สายอากาศเฮลิคอล

HELICAL ANTENNA

โดย

นายวัชรพงษ์ ชูแสง รหัส 37013037

นายสุชาติ เชื้อจ๋าย รหัส 37013048

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.สมผล โกศัลวิตร์

วัน เดือน ปี 18 ส.ค. 2540

เลขทะเบียน 037317

เลขเรียกหนังสือ T 621.38 ว378ส

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

037317

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศเฮลิคอล

HELICAL ANTENNA

ผู้จัดทำ นายวัชรพงษ์ ชูแสง รหัส 37013037

นายสุชาติ เชื้อจำย รหัส 37013048

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.สมผล โกศัลวิตร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศเฮลิคอล

HELICAL ANTENNA

โดย นายวัชรพงษ์ ชูแสง รหัส 37013037
นายสุชาติ เชื้อจำย รหัส 37013048

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. สมผล โกศัลวิตร์

บทคัดย่อ

สายอากาศเฮลิคอลในโหมดแนวแกนเป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบวงกลม และเป็นสายอากาศที่มีแถบความถี่กว้าง ซึ่งใช้กับดาวเทียมที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นตลอดเวลา ซึ่งในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบให้เป็นโหมดแนวแกนจำนวน 6 รอบ 1 ชุดและจำนวน 24 รอบ แบบอาร์เรย์ 4 ชุด ในการออกแบบใช้กับความถี่กลางที่ 720 เมกะเฮิร์ต และมีค่ามุมพิตช์เท่ากับ 13 องศา ซึ่งได้ทำการทดลองพร้อมเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งในแนวตั้ง และ แนวนอนโดยในการวัดใช้สายอากาศลอกพีริโอดิก (Log-peridic) เป็นตัวส่ง

Abstract

Helical Antenna in the axial mode is circular polarization as well as broad band used with satelite which always changing the polarization, in this thesis, it is being designed to axial mode for 6 turns 1 element and 24 turns array type 4 elements. for the purpose of mid range frequently at 720 MHz and pitch angle is 13°.The test being put to compare with the theory for both vertical and horizontal by using the log-periodic for transmission measurement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	2
2.1 ความเป็นมาของการค้นพบและการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานสื่อสารโทรคมนาคม	2
2.2 การแบ่งช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.3 รูปแบบของการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคม	5
2.4 สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)	7
2.5 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)	8
2.6 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	11
2.6.1 แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น	11
2.6.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์	13
2.6.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	13
2.6.4 ไดเรคติวิตี้ : (Directivity)	15
2.6.5 เกน : (Gain)	18
2.6.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	19
2.6.7 ประสิทธิภาพของบีม	20
2.6.8 โพลาไรเซชั่น : (Polarization)	21
2.6.9 อินพุทอิมพีแดนซ์	25
2.6.10 แบนด์วิดท์	29
บทที่ 3 สายอากาศเฮลิคอล	30
3.1 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล	30
3.2 โหมดของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอล	31
3.3 คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน	33
3.3.1 กระแสที่ไหลและอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน	33
3.3.2 ความเร็วเฟสของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน	36
3.3.3 การกระจายคลื่นจากสายอากาศเฮลิกซ์โหมดแนวแกน	39
3.4 อาร์เรย์ (Array)	45
3.4.1 อาร์เรย์ N เอเลเมนท์	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.4.2 ลิเนียร์เรย์ N เอเลเมนท์เมื่อระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์สม่ำเสมอแต่แอมปลิจูดของการป้อนกระแสไม่สม่ำเสมอ 53

3.5 อาร์เรย์แบบแผ่น (Planar away) 55

3.5.1 ค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ของอาร์เรย์แบบแผ่น 55

3.5.2 บีมวิดท์ 60

3.5.3 ไดเรคติวิตี (directivity) 61

3.5.4 สายอากาศเฮลิคอลอาร์เรย์โหมดแนวแกน 62

บทที่ 4 การออกแบบและทดลองสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน 65

4.1 การออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน 66

4.2 การออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน 75

4.3 การทดลองสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนที่มีจำนวนรอบขดลวดตัวนำ 6 รอบ 80

4.4 การทดลองสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนที่มีจำนวนรอบขดลวดตัวนำ 24 รอบนำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด 83

บทที่ 5 สรุป และ วิเคราะผลการทดลอง 88

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.2 ลักษณะคลื่นผิวดิน	5
2.3 การส่งผ่านโดยใช้การสะท้อนกลับจากชั้นไอโอโนสเฟียร์	6
2.4 การส่งผ่านของคลื่นในระยะเส้นสายตา	6
2.5 เส้นทางปิดที่ใช้คิดเงื่อนไขขอบเขตของสนามในแนวสัมผัส	8
2.6 รูปพื้นผิวปิดที่ใช้คิดเงื่อนไขขอบเขตของสนามในแนวตั้งฉาก	10
2.7 แสดงแพทเทอร์การแพร่กระจายคลื่น	11
2.8 แพทเทอร์ของสายอากาศชี้ทิศทาง	13
2.9 แสดงฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์	14
2.10 แสดงแพทเทอร์นของสายอากาศแบบสมมาตร และ แบบไม่สมมาตร	17
2.11 แสดงบีมท์ของสายอากาศ	21
2.12 แสดงลักษณะโพราไรเซชั่นของสายอากาศ	21
2.13 แสดงลักษณะการเกิดโพลาไรเซชั่น	23
2.14 หน่วยเวกเตอร์โพลาไรเซชั่น	25
2.15 แสดงวงจรสมมูลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการส่ง	26
2.16 แสดงวงจรสมมูลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการรับ	28
3.1 สายอากาศเฮลิคอลที่ใช้กับดาวเทียม Navster GVS	30
3.2 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล	31
3.3 ประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนสายอากาศเฮลิคอลโหมดต่าง ๆ	32
3.4.1 รูปแสดงแพทเทอร์นสายอากาศเฮลิคอลทั้งสองโหมด	32
3.4.2 รูปแสดงโพลาไรเซชั่นวงกลม	33
3.5 ลักษณะการไหลของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอลขนาดต่าง ๆ	35
3.6 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอล	36
3.7 การหาอะเรย์แฟกเตอร์ของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนโดยให้กระแสแบบจุดแทนเส้นลวดหนึ่งขด	37
3.8 อัตราส่วนระหว่างความเร็วเฟสในสายอากาศเฮลิคอลกับความเร็วแสงในกรณีที่สายอากาศทำงานในโหมดแนวแกน	39
3.9 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอลกับการคิดระยะทางไปยังจุดสังเกตุ	40
3.10 ค่าอัตราส่วนของโพลาไรเซชันในแกนหลักของสายอาการเฮลิคอลโหมดแนวแกน	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.11 ลักษณะแพทเทอร์นของสายอากาศที่ Cλ ต่าง ๆ 43

3.12 ลักษณะแพทเทอร์นของสายอากาศเฮลิคอลที่จำนวนรอบ (n) ต่าง ๆ 43

3.13 ลักษณะพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเฮลิคอล 44

3.14 รูปของอาร์เรย์ 2 เอเลเมนท์ ที่วางตามแนวแกน Z 45

3.15 เอเลเมนท์แฟคเตอร์ อาร์เรย์แฟคเตอร์ และสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ของไดโพลจิ๋ว สองตัวที่มี ($\beta = 0^\circ$, $d = {}^{\lambda}/_{4}$) 47

3.16 เอเลเมนท์แฟคเตอร์ อาร์เรย์แฟคเตอร์ และสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ของไดโพลจิ๋ว สองตัว $\beta = 90^\circ$, $d=\lambda/4$ 48

3.17 เอเลเมนท์แฟคเตอร์ อาร์เรย์แฟคเตอร์ และสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ของไดโพลจิ๋ว สองตัว $\beta = -90^\circ$, $d=\lambda/4$ 48

3.18 รูปการหาสนามระยะไกลของอาร์เรย์ N เอเลเมนท์ของไอโซโทรปิคซอร์ส วางตามแนวแกน Z 49

3.19 แสดงลิเนียร์และอาร์เรย์แบบแผ่น 56

3.20 แสดงแพทเทอร์น 3 มิติ ของ 5 × 5 เอเลเมนท์อาร์เรย์ที่ $\beta_x = \beta_y = 0$ และ$d_x = d_y = {}^{\lambda}/_{4}$ จะมีส่วนบีมสูงสุดที่ $\theta_0 = 0^\circ$ 59

3.21 แสดงแพทเทอร์น 3 มิติของอาร์เรย์แบบแผ่น (planar array) ของไอโซทรอปิคซอสต์ ซึ่งมี $d_x = d_y = \lambda$ 59

3.22 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ตามแนว $\theta = \theta_0$, $\phi = \phi_0$ 60

3.23 แสดง Radio telescope เป็นอาร์เรย์ 96 ×11 รอบ 62

3.24 แสดงสายอากาศเฮลลิคอล 80 รอบ โดยแบ่งจำนวนรอบลงแล้วทำเป็น อาร์เรย์ เพื่อให้ได้เกนตามที่ต้องการ 63

3.25 แสดงโครงสร้างและรายละเอียดของสายอากาศเฮลลิคอลโหมดแนวแกน แบบอาร์เรย์ 4 แกน ที่ความถี่กึ่งกลาง 800 MHz 64

4.1 แสดงแพทเทอร์นของสายอากาศเฮลิคอลเมื่อมีความเร็วเฟสของกระแสต่างกัน 65

4.2 แสดงสายอากาศเฮลิคอลที่ออกแบบ 68

4.3 แสดงการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอล 1 ขด 69

4.4 แสดงสนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอล 1 รอบตามทิศทางแกน ϕ 70

4.5 แสดงสนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอล 1 รอบ ตามทิศทางθ 71

4.6 แสดงค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ของสายอากาศเฮลิคอลที่มีระยะห่างระหว่างขดเท่ากับ 0.2174λ 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

4.7 แสดงสนามไฟฟ้า ตามทิศทาง ϕ ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีระยะห่างระหว่างขด(s_λ) เท่ากับ 0.2174 73

4.8 แสดงสนามไฟฟ้า ตามทิศทาง θ ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีระยะห่างระหว่างขด(s_λ) เท่ากับ 0.2174 74

4.9 แสดงการเปรียบเทียบสายอากาศเฮลิคอล ทีมีจำนวนรอบสูงๆ ที่สามารถทำให้เป็นสายอากาศอาร์เรย์ได้ 75

4.10 แสดงโครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลเมื่อทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด 76

4.11 แสดงโครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลเมื่อทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด ที่ได้ทำการออกแบบ 77

4.12 แสดงค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ ของสายอากาศ ที่มีระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์ 1.5λ 78

4.13 แสดงสนามไฟฟ้ารวม จากการทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด 79

4.14 การวัดค่า VSWR ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 6 รอบ 80

4.15 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 6 รอบในระนาบแนวตั้ง (Vertical) 81

4.16 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 6 รอบในระนาบแนวนอน (Horizontal) 82

4.17 การวัดค่า VSWR ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 24 รอบนำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด 83

4.18 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 24 รอบนำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด ในระนาบแนวตั้ง (Vertical) 84

4.19 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 24 รอบนำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุดในระนาบแนวนอน (Horizontal) 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าการสื่อสารโทรคมนาคมมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในสังคมมนุษย์ การสื่อสารหลายๆระบบ เช่น วิทยุกระจายเสียง โทรทัศน์ และโทรศัพท์ กำลังกลายเป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินชีวิตของเรา ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าการสื่อสารโทรคมนาคมมีประโยชน์ในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาต่างๆในเรื่องของสายอากาศ เช่น การแพร่กระจายคลื่น การเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง และอื่น เราจำเป็นต้องรู้ทฤษฎีพื้นฐาน และ ธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเสียก่อน ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 2 เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของสายอากาศ และระบบของสายอากาศต่อไป ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงคุณสมบัติ และโครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ซึ่งเป็นสายอากาศที่ทำงานได้ในแถบความถี่กว้าง เพื่อให้ระบบทำงานได้ดี เช่น ในการสื่อสารแบบคลื่นสั้น เป็นต้น นอกจากนั้นโดยทั่วไปถ้าสายอากาศสามารถทำงานในแถบความถี่กว้างได้ ก็จะเป็นการประหยัด และสะดวกในการทำงาน ซึ่งสายอากาศแบบเฮลิคอลก็เป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้าง จึงมีใช้ในการสื่อสารทั่วไป และเป็นสายอากาศแบบโพลาไรเซชั่นวงกลม ซึ่งเป็นโพลาไรเซชั่นแบบพิเศษ สามารถนำไปใช้ในระบบที่มีความถี่ซ้ำกันได้ (Reused frequency) .ในบทที่ 4 เป็นการออกแบบและทดลองสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนที่ได้ทำการศึกษา ส่วนในการบทที่ 5 เป็นบทวิจารณ์ และบทสรุปในการศึกษาและทดลองสร้างสายอากาศโหมดแนวแกน

เมื่อกล่าวโดยสรุปแล้ว ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบด้วย พื้นฐานทางทฤษฎีวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน พร้อมทั้งให้ข้อมูลและวิธีการออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ซึ่งเป็นพื้นฐานในงานวิศวกรรมสายอากาศ ซึ่งเหมาะเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษา และสร้างสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ความเป็นมาของการค้นพบและการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานสื่อสารโทรคมนาคม

เรื่องเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น เป็นเรื่องที่นักวิทยาศาสตร์ในสมัยศตวรรษก่อนให้ความสนใจ และทำการศึกษาทั้งการทดลอง ทางทฤษฎีไว้อย่างละเอียด นักวิทยาศาสตร์ที่มีบทบาทอย่างสำคัญต่อการค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่หลายคนด้วยกัน คือ "แอมแปร์" ซึ่งเป็นผู้เสนอว่า "สนามแม่เหล็กมีอยู่จริง และเกิดจากประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่อยู่หรือกระแสไฟฟ้า" นั่นเอง แอมแปร์ได้สรุปเป็นข้อเสนอดังกล่าวนี้ จากผลการทดลองในช่วงปี พ.ศ. 2363-2369 และข้อเสนอนี้เรียกว่า "กฎของแอมแปร์" [$\nabla x\vec{H} = j\omega\vec{D}+\vec{J}$] ในเวลาต่อมา

ในปี พ.ศ. 2374 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ทำการทดลองและค้นพบว่า "สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสนามแม่เหล็ก" การค้นพบนี้นับว่าเป็นก้าวสำคัญของการค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเวลาต่อมา สิ่งที่ฟาราเดย์ค้นพบนี้เรียกว่า "กฎของฟาราเดย์" [$\nabla x\ \vec{E} = -j\omega\vec{B}$]

ในเวลานั้นก็ยังไม่มีใครสามารถอธิบายได้ว่า สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ (propagate) ออกไปได้อย่างไร จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2397 "เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์" (James Clark Maxwell) ได้เสนอความคิดเกี่ยวกับกระแสดิสเพลซเมนต์ ว่าจะเป็นกระแสที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ด้วย แมกซ์เวลล์ได้แสดงให้เห็นว่า ถ้าสมมติฐานนี้เป็นจริง พลังงานก็จะสามารถถูกส่งผ่านไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ กล่าวคือถ้ามีความปั่นป่วน (disturbance) ทางแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งจากกฎของแอมแปร์ สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ ความปั่นป่วนนั้น และจากกฎของฟาราเดย์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามไฟฟ้าบริเวณถัดไป และจากสมมุติฐานของแมกซ์เวลล์ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งก็คือกระแสดิสเพลซเมนต์ ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณถัดไปอีก [$\nabla.\vec{J} = -j\omega\rho$] เมื่อ $\nabla.\vec{D} = \rho$

แมกซ์เวลล์ยังชี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ออกไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยอนุภาคของสสารในการส่งผ่าน กล่าวคือแม้ตัวกลางนั้นจะเป็นสูญญากาศก็สามารถส่งผ่านไปได้ ซึ่งแตกต่างจากคลื่นเสียง และแมกซ์เวลล์ ยังชี้ให้เห็นทางคณิตศาสตร์ ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเคลื่อนที่ออกไปด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งคือ

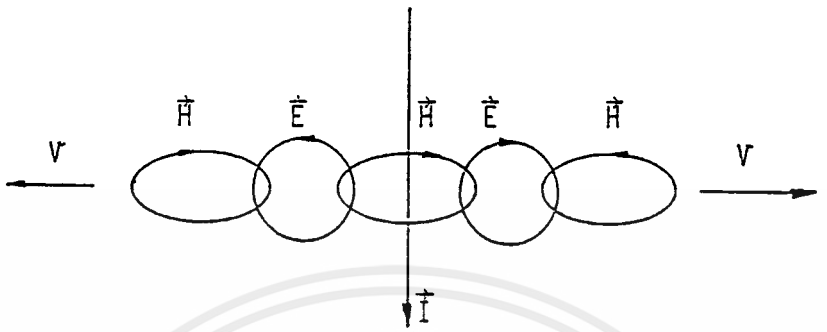
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \qquad \text{——————2.1}$$

โดยที่ μ เป็นค่าความซึมซาบได้ (permeability) ของตัวกลาง ซึ่งค่า μ_0 (สูญญากาศ) $= 4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี่ต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ε เป็นค่า Permittivity ของตัวกลาง ซึ่งค่า ε_0 (สูญญากาศ) = $\frac{10^{-9}}{36\pi}$ F/m

ซึ่งในกรณีตัวกลางเป็นสูญญากาศความเร็วจะเท่ากับ 2.998 x 10^8 m/s



รูปที่ 2.1 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แนวความคิดของแมกซ์เวลล์ ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ในสมัยนั้นยังไม่สามารถทำการพิสูจน์ให้เห็นแน่ชัดลงไปว่าถูกต้อง หรือไม่เนื่องจากปริมาณที่เกี่ยวข้องมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งหลังจากนั้นประมาณ 25 ปี ไฮนริค รูดอล์ฟ เฮิรตซ์ (Heinrich Rudolph Hertz) ได้ทำการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่จริงทางกายภาพ โดยทำการทดลองแสดงให้เห็นถึงการสอดแทรก (interference) การสะท้อน (reflection) และการหักเห (refraction) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำให้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปในเวลาต่อมา

2.2 : การแบ่งช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถสร้างขึ้น และนำมาใช้งานได้นั้นมีช่วงที่กว้างมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงมีการแบ่งช่วงความถี่ และมีชื่อเรียกช่วงความถี่นั้น ซึ่งตารางที่ 2.1 แสดงช่วงความถี่และชื่อเรียกของช่วงความถี่นั้น สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ส่วนตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะของงานสื่อสารกับช่วงความถี่ที่ใช้

ย่านความถี่	ชื่อเรียก
3 - 30 KHz	Very Low frequency (VLF)
30 - 300 KHz	Low frequency (LF)
300 - 3,000 KHz	Medium frequency (MF)
3 - 30 MHz	High frequency (HF)
30 - 300 MHz	Very - High frequency (VHF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300 - 3,000 MHz	Ultra - high frequency (UHF)
3 - 30 GHz	Super - high frequency (SHF)
30 - 300 GHz	Extremely - high frequency (EHF)

ตาราง 2.1 : แสดงการแบ่งช่วงความถี่

และที่เป็นข้อสังเกตอีกข้อหนึ่ง คือจากความถี่ย่าน EHF ซึ่งมีค่าอยู่ในหลัก 10^{10} Hz ได้มีการกระโดดข้ามไปใช้แสงในย่านอินฟราเรด ซึ่งมีความถี่อยู่ในหลัก 10^{14} Hz แทนในสาย optic เพราะความถี่ย่าน 10^{11} - 10^{13} Hz (100 GHz - 10,000 GHz) นั้นเป็นความถี่ที่มีค่าการสูญเสียสูงมากเมื่อส่งผ่านบรรยากาศ และไม่สามารถหาวัสดุที่เหมาะสมในการทำสายนำสัญญาณเพื่อส่งผ่านความถี่นี้ได้

ตารางที่ 2.2 : ลักษณะของการสื่อสารกับช่วงความถี่ใช้งาน

ช่วงความถี่ / ประเภทของงานสื่อสาร	VLF 10-30 kHz	LF 30-300 kHz	MF 300-3000 kHz	HF 3-30 MHz	VHF 30-300 MHz	UHF 300-3000 MHz	SHF 3-30 GHz	EHF 30-40 GHz
1. งานวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์			○	○	○	○	○	
2. การสื่อสารระหว่างจุดต่อจุด (โทรทัศน์)	○	○	○	○	○	○	○	
3. วิทยุการบิน		○	○		○	○	○	
4. วิทยุเดินเรือ		○	○				○	
5. วิทยุเคลื่อนที่แบบติดพาหนะบนบก			○	○	○	○		
6. วิทยุสมัครเล่น				○	○	○	○	
7. งานสำรอง				○	○	○	○	○
8. งานด้านดาราศาสตร์					○	○	○	○
9. งานด้านอุตุนิยม						○		
10. งานด้านสื่อสารดาวเทียม							○	
11. เรดาห์					○	○	○	○
12. งานควบคุมวงโคจรดาวเทียม					○	○	○	

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " ○ " แสดงว่ามีการใช้งานในช่วงความถี่นั้น

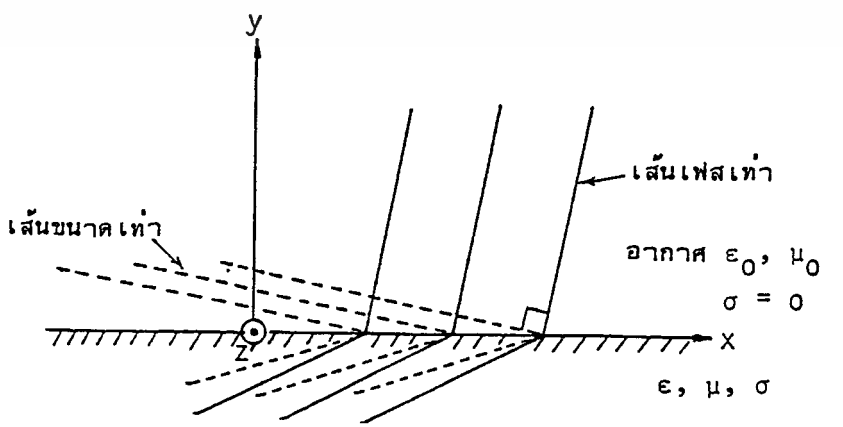
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.3 : การแบ่งช่วงความถี่ย่านไมโครเวฟ

ช่วงความถี่	ชื่อเรียกเก่า	ชื่อเรียกใหม่
1 - 2 GHz	L	D
2 - 3 GHz	S	E
3 - 4 GHz	S	F
4 - 6 GHz	C	G
6 - 8 GHz	C	H
8 - 10 GHz	X	I
10 - 12.4 GHz	X	J
12.4 - 18 GHz	Ku	J
18 - 20 GHz	K	J
20 - 26.5 GHz	K	K
26.5 - 40 GHz	Ka	K

2.3 : รูปแบบของการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคม

การสื่อสารโดยการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปนั้น ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ระบบนี้ใช้งานได้ดีนั้นคือ การส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบรรยากาศ จะต้องมีการสูญเสียต่ำในงานวิทยุกระจายเสียง AM นั้นใช้ความถี่ MF เนื่องจากความยาวคลื่นยาวประมาณ 300 m. ทำให้สายอากาศต้องมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย (โดยทั่วไปสายอากาศจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ จะมีประสิทธิภาพการกระจายคลื่นต่ำ) การส่งผ่านก็ได้รับผลกระทบจากพื้นโลก ดังนั้น สายอากาศส่ง AM จึงมักใช้แบบ Vertical Antenna และอาศัยการส่งผ่านคลื่นใหญ่ในรูปแบบ คลื่นผิว (Surface ware)

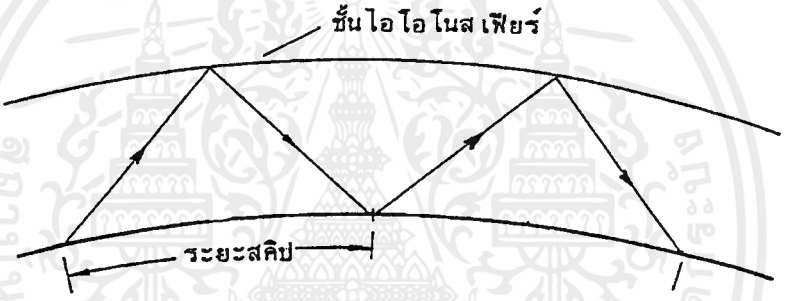


รูปที่ 2.2 : ลักษณะคลื่นผิวดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

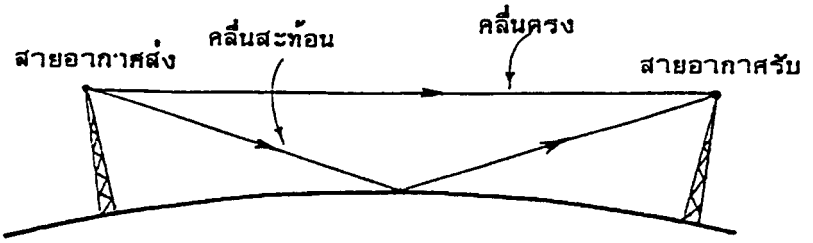
การส่งผ่านแบบคลื่นผิวนี้ ทิศทางสนามไฟฟ้าจะเกือบ ๆ ตั้งฉากกับผิวดิน และกำลังคลื่นส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวขอบเขตของอากาศกับผิวดิน ซึ่งทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ผิวดินสูงกว่าบริเวณที่อยู่สูงขึ้นไป ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างออกไปจะแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง ลักษณะของคลื่นผิวดินนี้จะสามารถส่งผ่านไปตามส่วนโค้งของผิวโลก ทำให้ส่งผ่านไปยังจุดที่อยู่ไกลออกไปหลายร้อยกิโลเมตรได้

เนื่องจากการสูญเสียกำลังคลื่นของคลื่นผิวดินจะมีค่าสูงขึ้นตามความถี่ ดังนั้นการใช้งานจะถูกจำกัดความถี่ต่ำกว่า 10 MHz ลงมา เมื่อความถี่สูงกว่า 10 MHz แล้วรูปแบบการส่งผ่านกำลังคลื่นจะเป็นแบบส่งผ่านบรรยากาศธรรมดา และการสื่อสารแบบอยู่ในระยะเส้นสายตา อย่างไรก็ตามช่วงความถี่ HF นั้นจะมีการใช้รูปแบบการสะท้อนกลับของคลื่นที่เกิดขึ้นที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งอยู่เหนือผิวโลกประมาณ 200 km.



รูปที่ 2.3 : การส่งผ่านโดยใช้การสะท้อนกลับจากชั้นไอโอโนสเฟียร์

การส่งผ่านในลักษณะนี้จะทำให้สามารถสื่อสารกันระหว่างจุดที่ห่างกัน หลายพันกิโลเมตรได้ และโดยทั่วไปความถี่ที่สูงกว่า 40 MHz มักจะทะลุผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ ดังนั้นความถี่สูงกว่า 40 MHz ขึ้นไป รูปแบบของการส่งผ่านจึงเป็นแบบระยะเส้นสายตาเป็นหลัก



รูปที่ 2.4 : การส่งผ่านของคลื่นในระยะเส้นสายตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 : สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)

สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) เป็นสมาชิกเชิงเส้น ดังนั้น ถ้ารู้การแพร่กระจายคลื่นจากเอเลเมนท์ขนาดจิ๋ว คือ IdL แล้ว เราสามารถใช้หลักการของ ซุเปอร์โพซิชั่น เพื่อหาสนามที่กระจายจากกระแสซึ่งมีการแจงรูปเป็นรูปร่างใด ๆ ก็ได้ โดยรวมสนามที่ถูกสร้างจากแต่ละเอเลเมนท์ของกระแสเข้าด้วยกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศ

ปริมาณสนามสี่ปริมาณที่เราสนใจได้แก่ ความเข้มสนามไฟฟ้า $\vec{E}(r)$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}(r)$, ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า $\vec{D}(r)$ และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $\vec{B}(r)$ สนามเหล่านี้ตลอดจนต้นกำเนิดของสนาม คือความหนาแน่นของกระแส $\vec{J}(r)$ และความหนาแน่นของประจุ $\rho(r)$ สัมพันธ์กันด้วยสมการ แมกซ์เวลล์ คือ

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \qquad \text{(กฎของฟาราเดย์)} \qquad \text{———2.2}$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\vec{D} + \vec{J} \qquad \text{(กฎทั่วไปของแอมแปร์)} \qquad \text{———2.3}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \qquad \text{(กฎของเกาซ์)} \qquad \text{———2.4}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad \text{(กฎความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็ก)} \qquad \text{———2.5}$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -j\omega\rho \qquad \text{(กฎความต่อเนื่อง)} \qquad \text{———2.6}$$

ใน free space มีความสัมพันธ์ว่า

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} \qquad \text{———2.7}$$

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} \qquad \text{———2.8}$$

เมื่อ ε_0 เป็นค่า Permitivitym ของฟรีสเปส เท่ากับ $10^{-9}/36\pi$ F/m

μ_0 เป็นค่า Permeability ของฟรีสเปสเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

ซึ่งในตัวกลางไดอีเล็คตริคที่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตี้ ε และค่าความนำ δ จะมีกระแสนำ (Conduction current) $\vec{J}_c$ ไหล มีค่าเท่ากับ $\delta\vec{E}$

เพราะฉะนั้นความหนาแน่นกระแส $\vec{J}$ จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ที่เกิดจากการกระตุ้นจากภายนอก $\vec{J}_0$ และส่วนที่เกิดจากสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ($\vec{J}_c$)

$$\vec{J} = \vec{J}_0 + \vec{J}_c = \vec{J}_0 + \delta\vec{E} \qquad \text{———2.9}$$

จากสมการ 3 จะได้ $\nabla \times \vec{H} = j\omega\vec{D} + \vec{J} = (j\omega\varepsilon + \delta)\vec{E} + \vec{J}_0$

$$= j\omega\left(\varepsilon + \frac{\delta}{j\omega}\right)\vec{E} + \vec{J}_0 \qquad \text{———2.10}$$

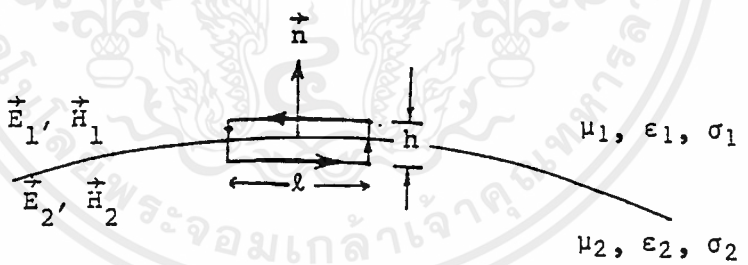
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกเทอม $\varepsilon + \delta/j\omega$ ว่าเป็นเพอร์มิตติวิตี้เชิงซ้อน ซึ่งโดยทั่วไปสารไดอีเล็คตริกจะมีค่าสูญเสียพลังงานรวมอยู่ด้วยนอกเหนือจากค่าความนำ ดังนั้นแม้ δ จะเป็นศูนย์ แต่ก็ยังเป็นค่าเชิงซ้อนอยู่ในรูป ของ $\varepsilon' - j\varepsilon''$ เมื่อไรก็ตามที่เราต้องเกี่ยวข้องกับสารไดอีเล็คตริกที่มีการสูญเสียพลังงาน เราจะใช้เพอร์มิตติวิตี้เชิงซ้อน และคิดการสูญเสียจากการนำกระแสว่าเป็นส่วนของค่าจินตภาพ ε''

2.5 : เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

คำตอบของสมการแมกเวลล์ จะยังไม่สมบูรณ์ จนกว่าจะได้ใส่เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมเข้าไป ในตัวกลางที่เป็นแบบที่มีเนื้อสม่ำเสมอ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าใด ๆ ที่เป็นคำตอบของสมการแมกซ์เวลล์ถือว่าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นจริงได้ แต่ถ้าตัวกลางนั้นประกอบด้วยตัวกลางตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปซึ่งมีค่าคงตัวของตัวกลางไม่เหมือนกัน เราจะต้องนำเงื่อนไขของเขตมาพิจารณาประกอบด้วย จึงจะได้คำเฉลยที่ถูกต้อง

ถ้าให้ค่าคงตัวของตัวกลาง 1 และ 2 เป็น $\varepsilon_1, \mu_1, \delta_1$ และ $\varepsilon_2, \mu_2, \delta_2$ ตามลำดับ และให้ n เป็น เวกเตอร์หน่วย (unit vector) ที่ตั้งฉากกับผิวขอบเขต เมื่อเราคิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตรงผิวขอบเขตรอบเส้นทางปิด (Closed contour) เล็ก ๆ ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.5 เส้นทางปิดที่ใช้คิดเงื่อนไขขอบเขตของสนามในแนวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคิดสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กบนผิวขอบเขตเส้นทางปิด (Closed contour) เล็ก ๆ และ ค่า h เข้าใกล้ศูนย์จะได้

$$\lim_{h\to 0} \oint \vec{E}.d\vec{l} = \lim_{h\to 0} \left(-\frac{\partial B}{\partial t} lh \right) = 0 \qquad \text{———2.11}$$

$$(E_{1t} - E_{2t}).l = 0 \qquad \text{———2.12}$$

$$(\vec{E1} - \vec{E2}) \times \vec{n} = 0 \qquad \text{———2.13}$$

หรือ

$$\lim_{h\to 0} \oint \vec{H}.d\vec{l} = \lim_{h\to 0} \left(Jlh + \frac{\partial D}{\partial t} lh \right) \qquad \text{———2.14}$$

$$(H_{1t} - H_{2t}).l = 0 \qquad \text{———2.15}$$

หรือ

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \times \vec{n} = 0 \qquad \text{———2.16}$$

จากสมการ 2.11 ถึง 2.16 แสดงว่าที่ผิวขอบเขตของตัวกลางทั้งสอง ส่วนประกอบ ในแนวผิวสัมผัส (Tangential componant) ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กจะต่อเนื่องกัน แต่ในสมการ 2.16 ถ้ามีกระแสผิว (Surface current) ไหลบนผิวขอบเขต เมื่อตัวกลางด้านใดด้านหนึ่งเป็นตัวนำสมบูรณ์แบบจะได้

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \times n = \vec{J}_S \qquad \text{———2.17}$$

กรณีตัวกลางที่ 2 เป็นตัวสมบูรณ์แบบจะไม่มีสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่ 2 ($\delta \to \infty$) สนามแม่เหล็ก $\vec{H}_1$ ก็จะกระตุ้นให้มีกระแสผิว $\vec{J}_S$ ที่มีขนาดและทิศทางตามสมการ 2.17 ไหลบนผิวตัวนำ

$$\vec{n} \times \vec{H}_1 = \vec{J}_S$$

ถ้าด้านใดด้านหนึ่งเป็นตัวนำสมบูรณ์ เงื่อนไขขอบเขตจะกลายเป็นต่อไปนี้

$$H_{tan} = J_S$$

———2.18

$$E_{tan} = 0$$

การคิดเงื่อนไขขอบเขตของส่วนประกอบในแนวตั้งฉาก (normal component) ทำโดย การพิจารณา พื้นผิวปิดรูปแบน ๆ ดังรูป 2.7 และคิดลิมิต h เข้าหาศูนย์ จะได้

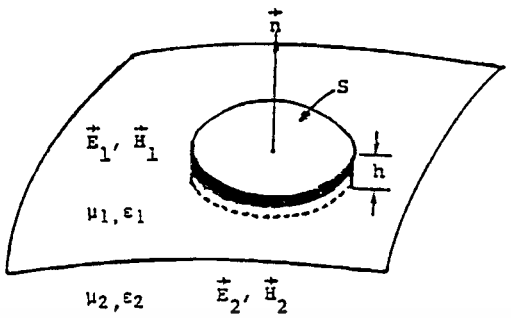
$$\lim_{h\to 0} \int_S \vec{B}.\vec{n}\, ds = 0$$

$$(\vec{B}_{1n} - \vec{B}_{2n})S = 0 \qquad \text{———2.19}$$

หรือ

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2).\vec{n} = (\mu_1\vec{H}_1 - \mu_2\vec{H}_2).\vec{n} = 0 \qquad \text{———2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 รูปพื้นผิวปิดที่ใช้คิดเงื่อนไขขอบเขตของสนามในแนวตั้งฉาก

สำหรับสนามไฟฟ้านั้น ในกรณีที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่บนผิวขอบเขตได้

$$\lim_{h\to 0} \int_S \vec{D}.\vec{n}\, ds = 0$$

$$(D_{1n} - D_{2n})\, S = 0 \qquad \text{———2.21}$$

หรือ $$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2).\vec{n} = (\varepsilon 1\vec{E}1 - \varepsilon 2\vec{E}2).\vec{n} \qquad \text{———2.22}$$

จากสมการ 2.19 ถึง 2.22 นี้ แสดงว่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก และฟลักซ์ไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับผิวขอบเขตจะต่อเนื่องกันที่บริเวณผิวขอบเขต ในกรณีที่มีประจุบนผิวขอบเขตจากสมการ 2.22 จะได้

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2).\vec{n} = \rho_s \qquad \text{———2.23}$$

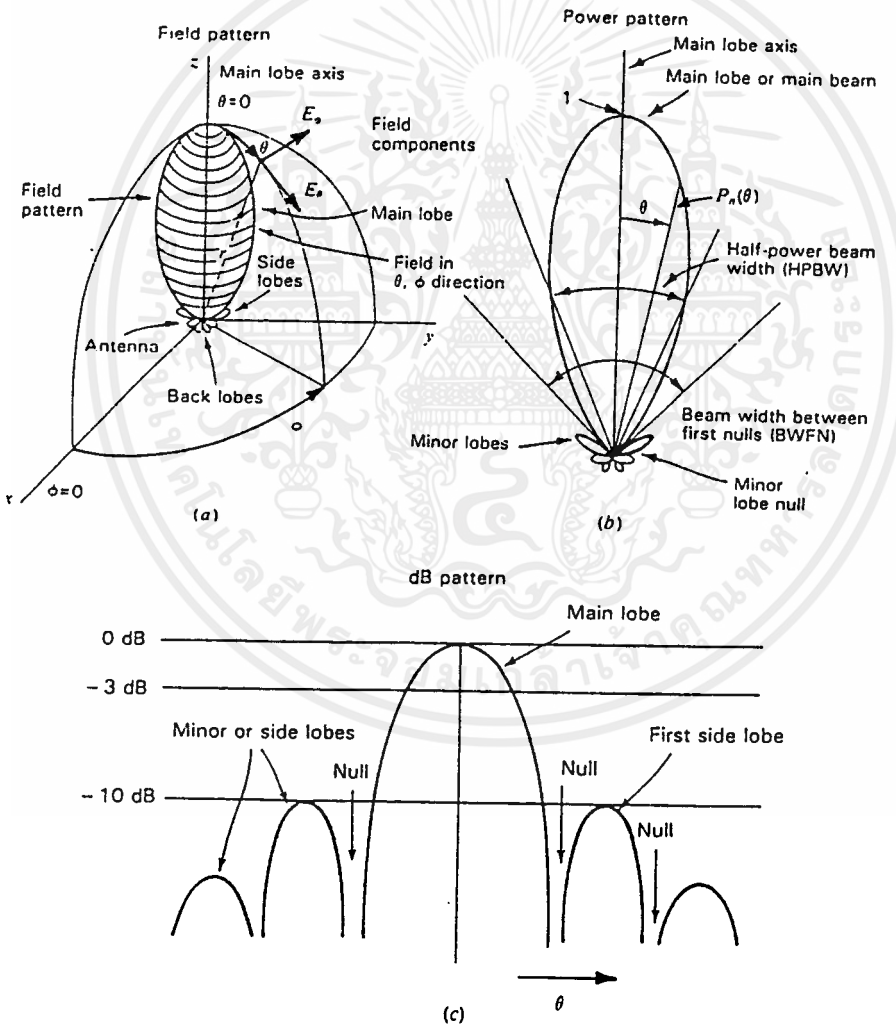
ในขณะที่ ρ_s (C/m^2) เป็นประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนผิวขอบเขต จากสมการแมกซ์เวลล์หากสามารถแก้สมการเหล่านี้ให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตของต้นกำเนิดสนาม อย่างเหมาะสมแล้ว จะสามารถทำนายปรากฏการณ์เกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.6.1 : แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น

แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น เมื่อเราสังเกตสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณไกลจากตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่น (Far field) สนามไฟฟ้าจะสามารถเขียนออกมาในรูปดังนี้ คือ



รูป 2.7 แสดงแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้ สนามไฟฟ้าในโคออดิเนททรงกลม คือ

$$E(r,\theta,\varnothing) = \frac{e^{-jkr}}{r} D(\theta,\varnothing) \qquad \text{----------2.24}$$

โดยที่ $D(\theta,\varnothing)$ นี้จะไม่แปรตามระยะทาง r แต่จะขึ้นอยู่กับ $\theta,\varnothing$ เท่านั้น

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ **ความเข้ม ของการแพร่กระจายคลื่น** (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) **หรือ โพลาไรเซชั่น** (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชั่นของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

แพทเทอร์นของการกระจายคลื่นโดยทั่วไปจะมี 2 แบบคือ

- ถ้าเขียนจากสนามไฟฟ้า $\left[D(\theta,\phi)\right]$ ในสมการ 2.24 จะเรียก "ฟิลด์แพทเทอร์น (Field pattern)" ดังรูป 2.7 (a)

- ถ้าเป็น แพทเทอร์นที่เขียนจาก กำลังคลื่น $\left[D(\theta,\phi)^2\right]$ จะเรียกว่า "เพาเวอร์แพทเทอร์น (Power pattern) " ดังรูป 2.7 (b)

โดยปกติจะหารไว้ด้วยค่าสูงสุดซึ่งจะทำให้แพทเทอร์นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หรือ ถ้ากำกับหน่วยเป็น dB ค่าสูงสุดก็จะเป็น 0 dB

แพทเทอร์นของการกระจายคลื่นนั้น โดยทั่วไปแล้วจะมีรูปร่างทำนองเดียวกับ รูป 2.7 ชื่อเรียกลักษณะสำคัญ ๆ ในแพทเทอร์นนี้มีดังนี้ คือ

1. เมนบีม (Main beam) หรือ โลบหลัก (Major Lobe) คือบีมส่วนที่มีกำลังคลื่นกระจายออกไปมากที่สุด และโดยทั่วไปจุดสูงสุดของแพทเทอร์นจะอยู่ในเมนบีมนี้ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโลบหลักนี้มากกว่าหนึ่งโลบ เช่น สายอากาศแยกบีม (Split - Beam Antenna)

2. โลบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ โลบอื่น ๆ นอกเหนือไปจากโลบหลัก

3. โลบข้าง (Side Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ติดโลบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโลบหลัก

4. โลบหลัง (Back Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบหลัก ปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องจำกัดโลบหลังนี้ให้น้อยที่สุด

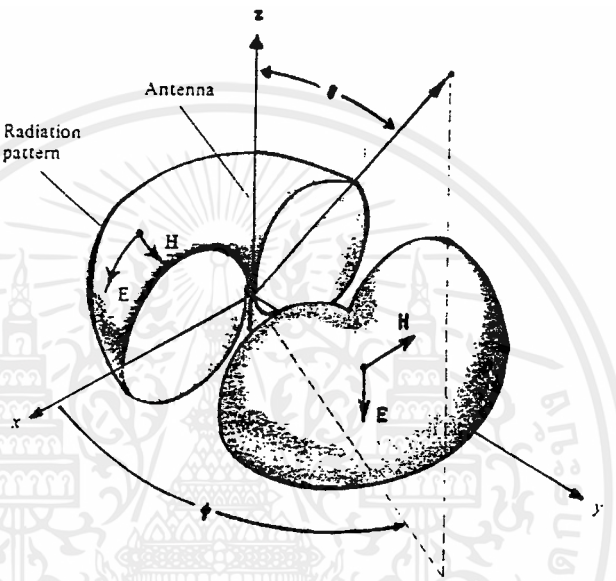
ระดับของโลบย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโลบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โลบ (Side lobe Ratio) หรือระดับไซด์โลบ (Side lobe level : SLL) ในทางปฏิบัติมักจะต้องการระดับไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB

แพทเทอร์นของการกระจายคลื่นนั้น ในบางกรณี จะมีรูปร่างพิเศษ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แพทเทอร์นแบบไอโซโทรปิค (Isotropic pattern) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง เช่น พอยท์ซอร์ส (point source) ซึ่งแพทเทอรินเป็นรูปทรงกลม เป็นสายอากาศที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริง เกี่ยวกับคุณสมบัติการแสดงทิศทางสายอากาศ

- สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น สายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าว คือ สายอากาศแบบออมนิไดเรคชั่นแนล (Omnidirection Antenna) ดังรูป 2.8



รูป 2.8 แพทเทอร์นของสายอากาศชี้ทิศทาง

2.6.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ : (Half - Power Beamwidth : HPBW)

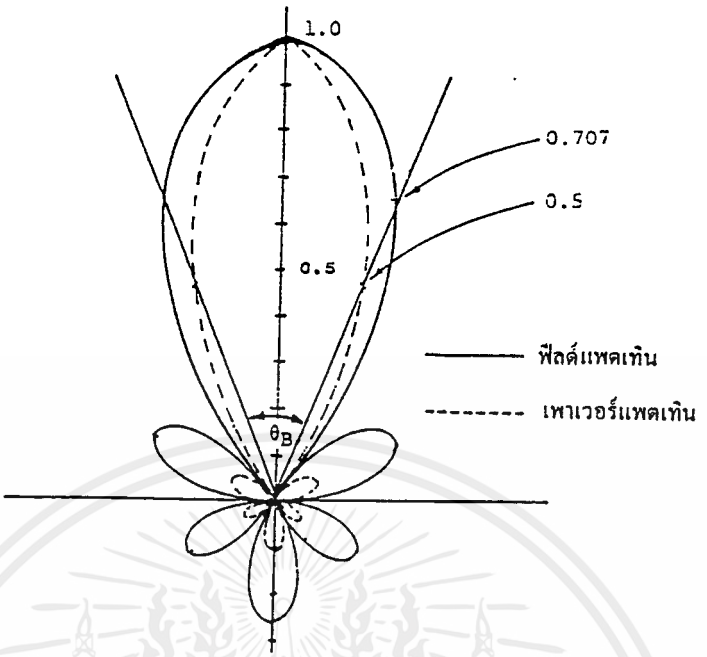
เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดในเมนบีม ของเพาเวอร์แพทเทอร์น (- 3 dB) หรือมุมที่เกิดระว่างจุด $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 ในเมนบีมของฟิลด์แพทเทอริน ดังรูป 2.9

2.6.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น : (Radiation Intensity)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (U) ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล

$$U = r^2 W_{rad} \qquad [\text{ W / หน่วยมุมตัน }] \qquad \text{—— 2.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.9 แสดงฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์

เมื่อ W_{rad} = ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น [W / m^2] ซึ่งถ้าเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล คือ

$$U(\theta,\phi) = \frac{r^2}{2\eta}\left|\vec{E}\ (r,\theta,\phi)\right|^2$$

$$= \frac{r^2}{2\eta}\left[\left|E_\theta(r,\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\theta(r,\theta,\phi)\right|^2\right]$$

$$= \frac{1}{2\eta}\left[\left|E_\theta(\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\theta(\theta,\phi)\right|^2\right] \qquad \text{———2.26}$$

เมื่อ $\vec{E}$ = ความเข้มของสนามไฟฟ้า ของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

และสามารถหากำลังงานทั้งหมดของการแพร่กระจายคลื่น โดยอินทิเกรต ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ตลอดมุมต้น 4π srad รอบทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} U \sin\theta \, d\theta \, d\varnothing \quad (W) \qquad \text{———2.26}$$

2.6.4 ไดเรคติวิตี้ : (Directivity)

ไดเรคติวิตี้ คือ ค่าของไดแรคทีฟเกน (Directive Gain) ในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือค่าไดเรคติวิตี้ ของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิค (Isotropic) คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์ท

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} \qquad \text{———2.27}$$

เมื่อ ไดเรคทีฟเกน (Directive Gain) ในทิศทางที่กำหนด คืออัตราส่วนของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับอ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

$$D_g = \frac{U}{U_0} \qquad \text{———2.28}$$

D_o = ไดเรคติวิตี้ (ไม่มีหน่วย)

D_g = ไดเรคทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W /หน่วยมุมตัน)

U_o = ความเข้มของกระจายคลื่นของไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์ส (W / หน่วยมุมตัน)

P_{rad} = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

เมื่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของพอยท์ซอร์ส (U_0) คือ

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (W / \text{หน่วยมุมตัน}) \qquad \text{———2.29}$$

ดังนั้น

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \qquad \text{———2.30}$$

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \qquad \text{———2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าไดเรคทีฟเกน และไดเรคติวิตี้ของไอโซทรอปิคพอยท์ซอร์ส มีค่าเป็นหนึ่งทั้งนี้ เพราะมีการแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทางเท่ากันหมดคือ U , U_{max} และ U_o ต่างมีค่าเท่ากัน ไดเรคติวิตี้ของไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์ส มีค่าเท่ากับหนึ่งเสมอ เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังงานออกไปในทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้น ย่อมมีไดเรคติวิตี้ มากกว่าหนึ่งเสมอ

สรุป คือ ค่าไดเรคทีฟเกนของสายอากาศ จะมากกว่า หรือเท่ากับศูนย์ และน้อยกว่าหรือเท่ากับไดเรคติวิตี้เสมอ

$$0 \leq Dg \leq D0 \qquad \text{———2.32}$$

โดยทั่วไป ไดเรคทีฟเกนและ ไดเรคติวิตี้ จะเป็นฟังก์ชั่นของมุม θ และ $\varnothing$

$$U = B_0 F(\theta, \varnothing) \qquad \text{———2.33}$$

$$U_{max} = B_0 F_{max}(\theta, \varnothing) \qquad \text{———2.34}$$

ดังนั้นกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด คือ

$$P_{rad} = B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \varnothing) \sin\theta \, d\theta \, d\varnothing \qquad \text{———2.35}$$

ไดเรคทีฟเกน คือ

$$D_g(\theta, \varnothing) = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

$$D_g(\theta, \varnothing) = \frac{4\pi F(\theta, \varnothing)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \varnothing) \sin\theta \, d\theta \, d\varnothing} \qquad \text{———2.36}$$

$$D_0(\theta, \varnothing) = \frac{4\pi}{\Omega_A} \qquad \text{———2.37}$$

เมื่อ Ω_A เป็นมุมต้นของบีม ซึ่งเท่ากับ

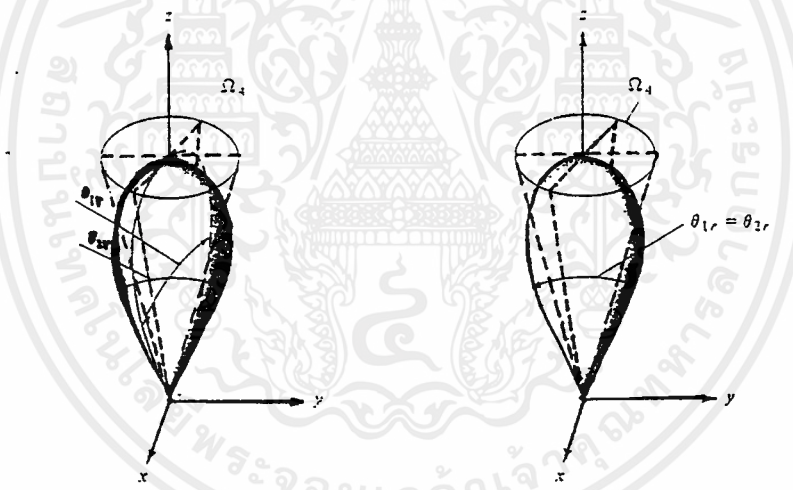
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi / F_{max}(\theta,\phi)$$

$$= \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F_n(\theta,\phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi \qquad \text{———2.38}$$

เมื่อ $F_n(\theta,\phi) = \dfrac{F(\theta,\phi)}{F_{max}(\theta,\phi)}$

มุมตันของบีม [Ω_A] คือมุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศ จะไหลผ่าน เมื่อความข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าคงที่ (และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ U) ในทุกมุมภายใน Ω_A สายอากาศซึ่งมีโลบหลักแคบ ๆ เพียงโลบเดียว และมีโลบย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของบีมจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ในสองระนาบซึ่งตั้งฉากกัน ดังรูป



รูป 2.10 แสดงแพทเทอร์นของสายอากาศแบบสมมาตร และ แบบไม่สมมาตร

จากการประมาณโดยคิดจากค่าโลบหลักเพียงอย่างเดียว มุมตันของบีม Ω_A ประมาณเท่ากับ

$$\Omega_A = H_{1r}\, H_{2r} \qquad \text{———2.39}$$

เมื่อ H_{1r} = HPBW ในระนาบใด ๆ (เรเดียน)

H_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

ดังนั้น $$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{H_{1r}\, H_{2r}} \qquad \text{———2.40}$$

$$D_0 = \frac{4\pi\,(180/\pi)^2}{H_{1d}\, H_{2d}} \qquad \text{———2.41}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ H_{1d} ,H_{2d} มีหน่วยเป็นองศา

จากสมการ 2.40 และ 2.41 จะใช้ได้ดี เมื่อ แพทเทอร์นมีโลบหลักโลบเดียว และโลบย่อยจะต้องมีขนาดเล็กมาก ๆ เท่านั้น สำหรับแพทเทอร์นซึ่งมีสองโลบหลักที่เหมือนกัน ค่าไดเรคติวิตี้ที่หาได้จะเป็นสองเท่าของค่าจริง ส่วนแพทเทอร์นที่มีโลบย่อยที่มีระดับสูง การหาไดเรคติวิตี้โดยวิธีนี้ ซึ่งตัดโลบย่อยทิ้งจะมีค่าสูงเกินความจริง และการประมาณนี้จะใกล้เคียงขึ้น เมื่อบีมวิดท์แคบลงยิ่งขึ้น

โดยปกติเรามักแสดงค่าไดเรคทีฟเกน และ ไดเรคติวิตี้เป็นหน่วยเดซิเบล (dB)

$$D_g(dB) = 10 \log_{10} D_g \qquad \text{———2.42}$$

$$D_0(dB) = 10 \log_{10} D_0 \qquad \text{———2.43}$$

2.6.5 เกน : (Gain)

เกน ของสายอากาศนั้นเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไดเรคติวิตี้ โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ซึ่งในขณะที่ไดเรคติวิตี้ แสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

เพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้ โดยเฉพาะโดยทั่วไปแล้วเราจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด

$$\text{Gain} = \frac{4\pi\, U(\theta, \varnothing)}{P_{in}} \qquad \text{———2.44}$$

โดยทั่วไปแล้วเรามักจะพูดถึงเกนสัมพันธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดให้ต่อเพาเวอร์เกน ของสายอากาศ ที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศเปรียบเทียบนั้นส่วนใหญ่ใช้แบบไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = \frac{4\pi\, U(\theta, \varnothing)}{P_{in} \text{ (ไอโซโทรปิคพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย)}} \qquad \text{———2.45}$$

เมื่อกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) คือ

$$P_{rad} = e_t P_{in} \qquad \text{———2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

e_t : เป็นประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศ

$$\therefore \quad G_g(\theta,\varnothing) = \frac{e_t [4\pi U(\theta,\varnothing)]}{P_{rad}}$$

จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$G_g(\theta,\varnothing) = e_t G_g(\theta,\varnothing) \qquad \text{———2.47}$$

ค่าสูงสุดของเกนสัมพันธ์กับค่าไดเรคติวิตี้ คือ

$$G_0 = G_g(\theta,\varnothing)\Big|_{max} = e_t D_g(\theta,\varnothing)\Big|_{max}$$

$$G_0 = e_t D_0 \qquad \text{———2.48}$$

G_o : Gain ของสายอากาศในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด คือค่าเพาเวอร์เกนที่มีค่าสูงสุด

$$G_0(dB) = 10 \log_{10} [\, e_t D_0 \,] \qquad \text{———2.49}$$

2.6.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ : (Efficiency factor of antenna)

ประสิทธิภาพของสายอากาศ (e_t) จะใช้เมื่อเราคำนึงถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้ว และภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่าง ๆ อาจเนื่องมาจาก

- การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมทซ์(Mismatch) กันระหว่างสายส่ง (Transmission Line) กับสายอากาศ
- การสูญเสียภายในตัวนำและฉนวน (I^2R)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวนได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \qquad \text{———2.50}$$

ซึ่งโดยทั่วไป $0 \le e_t \le 1$

เมื่อ e_t = ประสิทธิภาพของสายอากาศ

e_r = ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับของคลื่น = $(1- |\Gamma|^2)$

e_c = ประสิทธิภาพของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
037317

e_d = ประสิทธิภาพของฉนวน

Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อน ของศักยภาพไฟฟ้าที่ขั้วสายอากาศ $\Gamma = (Z_{in} - Z_o) / (Z_{in} + Z_o)$

Z_{in} = อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

Z_o = อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

ปกติ e_c และ e_d มักหาจากการทดลอง ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงรวมกัน

$$e_{cd} = e_c e_d$$

e_{cd} : ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งเมื่อสายอากาศไม่มีการสูญเสีย $e_{cd} = 1$

$$e_t = e_r e_{cd} = e_{cd} [(1-|\Gamma|^2)] \qquad \text{———2.51}$$

2.6.7 ประสิทธิภาพของบีม : (Beam efficiency)

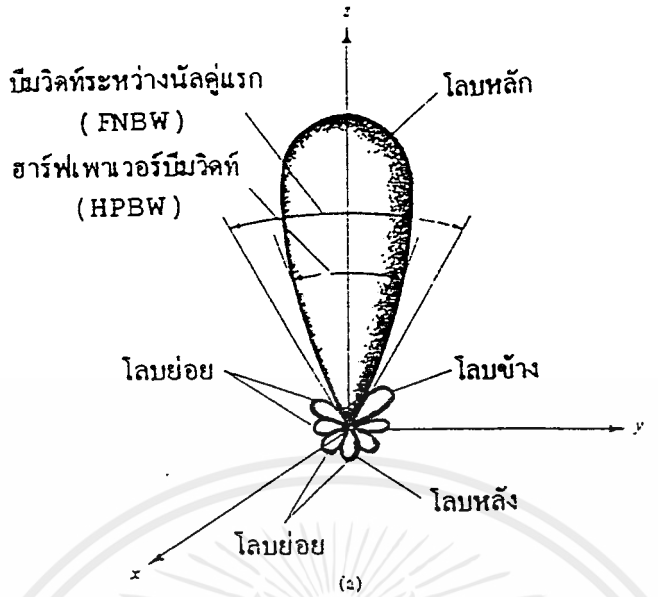
ประสิทธิภาพของบีม เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินใจว่าสายอากาศมีคุณภาพของการส่งหรือรับคลื่นดีเพียงใด สำหรับสายอากาศซึ่งมีโลบหลักอยู่ในทิศทางแกน z (θ=0) ประสิทธิภาพของบีม (Beam efficiency : BE) คือ

$$BE = \frac{\text{กำลังส่งหรือรับภายในกรวยซึ่งทำมุม } \theta_1}{\text{กำลังส่งหรือรับทั้งหมดด้วยสายอากาศนั้น}} \qquad \text{———2.52}$$

$$BE = \frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{\theta_1} U(\theta,\phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} U(\theta,\phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi} \qquad \text{———2.53}$$

เมื่อ θ_1 เป็นมุมที่เกิดมี นัล (Null) คือจุดตำแหน่งที่กำลังมีค่าเป็นศูนย์เป็นคู่แรก ดังนั้นประสิทธิภาพของบีมจะเป็นปริมาณที่แสดงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในโลบหลัก (θ_1) ต่อกำลังงานที่มีทั้งหมด

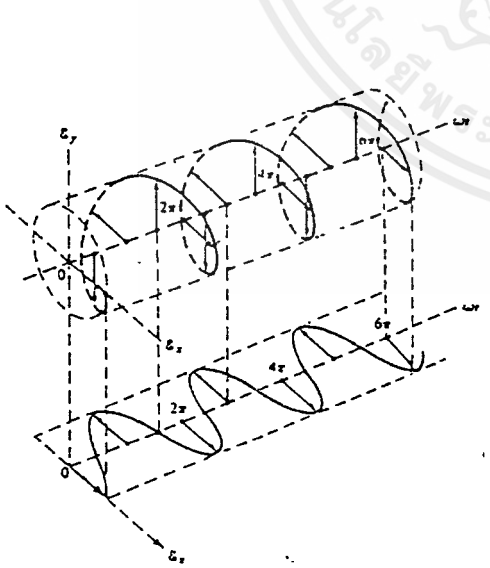
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



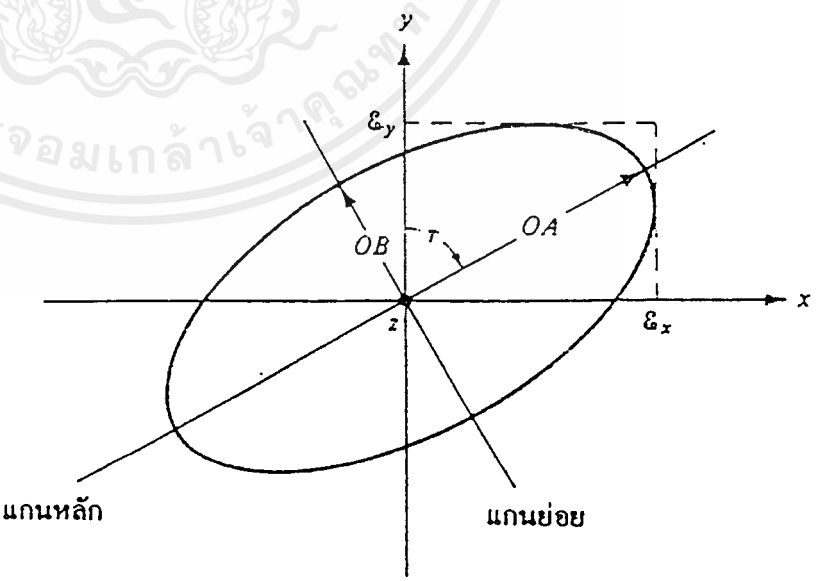
รูป 2.11 แสดงบีมท์ของสายอากาศ

2.6.8 โพลาไรเซชั่น : (Polarization)

โพลาไรเซชั่นของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทาง และขนาดของเวคเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา โดยโพลาไรเซชั่น จะแสดงการกวาดของยอดของเวคเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป ดังรูป 2.12



(a) การหมุนของคลื่น



(b) วงรีโพลาไรเซชัน

รูป 2.12 แสดงลักษณะโพราไรเซชั่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโพลาไรเซชั่นของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทิศทางใด จะเป็นโพลาไรเซชั่นของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาไรเซชั่นของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้ จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีเกนม้ากที่สุด ดังนั้นโพลาไรเซชั่นของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดของโพลาไรเซชั่น อาจแบ่งเป็น

- แบบลิเนียร์ลิโพลาไรเซชั่น (Linearly Polarization)
- แบบโพลาไรเซชั่นทรงกลม (Circularly Polarization)
- แบบโพลาไรเซชั่นวงรี (Elliptically Polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้ว จะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่าเป็นโพลาไรเซชั่นมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาไรเซชั่นมือซ้าย

ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง -z ได้ว่า

$$E(z,t) = a_x E_x(z,t) + a_y E_y(z,t) \qquad \text{----------2.54}$$

เมื่อส่วนประกอบขอบสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E_x(z,t) = E_1 \cos(\omega t - kz) \qquad \text{--------- 2.55}$$

$$E_y(z,t) = E_2 \cos(\omega t - kz + \theta) \qquad \text{--------- 2.56}$$

ถ้าให้เฟสของ E_2 เร็วกว่า E_1 อยู่ในมุม θ ที่ระนาบ $z = 0$

$$E_x(z,t) = E_1 \cos(\omega t) \qquad \text{---------- 2.57}$$

$$E_y(z,t) = E_2 \cos(\omega t + \theta) \qquad \text{---------- 2.58}$$

$$E_y(z,t) = E_2 (\sin\omega t \cos\theta + \cos\omega t \sin\phi) \qquad \text{---------- 2.59}$$

$$\cos\omega t = \frac{Ex(z,t)}{E1} \quad , \quad \sin\omega t = \sqrt{1+\left(\frac{Ex}{E1}\right)^2} \qquad \text{----------2.60}$$

แทนค่าสมการ 2.60 ใน 2.59 ได้คือ

$$\frac{Ex^2}{E1^2 \sin^2 q} - \frac{2\cos q\, Ex\, Ey}{E1\, E2 \sin^2 q} + \frac{Ey^2}{E2 \sin^2 q} = 1 \qquad \text{----------2.61}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.61 นี้เป็นสมการของวงรีที่มีแกนหลักทั้งสองไม่ตรงกับแกน x และ y

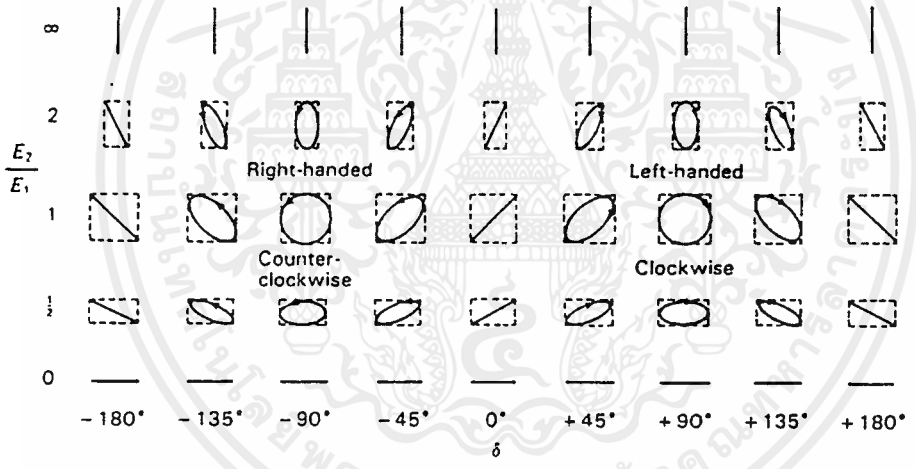
- <u>ลิเนียร์ลิโลาไรเซชั่น</u>

จากสมการ 2.61

$$\frac{E_x^2}{E_1^2 \sin^2\theta} - \frac{2\cos\theta E_x E_y}{E_1 E_2 \sin^2\theta} + \frac{E_y^2}{E_2 \sin^2\theta} = 1$$

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} - \frac{2\cos\theta E_x E_y}{E_1 E_2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = \sin^2\theta \qquad \text{—— 2.62}$$

ถ้าให้เฟสของ E_1 และ E_2 ต่างกัน $n\pi$ คือ $\theta = n\pi$; n = 1, 2, 3 ..... จะได้สมการ 2.61 เป็นสมการเส้นตรง และยังเป็นลิเนียร์ลิโพลาไรเซชั่นได้อีกหลายเงื่อนไขดังรูป 2.13



รูป 2.13 แสดงลักษณะการเกิดโพลาไรเซชั่น

- <u>โพลาไรเซชั่นแบบวงกลม</u>

จะเกิดโพลาไรเซชั่นแบบวงกลมได้ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน ($|E_1| = |E_2|$) และความต่างเฟส ระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนกี่เท่าของ $\pi/2$ ดังรูป 2.13

$$|E_1| = |E_2| \qquad \text{—— 2.63}$$

$$\theta = +((1/2) + 2n)\pi \quad ; \; n=0, 1, 2, 3.....CW$$

$$-((1/2) + 2n)\pi \quad ; \; n=0, 1, 2, 3.....CCW \qquad \text{—— 2.64}$$

CW (Clockwise) คือสนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter Clockwise) คือสนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าแทนค่าสมการ 2.63 และ 2.64 ในสมการ 2.61 จะได้ $E_x^2 + E_y^2 = |E_1|^2$ คือสมการวงกลม

- โพลาไรเซชั่นแบบวงรี

โพลาไรเซชั่นวงรีจะเกิดขึ้น เมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\pi/2$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสไม่เป็นจำนวนคี่ของ $\pi/2$ ดังรูป 2.13

$$|E_1| \neq |E_2| \qquad \text{—— 2.65}$$

เมื่อ $\theta = + ((1/2) + 2n)\pi$; n=0, 1, 2, 3.....CW

$- ((1/2) + 2n)\pi$; n=0, 1, 2, 3.....CCW —— 2.66

หรือ $\theta \neq \pm n\pi/2$; n=0, 1, 2 ..... —— 2.67

ถ้าแทนสมการ 2.65 และ 2.66 ในสมการ 2.61 จะได้สมการวงรี

$$\frac{E_x^2}{|E_1|^2} + \frac{E_y^2}{|E_2|^2} = 1 \qquad \text{—— 2.68}$$

กรณีของโพลาไรเซชั่นวงรี นั้นอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อยจะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) คือ

$$AR = \frac{\text{แกนหลัก}}{\text{แกนย่อย}} = \frac{OA}{OB} \qquad \text{—— 2.69}$$

เมื่อ $1 \leq AR \leq \infty$

- <u>โพลาไรเซชั่นลอสเฟคเตอร์ : (Polarization Loss Factor)</u>

โดยทั่วไปแล้วโพลาไรเซชั่นของสายอากาศไม่เหมือนกับโพลาไรเซชั่นของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่าเกิดโพลาไรเซชั่นมิสแมทช์ (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาไรเซชั่น (Polarization loss) สมมุติว่าสนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศ $(\vec{E}_i)$ เขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = \vec{\rho}_w \; E_i \qquad \text{—— 2.70}$$

ให้ $\vec{\rho}_w$ เป็นหน่วยเวคเตอร์ของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาไรเซชั่นของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับ (E_a) มีค่าดังนี้

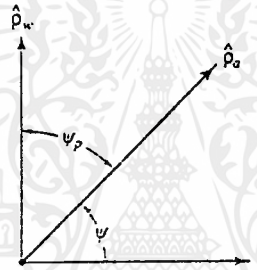
$$\vec{E}_a = \vec{\rho}_a \; E_a \qquad \text{—— 2.71}$$

ให้ $\vec{\rho}_a$ เป็นหน่วยเวคเตอร์ของสายอากาศ

กำหนดให้โพลาไรเซชั่นลอสเฟคเตอร์ (Polarization loss Factor : PLF) มีค่าดังนี้

$$PLF = \left| \vec{\rho}_w . \vec{\rho}_a^{\,*} \right|^2 = \left| \cos \psi_\rho \right|^2 \qquad \text{—— 2.72}$$

เมื่อ ψ_ρ เป็นมุมระหว่างหน่วยเวคเตอร์ทั้งสอง ดังรูป 2.14 ถ้าเกิดโพลาไรเซชั่น แมทช์ ค่า PLF จะเป็นหนึ่ง และสายอากาศจะรับกำลังงานได้มากที่สุด ดังนั้นถ้าสายอากาากับคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศตั้งฉากกันและกัน แล้ว สายอากาศนั้นจะรับคลื่นไม่ได้เลย



รูป 2.14 หน่วยเวคเตอร์โพลาไรเซชั่น

2.6.9 อินพุทอิมพีแดนซ์ : (Input Impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น ๆ อาจเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้า ที่ขั้วของสายอากาศนั้น คือ อัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็น

$$Z_A = R_A + jX_A \qquad (\Omega) \qquad \text{—— 2.73}$$

เมื่อ R_A = ความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ

X_A = รีเอคแตนซ์ที่ขั้วสายอากาศ

โดยทั่วไปความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ (R_A) จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ

$$R_A = R_r + R_L \qquad (\Omega) \qquad \text{—— 2.74}$$

เมื่อ R_r = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

R_L = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

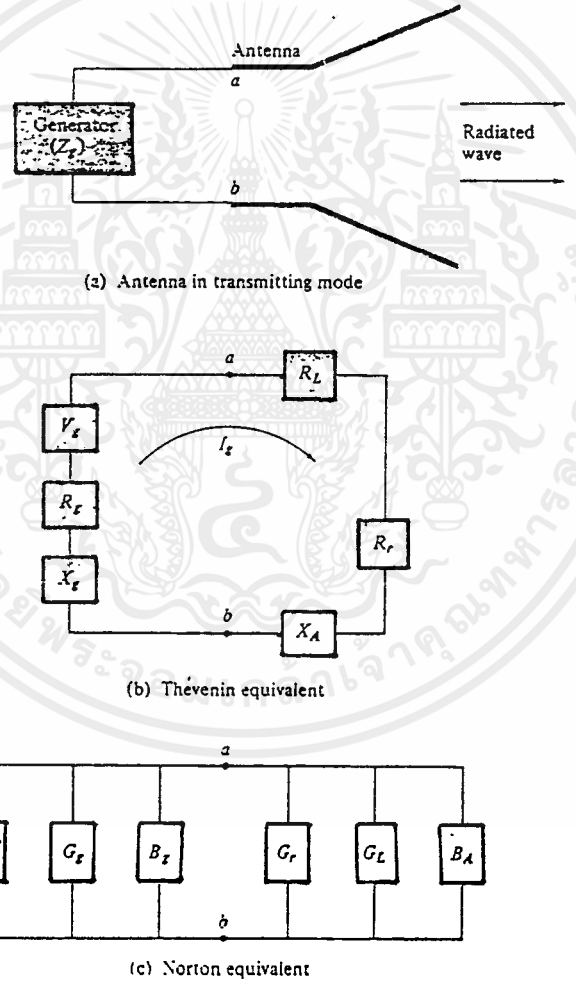
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้สายอากาศต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มี อินพีแดนซ์ ภายในเป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (\Omega) \qquad \text{—— 2.75}$$

เมื่อ R_g = ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

X_g = รีแอคแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ



รูป 2.15 แสดงวงจรสมมูลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการส่ง

จากรูป 2.15 หากระแสที่ไหลภายในลูป ได้คือ

$$I_g = \frac{V_g}{Z_t} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_g = \frac{V_g}{(R_r+R_L+R_g) + j\,(X_A + X_g)} \quad [A] \qquad \text{—— 2.76}$$

ขนาดของกระแสมีค่าดังนี้

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{\sqrt{(R_r+R_L+R_g)^2 + (X_A + X_g)^2}} \quad [A] \qquad \text{—— 2.77}$$

กำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่าดังนี้

$$P_r = 1/2\,|I_g|^2 R_r$$

$$= \frac{|V_g|^2}{2} \cdot \left[\frac{R_r}{(R_r+R_L+R_g)^2 + (X_A+X_g)^2}\right] \quad [W] \qquad \text{—— 2.78}$$

กำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อนจะมีค่าดังนี้

$$P_L = 1/2\,|I_g|^2 R_L$$

$$= \frac{|V_g|^2}{2} \cdot \left[\frac{R_L}{(R_r+R_L+R_g)^2 + (X_A+X_g)^2}\right] \quad [W] \qquad \text{—— 2.79}$$

กำลังส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว R_g ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งมีค่า

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{2} \cdot \left[\frac{R_g}{(R_r+R_L+R_g)^2 + (X_A+X_g)^2}\right] \quad [W] \qquad \text{—— 2.80}$$

จะเห็นว่ากำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดคอนจูเกตแมทช์ (Conjugete Match) นั่นคือจะเกิดเมื่อ

$$R_g = R_r + R_L \qquad \text{—— 2.81}$$

และ $X_A = -X_g$

ซึ่งจะทำให้ $P_g = P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \cdot \left[\frac{R_g}{(R_r + R_L)^2}\right]$ —— 2.82

ดังนั้นกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์ จะมีค่าดังนี้

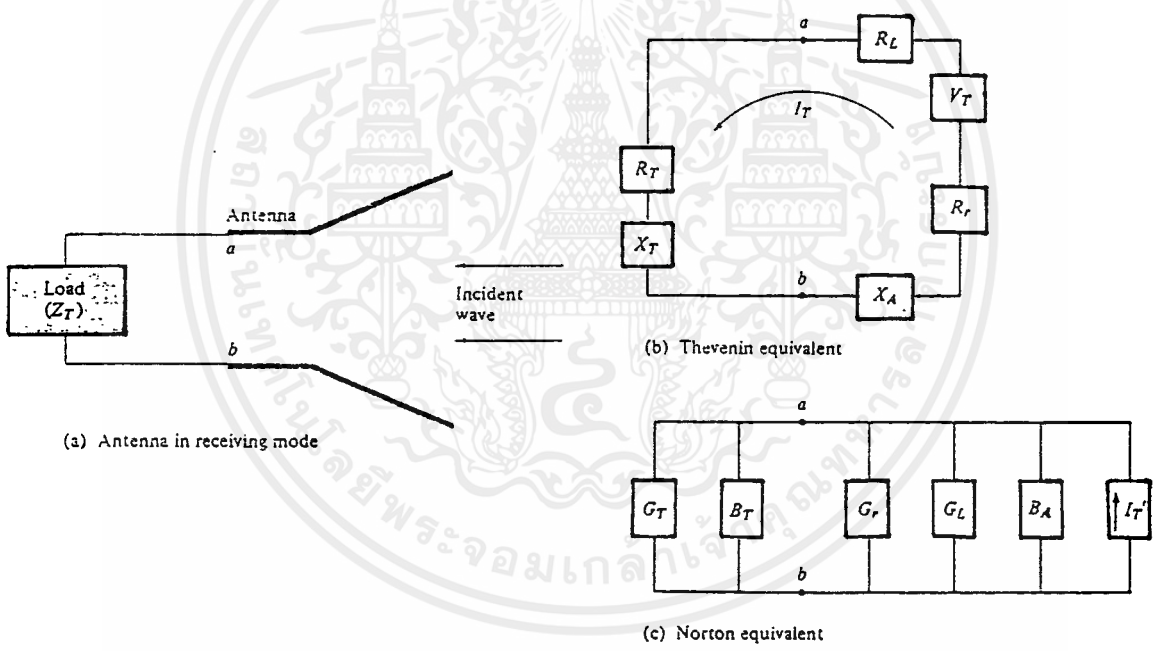
$$P_s = (1/2)\,V_g\,I_g^*$$

$$= (1/2)\,V_g \cdot \left[\frac{V_g^*}{2(R_r + R_L)}\right]$$

$$= \frac{|V_g|^2}{4} \cdot \left[\frac{1}{R_r + R_L}\right] \quad (w) \qquad \text{—— 2.83}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนกำลังที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด P_t ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนภายในความต้านทานภายใน (R_g) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมทช์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่มายังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไปโดยผ่านกลไกที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น P_r อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ($e_{cd} = 1$) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็น คอนจูเกตแมทช์ สมมุติว่าเป็นการแมทช์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายสิง ($e_r = 1$) ถ้ามีการใช้สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูป 2.16 ถ้ามีคลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า V_t ซึ่งเทียบได้กับ V_g ในโหมดของการส่ง



รูป 2.16 แสดงวงจรสมมูลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการรับ

ปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชั่นของความถี่ และจะสมพงษ์กับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่ง ๆ เท่านั้น นอกจากนี้อินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศยังขึ้นกับแฟคเตอร์ต่าง ๆ อีกได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมัก จงหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลองวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.10 แบนด์วิดท์ : (Band Width)

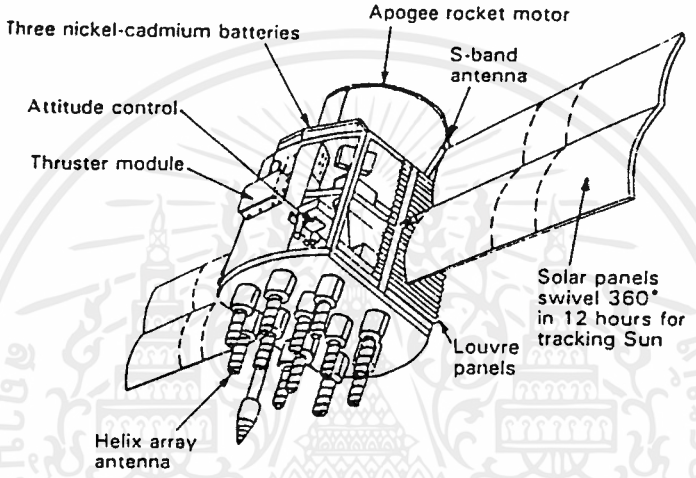
แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์ แพทเทอร์น , บีมวิดท์ , โพลาไรเซชั่น , ระดับของไซด์โลบ , แกน , ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นให้อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนด หรือมาตรฐาน

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่กล่าวมาจะไม่เปลี่ยนแปลง ตามความถี่ ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของแพทเทอร์น กับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
สายอากาศเฮลิคอล (Helical Antenna)

สายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน เป็นสายอากาศที่ให้คลื่นที่มีโพลาไรเซชั่น แบบวงกลมในทิศแนวแกน และมีแบนด์วิดท์กว้าง จึงมีใช้ในงานสื่อสารทั่วไป และเป็นสายอากาศแบบโพลาไรเซชั่นวงกลมแบบหนึ่งที่ใช้เป็นสายอากาศติดต่อกับจรวดและยานอวกาศอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 3.1 สายอากาศเฮลิคอลที่ใช้กับดาวเทียม Navster GVS

3.1 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล

สายอากาศเฮลิคอลที่ใช้กันโดยทั่วไปจะมีรูปร่างดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 กล่าวคือ ประกอบด้วยขดลวดรูปเฮลิคอล ซึ่งทำหน้าที่กระจายคลื่น และแผ่นสะท้อน การป้อนเพาเวอร์นั้นจะป้อนจากสายโคแอกเชียลจากทางด้านหลังของแผ่นสะท้อน โดยให้โลหะในต่อกับขดลวดรูปเฮลิคอลและโลหะนอกต่อกับแผ่นสะท้อน

สำหรับโครงสร้างรายละเอียดของขดลวดรูปเฮลิคอลนั้นจะประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้คือ

D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

C เป็นความยาวเส้นรอบวงขดลวด

S เป็นระยะห่างระหว่างขดลวด

α เป็นมุมพิตช์ (pitch angle)

L เป็นความยาวของขดลวดหนึ่งรอบ

n เป็นจำนวนรอบ

A เป็นความยาวตามแนวแกนของขดลวด

a เป็นรัศมีของเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

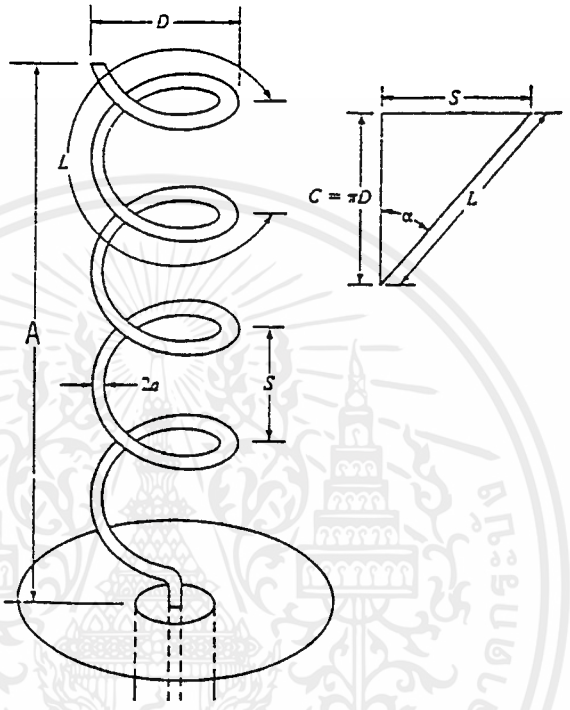
ตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$C = \pi D$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left\{\frac{S}{\pi D}\right\}$$

$$L = \{S^2 + (\pi D)^2\}^{1/2}$$

$$A = nS$$

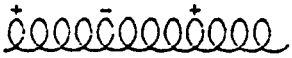


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล

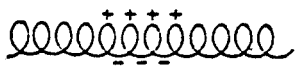
3.2 โหมดของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอล

เมื่อพิจารณาโหมดของกระแสที่ไหลบนโครงสร้างของเฮลิกซ์ จากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี พบว่ากระแสจะไหลได้หลายโหมดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 โดยที่เครื่องหมาย + และ - แสดงเครื่องหมายของประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนั้น ๆ โหมด T_0 เป็นโหมดต่ำสุดซึ่งจะมีบทบาทมากในกรณีที่ L สั้นกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ ในกรณีที่ $nL << \lambda$ โหมดนี้จะเป็นโหมดหลักที่ทำให้เกิดการกระจายคลื่นออกไป การกระจายคลื่นในโหมดนี้จะคล้ายคลึงกับการกระจายคลื่นออกจากสายอากาศคู่ปขนาดเล็ก ซึ่งคลื่นที่จะกระจายออกไปนั้นจะออกไปในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของเฮลิคอล จึงทำให้มีชื่อเรียกเป็นสายอากาศเฮลิคอลโหมดตั้งฉาก (Normal mode helical antenna) เนื่องจากสายอากาศเฮลิคอลโหมดตั้งฉากนี้เป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์แคบจึงไม่กล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้ อย่างไรก็ตามจากรูปร่างที่กะทัดรัดทำให้สายอากาศนี้มีที่ใช้งานวิทยุสื่อสารที่ไม่ต้องการแบนด์วิดท์กว้าง

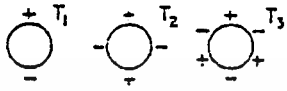
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โหมด T_0



(ข) โหมด T_1

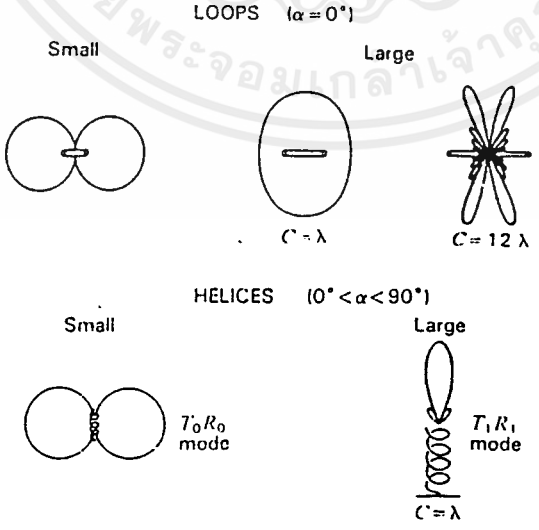


(ค) โหมด T_1, T_2, T_3 เมื่อมองจากแนวแกน

รูปที่ 3.3 ประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนสายอากาศเฮลิคอลโหมดต่าง ๆ

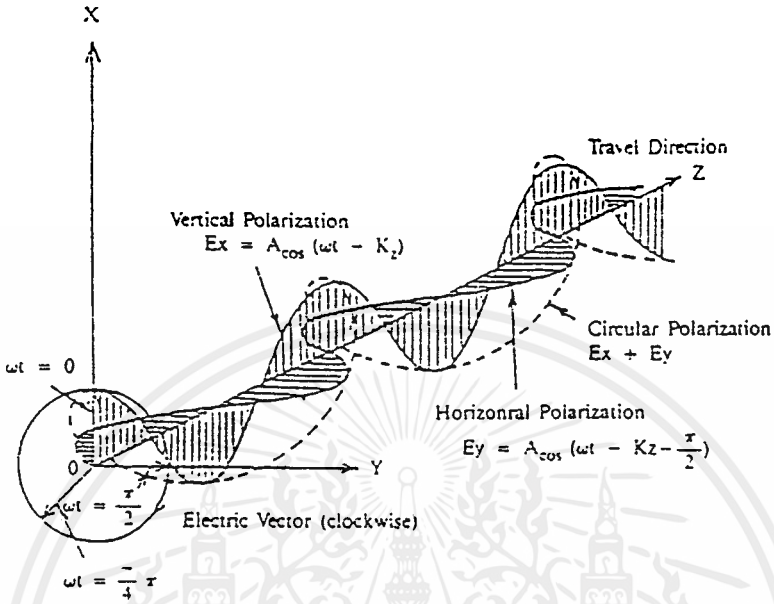
โหมด T_1 เป็นโหมดหลักในกรณีที่ C มีค่าประมาณหนึ่งความยาวคลื่น และถ้าโครงสร้างของขดลวดมีมุมพิตช์แคบก็จะทำให้กระแสชั่วขณะมีการกระจายดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 (ข) และ (ค) กล่าวคือ กระแสชั่วขณะที่มีเฟสเป็นบวกและมีเฟสเป็นลบจะอยู่ห่างกันครึ่งรอบหรืออยู่ฝั่งตรงข้ามของเส้นผ่านศูนย์กลาง กระแสในโหมดนี้จะทำให้เกิดการกระจายคลื่นออกไปในทิศแนวแกนและมีแบนด์วิดท์กว้างดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป สายอากาศเฮลิคอลที่มีโหมด T_1 เป็นหลักนี้ จึงเรียกว่าสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน (Axial mode helical antenna)

สำหรับโหมด T_2 และ T_3 และโหมดที่สูงกว่านี้นั้นจะเกิดขึ้น เมื่อ C มีขนาดยาวกว่าความยาวคลื่น รูปที่ 3.3 (ค) นั้นแสดงค่าประจุชั่วขณะของกรณีที่มุมพิตช์แคบ การกระจายคลื่นจากโหมดนี้จะออกไปหลายทิศทาง และทิศทางของเมนบีมก็เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ได้มาก ดังนั้นจึงไม่ค่อยมีที่ใช้ในแง่ของสายอากาศ



รูปที่ 3.4 .1 รูปแสดงแพทเทอร์นสายอากาศเฮลิคอลทั้งสองโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.2 รูปแสดง โพลาไรเซชั่น (Circular Polarization)

3.3 คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

สายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนนี้เป็นสายอากาศที่ให้คลื่นที่มีโพลาไรเซชั่นแบบวงกลมในทิศแนวแกน และมีแบนด์วิดท์กว้าง จึงมีที่ใช้ในงานสื่อสารทั่วไป และเป็นสายอากาศแบบโพลาไรเซชั่นวงกลมแบบหนึ่งที่ใช้เป็นสายอากาศติดต่อกับจรวดและยานอวกาศอย่างแพร่หลาย

3.3.1 กระแสที่ไหลและอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

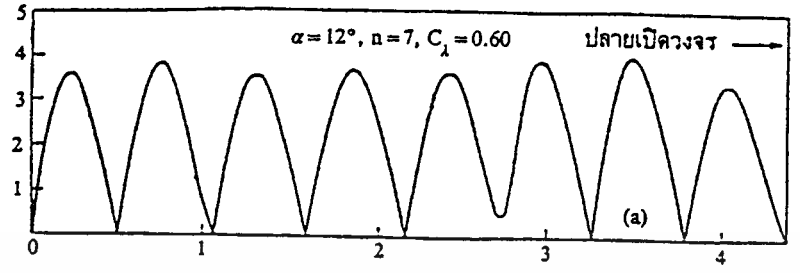
โหมดของกระแสที่ไหลบนสายอากาศเฮลิคอลขนาดต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ข้างบนนั้น ได้มีผู้ทำการทดลองวัดขนาดจริง ๆ ของกระแสที่ไหลบนสายอากาศเฮลิคอล ซึ่งตัวอย่างของผลการวัดส่วนหนึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ในกรณีของรูปนั้น เป็นกรณีที่ C = 0.6λ จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นลวดจะอยู่ในรูปคลื่นยืนที่ปลายสายเปิดวงจรอยู่สำหรับรูปนั้นเป็นกรณีที่ C = 1.07 λ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสไหลตามในรูปนั้น จะสามารถอธิบายได้โดยใช้รูป (ค) กล่าวคือในช่วงที่ C มีขนาดประมาณ 0.6 λ หรือเล็กว่านี้ โหมดของกระแสที่ไหลจะเป็น T_0 เป็นหลัก และกระแสโหมด T_0 นี้ก็จะเป็นคลื่นจรออกจากจุดป้อนแล้วไปสะท้อนที่ปลายเส้นลวด จึงทำให้เกิดคลื่นยืนตามที่เห็นในรูป (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

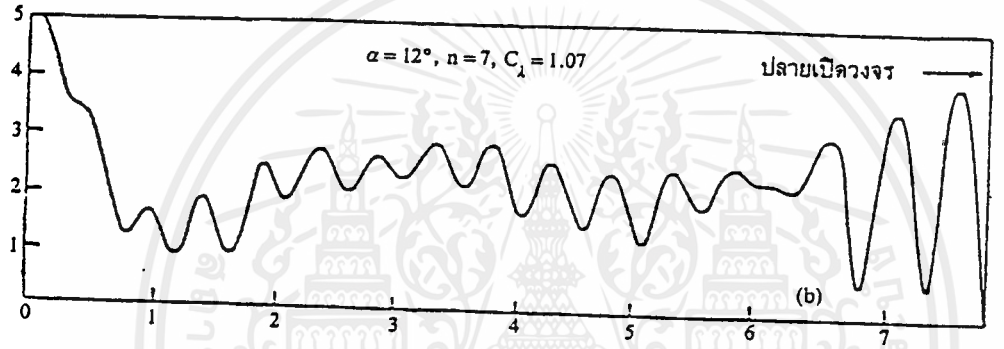
สำหรับกรณีของรูปนั้นจะอธิบายได้โดยใช้รูป (ง) และรูป (จ) ดังนี้คือ ในกรณีที่ C มีขนาดประมาณหนึ่งความยาวคลื่น โหมดของกระแสที่เกิดขึ้นได้มี 2 โหมดด้วยกัน คือ T_0 และ T_1 โหมด T0 นั้นเป็นโหมดที่ไม่สามารถที่ส่งผ่านไปตามโครงสร้างได้ จึงมีขนาดใหญ่บริเวณจุดป้อนแล้วจะมีขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากจุดป้อน สำหรับโหมด T_1 นั้นจะเป็นโหมดที่สามารถส่งผ่านไปตามโครงสร้างได้ และคลื่นจรของโหมดนี้ที่ออกจากจุดป้อนก็จะมีขนาดคงที่ตลอดความยาวของเส้นลวด เมื่อพิจารณาที่ปลายสายคลื่นจรโหมด T_1 เมื่อพบกับปลายสายที่เปิดวงจรอยู่ก็จะเกิดการสะท้อนโดยการสะท้อนนี้จะมีโหมด T_0 และโหมด T_1 ถูกกระตุ้น ให้เกิดพร้อมกัน และเช่นเดียวกับที่จุดป้อนโหมด T_0 ที่สะท้อนกลับมานี้นั้นจะเล็กลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากปลายสาย ในขณะที่โหมด T_1 จะส่งผ่านเป็นคลื่นจรกลับมาทางจุดป้อน เนื่องจากโหมด T_0 และ โหมด T_1 ขาไปเข้าด้วยกันจะเป็นรูปกราฟดังที่แสดงไวในรูป (จ) กล่าวคือจะมีบริเวณที่ค่ากระแสมีขนาดเล็กลงเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากเฟสของกระแสทั้งสองตรงข้ามกันในขณะที่ขนาดของกระแสเท่ากัน ลักษณะดังกล่าวนี้จะเกิดกับกระแสที่สะท้อนกลับมาเช่นเดียวกัน และเนื่องจากกระแสโหมด T_1 ที่สะท้อนกลับมามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขาไป จึงทำให้คลื่นยืนที่เกิดขึ้นตรงกลาง ๆ ของขดลวดมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอดังที่เห็นจากผลการวัดในรูป (ช) อนึ่งตามคำ อธิบายข้างบนนี้จะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นลวดเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นจะต้องมากเพียงพอ จึงจะทำให้เกิดกระแสที่บริเวณกลาง ๆ มีค่าสม่ำเสมอดังในรูป (ช) และจากการทดลองพบว่าช่องของค่า C และมุม α ที่ทำให้ได้กระแสใกล้เคียงกับรูป (ช) นั้นคือ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ และ $12^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$

เมื่อทำการพิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากรูปร่างของกระแสในรูปที่ 3.5 จะพิจารณาลักษณะเฉพาะของอินพุตอิมพีแดนซ์ของกรณีที่ C/λ มีขนาดเล็กกว่า 2/3 และกรณีที่ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ ได้

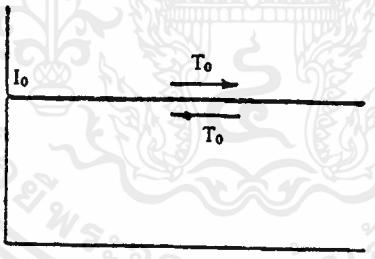
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



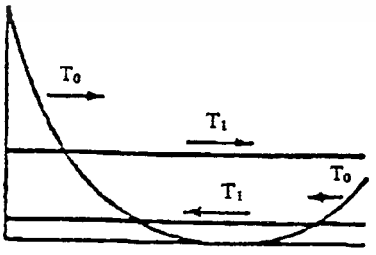
(ก) กรณีที่มีกระแสโหมด T_0 เป็นหลัก



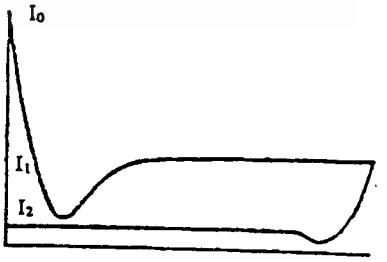
(ข) กรณีที่มีกระแสโหมด T_1 เป็นหลัก



(ค) กระแสคลื่นจรของกระแสโหมด T_0



(ง) กระแสคลื่นจรของกรณีที่มีโหมด T_1 เป็นหลัก



(จ) กระแสรวมของกรณีที่มีโหมด T_1 เป็นหลัก

รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอลขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนี้คือ ตามรูป (ก) เมื่อความถี่เปลี่ยนไป ความยาวของเส้นลวดเมื่อเทียบกับ λ จะเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้กระแสของคลื่นยืนที่ปรากฏที่ขั้วอินพุตเปลี่ยนไป ผลก็คือทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป และการเปลี่ยนแปลงนี้ค่อนข้างจะมากซึ่งทำให้แบนด์วิดท์ในเชิงของอินพุตอิมพีแดนซ์มีขนาดแคบ

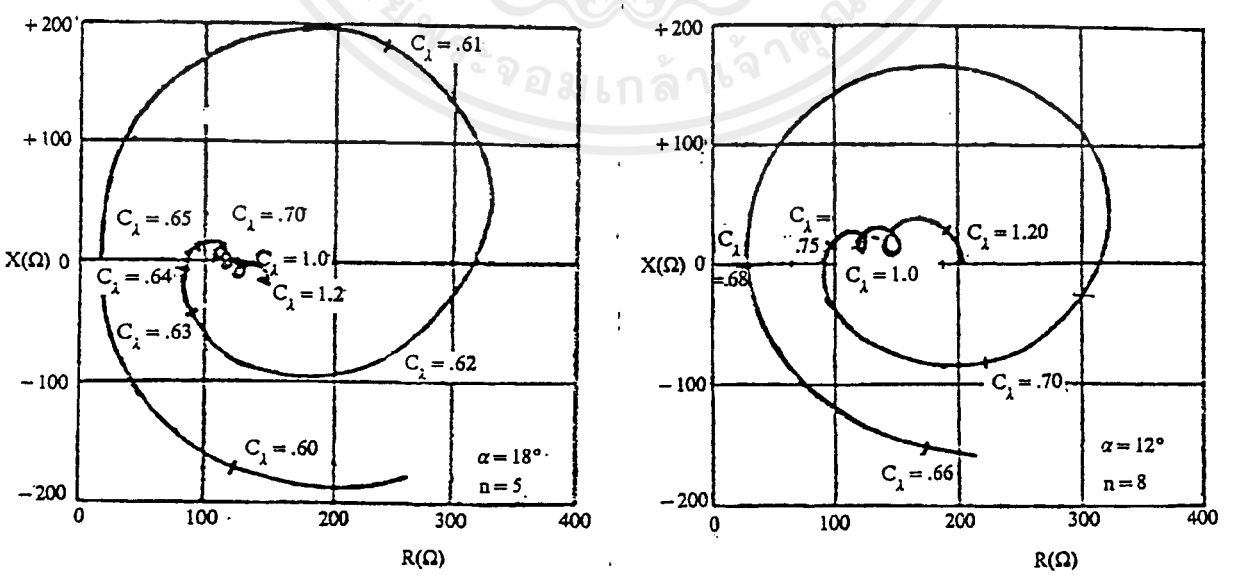
สำหรับในกรณีที่ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ นั้น จากรูปที่ 3.5 (จ) จะเห็นได้ว่าที่ขั้วอินพุตกระแสขาไปกับกระแสที่สะท้อนกลับมามีขนาดต่างกันมาก ทำให้ผลกระทบจากการสะท้อนกลับของกระแสตามความถี่น้อยด้วย ดังนั้นสายอากาศในเงื่อนไขดังกล่าวนี้จึงมีแบนด์วิดท์ในเชิงของอินพุตอิมพีแดนซ์กว้าง รูปที่ 3.6 แสดงผลการวัดอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอล ตามโครงสร้างในรูป (ก) ที่มี $\alpha = 12^\circ$, $n = 8$ และ $\alpha = 18^\circ$, $n = 5$ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่บริเวณ C/λ ต่ำกว่า 0.7 จะมีการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ค่อนข้างมาก และบริเวณที่ C/λ อยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 1.2 นั้นอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่ารีแอกแดนซ์ต่ำมาก และมีค่ารีซีสแตนซ์อยู่ในช่วง 100 ถึง 200 (Ω) สำหรับค่ารีซิสแตนซ์นี้จากผลการทดลองหลาย ๆ โครงสร้างพบว่าในเงื่อนไขต่อไปนี้คือ $3/4 \leq C/\lambda \leq 4/3$ และ $12^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ ค่ารีซิสแตนซ์ R จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$R = 140\ C/\lambda \qquad \text{---3.2}$$

โดยมีความผิดพลาดอยู่ภายใน $\pm 20\%$

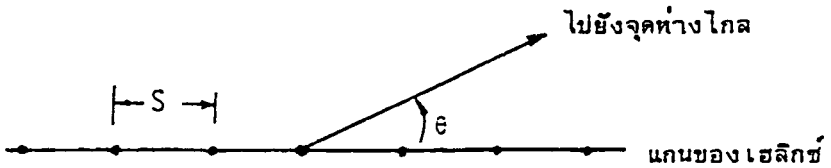
3.3.2 ความเร็วเฟสของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

ในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกไปจากสายอากาศเฮลิคอล โหมดแนวแกนนี้จำเป็นจะต้องรู้ความเร็วเฟสของกระแสที่ไหลบนสายอากาศ เพื่อให้การพิจารณาทำได้ง่ายจะใช้วิธีการประมาณค่าอันดับหนึ่ง กล่าวคือ สมมติให้กระแสที่ไหลบนสายอากาศอยู่ในรูปคลื่นจรที่มีค่าสม่ำเสมอ การพิจารณาค่าความเร็วเฟสของกระแสที่ต้องการเพื่อให้สายอากาศเฮลิคอลทำงานในโหมดแนวแกนนั้น อาจจะพิจารณาได้โดยใช้หลักการของสายอากาศอาร์เรย์ดังนี้คือ ให้เส้นลวดแต่ละขดเป็นตัวประกอบของอาร์เรย์



รูปที่ 3.6 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การหาอาร์เรย์แฟกเตอร์ของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนโดยให้กระแสแบบจุดแทนเส้นลวดหนึ่งขด

ซึ่งจะทำให้แพทเทอร์นของการกระจายคลื่นเป็นผลคูณของแพทเทอร์นที่เกิดจากเส้นลวดหนึ่งขดกับอาร์เรย์แฟกเตอร์ที่เกิดจากการเรียงตัวของกระแสบนจุดที่วางห่างกัน S ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 เพื่อให้แพทเทอร์นรวมชี้ไปในทิศแนวแกน แพทเทอร์นของอาร์เรย์แฟกเตอร์ก็จะต้องชี้ไปในทิศแนวแกนด้วย อาร์เรย์แฟกเตอร์ในกรณีนี้จะเขียนได้ตามสมการ 3.3 ดังนี้คือ

$$A_n(u) = \frac{\sin\left(\frac{nu}{2}\right)}{n\sin\frac{u}{2}} \qquad \text{____3.3}$$

โดยที่

$$u = S\cos\theta + \delta \qquad \text{____3.4}$$

และ n เป็นจำนวนตัวประกอบ และ δ เป็นเฟสของตัวประกอบที่ I เมื่อเทียบกับตัวประกอบที่ (I - 1) ถ้าให้ความเร็วเฟสของกระแสบนเส้นลวดเป็น

$$V = pc \qquad \text{____3.5}$$

จะสามารถเขียนสมการ 3.4 ในรูปต่อไปนี้

$$u = \frac{2\pi}{\lambda}\left(S\cos\theta - \frac{L}{p}\right) \qquad \text{____3.6}$$

เพื่อให้แพทเทอร์นของอาร์เรย์แฟกเตอร์ในสมการ 3.3 ชี้ไปในทิศแนวแกนหรือเป็นแอนด์ไฟร์อาร์เรย์ ค่า u ในสมการ 3.6 ในทิศ $\theta = 0^\circ$ จะต้องเป็นดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = -2\pi m \qquad \text{____3.7}$$

เมื่อแทนค่าสมการ 3.7 พร้อมเงื่อนไข $\theta = 0^\circ$ ลงในสมการ 3.6 ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้คือ

$$\frac{L}{P} = S + m\lambda \qquad \text{____3.8}$$

ในกรณีที่ m = 1 และ P = 1 ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ S ดังนี้คือ

$$L - S = \lambda \qquad \text{____3.9}$$

ในกรณีที่ m = 1 นี้ กระแสที่ไหล คือ โหมด T_1 และถ้า m = 2 กระแสที่ไหลก็จะเป็นโหมด T_2 ดังค่าค่า m จึงเป็นค่าที่แสดงโหมดของกระแสที่ทำให้ได้แพตเทินชี้ไปในแนวแกนด้วยอย่างไรก็ตามในกรณีที่ m = 0 นั้นค่า p จะต้องใหญ่กว่า 1 จึงจะเป็นได้ เพราะถ้าค่า p = 1 จากสมการ 3.8 จะได้ว่า L = S ซึ่งก็หมายถึงเส้นลวดถูกยืดเป็นเส้นตรงนั่นเอง และเนื่องจากจะไม่มีคลื่นกระจายออกไปในทิศทางแนวแกนของเส้นลวดเส้นตรง ดังนั้นเงื่อนไขที่ P = 1 จะไม่มีคลื่นออกไปในทิศทาง $\theta = 0^\circ$

เนื่องจากโหมดที่มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นดีนั้นเป็นโหมด T_1 ดังนั้นจะขอพิจารณาเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับ p ในกรณที่ m = 1 จากสมการ 3.8 จะสามารถเขียน p ได้ดังนี้คือ

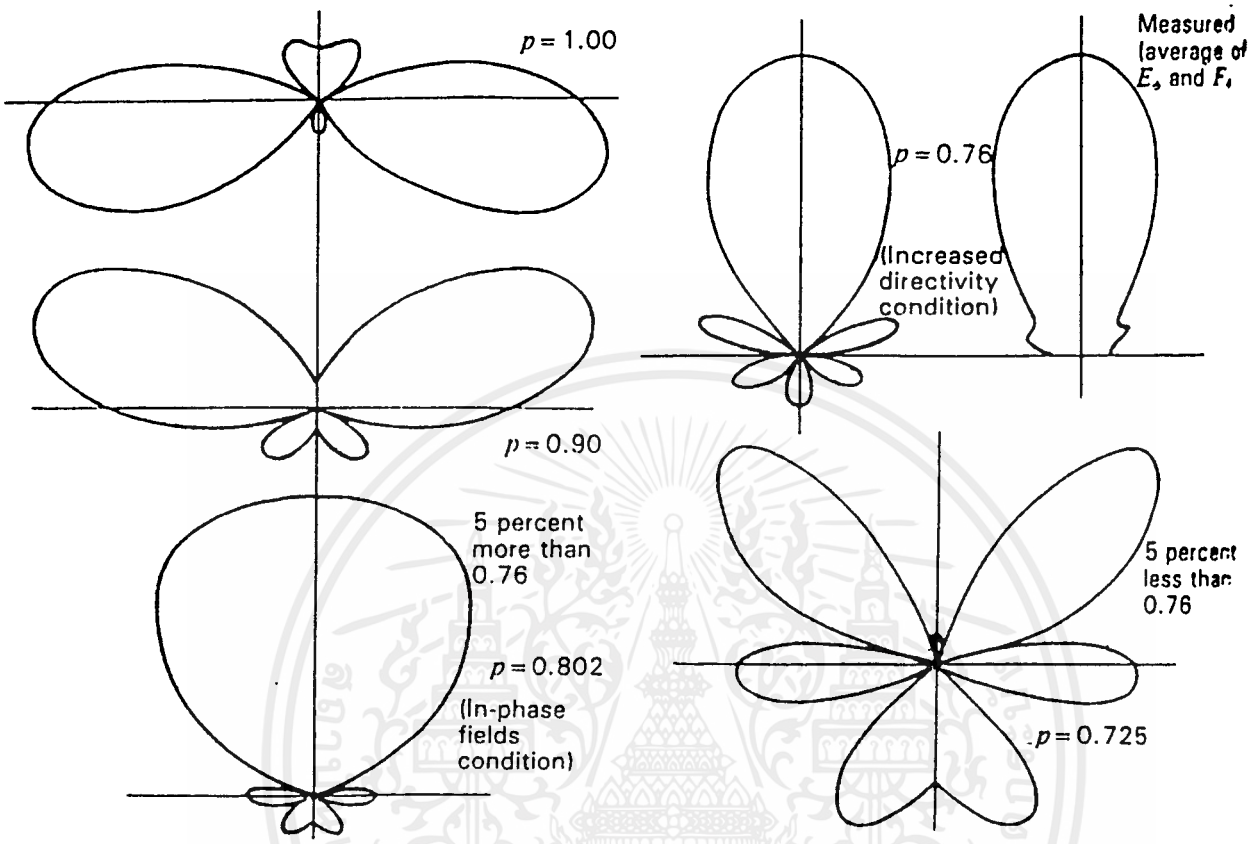
$$p = \frac{L}{S+\lambda} \qquad \text{____3.10}$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในโครงสร้างตามสมการ 3.1 แล้วเขียนสมการ 3.10 ในรูปของ C จะได้เป็นดังนี้

$$p = \frac{1}{\sin\alpha + (\cos\alpha \cdot \lambda / C)} \qquad \text{____3.11}$$

รูปที่ 3.8 แสดงผลการคำนวณค่า p โดยมี C/λ เป็นตัวแปรจากรูปจะเห็นได้ว่าที่บริเวณ $3/4 \le C/\lambda \le 4/3$ และ $12^\circ \le \alpha \le 18^\circ$ ค่า p จะต่ำกว่า 1 ซึ่งจากการวัดก็ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 อัตราส่วนระหว่างความเร็วเฟสในสายอากาศเฮลิคอลกับความเร็วแสงในกรณีที่สายอากาศทำงานในโหมดแนวแกน

3.3.3 การกระจายคลื่นจากสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

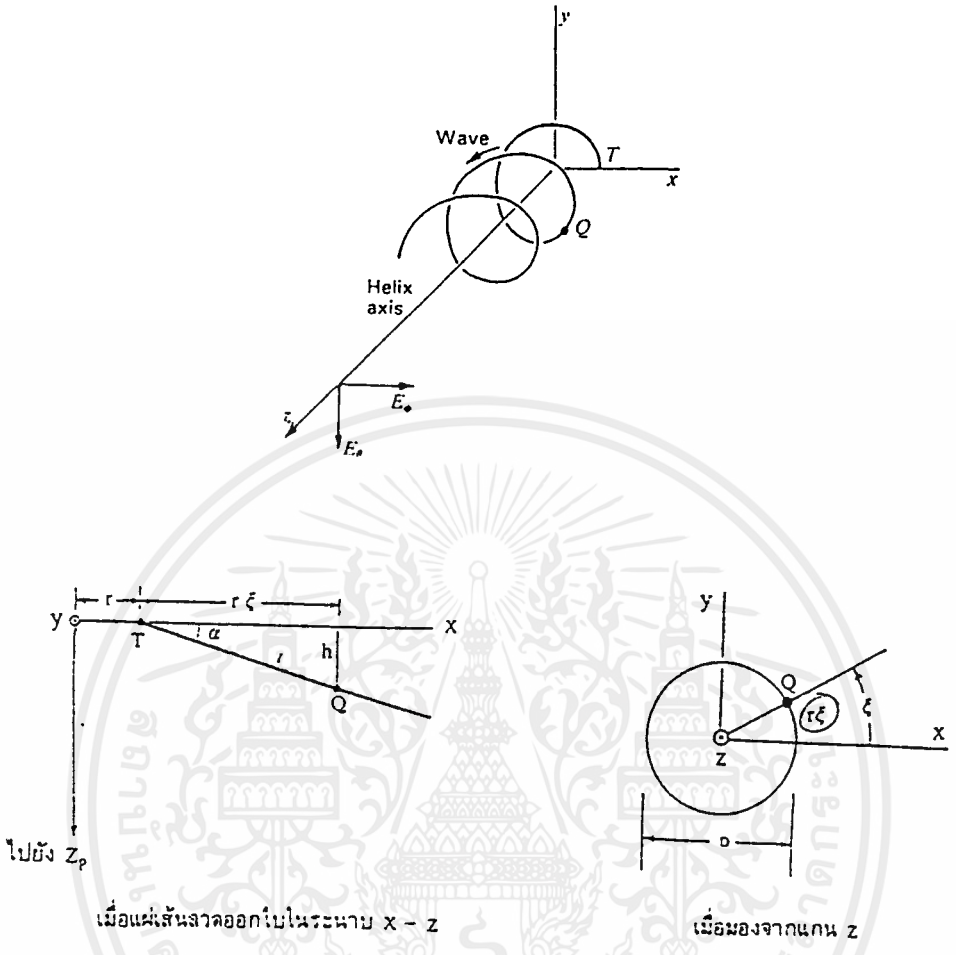
การคิดการกระจายคลื่นจากสายอากาศ โหมดแนวแกนนั้นจะทำได้โดยการใช้วิธีประมาณค่ากระแสให้อยู่ในรูปคลื่นจร และใช้ความเร็วเฟสของกระแสตามสมการ 3.10 หรือสมการ 3.11 ถ้าให้สายอากาศเฮลิคอล วางตัวอยู่ในรูปที่ 3.9 (ก) เมื่อกางเส้นลวดออกไปในระนาบ x - z จะได้เป็นรูป (ข) ส่วนรูป (ค) แสดงรูปสายอากาศที่มองจากแกน z ตรงจุด Q ตามรูป (ค) นี้ ตำแหน่งจุด Q บนเส้นลวดอาจจะแสดงได้โดยใช้ระบบแกนประสานแบบทรงกระบอกเป็น (r, ξ, z) ถ้าให้ ℓ เป็นระยะทางตามเส้นลวดจากจุดต้นทาง T ถึงจุด Q จะได้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของตัวแปรต่าง ๆ ในรูปต่อไปนี้

$$h = \ell \sin \alpha$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{r\xi}{\ell}\right) \qquad \text{3.12}$$

$$r\xi = \ell \cos\alpha$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอลกับการคิดระยะทางไปยังจุดสังเกตุ

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะขอพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเฉพาะที่จุดห่างไกลบนแกน z และให้ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงจุดสังเกตเป็น Zp จะพบว่าระยะทางจากจุด Q ถึงจุดสังเกตุเป็นดังนี้คือ

$$Zp - h = Zp - \ell \sin\alpha \qquad \text{____3.13}$$

และกระแสที่ไหลตรงตำแหน่ง Q จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$I(r,\xi, z) = I_0 \, e^{-j \frac{2\pi}{\lambda p} \cdot \ell} \qquad \text{____3.14}$$

โดยที่ I_0 เป็นขนาดของกระแสคลื่นจร จากสมการ 3.13 และสมการ 3.14 ข้างบนจะสามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้า E_θ และ $E_\varnothing$ ในรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\theta = j30kI_0 \cos\alpha \frac{e^{-jkZ_p}}{Zp} \int_0^{2\pi_n} \cos\xi\, e^{jk\lambda\left(\sin\alpha-\frac{1}{p}\right)} d\xi \qquad \text{____3.15}$$

$$E_\varnothing = j30kI_0 \cos\alpha \frac{e^{-jkZ_p}}{Zp} \int_0^{2\pi_n} \sin\xi\, e^{jk\lambda\left(\sin\alpha-\frac{1}{p}\right)} d\xi \qquad \text{____3.16}$$

จาก $\ell\cos\alpha = r\xi$ ในสมการ 3.12 จะทำให้สามารถเขียน $k\ell(\sin\alpha - \frac{1}{p})$ ได้ในรูปต่อไปนี้

$$k\ell(\sin\alpha - \tfrac{1}{p}) = kr\xi(\tan\alpha - \tfrac{1}{p\cos\alpha}) \qquad \text{____3.17}$$

เมื่อแทนค่าสมการ 3.17 ลงในสมการ 3.15 และสมการ 3.16 แล้วทำการอินทิเกรต จะได้ E_θ และ $E_\varnothing$ ในรูปต่อไปนี้

$$E_\theta = 30kI_0 \cos\alpha \frac{e^{-jkZ_p}}{Zp} * \frac{k'\left(e^{jk'2\pi n} - 1\right)}{\left(k' - 1\right)} \qquad \text{____3.18}$$

$$E_\varnothing = j30kI_0 \cos\alpha \frac{e^{-jkZ_p}}{Zp} * \frac{\left(e^{jk'2\pi n} - 1\right)}{\left(k'^2 - 1\right)} \qquad \text{____3.19}$$

โดยที่

$$k' = kr\left(\tan\alpha - \frac{1}{p\cos\alpha}\right) = \frac{L}{\lambda}\left(\sin - \tfrac{1}{p}\right) \qquad \text{____3.20}$$

เมื่อนำสมการ 3.19 หารด้วยสมการ 3.18 เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างโพลาไรเซชั่นในแกนหลัก (Axial ratio ย่อว่า AR) จะได้ผลดังนี้คือ

$$AR = \left|\frac{E_\phi}{E_\theta}\right| = \left|\frac{j}{k'}\right| = \frac{1}{|k'|} \qquad \text{____3.21}$$

จากสมการข้างบนจะเห็นได้ว่า ถ้า $|k'| = 1$ จะได้โพลาไรเซชั่นแบบวงกลม ซึ่งจะเป็นแบบหมุนซ้ายหรือหมุนขวานั้นจะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ k' จากสมการ 3.20 เมื่อพิจารณาว่าในช่วงที่ $\frac{3}{4} < C/\lambda < \frac{4}{3}$ ค่า p จะน้อยกว่า 1 ดังนั้น k' ก็ควรจะมีเครื่องหมายลบ ซึ่งจะได้โพลาไรเซชั่นวงกลมแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุนขวา เงื่อนไขของโพลาไรเซชันแบบวงกลมนี้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง p กับ L และ S ได้โดยใช้สมการ 3.20 ดังนี้คือ

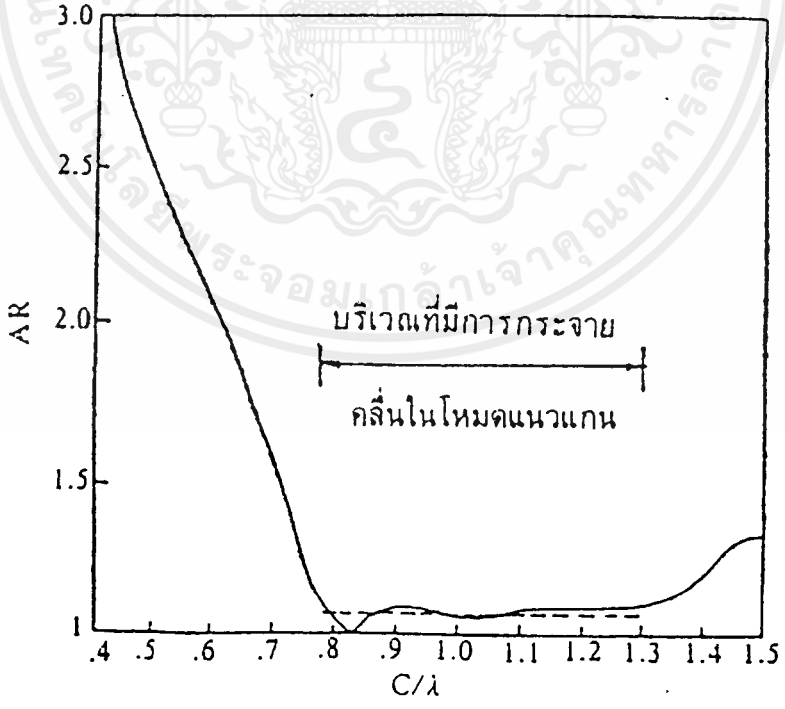
$$\frac{L}{\lambda}(\sin\alpha - \tfrac{1}{p}) \;.= \quad -1$$

$$p \quad = \quad \frac{L}{L\sin\alpha + \lambda} \quad = \quad \frac{L}{S+\lambda} \qquad \text{____3.22}$$

เงื่อนไขของ P ในสมการ 3.22 นี้จะตรงกับเงื่อนไขของ p ในสมการ 3.10 เพราะฉะนั้นสายอากาศเฮลิคอลที่มี C/λ ประมาณ 1 จึงสร้างคลื่นในแนวแกนที่มีโพลาไรเซชั่นเป็นวงกลมหรือใกล้เคียงกับวงกลม รูปที่ 3.10 แสดงผลการคำนวณสมการ 3.21 โดยให้ค่า AR อยู่ระหว่าง 1 ถึง ∞ กล่าวคือ ถ้า $|E_\theta| \rangle |E_\phi|$ ก็จะเป็นผลการคำนวณของ AR ในรูปต่อไปนี้

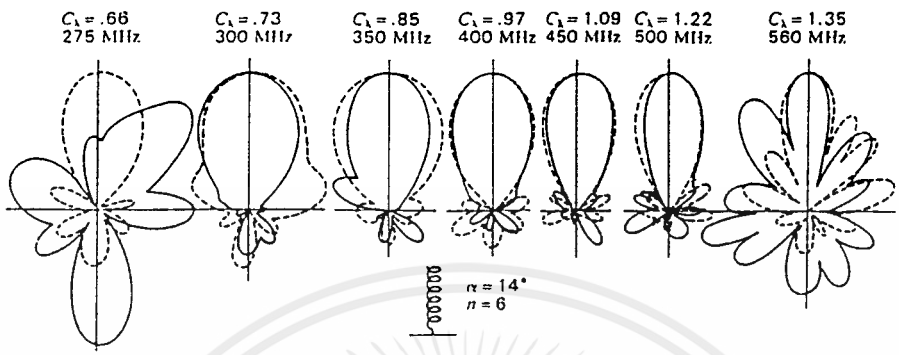
$$AR \quad = \quad \frac{|E_\theta|}{|E_\phi|} \quad = \quad |k'| \qquad \text{____3.23}$$

ผลการคำนวณในรูปที่ 3.10 เป็นกรณีที่สายอากาศมีโครงสร้างเป็น $\alpha = 13^\circ$ และ n เป็น 7 รอบ และใช้ค่า p ที่ได้จากการวัดในการคำนวณ จากรูปเห็นได้ว่าที่ค่า $C/\lambda = 0.83$ จะได้ AR เป็น 1 และในช่วง C/λ มีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{3}{4}$ ถึง $\frac{4}{3}$ ค่า AR จะต่ำกว่า 1.2

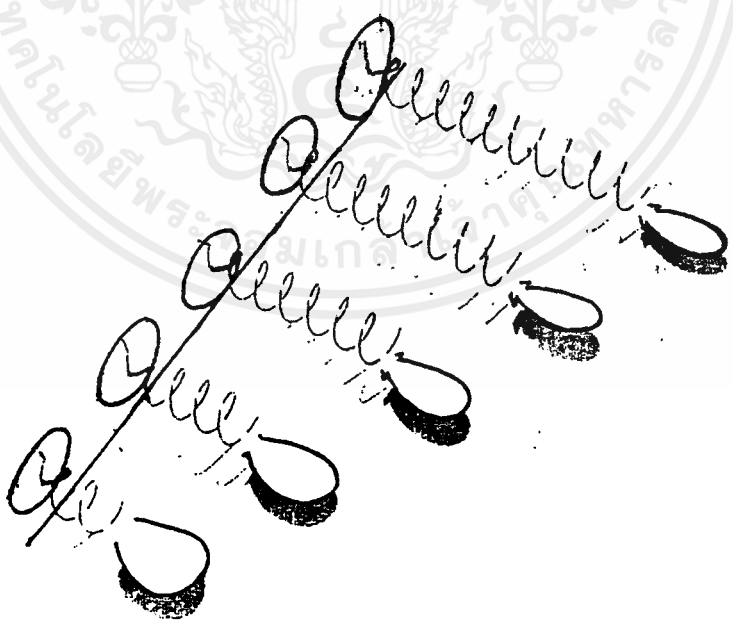


รูปที่ 3.10 ค่าอัตราส่วนของโพลาไรเซชันในแกนหลักของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

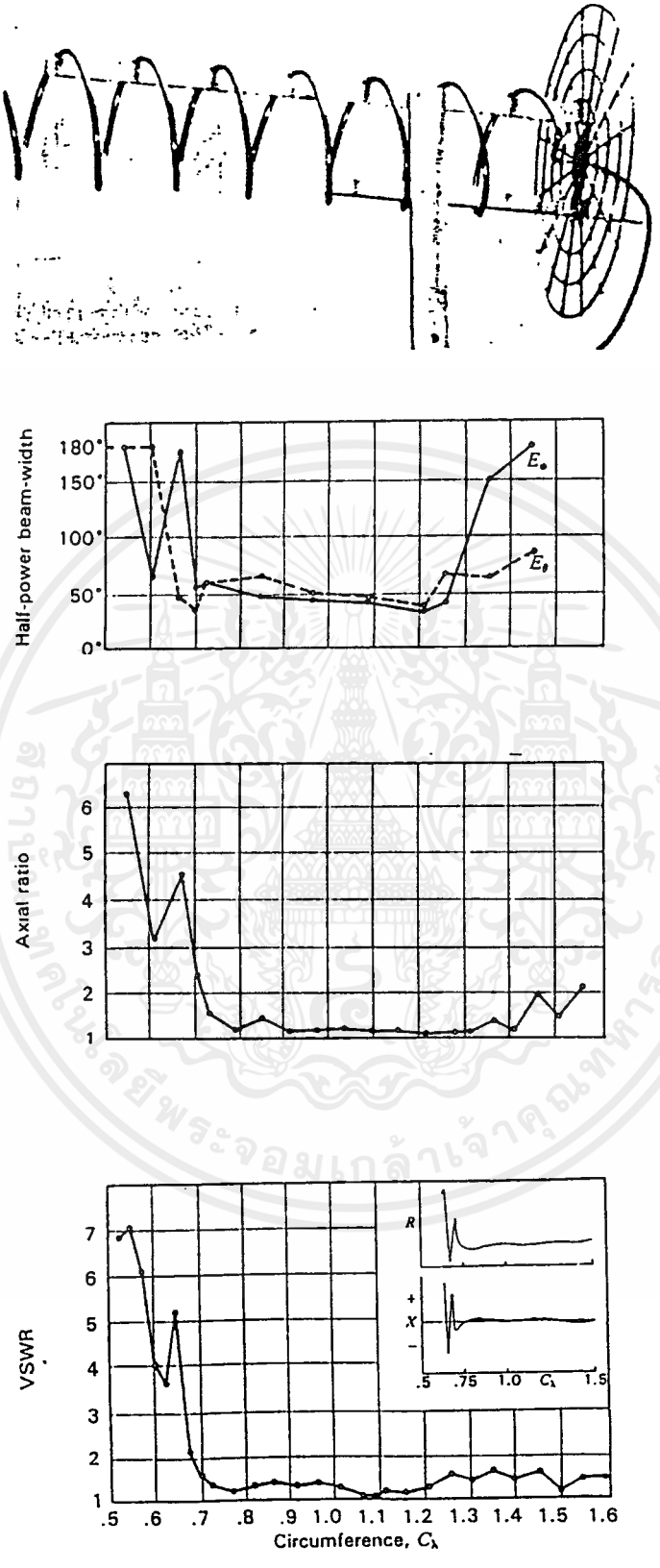


รูปที่ 3.11 ลักษณะแพทเทอร์นของสายอากาศที่ Cλ ต่าง ๆ



รูปที่ 3.12 ลักษณะแพทเทอร์นของสายอากาศเฮลิคอลที่จำนวนรอบ (n) ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ลักษณะพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเฮลิคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อาร์เรย์ (Array)

การเพิ่มขนาดของสายอากาศเดี่ยวจะทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้นก็ตาม แต่ก็มีวิธีอื่นที่จะเพิ่มขนาดของสายอากาศ โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศที่นำมาทำเป็นเอเลเมนท์ (Element) ซึ่งทำได้โดยจัดเอาเอเลเมนท์ที่แพระกระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง ซึ่งเรียกว่าอาร์เรย์ (Array) ปกติแล้วจะเลือกให้แต่ละเอเลเมนท์ของอาร์เรย์เหมือนกัน

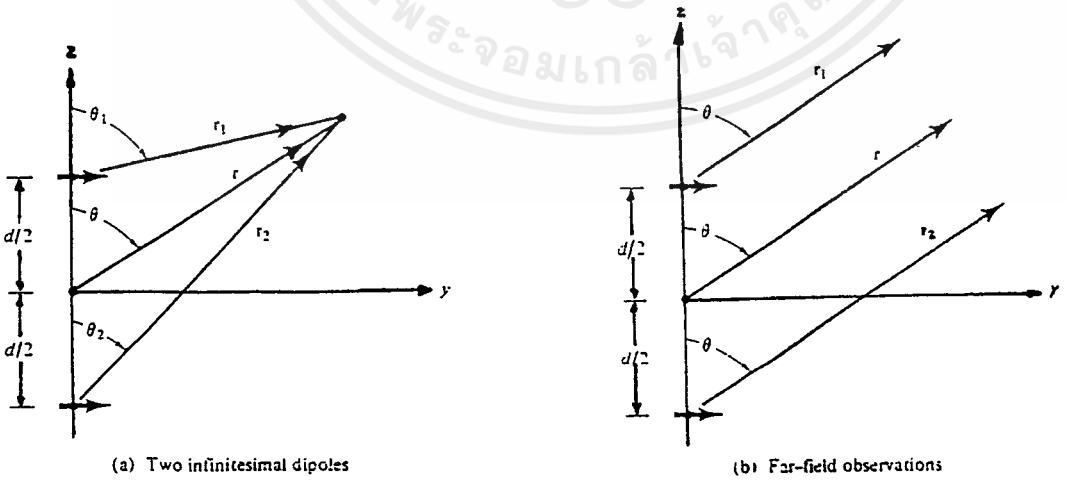
เมื่อตัดการดับปลิง (Coupling) ระหว่างเอเลเมนท์ทิ้ง จะหาสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ได้โดยบวกเวคเตอร์ของสนามที่แพร่กระจายจากแต่ละเอเลเมนท์ สนามจะรวมกันในทิศทางที่ต้องการติดต่อสื่อสาร และหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการติดต่อสื่อสาร

มีอยู่ 5 วิธีด้วยกันที่จะควบคุมแพทเทอร์นของสายอากาศ ซึ่งทำได้โดยควบคุมสิ่งต่าง ๆ ต่อไปนี้ คือ

1. การจัดเรียงเอเลเมนท์ของอาร์เรย์ (เป็นเส้นตรง, วงกลม, สี่เหลี่ยม ฯลฯ)
2. ระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนแต่ละเอเลเมนท์
4. เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละเอเลเมนท์
5. แพทเทอร์นของแต่ละเอเลเมนท์

อาร์เรย์สองเอเลเมนท์

สมมุติว่ามีไดโพลจิ๋ว 2 ตัว (ตามที่กล่าวมาแล้วว่าไดโพลจิ๋ว คือ ไดโพลที่มีความยาวน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น) วางตามแนวนอนและเรียงตามแกน Z ดังแสดงในรูป 3.14 และสมมุติว่าไม่มีคัปปลิงระหว่างเอเลเมนท์ทั้งสอง ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศจิ๋วทั้งสองจะเป็นผลรวมของสนามจากสายอากาศทั้งสองนั้น เมื่อคิดในระนาบ yz จะได้ผลลัพธ์ดังนี้



รูป 3.14 รูปของอาร์เรย์ 2 เอเลเมนท์ ที่วางตามแนวแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}_t = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 = \bar{\sigma}_\theta jn\frac{kl\ell}{4\pi}\left\{\frac{e^{-j[kr_1-(\beta/2)]}}{r_1}\left|\cos\theta_1\right| + \frac{e^{-j[kr_2-(\beta/2)]}}{r_2}\left|\cos\theta_2\right|\right\} \quad \text{_____3.24}$$

เมื่อ β เป็นความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่เอเลเมนท์ทั้งสอง โดยที่ป้อนให้มีขนาดของกระแสเท่ากัน ถ้าทำการสังเกตหาสนามที่ระยะทางไกล ๆ ดังแสดงในรูป 3.14 จะสามารถประมาณค่าได้ดังต่อไปนี้

$$\theta_1 \cong \theta_2 \cong \theta \quad \text{_____3.25}$$

$$\left.\begin{aligned} r_1 &\cong r - \frac{d}{2}\cos\theta \\ r_2 &\cong r + \frac{d}{2}\cos\theta \end{aligned}\right\} \text{สำหรับการแปรผันของเฟส} \quad \text{_____3.26}$$

$r_1 \cong r_2 \cong r$ สำหรับการแปรผันของขนาด

จะกลายเป็นดังนี้

$$\bar{E}_t = \bar{\sigma}_\theta jn\frac{kl\cdot\ell e^{-jkr}}{4\pi r}\left|\cos\theta\right|\left[e^{+j(kd\cos\theta+\beta)/2} + e^{-j(kd\cos\theta+\beta)/2}\right]$$

$$= \bar{\sigma}_\theta jn\frac{kl\cdot\ell e^{-jkr}}{4\pi r}\left|\cos\theta\right| 2\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta+\beta)\right] \quad \text{_____3.27}$$

จะเห็นว่าสนามลัพธ์ของอาร์เรย์มีค่าเท่ากับสนามของเอเลเมนท์เดี่ยว ที่วางอยู่ที่ออริจิน คูณด้วยแฟคเตอร์ ซึ่งเรียกว่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ (Array Factor) เพราะฉะนั้นอาร์เรย์แฟคเตอร์ของอาร์เรย์ 2 เอเลเมนท์ ที่มีขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอเลเมนท์เท่ากัน จะมีค่าดังนี้ คือ

$$AF = 2\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta+\beta)\right] \quad \text{_____3.28}$$

ซึ่งนอร์มอไลซ์อาร์เรย์แฟคเตอร์ นี้จะมีค่าดังนี้

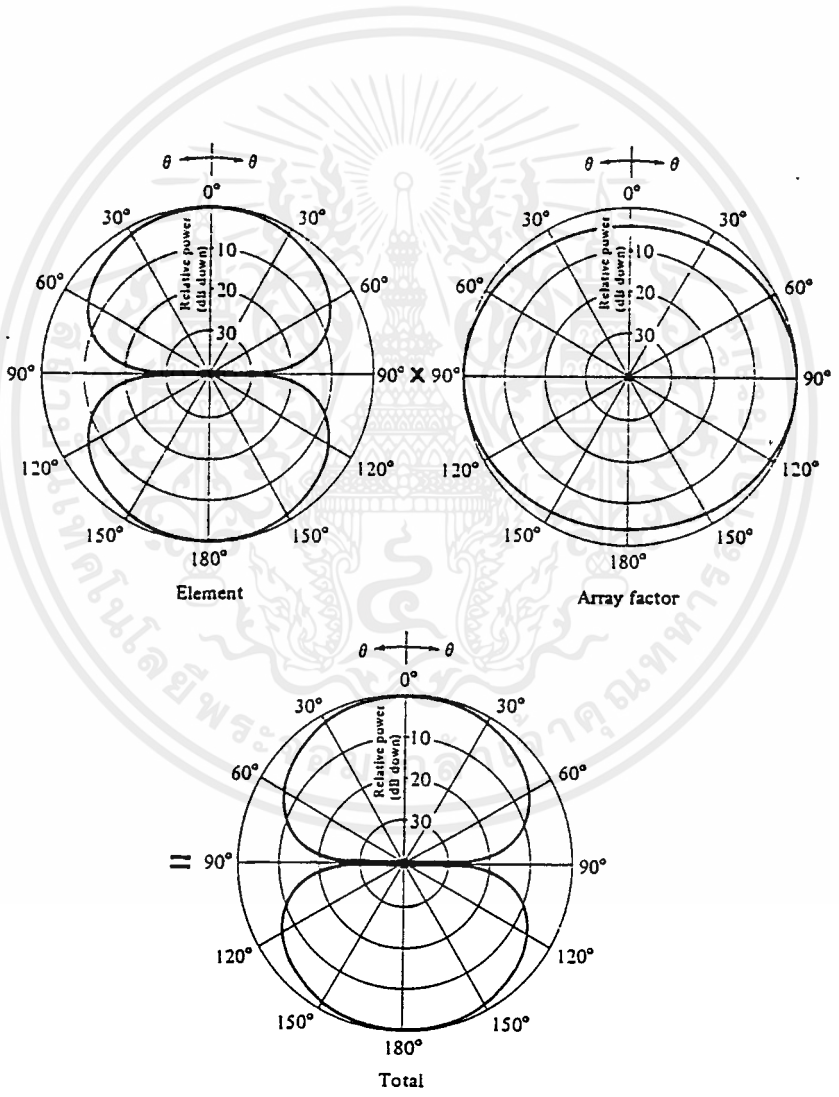
$$(AF)_n = \cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta+\beta)\right] \quad \text{_____3.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าอาร์เรย์แฟคเตอร์เป็นฟังก์ชั่นของรูปทรงของอาร์เรย์ และเฟสของการป้อนกระแสให้กับเอเลเมนท์ของอาร์เรย์ เราสามารถควบคุมสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ได้โดยเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์ d และ/หรือ เฟส β ซึ่งสนามระยะไกลของอาร์เรย์ 2 เอเลเมนท์ที่เหมือนกัน และมีขนาดการป้อนกระแสสม่ำเสมอจะมีค่าดังต่อไปนี้

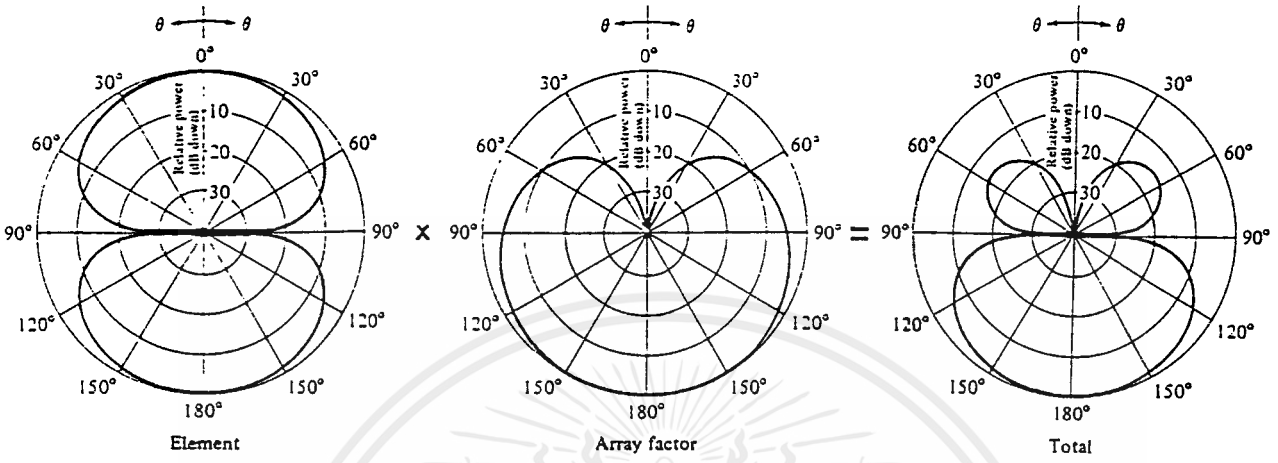
$$\bar{E}\ \text{ลัพธ์} = [\bar{E}\ (\text{เอเลเมนท์เดี่ยวอยู่ที่ออริจิน})] \times [\text{อาร์เรย์แฟคเตอร์}] \qquad \text{____3.30}$$

เรียกว่าหลักการคูณแพทเทอร์น (Pattern Multiplication)



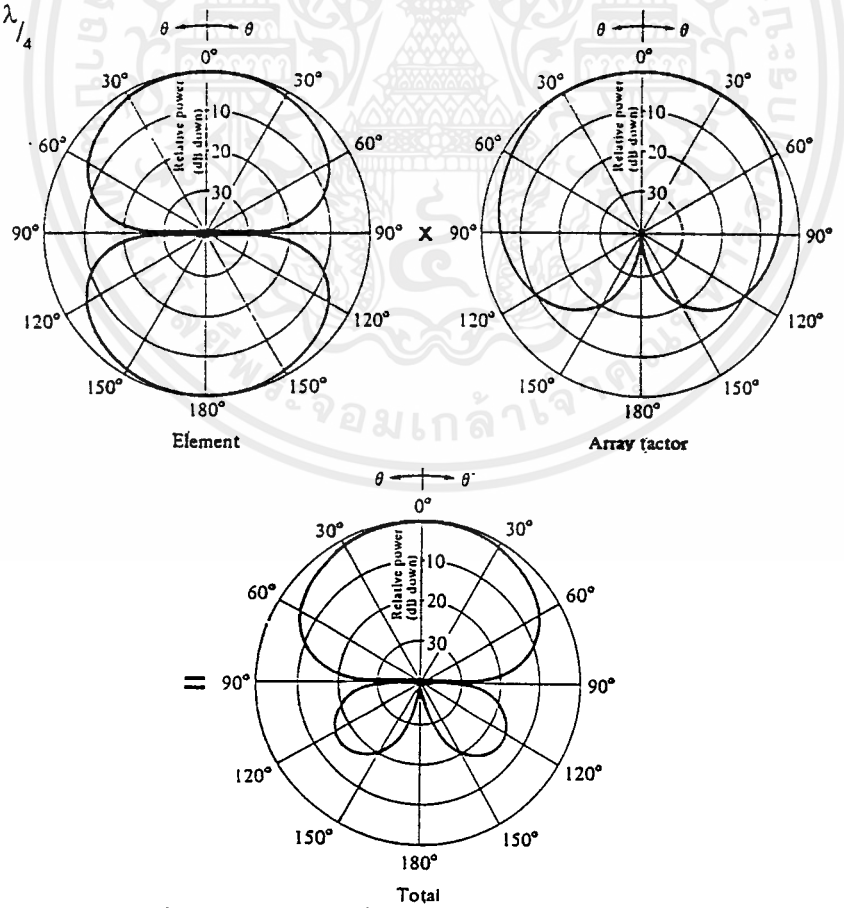
รูป 3.15 เอเลเมนท์แฟคเตอร์ อาร์เรย์แฟคเตอร์ และสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ของไดโพลจิ๋วสองตัวที่มี ($\beta = 0^\circ$, $d = \lambda/4$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.16 เอเลเมนท์แฟคเตอร์ อาร์เรย์แฟคเตอร์ และสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ของไดโพลจิ๋วสองตัว

$\beta = 90°, d = \lambda/4$



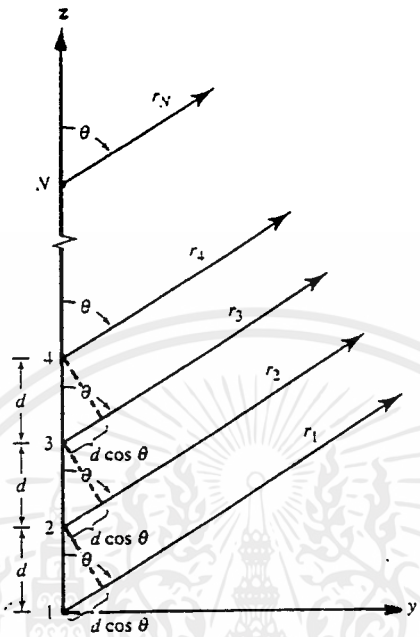
รูป 3.17 เอเลเมนท์แฟคเตอร์ อาร์เรย์แฟคเตอร์ และสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ของไดโพลจิ๋วสองตัว

$\beta = -90°, d = \lambda/4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 อาร์เรย์ N เอเลเมนท์

เมื่อขนาดของกระแสที่ป้อนแต่ละเอเลเมนท์และระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์มีค่าสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.18 รูปการหาสนามระยะไกลของอาร์เรย์ N เอเลเมนท์ของไอโซโทรปิคซอร์ส วางตามแนวแกน Z

ตามรูป 3.18 มีเอเลเมนท์ที่เหมือนกันอยู่ N ตัว แต่ละเอเลเมนท์มีเฟสต่างกัน β จะเรียกว่าอาร์เรย์แบบนี้อยู่ว่า ยูนิฟอร์มอาร์เรย์ (Uniform Array)

สนามลัพธ์ของอาร์เรย์นี้จะเป็นการคูณแพทเทอร์นระหว่างเอเลเมนท์แพทเทอร์น กับอาร์เรย์แฟคเตอร์ ในกรณีนี้อาร์เรย์แฟคเตอร์ จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$AF = 1 + e^{+j(kd\cos\theta+\beta)} + e^{+j2(kd\cos\theta+\beta)} + \ldots + e^{j(N-1)(kd\cos\theta+\beta)}$$

$$AF = \sum_{n=1}^{N} e^{j(N-1)(kd\cos\theta+\beta)} \qquad \text{_____3.31}$$

ซึ่งเขียนได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \sum_{n=1}^{N} e^{j(N-1)\varphi} \qquad \text{_____3.32}$$

เมื่อ $\varphi = kd\cos\theta+\beta$ _____3.33

เมื่อคูณทั้งสองข้างด้วย $e^{j\varphi}$ จะได้

$$(AF)e^{j\varphi} = e^{j\varphi}+e^{+j2\varphi}+e^{j3\varphi}+\ldots+e^{j(N-1)\varphi}+e^{jN\varphi} \qquad \text{_____3.34}$$

และเมื่อลบ (3.33) ออกจาก (3.34) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$AF\,(e^{j\varphi}-1) = (-1+e^{jN\varphi}) \qquad \text{_____3.35}$$

หรือเขียนได้ว่า

$$AF = \left[\frac{e^{jN\varphi}-1}{e^{j\varphi}-1}\right] = e^{j[(N-1)/2]\varphi}\left[\frac{e^{j(N/2)\varphi}-e^{-j(N/2)\varphi}}{e^{j(\frac{1}{2})\varphi}-e^{-j(\frac{1}{2})\varphi}}\right]$$

$$= e^{j[(N-1)/2]\varphi}\left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\varphi)}{\sin(\frac{1}{2}\varphi)}\right] \qquad \text{_____3.36}$$

ถ้าจุดเปรียบเทียบเฟสเป็นจุดกึ่งกลางของอาร์เรย์ จะกลายเป็นดังนี้

$$AF = \left[\frac{\sin(\frac{N\varphi}{2})}{\sin\frac{1\varphi}{2}}\right]$$

ถ้าค่า φ มีค่าน้อย ๆ จะประมาณได้ว่า

$$AF = \left[\frac{\sin(\frac{N\varphi}{2})}{\frac{\varphi}{2}}\right] \qquad \text{_____3.37}$$

มีค่าสูงสุดเท่ากับ N และค่านอร์มอไลซ์อาร์เรย์ แฟคเตอร์จะมีค่าดังนี้คือ

$$(AF)_n = \frac{1}{N}\left[\frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{1\varphi}{2}\right)}\right] \qquad \text{_____3.38}$$

และ

$$(AF)_n = \left[\frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\frac{N\varphi}{2}}\right] \qquad \text{_____3.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าจะหานัลจะกำหนดให้ เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้น

$$\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right) = 0 \rightarrow \left.\frac{N\varphi}{2}\right|_{\theta=\theta_n} = \pm n\pi$$

$$\rightarrow \theta_n = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(\frac{-\beta \pm 2n\pi}{N}\right)\right] \qquad \text{_____3.40}$$

$n = 1, 2, 3.....$

$n \neq N, 2N, 3N$

เมื่อ $n = N, 2N, 3N,.....$ จะมีค่าสูงสุด เพราะจะอยู่ในรูปแบบ $\frac{\sin(0)}{0}$ ค่า n เป็นตัวกำหนดกำลังของนัล (ที่หนึ่ง, ที่สอง, ฯลฯ) สำหรับในกรณีที่มีค่าเป็นศูนย์ อาร์กิวเมนท์ของอาร์คโคไซน์ (ArcCosine) ไม่สามารถเป็นหนึ่ง ดังนั้นจำนวนนัลที่มีได้จะเป็นฟังก์ชั่นของระยะระหว่างเอเลเมนท์ d และความต่างเฟส β

นอกจากนี้ค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2}(kd\cos\theta + \beta)\Big|_{\theta=\theta_m} = \pm m\pi \rightarrow \theta_m = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}(-\beta \pm 2n\pi)\right]..$$

$m = 0, 1, 2....$ _____3.41

อาร์เรย์แฟคเตอร์ มีค่าสูงสุดค่าเดียว ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ $m = 0$ นั่นคือ

$$\theta_m = \cos^{-1}\left(\frac{\lambda\beta}{2\pi d}\right) \qquad \text{_____3.42}$$

ซึ่งเป็นมุมที่ทำการสังเกตที่ทำให้ $\varphi = 0$

ถ้า $d >> \lambda$ จะได้ค่า

$$\theta_h \approx \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d}\left(\frac{-\beta \pm 2.782}{N}\right)\right] \qquad \text{_____3.43}$$

จะหาค่า HPBW θ_h ได้เมื่อหามุมของ θ_m แรก และ HPBW (θ_h) ได้ ซึ่งถ้าแพทเทอร์นมีลักษณะสมมาตรตรงบริเวณบีมหลัก จะได้ว่า

$$\theta_h = 2\left|\theta_m - \theta_{h_-}\right| \qquad \text{_____3.44}$$

ส่วนค่าสูงสุดของไซด์โลบแรก เกิดขึ้นโดยประมาณ เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{N\varphi}{2} = \frac{N}{2}(kd\cos\theta+\beta)\Big|_{\theta=\theta_s} \approx \pm\left(\frac{3\pi}{2}\right) \quad \text{_____3.45}$$

หรือเมื่อ

$$\theta_s = \cos^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[\frac{-\beta\pm 3\pi}{N}\right]\right\} \quad \text{_____3.46}$$

$$(AF)_{-} \approx \left[\frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\frac{N\varphi}{2}}\right]\Bigg|_{\substack{\theta=\theta_s \\ S=1}} = \frac{2}{3\pi} = 0.212 \quad \text{_____3.47}$$

$$(AF)_{-} = 20\log_{10}\left(\frac{2}{3\pi}\right) = -13.46dB \quad \text{_____3.48}$$

<u>บรอดไซด์อาร์เรย์</u>

บรอดไซด์อาร์เรย์ (Broodside Array) เป็นอาร์เรย์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแกนของอาร์เรย์ ค่าสูงสุดของอาร์เรย์แฟคเตอร์ จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\varphi = kd\cos\theta+\beta = 0 \quad \text{_____3.49}$$

เนื่องจากต้องการให้มีค่าสนามสูงสุดที่ $\theta = 90^\circ$ ดังนั้น

$$\varphi = kd\cos\theta+\beta\Big|_{\theta=90^\circ} = \beta = 0 \quad \text{_____3.50}$$

เพราะฉะนั้นเพื่อจะทำให้อาร์เรย์แฟคเตอร์ของยูนิฟอร์มลิเนียร์อาร์เรย์มีค่าสูงสุดชี้ในทิศทางบรอดไซด์กับแกนของอาร์เรย์ ทุกเอเลเมนท์จะต้องมีเฟสเดียวกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์จะเป็นเท่าไรก็ได้

เพื่อให้มั่นใจว่าสนามไม่มีค่าสูงสุดในทิศทางอื่น d ต้องไม่เท่ากับ $n\lambda$ (n=1,2,3...)

เมื่อ $\beta = 0$ ถ้า $d = n\lambda$, $n = 1, 2, 3.....$ และ $\beta = 0$ จะได้

$$\varphi = kd\cos\theta+\beta\Big|_{\substack{d=n\lambda \\ \beta=0 \\ n=1,2,3....}} = 2n\pi\cos\theta\Big|_{\theta=0^\circ,\,180^\circ} = \pm 2n\pi \quad \text{_____3.51}$$

ค่าของ φ นี้เมื่อถูกแทน จะทำให้อาร์เรย์แฟคเตอร์มีค่าสูงสุด ดังนั้นสำหรับยูนิฟอร์มอาร์เรย์ ที่มี $\beta = 0$ และ $d = n\lambda$ นอกจากสนามจะมีค่าสูงสุดในทิศทางบรอดไซด์ ($\theta = 90^\circ$) แล้วสนามจะมีค่าสูงสุดชี้ในทิศทางตามแกนของอาร์เรย์ ($\theta = 0^\circ, 180^\circ$) อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนด์ไฟร์อาร์เรย์

เอนด์ไฟร์อาร์เรย์ (End - fire Array) เป็นอาร์เรย์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นค่าสูงสุดในทิศทางตามแกนของอาร์เรย์ สามารถกำหนดให้แพทเทอร์นมีค่าสูงสุดชี้ในทิศทาง $\theta = 0^\circ$ หรือ $\theta = 180^\circ$ ก็ได้

ในกรณีที่ชี้ในทิศทาง $\theta = 0^\circ$

$$\varphi = kd\cos\theta + \beta\Big|_{\theta=0^\circ} = kd + \beta = 0$$

$$\rightarrow \beta = -kd \qquad \text{3.52}$$

ส่วนในกรณีที่ชี้ในทิศทาง $\theta = 180^\circ$

$$\varphi = kd\cos\theta + \beta\Big|_{\theta=180^\circ} = kd + \beta = 0$$

$$\rightarrow \beta = +kd \qquad \text{3.52}$$

ถ้าระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์เป็น $d = n\lambda$ ($n = 1,2,3...$) นอกจากจะเป็นเอนด์ไฟร์แล้ว ยังมีค่าสูงสุดของแพทเทอร์นในทิศทางบรอดไซด์อีกด้วย นอกจากนี้ในทิศทางเอนด์ไฟร์ยังชี้ทั้งในทิศทาง $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 180^\circ$ อีกด้วย ดังนั้นเมื่อ $d = n\lambda$, $n = 1,2,3...$ สนามจะมีค่าสูงสุดอยู่ในสี่ทิศทาง

ได้แสดงแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของอาร์เรย์ 10 เอเลเมนท์ เมื่อ $d = \frac{\lambda}{4}$ และ $\beta = \pm kd$ เมื่อ $\beta = -kd$ สนามค่าสูงสุดจะอยู่ในทิศทาง $\theta = 0^\circ$ และเมื่อ $\beta = \pm kd$ สนามค่าสูงสุดจะอยู่ในทิศทาง $\theta = 180^\circ$

3.4.2 ลิเนียร์เรย์ N เอเลเมนท์เมื่อระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์สม่ำเสมอแต่แอมปลิจูดของการป้อนกระแสไม่สม่ำเสมอ

ในบรรดาการแจงรูปกระแส 3 แบบ คือ ยูนิฟอร์ม ไบโนเมียล และเชบีเชฟ พบว่า ยูนิฟอร์มอาร์เรย์จะมี HPBW แคบที่สุด รองลงมาเป็นเชบีเชฟอาร์เรย์ และไบโนเมียลอาร์เรย์ ตามลำดับ ในทางกลับกันไบโนเมียลอาร์เรย์ จะมีไซด์โลบต่ำที่สุด รองลงมาเป็นเชบีเชฟอาร์เรย์และยูนิฟอร์มอาร์เรย์ตามลำดับ ไบโนเมียลอาร์เรย์ที่มีระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์ $\lambda/2$ จะไม่มีไซด์โลบในการออกแบบจะต้องทำการประนีประนอมระหว่างระดับของไซด์โลบกับบีมวิดท์

การที่จะกำหนดบีมวิดท์และโซด์โลบทำได้โดยกำหนดการแจงรูปกระแสหรือการเทเปอร์ (Taper) บนแต่ละเอเลเมนท์ ได้มีการพิสูจน์แล้วว่าเมื่อกำหนดระดับการไซด์โลบให้ค่าหนึ่ง เชบีเชฟอาร์เรย์ จะมีบีมวิดท์ (BW) แคบที่สุด แต่ถ้ากำหนดบีมวิดท์ค่าหนึ่ง เชบีเชฟอาร์เรย์จะมี SLL ต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์เรย์เฟคเตอร์

อาร์เรย์ที่มีไอโซโทรปิคเอเลเมนท์ จำนวนเลขคู่ (2 M เมื่อ M เป็นเลขจำนวนเต็ม) ถูกวางอย่างสมมาตรตามแกน Z โดยที่ระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์เป็น d และเอเลเมนท์ทั้ง M ตัว วางอยู่อย่างสมมาตรสองข้างของจุดออริจิน สมมติว่าขนาดของการป้อนกระแสสมมาตรรอบจุดออริจินนี้ อาร์เรย์แฟคเตอร์ของบรอดไซด์อาร์เรย์ที่มีการป้อนกระแสไม่มยูนิฟอร์ม จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$(AF)_{2M} = a_1 e^{+j(1/2)\,kd\cos\theta} + a_2 e^{+j(3/2)kd\cos\theta} + \cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$+ a_M e^{+j[(2M-1)/2]\,kd\cos\theta}$$

$$+ a_1 e^{-j(1/2)\,kd\cos\theta} + a_2 e^{-j(3/2)kd\cos\theta} + \cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$+ a_M e^{-j[(2M-1)/2]\,kd\cos\theta}$$

$$(AF)_{2M} = 2\sum_{n=1}^{M} a_n \cos\left[\frac{(2n-1)}{2} kd\cos\theta\right] \qquad \text{_____3.54}$$

และนอร์มอไลซ์อาร์เรย์แฟคเตอร์ จะมีค่าดังนี้

$$(AF)_{2M} = \sum_{n=1}^{M} a_n \cos\left[\frac{(2n-1)}{2} kd\cos\theta\right] \qquad \text{_____3.55}$$

เมื่อ a_n เป็นสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสในแต่ละเอเลเมนท์

ถ้าจำนวนเอเลเมนท์เป็นเลขคี่ (2M+1) เมื่อ M เป็นเลขจำนวนเต็ม) อาร์เรย์แฟคเตอร์ จะมีค่าดังนี้คือ

$$(AF)_{2M+1} = 2a_1 + a_2 e^{jkd\cos\theta} + a_3 e^{j2kd\cos\theta} + \cdots + a_{M+1} e^{jMkd\cos\theta}$$

$$+ a_2 e^{-jkd\cos\theta} + a_3 e^{-j2kd\cos\theta} + \cdots + a_{M+1} e^{-jMkd\cos\theta}$$

$$(AF)_{2M+1} = 2\sum_{n=1}^{M+1} a_n \cos[(n-1)kd\cos\theta] \qquad \text{_____3.56}$$

และนอร์มอไลซ์อาร์เรย์แฟคเตอร์ จะมีค่าเป็นดังต่อไปนี้ คือ

$$(AF)_{2M+1} = \sum_{n=1}^{M+1} a_n \cos[(n-1)kd\cos\theta] \qquad \text{_____3.57}$$

จะเห็นว่าขนาดของการป้อนกระแสในเอเลเมนท์ตัวกลางเป็น $2a_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$(AF)_{2M+1}(\text{เลขคี่}) = \sum_{n=1}^{M+1} a_n \cos[2(n-1)u] \qquad \text{_____3.58}$$

เมื่อ $u = \frac{\pi d}{\lambda}\cos\theta$ _____3.59

จุดประสงค์ของการทำอาร์เรย์ ก็คือต้องการเพิ่มขนาดของสายอากาศเพื่อปรับปรุงแพทเทอร์นของสายอากาศนั้น การที่เราจะเพิ่มขนาดของสายอากาศตัวเดียว ๆ แม้ว่าจะทำให้โลบหลักของสายอากาศแคบลงก็ตาม แต่จะมีผลทำให้โลบข้างมีขนาดสูงขึ้น ซึ่งไม่เป็นสิ่งที่พึงปรารถนา การปรับขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอเลเมนท์ จะมีผลทำให้รูปร่างของแพทเทอร์นเปลี่ยนแปลงในขณะที่การปรับเฟสระหว่างเอเลเมนท์จะเป็นการกำหนดทิศทางของบีมของแพทเทอร์น

3.5 อาร์เรย์แบบแผ่น (Planar away)

ในส่วนของการจัดส่วนประกอบของลิเนียร์อาร์เรย์ (Linear array) แต่ละอันสามารถจัดเรียงตำแหน่งตามลักษณะของตะแกรงสี่เหลี่ยม หรืออาร์เรย์แบบแผ่น (planar array) ได้โดยให้อาร์เรย์แบบแผ่นนี้เป็นส่วนที่สามารถใช้ควบคุมรูปแบบของแพทเทอร์นของอาร์เรย์ อาร์เรย์แบบแผ่นนี้มีประโยชน์อย่างมากและสามารถทำให้แพทเทอร์นที่ได้สมมาตรกันและมีโลบข้าง (side Lobe) มีค่าต่ำสามารถประยุกต์ใช้ในส่วนของ tracking radar, search radar, remote sensing และอื่น ๆ อีกมาก

3.5.1 ค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ของอาร์เรย์แบบแผ่น :

อาร์เรย์เฟคเตอร์ของอาร์เรย์แบบแผ่น จากรูป 3.19 ถ้ามี M เอเลเมนท์และส่วนมากเป็นส่วนในระนาบแกน x ดังในรูป 3.19.a ซึ่งค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ของมันคือ

$$AF = \sum_{M=1}^{M} a_n e^{j(m-1)(kd\cos\gamma+\beta)}$$

เมื่อ $\cos\gamma = \sin\theta\cos\phi$ (ตามแนวแกน X)

$$AF = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x} \qquad \text{_____3.60}$$

เมื่อ I_{m1} เป็นค่า excitation coefficient ของแต่ละเอเลเมนท์ ระยะห่างและเฟสชิฟระหว่างเอเลเมนท์ ตามแกน X แสดงได้โดย d_x และ β_x ตามลำดับ ถ้า N อาร์เรย์มีการจัดเรียงแต่ละเอเลเมนท์ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

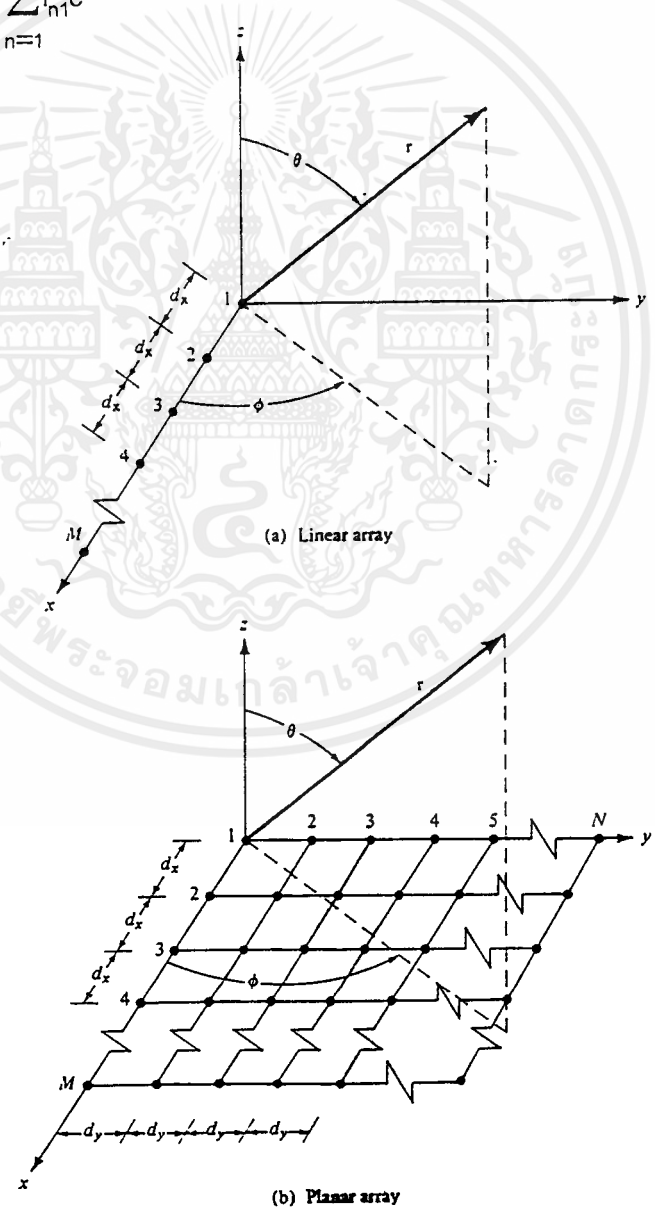
ระนาบ Y มีระยะห่าง d_y และเฟส β_y ระนาบสี่เหลี่ยม array จะมีลักษณะตามรูป 3.19 b และค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ในส่วนอาร์เรย์แบบแผ่น สามารถเขียนได้ คือ

$$AF = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} \left[\sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta\cos\phi+\beta_y)} \qquad \text{3.61}$$

หรือ $AF = S_{xm} S_{yn}$

เมื่อ $S_{xm} = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)}$

$S_{yn} = \sum_{n=1}^{N} I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta\cos\phi+\beta_y)}$



รูป 3.19 แสดงลิเนียร์และอาร์เรย์แบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นแสดงว่า แพทเทอร์นของอาร์เรย์สี่เหลี่ยมนี้ได้จาก อาร์เรย์แฟคเตอร์ของอาร์เรย์ในแนวแกน X และ y

ถ้าแอมปลิจูดของ excitation coefficient ของอาร์เรย์ในแนวแกน y เป็นสัดส่วนกับแนวแกน x คือ

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \qquad \text{_____3.62}$$

ถ้าในส่วนของแอมปลิจูดของ excitation coefficient ของอาร์เรย์สม่ำเสมอ คือ $I_{1n} = I_0$

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^{M} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)} \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta\cos\phi+\beta_y)} \qquad \text{_____3.63}$$

ค่านอร์มอไลซ์ (Normalized) ของอาร์เรย์เฟคเตอร์สมการ 3.63 สามารถเขียนได้ คือ

$$AF_n(\theta,\phi) = \left[\frac{1}{M}\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi x\right)}{\sin\left(\frac{\psi x}{2}\right)}\right]\left[\frac{1}{N}\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi y\right)}{\sin\left(\frac{\psi y}{2}\right)}\right] \qquad \text{_____3.64}$$

เมื่อ $\psi_x = kd_x \sin\theta\cos\phi + \beta_x$

$\psi_y = kd_y \sin\theta\cos\phi + \beta_y$

ระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์เท่ากับหรือมากกว่าความยาวคลื่น (λ) ค่าสูงสุดของบีมจะอ้างอิงกับโลบหลัก (major lobe)ป และการมีตะแกรงโลบ (grating lobes) ซึ่งจะกำหนดจากโลบที่ได้หรือโลบหลัก (main lobe) ที่เกิดจากส่วนของสายอากาศอาร์เรย์ เมื่อระยะระหว่างเอเลเมนท์มีค่ามากเพียงพอ ที่จะทำให้มีเฟสตรงกับสนามการแพร่กระจายที่มากกว่าหนึ่งส่วน เมื่อให้ระยะระหว่างเอเลเมนท์ในส่วนแกน x และ y น้อยกว่าความยาวคลื่น (λ) คือ $d_x < \lambda$ และ $d_y < \lambda$

$$kd_x \sin\theta\cos\phi + \beta_x = \pm 2m\pi \quad m=0,1,2...$$

$$kd_y \sin\theta\cos\phi + \beta_y = \pm 2n\pi \quad n=0,1,2... \qquad \text{_____3.65}$$

เฟส β_x และ β_y เป็นอิสระกันในแต่ละส่วน และสามารถปรับค่าบีมหลัก (main beam) ของ S_{xm} และไม่เหมือนกับ S_{yn} อย่างไรก็ตามกรวยบีมของ S_{xm} และ S_{yn} มีการทาบทับกันและมีค่าสูงสุดตามทิศทางของสายอากาศ ถ้าต้องการเมนบีมเดียว ในทิศทาง $\theta=\theta_0$, $\phi=\phi_0$ ซึ่งเฟสชิ่งระหว่างเอเลเมนท์ในส่วนแกน x และ y จะเท่ากับ

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_0\cos\phi_0$$

$$\beta_y = -kd_x \sin\theta_0\cos\phi_0 \qquad \text{_____3.66}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tan\phi_0 = \frac{\beta_y d_x}{\beta_x d_y}$$

$$\sin^2\theta_0 = \left(\frac{\beta_x}{kd_x}\right)^2 + \left(\frac{\beta_x}{kd_y}\right)^2 \qquad \text{_____3.67}$$

เมื่อ m = n = 0 และตะแกรงโลบ (grating lobes) สามารถกำหนดโดย

$$kd_x(\sin\theta\cos\phi - \sin\theta_0\cos\phi_0) = \pm 2m\pi \quad ,m=0,1,2,\ldots$$

$$kd_y(\sin\theta\cos\phi - \sin\theta_0\cos\phi_0) = \pm 2n\pi \quad ,n=0,1,2,\ldots \qquad \text{_____3.68}$$

หรือ

$$\sin\theta\cos\phi - \sin\theta_0\cos\phi_0 = \pm\frac{m\lambda}{d_x} \quad ,m=0,1,2,\ldots$$

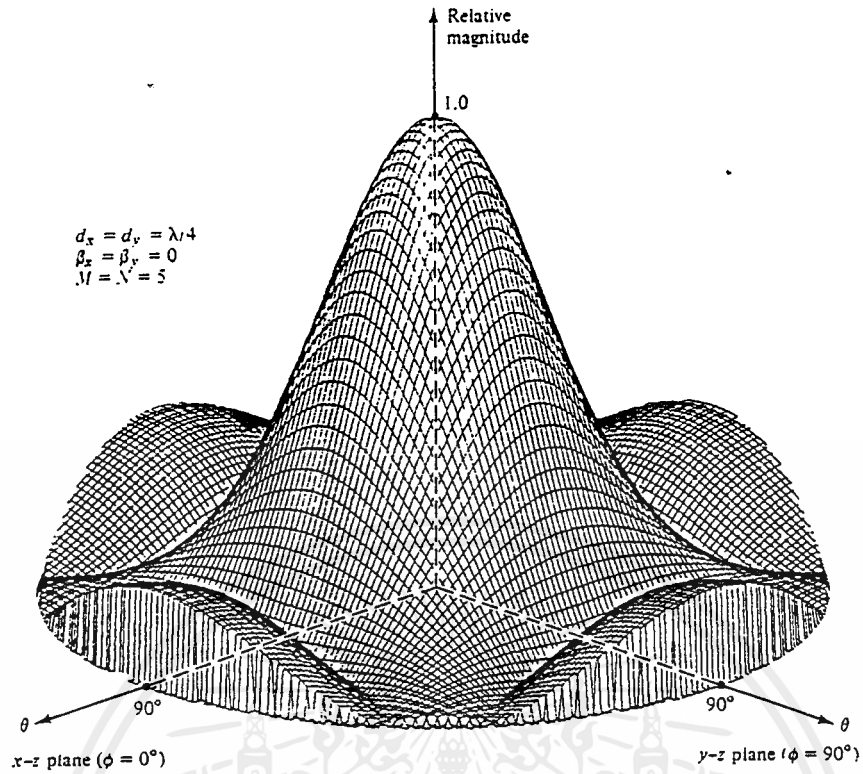
$$\sin\theta\cos\phi - \sin\theta_0\cos\phi_0 = \pm\frac{n\lambda}{d_y} \quad ,n=0,1,2,\ldots \qquad \text{_____3.69}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{\sin\theta_0\cos\phi_0 \pm n\lambda/d_y}{\sin\theta_0\cos\phi_0 \pm m\lambda/dx}\right] \qquad \text{_____3.70}$$

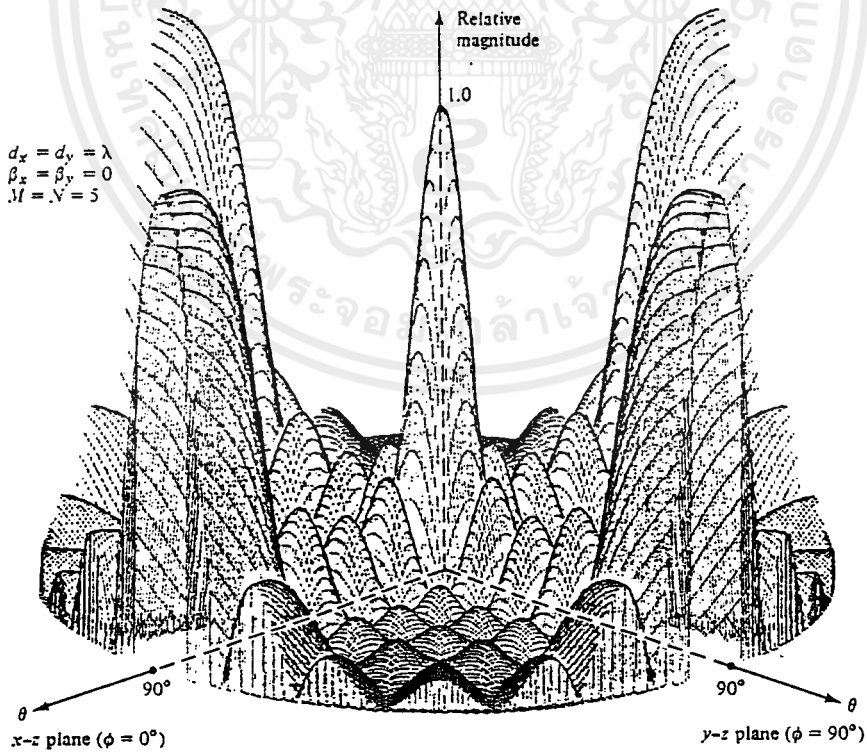
และ

$$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{\sin\theta_0\cos\phi_0 \pm m\lambda/d_x}{\cos\phi}\right] = \sin^{-1}\left[\frac{\sin\theta_0\cos\phi_0 \pm n\lambda/dy}{\sin\phi}\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.20 แสดงแพทเทอร์น 3 มิติ ของ 5 × 5 เอเลเมนท์อาร์เรย์ที่ $\beta_x = \beta_y = 0$ และ $d_x = d_y = \lambda/4$ จะมีส่วนบีมสูงสุดที่ $\theta_0 = 0^\circ$



รูป 3.21 แสดงแพทเทอร์น 3 มิติ ของอาร์เรย์แบบแผ่น (planar array) ของไอโซทรอปิคซอสต์ ซึ่งมี $d_x = d_y = \lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์เรย์แฟคเตอร์ (array factor) ของอาร์เรย์แบบแผ่น (planar array) ที่ได้เป็นการสมมติให้แต่ละเอเลเมนต์เป็นไอโซทรอปิคซอสต์ ถ้าสายอากาศเป็นอาร์เรย์ที่แต่ละเอเลเมนต์เหมือนกัน ผลรวมสนามสามารถได้จากผลคูณของสนามดังนี้

$$E\ (\text{รวม}) = E\ (\text{เอเลเมนท์เดี่ยว}) \times AF \qquad \text{_____3.71}$$

3.5.2 บีมวิดท์ (Beam width)

การหาบีมวิดท์ของ nonuniform amplitud planar array เมื่อให้

H_{xo} คือ ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ของ broad side linear array ของ M เอเลเมนท์

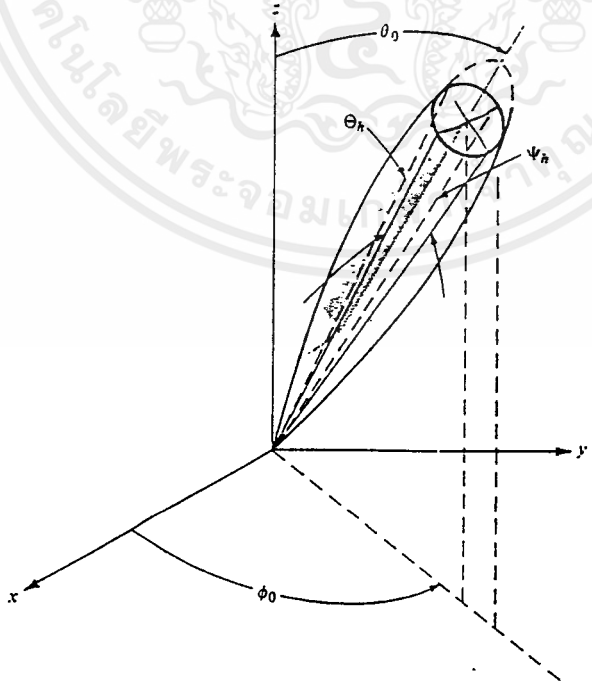
H_{yo} คือ ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ของ broad side linear array ของ N เอเลเมนท์

H_h คือ ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ซึ่งประมาณได้ คือ

$$H_h = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\theta_0\left[H_{xo}^{-2}\cos^2\phi_0 + H_{yo}^{-2}\sin^2\phi_0\right]}} \qquad \text{_____3.72}$$

เมื่อเป็น square array คือ M = N, $H_{xo} = H_{yo}$ จะได้

$$H_h = H_{xo}\sec\theta_0 = H_{yo}\sec\theta_0$$



รูป 3.22 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ตามแนว $\theta = \theta_0$, $\phi = \phi_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (ψ_h) ในระนาบเส้นตั้งฉาก มุมเอลิเวชั่น $\phi = \phi_0$

$$\psi_h = \sqrt{\frac{1}{H_{xo}^{-2}\sin^2\phi_0 + H_{yo}^{-2}\cos^2\phi_0}} \qquad \text{3.73}$$

เมื่อเป็นอาร์เรย์สี่เหลี่ยม (N = M)

$$\psi_h = H_{xo} = H_{yo}$$

ค่า beam solid angle (ΩA) ของอาร์เรย์แบบแผ่น (planar array) คือ

$$\Omega A = H_h \psi_h \qquad \text{3.74}$$

หรือ

$$\Omega A = \frac{H_{xo}H_{yo}\sec\theta_0}{\left[\sin^2\phi_0 + \frac{H_{yo}^2}{H_{xo}^2}\cos^2\phi_0\right]^{1/2}\left[\sin^2\phi_0 + \frac{H_{yo}^2}{H_{xo}^2}\cos^2\phi_0\right]^{1/2}} \qquad \text{3.75}$$

3.5.3 ไดเรคติวิตี (directivity)

ค่าไดเรคติวิตี ของอาร์เรย์เฟคเตอร์ AF (θ,ϕ) ที่บีมหลัก (major beam) ณ ตำแหน่ง $\theta = \theta_0, \phi = \phi_0$ สามารถที่กำหนดได้ คือ

$$D_0 = \frac{4\pi F(\theta,\phi)\big|_{max}}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi}$$

$$D_0 = \frac{4\pi\left[AF(\theta_0,\phi_0)\right]\left[AF(\theta_0,\phi_0)\right]^*\big|_{max}}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\left[AF(\theta,\phi)\right]\left[AF(\theta,\phi)\right]^*\sin\theta d\theta d\phi} \qquad \text{3.76}$$

ซึ่งในลักษณะนี้เป็นการยากลำบากในการหาค่าของ nonuniform amplitude distribution และจะง่ายขึ้นเมื่อจะหาไดเรคติวิตี ในการคำนวณจาก linear array เพื่อเป็นอาร์เรย์แบบแผ่น (planar array) ซึ่งที่จุดภายนอกค่าไดเรคติวิตี้ ของอาร์เรย์ 2 ส่วน (2 แพทเทอร์นในฟรีสเปช) ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของค่าไดเรคติวิตีของอาร์เรย์ที่เป็นส่วนเดียว (1 แพทเทอร์น) ซึ่งอาร์เรย์แบบแผ่น (planar array) ขนาดใหญ่ที่ใกล้กับบรอดไซด์ค่าไดเรคติวิตี จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_0 = \pi \cos\theta_0 D_x D_y \qquad \text{_____3.77}$$

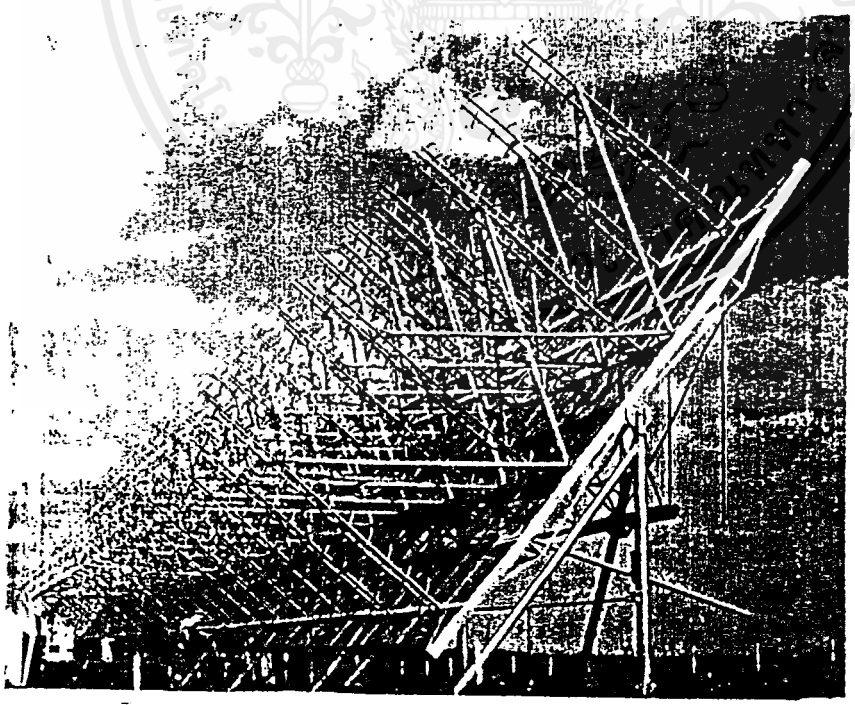
D_x และ D_y เป็นค่าไดเรคติวิตี้ของ broad side linear array แต่ละชุด ซึ่งไดเรคติวิตีของสมการ 3.77 จะสัมพันธ์กับค่า beam solid angle (ΩA) ซึ่งจะได้

$$D0 \approx \frac{\pi^2}{\Omega_A (\text{rads}^2)}$$

$$\approx \frac{32400}{\Omega_A (\text{degrees}^2)} \qquad \text{_____3.78}$$

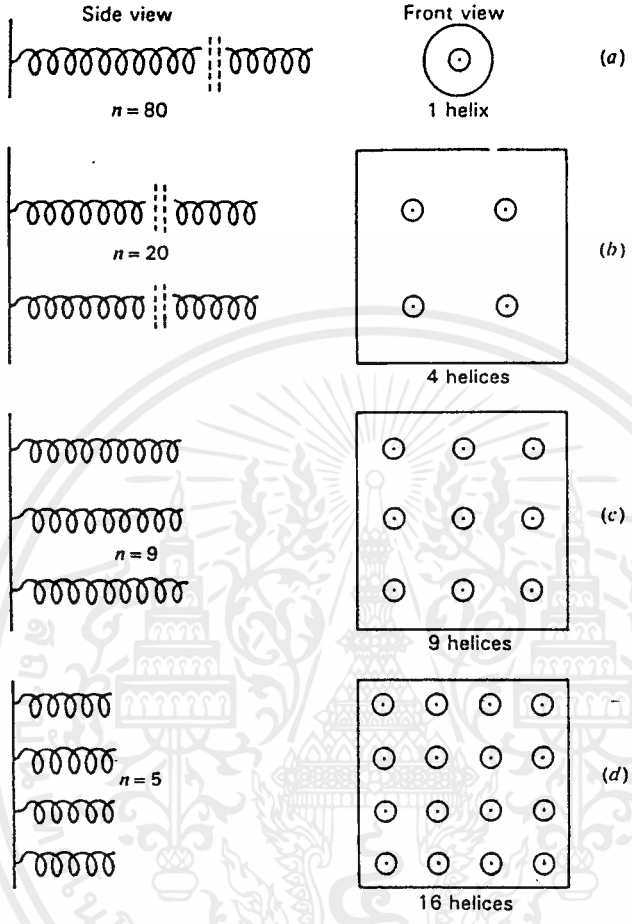
3.5.4 สายอากาศเฮลิคอลอาร์เรย์โหมดแนวแกน (Arrays of Monofilar axial mode Helical Antennas)

สายอากาศเฮลลิคอลอาร์เรย์โหมดแนวแกน (axial mode helical antennas) ทำให้เป็นแบบอาร์เรย์ (arrays) เพื่อการออกแบบจะกำหนดให้จำนวนรอบและความยาวของเฮลลิคอล เพื่อให้ได้เกนตามที่ต้องการ ดังรูป 3.23 ซึ่งแสดงเมื่อต้องการออกแบบให้สายอากาศเฮลลิคอลมีเกน 24 dBi ซึ่งจะต้องการจำนวนรอบของขดลวดทั้งหมด 80 รอบ ซึ่งโครงสร้างที่ได้จะทำได้ยากมาก เพราะจะยาวมาก ทำให้โครงสร้างไม่แข็งแรง จึงออกแบบเป็นอาร์เรย์ (arrays) เพื่อให้ได้เกนตามที่ต้องการ ซึ่งส่วนของโครงสร้างทำได้ง่ายขึ้น จะแบ่งให้แต่ละส่วนของอาร์เรย์สมมาตรกันดังรูป 3.23



รูป 3.23 แสดง Radio telescope เป็นอาร์เรย์ 96 ×11 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

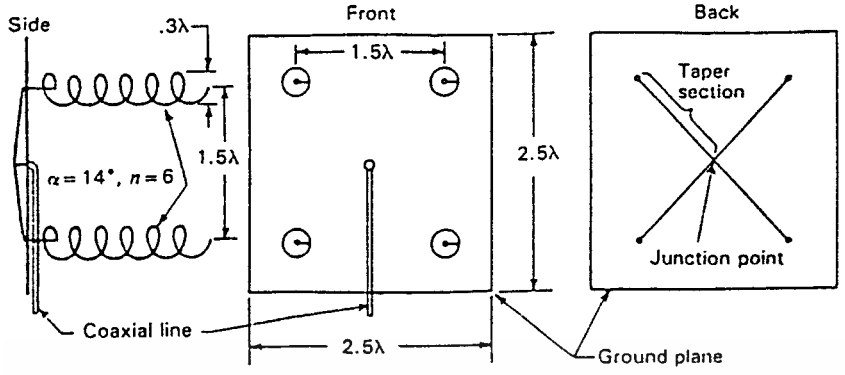


รูป 3.24 แสดงสายอากาศเฮลลิคอล 80 รอบ โดยแบ่งจำนวนรอบลงแล้วทำเป็นอาร์เรย์ เพื่อให้ได้เกนตามที่ต้องการ

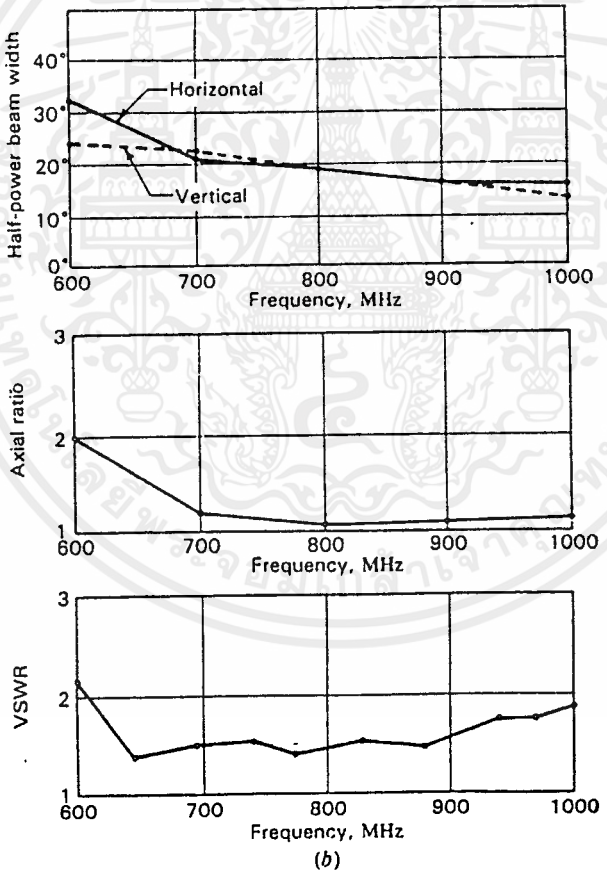
จากรูป a จะพบว่าสายอากาศเฮลลิคอลมีจุดป้อนจุดเดียว แต่มีโครงสร้างยาวมาก และส่วนกราวด์มีขนาดเล็ก แต่สายอากาศเฮลลิคอลแบบอาร์เรย์ ดังรูป b,c,d จะมีโครงสร้างส่วนกราวด์ใหญ่ มีขนาดความยาวสายอากาศลดลง ซึ่งจะสร้างได้ง่ายและแข็งแรงกว่า และสายอากาศแบบอาร์เรย์นี้สามารถหาจุดป้อนโดยจุดที่แต่ละส่วนของสายอากาศอาร์เรย์นี้จะสมมาตรกัน

ในส่วนของสายอากาศเฮลลิคอลแบบอาร์เรย์นี้ จะมีค่าอิมพีแดนซ์สัมพันธ์กับสายอากาศเฮลลิคอลปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นค่าส่วนประกอบของค่า รีซิลตีฟ และรีแอคตีฟ ของสายอากาศเฮลลิคอลอาร์เรย์ ซึ่งสัมพันธ์กับสายอากาศเฮลลิคอลเอเลเมนท์เดียวกัน ที่จำนวนรอบของส่วนที่เป็นส่วนย่อยของอาร์เรย์ แต่อิมพีแดนซ์ที่จุดป้อน ของสายอากาศเฮลลิคอลแบบอาร์เรย์ ที่ได้จะลดลงเล็กน้อยขึ้นอยู่กับระยะห่างของส่วนอาร์เรย์ที่สมมาตรกันอยู่ ซึ่งควรจะมีระยะห่างกันมากกว่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูป 3.25 แสดงโครงสร้างและรายละเอียดของสายอากาศเฮลลิคอลโหมดแนวแกนแบบอาร์เรย์ 4 แกน ที่ความถี่กึ่งกลาง 800 MHz

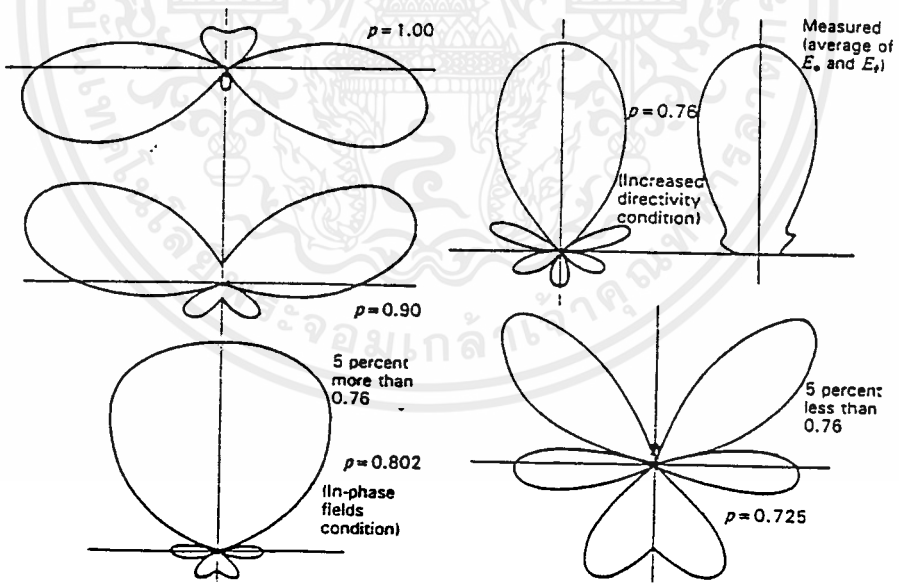
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบและทดลองสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

จากคุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนที่กล่าวมาในบทต้นๆ จะพบว่าถ้าต้องการให้สายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ทำงานในลักษณะที่ให้คลื่นมีโพลาไรเซชั่นวงกลมในแนวแกนของสายอากาศ จะต้องออกแบบให้เส้นรอบวงของสายอากาศ มุมพิตท์ และ และจำนวนรอบมีค่าดังนั้น คือ

$$\left.\begin{array}{l} 0.75 \le C\lambda \le 1.2 \\ 12^{\circ} \le \alpha \le 15^{\circ} \\ n \ge 3 \end{array}\right\} \qquad \text{———4.1}$$

ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่งที่จะทำให้แพทเทอร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีทิศทางตามแนวแกน และมีผลทำให้ไซด์โลบมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับโลบหลัก คือ จะต้องมีความเร็วเฟสของกระแสบนสายอากาศอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 0.805



รูป 4.1 แสดงแพทเทอร์นของสายอากาศเฮลิคอลเมื่อมีความเร็วเฟสของกระแสต่างกัน

แสดงสูตรการคำนวนคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

อินพุตอิมพีแดนซ์	$140\,C\lambda$	(Ω)
ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์(HPBW)	$\frac{52}{C\lambda\sqrt{n.s\lambda}}$	(องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บีมวิดท์ระหว่างนัลคู่แรก(FNBW)	$\frac{115}{C\lambda\sqrt{n.S\lambda}}$	(องศา)
เกน(GAIN)	$11.8 + 10 \log C\lambda^2 . n . S\lambda$	(dBi)
ความสามารถในการชี้ทิศทาง (Directivity)	$12\, C\lambda^2 . n . S\lambda$	
อัตราส่วนระหว่างโพลาไรเซชั่นแกนหลัก(Axial ratio)	$\left\lvert L\lambda\left(\sin\alpha - \frac{1}{p}\right)\right\rvert$	
ความเร็วแสงของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอล	$\frac{1}{\sin\alpha + \left(\cos\alpha . \frac{\lambda}{C}\right)}$	

เมื่อโครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล ประกอบด้วย

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด ของสายอากาศเฮลิคอล

C คือ ความยาวเส้นรอบวงขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล

S คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล

α คือ มุมพิตช์ (Pitch angle)

L คือ ความยาวขดลวดหนึ่งรอบ

n คือ จำนวนรอบขดลวด

a คือ รัศมีของขดลวดตัวนำ

การออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

ความถี่ที่เราต้องการออกแบบสายอากาศคือ 720 MHz

$$\text{ความยาวคลื่น}(\lambda) = \frac{C}{f} \quad (m)$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{720 \times 10^6}$$

$$= 41.666 \quad (cm)$$

เพื่อให้แพทเทอร์นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชี้ในทิศทาง ตามแนวแกน จึงกำหนดให้มีความยาวเส้นรอบวงขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล ($C\lambda$) เท่ากับ 0.942 เพื่อจะได้มีความเร็วเฟสของกระแสบนสายอากาศ อยู่ในช่วงที่ทำให้แพทเทอร์นชี้ไปตามแนวแกนของสายอากาศ ซึ่งจะได้ความเร็วเฟสของกระแสบนสายอากาศ(p) เท่ากับ 0.794

$$C\lambda = 0.942\lambda$$

$$= 0.942 \times 41.666$$

$$= 39.27 \quad (cm)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล(D_λ)

$$D_\lambda = c/\pi$$
$$= 39.27/(3.1416 \times 41.666)$$
$$= 0.3$$

กำหนดให้สายอากาศมีมุมพิตช์ (α) เท่ากับ 13°

ระยะห่างระหว่างขดลวดแต่ละรอบของสายอากาศ (S_λ)

$$S_\lambda = \pi . D_\lambda . \tan \alpha$$
$$= 3.1416 \times 12.5 \tan 13^\circ$$
$$= 0.2174$$

ความยาวขดลวดหนึ่งรอบ (L_λ)

$$= \left[S^2 + (\pi D)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
$$= \left[9.06^2 + (3.1416 \times 12.5)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
$$= 40.3 \quad \text{(cm)}$$
$$= 0.967\lambda$$

สามารถคำนวนคุณสมบัติต่างๆ ในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเฮลิคอลได้ดังนี้

อินพุทอิมพีแดนซ์

$$= 140 \times C_\lambda$$
$$= 131.88 \quad (\Omega)$$

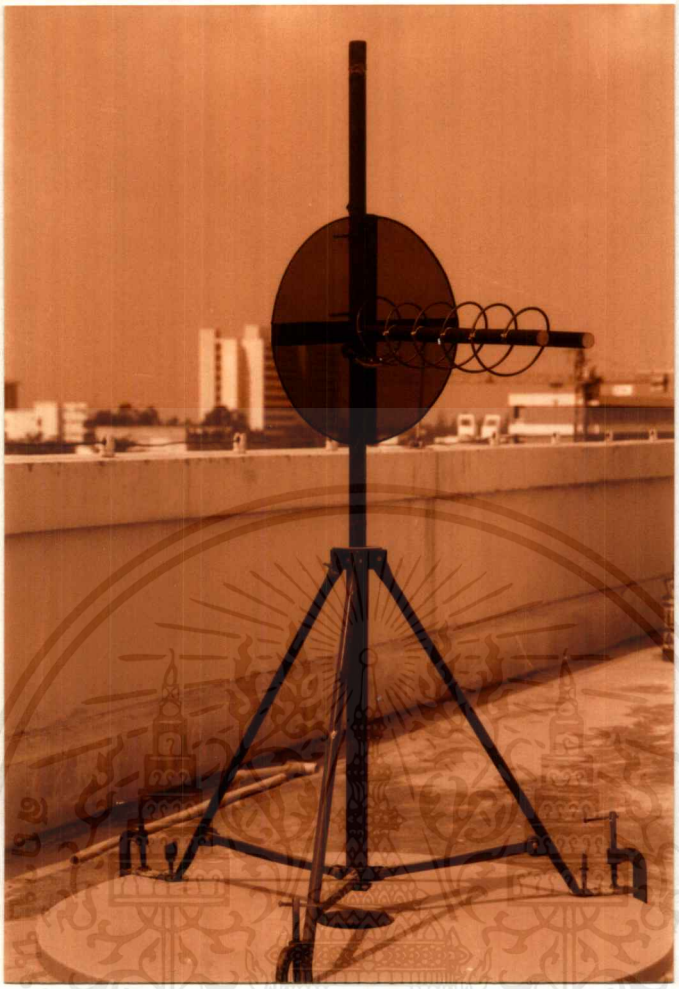
ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์

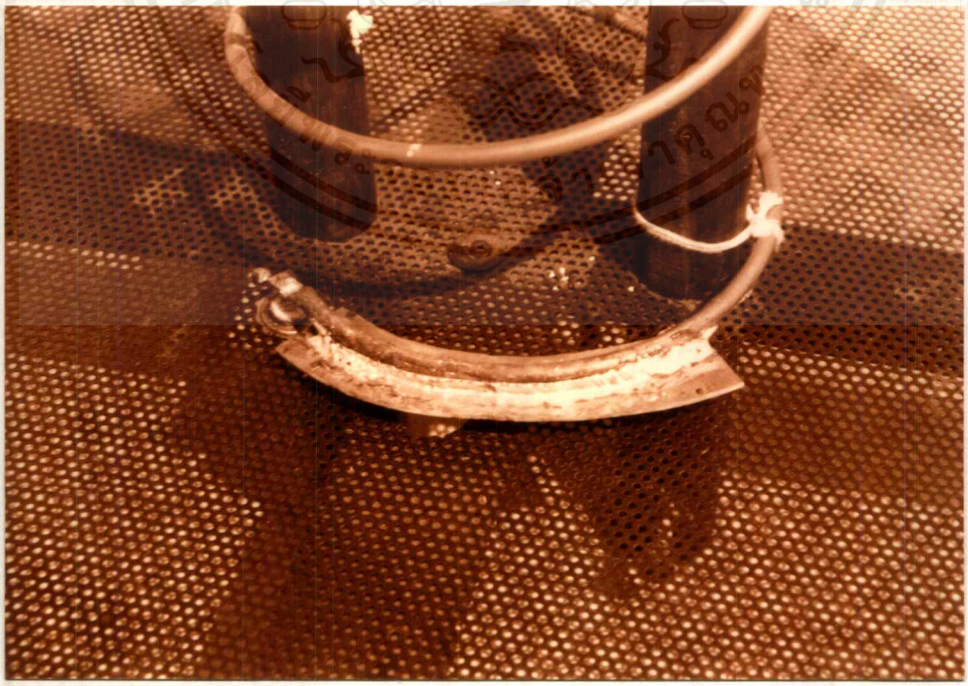
$$= \frac{52}{C_\lambda \sqrt{n.S_\lambda}}$$
$$= \frac{52}{0.972\sqrt{6 \times 0.2174}}$$
$$= 48.333 \quad \text{(องศา)}$$

บีมวิดท์ระหว่างนัลคู่แรก

$$= \frac{115}{C_\lambda \sqrt{n.S_\lambda}}$$
$$= \frac{115}{0.942\sqrt{6 \times 0.2174}}$$
$$= 106.89 \quad \text{(องศา)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูป 4.2 แสดงสายอากาศเฮลิคอล จำนวน 6 รอบที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกนของสายอากาศ = $11.8+10\text{Log}\left(C\lambda^{2}{}_{n}\, S\lambda\right)$

= $11.8+10\text{Log}\left(0.942^{2} \times 6 \times 0.2174\right)$

= 12.435 (dBi)

ความสามารถชี้ทิศทาง = $12\, C\lambda^{2}{}_{.n}\, S\lambda$

= $12 \times 0.942^{2} \times 6 \times 0.2174$

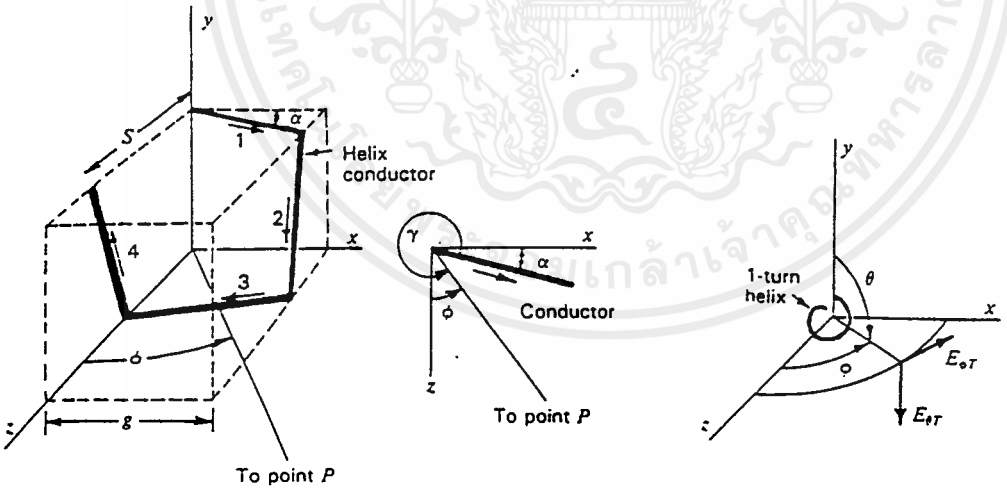
= 13.889

ความเร็วเฟสของกระแส = $\dfrac{1}{\sin\alpha + \left(\dfrac{\lambda}{C}\cos\alpha\right)}$

= $\dfrac{1}{\sin 13 + \left(\dfrac{1}{0.942}\cos\alpha\right)}$

= 0.794

สนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน จากการคำนวนทางทฤษฎีโดยการแบ่งสายอากาศเฮลิคอลที่มีมุมพิตท์(∝) เท่ากับ 13° 1 ขด แบ่งเป็นส่วนย่อยๆ 4 ส่วนเพื่อใช้ในการหาสนามไฟฟ้า



รูป 4.3 แสดงการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอล 1 ขด

โดยอาศัยทฤษฎีของ เฮริตซ์เวกเตอร์ (Hertz vecter) สามารถหาสนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอล 1 ขด ดังรูป 4.3 ได้สนามไฟฟ้าในทิศทาง θ และ ϕ ได้ดังนี้

$$E_{\phi T} = \frac{\sin\gamma}{\sin A}\sin BA/\left(-BA\right) + \frac{\sin\gamma'}{\cdot A'}\sin BA'/\left[-BA'-2\sqrt{\pi}B + \pi\left(S\lambda\cos\phi + \sqrt{\pi}D\lambda\sin\phi\right)\right] \quad \text{——4.2}$$

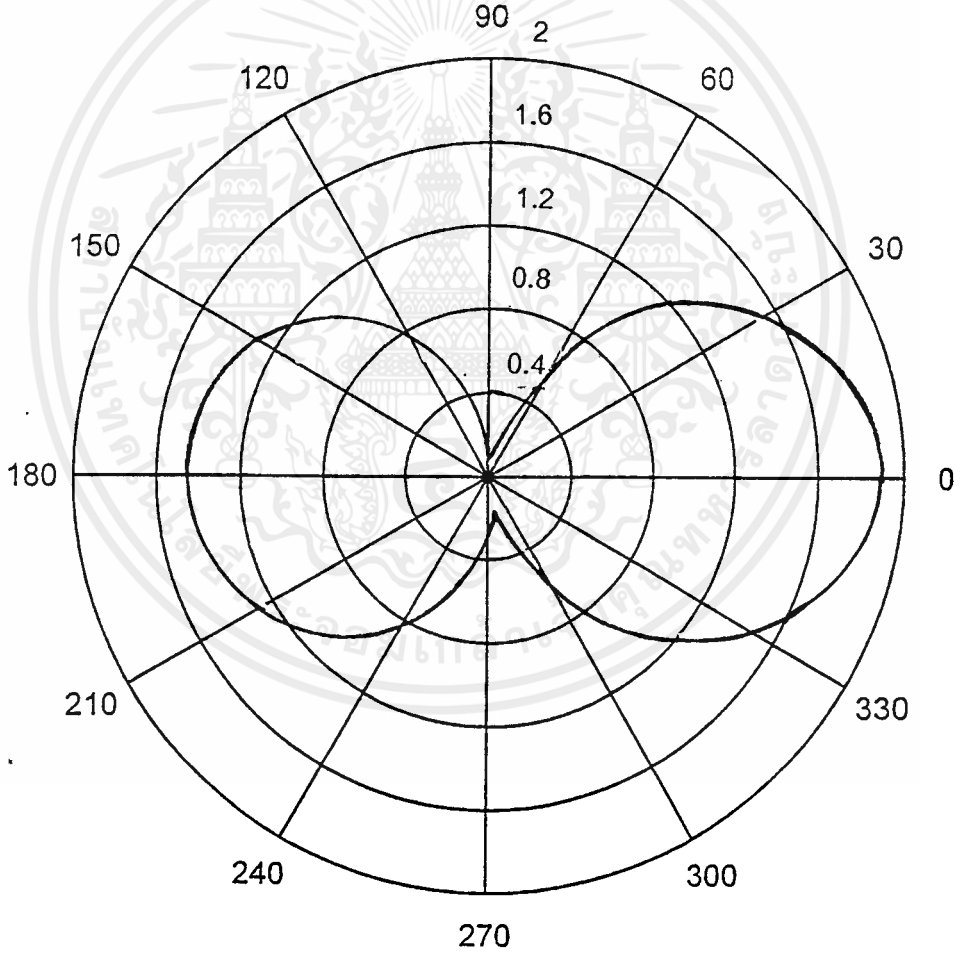
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\gamma = \frac{3\pi}{2} + \alpha + \phi$, $\gamma' = \frac{\pi}{2} - \alpha + \phi$, $\gamma'' = \cos^{-1}(\sin\alpha\cos\phi)$

$A = 1\text{-}p\cos\gamma$, $A' = 1\text{-}p\cos\gamma'$, $A'' = 1\text{-}p\cos\gamma''$

$$B = \frac{D\lambda\pi^{\frac{3}{2}}}{2p\cos\alpha}$$

จากสมการ 4.2 สามารถนำไปหาสนามไฟฟ้าตามทิศทาง ϕ ได้ดังรูป 4.4



รูป 4.4 แสดงสนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอล 1 รอบตามทิศทางแกน ϕ

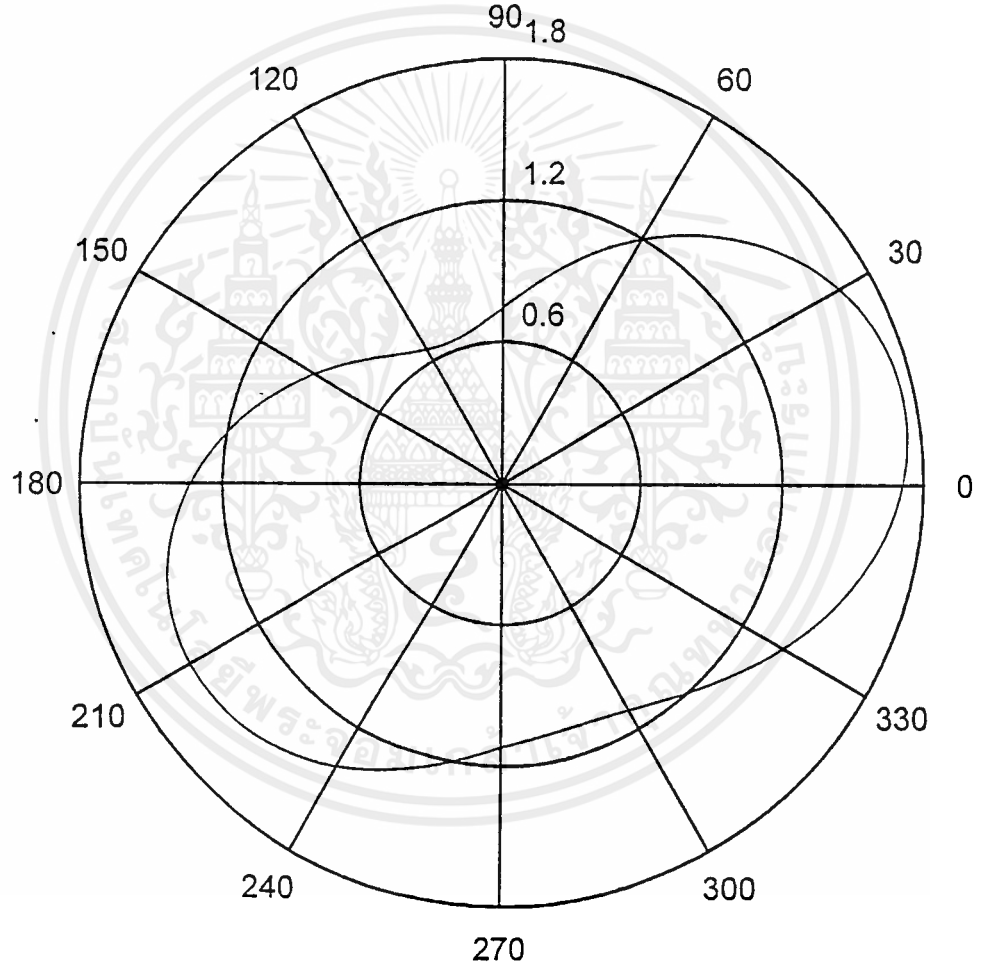
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล 1 รอบตามทิศทาง θ ได้คือ

$$E_{\theta r} = \frac{2\sin\gamma^{\circ}\ \sin BA^{\circ}\ \cos\alpha}{A^{\circ}\left(1 - \sin^2\alpha_c \cos^2\phi\right)^{\frac{1}{2}}} \times \sin\frac{1}{2}\left[\pi\left(S\lambda.\cos\phi - \sqrt{\pi}D\lambda.\sin\phi\right) - 2\sqrt{\pi}B\right]$$

____4.3

สามารถแสดงสนามไฟฟ้าตามสมการ 4.3 ได้ดังรูป 4.5



รูป 4.5 แสดงสนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอล 1 รอบ ตามทิศทางθ

เมื่อสามารถหาสนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน 1 รอบ ได้แล้วเราสามารถหาสนามไฟฟ้ารวมเมื่อมีจำนวนขดลวด 6 รอบ ได้ดังนี้คือ

$$E_{\phi} = E_{\phi r} \times AF \qquad \text{———4.4}$$

$$E_{\theta} = E_{\theta r} \times AF \qquad \text{———4.5}$$

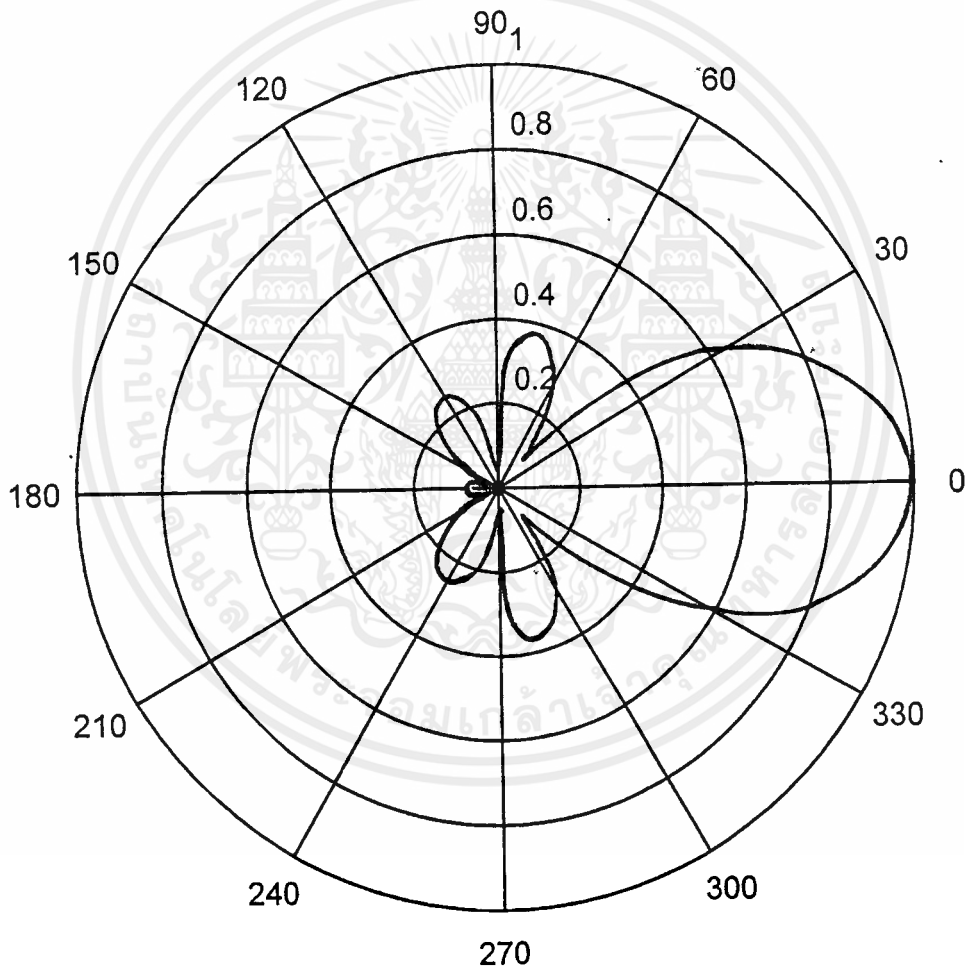
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ AF เป็น อาร์เรย์เฟคเตอร์ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีระยะห่างระหว่างขด(s_λ) เท่ากับ 0.2174 สามารถทำการคำนวนหาค่า นอร์มอลไลซ์ อาร์เรย์เฟคเตอร์ (AF) ได้ดังนี้

$$AF = \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right)\frac{\sin\left(\frac{n\varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \qquad \text{———4.6}$$

; $\varphi = 2\pi(s_\lambda \cos\phi - \frac{L_\lambda}{p})$

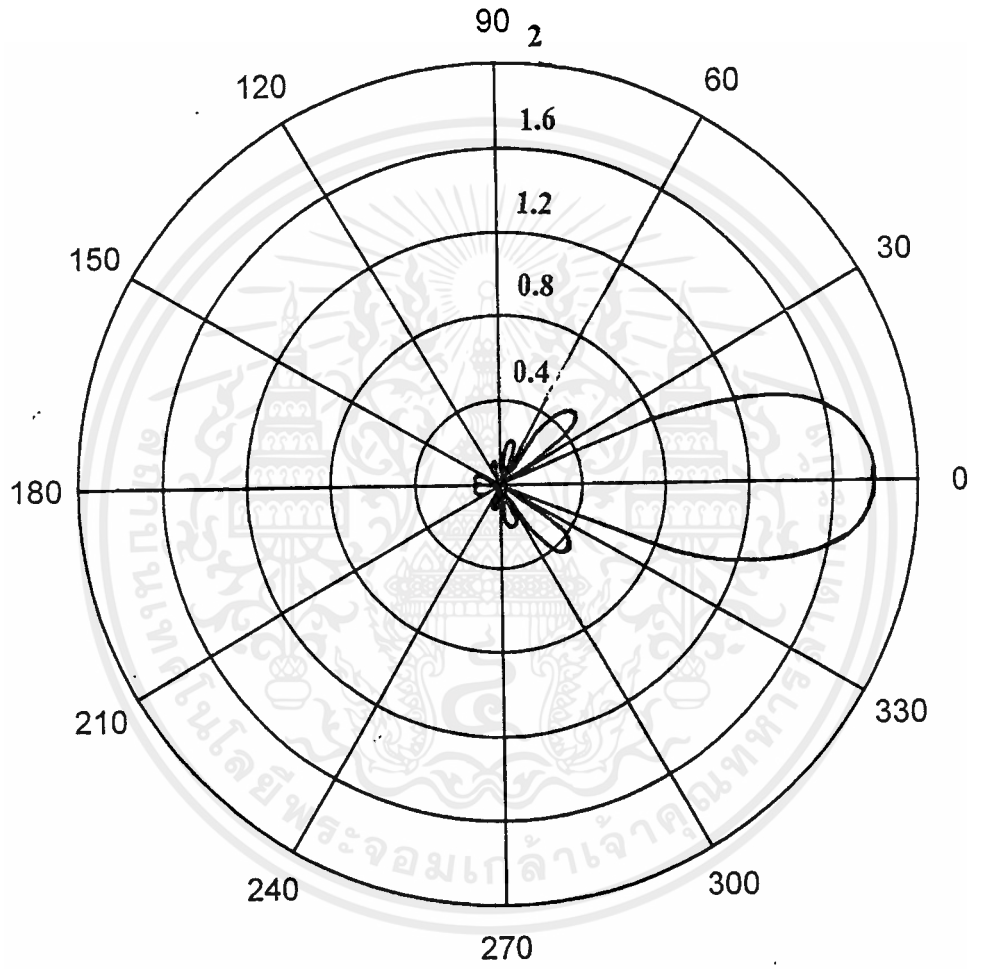
จากสมการ 4.6 สามารถหาค่า อาร์เรย์เฟคเตอร์ได้ดังรูป 4.6



รูป 4.6 แสดงค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ของสายอากาศเฮลิคอลที่มีระยะห่างระหว่างขดเท่ากับ 0.2174λ

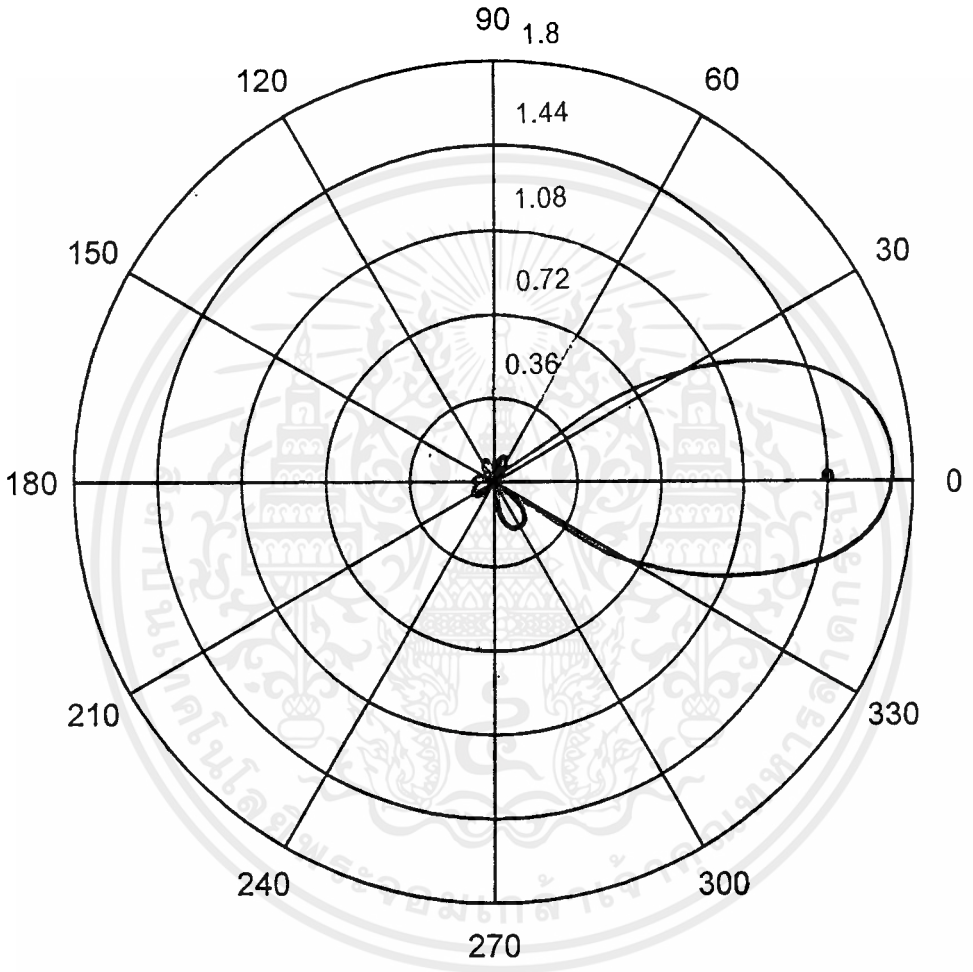
จากสมการ 4.4 สามารถหาสนามไฟฟ้าของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน จำนวน 6 รอบ ตามทิศทาง ϕ และ θ ได้ดังรูป 4.7 และ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.7 แสดงสนามไฟฟ้า ตามทิศทาง ϕ ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีระยะห่างระหว่างขด(s_λ) เท่ากับ 0.2174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

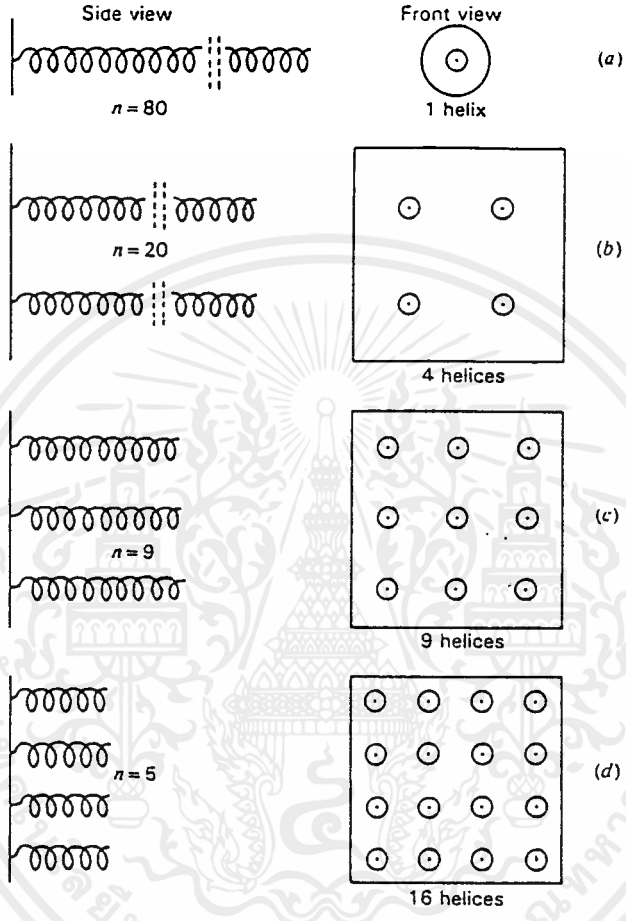


รูป 4.8 แสดงสนามไฟฟ้า ตามทิศทาง θ ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีระยะห่างระหว่างขด(s_λ) เท่ากับ 0.2174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน แบบอาร์เรย์ 4 ชุด

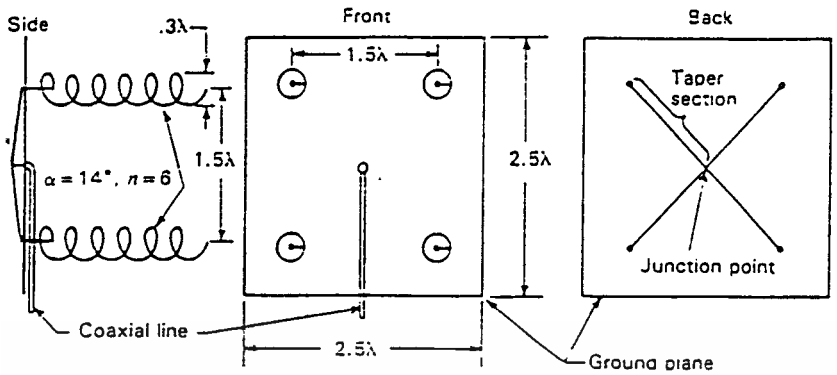
การออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ที่มีจำนวนรอบมากๆ สามารถสร้างเป็นสายอากาศ อาร์เรย์ แบบแผ่น(planar array) ได้ดังรูป 4.9



รูป 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสายอากาศเฮลิคอล ทีมีจำนวนรอบสูงๆ ที่สามารถทำให้เป็นสายอากาศอาร์เรย์ได้

โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ที่ได้ทำการออกแบบคือ มีจำนวนรอบเท่ากับ 24 รอบ โดยทำเป็นสายอากาศอาร์เรย์ 4 ชุด ซึ่งมีโครงสร้างแต่ละชุดเหมือนกับที่ได้ออกแบบไว้ในตอนต้น คือ 1 ชุดมีจำนวน 6 รอบขดลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 แสดงโครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลเมื่อทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด

ซึ่งสามารถทำการ คำนวนหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน 24 รอบที่นำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด ได้คือ

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (HPBW) $= \dfrac{52^{\circ}}{C\lambda\sqrt{n.S\lambda}}$

$= \dfrac{52^{\circ}}{0.942\sqrt{24 \times 0.2174}}$

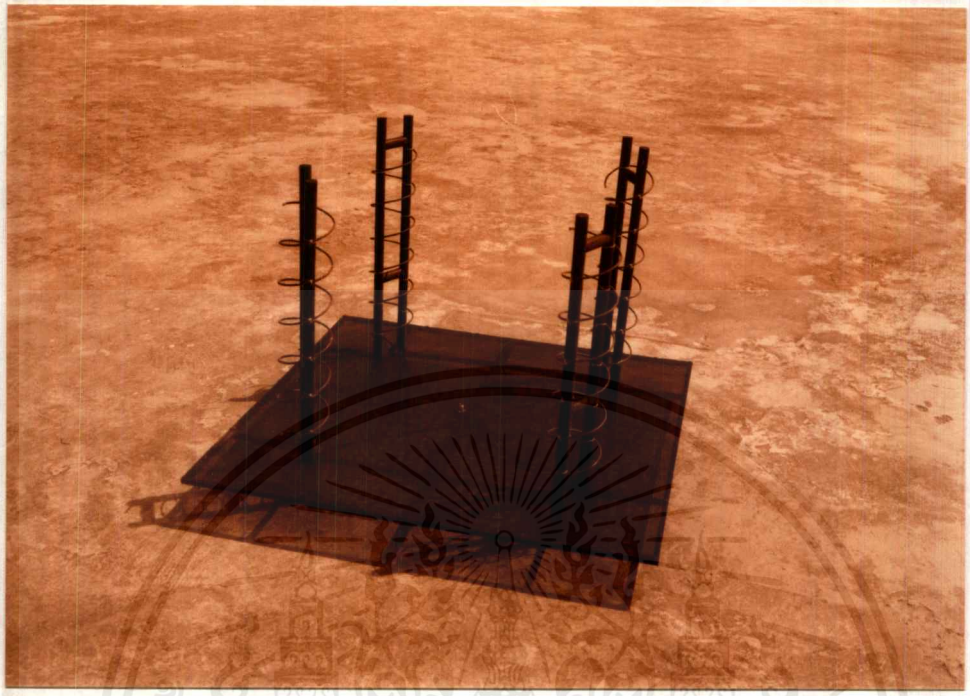
$= 24.16$ (องศา)

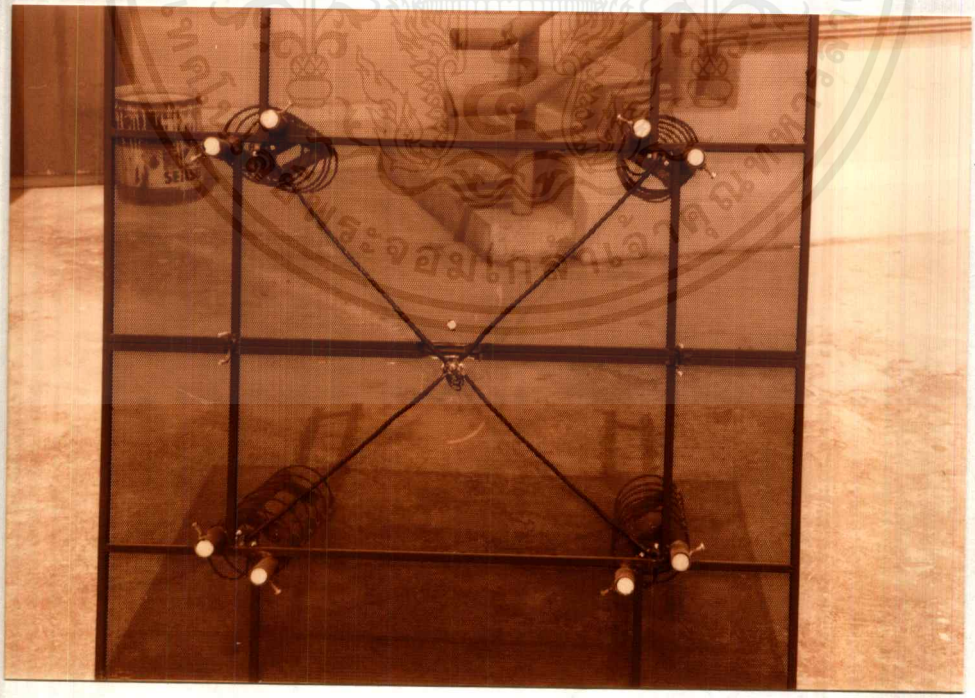
เกน (Gain) $= 11.8+10\text{Log } C\lambda^{2}n.S\lambda$

$= 11.8+10\text{Log}(0.942^{2} \times 24 \times 0.2174)$

$= 18.4$ (dBi)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

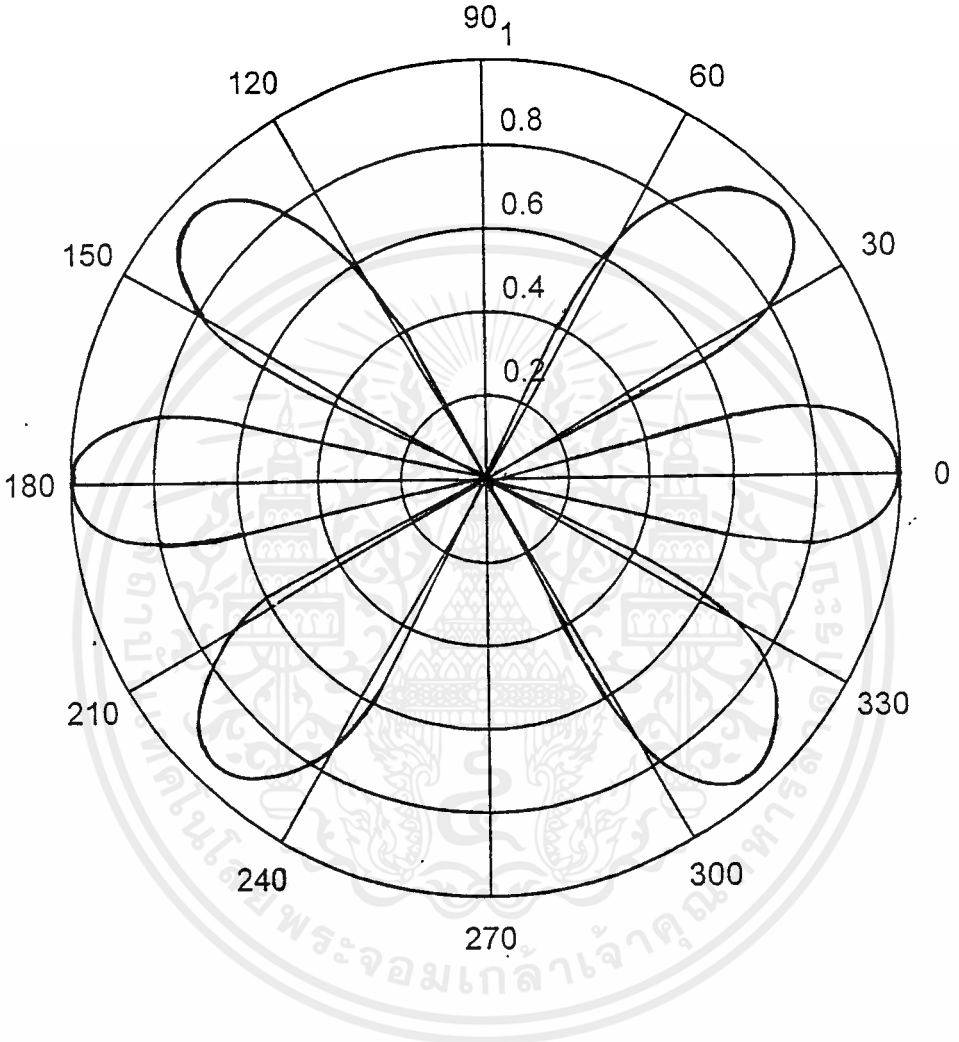




รูป 4.11 แสดงโครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลเมื่อทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุดที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

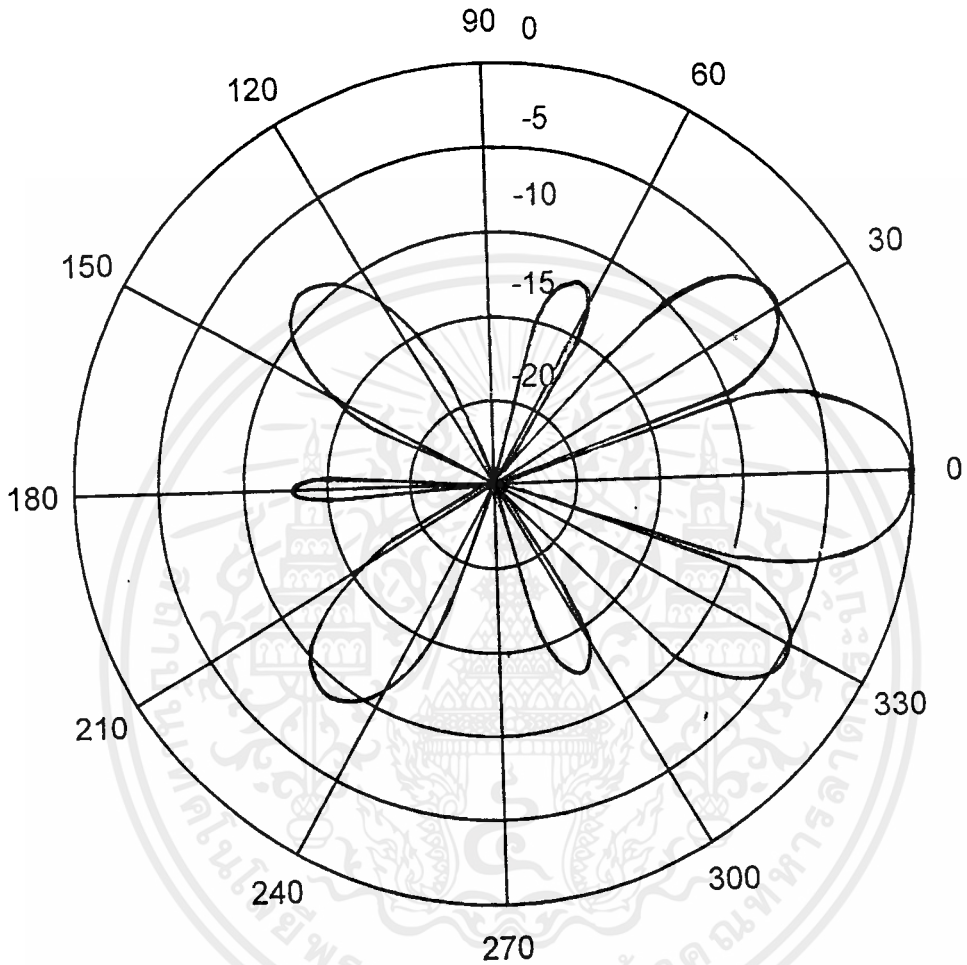
จากการนำสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน 4 ชุด มาต่อแบบอาร์เรย์ ที่มีระยะห่าง 1.5λ ซึ่งหาค่า อาร์เรย์เฟคเตอร์ (AF) ได้ดังรูป 4.12



รูป 4.12 แสดงค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ ของสายอากาศ ที่มีระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์ 1.5λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

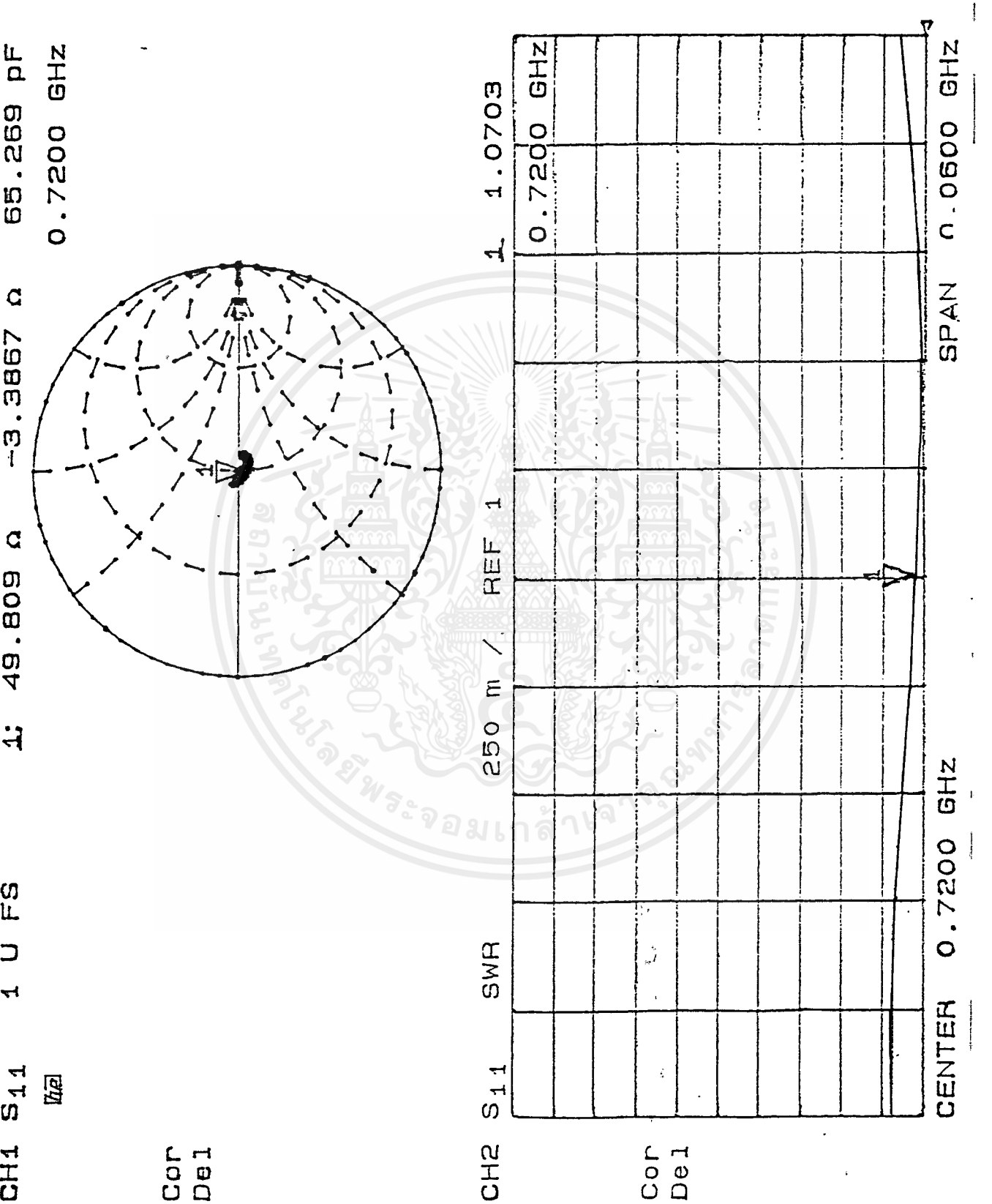
สนามไฟฟ้า รวมจากการทำสายอากาศเฮลิคอลเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด จะได้ดังรูป 4.13



รูป 4.13 แสดงสนามไฟฟ้ารวม จากการทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด

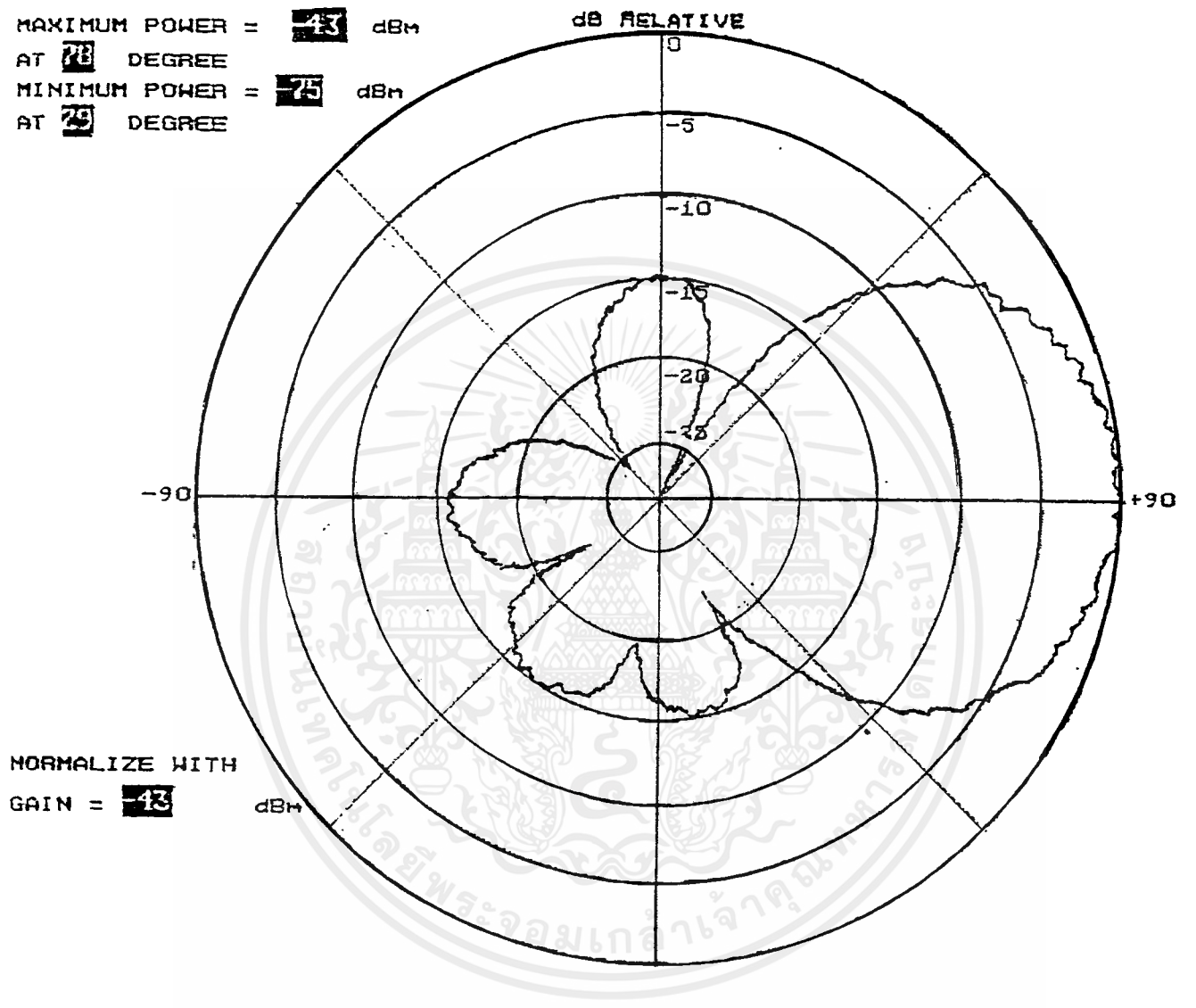
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองสายอากาศเฮลิคอล โหมดแนวแกน ที่มีจำนวนรอบขดลวดตัวนำ 6 รอบ



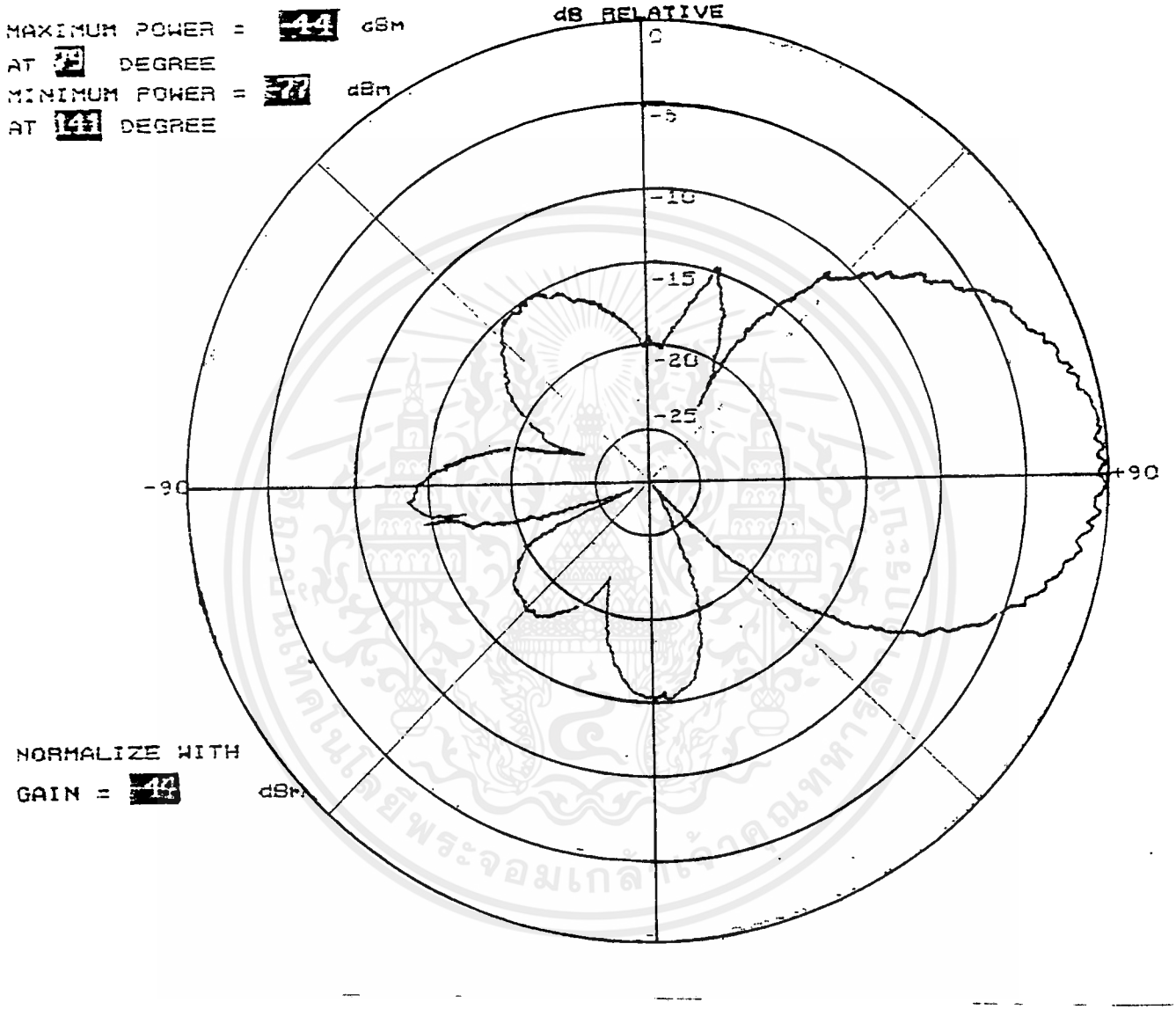
รูป 4.14 การวัดค่า VSWR ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 6 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.15 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 6 รอบ ในระนาบแนวตั้ง (Vertical)

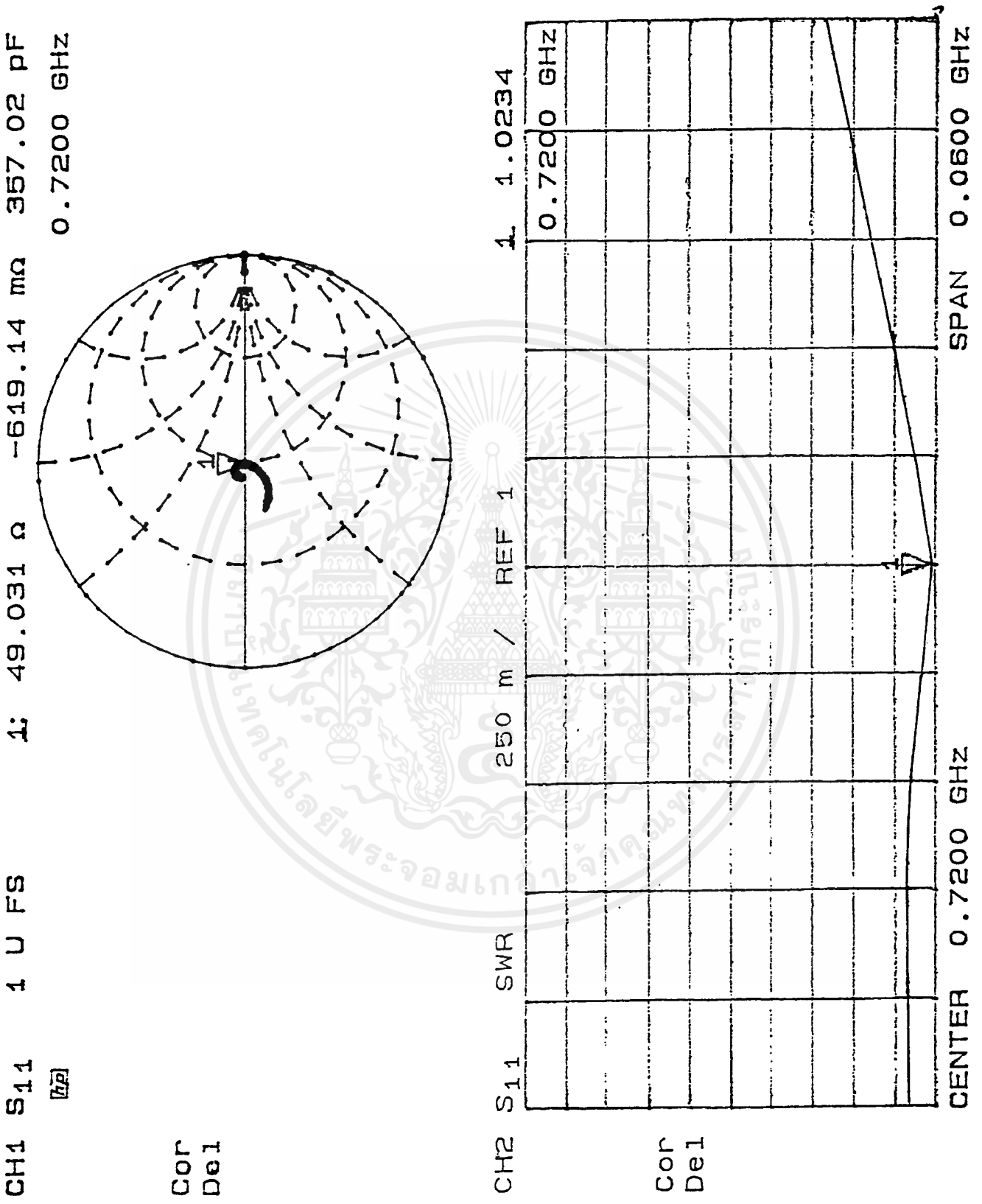
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.16 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 6 รอบ ในระนาบแนวนอน (Horizontal)

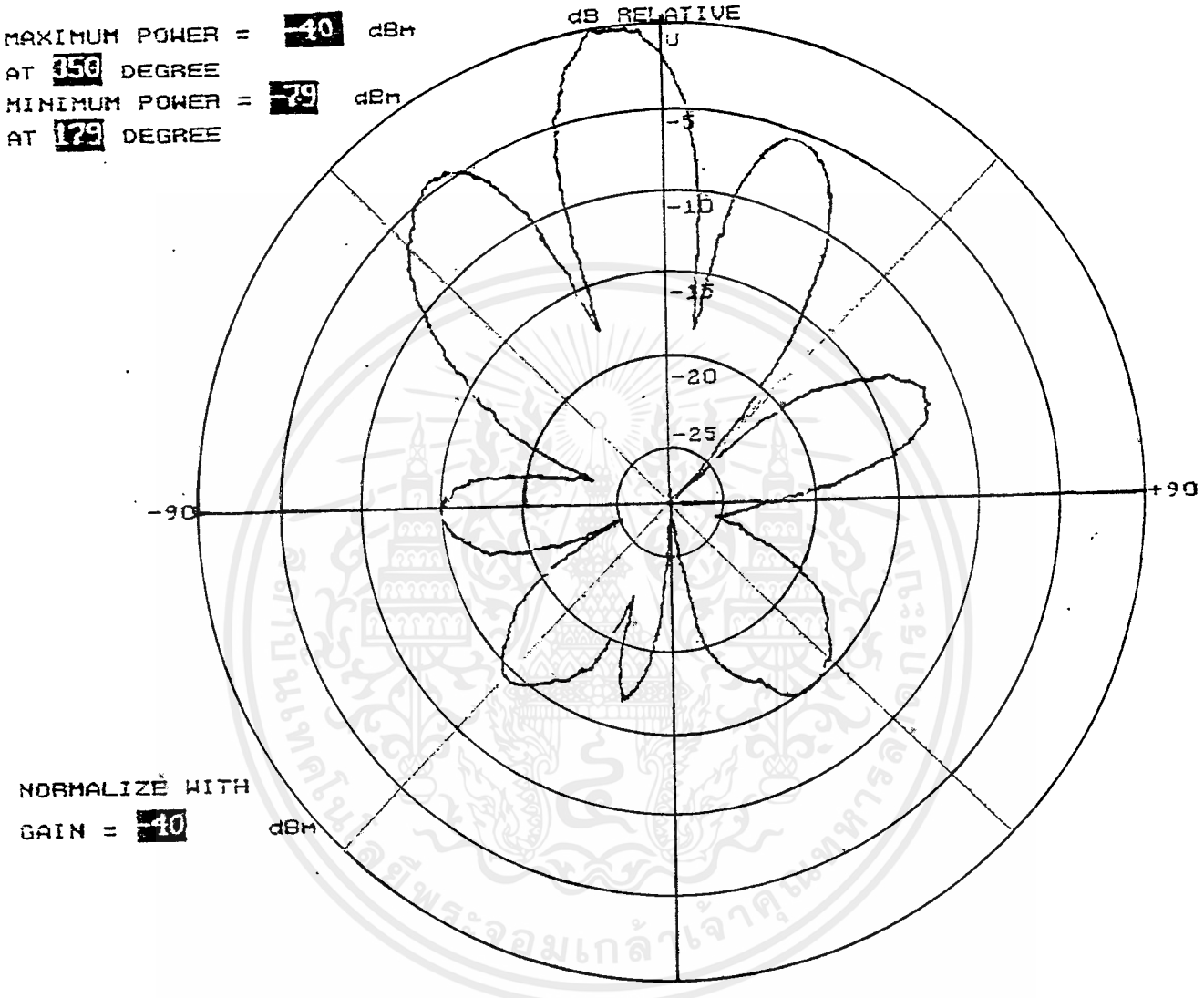
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ที่มีจำนวนรอบขดลวดตัวนำ 24 รอบนำมาทำเป็น



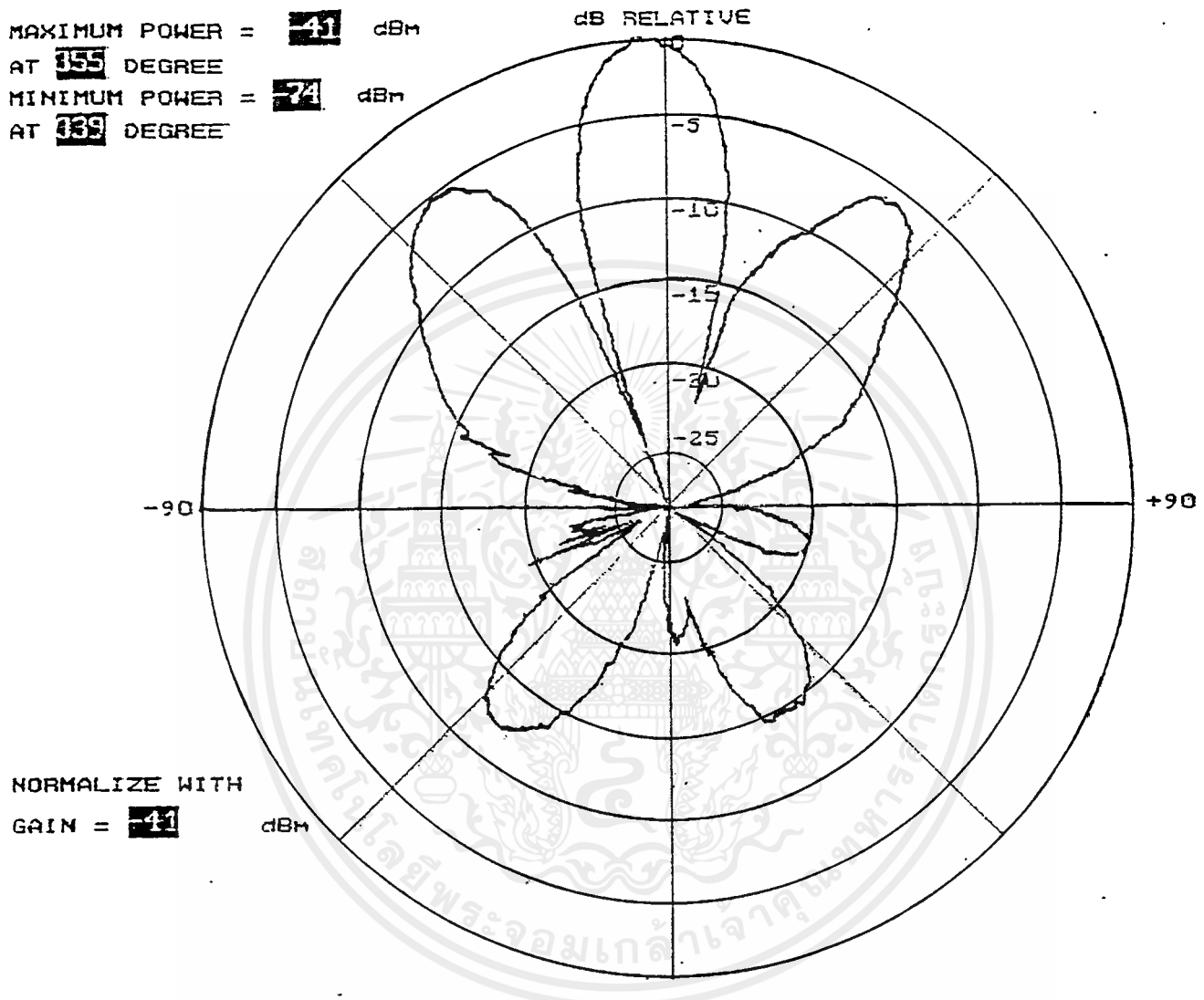
รูป 4.17 การวัดค่า VSWR ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 24 รอบนำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.18 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 24 รอบนำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด ในระนาบแนวตั้ง (Vertical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.19 แสดงแพทเทอร์นสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวดตัวนำ 24 รอบ นำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุดในระนาบแนวนอน (Horizontal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองวัดแพทเทอร์น ของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ทั้งสองชุด จะได้ค่าไดเรคติวิตี้ ของสายอากาศคือ

$$D_o = \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}}$$

$$= \frac{41253}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}}$$

ซึ่งจากการทดลองทดสอบสายอากาศเฮลิคอล จำนวน 6 รอบ สามารถหาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ได้คือ

$$\Theta_{1d} = 54 \text{ องศา}$$

$$\Theta_{2d} = 44 \text{ องศา}$$

$$\text{ค่าไดเรคติวิตี้}(D_o) = \frac{41253}{54 \times 44}$$

$$= 17.362$$

$$\text{เกน(Gain)} = \frac{30000}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}}$$

$$= \frac{30000}{54 \times 44}$$

$$= 12.626$$

$$= 11 \text{ dBi}$$

ค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น(e_{cd})ของสายอากาศเฮลิคอลจำนวน 6 รอบคือ

$$e_{cd} = \frac{G_o}{D_o}$$

$$= \frac{12.626}{17.362}$$

$$= 0.7287$$

$$= 72.87 \%$$

ซึ่งจากการทดลองทดสอบสายอากาศเฮลิคอล จำนวน 24 รอบ สามารถหาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ได้คือ

$$\Theta_{1d} = 17.5 \text{ องศา}$$

$$\Theta_{2d} = 18 \text{ องศา}$$

$$\text{ค่าไดเรคติวิตี้}(D_o) = \frac{32400}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}}$$

$$= \frac{32400}{17.5 \times 18}$$

$$= 102.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกน(Gain) $= \frac{30000}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}}$

$= \frac{30000}{17.5 \times 18}$

$= 95.23$

$= 19.7$ dBi

ค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น(e_{cd})ของสายอากาศเฮลิคอลจำนวน 24 รอบคือ

$e_{cd} = \frac{G_o}{D_o}$

$= \frac{95.23}{102.8}$

$= 0.9263$

$= 92.63$ %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุป และ วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลอง สายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ทั้งสองตัวที่ ได้ทำการออกแบบ จะได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติ และ มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ ลักษณะแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า บริเวณระยะห่างไกล ซึ่งมีค่าใกล้เคียง กับ ทางทฤษฎีที่ได้ออกแบบ โดยสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนที่มีจำนวนรอบ 6 รอบ จะมีฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์สูงกว่า สายอากาศเฮลิคอล 24 รอบที่นำมาทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด ตรงตามทฤษฎี แต่สายอากาศเฮลิคอล 24 รอบ ที่ทำเป็นอาร์เรย์นั้นทำให้ค่า ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ลดลงก็จริง แต่การทำเป็นอาร์เรย์นั้นจะทำให้โลบข้างมีขนาดสูงตามมาด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ และสายอากาศเฮลิคอล ที่มีขดลวด 24 รอบที่ทำเป็นอาร์เรย์ 4 ชุด นั้นจะทำให้ค่า เกนของสายอากาศสูงขึ้นก็ตาม

สรุป จากการออกแบบ และ ทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ทั้ง 2 ตัวนี้ จะได้ค่าใกล้เคียงกับทางค่าที่ได้คำนวนทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ. สมผล โกศัลวิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา รวมทั้งแนะนำโครงงาน และให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน ซึ่งทำให้โครงงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ๆห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI / EMC R&D LABORATORY) ทุกคน ที่กรุณาให้คำปรึกษา ทั้งให้ทำการวัด และ ทดลองสายอากาศ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และ ผู้มีส่วนร่วมที่ช่วยเหลือ ให้โครงงาน และ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้เรียบเรียงขอมอบความปรารถนาดี ให้กับบุคคลดังกล่าวข้างต้นมา ณ. ที่นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. โมไนย ไกรฤกษ์ : " ทฤษฎีสายอากาศ" , สำนักพิมพ์พีสิกค์เซ็นเตอร์
2. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ : " วิศวกรรมสายอากาศ" , นักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2537
3. Constantine A.Balanis : " Antenna Theory : Analysis and Design" , Harper & Row Publishers , New York ,1997
4. John D.Kraus : " Antennas" , McGraw - Hill , 1988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้