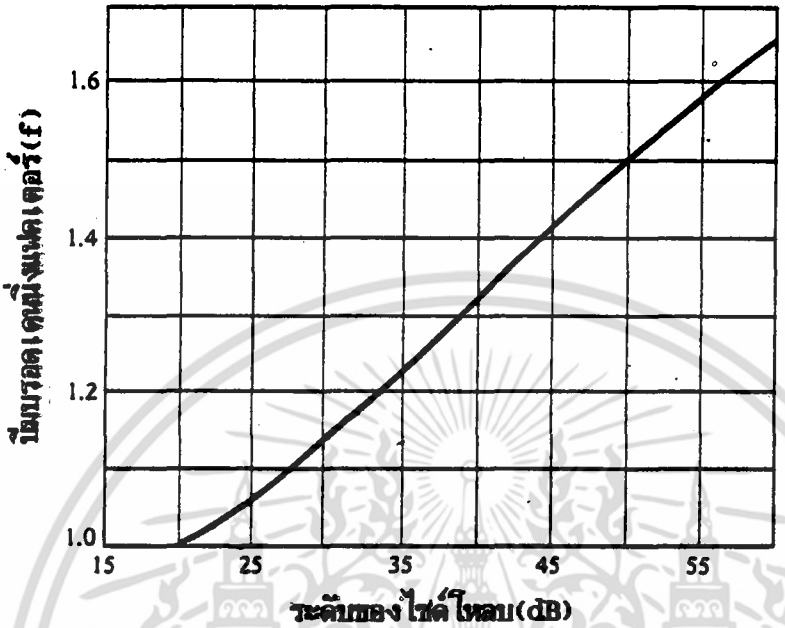
$$f = 1 + 0.636\left\{ \frac{2}{R_o} \cosh\left[\sqrt{(\cosh^{-1}R_o)^2 - \pi^2} \right] \right\}^2 \quad (4.6)$$

โดยที่ค่า R_o เป็นค่าอัตราส่วนโวลเตจ ของเมนโหลบกับไซด์โหลบ และค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ (f) สามารถแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์กับค่าไซด์โหลบ (dB) ดังในรูปที่ 4.2

เมื่อทราบค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ ก็จะสามารถหาค่าบีมวิดธ์ ได้โดยวิธีการ ดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่าบีมวิดธ์ของยูนิฟอร์มอาร์เรย์ (ที่มีจำนวนเอลีเมนท์และระยะห่างเท่ากัน) โดยใช้สมการที่ (4.7) ดังนี้ [4] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์และระดับของไซด์โลบ

$$\theta_h = \cos^{-1}[\cos\theta_o - .443\lambda/(L+d)] - \cos^{-1}[\cos\theta_o + .443\lambda/(L+d)] \quad (4.7)$$

2. นำค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ที่คำนวณได้ หรืออาจจะอ่านจากกราฟในรูปที่ 4.2 คูณกับบีมวิดธ์ที่คำนวณได้ ในข้อที่ 1 ก็จะได้บีมวิดธ์ของเชบบีเชพอาร์เรย์ตามที่ต้องการ

ส่วนค่าไดเร็คติวิตี้ ของเชบบีเชพอาร์เรย์ ก็สามารถคำนวณได้โดยอาศัยค่าของบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ เช่นเดียวกัน นั่นคือ

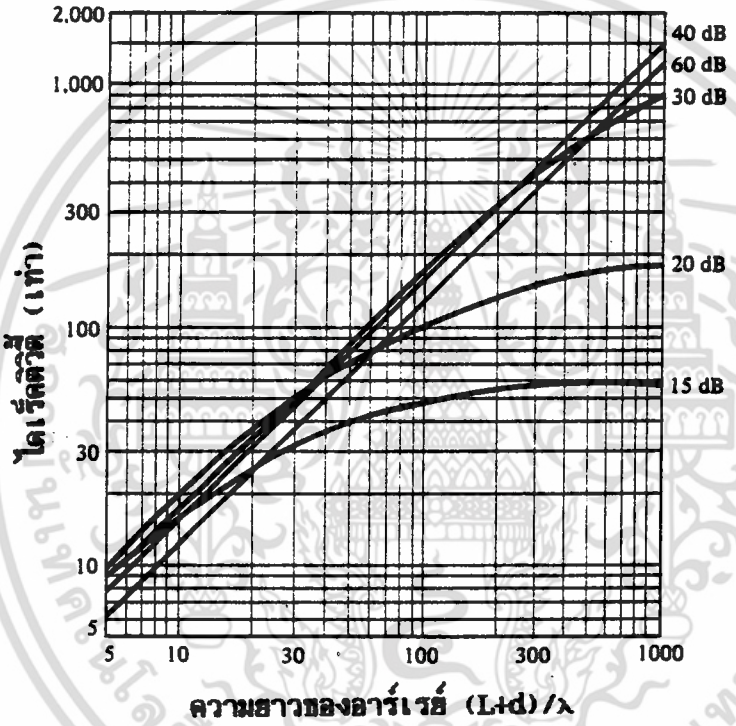
$$D_o = \frac{2R_o^2}{1 + (R_o^2 - 1)f[\lambda/(L+d)]} \quad (4.8)$$

หรืออาจจะแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ ระหว่างไดเร็คติวิตี้และค่าของ $(L+d)/\lambda$ ในกราฟรูปที่ 4.3 ซึ่งจะสามารถสรุปความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค่าไดเร็คติวิตี้ ของเชบบีเชพอาร์เรย์และค่าระดับของไซด์โหลบที่กำหนดให้ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ขนาดของอาร์เรย์หรือจำนวนเอลีเมนท์ของอาร์เรย์เพิ่มมากขึ้น

2. สำหรับความยาวหรือจำนวนเอลีเมนท์ ของอาร์เรย์ที่กำหนดให้ ไม่จำเป็นต้องมีค่าไดเร็คติวิตี้เพิ่มขึ้น ขณะที่ระดับของไซด์โหลบลดต่ำลง



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างไดเร็คติวิตี้และค่า (L+d)/λ

4-3 การสังเคราะห์เชคเตอร์แพทเทิร์น โดยวิธีการแปลงของฟูเรียร์ (Fourier Transform Method)

โดยปกติการสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์ จะมีวิธีการสังเคราะห์โดยลักษณะของสายอากาศ และลักษณะของรูปแบบการกระจายคลื่น แต่ทว่าเนื่องจากลักษณะของสายอากาศอาร์เรย์มีอยู่มากมาย จึงแบ่งวิธีการสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์นี้ ออกตามลักษณะของรูปแบบการกระจายคลื่น ซึ่งมีอยู่ 2 แบบใหญ่ๆ คือ การสังเคราะห์แบบเชคเตอร์แพทเทิร์น และการสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ ดังที่กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 4-2 โดยที่วิธีการทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้มีความแตกต่างกัน อย่างเห็นได้ชัด สำหรับในหัวข้อนี้ จะได้แสดงวิธีการสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์ แบบเชคเตอร์แพทเทิร์น โดยวิธีการแปลงของฟูเรียร์ ซึ่งได้เลือกวิธีการดังกล่าว มาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีการสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์ แบบเชคเตอร์แพทเทิร์น อยู่อีกวิธีหนึ่ง คือวิธีการสุ่มของวู๊ดเวิร์ด (Woodward Sampling Method) ซึ่งให้ผลลัพธ์คล้ายคลึงกัน โดยวิธีการทั้งสองกรณีนี้ สามารถนำไปใช้ได้กับ แหล่งกำเนิดที่เป็นเส้นตรง (Line Source) และสายอากาศอาร์เรย์ที่เป็นแนวเส้นตรง (Linear Array)

การสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์ แบบเชคเตอร์แพทเทิร์น โดยวิธีการแปลงของฟูเรียร์ ก็มีหลักการเช่นเดียวกันกับ การสังเคราะห์สายอากาศอาร์เรย์ทั่วไป นั่นคือ เป็นการหาค่าตัวประกอบอาร์เรย์ และค่าสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสสัญญาณ ให้กับแต่ละเอลีเมนท์ โดยพิจารณาจากอาร์เรย์แบบเส้นตรงจำนวน N เอลีเมนท์ ที่มีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์เท่ากัน และมีสัมประสิทธิ์การป้อนกระแสสัญญาณไม่สม่ำเสมอ (a_m) สามารถเขียนค่าตัวประกอบอาร์เรย์ โดยอาศัยความรู้จากบทที่ 2 ได้ค่าตัวประกอบอาร์เรย์อยู่ในรูปของอนุกรม แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้คือ

เมื่อจำนวนเอลีเมนท์เป็นเลขคี่ ($N = 2M+1$)

$$AF(\theta) = AF(\psi) = \sum_{m=-M}^{M} a_m \exp\{jm\psi\} \qquad (4.9)$$

และเมื่อจำนวนเอลีเมนท์เป็นเลขคู่ ($N = 2M$)

$$AF(\theta) = AF(\psi) = \sum_{m=-M}^{-1} a_m \exp\{j[(2m+1)/2]\psi + \sum_{m=1}^{M} a_m \exp\{j[(2m-1)/2]\psi \qquad (4.10)$$

โดยที่ $\boxed{\psi = kd\cos\theta+\beta}$ (4.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวางตำแหน่งของแต่ละเอลีเมนท์ จะกำหนดได้ดังนี้

สำหรับเอลีเมนท์จำนวนคี่

$$z'_m = md \qquad m = 0,\pm1,\pm2,\ldots,\pm M \qquad (4.12a)$$

และสำหรับเอลีเมนท์จำนวนคู่

$$z'_m = \begin{cases} \dfrac{(2m-1)d}{2} & 1 \le m \le M \\ \dfrac{(2m+1)d}{2} & -M \le m \le -1 \end{cases} \qquad (4.12b)$$

จากค่าตัวประกอบอาร์เรย์ดังกล่าว จะเห็นว่ามีค่าเป็นฟังก์ชัน ที่มีคาบเท่ากับ 2π เรเดียน อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริง จะมีคาบไม่เท่ากับ 2π เรเดียน เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์ ไม่เท่ากับ $\lambda/2$ (เพราะว่า $2kd = 2\pi$ ทำให้ $d = \lambda/2$) ดังนั้นจึงต้องมีการ เพิ่มเติมให้เป็นฟังก์ชันที่มีคาบ เพื่อที่จะได้สังเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงของฟูเรียร์ได้ ถ้าค่าตัวประกอบอาร์เรย์ $AF(\psi)$ เป็นค่าตัวประกอบอาร์เรย์ที่ต้องการแล้ว จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสสัญญาณ ของแต่ละเอลีเมนท์ ได้โดยใช้สูตรการแปลงของฟูเรียร์ ดังนี้

เมื่อจำนวนเอลีเมนท์เป็นเลขคี่ ($N = 2M+1$)

$$a_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} AF(\psi)\exp\{-jm\psi\}\, d\psi \qquad (4.13a)$$

และเมื่อจำนวนเอลีเมนท์เป็นเลขคู่ ($N = 2M$)

$$a_m = \begin{cases} \dfrac{1}{2\pi} \displaystyle\int_0^{2\pi} AF(\psi)\exp\{-j[2m+1]\psi\}\, d\psi \\ \dfrac{1}{2\pi} \displaystyle\int_0^{2\pi} AF(\psi)\exp\{-j[2m-1]\psi\}\, d\psi \end{cases} \qquad (4.13b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด
(PIN Diode Phase Shifter)

5-1 กล่าวนำ

วงจรเลื่อนเฟสนั้นมีส่วนสำคัญมาก ในการปรับการกวาดบีมหลักของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ดังได้กล่าวไว้แล้ว ในบทต้นๆ โดยจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเฟสของกระแส ที่ป้อนให้แต่ละเอลีเมนท์ของสายอากาศอาร์เรย์เพื่อทำให้คลื่นที่กระจายออกจากสายอากาศ มีการเสริมกันในทิศทางที่ต้องการให้สนามมีค่าสูง และหักล้างกันในทิศทางที่ต้องการให้สนามมีค่าต่ำ วงจรเลื่อนเฟสทั่วไปที่มีการใช้กันอยู่ มักจะเป็นวงจรเลื่อนเฟสที่ใช้สารเฟอร์ไรท์ (Ferrite Phase Shifter) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้กับย่านความถี่ไมโครเวฟ จนกระทั่งประมาณปี ค.ศ.1960 ได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับวงจรเลื่อนเฟสที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวสวิทชิ่งที่ความถี่สูง ได้แก่ตัวพินไดโอด (PIN Diode) สำหรับข้อดีของการใช้พินไดโอด คือ มีความเร็วในการสวิทชิ่งเพื่อเลื่อนเฟสสูง สามารถสร้างวงจรขับเพื่อป้อนกระแสไบอัสให้แก่วงจรได้ง่าย และมีผลขึ้นกับอุณหภูมิน้อย ดังนั้นหลักการของวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอดก็คือ เป็นการสวิทชิ่งปิดเปิดแบบดิจิตอลเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของเฟส ที่เป็นมุมเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Phase reflection coefficient) ในสองสถานะของการไบอัสให้แก่พินไดโอด ตามสมการ ต่อไปนี้

$$\Delta\phi = \arg \Gamma_F - \arg \Gamma_R \qquad (5.1)$$

โดยที่ $\Delta\phi$: เป็นความแตกต่างของเฟส หรือมุมเฟสที่เปลี่ยนไป (Phase shift)

และ $\arg \Gamma_F, \arg \Gamma_R$: เป็นมุมเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพินไดโอด ในสถานะการไบอัสไปข้างหน้า และย้อนกลับ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการควบคุมการสวิทชิ่ง เพื่อเลื่อนเฟสนี้ สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้จะทำให้ได้การเลื่อนเฟสที่มีผลต่อการกวาดบีมของสายอากาศมีความเร็วสูงมาก โดยอาจจะใช้เวลาน้อยกว่า 1 ไมโครวินาทีต่อการกวาดบีมของสายอากาศ 1 รอบ

วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอดนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

ก) แบบส่งผ่าน (Transmission Type) มี 2 ชนิด ดังนี้ คือ

- แบบสวิทช์ไลน์ทรานส์มิชชัน (Switched Line Transmission Type)
- แบบโหลดไลน์ทรานส์มิชชัน (Loaded Line Transmission Type)

ข) แบบสะท้อน (Reflection Type) เป็นแบบใช้วงจรไฮบริดคัปเปลอร์รีเฟลคชัน (Hybrid Coupler Reflection Type)

ในที่นี้ได้แสดงรูปลักษณะ ของวงจรเลื่อนเฟสแบบต่างๆ ดังกล่าวไว้ในรูปที่ 5.1

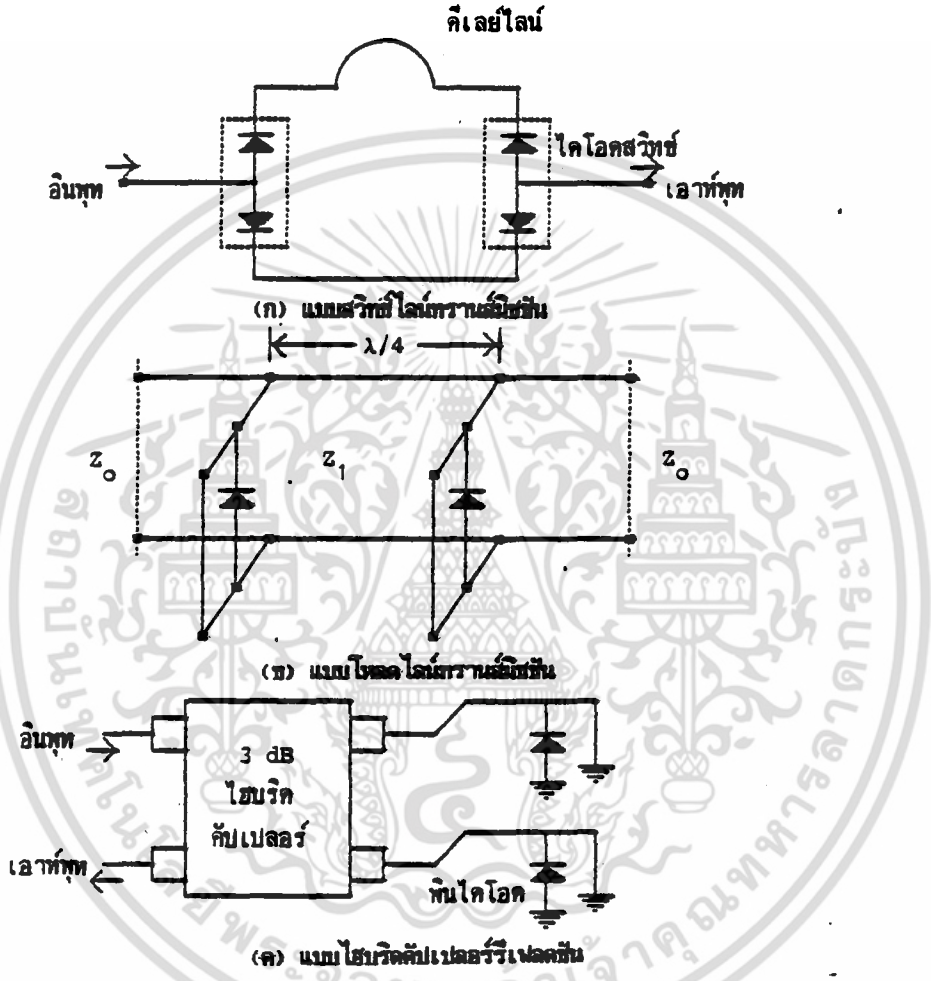
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาค้นคว้า และทดลองสร้างวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด ที่ความถี่ ย่านยูเอ็ชเอ็ฟ 915 MHz เป็นแบบสะท้อน ซึ่งจะใช้วงจรไฮบริดคัปเปลอร์ ชนิดบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ (Branch line hybrid coupler) เหตุผลที่เลือกศึกษาและทดลองวงจรแบบนี้ ก็เนื่องจากว่าเป็นแบบที่ใช้พินไดโอดต่อหนึ่งวงจรจำนวนน้อยที่สุด และมีคุณสมบัติเป็นแบบที่ใช้งานได้ทั้งสองทิศทาง (Reciprocal)

5-2 วงจรสมมูลย์ของพินไดโอด

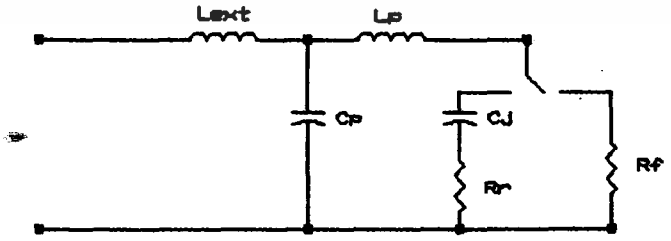
เนื่องจากพินไดโอดเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการเลื่อนเฟส ของวงจรเลื่อนเฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงคุณสมบัติของพินไดโอดไว้พอสังเขป ดังนี้คือ ตัวพินไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ที่มีการโด๊ปชั้นพีกับชั้นเอ็นไว้หนามาก และมีชั้นของสารบริสุทธิ์ ที่มีความต้านทานสูง คั่นไว้ระหว่างกลาง เรียกชั้นนี้ว่าชั้นไอ (i region) ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า ความถี่ที่ออกแบบใช้งาน พินไดโอดจะทำหน้าที่เป็นเร็คติไฟร์ไดโอด แต่เมื่อนำไปใช้งานที่ย่านความถี่สูงค่าหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นสวิทชิ่งไดโอด เนื่องใช้ปิดเปิดวงจรที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 เป็นการแสดงลักษณะและวงจรสมมูลย์ของพินไดโอด โดยแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ในสถานะการไบอัสไปข้างหน้าและย้อนกลับด้วย [11]



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะและวงจรสมมูลย์ของพินไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_F^{D'} = R_F^{D'} + jX_F^{D'} = \frac{R_F}{(1-\omega^2 L_p C_p)^2} + j\left(\omega L_{ext} + \frac{\omega L_p}{1-\omega^2 L_p C_p}\right) \qquad (5.2)$$

$$Z_R^{D'} = R_R^{D'} + jX_R^{D'} = \frac{R_R}{[1-\omega C_p(\omega L_p - 1/\omega C_j)]^2} + j\left(\omega L_{ext} + \frac{(\omega L_p - 1/\omega C_j)}{1-\omega C_p(\omega L_p - 1/\omega C_j)}\right) \qquad (5.3)$$

จากสมการที่ (5.2) และ (5.3) สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ ของวงจรสมมูลย์ ได้ดังนี้ คือ

$$L_{ext} = \frac{X_F^{D'}}{\omega} - \frac{L_p}{(1-\omega^2 L_p C_p)} \qquad (5.4)$$

$$R_F = R_F^{D'}(1-\omega^2 L_p C_p)^2 \qquad (5.5)$$

$$C_j = \frac{1+\omega C_p(X_R^{D'} - \omega L_{ext})}{\omega[(\omega L_{ext} - X_R)(1-\omega^2 L_p C_p) + \omega L_p]} \qquad (5.6)$$

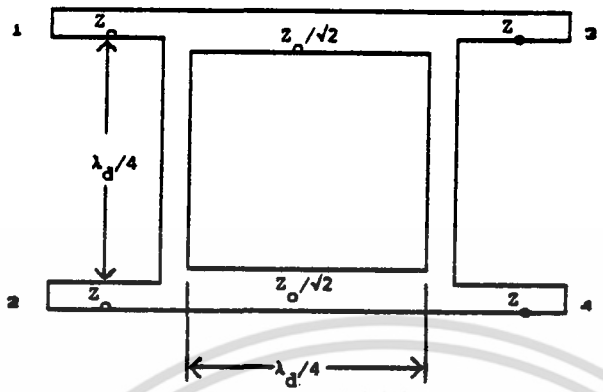
$$R_R = R_R^{D'}\left[1-\omega C_p\left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_j}\right)\right]^2 \qquad (5.7)$$

5-3 วงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์

การออกแบบสร้างวงจรเลื่อนเฟส โดยใช้พินไดโอด แบ่งส่วนสำคัญออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรไฮบริดคัปเปลอร์ และส่วนของวงจรแมทชิ่ง ซึ่งในหัวข้อนี้ จะได้กล่าวถึงเฉพาะส่วนแรกก่อน สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้วงจรเป็นแบบบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ ที่มีโครงสร้างเป็นไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยขนาดความกว้างของวงจร คำนวณได้จากค่าคาร์แรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ตามความสัมพันธ์ จากสมการต่อไปนี้ [8] คือ

$$\frac{W}{h} = \frac{8}{A}\sqrt{\frac{A}{11}\left(7+\frac{4}{\epsilon_r}\right)+\frac{1}{0.81}\left(1+\frac{1}{\epsilon_r}\right)} \qquad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่ 5.3</u> แสดงโครงสร้างของบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์

โดยที่ W เป็นความกว้างของไมโครสตริปไลน์

h เป็นความหนาของสารรองรับ (Substrate)

และ $$A = \exp\left[\frac{Z_o}{42.4}\sqrt{\epsilon_r+1}\right] - 1 \qquad (5.9)$$

ส่วน ϵ_r เป็นค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือ ค่าคงที่ของไดอิเลคตริค (Dielectric Constant)

สำหรับความยาวของวงจร กำหนดได้จากความยาว 1/4 ของความยาวคลื่น λ_d ซึ่งเดินทางในสารรองรับ ที่เป็นสารไดอิเลคตริค นั่นคือ

$$\lambda_d = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \qquad (5.10)$$

โดยที่ λ_d คือความยาวคลื่นในสารไดอิเลคตริค

λ_o คือความยาวคลื่นในฟรีสเปซ (Free Space)

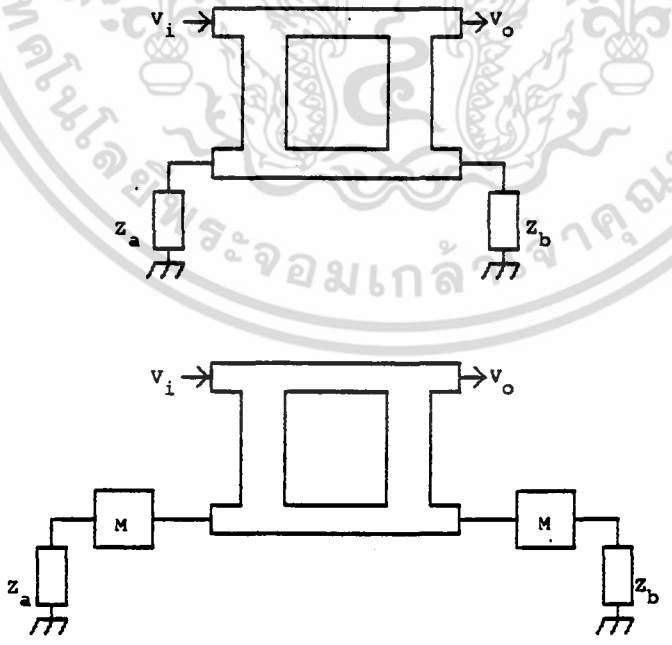
และ ϵ_{eff} คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ประสิทธิผล (Effective Permittivity) คำนวณได้จากสมการที่ (5.11)

$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r+1)}{2} + \frac{(\epsilon_r-1)}{2}\left[1+\frac{12h}{W}\right]^{-1/2} \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{W}{h} \geq 1 \qquad (5.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5-4 วงจรแมทชิ่งแบบทรานส์มิชชันไลน์ทรานส์ฟอร์มเมอร์

การต่อพินไดโอด กับวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ ตามปกติไม่สามารถที่จะต่อเข้ากันได้โดยตรง เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่แมทช์กันจำเป็นจะต้องมีวงจรแมทชิ่ง เพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ของไฮบริดคัปเปลอร์ ให้แมทช์กับค่าอิมพีแดนซ์ของพินไดโอด และเนื่องจากการเลื่อนเฟสของวงจร เกิดจากการเปลี่ยนไปของอิมพีแดนซ์ของพินไดโอดในสองสถานะ คือสถานะไปข้างหน้าและสถานะย้อนกลับ หรือสถานะปิดและเปิดวงจรของพินไดโอดตามสมการที่ (5.1) เพราะฉะนั้นในการสร้างวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด ให้สามารถควบคุมให้เกิดความแตกต่างของเฟสของสัญญาณ ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้นั้นจะต้องออกแบบวงจรแมทชิ่งให้มีขนาด (Magnitude) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าคงที่ เพื่อทำการแมทช์ค่าอิมพีแดนซ์ของพินไดโอด กับค่าอิมพีแดนซ์ของบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ หัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง หลักการสร้างวงจรดังกล่าว ลักษณะของการต่อวงจรแมทชิ่ง เข้ากับวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์และพินไดโอด มีดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงการแมทชิ่งของวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

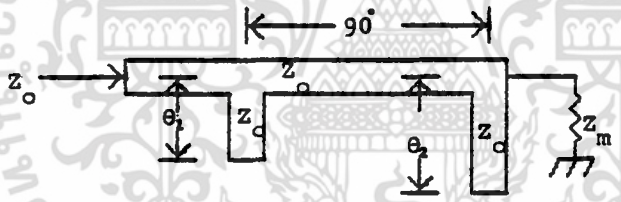
สำหรับวงจรแมทชิ่งในที่นี้ เป็นวงจรไมโครสตริปไลน์ เช่นเดียวกับวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีแบบที่ใช้กันอยู่ 3 ชนิด [12] คือ

(ก) แบบควอเตอร์เวฟเลงช์ดับเบิลสตับทรานส์ฟอร์มเมอร์
(Quarter-Wavelength Double-Stub Transformer)

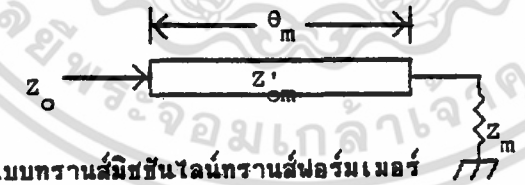
(ข) แบบทรานส์มิชชันไลน์ทรานส์ฟอร์มเมอร์
(Transmission Line Transformer)

(ค) แบบแทนเดม $\frac{3}{8}$ เวฟเลงช์เน็ทเวิร์ค
(Tandem $\frac{3}{8}$ Wavelength Network)

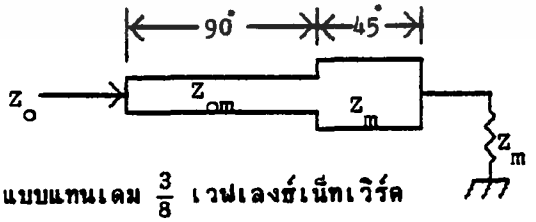
ซึ่งลักษณะโครงสร้าง ของแต่ละชนิด มีดังแสดงในรูปที่ 5.5



(ก) แบบควอเตอร์เวฟเลงช์ดับเบิลสตับทรานส์ฟอร์มเมอร์



(ข) แบบทรานส์มิชชันไลน์ทรานส์ฟอร์มเมอร์



(ค) แบบแทนเดม $\frac{3}{8}$ เวฟเลงช์เน็ทเวิร์ค

รูปที่ 5.5 แสดงโครงสร้างของวงจรแมทชิ่งแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้วงจรแมทชิ่ง ตามรูป 5.5(ข) แบบทรานส์มิชชันไลน์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ เนื่องจากมีโครงสร้างง่ายที่สุด ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแมทชิ่ง แบบดังกล่าวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ตามสมการต่อไปนี้

$$Z'_{om} = \sqrt{\frac{Z_o(R_m Z_o - R_m^2 - X_m^2)}{(Z_o - R_m)}} \qquad (5.12)$$

และ $$\theta_m = \tan^{-1}\sqrt{\frac{(Z_o - R_m)(R_m Z_o - R_m^2 - X_m^2)}{Z_o X_m^2}} \qquad (5.13)$$

โดยในที่นี้ Z_o คือค่าคาร์แรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ของไฮบริดคัปเปลอร์

Z'_{om} คือค่าคาร์แรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ของวงจรแมทชิ่ง

และ θ_m คือความยาวทางไฟฟ้า (Electrical Length) ของวงจรแมทชิ่ง

สำหรับค่า Z_m ในสมการที่ (5.12) และ (5.13) เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรแมทชิ่ง ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ คือ

$$Z_m = R_m + jX_m \qquad (5.14)$$

โดยในที่นี้ $$R_m = \frac{Q}{2}\left[1 \pm 1 + \frac{4P}{Q^2}\right] \qquad (5.15\text{-ก})$$

$$X_m = UR_m + V \qquad (5.15\text{-ข})$$

โดยที่ $$P = \frac{(E + MV - V^2)}{(1+U^2)} \qquad (5.16\text{-ก})$$

$$Q = \frac{(KN - UM + 2UV)}{(1+U^2)} \qquad (5.16\text{-ข})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = \frac{K(R_1-R_2)}{(R_1+R_2)} \qquad (5.16\text{-ค})$$

$$V = \frac{(R_1X_2+X_1R_2)}{(R_1+R_2)} \qquad (5.16\text{-ง})$$

และ

$$E = (R_1R_2-X_1X_2) \qquad (5.17\text{-ก})$$

$$M = (X_1+X_2) \qquad (5.17\text{-ข})$$

$$N = (X_1-X_2) \qquad (5.17\text{-ค})$$

$$K = \cot(\frac{\phi}{2}) \qquad (5.17\text{-ง})$$

โดยค่า $Z_1 = R_1 + jX_1$ และ $Z_2 = R_2 + jX_2$ คือค่าอิมพีแดนซ์ของพินไดโอดในสถานะปิด (OFF) และเปิด (ON) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ส่วนป้อนกระแสสัญญาณให้สายอากาศอาร์เรย์

6-1 กล่าวนำ

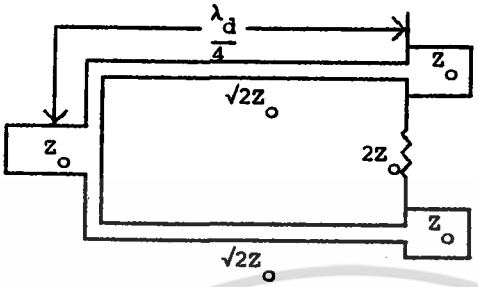
บทนี้จะกล่าวถึงส่วนสุดท้าย ในการออกแบบและสร้างสายอากาศเฟสอาร์เรย์ โดยแบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรแบ่งแยกกำลัง (Power Divider) และส่วนของวงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator) โดยวงจรแบ่งแยกกำลัง จะทำหน้าที่แบ่งกำลังงานของคลื่นให้ออกเท่ากัน โดยค่าอิมพีแดนซ์นั้นจะต้องแมทช์กัน ทั้งอินพุทและเอาท์พุทด้วย และส่วนวงจรลดทอนสัญญาณ จะทำหน้าที่เป็นตัวลดขนาดของกระแสสัญญาณ ที่ป้อนให้แก่สายอากาศแต่ละเอลีเมนท์เพื่อให้มีขนาดของกระแสตามที่ได้คำนวณ สำหรับการสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น ตามที่ได้อธิบายไว้ ในบทที่ 4 ส่วนของรายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

6-2 วงจรแบ่งแยกกำลัง (Power Divider)

ในส่วนของวงจรแยกกำลัง ที่รู้จักกันดีได้แก่วงจรแบ่งแยกกำลังของวิลคินสัน (Wilkinson)[13] ซึ่งมีช่วงความถี่ที่ใช้งานได้กว้าง และมีคุณสมบัติของเฟสเท่ากัน ในแต่ละพอร์ทของเอาท์พุท ลักษณะโครงสร้างของวงจรแบ่งแยกกำลังแบบสองเอาท์พุทมีดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งเป็นแบบที่มีเฟสเดียวกันและมีเอาท์พุทขนาดเท่ากัน จากรูปจะเห็นเป็นลักษณะของไมโครสตริปไลน์ มีค่าคาร์แรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 50 โอห์ม (Z_o) ที่พอร์ทอินพุทและเอาท์พุทเท่ากัน ส่วนในควอเตอร์เวฟไลน์ (Quarter-wave Line) มีค่าคาร์แรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 70.7 โอห์ม ($\sqrt{2}Z_o$) และมีความต้านทานไอโซเลท (Isolate Resistor) ค่าเท่ากับ 100 โอห์ม ($2Z_o$) เทอมิเนต (Terminate) ระหว่างเอาท์พุทของวงจรแบ่งแยกกำลังด้วย

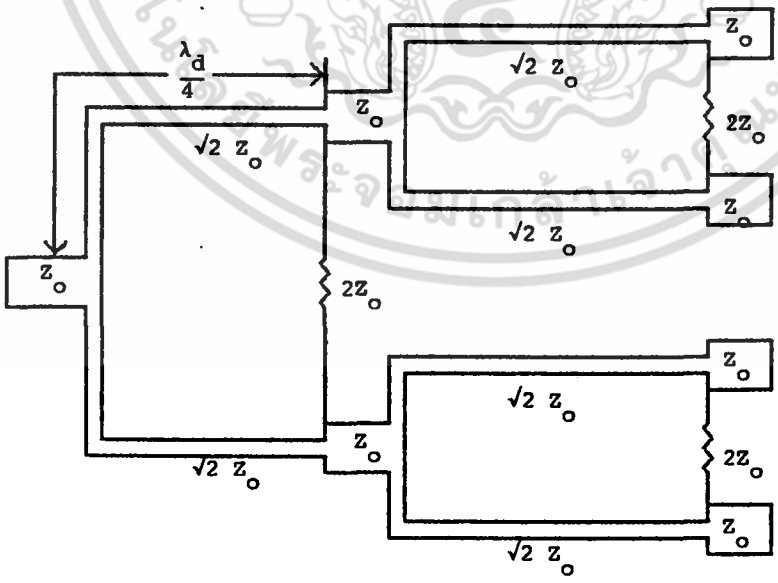
การคำนวณหาความกว้างของวงจรแบ่งแยกกำลัง จะใช้สมการที่ (5.8)-(5.9) และการคำนวณความยาวของวงจรก็ใช้ความยาวคลื่นที่เดินทางในสารรองรับ λ_d ตามสมการที่ (5.10)-(5.11) เช่นเดียวกันกับการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของวงจรแบ่งแยกกำลัง

ความกว้างและความยาวของวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ ในบทที่ 5 และสำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ต้องใช้วงจรแบ่งแยกกำลังเพื่อป้อนกระแส สัญญาณให้แก่สายอากาศอาร์เรย์ 4 เอลีเมนท์ ในแนวเอลีเวชัน และ 8 เอลีเมนท์ในแนวอะซิมุธซึ่งมีเอาท์พุทมากกว่า 2 ทาง เราก็ยังคงใช้หลักการของวิลคินสันได้ โดยเพิ่มจำนวนวงจรแบ่งแยกกำลังให้มากขึ้นเป็นสองส่วนหรือสามส่วน ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลังแบบ 4 เอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6-3 วงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator)

วงจรลดทอนสัญญาณ โดยปกติมีอยู่หลายชนิด ในที่นี้ได้เลือกใช้วงจรที่ทำขึ้นจากความต้านทานเท่านั้น ซึ่งมีวงจรพื้นฐานอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบพาย-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ (Pi-Network Resistive) และแบบที-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ (T-Network Resistive) ดังแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.3

(ก) แบบพาย-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ (ข) แบบที-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ

Pi-Network Resistive T-Network Resistive

รูปที่ 6.3 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณ

วิธีการคำนวณค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ของวงจรลดทอนสัญญาณทั้งสองแบบ มีดังนี้ คือ

แบบพาย-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ

$$R_1 = \frac{10^{\alpha/20}+1}{10^{\alpha/20}-1} Z_o \qquad (6.1)$$

$$R_2 = \frac{2Z_o{}^2 R_1}{R_1{}^2-Z_o{}^2} \qquad (6.2)$$

โดยที่ค่า Z_o เป็นค่าความต้านทานของคาร์แรคเตอร์ริสติคอิมพีแดนซ์ ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

และ α เป็นค่าการลดทอนสัญญาณ มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>แบบที-เน็ทเวิร์คซีรีสทีพ</u>

$$R_1 = \frac{10^{\alpha/20}-1}{10^{\alpha/20}+1} Z_o \qquad (6.3)$$

$$R_2 = \frac{Z_o^2-R_1^2}{2R_1} \qquad (6.4)$$

โดยที่ค่า Z_o และ α เป็นค่าเดียวกันกับแบบพาย-เน็ทเวิร์คซีรีสทีพ

จากสมการที่ (6.1)-(6.2) จะเห็นว่าค่า R_1 ลดลง และ R_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่า α มีค่าเพิ่มขึ้น และในสมการที่ (6.3)-(6.4) ค่า R_1 เพิ่มขึ้น และ R_2 มีค่าลดลง เมื่อค่า α เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า R_1 ทั้งสองแบบจะมีค่าจำกัดอยู่ คือในแบบพาย-เน็ทเวิร์คซีรีสทีพ R_1 จะลดลงจนเท่ากับ 50 โอห์ม และในแบบที-เน็ทเวิร์คซีรีสทีพ R_1 จะเพิ่มขึ้นได้ไม่เกินค่า 50 โอห์ม เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

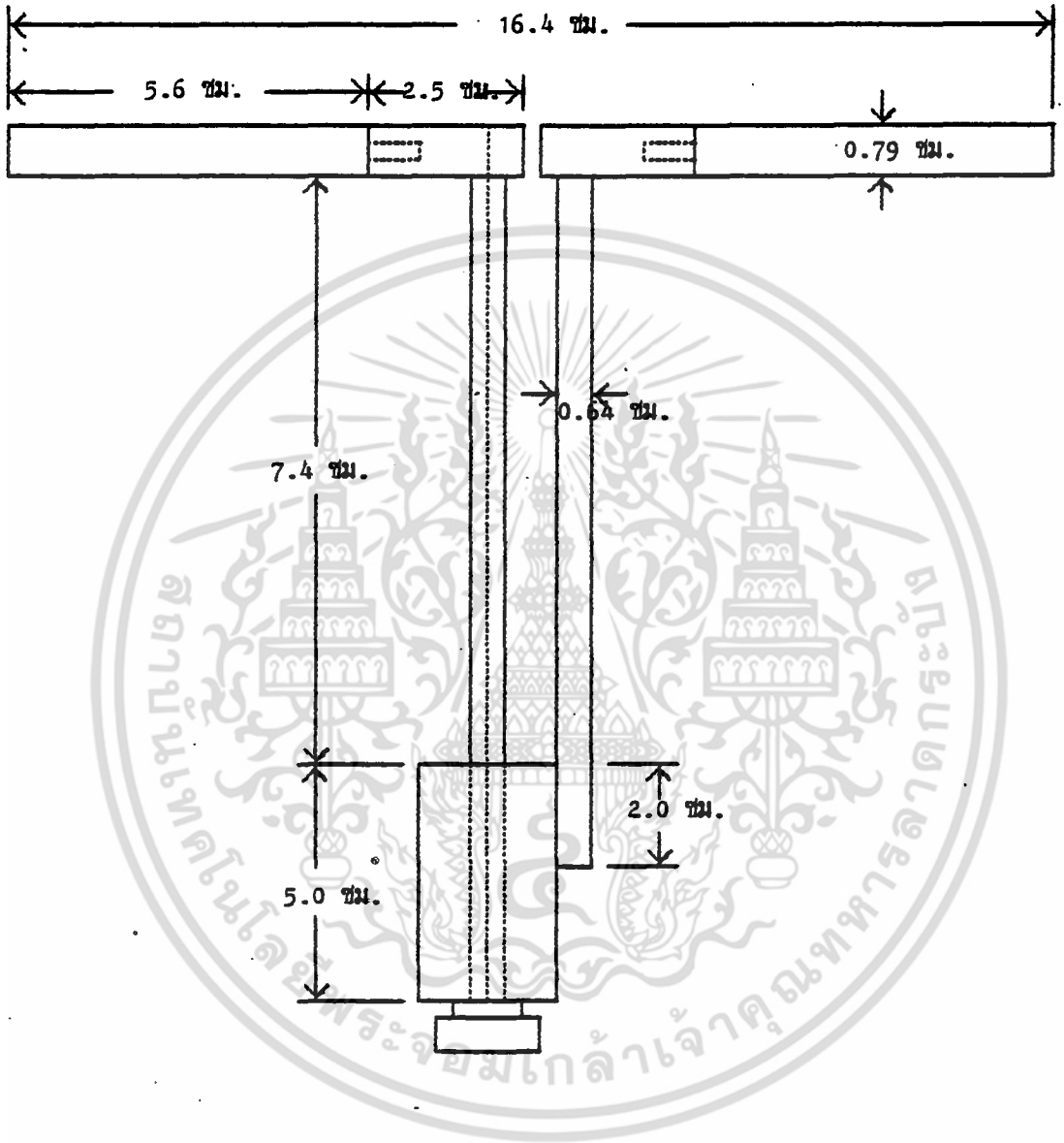
บทที่ 7
การคำนวณและออกแบบสร้าง

7-1 การคำนวณและออกแบบสายอากาศไดโพลอาร์เรย์

แบบระนาบเหนือบนกราวนด์เพลน

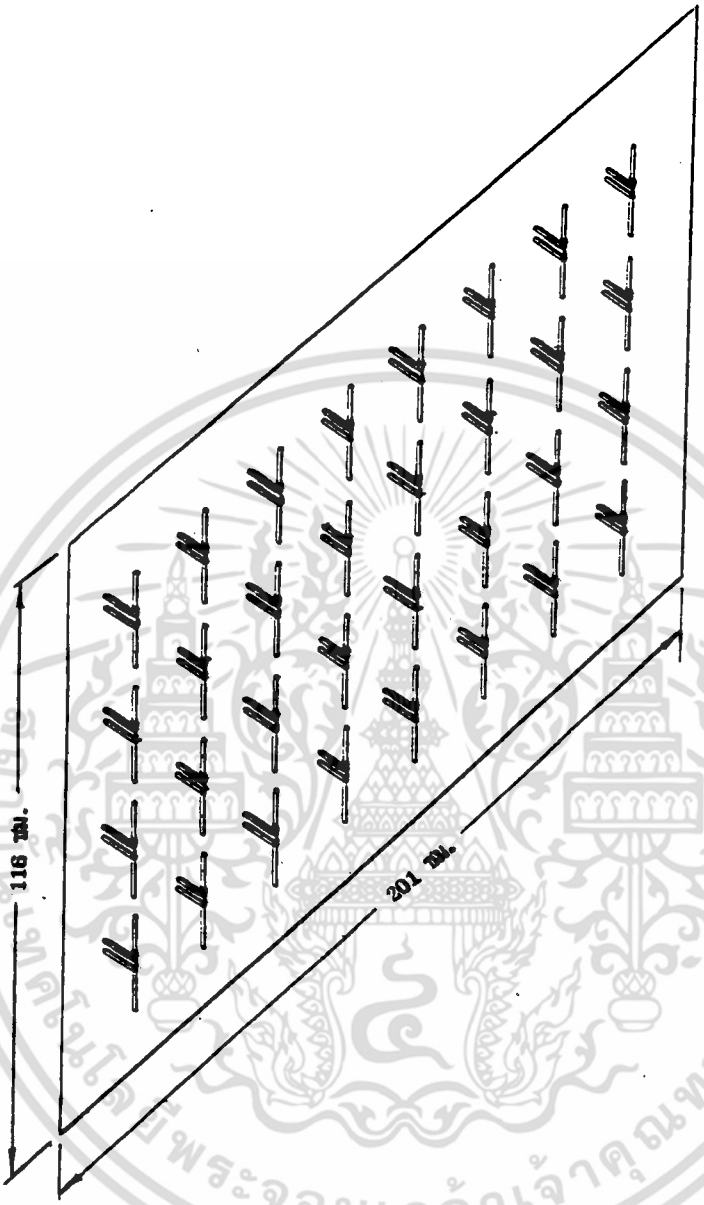
สำหรับในหัวข้อนี้จะแสดงการคำนวณและออกแบบ สายอากาศไดโพลอาร์เรย์แบบระนาบเหนือบนกราวนด์เพลน ก่อนอื่นจะได้กล่าวถึงการคำนวณขนาดของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียวก่อน ตามที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ว่า เราได้กำหนดให้ความถี่ที่ใช้ เท่ากับ 915 MHz ดังนั้น ความยาวคลื่น (λ) ที่คำนวณได้จึงเท่ากับ 32.8 ซม. เพราะฉะนั้นขนาดความยาวของไดโพล ควรจะมีความยาวประมาณ 16.4 ซม. และรูปแสดงขนาดของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียว มีดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.1 โดยมีการออกแบบบาลัน (Balun) เป็นแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์ม และเลือกขนาดของท่อให้ใกล้เคียง กับขนาดของสายอากาศกับบาลันที่คำนวณได้ และเพื่อสร้างอาร์เรย์สายอากาศไดโพลขึ้นมา เราจะต้องใช้สายอากาศไดโพลจำนวน 32 เอลีเมนท์ จากนั้นก็นำสายอากาศไดโพลทั้งหมดมาติดไว้บนแผ่นอลูมิเนียม ที่ใช้เป็นกราวนด์เพลน โดยมีระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์คงที่เท่ากัน ระยะจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศแต่ละตัว มีระยะห่างเท่ากับ 0.7λ เพราะว่าถ้าเลือกให้ระยะห่างน้อยกว่านี้ ก็จะทำให้สายอากาศอยู่ชิดกันมาก และเกิดมิวช่วลคัปปลิ้งได้มากกว่า แต่ถ้าเลือกให้ระยะห่างมากกว่านี้ คือมากกว่า λ จะทำให้เกิดเกรทติ้งโหลบ (Grating Lobe) สูงมาก และทำให้ขนาดของระนาบกราวนด์เพลนใหญ่ขึ้นมากด้วย สำหรับโครงสร้างแสดงการวางเอลีเมนท์ของไดโพลอาร์เรย์ แสดงไว้ในรูปที่ 7.2 ซึ่งมีจำนวน 4 แถว 8 คอลัมน์ ความกว้างและความยาวของระนาบกราวนด์เพลนประมาณ 116 ซม. และ 201 ซม. ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1 แสดงขนาดของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 แสดงการวางเอลีเมนท์ของไดโพลอาร์เรย์
เหนือบนระนาบกราวนด์เพลน

7-2 การคำนวณและออกแบบสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น

7-2-1 การสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ

โดยวิธีการใช้เชบบีเชฟโพลีโนเมียล ตามหัวข้อ 4-2 ความต้องการของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ต้องการสังเคราะห์ให้รูปแบบการกระจายคลื่นมีบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ ในระนาบอะซิมุธ ซึ่งมีเอลีเมนท์ของสายอากาศอยู่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอลีเมนท์ ดังนั้นจำนวนเอลีเมนท์ของอาร์เรย์ที่ใช้คำนวณ ในที่นี้เท่ากับ 8 เอลีเมนท์ กล่าวคือค่า M ตามสมการที่ (2.1) มีค่าเท่ากับ 4 ระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์ d = 0.7λ และ กำหนดให้มีค่าระดับของไซด์โหลบ เมื่อเทียบกับค่าสูงสุดของเมนโหลบ เท่ากับ 20 dB โดยอาศัยขั้นตอนการออกแบบตามหัวข้อที่ 4-2-1 จะได้ว่า

1. ค่าตัวประกอบอาร์เรย์ที่เหมาะสม ตามสมการ (2.1) เท่ากับ

$$(AF)_s = \sum_{n=1}^{4} a_n \cos[(2n-1)u] \qquad (7.1)$$

โดยที่ $$u = \frac{\pi d}{\lambda}\cos\theta = 0.7\pi\cos\theta \qquad (7.2)$$

2. เมื่อกระจายค่าตัวประกอบอาร์เรย์ จะได้

$$(AF)_s = a_1\cos(u) + a_2\cos(3u) + a_3\cos(5u) + a_4\cos(7u) \qquad (7.3)$$

3. ทำการหาจุด $z = z_o$ ที่ทำให้ $T_m(z_o) = R_o$

จากข้อกำหนด เราได้ให้ SLL = 20 dB $= R_o$

ดังนั้น จะได้ว่า R_o = 10 เท่า โดยอาศัยสมการ (4.4) เราจะได้

$$T_7(z_o) = \cosh[7\cosh^{-1}(z_o)] = R_o \qquad (7.4)$$

เพราะฉะนั้น

$$z_o = \cosh[\tfrac{1}{7}\cosh^{-1}(10)] = 1.0928 \qquad (7.5)$$

ซึ่งค่า z_o นี้อาจจะใช้สมการ ที่ (7.6) คำนวณแทนได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$z_o = \frac{1}{2}\left[(R_o+\sqrt{R_o^2-1})^{1/p}+(R_o-\sqrt{R_o^2-1})^{1/p} \right] \qquad (7.6)$$

โดยในที่นี้ p คือ จำนวนเต็ม ที่มีค่าน้อยกว่าจำนวนเอลีเมนท์ของอาร์เรย์อยู่ 1

$$z_o = \frac{1}{2}\left[(10+\sqrt{100-1})^{1/7}+(10-\sqrt{100-1})^{1/7} \right] = 1.0928 \qquad (7.7)$$

ดังนั้น จะได้ว่า $\cos(u) = \frac{z}{z_o} = \frac{z}{1.0928}$ (7.8)

4. แทนค่าฟังก์ชันของ cos(mu) ในขั้นตอนที่ 2 และแทนค่า $\cos(u) = \frac{z}{1.0928}$ แล้วจะได้ค่าตัวประกอบอาร์เรย์เท่ากับ

$$(AF)_8 = a_1(\frac{z}{z_o}) + a_2(\frac{4z^3}{z_o^3} - \frac{3z}{z_o})$$

$$+ a_3(\frac{16z^5}{z_o^5} - \frac{20z^3}{z_o^3} + \frac{5z}{z_o}) + a_4(\frac{64z^7}{z_o^7} - \frac{112z^5}{z_o^5} + \frac{56z^3}{z_o^3} - \frac{7z}{z_o})$$

$$= \frac{z}{z_o}(a_1 - 3a_2 + 5a_3 - 7a_4) + \frac{z^3}{z_o^3}(4a_2 - 20a_3 + 56a_4)$$

$$+ \frac{z^5}{z_o^5}(16a_3 - 112a_4) + \frac{z^7}{z_o^7}(64a_4) \qquad (7.9)$$

5. โดยการจัดรูปสมการระหว่างตัวประกอบอาร์เรย์ กับค่า $T_7(z)$ แล้วเทียบสัมประสิทธิ์หาค่า a_n (n = 1 ถึง 4) จะได้ค่าแต่ละค่า ดังนี้ คือ

$$a_1 = 3.2025 \qquad a_2 = 2.8074$$
$$a_3 = 2.1187 \qquad a_4 = 1.8612 \qquad (7.10)$$

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ค่า a_n ที่คำนวณได้โดยค่า 3.2025 แล้วจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_1 = 1.0000 \qquad a_2 = 0.8766$$
$$a_3 = 0.6616 \qquad a_4 = 0.5812 \qquad (7.11)$$

6. ทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ ลงในสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบอาร์เรย์ จะได้

$$(AF)_8 = \cos(u)+0.8766\cos(3u)+0.6616\cos(5u)+0.5812\cos(7u) \qquad (7.12)$$

การคำนวณ ค่าไดเร็คติวิตี้และบีมวิดธ์ ของสายอากาศแบบเชบบีเชพอาร์เรย์นี้ทำได้ โดยก่อนอื่น จะต้องคำนวณหาค่า บีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ จากสมการที่ (4.6) ดังนี้

$$f = 1 + 0.636\left\{\frac{2}{10}\cosh\left[\sqrt{(\cosh^{-1}(10))^2-\pi^2}\right]\right\} \qquad (7.13)$$
$$f = 1 + 0.896 = 1.1896$$

ค่าบีมวิดธ์สามารถหาได้ จากสมการที่ (4.7) เมื่อคูณกับค่าบีมบรอดเดนนิ่งแฟคเตอร์ นั่นคือ

$$\theta_h = \cos^{-1}\left[\frac{-0.443\lambda}{(4.9\lambda+0.7\lambda)}\right] - \cos^{-1}\left[\frac{+0.443\lambda}{(4.9\lambda+0.7\lambda)}\right]$$

$$\theta_h = 94.54^\circ - 85.46^\circ = 9.08^\circ$$

$$\text{Beamwidth} = f.\theta_h = 1.1896 \times 9.08^\circ = 10.08^\circ \qquad (7.14)$$

และค่าไดเร็คติวิตี้ ของเชบบีเชพอาร์เรย์ เมื่อคำนวณจากสมการที่ (4.8) สามารถหาได้ ดังนี้

$$D_o = \frac{2\times100}{1+(100-1)1.1896\ \lambda/(4.9\lambda+0.7\lambda)} = 9.08 \text{ เท่า} = 9.58 \text{ dB} \qquad (7.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7-2-2 การสังเคราะห์เชคเตอร์แพทเทิร์น

ในระนาบเอลีเวชัน ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ แต่ละคอลัมน์มีเอลีเมนท์ของไดโพลอยู่ 4 เอลีเมนท์ ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ จะสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นเป็นแบบเชคเตอร์แพทเทิร์น ตามวิธีการในหัวข้อที่ 4-3 อาศัยสมการที่ (4.10) เมื่อจำนวนเอลีเมนท์เป็นเลขคู่ (N = 4 = 2M => M = 2) จะได้ค่าตัวประกอบอาร์เรย์เป็น

$$AF(\psi) = \sum_{m=-2}^{-1} a_m \exp\{j[\frac{(2m+1)}{2}]\psi\} + \sum_{m=1}^{2} a_m \exp\{j[\frac{(2m-1)}{2}]\psi\} \quad . \qquad (7.16)$$

โดยที่ $$\psi = 1.4\pi \cos\theta + \beta \qquad (7.17)$$

ในที่นี้จุดมุ่งหมายที่ต้องการหา คือ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสสัญญาณ a_m เพื่อสังเคราะห์แพทเทิร์นเป็นแบบเชคเตอร์แพทเทิร์น โดยอาศัยสมการที่ (4.13b) เมื่อเอลีเมนท์เป็นจำนวนคู่ นั่นคือ

$$a_m = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{-1.4\pi}{\sqrt{2}}}^{\frac{1.4\pi}{\sqrt{2}}} \exp\{-j[\frac{2m+1}{2}]\}\, d\psi \\ \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{-1.4\pi}{\sqrt{2}}}^{\frac{1.4\pi}{\sqrt{2}}} \exp\{-j[\frac{2m-1}{2}]\}\, d\psi \end{cases} \qquad (7.18)$$

จะได้ว่า

$$a_m = \begin{cases} \frac{1.4}{\sqrt{2}} \; \frac{\sin[((2m+1)/2)1.4\pi/\sqrt{2}]}{(2m+1/2)1.4\pi/\sqrt{2}} \\ \frac{1.4}{\sqrt{2}} \; \frac{\sin[((2m-1)/2)1.4\pi/\sqrt{2}]}{(2m-1/2)1.4\pi/\sqrt{2}} \end{cases} \qquad (7.19)$$

เมื่อแทนค่า m ตามตำแหน่งต่างๆ ในสมการที่ (7.19) จะได้ค่า a_m ตามตารางที่ 7.1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m	z_m	a_m	a_m (นอร์มอลไลซ์)
-2	-1.05λ	-0.21197	-0.3330
-1	-0.35λ	0.6365	1.0000
+1	$+0.35\lambda$	0.6365	1.0000
+2	$+1.05\lambda$	-0.21197	-0.3330

ตารางที่ 7.1 แสดงสัมประสิทธิ์การป้อนกระแสสัญญาณของเซคเตอร์แพทเทิร์น

7-3 การคำนวณและออกแบบวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด

สำหรับหัวข้อนี้ เป็นการออกแบบวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด ซึ่งได้อธิบายหลักการไว้แล้วในบทที่ 5 ส่วนที่ต้องคำนวณ แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ และส่วนของวงจรแมทชิ่ง โดยที่ทั้งสองส่วนนี้ คำนวณที่ความถี่ที่ต้องการใช้งาน คือ 915 MHz สำหรับสารรองรับ (Substrate) ได้ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอีพ็อกซี่เป็นสารรองรับ มีค่าคงที่ของไดอิเล็คตริค หรือค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ประมาณ 3.151

7-3-1 การคำนวณและออกแบบวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์

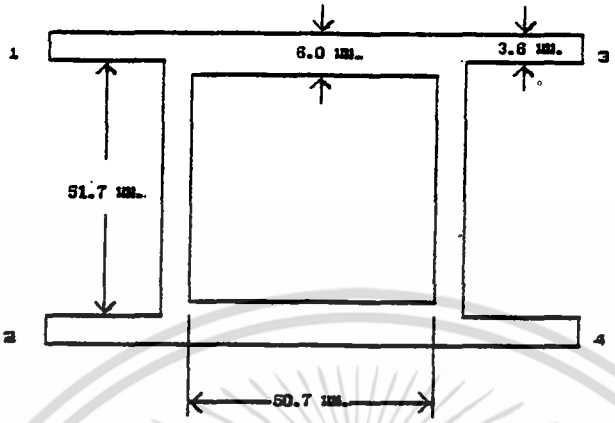
ตามโครงสร้างของรูปที่ 5.3 โดยอาศัยสมการที่ (5.8)-(5.11) จะได้ขนาดของวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้ คือ

(ก) Z_o = 50 โอห์ม มีความกว้างและความยาวเท่ากับ 3.6 มม. และ 51.7 มม. ตามลำดับ

(ข) $Z_o/\sqrt{2}$ = 35.36 โอห์ม มีความกว้างและความยาวเท่ากับ 6.0 มม. และ 50.7 มม. ตามลำดับ

สำหรับผลการคำนวณขนาดของวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ ที่ได้ออกแบบไว้ จะแสดงด้วยรูปที่ 7.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 แสดงขนาดของวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ที่ได้คำนวณออกแบบ

7-3-2 การคำนวณและออกแบบวงจรแมทชิ่ง

ในที่นี้เลือกใช้วงจรแบบทรานส์มิชชันไลน์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ ตามรูปที่ 5.5(ข) โดยหาค่าอิมพีแดนซ์ของพินไดโอดสองสถานะ ซึ่งได้เลือกใช้พินไดโอดเบอร์ 1SV128 ของบริษัทโตชิบา ซึ่งจากการทดลองหาค่าอิมพีแดนซ์ได้ค่า ดังนี้คือ

สถานะปิด (OFF) $Z_1 = 149.07 + j14.51$ โอห์ม

สถานะเปิด (ON) $Z_2 = 31.92 + j8.80$ โอห์ม

แทนค่า Z_1 และ Z_2 ลงในสมการที่ (5.16)-(5.17) เพื่อหาค่า Z_m ในสมการที่ (5.15) เพื่อนำไปคำนวณค่า Z'_{om} และ θ_m ตามสมการที่ (5.12) และ (5.13) ตามลำดับ

จากผลการคำนวณตามขั้นตอนดังกล่าว จะได้ขนาดของวงจรแมทชิ่งที่ใช้กับวงจรเลื่อนเฟส 3 บิท ที่มีความต่างเฟสของแต่ละบิทเท่ากับ 45°, 90° และ 180° ตามลำดับ โดยได้คำนวณที่ความถี่ 915 MHz บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอีพ็อกซี่ เป็นสารรองรับ มีค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ เท่ากับ 3.151 เช่นเดียวกับวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ ซึ่งได้แสดงค่าความกว้างและความยาวของไมโครสตริปไลน์ โดยใช้สมการที่ (5.8)-(5.11) สำหรับการคำนวณไว้ในตารางที่ 7.2

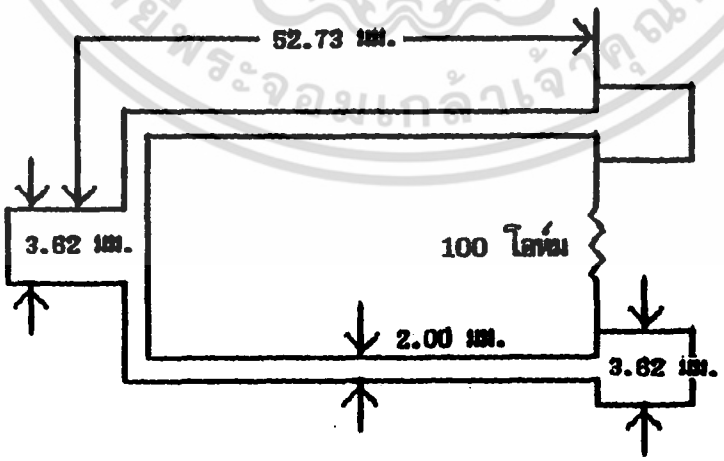
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta\phi$	$Z'_{om}(\Omega)$	θ_m	W(มม.)	L(มม.)
45°	99.15	23.06°	0.98	11.8
90°	82.89	30.85°	1.46	15.8
180°	60.28	67.89°	2.67	34.8

ตารางที่ 7.2 แสดงผลการคำนวณออกแบบวงจรแมทชิ่งของวงจรเลื่อนเฟส

7-4 การคำนวณและออกแบบวงจรแบ่งแยกกำลัง

การออกแบบได้ทำตามหลักการและวิธีการคำนวณออกแบบ ในบทที่ 6 ในที่นี้จะต้อง ออกแบบวงจรแบ่งแยกกำลัง เป็น 2 แบบ คือ แบบ 4 เอาท์พุท ตามรูปที่ 7.4 สำหรับการสังเคราะห์เซคเตอร์แพทเทิร์น ของอาร์เรย์ 4 เอลีเมนท์และแบบ 8 เอาท์พุท สำหรับการสังเคราะห์แพทเทิร์นแบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ ของอาร์เรย์ 8 เอลีเมนท์ โดยจะใช้สมการที่ (5.8)-(5.11) ในการคำนวณขนาดความกว้างและความยาวของวงจรแบ่งแยกกำลัง พร้อมกันนี้ ในรูปที่ 7.4 ได้แสดงผลของการคำนวณดังกล่าวไว้ด้วย



รูปที่ 7.4 แสดงขนาดของวงจรแบ่งแยกกำลังที่ได้คำนวณออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขนาดของ W_1 ต้องการให้มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม มีค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ประมาณ 3.151 ที่ความถี่ 915 MHz และมีความหนา (h) ของแผ่นวงจรพิมพ์อีพ็อกซี่เท่ากับ 1.5 มม.

$$\frac{W_1}{h} = \frac{8}{A}\sqrt{\frac{A}{11}(7+\frac{4}{3.151})+\frac{1}{0.81}(1+\frac{1}{3.151})}$$

โดยที่ $$A = \exp\left\{\frac{50}{42.4}\sqrt{3.151+1}\right\} - 1 = 10.052$$

$$\frac{W_1}{1.5} = \frac{8}{10.052}\sqrt{\frac{10.052}{11}(8.269)+1.626} = 2.412$$

$$W_1 = 3.62 \text{ มม.}$$

แต่สำหรับขนาดของ W_2 ต้องการให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 70.7 โอห์ม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆเช่นเดียวกับส่วนของ W_1 เราสามารถคำนวณหา W_2 ได้ดังนี้ คือ

$$\frac{W_2}{h} = \frac{8}{A}\sqrt{\frac{A}{11}(8.269)+1.626}$$

โดยที่ $$A = \exp\left\{\frac{70.7}{42.4}\sqrt{3.151+1}\right\} - 1 = 28.882$$

$$\frac{W_2}{1.5} = \frac{8}{28.882}\sqrt{\frac{28.882}{11}(8.269)+1.626} = 1.338$$

$$W_2 = 2.00 \text{ มม.}$$

และสำหรับค่าความยาวคลื่น ที่เดินทางในแผ่นวงจรพิมพ์ คำนวณจากสมการที่ (5.10) คือ

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ค่า ϵ_{eff} สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (5.11) คือ

$$\epsilon_{eff} = \frac{3.151+1}{2} + \frac{3.151-1}{2}\left(1+\frac{12}{1.338}\right)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.416$$

เมื่อแทนค่า λ_o และ ϵ_{eff} จะได้ค่า

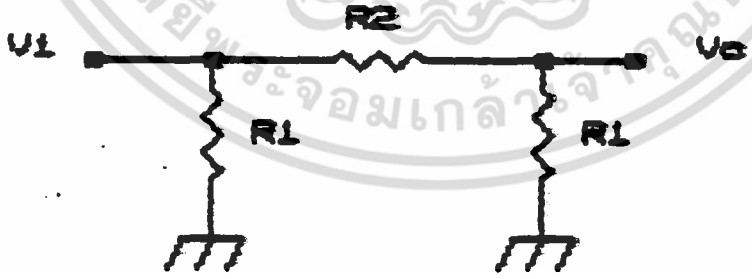
$$\lambda_d = \frac{32.787}{\sqrt{2.416}} = 21.09 \text{ ซม.}$$

เพราะฉะนั้น จะได้ค่าความยาวของวงจรแบ่งแยกกำลัง เท่ากับ

$$\frac{\lambda_d}{4} = \frac{21.09}{4} = 5.273 \text{ ซม.} = 52.73 \text{ มม.}$$

<u>7-5 การคำนวณและออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณ</u>

สำหรับวงจรลดทอนสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้วงจรลดทอนสัญญาณ ตามหัวข้อที่ 6-3 คือแบบพาย-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ ซึ่งได้แสดงให้เห็นอีกครั้ง ด้วยวงจรในรูปที่ 7.5



<u>รูปที่ 7.5</u> แสดงวงจรลดทอนสัญญาณแบบพาย-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ

สำหรับค่า R_1 และ R_2 ในรูปที่ 7.5 สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (6.1)-(6.2) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมีการคำนวณวงจรลดทอนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการสังเคราะห์แบบเชคเตอร์แพทเทิร์น และส่วนของการสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ ดังต่อไปนี้ คือ

- <u>ส่วนการสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ</u>

จากหัวข้อที่ 7-2-1 ได้ค่าสัมประสิทธ์ของการป้อนกระแสสัญญาณ ที่นอร์มอลไรซ์แล้ว ดังนี้ คือ

$a_1 = 1.0000$ $a_2 = 0.8766$

$a_3 = 0.6616$ $a_4 = 0.5812$

เมื่อทำการแปลงค่าเป็นการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์ จะได้ค่าดังตารางที่ 7.3 ต่อไปนี้ คือ

α_n	ค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์(dB)
α_1	0.00
α_2	1.14
α_3	3.59
α_4	4.71

<u>ตารางที่ 7.3</u> แสดงค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์ ของการสังเคราะห์แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ

เมื่อแทนค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์ที่ได้ ลงในสมการที่ (6.1) และ (6.2) จะได้วงจรลดทอนสัญญาณ 3 วงจร โดยส่วนของ α_1 จะไม่มีการลดทอนของสัญญาณ ค่าของความต้านทานต่างๆ ที่คำนวณได้มีดังต่อไปนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่า α_2 = 1.14 dB

$$R_{12} = \left(\frac{10^{1.14/20}+1}{10^{1.14/20}-1}\right)50$$

$$= \left(\frac{2.140}{0.140}\right)50 = 764.29 \text{ โอห์ม}$$

$$R_{22} = \frac{2\times50^2\times764.29}{764.29^2-50^2} = 6.57 \text{ โอห์ม}$$

เมื่อค่า α_3 = 3.59 dB

$$R_{13} = \left(\frac{10^{3.59/20}+1}{10^{3.59/20}-1}\right)50$$

$$= \left(\frac{2.512}{0.512}\right)50 = 245.31 \text{ โอห์ม}$$

$$R_{23} = \frac{2\times50^2\times245.31}{245.31^2-50^2} = 21.27 \text{ โอห์ม}$$

และเมื่อค่า α_4 = 4.71 dB

$$R_{14} = \left(\frac{10^{4.71/20}+1}{10^{4.71/20}-1}\right)50$$

$$= \left(\frac{2.720}{0.720}\right)50 = 188.89 \text{ โอห์ม}$$

$$R_{24} = \frac{2\times50^2\times188.89}{188.89^2-50^2} = 28.47 \text{ โอห์ม}$$

- <u>ส่วนการสังเคราะห์เซคเตอร์แพทเทิร์น</u>

จากหัวข้อที่ 7-2-2 ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การป้อนกระแสสัญญาณ จากตารางที่ 7.1 และเมื่อแปลงค่าเป็นการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์จะได้ค่าดังตารางที่ 7.4 ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α_m	ค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์(dB)
α_{-2}	9.55
α_{-1}	0.00
α_{+1}	0.00
α_{+2}	9.55

ตารางที่ 7.4 แสดงค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์ ของการสังเคราะห์แบบเชคเตอร์แพทเทิร์น

จะเห็นได้ว่า เราจะต้องคำนวณหาส่วนประกอบ วงจรลดทอนสัญญาณเพียง 1 วงจร ทั้งนี้เพราะว่า α_{-1} กับ α_{+1} ไม่มีการลดทอนของสัญญาณ และ α_{-2} กับ α_{+2} มีคุณลักษณะที่เหมือนกัน โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (6.1) และ (6.2) เมื่อค่าการลดทอนสัญญาณสัมพัทธ์เท่ากับ 9.55 dB หาค่า R_1 และ R_2 ได้ดังต่อไปนี้ คือ

$$R_1 = \left(\frac{10^{9.55/20}+1}{10^{9.55/20}-1}\right)50$$

$$= \left(\frac{4.003}{2.003}\right)50 = 99.93 \text{ โอห์ม}$$

$$R_2 = \frac{2\times 50^2 \times 99.93}{99.93^2-50^2} = 66.75 \text{ โอห์ม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

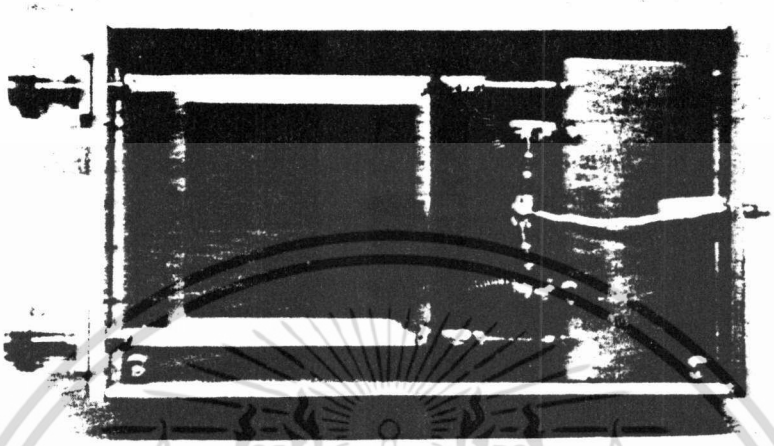
บทที่ 8
การทดลองและผลการทดลอง

จากผลการคำนวณและออกแบบสร้างส่วนประกอบต่างๆ ในบทที่ 7 ได้นำมารวมกันเป็นสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ดังแสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.3 โดยในขั้นต้นนี้ จะควบคุมการกวาดบีมหลักด้วยการเลือกไบอัสวงจรเลื่อนเฟสทีละครั้ง แล้วทดลองวัดคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ที่มีบีมหลักในทิศทางต่างๆ กัน รวมทั้งได้แสดงคุณสมบัติการสะท้อนคลื่น ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ที่ความถี่และสถานะการเลื่อนเฟสต่างๆ กันด้วย แต่ก่อนอื่นจะขอแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนประกอบย่อยในแต่ละส่วนไว้ก่อน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์คุณสมบัติรวมที่ได้ทดลองวัดเอาไว้ในส่วนสุดท้าย

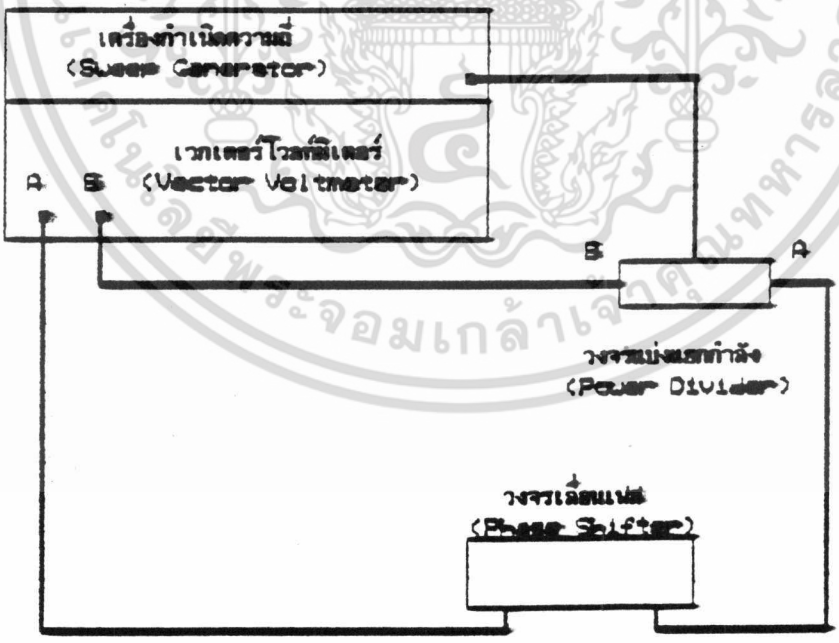
8-1 ผลการทดสอบวงจรเลื่อนเฟส

สำหรับระบบสายอากาศเฟสอาร์เรย์นั้น วงจรเลื่อนเฟสถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบสายอากาศนี้ เพราะถ้าขาดวงจรเลื่อนเฟสแล้ว การกวาดบีมหลักก็จะไม่เกิดขึ้น ในส่วนของการทดสอบวงจรเลื่อนเฟส สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้เริ่มต้นออกแบบสร้างวงจรเลื่อนเฟสขนาด 1 บิท พร้อมทั้งมีส่วนของการไบอัสพินไดโอดรวมอยู่ด้วย ในที่นี้ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟ +5 โวลท์ เพื่อทำให้พินไดโอดเปลี่ยนสถานะทำงานได้ และทำให้เกิดการเลื่อนเฟสขึ้น ในรูปที่ 8.1 ได้แสดงรูปของวงจรเลื่อนเฟสที่สร้างขึ้นทดลอง สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของวงจรเลื่อนเฟส ในที่นี้ได้ใช้เวกเตอร์โวลท์มิเตอร์ (Vector Voltmeter) และสเปคตรัมแอนนาไลเซอร์ (Spectrum Analyzer) วัดค่าของเฟสที่เลื่อนไป (Phase Shift) ,ค่าอินเสิร์ทชันลอส (Insertion Loss) และค่ารีเทิร์นลอส (Return Loss) ซึ่งค่ารีเทิร์นลอสนี้นำไปใช้คำนวณค่า VSWR ได้ สำหรับวิธีการคำนวณค่า VSWR นี้จะขอแสดงไว้ในภาคผนวก ค. ทั้งนี้ได้แสดงรูปวิธีการต่อเครื่องมือวัดคุณสมบัติดังกล่าว เอาไว้ในรูปที่ 8.2 ถึง 8.4 ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

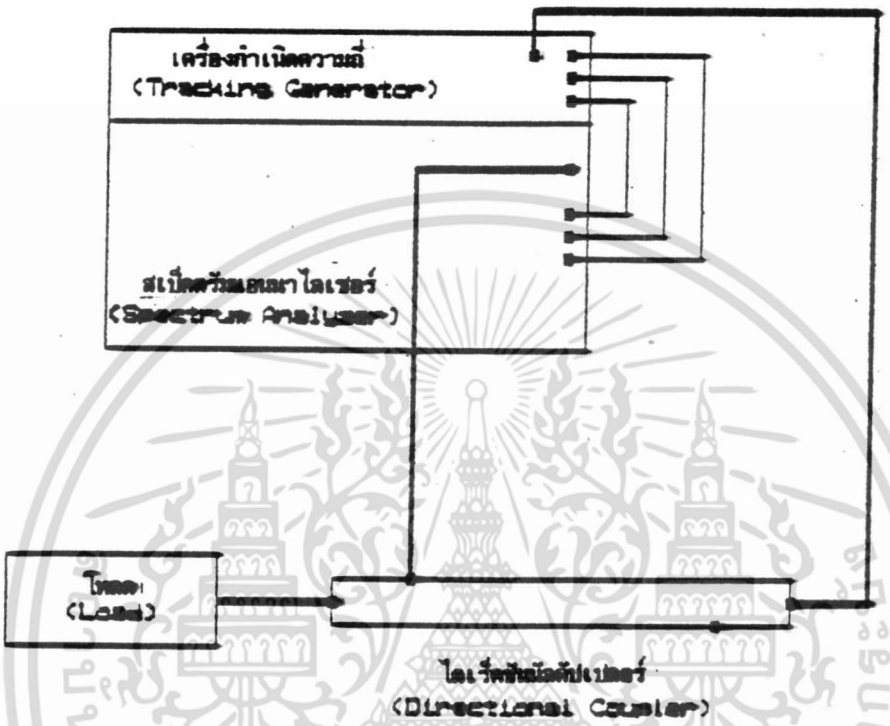


รูปที่ 8.1 แสดงวงจรเลื่อนเฟสขนาด 1 บิท ที่สร้างขึ้นทดลอง

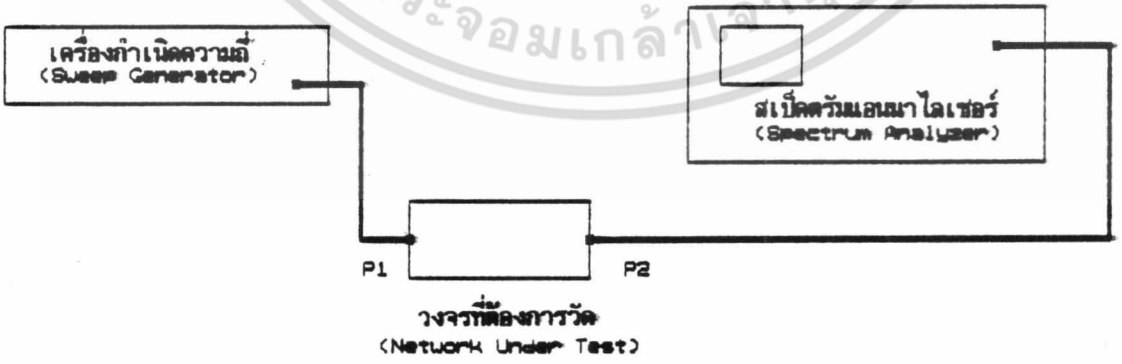


รูปที่ 8.2 แสดงการต่อเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์สำหรับวัดการเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



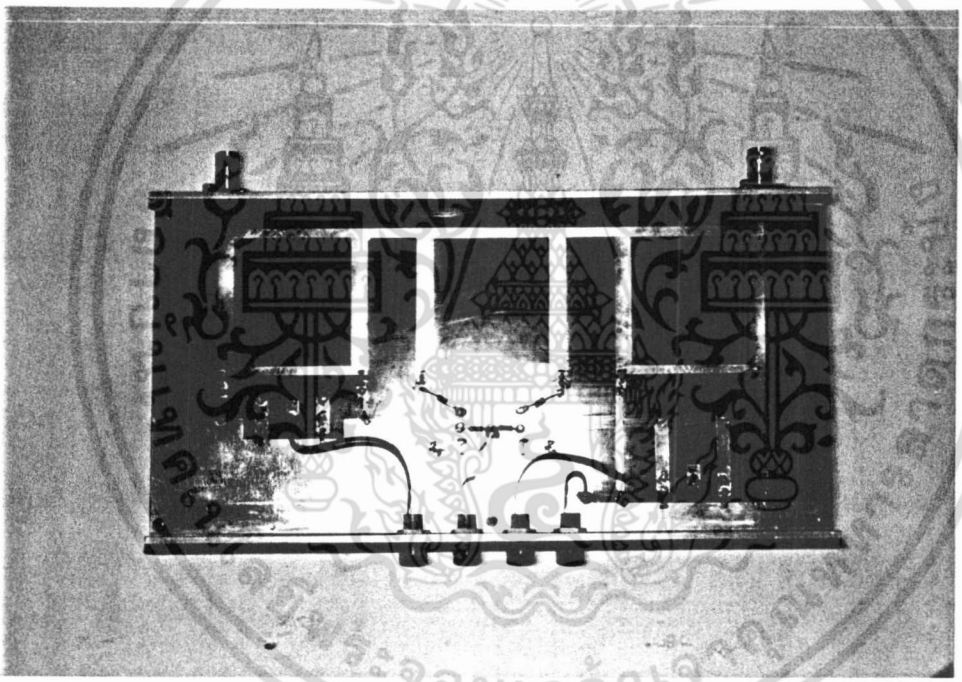
รูปที่ 8.3 แสดงการต่อสเปคตรัมแอนนาไลเซอร์สำหรับวัดรีเทิร์นลอส



รูปที่ 8.4 แสดงการต่อสเปคตรัมแอนนาไลเซอร์สำหรับวัดอินเสิร์ทชันลอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในทางปฏิบัติจริง ของวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้วงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท จำนวน 8 เอลีเมนท์ ซึ่งได้สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการจากวงจรเลื่อนเฟสขนาด 1 บิท มาต่อร่วมกันโดยใช้วงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ตัวเดียวกัน แล้ววัดคุณสมบัติการเลื่อนเฟสเช่นเดียวกับวิธีการดังกล่าวข้างต้น แต่ได้ผลที่ไม่น่าพอใจ จึงได้เปลี่ยนมาใช้วงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์ 3 ตัว สำหรับวงจรเลื่อนเฟสแต่ละบิท และนำมาต่อเรียงกัน(Cascade) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.5 เป็นวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นใช้งานจริง สำหรับสายอากาศเฟสอาร์เรย์

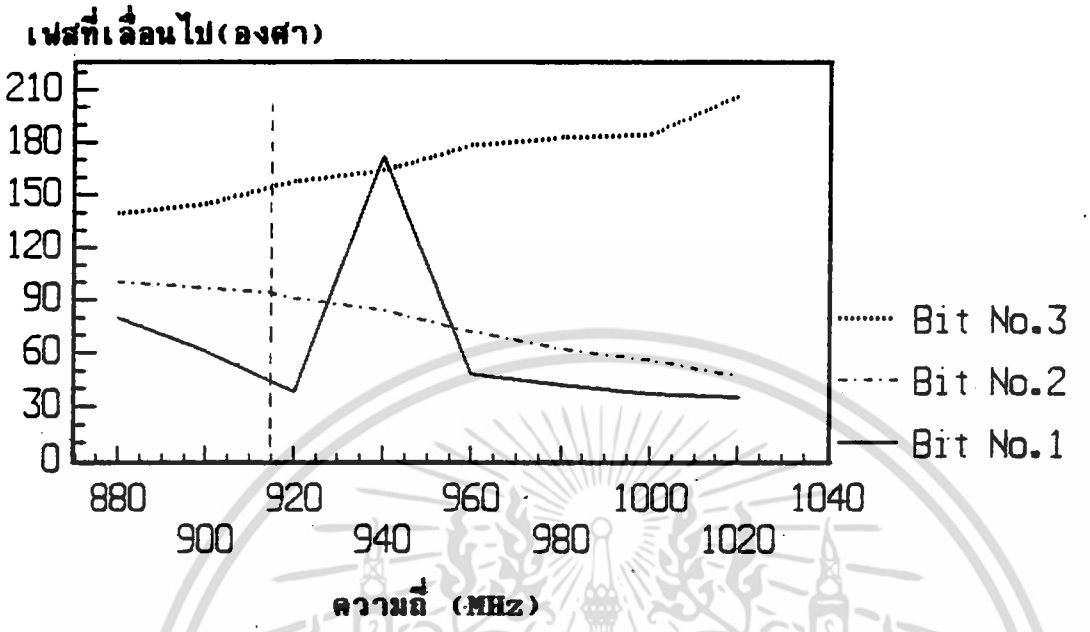


รูปที่ 8.5 แสดงวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท ที่สร้างขึ้นใช้งานจริง

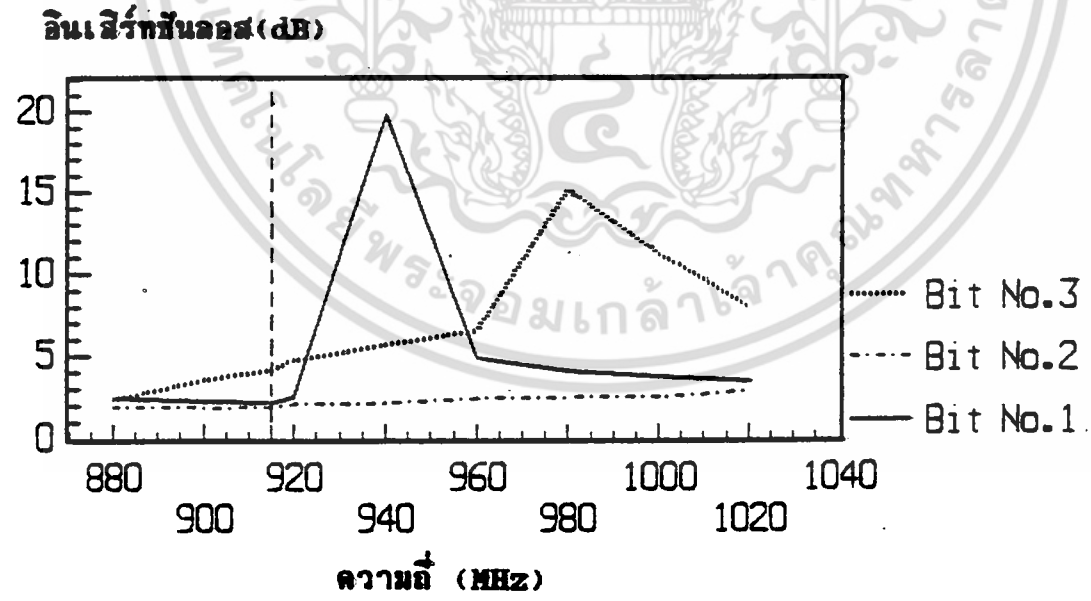
8-1-1 วงจรเลื่อนเฟสขนาด 1 บิท แต่ละบิท

หลังจากวัดคุณสมบัติต่างๆ ของวงจรเลื่อนเฟสดังกล่าว นำไปเขียนกราฟแสดงผลการทดสอบ วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ทดลองไปจากความถี่ที่ออกแบบ คือ 915 MHz ด้วย โดยมีรูปแสดงผลการทดสอบดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 8.6 ถึง รูปที่ 8.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

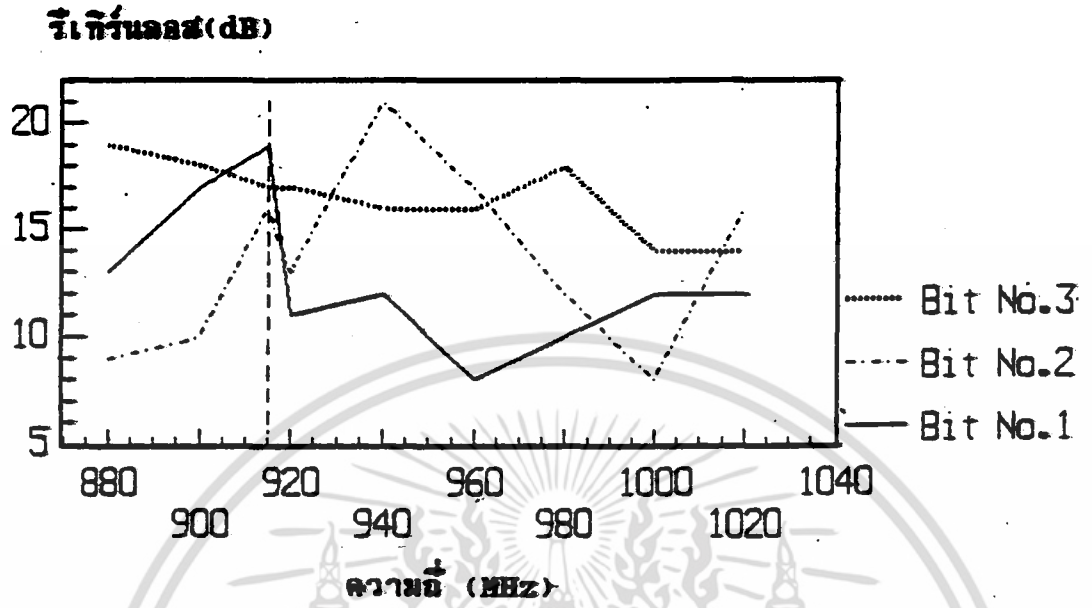


รูปที่ 8.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เลื่อนไป(Phase Shift) และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส

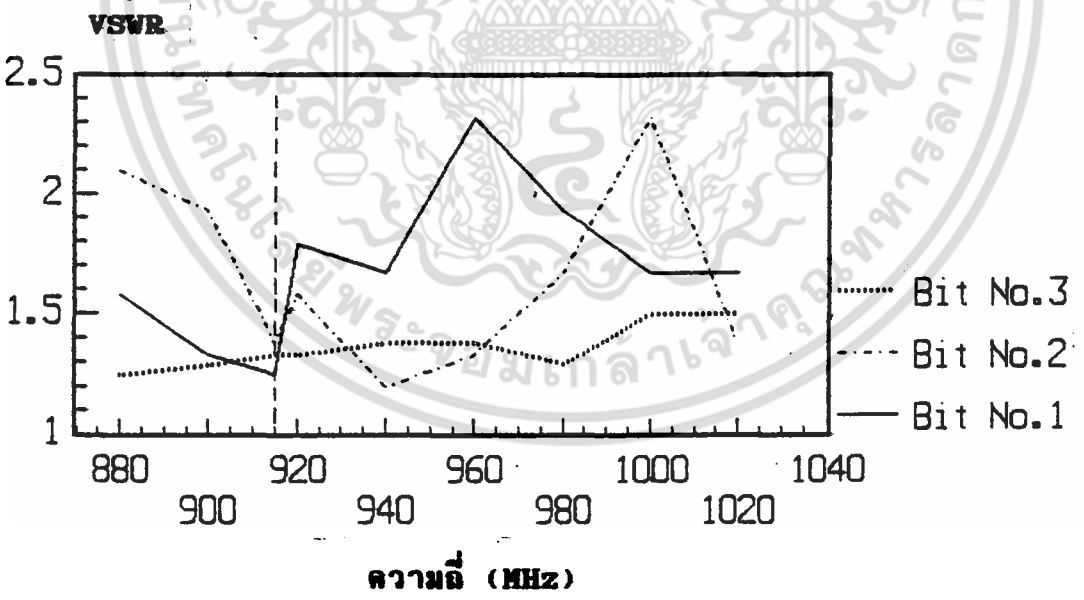


รูปที่ 8.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินเสิร์ทชันลอส(Insertion Loss) และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรีเทิร์นลอส(Return Loss) และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส

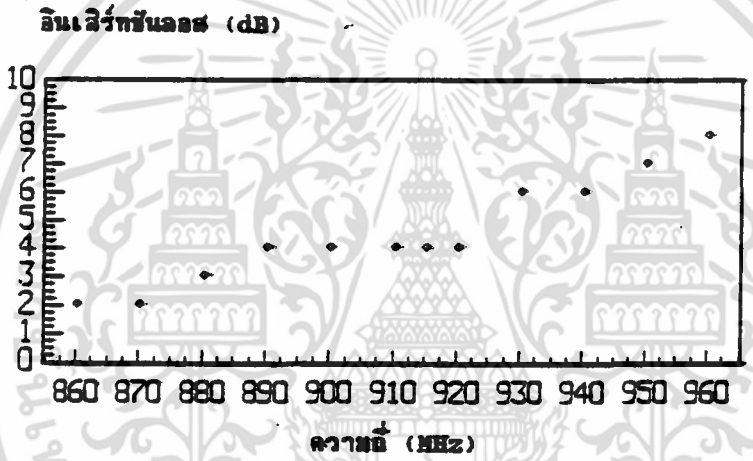


รูปที่ 8.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟส

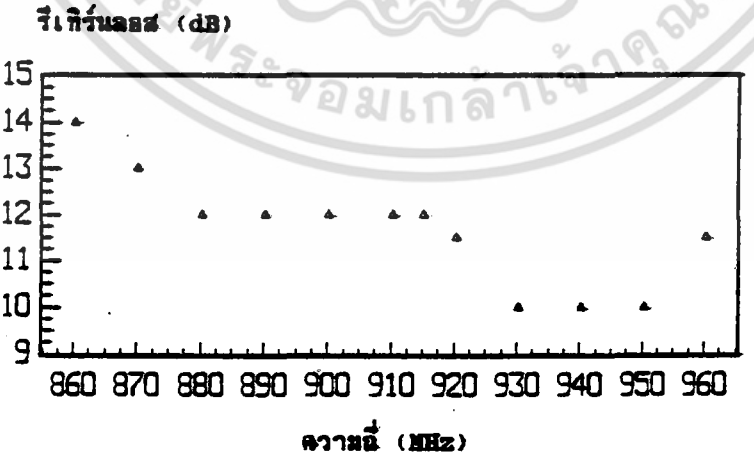
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8-1-2 วงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน

ในส่วนของการทดสอบวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกันนั้น ก็ยังคงใช้วิธีการทดสอบเช่นเดิม โดยได้แสดงผลของการทดสอบ อยู่ในรูปกราฟเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ไปจากความถี่ที่ออกแบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.10 ถึง รูปที่ 8.12 เป็นความสัมพันธ์ของอินเสิร์ทชันลอส, รีเทิร์นลอส และ VSWR ที่ความถี่ต่างๆกัน และสำหรับผลการทดสอบเฟสที่เลื่อนไป ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกันนั้น จะได้แสดงไว้ในตารางที่ 8.1

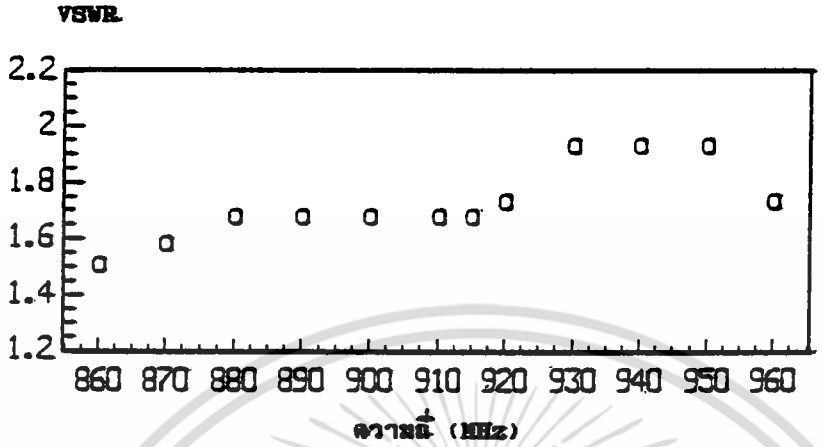


รูปที่ 8.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินเสิร์ทชันลอส(Insertion Loss) และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน



รูปที่ 8.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรีเทิร์นลอส(Return Loss) และความถี่ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และ
ความถี่ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน

Δø(ที่ต้องการ)	Δø(ที่วัดจากเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์)
45°	75°(-285°)
90°	90°(-270°)
180°	145°(-215°)

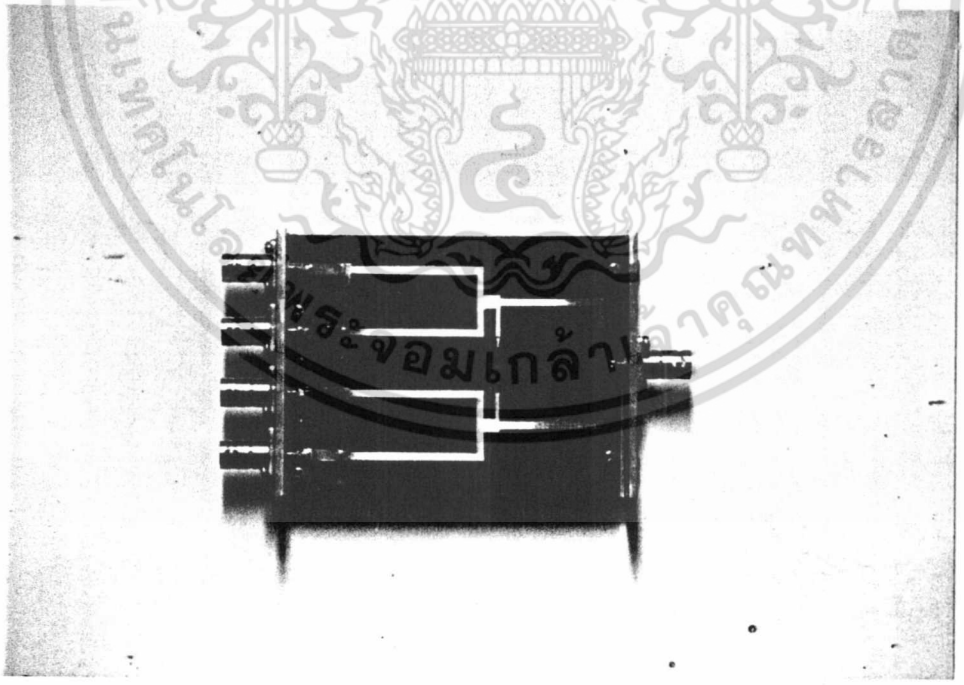
ตารางที่ 8.1 แสดงผลของการเลื่อนเฟส (Phase Shift)
ที่ความถี่ 915 MHz ของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน

8-2 ผลการทดสอบไดโพลอาร์เรย์เหนือบนระนาบกราวนด์เพลน

สำหรับส่วนประกอบอื่นๆ ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ได้แก่ วงจรแบ่งแยกกำลัง และวงจรลดทอนสัญญาณ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ช่วยให้เกิดการสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นตามต้องการ ดังได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 โดยมีผลการคำนวณออกแบบสร้าง แสดงไว้แล้วในบทที่ 7 ซึ่งจะแสดงรูปของวงจรทั้งสองที่ได้นำมาใช้งานจริง เอาไว้ในรูปที่ 8.13 เป็นวงจรแบ่งแยก

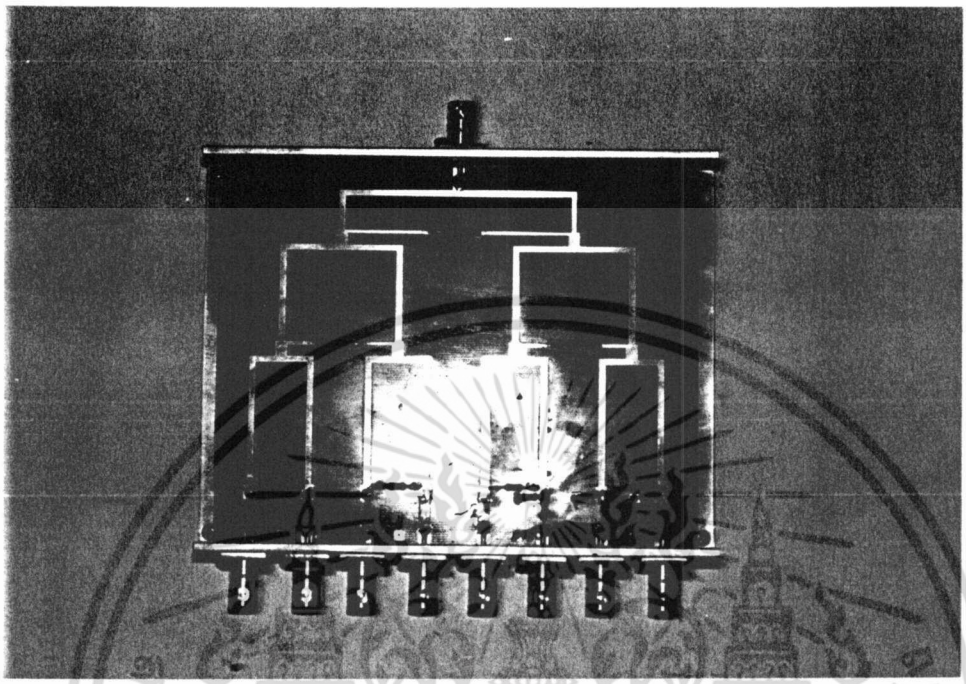
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลัง 4 เอาท์พุท และวงจรลดทอนสัญญาณเพื่อสังเคราะห์เชคเตอร์แพทเทิร์น ส่วนในรูปที่ 8.14 เป็นวงจรแบ่งแยกกำลัง 8 เอาท์พุท และวงจรลดทอนสัญญาณเพื่อสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่นแบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ ซึ่งใช้เชบบีเชพโพลีโนเมียล โดยในที่นี้ จะไม่แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของวงจรดังกล่าว แต่จะขอนำไปแสดงผลรวมกันของการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ได้แก่ รูปแบบการกระจายคลื่น ทั้งในระนาบอะซิมุธและระนาบเอลีเวชัน โดยมีการปรับทิศทางของบีมหลักได้ 8 ทิศทาง ในระนาบอะซิมุธ ซึ่งจะมีกราฟแสดงเปรียบเทียบกันระหว่าง ผลที่ได้จากการทดลองวัด และผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี (ด้วยโปรแกรม MathCAD 2.5) นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายคลื่น ที่ความถี่อื่นๆ นอกเหนือไปจากความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ แต่ก่อนอื่นจะแสดงภาพวิธีการวัดรูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศเอาไว้ในรูปที่ 8.15 พร้อมทั้งภาพถ่ายของระบบสายอากาศเฟสอาร์เรย์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดด้วย

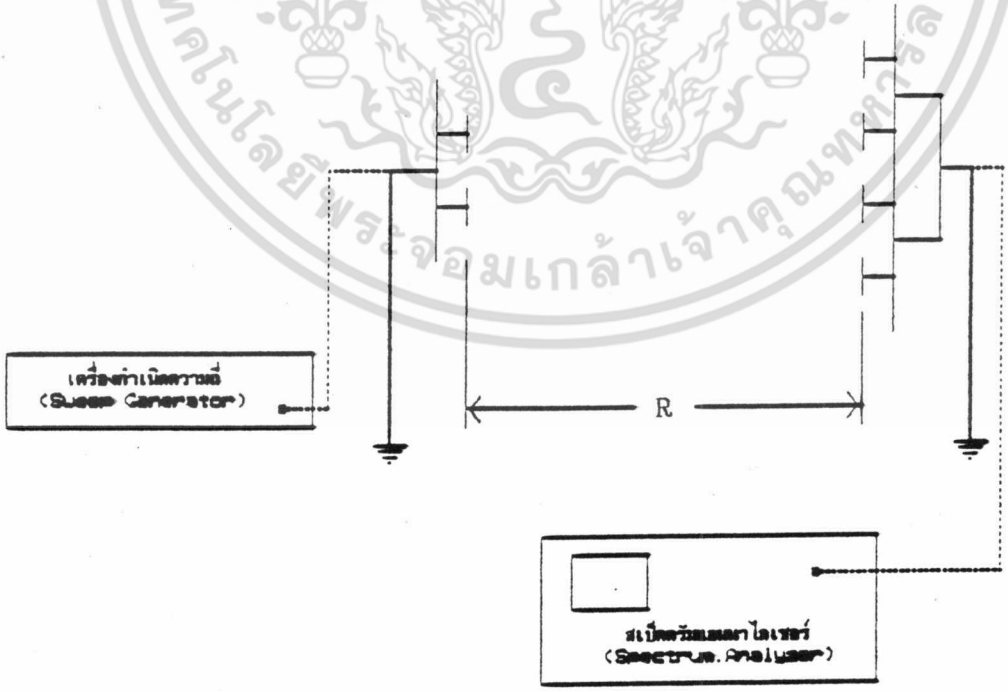


<u>รูปที่ 8.13</u> แสดงวงจรแบ่งแยกกำลัง 4 เอาท์พุท และ
วงจรลดทอนสัญญาณเพื่อสังเคราะห์เชคเตอร์แพทเทิร์น ที่นำมาใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

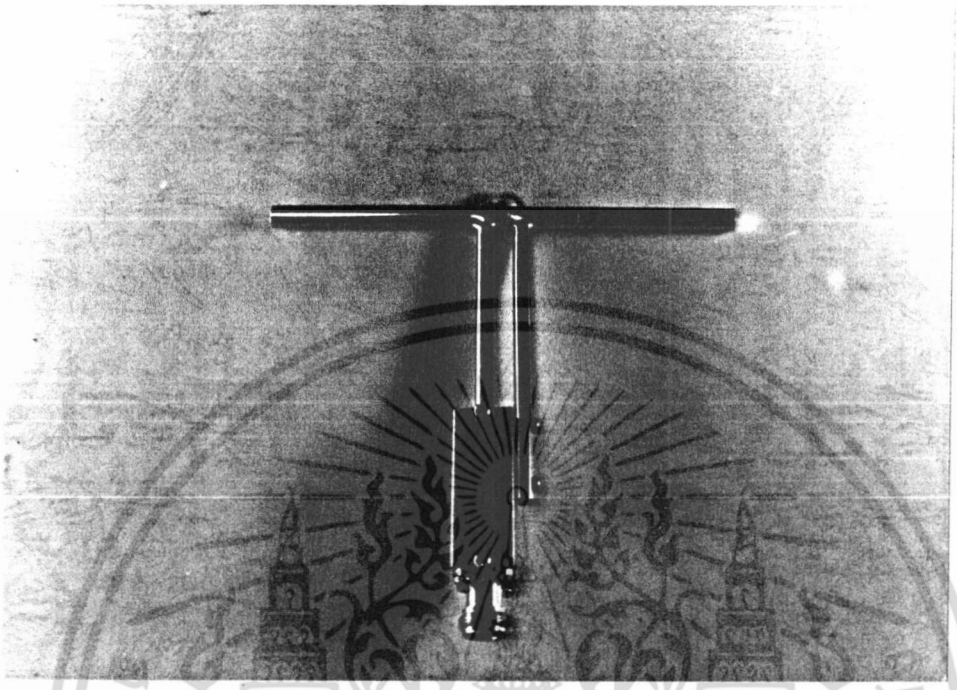


รูปที่ 8.14 แสดงวงจรแบ่งแยกกำลัง 8 เอาท์พุท และ
วงจรลดทอนสัญญาณเพื่อสังเคราะห์รูปแบบการกระจายคลื่น
แบบบีมวิดธ์แคบ ไซด์โหลบต่ำ ที่นำมาใช้งานจริง

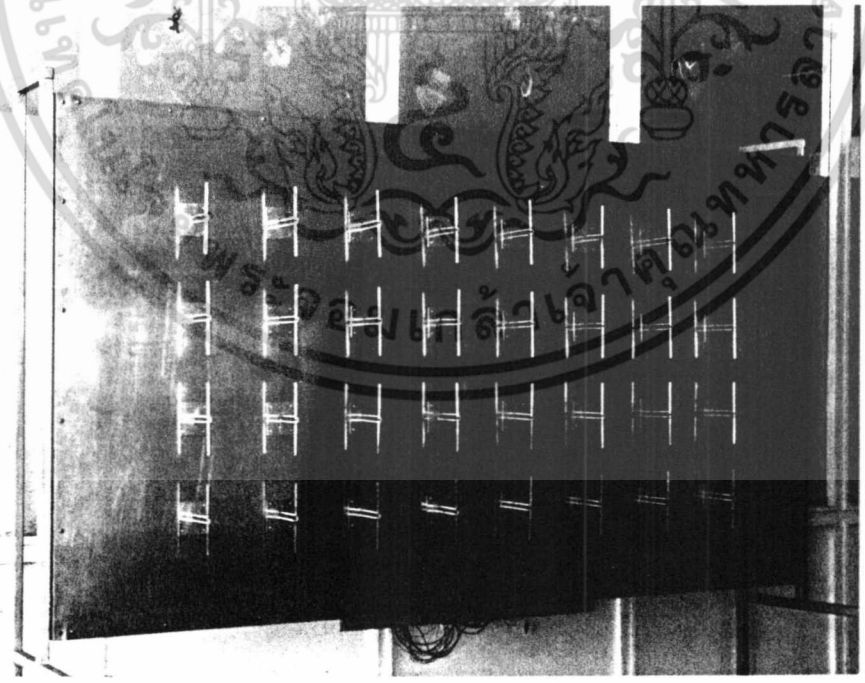


รูปที่ 8.15 แสดงวิธีการต่อเครื่องมือสำหรับวัดรูปแบบการกระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

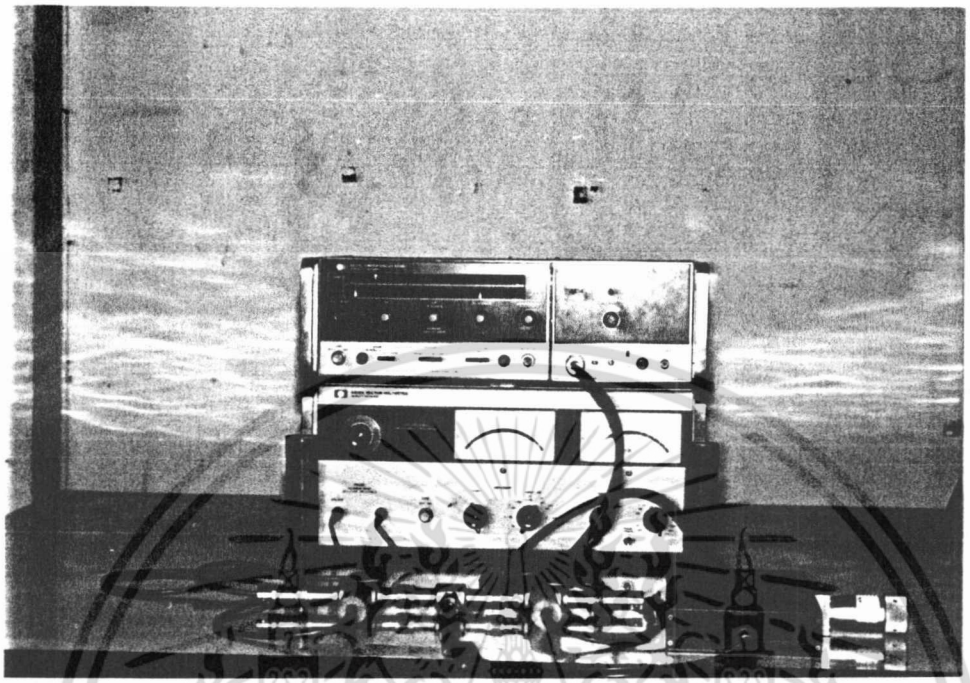


รูปที่ 8.16 แสดงภาพของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียวที่สร้างขึ้น

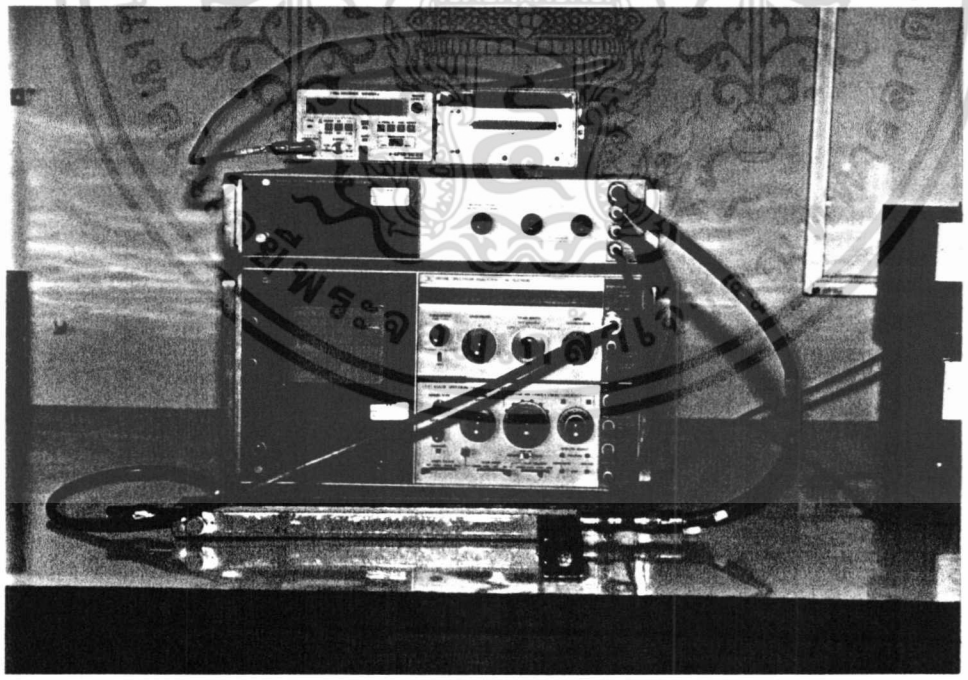


รูปที่ 8.17 แสดงภาพของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.18 แสดงภาพของเวกเตอร์โวลท์มิเตอร์สำหรับวัดการเลื่อนเฟส



รูปที่ 8.19 แสดงภาพของสเปคตรัมแอนนาไลเซอร์สำหรับวัดรีเทิร์นลอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8-2-1 เงื่อนไขในการกำหนดทิศทางของบีมหลัก

จากสมการที่ (2.9) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ ของเฟสที่เปลี่ยนไป ทำให้ได้ทิศทางของบีมหลักเปลี่ยนไปด้วย (θ_o) สำหรับการออกแบบสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดให้เฟสของวงจรเลื่อนเฟสเปลี่ยนไป 8 สถานะ โดยมีวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท จำนวน 8 เอลีเมนท์ ทำให้ปรับทิศทางของบีมหลักได้ 8 ทิศทาง ดังแสดงให้เห็นด้วยตารางที่ 8.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์ของการคำนวณ จากสมการที่ (2.9)

$$\beta = -kd\cos\theta_o \qquad (2.9)$$

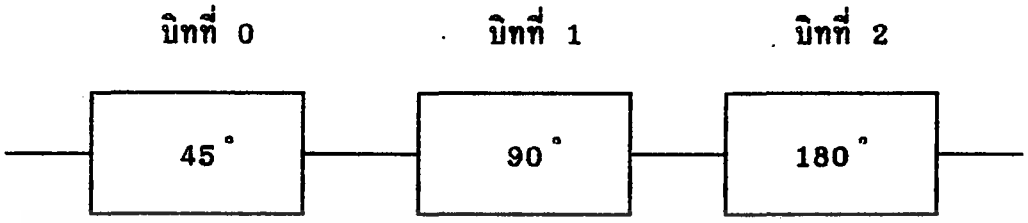
เมื่อระยะห่างระหว่างเอลีเมนท์ $d = 0.7\lambda$ จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้ คือ

$$\theta_o = \cos^{-1}\left[\frac{-\beta}{1.4\pi}\right] \qquad (8.1)$$

สถานะที่	β	θ_o
1	180°	135.6°
2	135°	122.4°
3	90°	110.9°
4	45°	100.3°
5	0°	90.0°
6	315°(-45°)	79.7°
7	270°(-90°)	69.1°
8	225°(-135°)	57.6°

ตารางที่ 8.2 แสดงการเปลี่ยนทิศทางของบีมหลัก 8 ทิศทาง เมื่อเปลี่ยนสถานะของวงจรเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

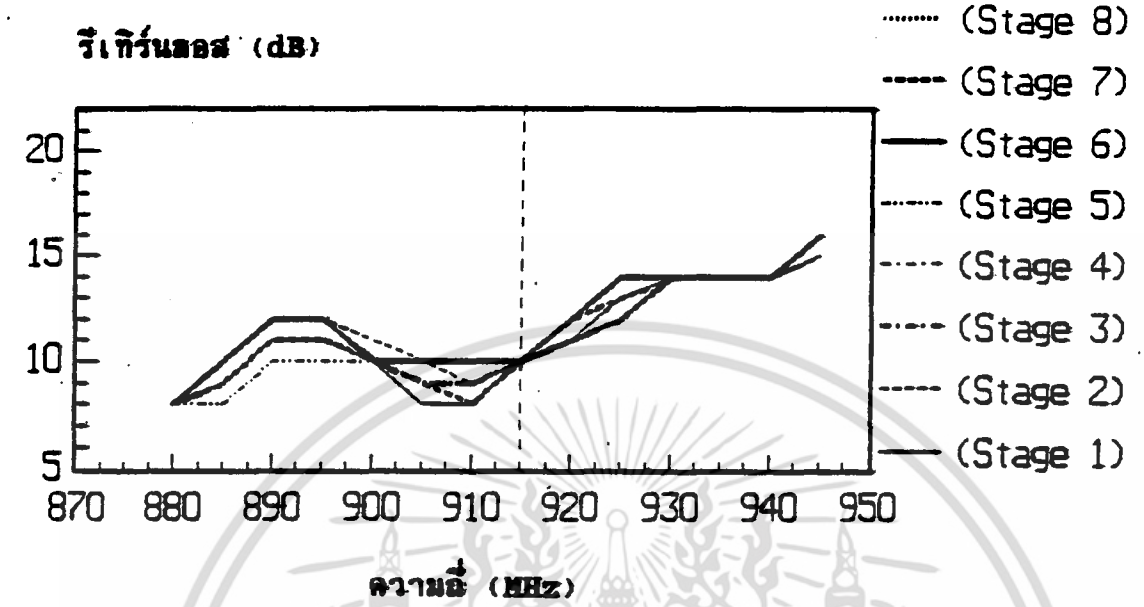


รูปที่ 8.20 แสดงการจัดลำดับของวงจรเลื่อนเฟสแต่ละบิท

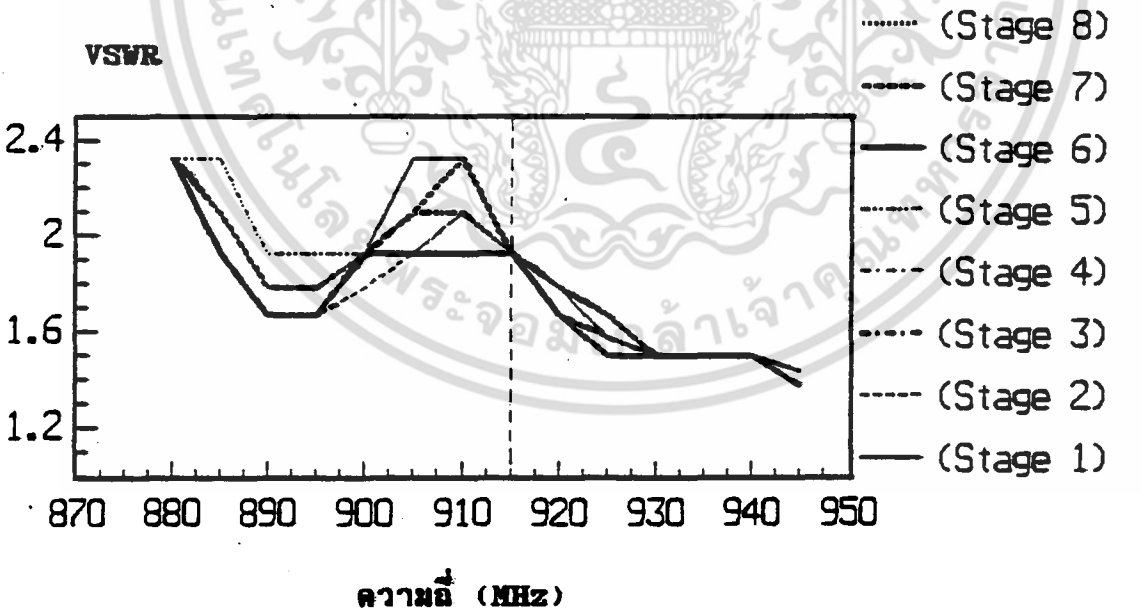
สถานะที่	$A_2A_1A_0$	$B_2B_1B_0$	$C_2C_1C_0$	$D_2D_1D_0$	$E_2E_1E_0$	$F_2F_1F_0$	$G_2G_1G_0$	$H_2H_1H_0$
1	0 0 0	1 0 0	0 0 0	1 0 0	0 0 0	1 0 0	0 0 0	1 0 0
2	0 0 0	0 1 1	1 1 0	0 0 1	1 0 0	1 1 1	0 1 0	1 0 1
3	0 0 0	0 1 0	1 0 0	1 1 0	0 0 0	0 1 0	1 0 0	1 1 0
4	0 0 0	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0	1 1 1
5	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
6	0 0 0	1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1
7	0 0 0	1 1 0	1 0 0	0 1 0	0 0 0	1 1 0	1 0 0	0 1 0
8	0 0 0	1 0 1	0 1 0	1 1 1	1 0 0	0 0 1	1 1 0	0 1 1

ตารางที่ 8.3 แสดงสถานะของการไบอัสให้แก่พินไดโอดในวงจรเลื่อนเฟส ขนาด 3 บิท จำนวน 8 เอลีเมนท์ เพื่อปรับทิศทางของบีมหลักได้ 8 ทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



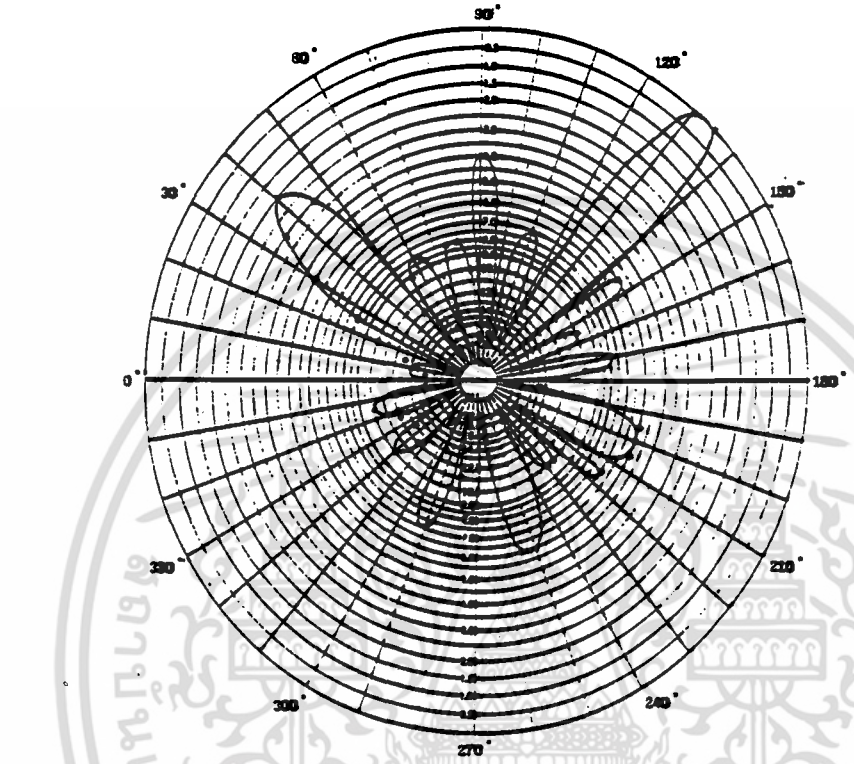
รูปที่ 8.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรีเทิร์นลอส(Return Loss)
และความถี่ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์
เมื่อปรับบีมหลักไปในทิศทางต่างๆกัน



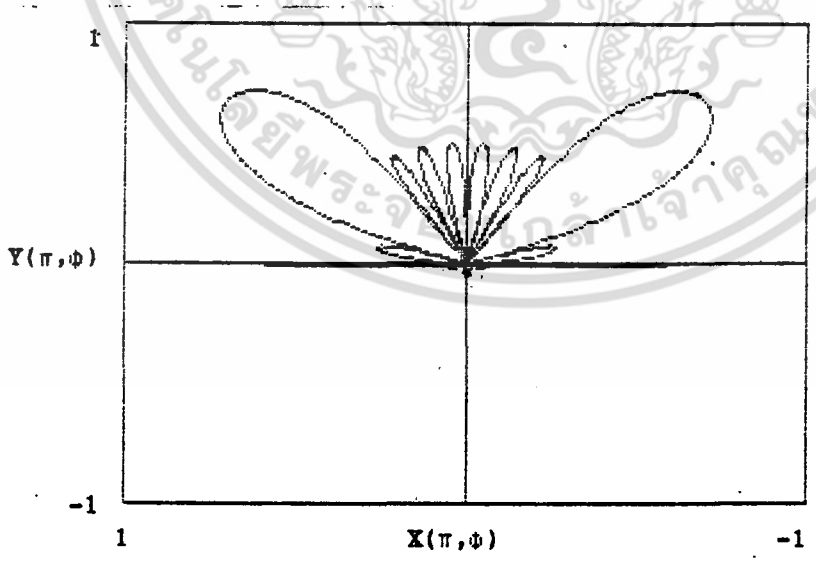
รูปที่ 8.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR
และความถี่ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์
เมื่อปรับบีมหลักไปในทิศทางต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8-2-2 รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ



(ก)

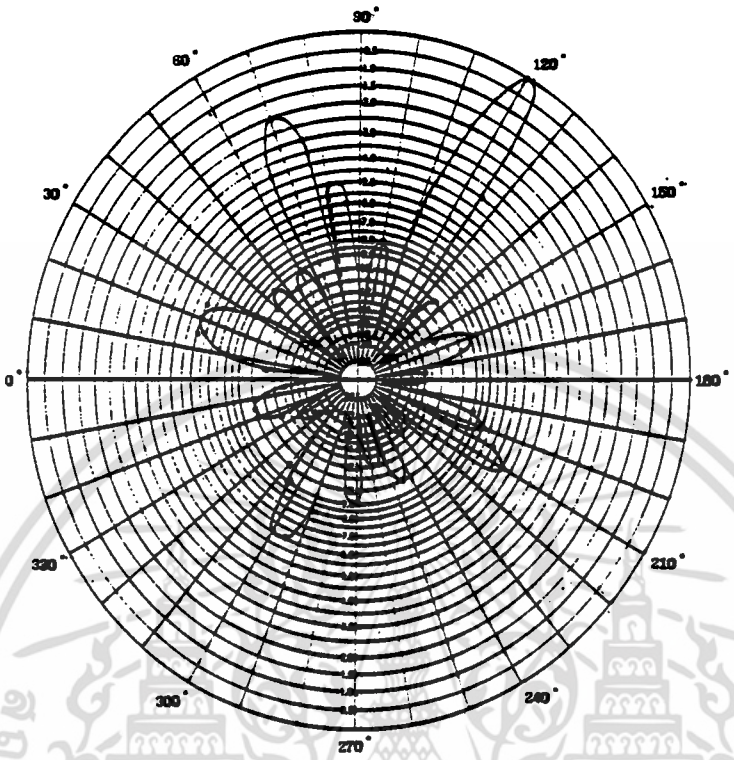


(ข)

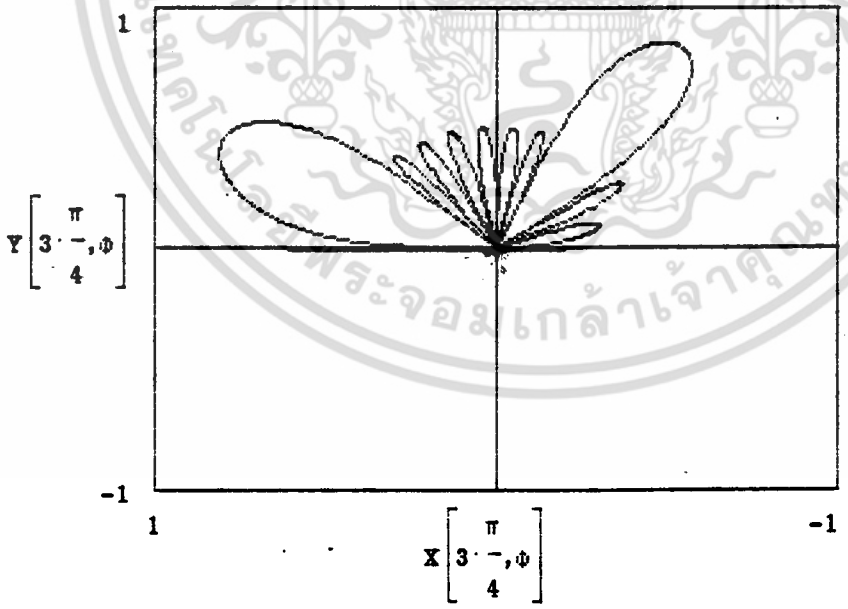
รูปที่ 8.23 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 1(β=180°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

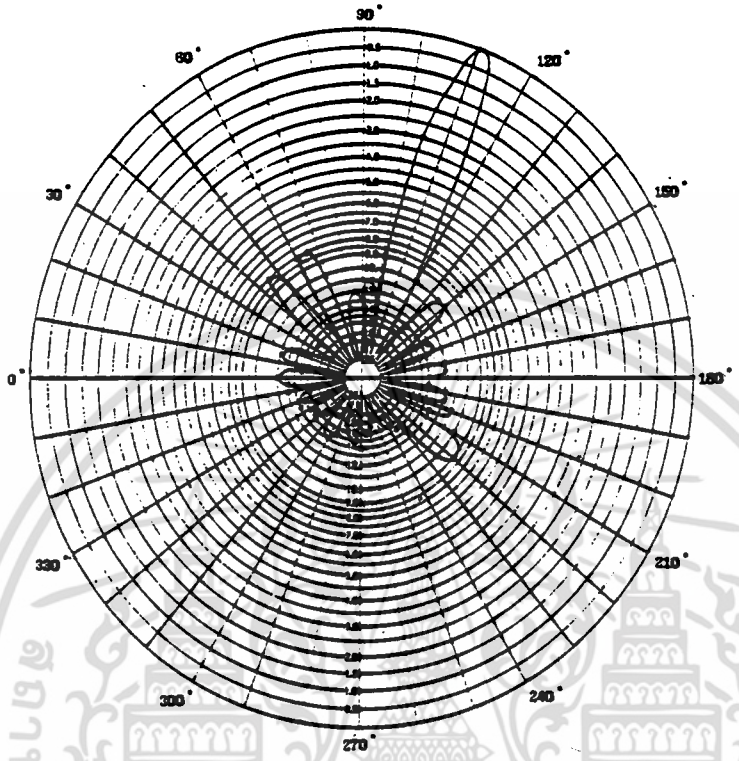


(ข)

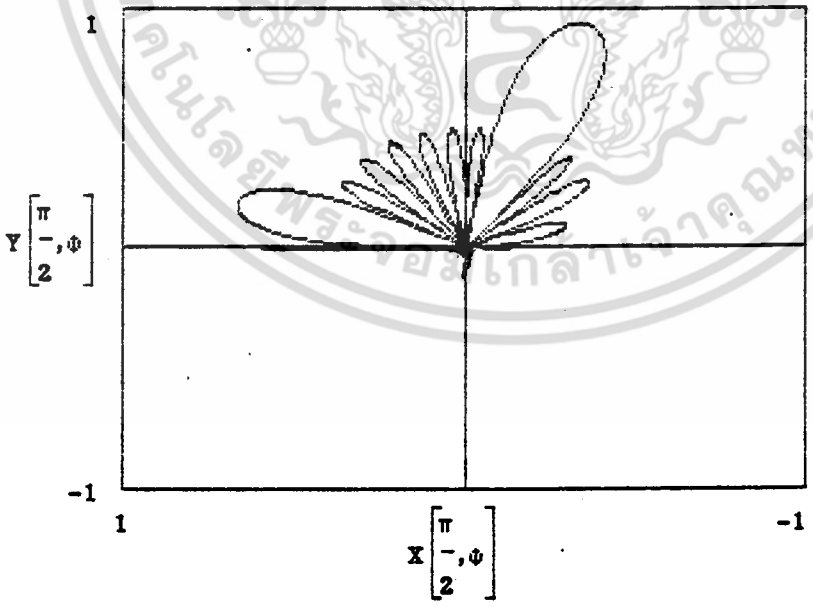
รูปที่ 8.24 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 2(β=135°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

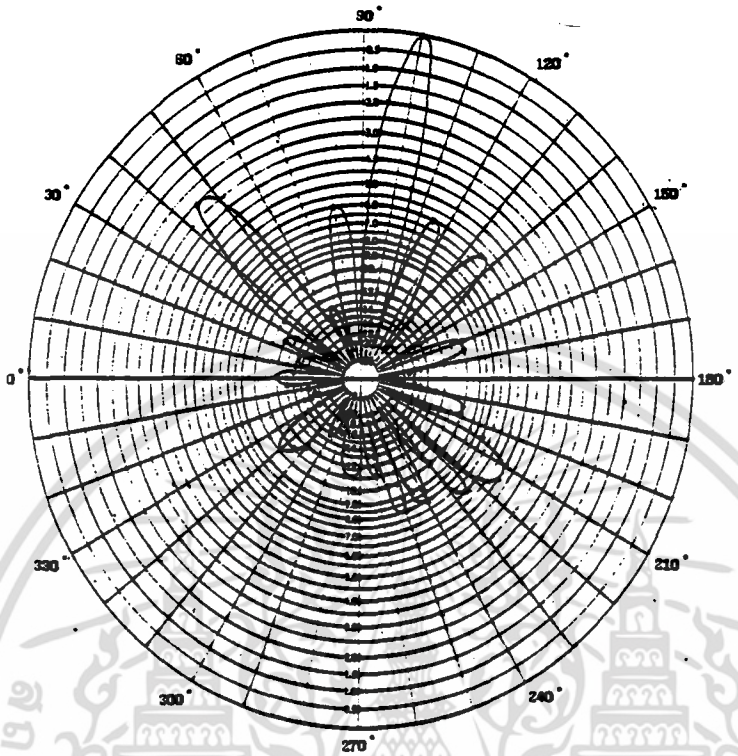


(ข)

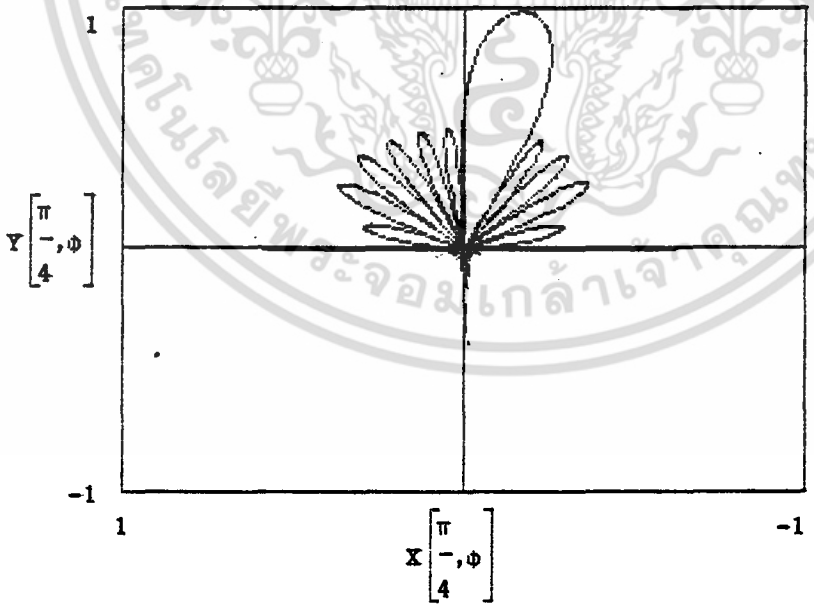
รูปที่ 8.25 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 3(θ=90°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

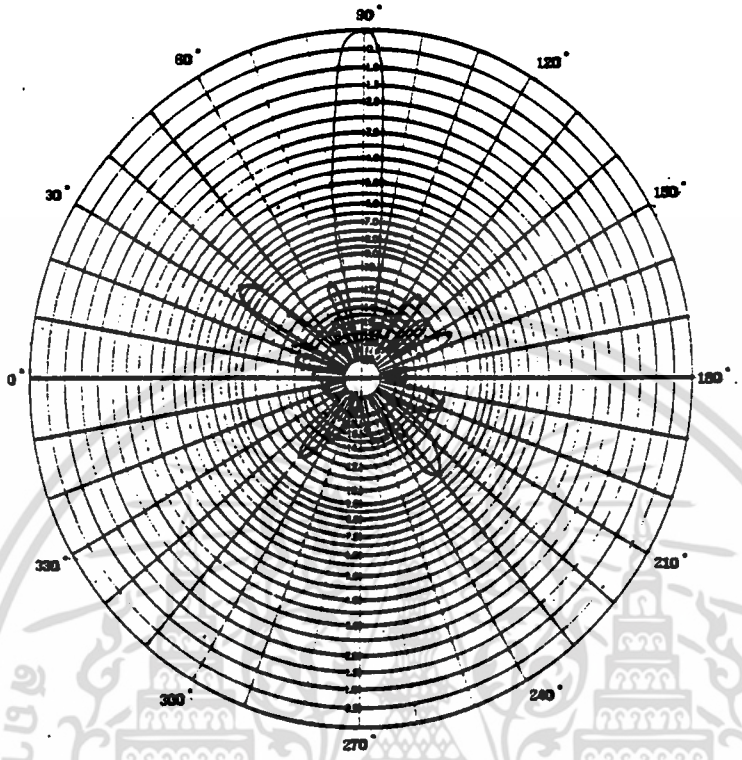


(ข)

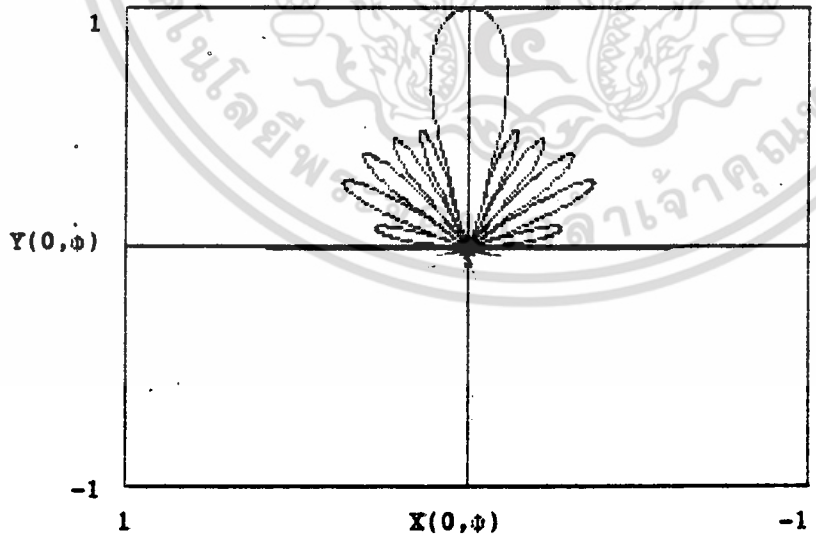
รูปที่ 8.26 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 4 (β=45°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

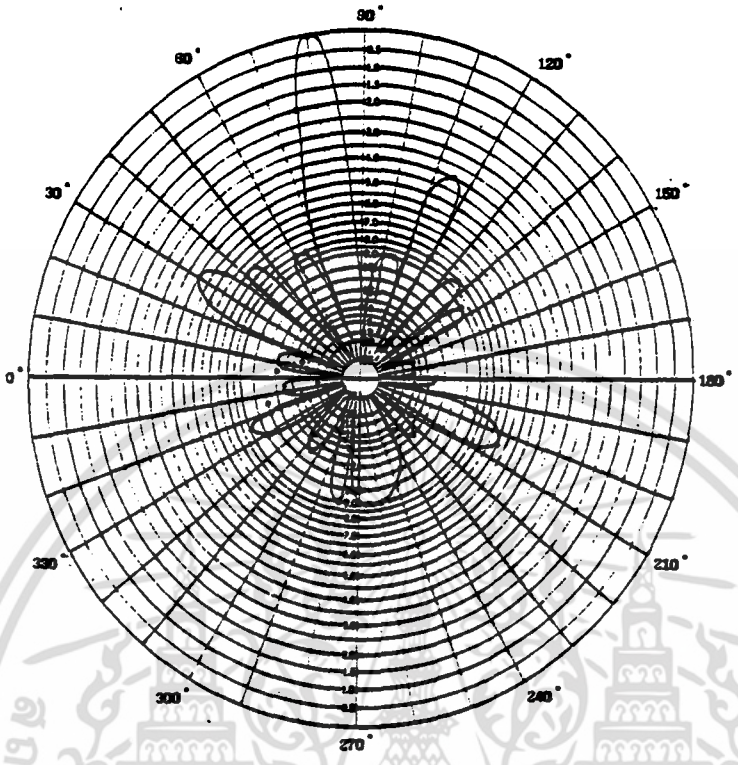


(ข)

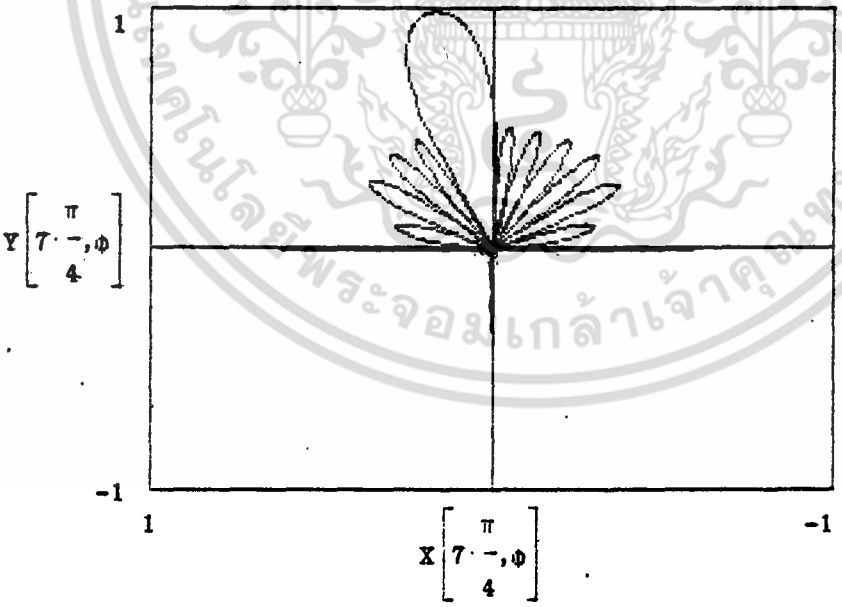
รูปที่ 8.27 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 5(θ=0°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

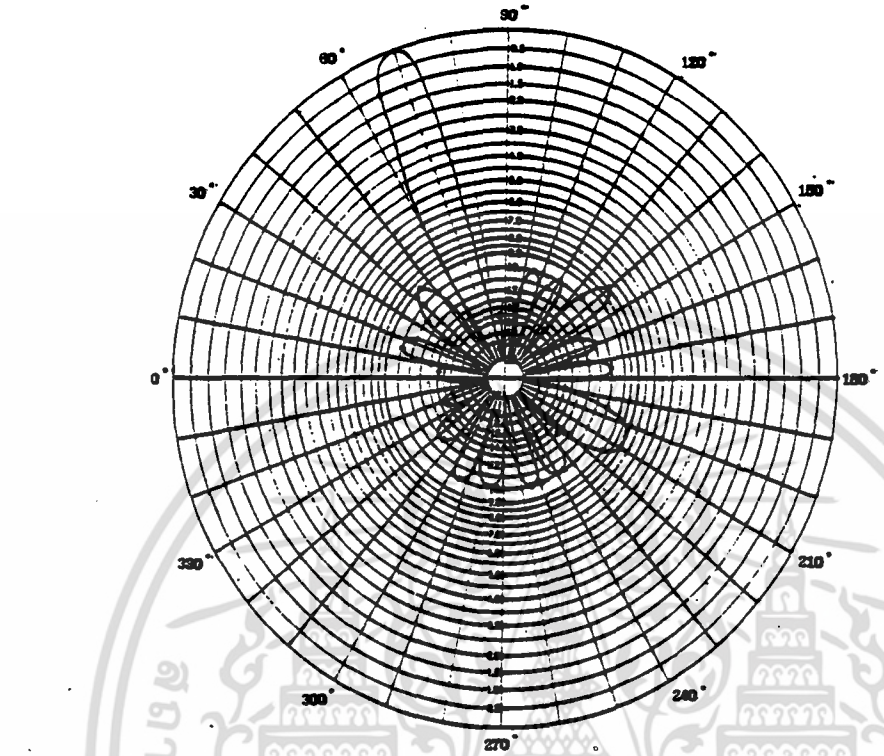


(ข)

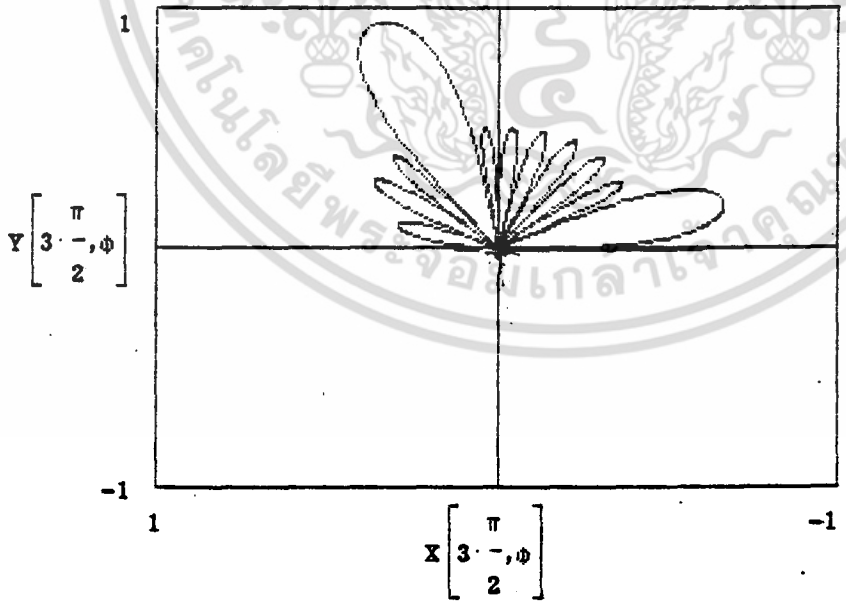
รูปที่ 8.28 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 6(θ=315°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

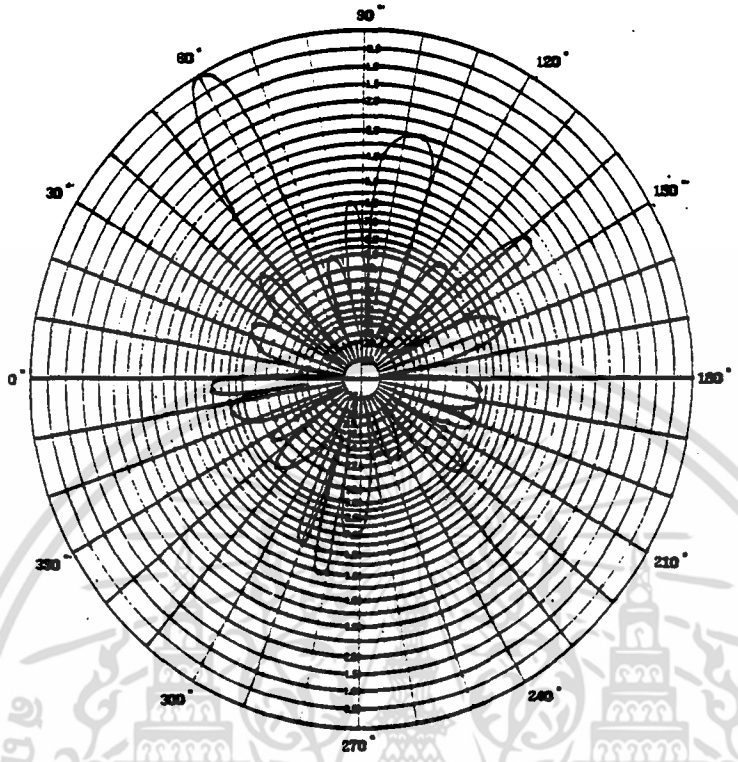


(ข)

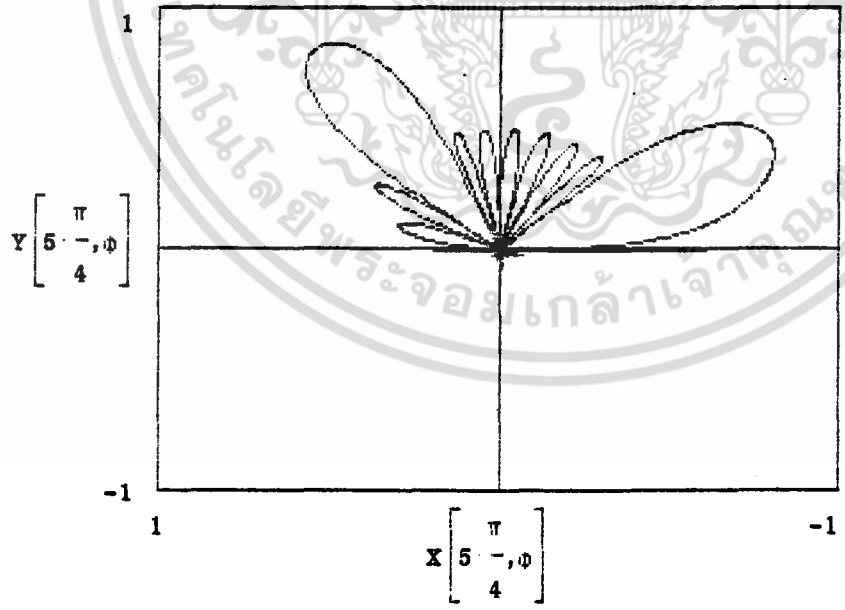
รูปที่ 8.29 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 7(ϕ=270°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



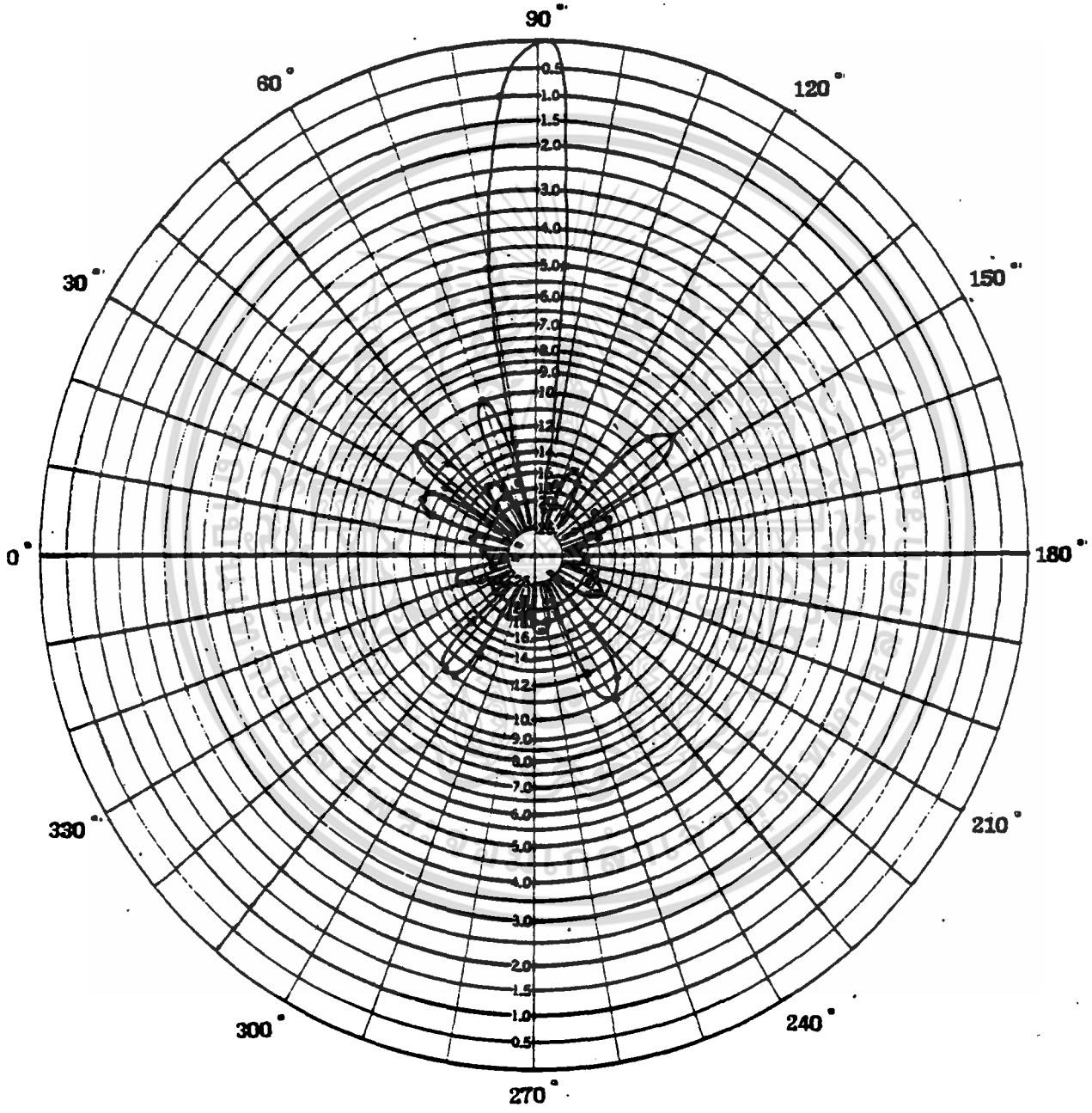
(ข)

รูปที่ 8.30 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 8 (θ=225°)

(ก) จากการทดลอง (ข) จากทฤษฎี

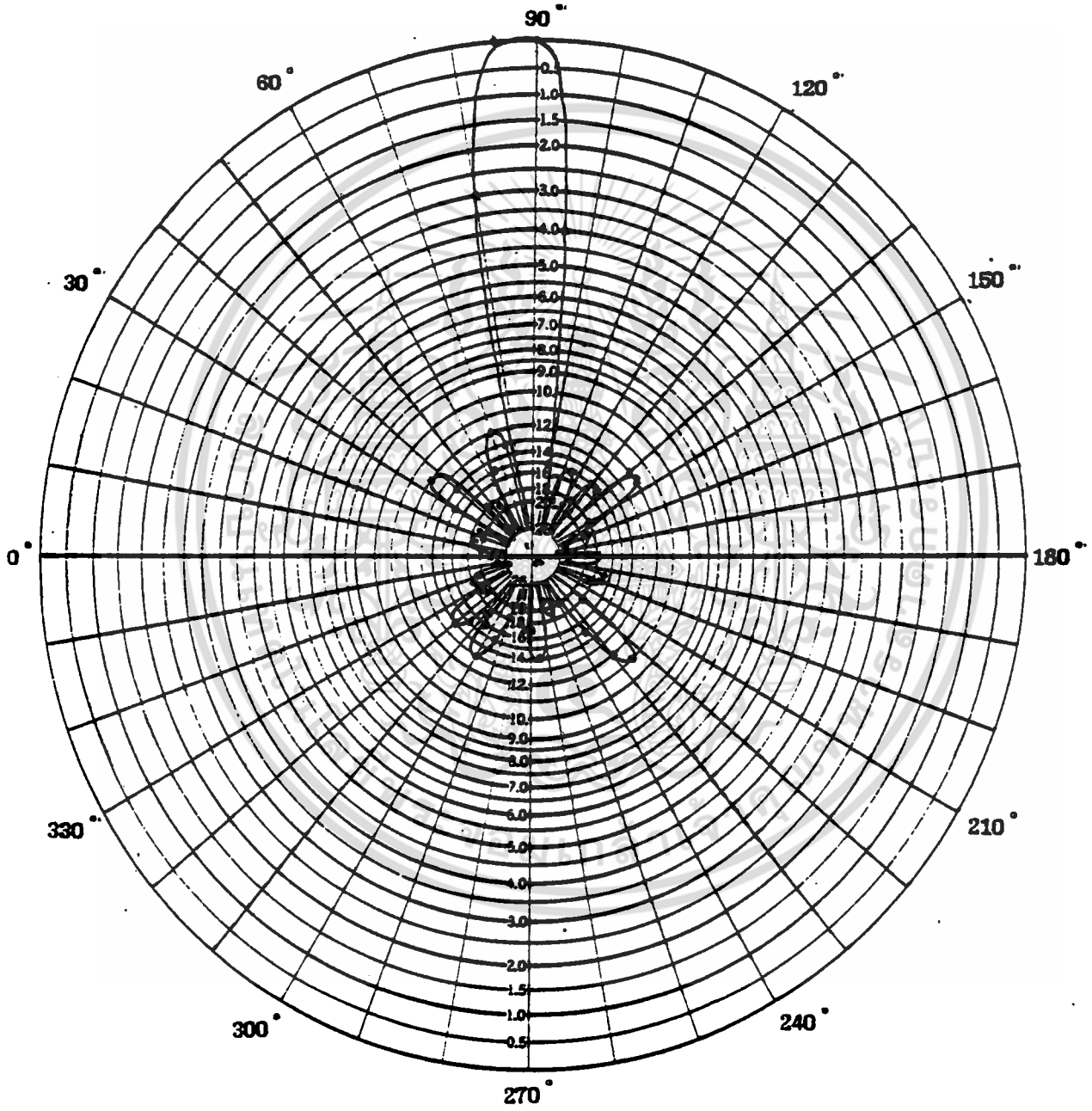
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8-2-3 รูปแบบการกระจายคลื่น จากการทดลอง ในสถานะที่ 5 เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ไปจากความถี่ที่ออกแบบ



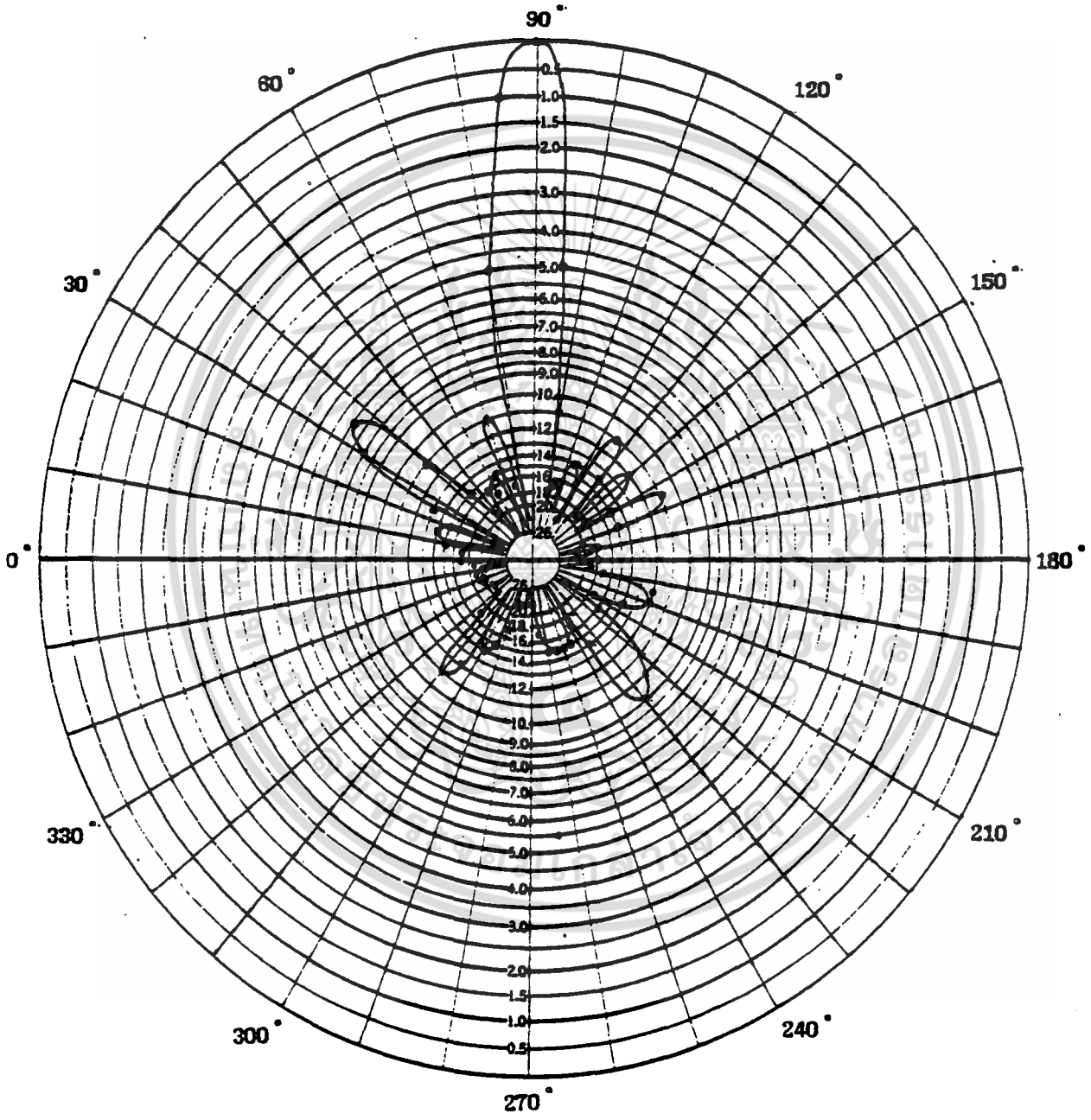
รูปที่ 8.31 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ ความถี่ 880 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



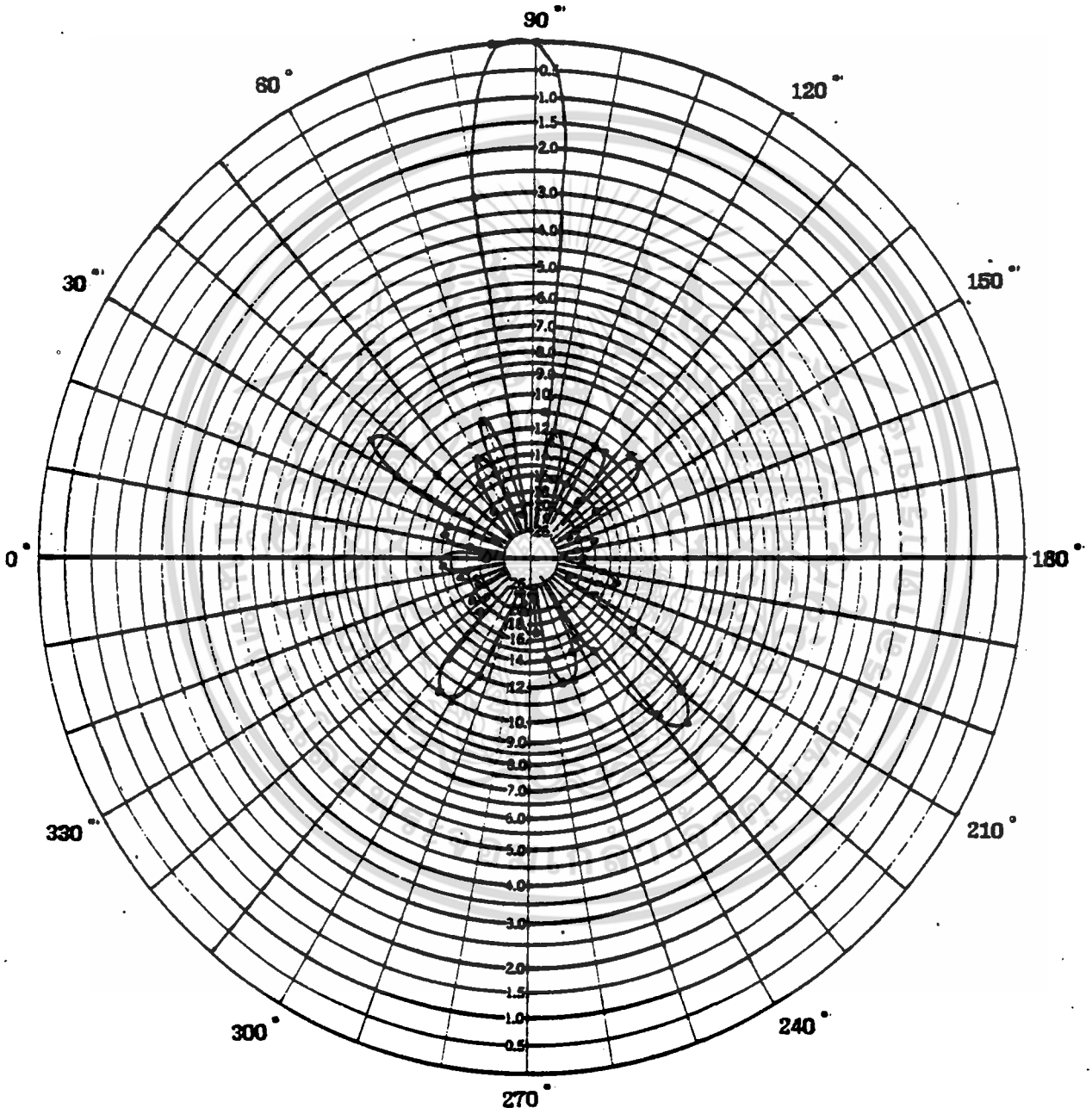
รูปที่ 8.32 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ ความถี่ 900 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



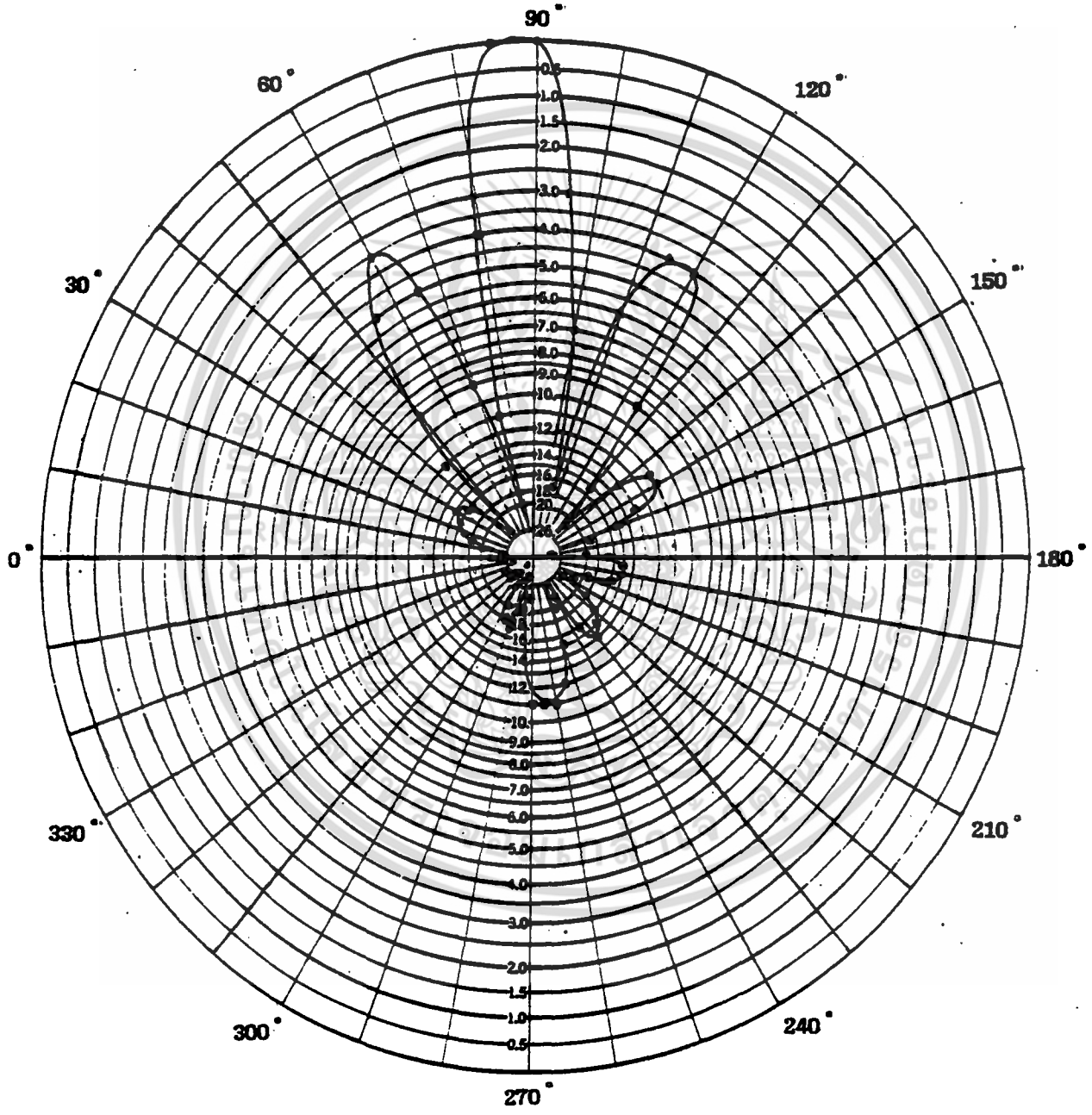
รูปที่ 8.33 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ ความถี่ 915 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



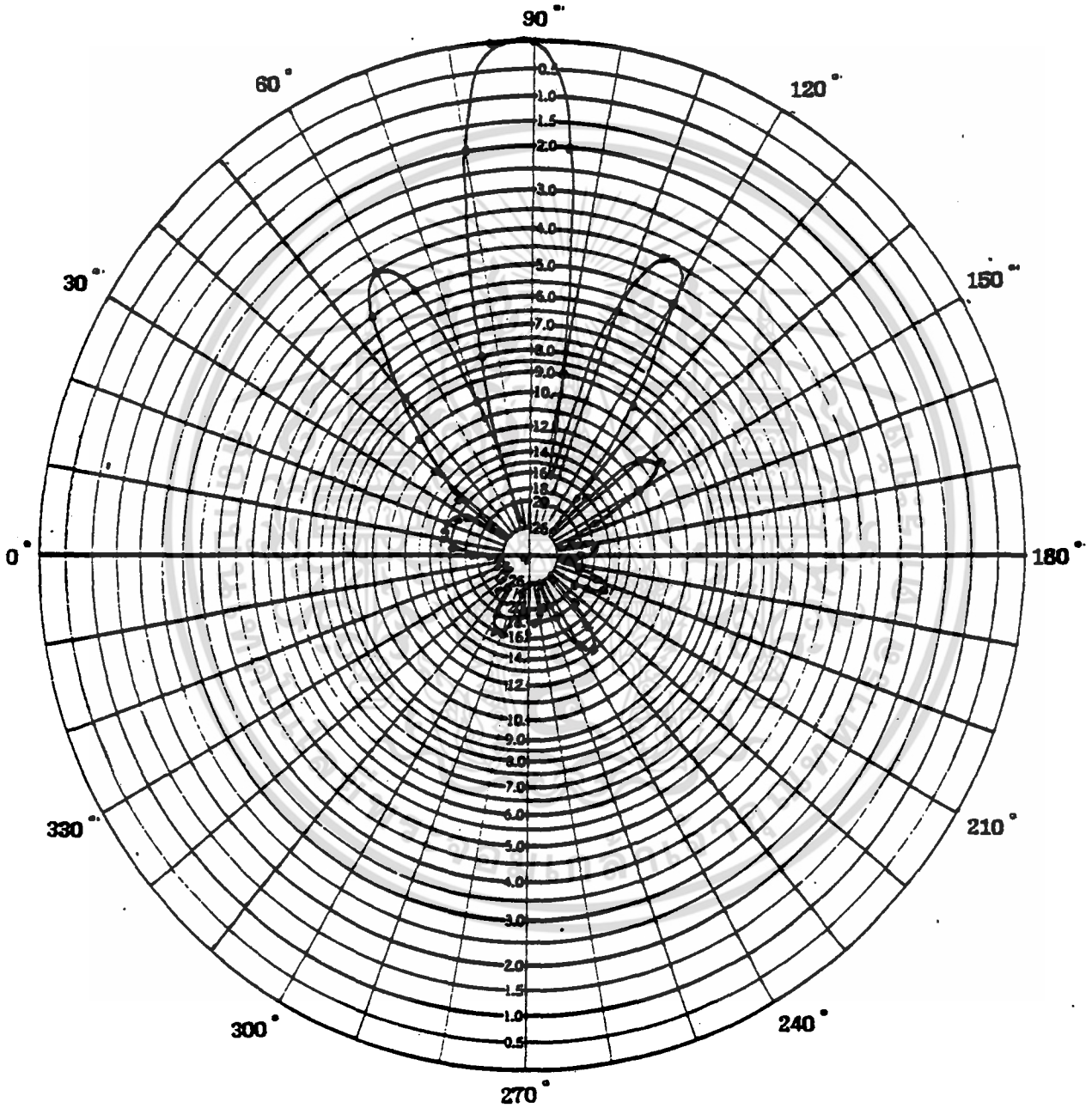
รูปที่ 8.34 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ ความถี่ 920 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



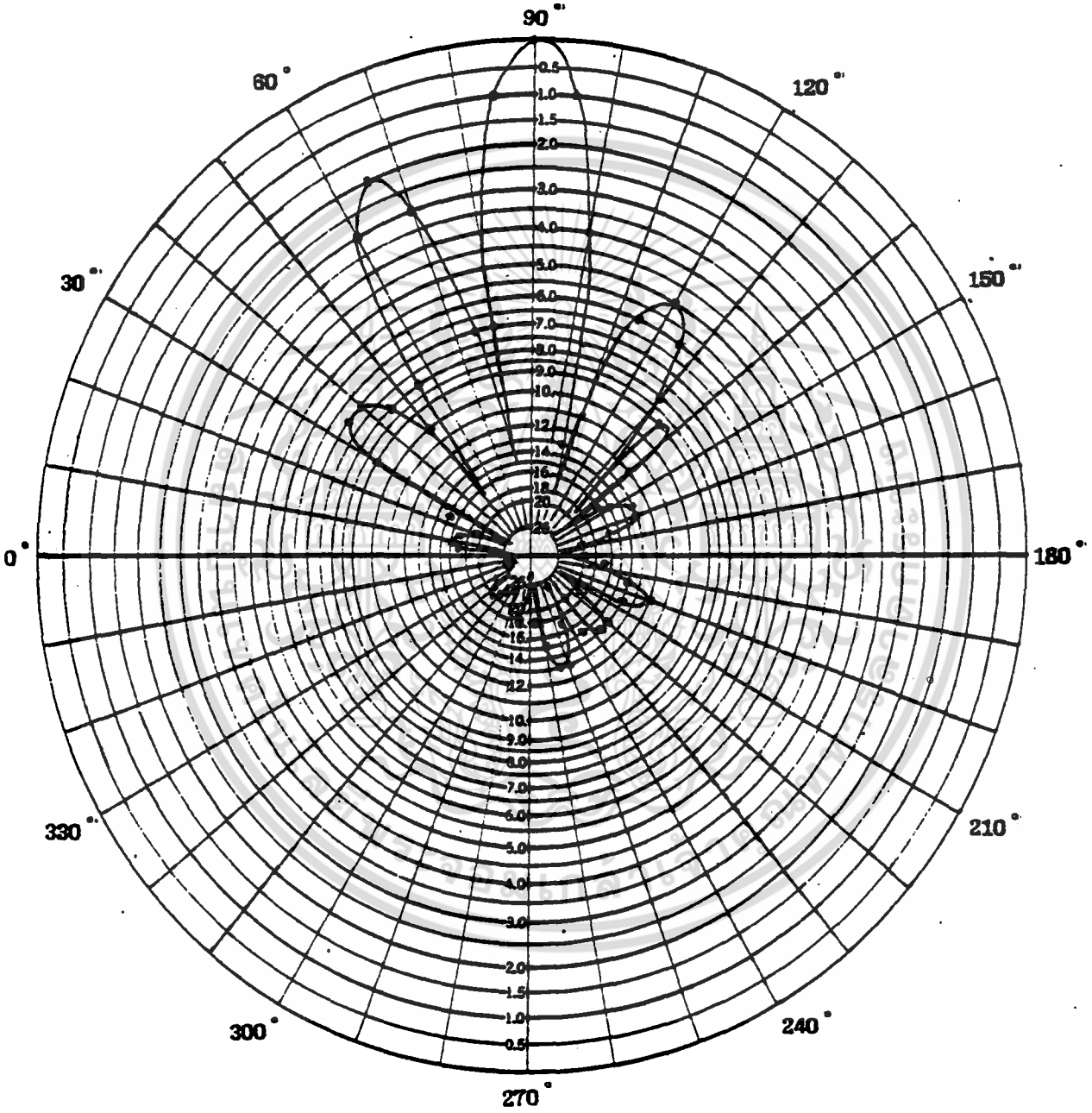
รูปที่ 8.35 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน ความถี่ 880 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



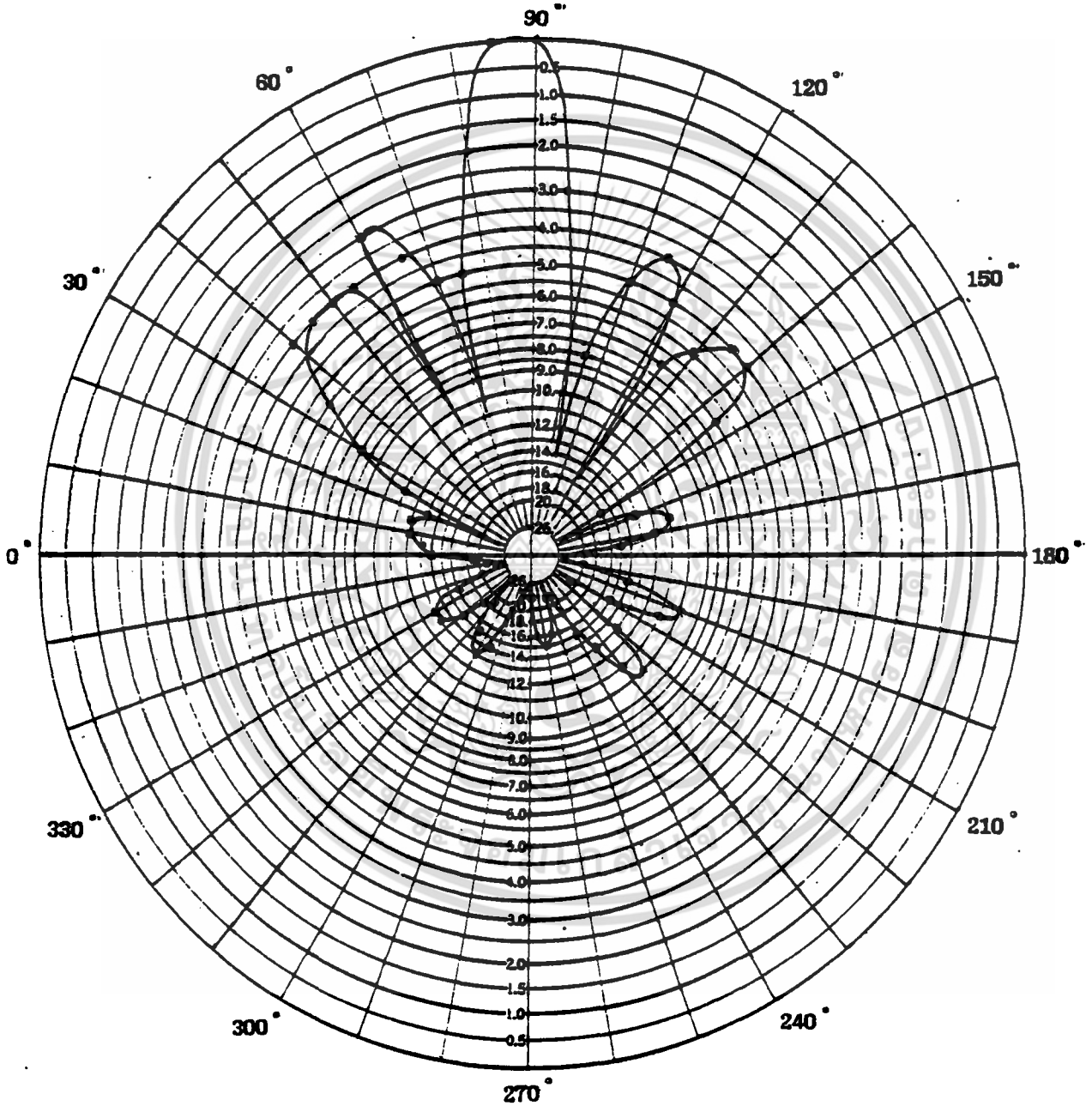
รูปที่ 8.36 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน ความถี่ 900 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.37 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน ความถี่ 915 MHz

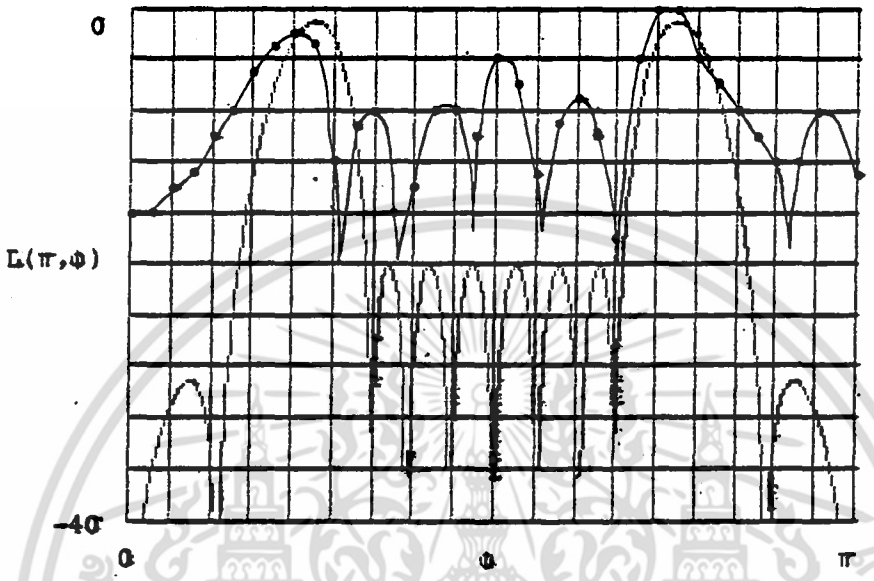
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.38 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน ความถี่ 920 MHz

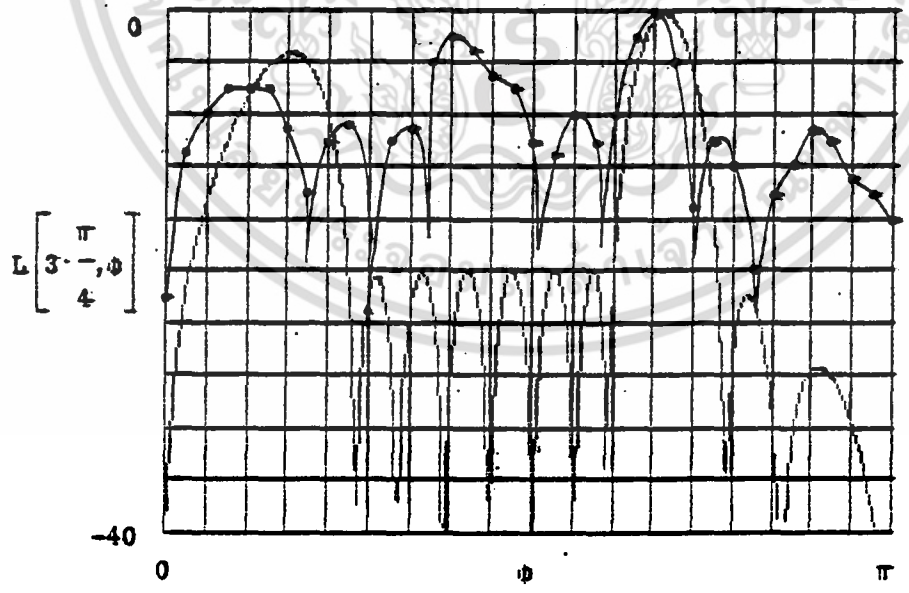
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8-2-4 การเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธที่สถานะต่างๆ สำหรับโคออร์ดิเนตแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 8.39 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 1(β=180°)

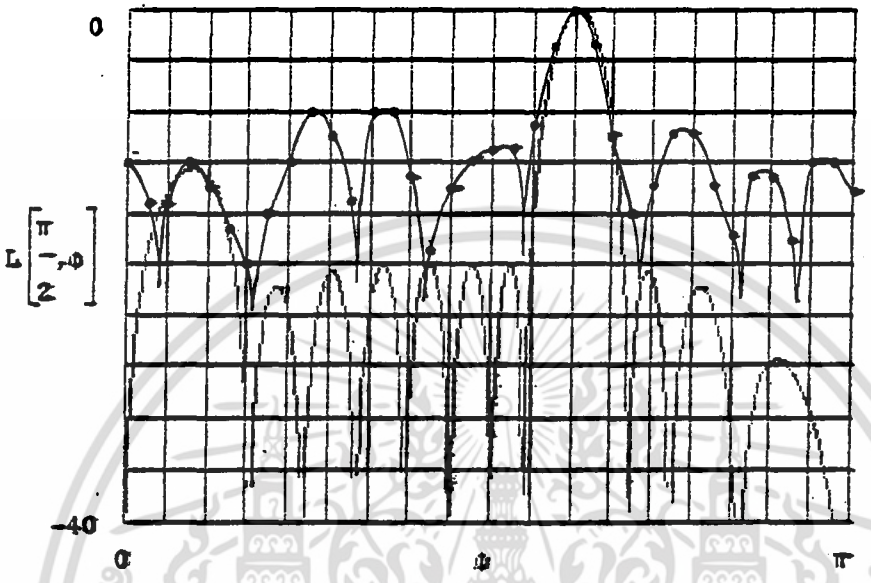
——•—— จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี



รูปที่ 8.40 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 2(β=135°)

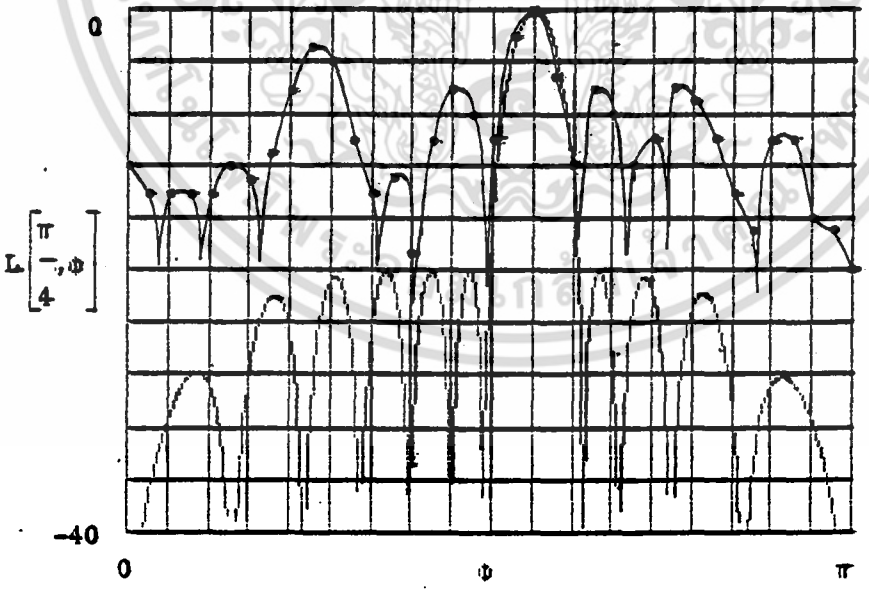
——•—— จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.41 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 3(β=90°)

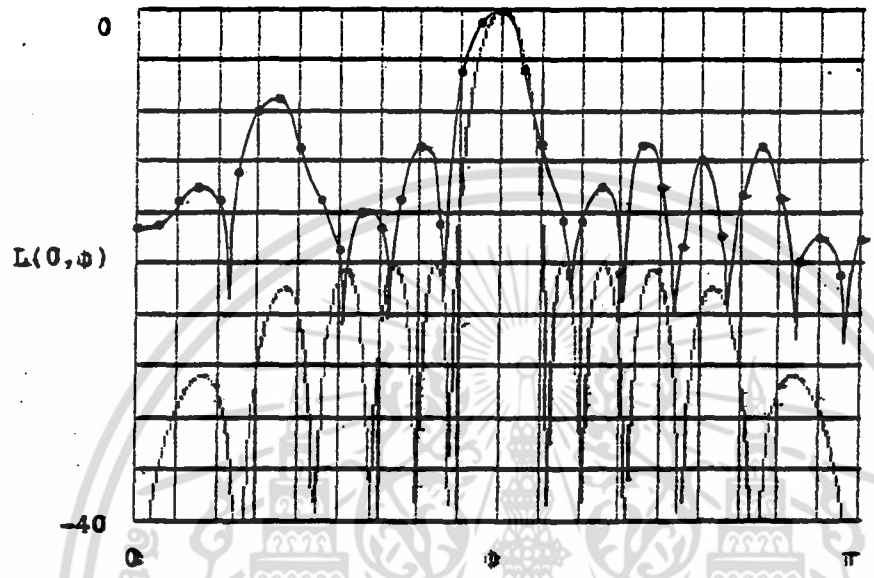
●——● จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี



รูปที่ 8.42 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 4(β=45°)

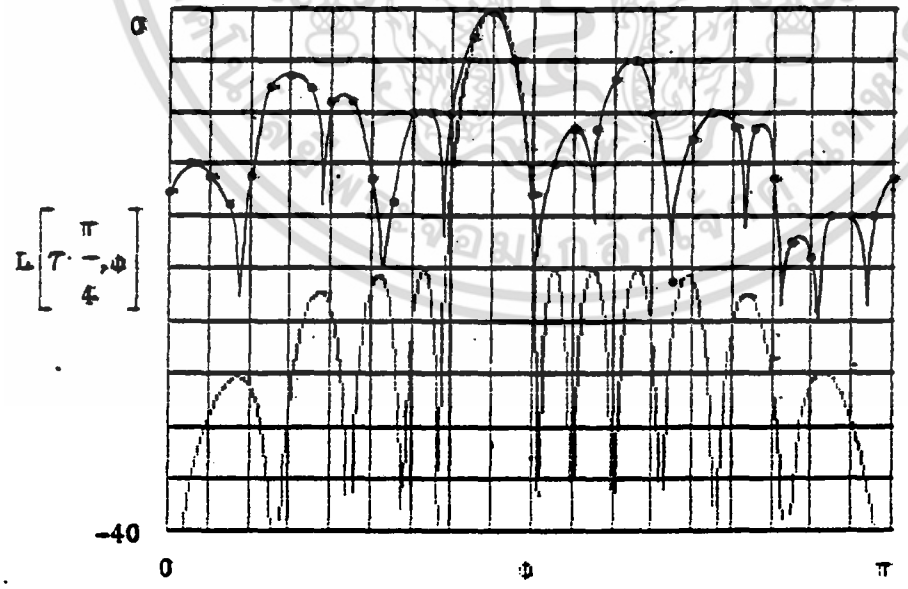
●——● จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.43 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 5(β=0°)

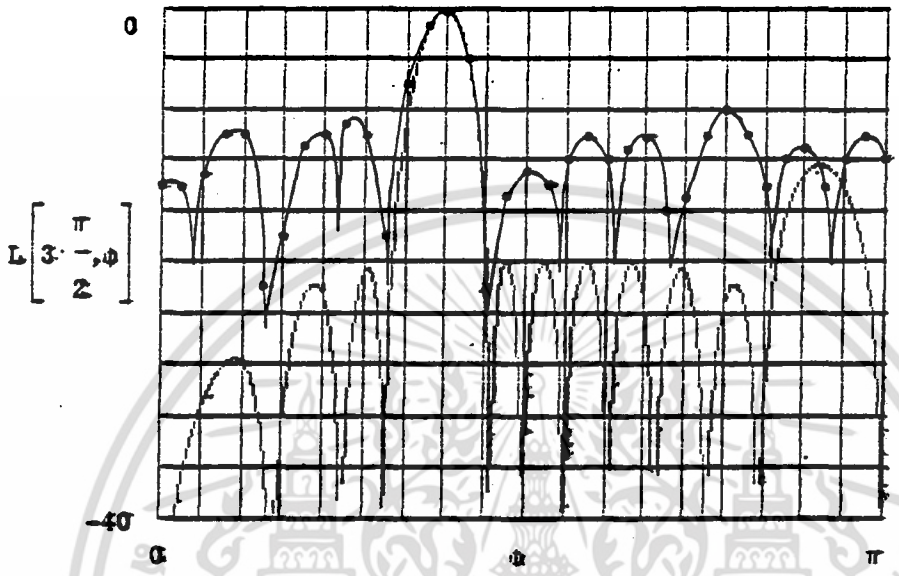
——●—— จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี



รูปที่ 8.44 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 6(β=315°)

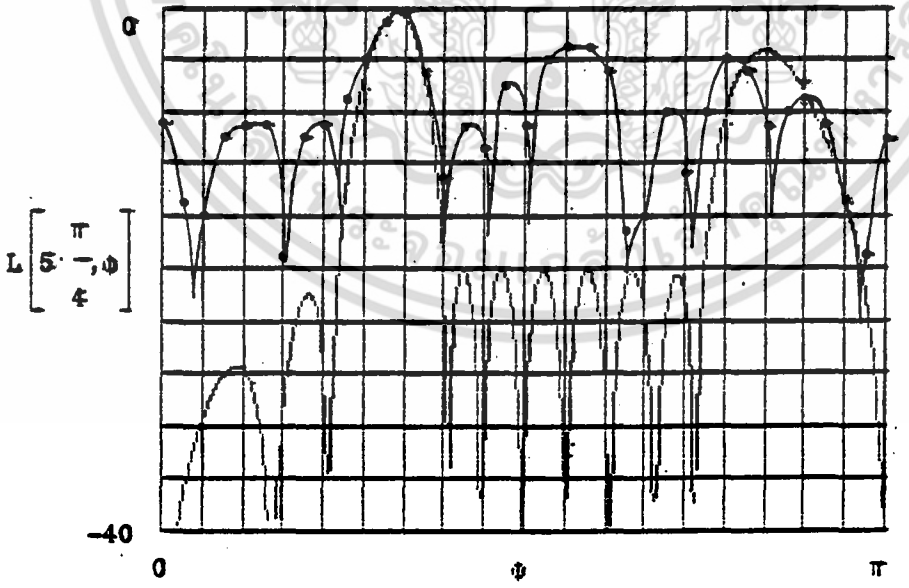
——●—— จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.45 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 7(β=270°)

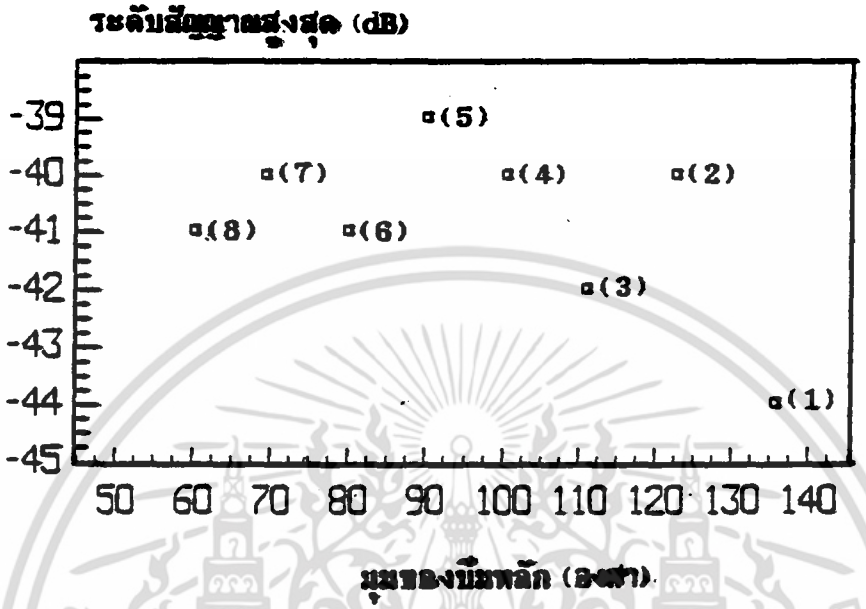
●——● จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี



รูปที่ 8.46 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 8(β=225°)

●——● จากการทดลอง ——— จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับสัญญาณสูงสุดของบีมหลัก และมุมของบีมหลัก ในสถานะต่างๆ ที่ความถี่ 915 MHz

ระนาบที่วัด	เกนของสายอากาศ (dB_d)
อะซิมุธ	+5
เอลีเวชัน	+5

ตารางที่ 8.4 แสดงผลการวัดเกนของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ในสถานะที่ 5 เปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9
บทสรุปและวิจารณ์

สายอากาศเฟสอาร์เรย์ที่สร้างขึ้น จากวิธีการคำนวณออกแบบสร้างในบทที่ 7 และทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงไว้ในบทที่ 8 นั้น จะขอกล่าวสรุปแยกเป็นประเด็นสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติ ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ดังนี้

9-1 ส่วนของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน

โดยที่วงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน เป็นส่วนที่นำมาใช้งานจริง สำหรับการสร้างสายอากาศดังกล่าว และได้ผลการทดลอง ดังแสดงด้วยกราฟรูปที่ 8.10 เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่า วงจรเลื่อนเฟสที่นำมาใช้งานนี้ มีค่าอินเสิร์ทชันลอส ที่สูงกว่าค่าอินเสิร์ทชันลอส ของวงจรเลื่อนเฟสที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปประมาณ 1-2 dB ทั้งนี้เนื่องจากการเลือกใช้สารรองรับ (Substrate) ที่เป็นอีพ็อกซี่ (Epoxy) ในการสร้างไมโครสตริพไลน์ เป็นวงจรบรานช์ไลน์ไฮบริดคัปเปลอร์และวงจรแมทชิ่ง มีค่าไดอิเล็คตริคลอส(Dielectric Loss) ที่สูงพอสมควร จึงทำให้เกิดค่าอินเสิร์ทลอสสูงตามที่แสดงไว้ในผลการทดลอง

ส่วนคุณสมบัติของการสะท้อนกลับของสัญญาณ เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 8.11 แล้ว จะแสดงให้เห็นว่า วงจรเลื่อนเฟสที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำมาใช้งานได้จริง เนื่องจากมีค่ารีเทิร์นลอสที่สูงพอสมควร โดยอาจจะประมาณจากค่าของ VSWR ในกราฟรูปที่ 8.12 ก็ได้ ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า 1.7 : 1 สำหรับความถี่ที่ออกแบบคือ 915 MHz ทั้งนี้คิดว่าควรจะเป็นผลที่ได้จากเทคนิคในการสร้างวงจรเลื่อนเฟสขนาด 1 บิท แยกกันจึงทำให้สามารถออกแบบวงจรแมทชิ่งให้มีคุณสมบัติการสะท้อนสัญญาณที่ดีพอใช้ เมื่อนำมาต่อรวมกันเป็น 3 บิท

แต่อย่างไรก็ดี ประเด็นสำคัญของการใช้งานวงจรเลื่อนเฟส ก็คือได้ผลการทดสอบเฟสที่เลื่อนไป (Phase Shift) เป็นที่น่าพอใจ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.1 ซึ่งจะเห็นว่าในบิทที่ 0 ($\Delta\phi = 45^\circ$) นั้นมีค่าผิดพลาดไปจากค่าที่ต้องการ 30° ส่วนในบิทที่ 2 ($\Delta\phi = 180^\circ$)มีค่าผิดพลาดไปจากค่าที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าเล็กน้อยคือ 35° แต่ในบิทที่ 1 ($\Delta\phi$ = 90°) ได้ผลตรงตามที่ต้องการ เมื่อนำค่าของมุมเฟสเหล่านี้ ตามที่ได้จากผลการทดสอบ ในตารางที่ 8.1 มาแทนค่าเพื่อหามุมของบีมหลักในทิศทางใหม่ เช่นเดียวกับที่ได้คำนวณไว้ในตารางที่ 8.2 จะได้ผลการคำนวณใหม่ ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 9.1 เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผล การทดสอบคุณสมบัติรูปแบบการกระจายคลื่น ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ต่อไป

สถานะที่	β	θ_o
1	145°	125.1°
2	165°	130.9°
3	90°	110.9°
4	75°	107.3°
5	0°	90.0°
6	310°(-50°)	78.6°
7	235°(-125°)	60.3°
8	220°(-140°)	56.3°

ตารางที่ 9.1 แสดงการเปลี่ยนทิศทางของบีมหลัก 8 ทิศทาง เมื่อเปลี่ยนสถานะของวงจรเลื่อนเฟส(ที่สร้างขึ้นใช้งานจริง)

9-2 ส่วนของสายอากาศเฟสอาร์เรย์

สำหรับส่วนการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศเฟสอาร์เรย์นั้น จะมุ่งเน้นไปที่รูปแบบการกระจายคลื่น โดยเฉพาะในระนาบอะซิมุธ ซึ่งได้กำหนดให้มีการกวาดทิศทางของบีมหลัก ส่วนในระนาบเอลีเวชัน จะได้กล่าวสรุปประกอบไว้พอสังเขป แต่ก่อนอื่นจะขอแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับคุณสมบัติของการสะท้อนสัญญาณของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ทั้งระบบ ซึ่งในที่นี้มีความหมายรวมถึง ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเลื่อนเฟส และส่วนป้อนกระแสสัญญาณให้แก่สายอากาศด้วย ตามที่ได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 8.21 มีค่ารีเทิร์นลอสเท่ากับ 10 dB ณ ความถี่ที่ออกแบบเท่ากันในทุกสถานะ เมื่อเปลี่ยนสถานะของวงจรเลื่อนเฟสเพื่อปรับทิศทางไป ทำให้พอจะกล่าวได้ว่าสายอากาศนี้ออกแบบได้ตรงกับความถี่ที่ออกแบบ แต่ก็ยังมีค่ารีเทิร์นลอสที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวงจรเลื่อนเฟสเพียงตัวเดียว ซึ่งในกรณีนี้จะพิจารณาได้จากค่า VSWR ดังได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 8.22 มีค่าเท่ากับ 1.93 : 1 หรือหมายความว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสัญญาณ(โวลเตจ) เท่ากับ 31.6% ณ ความถี่ที่ออกแบบ เท่ากันในทุกสถานะ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศเฟสอาร์เรย์ที่ได้สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานได้ สำหรับกรณีเป็นสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณ แต่ในกรณีที่ต้องการใช้เป็นสายอากาศส่ง จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงให้มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนสัญญาณที่น้อยกว่านี้ หรือมีค่า VSWR ที่เข้าใกล้ค่า 1.0 : 1 จึงจะถือว่ามีค่าอิมพีแดนซ์ที่แมทช์กันดี

9-2-1 รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ

จากผลการทดลองวัดรูปแบบการกระจายคลื่น ในระนาบอะซิมุธ ซึ่งมีสถานะของการกวาดบีมหลัก 8 สถานะ ตามรูปที่แสดงไว้ในกราฟแบบวงกลม (Polar Graph) ตั้งแต่รูปที่ 8.23 ถึงรูปที่ 8.30 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (ก) ส่วนที่ได้จากการทดลอง และ (ข) ส่วนที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีด้วยโปรแกรม MathCAD 2.5 จะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มในการกวาดบีมหลักใกล้เคียงกับ ผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี กล่าวคือ มีความผิดพลาดของมุมของบีมหลักน้อยมาก และเมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณเพื่อหาค่ามุมของบีมหลักตามสมมการที่ (8.1) ได้ผลลัพธ์ใหม่ตามตารางที่ 9.1 จะเห็นว่า มีค่าผิดพลาดไปจากผลลัพธ์นี้เพียง 4 สถานะ คือ ในสถานะที่ 1,2,4 และ 7 ส่วนในสถานะอื่นๆยังคงให้ผลการคำนวณเท่าเดิมหรือใกล้เคียงกับค่าเดิม ในตารางที่ 8.2 มาก ซึ่งค่าผิดพลาดที่ได้จากการวัดรูปแบบการกระจายคลื่นทั้ง 4 สถานะนั้น ก็ยังมีค่าผิดพลาดที่ไม่มากนัก คือ ไม่เกิน 10° ในสถานะที่ 1 และน้อยกว่า 10° ในสถานะที่เหลืออีก 3 สถานะ ดังนั้นอาจจะกล่าวสรุปได้ว่า การออกแบบสร้างสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ตามขั้นตอนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้ ให้ผลในการกวาดบีมหลักที่ดี เป็นที่น่าพอใจมาก

สำหรับการพิจารณาคุณสมบัติอื่นๆ คือ ระดับของไซด์โหลบ ซึ่งในการคำนวณออกแบบ ของระนาบอะซิมุธ ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20 dB แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายคลื่น ที่สถานะต่างๆ กับการคำนวณตามทฤษฎี บนกราฟรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Graph) ที่มีสเกลเดียวกัน ตามกราฟรูปที่ 8.39 ถึงรูปที่ 8.46 จะเห็นได้ชัดเจนว่า มีระดับไซด์โหลบน้อยกว่าที่ได้คำนวณออกแบบไว้ คือ มีค่าระดับไซด์โหลบจากการทดลองวัดประมาณ 10 dB โดยเฉลี่ย ที่ทุกสถานะของการกวาดบีมหลัก ทั้งนี้โดยการค้นคว้าจากเอกสารอ้างอิงที่ [15] ได้อธิบายไว้ว่า ในการออกแบบสายอากาศเฟสอาร์เรย์นั้น จะมีคุณสมบัติของรูปแบบการกระจายคลื่น ไม่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ตามทฤษฎี มีสาเหตุมาจากอิทธิพลของความผิดพลาด 3 ประการ ดังนี้ คือ

1. ผลของความไม่แน่นอน ในวงจรเลื่อนเฟส ที่มีค่าผิดพลาดของการเลื่อนเฟส (Phase Shift Error) โดยได้กำหนดให้ค่าผิดพลาดนี้ (δ) ไม่ควรจะเกินกว่าเงื่อนไขในสมการที่ (9.1) [15] ดังนี้

$$\delta = \frac{2\pi}{2^m} \qquad (9.1)$$

โดยที่ m เป็นจำนวนบิทที่สูงที่สุด ของวงจรเลื่อนเฟส

ดังนั้นตามวิทยานิพนธ์นี้ จะต้องมีค่าความผิดพลาดไม่เกินไปกว่า 45° เมื่อจำนวนบิทสูงสุดของวงจรเลื่อนเฟส ที่ใช้งานจริงเท่ากับ 3 บิท ค่าผิดพลาดนี้ ก็ยังอยู่ในเงื่อนไข ที่จะทำให้ทิศทางของบีมหลักที่ได้จากการทดลอง ไม่ผิดพลาดไปมากนัก แต่จะไปส่งผลให้รูปแบบการกระจายคลื่นเลวลง (Pattern Degradation) กล่าวคือ ทำให้ระดับไซด์โหลบ มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ในการคำนวณออกแบบ

2. ความผิดพลาดของสายอากาศไดโพลแต่ละเอลีเมนท์ (Element Failures in Phased Array) เนื่องจากสายอากาศไดโพลที่ใช้ในการทำเป็นอาร์เรย์แบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Planar Array) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

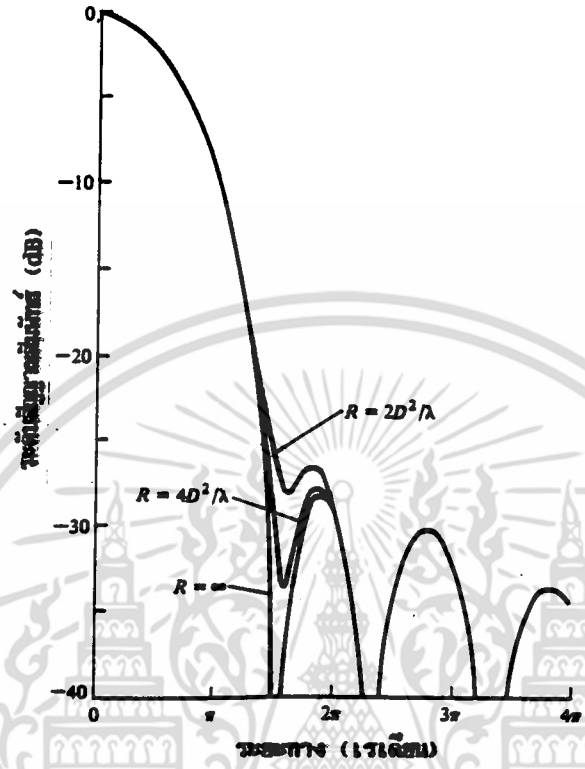
คุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันทุกประการ (Identical) ทั้ง 32 เอลีเมนท์ ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการกระจายคลื่น หรือการแมทชิ่งของสายอากาศแต่ละอลีเมนท์ จึงเป็นผลให้เกิดรูปแบบการกระจายคลื่นเลวลง เช่นเดียวกับอิทธิพลข้อแรก

3. ผลของความผิดพลาดในระบบ (Systematic Errors) ได้แก่ ส่วนป้อนกระแสสัญญาณให้แก่สายอากาศ คือวงจรแบ่งแยกกำลังและวงจรลดทอนสัญญาณ แต่ที่คิดไว้ในการสร้างสายอากาศเฟสอาร์เรย์นี้ส่วนวงจรลดทอนสัญญาณแบบพาย-เน็ทเวิร์ค รีซิสทีฟ น่าจะเป็รส่วนที่มีผลมากที่สุดในระบบ กล่าวคือ ในการเลือกใช้ค่าความต้านทาน ไม่ได้ตรงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ทำให้ส่วนป้อนกระแสสัญญาณแก่ระบบสายอากาศนี้ มีค่าที่ผิดพลาด จึงเป็นผลให้รูปแบบการกระจายคลื่น ที่ได้จากการทดลอง มีระดับของไซด์โหลบ น้อยกว่าที่ได้คำนวณออกแบบไว้ ซึ่งอิทธิพลนี้ น่าจะมีผลมากที่สุด สำหรับอธิบายสาเหตุของการที่ระดับของไซด์โหลบ มีค่าตามผลการทดลอง

นอกจากนี้ ในการวัดรูปแบบการกระจายคลื่นที่ต้องใช้สนามระยะไกล เนื่องจากสายอากาศมีขนาดใหญ่ จึงทำให้ต้องใช้ระยะทางในการวัด ที่เป็นสนามระยะไกลมีค่ามาก คือประมาณมากกว่า 30 เมตร โดยที่ความเป็นจริงในการทดลองวัด ได้เลือกใช้พื้นที่ภายในโรงยิมเนเซี่ยม มีระยะทางที่ใช้ในการวัดประมาณ 21 เมตร ซึ่งน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ทำให้รูปแบบการกระจายคลื่นมีระดับไซด์โหลบ ที่น้อยกว่า ค่าที่กำหนดไว้ในการออกแบบ โดยเหตุผลดังกล่าวนี้จะแสดงด้วยกราฟรูปที่ 9.1 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นเปรียบเทียบที่ระยะต่างๆ [4] จะเห็นว่าที่สนามระยะไกลมากกว่า จะได้รูปแบบการกระจายคลื่นที่มีระดับไซด์โหลบ มากกว่าสนามที่ระยะไกลน้อยกว่า

ส่วนผลการวัดรูปแบบการกระจายคลื่น ในสถานะที่ 5 เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ไปจากความถี่ที่ออกแบบ และได้ผลการทดลองดังแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 8.31 ถึง รูปที่ 8.34 จะเห็นได้ว่ามีรูปแบบการกระจายคลื่น ที่เหมือนกันในย่านความถี่ที่วัดมานี้ โดยมีทิศทางของบีมหลัก อยู่ที่มุม 90° คือ ด้านหน้าของสายอากาศ (ที่สถานะของการเลื่อนเฟสเป็นมุม 0°) เป็นรูปแบบการกระจายคลื่นแบบบรอดไซด์ (Broadside)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.1 แสดงรูปแบบการกระจายคลื่นเปรียบเทียบที่ระยะต่างๆ

9-2-2 รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน

โดยที่ในระนาบนี้ ได้กำหนดให้มีการออกแบบเป็นเซคเตอร์แพทเทิร์น แต่เมื่อวัดคุณสมบัติของรูปแบบการกระจายคลื่น เปรียบเทียบกันในความถี่ต่างๆ เช่นเดียวกับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปในระนาบอะซิมุธ ได้ผลดังแสดงไว้ในกราฟ รูปที่ 8.35 ถึง รูปที่ 8.38 จะเห็นว่าที่ความถี่ 800 MHz และ 900 MHz มีรูปแบบการกระจายคลื่นที่เหมือนกัน และไม่ใกล้เคียงกับเซคเตอร์แพทเทิร์น แต่สำหรับที่ความถี่ 915 MHz และ 920 MHz โดยเฉพาะที่ความถี่ 920 MHz มีรูปแบบการกระจายคลื่นที่พอจะมองว่าคล้ายกับเซคเตอร์แพทเทิร์น โดยพิจารณาจากระดับของไซด์โหลบ ที่น้อยกว่าสองความถี่แรก ทั้งนี้และทั้งนั้น ก็ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง ที่ไม่เป็นเซคเตอร์แพทเทิร์นตามต้องการ เนื่องจากมีอิทธิพลของความผิดพลาด 3 ประการ เช่นเดียวกับในระนาบอะซิมุธ ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อิทธิพลของส่วนป้อนกระแสสัญญาณ ในส่วนของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดทอนสัญญาณ จะมีผลมากที่สุด ซึ่งมีค่าผิดพลาดมาจากความต้านทาน ที่ใช้ในการสร้างวงจรลดทอนสัญญาณแบบพาย-เน็ทเวิร์ครีซิสทีพ จึงทำให้รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบนี้ผิดพลาดไป

9-2-3 เกนเปรียบเทียบของสายอากาศเฟสอาร์เรย์

จากตารางที่ 8.4 แสดงผลการวัดเกนของสายอากาศ ในสถานะที่ 5 เปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียว ได้ค่าเกนเท่ากัน +5 dB_i ทั้งสองระนาบเท่ากัน หรือประมาณ +7.15 dB_i ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่น้อยกว่าที่ค่าที่ควรจะเป็น ตามการคำนวณโดยประมาณ ทั้งนี้เนื่องจากในระบบสายอากาศ มีการสูญเสียไปกับอินเสิร์ทชันลอส ขององค์ประกอบ (Components) แต่ละตัว ได้แก่ วงจรเลื่อนเฟส วงจรแบ่งแยกกำลัง วงจรลดทอนสัญญาณ และรวมทั้งสายอากาศไดโพลที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (Identical) และไม่แมทช์กันที่ความถี่ 915 MHz ทั้งหมด 32 เอลีเมนท์

ส่วนในรูปกราฟแสดงผล ความสัมพันธ์ระหว่างระดับสัญญาณสูงสุดของบีมหลักและมุมของบีมหลัก ในสถานะต่างๆ ที่ความถี่ 915 MHz ตามรูปที่ 8.47 จะเป็นส่วนที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อทิศทางของบีมหลักเปลี่ยนไป จากทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ จะทำให้เกนของสายอากาศลดลงได้ คงมีเพียงในสถานะที่ 5 คือสถานะที่สายอากาศทุกเอลีเมนท์มีเฟสเดียวกัน ที่มีเกนสูงสุด

9-3 สรุปและเสนอแนะ

จากผลการออกแบบสร้าง และทดสอบคุณสมบัติของ สายอากาศเฟสอาร์เรย์ดังกล่าว จนสามารถสรุปวิเคราะห์ข้อดีข้อเสีย ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นของบทนี้ โดยที่ในบทนำได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ไว้แล้ว ว่าเป็นการศึกษาพื้นฐานของสายอากาศเรดาร์ ที่มีการกวาดทิศทางของบีมหลักด้วยวิธีทางไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบ การเรียนและการทดลองให้แก่นักศึกษา ของภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาวิชาสายอากาศ โดยเฉพาะสายอากาศอาร์เรย์ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้สายอากาศนี้ มีความสมบูรณ์มากขึ้น จึงควรได้มีการพัฒนาปรับปรุงต่อไป สำหรับความคิดของผู้เขียนในตอนนี้ คิดว่ามีจุดที่น่าสนใจในการพัฒนาสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ดังนี้ คือ

1. การสร้างส่วนควบคุมวงจรเลื่อนเฟส เพื่อให้กวาดบีมหลักด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยส่วนควบคุมนี้จะใช้สัญญาณทางดิจิตอลในการควบคุม มีการสร้างวงจรอินเตอร์เฟส (Interface) กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำให้สามารถเขียนโปรแกรม ควบคุมการกวาดทิศทางของบีมหลักได้

2. ส่วนของวงจรเลื่อนเฟสขนาด 3 บิท รวมกัน ควรจะได้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาให้ได้วงจรเลื่อนเฟส 3 บิท ที่ใช้วงจรไบบริดคัปเปลอร์ เพียงตัวเดียวร่วมกันได้ เพื่อเป็นการลดค่าอินเสิร์ทชันลอสลงได้ ทั้งนี้อาจจะมีการเลือกใช้สารรองรับชนิดอื่น ที่มีค่าไดอิเล็คตริคลอสที่ต่ำ ซึ่งก็จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูงขึ้น อย่างไรก็ดี ในอนาคตอาจจะหาสารรองรับที่มีค่าไดอิเล็คตริคลอสต่ำ ได้ง่ายกว่านี้ ก็เป็นได้

3. ในส่วนของเอลีเมนท์สายอากาศ ถ้าหากต้องการออกแบบสร้างที่ความถี่สูงมากกว่านี้ อาจจะใช้สายอากาศแบบอื่น นอกจากสายอากาศไดโพลที่ใช้อยู่นี้ก็ได้ ซึ่งขนาดและรูปร่างของสายอากาศ ก็จะเล็กลงและสะดวกในการวัดคุณสมบัติรูปแบบการกระจายคลื่นอีกด้วย ส่วนพินไดโอดก็จะต้องเปลี่ยนไปใช้เบอร์ใหม่แทน เพื่อให้ทำงานที่ความถี่สูงมากกว่านี้ได้

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนหวังว่าสายอากาศเฟสอาร์เรย์ต้นแบบนี้ คงจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่จะนำไปใช้งาน ตามวัตถุประสงค์ที่ได้มุ่งหวังไว้ และถ้าหากมีผู้สนใจที่จะศึกษาวิจัยต่อไป ก็คงจะได้แนวความคิดและความรู้ทางด้านเทคนิคจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตามที่ผู้เขียนได้เต็มใจอุทิศไว้ให้แก่การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านโทรคมนาคมของประเทศสืบไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] W.L.Stutzman and G.A.Thiele, " ANTENNA THEORY AND DESIGN ",John Wiley & Sons,New York,1981.

[2] P.J.Kahrilas, " Design of Electronic Scanning Radar Systems ",Proc. of the IEEE, pp.1763-1771, November 1968.

[3] M.I.Skolnik, " Radar Handbook ", McGraw-Hill Book Company, New York,1970.

[4] C.A.Balanis," Antenna Theory: Analysis and Design ", John Wiley & Sons ,New York ,1982.

[5] R.S.Elliott," Antenna Theory and Design ", Prentice-Hall of India Private Limited ,New Delhi ,1981.

[6] J.F.White," Diode Phase Shifters for Array Antennas" ,IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,vol. MTT-22, No.6, pp.658-674, June 1974.

[7] R.Ekinge and J.P.Starski,"Design Recommendation for Stripline Diode Phase Shifters", Ericsson Technics, vol.34 NO.1,1978.

[8] Tri T.Ha, " Solid-State Microwave Amplifier Design " ,John Wiley & Sons ,New York,pp.60-62,1981.

[9] Y.T.Lo and S.W.Lee," Antenna Handbook ",Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1988.

[10] M.T.Ma, " Theory and Application of Antenna Arrays " ,John Wiley & Sons, New York, 1974.

[11] J.P.Starski, "Optimization of the matching network for a hybrid coupler phase shifter",IEEE vol.MTT-25, pp.662-666,Aug,1977.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] H.A.Atwater ,"Reflectiion Coefficient Transformation for Phase Shifter Circuits" ,IEEE vol.MTT-28, pp.563-568,June,1980.

[13] I.Bahl and P.Bhartia, "Microwave Solid State Circuit Design", John Wiley & Sons, New York, 1988.

[14] กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์, โมไนย ไกรฤกษ์, วิวัฒน์ กิรานนท์, " วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้พินไดโอด ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 152-161, พฤศจิกายน, 2532.

[15] Benjamin Rulf, Gregory A.Robertshaw, "Understanding Antennas for Radars, Communications and Avionics" , Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp.159-191, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

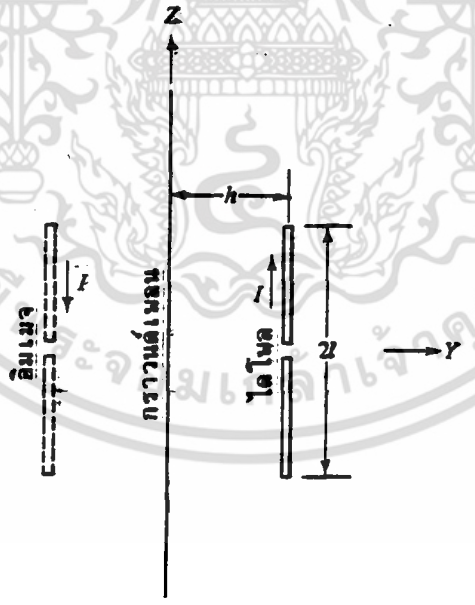
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
สนามของสายอากาศไดโพลเหนือบนกราวนด์เพลน

การคำนวณหาสนามลัพธ์ของสายอากาศไดโพลเหนือบนกราวนด์เพลน จะแสดงลักษณะการวางเอลีเมนท์ บนโคออร์ดิเนต (X,Y,Z) ไว้ในรูปที่ ก.1 โดยมีสนามลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ[5] ดังนี้ คือ

$$\vec{E}(\theta,\phi) = \frac{-4jI_m}{k\sin\theta}\left[(\cos(kl\cos\theta)-\cos kl\right]\sin(kh\sin\theta\sin\phi) \qquad (ก.1)$$

โดยในที่นี้มุม θ เป็นมุมที่วัดจากแกน Z ไปยังแกน -Z มีค่าเท่ากับ 0 ถึง π ดังแสดงในรูปที่ ก.1 ในขณะที่มุม ϕ เป็นมุมที่วัดในระนาบ X-Y โดยที่ค่า $\phi = 0$ มีทิศพุ่งออกมา และค่า $\phi = \pi$ มีทิศพุ่งเข้าไปในกระดาษ



<u>รูปที่ ก.1</u> แสดงลักษณะการวางสายอากาศไดโพลเหนือบนกราวนด์เพลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (ก.1) จะเห็นว่าสนามลัพธ์หรือรูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลเหนือบนกราวนด์เพลน มีค่าเท่ากับสนามของสายอากาศไดโพลเดี่ยว คูณกับค่าตัวประกอบ $2j(\sin(kh\sin\theta\sin\phi))$

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบให้มีระยะห่าง $h = \frac{\lambda}{4}$ และความยาวของไดโพลเป็น $\frac{\lambda}{2}$ ซึ่งจะได้ค่า $l = \frac{\lambda}{4}$ เมื่อแทนค่า h, l และค่ามุม $\theta = \frac{\pi}{2}$ จะได้รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบอะซิมุธ ที่นอร์มอลไลซ์แล้ว ตามสมการ (ก.2) ดังนี้ คือ

$$\vec{E}_n(\tfrac{\pi}{2},\phi) = \sin(\tfrac{\pi}{2}.\sin\phi) \qquad (ก.2)$$

โดยนำค่าสนามลัพธ์ของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียว ที่ได้จากสมการ (ก.2) นี้ ไปคูณกับตัวประกอบอาร์เรย์ของสายอากาศเฟสอาร์เรย์ ตามหลักการคูณรูปแบบการกระจายคลื่น ของสายอากาศอาร์เรย์ ในระนาบอะซิมุธ ที่มีระดับไซด์โหลบต่ำ และบีมวิดธ์แคบ ก็จะได้สนามลัพธ์ของสายอากาศในระนาบอะซิมุธ

ในทำนองเดียวกัน เมื่อแทนค่ามุม ϕ เท่ากับ $\frac{\pi}{2}$ จะได้รูปแบบการกระจายคลื่นในระนาบเอลีเวชัน ที่นอร์มอลไลซ์แล้ว ตามสมการ (ก.3) ดังนี้ คือ

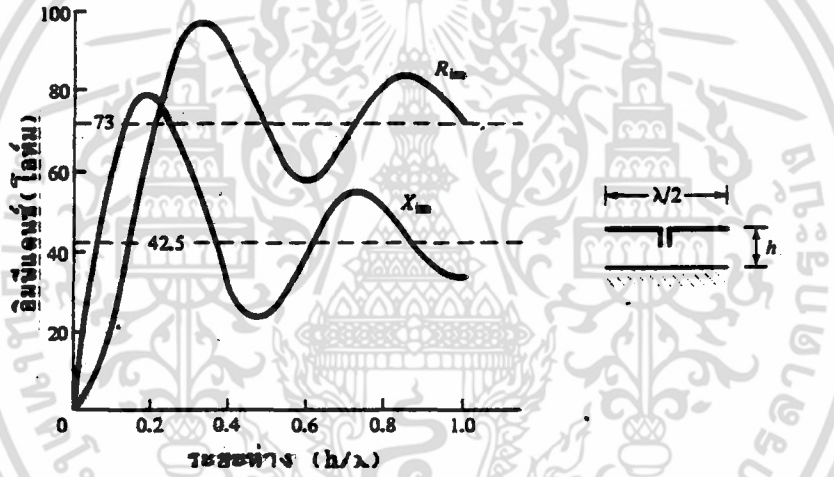
$$\vec{E}_n(\theta,\tfrac{\pi}{2}) = \cos(\tfrac{\pi}{2}.\cos\theta)\frac{\sin(\pi/2.\sin\theta)}{\sin\theta} \qquad (ก.3)$$

โดยค่าสนามของสายอากาศไดโพลเอลีเมนท์เดียวของระนาบนี้ จะนำไปคูณกับตัวประกอบอาร์เรย์ ที่ออกแบบเป็นเชคเตอร์แพทเทิร์น ก็จะได้สนามลัพธ์ของสายอากาศอาร์เรย์ในระนาบเอลีเวชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลเหนือบนกราวนด์เพลน

จากผลลัพธ์ในภาคผนวก ก. สามารถคำนวณค่า P_{rad} ได้ และนำไปคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่นได้ โดยในภาคผนวกนี้จะแสดงด้วยค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล วางขนานอยู่เหนือบนกราวนด์เพลน เอาไว้ในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล วางขนานอยู่เหนือบนกราวนด์เพลนสัมพันธ์กับระยะห่างจากกราวนด์เพลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
การคำนวณค่า VSWR

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสัญญาณ (Reflection Coefficient) (ρ) มีค่าเท่ากับสมการ (ค.1) ดังนี้

$$\rho = 10^{-RL/20} \qquad \text{(ค.1)}$$

โดยที่ RL เป็นค่ารีเทิร์นลอส (Return Loss) มีหน่วยเป็น dB

การคำนวณค่า VSWR จะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสัญญาณแล้วจึงนำไปแทนค่าในสมการ (ค.2) ดังนี้ คือ

$$\boxed{VSWR = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}} \qquad \text{(ค.2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RL	ρ	VSWR
1	0.891	17.391
2	0.794	8.724
3	0.708	5.848
4	0.631	4.419
5	0.562	3.570
6	0.501	3.010
7	0.447	2.615
8	0.398	2.323
9	0.355	2.100
10	0.316	1.925
11	0.282	1.785
12	0.251	1.671
13	0.224	1.577
14	0.200	1.499
15	0.178	1.433
16	0.158	1.377
17	0.141	1.329
18	0.126	1.288
19	0.112	1.253
20	0.100	1.222

ตาราง ข.1 แสดงผลการคำนวณค่า VSWR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

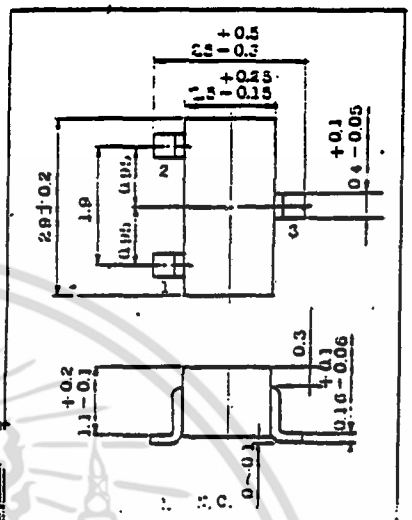
ภาคผนวก ง.

ข้อมูลของพินไดโอด

1SV128

○ VHF・UHFバンド可変減衰器，AGC用

単位：mm



JEDEC	TO-236
EIAJ	SC-59
東芝	1-3D1B

特　長

- 超小型パッケージ（TO-236）
- 低容量：C_T=0.25pF（標準）
- 直列抵抗が小さい：r_s=7Ω
- 少数キャリア蓄積時間が長い：　τ=400ns（標準）

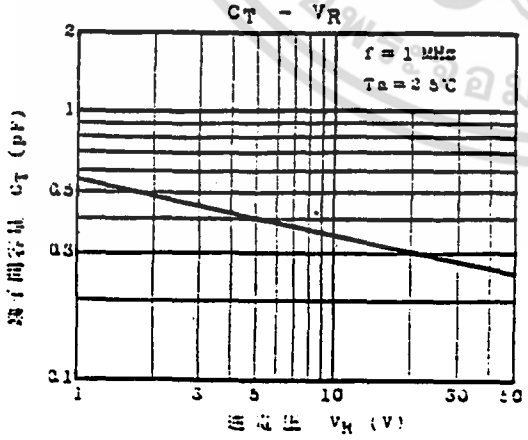
最大定格　（Ta=25℃）

項　　目	記　号	定　格	単　位
逆　電　圧	V_R	50	V
順　電　流	I_F	50	mA
接　合　温　度	T_j	125	℃
保　存　温　度	T_{stg}	−55～125	℃

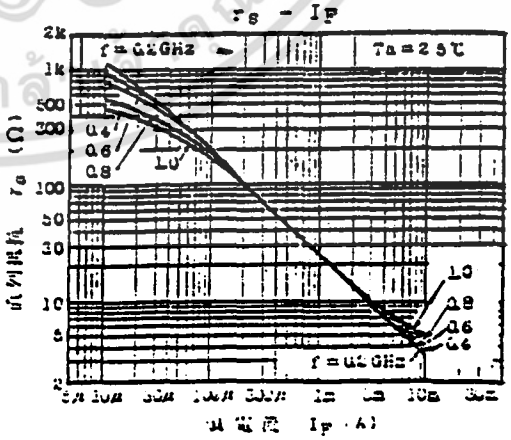
電気的特性　（Ta=25℃）

項　　目	記　号	測　定　条　件	最小	標準	最大	単位
逆　電　圧	V_R	I_R=10μA	50	—	—	V
逆　電　流	I_R	V_R=50V	—	—	0.1	μA
順　電　圧	V_F	I_F=50mA	—	0.95	—	V
端　子　間　容　量	C_T	V_R=30V	—	0.25	—	pF
直　列　抵　抗	r_s	I_F=10mA，f=100MHz	—	7	—	Ω
少数キャリア蓄積時間	τ	I_F=10mA，I_R=6mA	—	400	—	ns

C_T − V_R

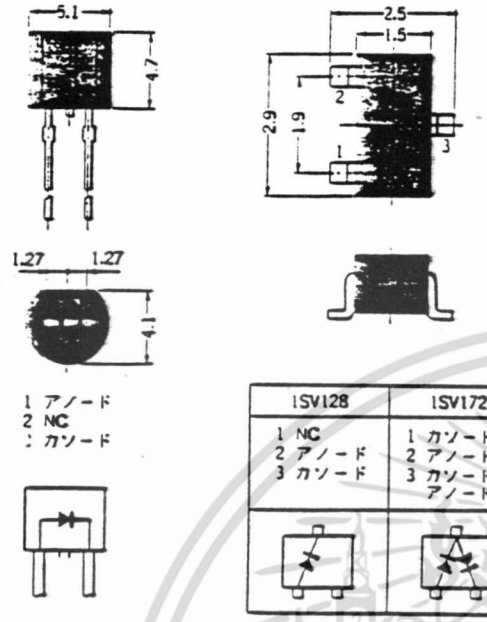


r_s − I_F



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

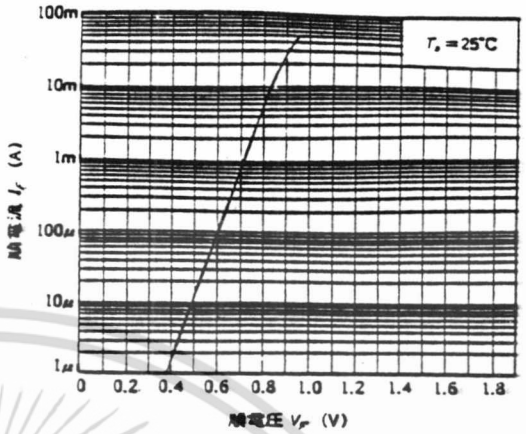
〈図12〉樹脂モールド型PINダイオードの外形図



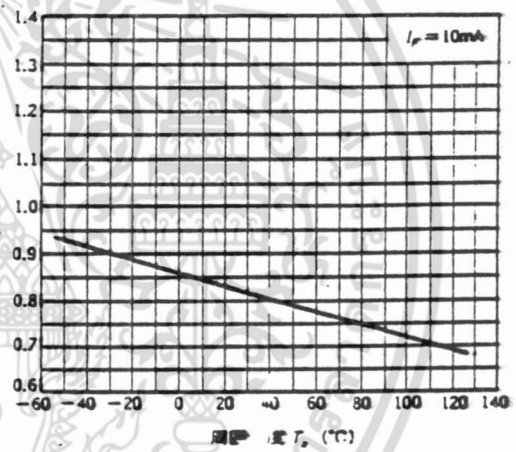
1SV128	1SV172
1 NC 2 アノード 3 カソード	1 カソード2 2 アノード1 3 カソード1/ アノード2

(a) 1SV99: TO92モールド・パッケージ　(b) 1SV128, 1SV172: スーパミニ・モールド・パッケージ

〈図13〉1SV99のI_F-V_F特性



〈図14〉1SV99のV_F-T_a特性



〈表2〉1SV99の電気的特性

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
順電圧	V_F	I_F=50mA	—	0.9	—	V
逆電流	I_R	V_R=50V	—	—	0.1	μA
端子間容量	C_T	V_R=30V, f=1MHz	—	0.3	0.5	pF
直列抵抗	r_s	I_F=10mA, f=100MHz	—	7	10	Ω

(T_a=25°C)

は，セットの小型化を実現する目的で，上記と同じ半導体チップを封入したものです．スーパミニ・モールド・パッケージに2個PINダイオードのチップを封入した製品もあります．この品種は，それぞれのダイオードが図12に示したようにシリーズ接続されており，多数のPINダイオードを使用する回路や，プリント基板の実装効率を上げる場合に便利です．

PINダイオードのパッケージは，このほかにガラス・タイプのものやセラミック・タイプのものがあります．しかし民生用途としては，前述したモールド・タイプのものが主流になっています．

■V_F：順方向電圧

PINダイオードも，シリコン・ウェハを用いたダイオードですから，順バイアス印加時のアノード-カソード間には，約0.7～0.8V程度の順電圧(V_F)が発生します．この電圧は，一般のダイオードとまったく変わりありません．しかも，図13に示すI_F-V_Fカーブや，図14に示すV_F-T_aの温度カーブも，一般ダイオードとまったく差はありません．

■I_R：逆方向電流

本来，ダイオードのPN接合に逆バイアスをかけた場合，カソードからアノード方向に電流は流れないはずですが，現実には極めてわずかながら電流が流れます．これが逆方向電流(I_R)であり，PINダイオードの場合も通常100nA程度以下に管理されています．

■C_T：端子間容量

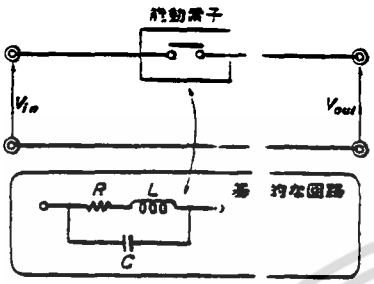
これはアノード-カソード間の総容量で，接合容量とケース容量が支配的です．逆電圧(V_R)により図15のように依存性をもちます．

$$C_T = C_j + C_c \quad \cdots\cdots(1)$$

[C_j：接合容量
C_c：ケース容量]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

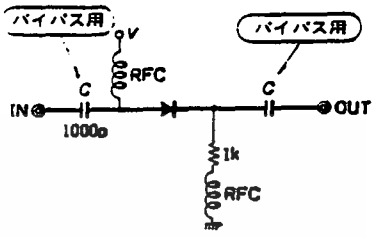
〈図21〉ON・・スイッチの基本回路



理想的なONスルー・スイッチの素子定数

	信号	R	L	C
スイッチON	通過	0	∞	∞
スイッチOFF	遮断	∞	∞	0

〈図22〉ONスルー・スイッチ



〈表3〉代表的なPINダイオードの特性

型名	メーカ	最大定格 V_R (V)	最大定格 I_F (mA)	順電圧 V_F (V) (max)	順電圧 I_F (mA)	リーク電流 I_L (μA) (max)	リーク電流 V_R (V)	端子間容量 C_t (pF) (max)	端子間容量 V_R (V)	直列抵抗 (Ω) (max)	直列抵抗 I_F (mA)	直列抵抗 f (MHz)	備考
1SV26	NEC	100	50	1	50	10	100	0.3 (typ)	—	1.6～3.6 300～500	10 0.01	1700	
1SV27	NEC	100	50	1	50	10	100	0.3 (typ)	—	1.6～3.6 300～500	10 0.01	1700	
1SV28	NEC	100	50	1	50	10	100	0.2 (typ)	—	1.6～3.6 300～500	10 0.01	1700	
1SV35	NEC	100	50	1.1	50	10	100	0.5	50	10	10	100	t_w=1 μs
1SV36	NEC	100	50	1.1	50	10	100	0.6	50	10	10	100	t_w=1 μs
1SV37	NEC	100	50	1.1	50	10	100	0.6	50	10	10	100	t_w=1 μs
1SV77	NEC	50	—	—	—	—	—	0.8	30	10 1k (min)	10 0.01	100	t_w=0.8μs
1SV80	NEC	30	50	1.1	50	10	30	0.4 (typ)	15	15 1k (min)	10 0.01	100	
1SV99	東芝	50	5	1.2	50	0.1	50	0.6	30	10	10	100	
1SV121	日立	100	10	1.1	50	0.1	30	0.7	50	10 0.9k(min)	10 0.01	100	
1SV122	NEC	30	15	1	50	10	30	0.4 (typ)	30	0.8(typ)	10	100	
1SV125	東芝	50	5	0.95 (typ)	50	0.1	50	0.25 (typ)	50	7 (typ)	10	100	

(T_a=+25℃)

ONスルー・スイッチは、伝送線路の一部に直列にスイッチを入れた回路で、その動作としてはスイッチON状態で電気信号が通過し、スイッチOFF状態で電気信号がしゃ断されます　この回路で特に注意すべきことは、伝送線路内に直列に能動素子が入るために、素子のON抵抗による高周波信号の減衰や、能動素子自身のもつ順方向特性の非直線性のために波形ひずみが生じやすく、混変調や相互変調などに十分注意しなければならないことです。

図22に、PINダイオードを使用したONスルー・スイッチの実際の回路例を示しておきます。

表3に市販の主なPINダイオードを示します。

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 19—CHARACTERISTICS

Material Composition	T°C	Dielectric Constant at (Frequency in Hertz) 60	10^3	10^6	10^9	3×10^9	2.5×10^{10}
Ceramics:							
Aluminum oxide	25	—	8.53	8.80	8.80	8.79	—
Barium titanate	25	1250	1200	1142	—	600	100
Calcium titanate	25	168	167.7	167.7	167.7	168	—
Magnesium oxide	25	—	9.65	9.65	9.65	—	—
Magnesium silicate	25	6.00	5.98	5.97	5.96	5.90	—
Magnesium titanate	25	—	13.9	13.9	13.9	13.8	13.7
Oxides of aluminum, silicon, magnesium, calcium, barium	24	—	6.04	6.04	—	5.90	—
Porcelain (dry process)	25	5.5	5.36	5.06	5.04	—	—
Steatite 410	22	5.77	5.77	5.77	5.77	5.7	—
Strontium titanate	25	—	233	233	233	—	—
Titanium dioxide (rutile)	25	—	100	100	100	—	—
Glasses:							
Iron-sealing glass	24	8.41	8.36	8.20	8.20	7.98	7.80
Soda-borosilicate	25	—	4.97	4.84	4.84	4.82	4.65
100% silicon dioxide (fused quartz)	25	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Plastics:							
Alkyd resin	25	—	5.10	4.76	4.55	4.50	—
Cellulose acetate-butyrate, plasticized	25	3.60	3.48	3.32	3.09	2.91	—
Cresylic acid-formaldehyde, 50% α-cellulose	25	5.45	4.95	4.51	3.55	3.43	3.21
Cross-linked polystyrene	25	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58	—
Epoxy resin (Araldite CN-501)	25	—	3.67	3.62	3.35	3.09	—
Epoxy resin (Epon resin RN-48)	25	—	3.65	3.52	3.32	3.04	—
Foamed polystyrene, 0.25% filler	25	1.03	1.03	1.03	—	1.03	1.03
Melamine—formaldehyde, α-cellulose	26	—	7.57	7.00	6.0	4.93	—
Melamine—formaldehyde, 55% filler	25	—	6.00	5.75	5.5	—	—
Phenol—formaldehyde (Bakelite B M 120)	25	4.90	4.74	4.26	3.96	3.70	3.55
Phenol—formaldehyde, 50% paper laminate	25	5.25	5.15	4.80	4.04	3.57	—
Phenol—formaldehyde, 65% mica, 4% lubricants	24	5.1	5.03	4.75	4.72	4.71	—
Polycarbonate	—	3.17	3.02	2.96	—	—	—
Polychlorotrifluoroethylene	25	2.72	2.63	2.42	2.32	2.29	2.28
Polyethylene	25	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28
Polyethylene-terephthalate	—	3.16	3.12	2.95	—	—	—
Polyethylmethacrylate	22	—	2.75	2.55	2.52	2.51	2.5
Polyhexamethylene-adipamide (nylon)	25	3.7	3.50	3.16	3.0	2.84	2.78
Polyimide	—	—	3.5	3.4	—	—	—
Polyisobutylene	25	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	—
Polymer of 95% vinyl-chloride, 5% vinyl-acetate	20	—	3.15	2.90	2.8	2.74	—
Polymethyl methacrylate	27	3.45	3.12	2.76	—	2.60	—
Polyphenylene oxide	—	2.55	2.55	2.55	—	2.55	—
Polypropylene	—	2.25	2.25	2.25	—	—	—
Polystyrene	25	2.56	2.56	2.56	2.55	2.55	2.54
Polytetrafluoroethylene (teflon)	22	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.08
Polyvinylcyclohexane	24	—	2.25	2.25	2.25	2.25	—
Polyvinyl formal	25	3.20	3.12	2.92	2.80	2.76	2.7
Polyvinylidene fluoride	—	8.4	8.0	6.6	—	—	—
Urea-formaldehyde, cellulose	27	6.6	6.2	5.65	5.1	4.57	—
Urethane elastomer	—	6.7–7.5	6.7–7.5	6.5–7.1	—	—	—
Vinylidene–vinyl chloride copolymer	23	5.0	4.65	3.18	2.82	2.71	—
100% aniline-formaldehyde (Dilecrene-100)	25	3.70	3.68	3.58	3.50	3.44	—
100% phenol-formaldehyde	24	8.6	7.15	5.4	4.4	3.64	—
100% polyvinyl-chloride	20	3.20	3.10	2.88	2.85	2.84	—
Organic Liquids:							
Aviation gasoline (100 octane)	25	—	—	1.94	1.94	1.92	—
Benzene (pure, dried)	25	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้