สายอากาศ

J POLE ANTENNAS

โดย

นาย นิติ เปรมบำรุง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วัน เดือน ปี 30 ก.ค. 2540
เลขทะเบียน 036934
เลขเรียกหนังสือ ว 38027 น. 581 ส

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

036934

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ สายอากาศ เจ โพล

(J Pole Antennas)

โดย นาย นิติ เปรมบำรุง รหัส 36012013 2N

ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สมภพ แก้วมีชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง **อนุมัติให้** นับปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

_____ อ.ที่ปรึกษา

(_____)

_____ กรรมการ

(_____)

_____ กรรมการ

(_____)

_____ กรรมการ

(_____)

_____ กรรมการ

(_____)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROJECT J POLE ANTENNAS

NAME MR. NITI PRAMBUMRUNG 36012013

ADVISOR MR. SOMPOP KALMECHAI

LEVEL OF STUDY BACHELOR'S DEGREE IN INDUSTRIAL
(TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY)

ACADEMIC YEAR 1995

ABSTRACT

This project is an analysing comparison to the gains , the pattern and the construct of j pole antenna , half wave dipole antenna, folded dipole.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	สายอากาศ เจโพล
นักศึกษา	นาย นิติ เปรมบำรุง 36012013
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ สมภพ แก้วมีชัย
ระดับการศึกษา	อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต
ปีการศึกษา	2538

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์นี้จะเป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบว่าสายอากาศ เจโพล กับสายอากาศ ฮาร์ฟเวฟ ไดโพล และ โฟลเดด ไดโพล เช่น เกณฑ์การขยาย รูปแบบการแพร่คลื่น รูปแบบการแมชท์ รวมถึงโครงสร้างของสายอากาศแต่ละแบบ ว่าแตกต่างกันอย่างไรบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

(ACKNOWLEDGMENTS)

ปริญญานิพนธ์ที่ได้จัดทำขึ้นนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาที่ดีกับผู้จัดทำ โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา อ. สมภพ แก้วมีชัย ที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจกับผู้จัดทำ และ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดลชัย สุขเจริญผล และ อาจารย์ กฤษดากร กล่อมการ ที่ให้คำปรึกษาและเอกสารต่าง ๆ กับผู้จัดทำ

ผู้จัดทำจึงกราบขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ. โอกาสนี้

ผู้จัดทำ

28 ตุลาคม 2538

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

การออกแบบสายอากาศ เจโพล เป็นปริญญานิพนธ์ ของหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต (อ.ส.บ.) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีการศึกษา 2538 ปริญญานิพนธ์ชิ้นนี้ได้ศึกษาออกแบบสายอากาศ เจโพล เปรียบเทียบกับสายอากาศชนิด ไดโพล ว่ามีข้อแตกต่างกันอย่างไร

ปริญญานิพนธ์ซึ่งนักศึกษาจะต้องทำในปีสุดท้ายของการเรียนในระดับปริญญาตรี เพื่อเอาความรู้ที่ได้ศึกษามาไปประยุกต์ใช้ ฝึกการทำงาน และการแก้ปัญหาให้ลุล่วงไปด้วยดี เพื่อสามารถที่จะนำไปใช้ในชีวิตการทำงานที่แท้จริง

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ปริญญานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา เพื่อเอาไปใช้งานหรือประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน และพัฒนาให้ดียิ่ง ๆ ขึ้นไป ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ที่สามารถทำให้ปริญญานิพนธ์ชิ้นนี้สำเร็จด้วยดี

ผู้จัดทำ

28 ตุลาคม 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	ความรู้ขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นและชั้นบรรยากาศ	1
	1.1 บทนำ	1
	1.2 ลักษณะของคลื่นวิทยุ	1
	1.3 คุณสมบัติของคลื่น	3
	1.4 ตัวแปรที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
	1.5 การคำนวณค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่น	10
	1.6 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	16
	1.7 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	22
	1.8 คลื่นดินหรือคลื่นผิวโลก	26
	1.9 การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	29
	1.10 ความถี่วิกฤต	33
	1.11 ความถี่ใช้งานสูงสุด	34
	1.12 รอยข้ามสกิป	36
	1.13 การสื่อสารหลายฮอบ	36
	1.14 คลื่นอวกาศ	37
	1.15 การใช้ดาวเทียมสื่อสาร	39
	1.16 การส่งคลื่นวิทยุแบบโทรโปสแกตเตอร์	40
	1.17 การจางหายของคลื่นวิทยุ	40
	1.18 การใช้งานในย่านความถี่ต่าง ๆ	43
บทที่ 2	ความรู้ขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ	44
	2.1 บทนำ	44
	2.2 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ	44
	2.3 หลักการของสายอากาศ	47
	2.4 รีโซแนนซ์ในวงจรลิเนียร์	48
	2.5 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.6 การเกิดอาร์โมนิก 50

2.7 ความยาวทางไฟฟ้า 51

2.8 ความยาวจริงของสายอากาศแบบครึ่งความยาวคลื่น 53

2.9 ปรากฏการณ์เอนด์ เอฟเฟ็กต์ 54

2.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 55

2.11 การพิจารณาสายอากาศเป็นวงจร 56

2.12 ค่าความต้านทาน 59

2.13 ค่ารีแอคแตนซ์ 61

2.14 การคัปเปิลสายอากาศ 61

2.15 การใช้งานสายอากาศในช่วงอาร์โมนิก 62

2.16 ความยาวของสายอากาศในการใช้ช่วงอาร์โมนิก 64

2.17 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้งานช่วงอาร์โมนิก 65

2.18 รูปแบบการแพร่คลื่น, อัตราการขยายและไดเร็คติวิตี้ 68

2.19 รูปแบบการแพร่คลื่น 75

2.20 รูปแบบโอโซทรอปิก, ไดเร็คชั่นแนลและออมนิไดเร็คชั่นแนล 76

2.21 รูปแบบ E และ H 77

2.22 ส่วนต่างๆ ในรูปแบบการแพร่คลื่น 78

บทที่ 3 สายนำสัญญาณ 80

3.1 บทนำ 80

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ขั้นต้นกับสายนำสัญญาณ 81

3.3 สายนำสัญญาณ 83

3.4 การต่อโหลดเข้ากับสายนำสัญญาณ 91

3.5 สัมประสิทธิ์การสะท้อน 96

3.6 คลื่นนิ่ง 97

3.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง 99

3.8 การวัด SWR 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.9 ชนิดและอุปกรณ์ของสายนำสัญญาณ 102

3.10 สายแบบใช้อากาศเป็นฉนวน 102

3.11 สายแบบเฟล็กซิเบิล 105

3.12 ข้อพิจารณาการเลือกใช้สาย 112

บทที่ 4 วิธีแม็ชท์ในระบบสายอากาศ 115

4.1 บทนำ 115

4.2 ช่องของความถี่และอัตราส่วน SWR 115

4.3 การแมชท์สายนำสัญญาณ 116

4.4 การแมชท์โดยตรง 117

4.5 บาลัน 119

4.6 การแมชท์โดยวิธีสตับ 120

4.7 การแมชท์โดยใช้สายนำสัญญาณยาว /4 121

4.8 วิธีแมชท์รูปตัว T 123

4.9 วิธีแมชท์แบบแกมม่า 124

4.10 วิธีแมชท์แบบโอเมก้า 125

บทที่ 5 สายอากาศเส้นลวดเส้นตรง 126

5.1 ไดโพลจิ๋ว 126

5.2 ไดโพลขนาดเล็ก 135

5.3 สายอากาศที่มีความยาวจำกัด 139

บทที่ 6 การออกแบบและการทดลอง 151

6.1 ขั้นตอนการออกแบบ Half wave dipole 151

6.2 ขั้นตอนการออกแบบ Folded dipole 153

6.3 ขั้นตอนการออกแบบ J pole 154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
ความรู้ขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับ
คลื่นและชั้นบรรยากาศ

1.1 บทนำ

มีการกล่าวถึงเรื่องราวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจากผลการทดลองของเฮิรตซ์ในปี ค.ศ. 1888 ในผลงานตีพิมพ์ชื่อ"การแผ่กระจายของไฟฟ้า" (On Electric Radiation) ซึ่งเนื้อหาภายในบทนี้ส่วนหนึ่งเป็นการอธิบายถึงคลื่นวิทยุถูกค้นพบได้อย่างไร ?

เริ่มแรกเกิดจากนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แมกซ์เวลล์ (Scot James Clerk Maxwell) ได้คำนวณสูตรทางคณิตศาสตร์เป็นผลสำเร็จ สามารถอธิบายได้ว่าเราสามารถส่งพลังงานผ่านสิ่งต่าง ๆ ได้ เช่น วัตถุแข็ง, วัตถุเหลว, ก๊าซ หรือในสุญญากาศก็ตาม โดยมีความเร็วที่มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง รวมทั้งภายในตัวคลื่นเอง สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ตั้งฉากกันตลอดกับทิศทางที่เดินทางไป

ความจริงที่แมกซ์เวลล์พิสูจน์ได้นี้เป็นเพียงค่าตัวเลขในสูตรคณิตศาสตร์เท่านั้น ขาดวิธีการทดลองให้เห็นจริงกับสมมุติฐานนี้

เฮิรตซ์ เป็นผู้สามารถพิสูจน์สมมุติฐานนี้โดยวิธีการทดลองสำเร็จเป็นคนแรก

รูปที่ 1.1 Heinrich Rudoff Hertz ผู้ค้นพบคลื่นวิทยุ

1.2 ลักษณะของคลื่นวิทยุ

ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างง่าย ๆ ที่เห็นชัด คือ การลองต่อลวดทองแดงเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (A.C.) พบว่าปรากฏการสั่นสะเทือนของอิเล็กตรอนภายในลวดตัวนำสามารถสร้างคลื่นแม่เหล็ก-ไฟฟ้าที่มีค่าความถี่เท่ากับของแหล่งจ่ายไฟได้

โดยที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) นี้ ส่งผ่านลวดตัวนำด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง

แมกซ์เวลล์ได้แสดงสูตรหาความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้ :

$$C = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$$

โดยที่ค่า คือ เพอร์มิลอะบิลิตี้ (permeability) ของตัวกลาง

คือ เพอร์มิททิวิตี้ (permittivity) ของตัวกลาง

สำหรับค่า และ จัดเป็นค่าคงที่ตามสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ความหมายของค่า และ อธิบายดังนี้

- ค่า เป็นตัวแทนคุณสมบัติของเนื้อสาร คิดว่าเป็นสัดส่วนของค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดจากเนื้อสารนั้นหารด้วยค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก

- ค่า แทน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกคูณกันค่าเพอร์มิททิวิตี้ของสุญญากาศ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ ตามกฎคูลอมป์ (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ในหน่วยเซนติเมตร-กรัม-วินาที หรือเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัด / เมตร)

เมื่อคิดค่า C ในสภาพสุญญากาศ พบว่ามีค่าเท่ากับ 3×10^{8} เมตร / วินาที ส่วนถ้าพิจารณาในตัวกลางอื่น ๆ จะมีค่าแตกต่างตามคุณสมบัติของตัวกลางนั้น

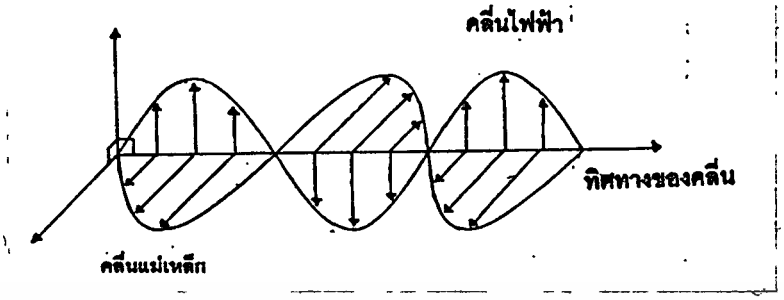
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างจากคลื่นน้ำในหลายประเด็น โดยประกอบด้วยคลื่นพื้นฐาน 2 ตัว คือ

- คลื่นไฟฟ้า (electrical wave) หรือ เรียกว่า สนาม E

- คลื่นแม่เหล็ก (magnetic wave) หรือ เรียกว่า สนาม B

ทั้งสองมีการเคลื่อนที่พร้อมกัน (มีค่าเฟสเดียวกัน) แต่มีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันในลักษณะวนขวา เราแสดงรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูป 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



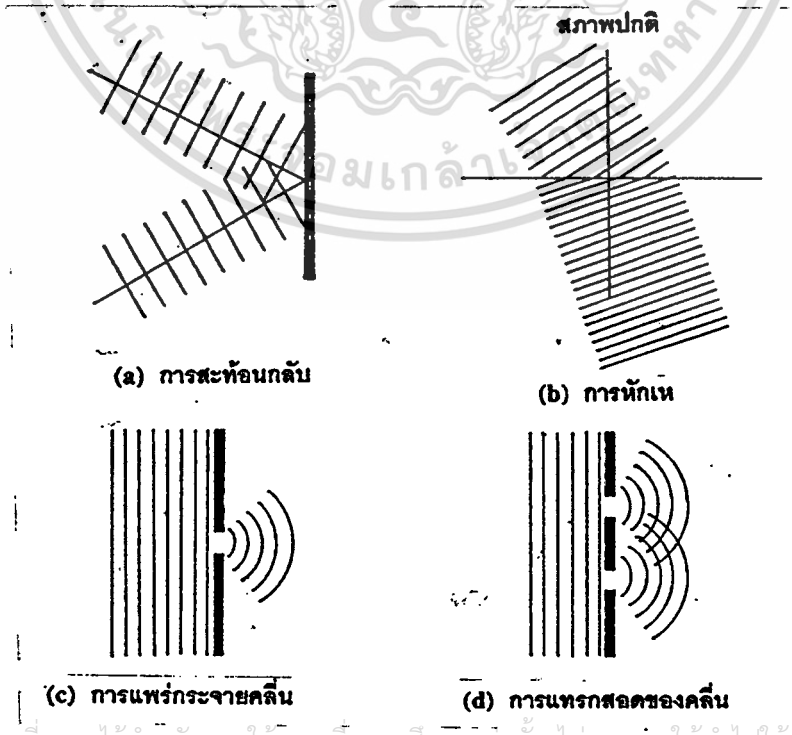
รูปที่ 1.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3 คุณสมบัติของคลื่น

คุณสมบัติพื้นฐานของคลื่นต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้ 4 ประการ ซึ่งมี

- การสะท้อนกลับ (reflection)
- การหักเห (refraction)
- การแพร่กระจายคลื่น (diffraction)
- การแทรกสอดของคลื่น (interference)

รายละเอียดของแต่ละประการ พิจารณาจากรูป 1.3



รูปที่ 1.3 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของคลื่น (4 ลักษณะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายได้ดังนี้

(a) การสะท้อนกลับ - มุมที่คลื่นกระทำกับผิวตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมที่สะท้อนกลับไปจากรูปเส้นทับแทนทิศทางการเดินทางของคลื่น และเส้นบางแทนแนวหน้าคลื่น

(b) การหักเห - เมื่อคลื่นเดินทางจากตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังตัวกลางอีกชนิด พบว่าความเร็วและทิศทางของคลื่นมีค่าเปลี่ยนแปลง

(c) การแพร่กระจายคลื่น - เมื่อคลื่นเดินทางผ่านช่องที่มีระยะห่างเท่ากับความยาวคลื่น พบว่าคลื่นมีการแพร่กระจายไปในแนวหน้าคลื่นเป็นเส้นโค้ง

(d) การแทรกสอดของคลื่น - ถ้าคลื่นสองตัวที่มีความถี่และขนาดเท่ากัน เดินทางมาชนกัน พบว่ามีการแทรกสอดของคลื่นเกิดขึ้น โดยมีเงื่อนไขว่า

- ถ้าคลื่นทั้งสองมีค่าเฟสเดียวกัน การแทรกสอดของคลื่นเป็นไปในลักษณะเสริมกัน
- ถ้าคลื่นทั้งสองมีค่าเฟสต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดของคลื่น เป็นไปในลักษณะหักล้างกัน

สำหรับคลื่นที่มีลักษณะไขว้กัน อย่างเช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ยังมีคุณสมบัติเพิ่มเติมอีก คือ โพลาไรเซชั่น (polarization) ซึ่งมีความหมายถึง การพิจารณาการเดินทางของคลื่นในระนาบเดียวเท่านั้น

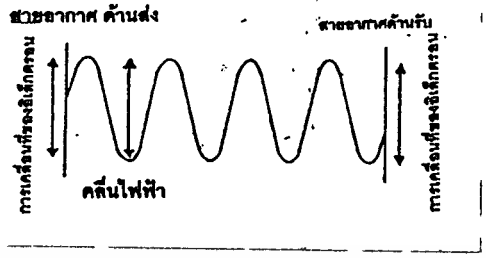
ถึงแม้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กในแต่ละค่าเฟสนั้น มักจะพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบคลื่นไฟฟ้าแทนเมื่อกล่าวเกี่ยวกับโพลาไรเซชั่น

สมมุติให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนในลวดตัวนำแนวดิ่ง (อย่างเช่น สายอากาศด้านส่ง) มีผลให้คลื่นไฟฟ้าเดินทางในระนาบแนวดิ่ง และกล่าวได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีโพลาไรเซชั่นในระนาบแนวดิ่ง

ส่วนสายอากาศด้านรับควรติดตั้งรับสัญญาณในแนวดิ่งเช่นกัน เพื่อรับองค์ประกอบทางคลื่นไฟฟ้าได้ โดยอิเล็กตรอนของสายอากาศด้านรับจะสั่นในความถี่เดียวกับคลื่นไฟฟ้าที่รับเข้ามา

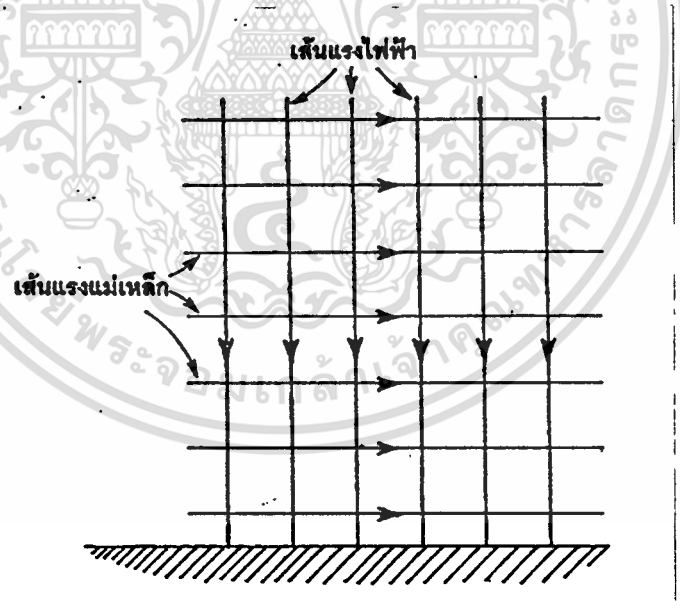
ถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งออกมาในลักษณะทุกทิศทาง สายอากาศด้านรับจะตรวจรับเฉพาะคลื่นไฟฟ้าที่มีระนาบขนานกับสายอากาศเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 แสดงโพลาไรเซชั่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เพื่อความเข้าใจในคุณสมบัติเรื่องนี้ของคลื่นมากขึ้น จึงขอกล่าวเพิ่มเติมต่อไป จากเดิมในรูป 1.2 ที่แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เราสามารถนำมาเขียนได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง เพื่อแสดงการแพร่กระจายของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาคลื่นในแต่ละระนาบแทนเส้นแรงแม่เหล็กและเส้นแรงไฟฟ้า ดังรูป 1.5



รูปที่ 1.5 แสดงภาพแทนสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า
ตามระนาบแนวดิ่งเทียบกับพื้นดิน

จากรูป ลูกศรแทนทิศทางของสนามในขณะนั้น โดยคลื่นมีทิศเดินทางพุ่งออกจากหน้ากระดาษเข้าหาผู้อ่าน (ตามกฎมือขวา)

นอกจากนี้ตามรูป 1.5 ยังพิจารณาได้ว่า คลื่นมีโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่งด้วย เนื่องจากเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงไฟฟ้าตั้งฉากกับพื้นโลก สอดคล้องกับกฎข้อหนึ่งเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระบุว่าเส้นแรงไฟฟ้า ที่สัมผัสกับพื้นผิวตัวนำชนิดดีจะมีลักษณะตั้งฉากมากขึ้น

เราพบว่าพื้นดินส่วนใหญ่เป็นตัวนำชนิดดี ที่ความถี่ต่ำกว่าค่า 10 MHz ทำให้คลื่นในช่วงความถี่นี้มีการโพลาไรเซชั่นแนวดิ่งเป็นส่วนใหญ่ ก็มีเหมือนกันที่พื้นดินบางบริเวณ (เป็นส่วนน้อย) ทำให้เกิดเส้นแรงไฟฟ้าเอียงทำมุมกับพื้นโลก อันเนื่องมาจากสภาพตัวนำของพื้นดินบริเวณนั้นที่ไม่สมบูรณ์ มีผลให้คลื่นสูญเสียพลังงานมากขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น

คลื่นที่มีลักษณะการเดินทางสัมผัสกับพื้นผิวของโลก จัดว่ามีการใช้งานค่อนข้างน้อยในงานสื่อสารวิทยุสมัครเล่น เนื่องจากถ้าความถี่ที่ใช้มีค่ามากขึ้น ทำให้ระยะทางที่คลื่นเดินทางได้โดยไม่สูญเสียพลังงานเกินขีดกำหนดมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ จึงเป็นเหตุให้คลื่นพื้นผิว (surface wave) นิยมใช้เฉพาะย่านความถี่ต่ำเท่านั้น

ส่วนในย่านความถี่สูง การเดินทางของคลื่นไปยังสายอากาศรับมีส่วนสัมผัสกับพื้นผิวโลกน้อยมาก และการพิจารณาโพลาไรเซชั่นไม่จำเป็นต้องเป็นระนาบแนวดิ่งเสมอไป

กรณีที่เส้นแรงไฟฟ้าอยู่ในแนวนอน เรากล่าวได้ว่าคลื่นนั้นมีโพลาไรเซชั่นในระนาบแนวนอน (horizontally polarized) นอกจากนี้การโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่ง และในแนวนอนยังอาจเรียกรวมกันได้ว่า การโพลาไรเซชั่นแบบลิเนียร์ (linear polarization)

ในสภาวะสุญญากาศ (free-space) คำว่า "ระนาบแนวนอน" และ "ระนาบแนวดิ่ง" ไม่มีความหมาย รวมทั้งการอ้างอิงถึงพื้นผิวโลกในแนวนอนยังใช้ไม่ได้ด้วย

มีอยู่กรณีหนึ่งที่คลื่นมีโพลาไรเซชั่นไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เราเรียกคลื่นที่อยู่ในสภาวะนี้ว่ามีโพลาไรเซชั่นแบบวงรี (elliptically polarized) ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนโพลาไรเซชั่นเป็นไปตามกฎการหมุนของฟาราเดย์

ได้มีการคิดวิธีเอาชนะผลกระทบจากกฎของฟาราเดย์ข้อนี้ ในการสื่อสารผ่านที่โล่ง โดยใช้วิธีโพลาไรเซชั่นแบบวงกลม (circular polarization) อธิบายคือ

ในการโพลาไรเซชั่นแบบวงกลม คลื่นจะถูกหมุนไป 360 องศา เมื่อมันเดินทางได้ระยะทางเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น ซึ่งทิศทางการหมุนให้พิจารณาจากสายอากาศด้านส่งว่ากำหนดให้หมุนตามเข็มนาฬิกา หรือทวนเข็มนาฬิกา

1.4 ตัวแปรที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในส่วนเกี่ยวข้องกับสายอากาศ หรือชั้นบรรยากาศ ก่อนอื่นควรศึกษาถึงนิยามต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เข้าใจดีเสียก่อน เพื่อเป็นพื้นฐานในการเรียนรู้สิ่งที่ยากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เฟสและความยาวคลื่น (Phase and Wavelength)

เนื่องจากความเร็วในการเดินทางของคลื่นมีค่าสูงมาก จนเกือบทำให้เราเลิกพิจารณาถึงสิ่งนี้ ทั้งนี้เพราะเพียงเวลาแค่ 1/7 ของหนึ่งวินาที ทำให้คลื่นวิทยุเดินทางได้รอบโลก อย่างไรก็ตามในการพิจารณาเรื่องสายอากาศ ตัวแปร "เวลา" มีความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เพราะหลักการของคลื่นคือ การส่งกระแสสลับผ่านลวดตัวนำ (สายอากาศ) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กขึ้น จึงเป็นเรื่องยากที่เราพิจารณาทฤษฎีสายอากาศหรือประสิทธิภาพต่าง ๆ โดยไม่เกี่ยวข้อง "เวลาเดินทางของคลื่น" เลย

คลื่นที่ใช้ในงานวิทยุสื่อสารมีค่าความถี่จากประมาณ 10,000 จนถึงหลายพันล้านเฮิรตซ์ (Hz)

สมมุติให้ค่าความถี่เท่ากับ 30,000,000 Hz (เรียกทั่วไปว่า 30 เมกะเฮิรตซ์-MHz) พิจารณาได้ว่า ในหนึ่งไซเคิล หรือหนึ่งรอบคลื่นมีค่าในหน่วยเวลาเท่ากับ 1/30,000,000 วินาที และคลื่นเดินทางได้ระยะ 300,000,000 เมตรต่อวินาที ดังนั้นคิดได้ว่า คลื่นเดินทางได้ระยะเพียง 10 เมตร เมื่อคิดจากเวลาที่กระแสเปลี่ยนแปลงครบหนึ่งไซเคิล (cycle)

กล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะ 10 เมตร จากสายอากาศเกิดจากกระแสไหลครบหนึ่งรอบไซเคิล หรือสนามที่ระยะ 20 เมตร จากสายอากาศเกิดจากกระแสไหลครบสองรอบไซเคิล (คิดต่อ ๆ ไปได้)

ถ้าแต่ละรอบเวลาที่กระแสไหลเหมือน ๆ กัน หรือมีค่าเท่ากัน พบว่าผลลัพธ์จากกระแสในแต่ละช่วงเวลาจะเหมือนกันด้วยพิจารณาง่าย ๆ คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสมีลักษณะเหมือนกัน

เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งออกไปจากสายอากาศ ค่าความเข้มของสนามจะมีค่าน้อยลงไป เมื่อระยะทางไกลมาขึ้น รวมทั้งแอมปลิจูดมีค่าลดลงเช่นกัน แต่ความเหมือนกันในแต่ละช่วงเวลาของคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจะไม่สูญเสียไป เราเรียกกรณีเช่นนี้ว่า มีเฟสเดียวกัน หรืออินเฟส (in phase)

เพื่อรายละเอียดที่สมบูรณ์ขึ้น จึงขออธิบายนิยามเพิ่มอีก 2 ความหมาย คือ "หน้าคลื่น (wave front)" และ "ความยาวคลื่น" (wave length)"

- หน้าคลื่น หมายถึง พื้นผิวในทางจินตนาการ ซึ่งทุกส่วนของพื้นผิวนี้ พบว่าคลื่นต้องมีเฟสเดียวกัน

- ความยาวคลื่น หมายถึง ระยะทางระหว่างหน้าคลื่น 2 จุด ที่มีเฟสเดียวกันโดยระยะทางนี้วัดเทียบตั้งฉากกับหน้าคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราแทนสัญลักษณ์ของความยาวคลื่นด้วยอักษรกรีกคือ แลมด้า (λ)

สามารถแสดงสมการเกี่ยวกับความยาวคลื่นได้ว่า

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

โดยที่ λ = ความยาวคลื่น (เมตร)

V = ความเร็วของคลื่น (เมตร/วินาที)

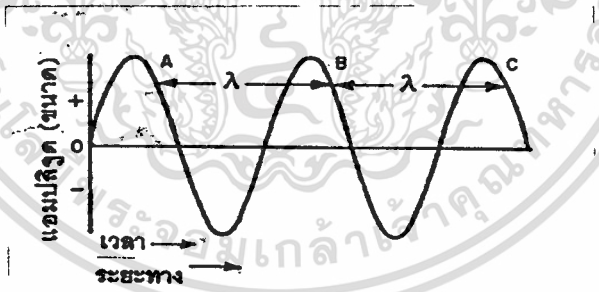
f = ความถี่ของกระแสที่ทำให้เกิดคลื่น (Hz)

สำหรับคลื่นที่เดินทางในสภาวะสุญญากาศ ค่าความยาวคลื่นหาได้จาก

$$\lambda \text{ (เมตร)} = \frac{300}{f\,(MHz)}$$

มีความจำเป็นอย่างมากสำหรับผู้อ่านเองที่เข้าใจต่อนิยามเหล่านี้ เพื่อศึกษาในรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการออกแบบ ติดตั้ง การปรับสายอากาศ การแม็ชท์ชิ่งระบบหรือขยายส่งสัญญาณได้

ขอให้พิจารณารูป 1.6



รูปที่ 1.6 แสดงรูปคลื่นทั้ง 2 สนาม

จากรูป จุด A, B และ C มีลักษณะเฟสเดียวกันและระยะทางระหว่างจุด A และ B หรือจุด B และ C มีค่าหนึ่งความยาวคลื่น

2. ความเข้มสนาม (Field Intensity)

พลังงานจากการแหร่กระจายของคลื่น มีปริมาณลดลงตามระยะทางที่ไกลจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น เนื่องมาจากการแพร่พลังงานของคลื่นไปตามชั้นบรรยากาศที่กว้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความเข้มของสนามพลังงานที่จุดห่างจากสายอากาศส่ง เป็นการวัดความเข้มสนาม (ภาษาอังกฤษอาจใช้ว่า field intensity หรือ field strength ก็ได้)

ซึ่งวัดออกมาในหน่วยแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) ที่คิดจากจุดระหว่างจุด 2 จุด ของเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบเดียวกับหน้าคลื่น

มาตรฐานของวิธีวัดความเข้มสนาม พิจารณาจากลวดตัวนำขนาด 1 เมตร และแทนด้วยหน่วยโวลต์ / เมตร

ทั่วไปแล้วค่าโวลต์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ ดังนั้นเราแทนหน่วยวัดเป็นมิลลิโวลต์ หรือไมโครโวลต์ต่อเมตรได้

สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสสลับ สามารถวัดตามค่าโวลต์ของกระแสสลับได้ทั้งจากค่าเฉลี่ย หรือค่าสูงสุดอย่างใดอย่างหนึ่ง

ในงานวิทยุสมัครเล่นไม่จำเป็นต้องวัดค่าความเข้มสนามจริงออกมา ตามคุณสมบัติข้อกำหนดของอุปกรณ์นั้น เราจำเป็นต้องวัดต่อเมื่อมีการปรับเทียบเท่านั้นและเครื่องมือวัดความเข้มสนาม (field strength meter) ยังสามารถสร้างด้วยตัวเองได้

3. การลดทอนคลื่น (Wave Attenuation)

ในสภาวะสุญญากาศ ค่าความเข้มสนามของคลื่นมีลักษณะเป็นสัดส่วนกลับกันกับระยะทางจากแหล่งกำเนิด โดยถ้าค่าความเข้มสนามที่ระยะทางหนึ่งไมล์จากแหล่งกำเนิดมีค่า 100 mV/m ก็จะมีค่าเหลือ 50 mV/m ที่ระยะ 2 ไมล์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามกับความหนาแน่นของกำลังคลื่น (power density) จัดว่ามีลักษณะเดียวกับวงจรระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทั่วไป

ได้มีการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสุญญากาศเท่ากับ 377 โอห์ม

ดังนั้นหาค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่นได้จากสูตร (คิดค่าความเข้ม = 1 V/m)

$$P = \frac{E^2}{Z} = \frac{(1V/m)^2}{377}$$

$$= \frac{1}{377} W/m^2 = 2.65 \ mW/m^2 \qquad \text{(Ans.)}$$

เห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า มีลักษณะเดียวกัน (จากสูตร $P = \frac{V^2}{R}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รวมทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวได้ว่าความหนาแน่นของกำลังคลื่น มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนเดียวกับรากที่สองของความเข้มสนาม และเป็นสัดส่วนกลับกันกับกำลังสองของระยะทาง

อย่างเช่น ค่า P ที่ระยะทางหนึ่งไมล์เท่ากับ 4 mW/m^2

ดังนั้น ค่า P ที่ระยะทางสองไมล์เท่ากับ 1 mw/m^2

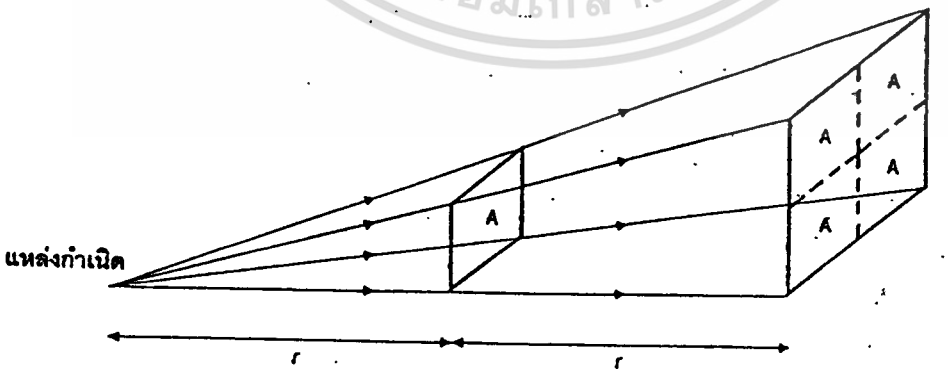
แต่ในการใช้งานจริง ๆ การลดทอนที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากฎข้างต้นมาก ทั้งนี้ด้วยเหตุผลหลายข้อดังนี้

- คลื่นไม่ได้เดินทางในสภาวะสุญญากาศ แต่อยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก
- สายอากาศรับใช้ได้ดีในระยะเส้นสายตา (Line of sight) เท่านั้น
- พื้นโลกมีลักษณะกลม ทำให้คลื่นไม่ทะลุผ่านไป แต่จะโค้งงอไปตามผิวโลก

สิ่งเหล่านี้มีผลให้เกิดค่าการลดทอนมากกว่าในทฤษฎีอย่างมาก

1.5 การคำนวณค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่น

จากหัวข้อที่ผ่านมามีประเด็นที่น่าสนใจ และขอกล่าวถึงในที่นี้ คือ การคำนวณค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่น จากทางทฤษฎีกล่าวไว้ว่า เมื่อมีระยะทางเพิ่มขึ้นสองเท่า ค่ากำลังมีค่าลดลงสี่เท่าจากค่าเดิม พิจารณาจากรูป 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงผลจากการเพิ่มระยะทางเป็นสองเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับค่าความหนาแน่นของคลื่น ขออธิบายถึงเหตุก่อนดังนี้

ความปลอดภัยในการส่งคลื่นความถี่วิทยุ (RF Radiation Satety)

ข้อแนะนำเกี่ยวกับความปลอดภัยที่มักถูกละเลยอยู่เสมอคือ การส่งคลื่น อาร์.เอฟ.เกินขีดความจำเป็น

วิทยุสมัครเล่นจัดเป็นกิจกรรมที่มีพื้นฐานของความปลอดภัย แต่อุบัติเหตุสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าเราไม่ระมัดระวัง สิ่งที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นข้อเตือนให้คำนึงถึงความปลอดภัยก่อน

พลังงานของคลื่น อาร์.เอฟ. เป็นอันตรายหรือไม่ ?

เนื้อเยื่อของร่างกายที่ได้รับปริมาณพลังงานจากคลื่น อาร.เอฟ. สูงอาจเกิดอันตรายเป็นรอยไหม้ได้ ซึ่งผลกระทบนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่ง, ความหนาแน่นของพลังงานคลื่น อาร์.เอฟ. ที่สัมผัสกับร่างกายและแม้กระทั่งโพลาไรเซชั่นของคลื่น

พบว่าความถี่ที่มีค่าความยาวของร่างกายมนุษย์ประมาณ 0.4 ของความยาวคลื่นที่ความถี่นั้น พลังงานคลื่น อาร์.เอฟ ถูกดูดซับได้มากที่สุด ซึ่งเป็นช่วงความถี่ในย่าน VHF จาก 30-300 MHz (เหตุที่มีช่วงกว้างมากเพราะความสูงของร่างกายมนุษย์มีค่าแตกต่างกัน)

ได้มีการศึกษาและถกเถียงกันอย่างมากถึงผลกระทบของคลื่น อาร์. เอฟ. ต่อร่างกายคนเมื่อไม่นานมานี้ ตัวแทนของหลาย ๆ รัฐบาลได้ร่วมกันศึกษาในประเด็นนี้รวมทั้ง หน่วยงาน ANSI (American National Standard Institute) ยังได้ค้นคว้าวิจัยในเรื่องนี้อย่างจริงจัง เพื่อเป็นแนวทางป้องกันผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์จากกิจกรรมวิทยุสมัครเล่น

จุดประสงค์ของเนื้อหาในตอนนี้ เขียนเพื่อเป็นคำแนะนำในการป้องกันผลจากคลื่น อาร์. เอฟ. โดยแยกปัญหาการป้องกันได้ 2 ประเด็น คือ

- กำหนดระดับที่เหมาะสมในการส่งคลื่น อาร์.เอฟ.
- คำนวณค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่นจากสายอากาศส่ง

โดยถ้าค่าคำนวณนี้มีมากกว่าระดับที่กำหนด ก็ต้องหาการป้องกันกันต่อไป

ระดับการส่งคลื่น อาร์.เอฟ. ที่ปลอดภัย

ไม่นานมานี้เอง นักวิทยาศาสตร์ได้ทำข้อตกลงในการกำหนดขีดจำกัดของการส่งคลื่น อาร์. เอฟ. ขึ้นโดยในเดือนกรกฎาคม 1982 ทางหน่วยงาน ANSI ได้สร้างมาตรฐานของการแพร่กระจายคลื่น อาร์.เอฟ. ซึ่งมีชื่อเรียกทั่วไป RFPG (Radio Frequency Protection

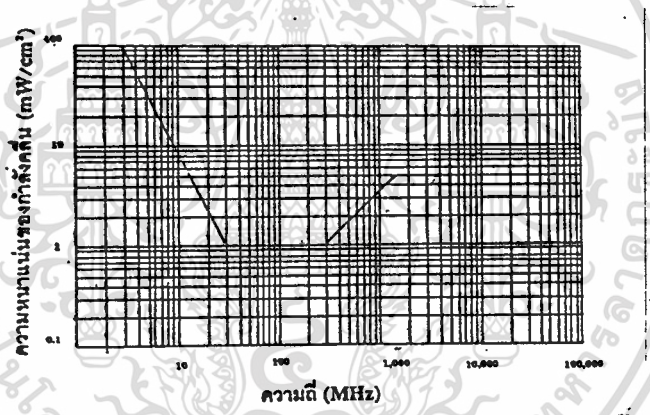
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Guides) มีการกล่าวถึงปรากฏการณ์ของคลื่น อาร์.เอฟ. ที่มีต่อร่างกายมนุษย์ และค่าระดับการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายแต่อย่างใด

จากที่กล่าวมาก่อนหน้าว่า ร่างกายมนุษย์มีผลการตอบรับต่อปริมาณแพร่กระจายสูงสุดเมื่อค่าความสูงของร่างกายเท่ากับค่า 0.4 เท่าของความยาวคลื่น จากความถี่ที่ใช้ส่ง และเนื่องจากเหตุนี้ ค่าระดับความปลอดภัยต่ำที่สุดจากการแพร่กระจายคลื่น จากความถี่ที่ใช้ส่ง และเนื่องจากเหตุนี้ ค่าระดับความปลอดภัยต่ำที่สุดจากการแพร่กระจายคลื่นอยู่ในช่วงความถี่จาก 30-300 MHz ถ้าอยู่นอกเหนือจากช่วงนี้ จะไม่มีผลต่อร่างกายเลย

ตามมาตรฐาน ANSI กำหนดขีดจำกัดการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ 30-300 MHz ไว้เท่ากับ mW/m^2

ขอให้พิจารณาจากรูป 1.8 เป็นกราฟแสดงระดับพลังงานในช่วงปลอดภัยที่ค่าความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 1.8 แสดงระดับความปลอดภัยในการแพร่กระจายคลื่นตามมาตรฐาน ANSI

จากรูปมีการเพิ่มของระดับกำลังคลื่นที่อยู่นอกช่วงความถี่ 30-300 MHz อย่างเช่น

- ที่ความถี่ 3 MHz ค่าระดับการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดมีได้ถึง 100 m W/cm^2
- ที่ความถี่ 1,500 MHz มีค่าระดับในทำนองเดียวกันได้ถึง 5 mW/cm^2

ซึ่งค่าในช่วงนอกเหนือจาก 30-300 MHz ตามมาตรฐาน ANSI ถือว่ามีความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านเนื้อเยื่อของร่างกายได้ต่ำมาก

*** การคำนวณประมาณค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่น**

ก่อนอื่น ขอถามคำถาม 2 ข้อให้เกิดขึ้นในใจของผู้อ่านก่อน

- ทำอย่างไรจึงสามารถรู้ค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่ส่งออกจากสายอากาศด้านส่งได้ ?

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิธีใดบ้างที่ทำให้รู้ว่าระดับการแพร่กระจายคลื่นเกินจากค่าที่กำหนดไว้ ? ถึงแม้ว่าจะมีเครื่องมือเฉพาะในการวัดสนามคลื่น อาร์.เอฟ. ออกมาอย่างเที่ยวงตรงได้ก็ตาม แต่เมื่อคิดถึงความเป็นจริงแล้ว นักวิทยุสมัครเล่นส่วนใหญ่ไม่มีเครื่องมือชนิดนี้

ดังนั้นจึงคิดค้นวิธีคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่นออกมาแทน อย่างแรกที่ผู้เขียนต้องการบอกกล่าวให้ผู้อ่านทราบก่อนว่า การคำนวณในตอนนี้เป็นการประมาณค่าเท่านั้นและเหมาะใช้ทำนายค่าขีดจำกัดสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่น

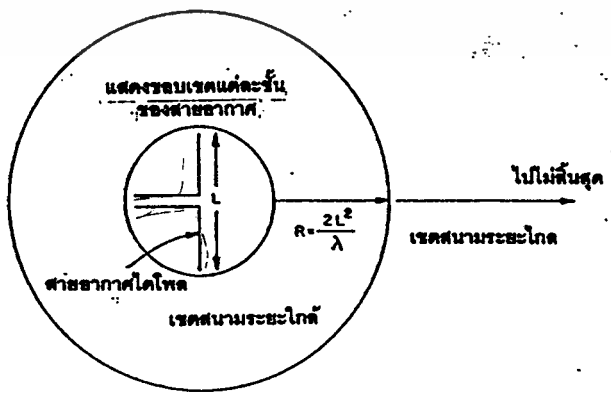
โปรดระลึกไว้อย่างหนึ่งว่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นแนวทางของความปลอดภัยไว้ก่อนเท่านั้นไม่ใช่ข้อพิสูจน์ว่าระดับของกำลังคลื่นขณะนั้นปลอดภัย

ตัวอย่างเช่น การคำนวณในตอนนี้ พิจารณาเฉพาะการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศเท่านั้น หมายถึง การแพร่กระจายของคลื่น อาร์.เอฟ ส่งตรงจากภาคขยายกำลังสัญญาณเลย แต่บางกรณีสายนำสัญญาณสามารถแพร่กระจายคลื่นเองได้ด้วย จึงเป็นเหตุผลที่ว่า ผลลัพธ์จากการคำนวณเป็นการทำนายระดับพลังงาน RF ไว้เท่านั้น

การคำนวณนี้คิดภายใต้สภาวะสุญญากาศ และบางกรณีเราอาจบวกเพิ่มลงไป 4-6 dB เพื่อประกันความปลอดภัยในกรณีที่มีการสะท้อนกลับเกิดขึ้น วิศวกรด้านสายอากาศได้แบ่งอาณาบริเวณรอบสายอากาศเป็น 2 เขต คือ

- เขตสนามระยะใกล้ (near-field)
- เขตสนามระยะไกล (far-field)

ขอให้พิจารณาจากรูป 1.9 แสดงความหมายของแต่ละเขตได้ดี



รูปที่ 1.9 แสดงภาพการแบ่งเขตชั้นบรรยากาศของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป ถึงแม้ว่าเราใช้สายอากาศชนิดไดโพลในรูปก็ตาม แต่สามารถประยุกต์ใช้กับชนิดอื่นได้ เช่น แบบยากิ เป็นต้น

ค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่น (power density) ในเขตสนามระยะไกลของสายอากาศสามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\rho = \frac{PG}{4\pi R^2}$$

โดย

ρ = ค่าประมาณของความหนาแน่นของกำลังคลื่น คิดที่ระยะห่างเท่ากับ R จากสายอากาศ (มีหน่วยเป็น W/m^2 ถ้าค่า P มีหน่วยเป็นวัตต์ และ R มีหน่วยเป็นเมตร)

R = ระยะทางจากจุดสังเกตที่ใกล้ที่สุดกับสายอากาศ

P = ค่ากำลังเฉลี่ยที่จุดส่งคลื่นของสายอากาศ (มีหน่วย W)

G = อัตราขยายของสายอากาศคิดจากค่าอัตราส่วนของกำลัง [มีค่าเป็นตัวเลขธรรมดา และไม่แสดงผลในหน่วยดีบี (dB)]

สูตรข้างต้นสามารถนำมาใช้ได้ทันที ถ้าตอบรับกับเงื่อนไข 2 ข้อนี้คือ

- เป็นการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะสุญญากาศ
- ระยะทางที่คิดห่างจากสายอากาศต้องอยู่ภายในบริเวณเขตสนามระยะไกล

เพื่อความแน่นอนในการประมาณค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่นสูงสุดให้ใช้ค่าอัตราขยายของสายอากาศในสภาวะสุญญากาศด้วย (ถ้าเราไม่ทราบค่าจริง ๆ ของมัน)

กรณีที่หน่วยของอัตราขยาย (Gain) เป็น dB ให้แปลงเป็นตัวเลขอย่างเสียก่อนตามสูตร

$$\text{อัตราขยาย} = 10^{dB/10}$$

ลองพิจารณาตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกำลังคลื่นดู

โดยยกเหตุการณ์ว่า เราใช้งานในย่านความถี่ 14 MHz โดยใช้สายอากาศแบบยากิ (3 อีลีเมนท์) ที่มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 6 dB และค่าเฉลี่ยของกำลังงานที่จะส่งคลื่นของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 500 วัตต์

ให้พิจารณาหาค่าการแพร่กระจายของคลื่นที่มีต่อคนที่จุดห่าง 15 เมตร จากสายอากาศ?

อย่างแรก แปลงค่าอัตราขยายใหม่ก่อนได้เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยาย $= 10^{6/10} = 10^{0.6} = 3.98 \approx 4$

ต่อจากนั้นคำนวณหาจุดระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับสายอากาศที่เราสามารถพิจารณาอยู่ภายในเขตสนามระยะไกล โดยคำนวณจากสูตร

$$R_{min} = \frac{2L^2}{\lambda}$$

ตัวแปร L = ค่าความยาวของอีลีเมนท์สายอากาศที่ยาวที่สุด (เมตร)

ในตัวอย่างนี้ เราใช้ก้านอีลีเมนท์ที่ยาวที่สุด เท่ากับ 35 ฟุต แปลงกลับเป็นหน่วยเมตร โดยคูณ 0.3048 จะได้ $L = 10.7$ m

หาค่า $R_{min} = \frac{2(10.7)^2}{20} = \frac{228.98\ m^2}{20\ m} \approx 11.4$ M

จากค่า R_{min} ที่ได้ทำให้เราสามารถนำสูตรหาค่า p มาใช้ได้ เพราะจุดที่กำหนดไว้ 15 เมตร นั้นไกลกว่าระยะทางที่ใกล้ที่สุด

หาค่า $\rho = \frac{500\ W \times 4}{4\pi \times (15m)^2} = \frac{2000\ W}{2827\ m^2} = 0.707\ W/m^2$

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับมาตรฐาน RFPG ได้ ต้องแปลงมาเป็นหน่วย mW / cm^2 ก่อนจะได้

$$\rho = \frac{0.707\ W}{m^2} \times \frac{1000\ mW}{1\ W} \times \frac{1\ m^2}{10{,}000\ cm^2}$$

$$= 0.070\ mW/cm^2 \qquad \text{(Ans.)}$$

เมื่อเทียบกับกราฟในรูป 1.8 เราพิจารณาจากกราฟได้ว่า ค่ามากที่สุดของความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่ความถี่ 14 MHz เท่ากับ 4.6 mW / cm^2 และจากผลคำนวณที่ได้พบว่าสถานีส่งในตัวอย่างนี้เป็นไปด้วยดี ภายใต้ขีดจำกัดของมาตรฐานตาม ANSI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ (Propagation of Radio Waves)

การทดลองเริ่มแรกของวิธีส่งสัญญาณวิทยุในรูปของคลื่น เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1901

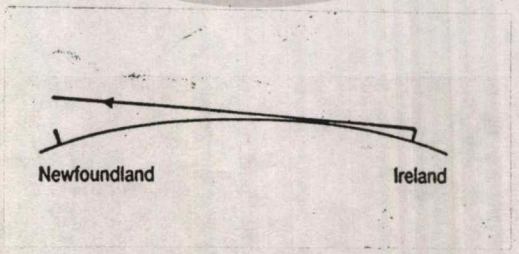
เมื่อมาร์โคนีทำการทดลองรับข่าวสารวิทยุได้ที่เมือง Newfoundland โดยส่งผ่านมหาสมุทรแอตแลนติกมาจากเมือง Ireland เหตุการณ์นี้เป็นจุดเริ่มของการสื่อสารวิทยุระยะไกลขึ้น

จากรูป 1.10 เป็นภาพเหตุการณ์เตรียมการทดลองของมาร์โคนี ในปี ค.ศ. 1901

รูปที่ 1.10

ข้อสรุปที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ คือ การแพร่กระจายคลื่นวิทยุนั้นมีความซับซ้อนมากว่าที่คนสมัยก่อนได้สันนิษฐานไว้

ขอให้พิจารณาในรูป 1.11



รูปที่ 1.11 แสดงผลกระทบของความโค้งผิวโลกต่อคลื่นวิทยุ

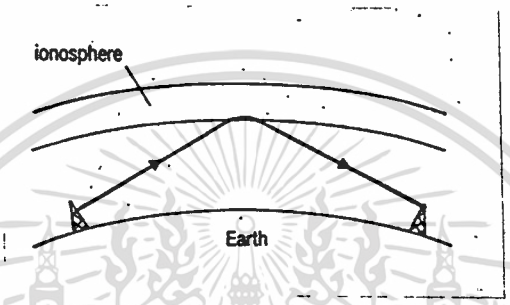
จากรูปเป็นความจริงอยู่อย่างที่ว่า ความโค้งของผิวโลกมีส่วนป้องกันการสื่อสารแบบระหว่างจุดสองจุด แต่เมื่อทดลองแล้วพบว่า เราสามารถรับคลื่นวิทยุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำตอบของเรื่องนี้ นาย Edward Appleton ได้พิสูจน์ออกมาได้พบว่ามีการ "สะท้อนกลับ" ของคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศที่สูงจากพื้นผิวโลก เราเรียกชั้นบรรยากาศที่เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)

ภายหลังจากการค้นพบนี้ ได้มีการทดลองตามมาหลาย ๆ อย่าง จนกระทั่งพบว่าไอโอโนสเฟียร์ไม่ได้ประกอบด้วยชั้นเพียงชั้นเดียวเท่านั้น

ลองพิจารณารูป 1.12 แสดงผลของชั้นบรรยากาศนี้ต่อการส่งคลื่นวิทยุ



รูปที่ 1.12 แสดงความเกี่ยวข้องของไอโอโนสเฟียร์ต่อคลื่นวิทยุ

ต่อไปจะอธิบายอย่างเป็นขั้นตอน และเจาะรายละเอียดถึงชั้นบรรยากาศมากขึ้น

เมื่อส่งกระแสไฟฟ้าความถี่ขนาดคลื่นวิทยุไปในสายอากาศด้านส่ง จะมีคลื่นวิทยุความถี่เดียวกันถูกแพร่กระจายออกไปตามทิศทางของแพทเทิร์นสายอากาศชนิดนั้น ๆ

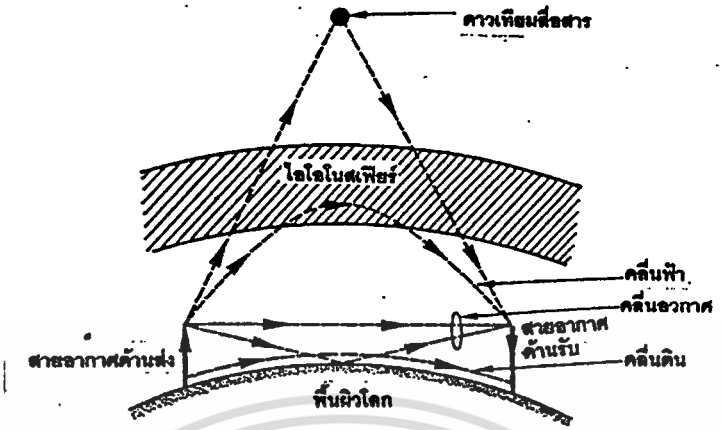
ในระบบแพร่กระจากคลื่นใด ๆ (รวมทั้งระบบเคลื่อนที่) เมื่อพิจารณาที่สายอากาศด้านรับ พบว่าวิธีการแพร่กระจายคลื่นมาถึงมีได้ถึง 5 วิธี

โดยขออธิบาย 4 วิธีแรกก่อนมีดังนี้

- การใช้คลื่นดิน (Ground wave) หรือคลื่นผิวโลก (Surface wave)
- การใช้คลื่นฟ้า (Sky wave)
- การใช้คลื่นอวกาศ (Space wave)
- การใช้ดาวเทียมสื่อสาร (Communication satellite)

สามารถพิจารณาได้จากรูป 1.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

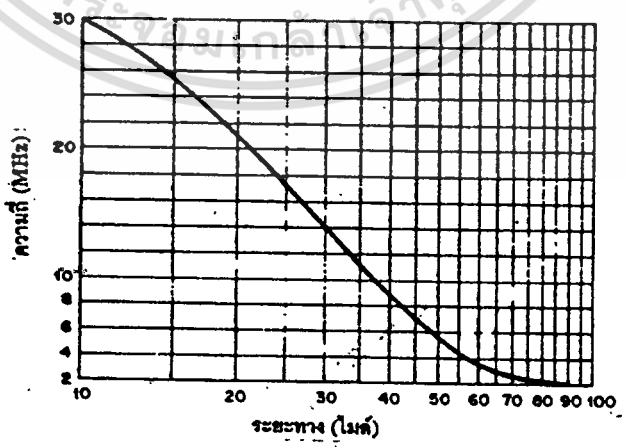


รูปที่ 1.13 แสดงวิธีการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

จากรูปอธิบายรายละเอียดดังนี้

* คลื่นดิน เป็นคลื่นที่เดินทางตามผิวโค้งของโลกได้ สามารถส่งไปได้ไกลเมื่อใช้ความถี่ต่ำ ๆ เช่น ในย่าย LF หรือ MF ทั่วไปจะครอบคลุมถึงระยะ 100 ไมล์ ตามมาตรฐานการแพร่กระจายคลื่นในช่วงเวลาตลอดวัน จากนั้นการลดทอนจะมีสูงมาก

พิจารณากราฟในรูป 1.14



รูปที่ 1.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับระยะทางของคลื่นดินในย่านความถี่ HF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ว่า การลดทอนหลังงานคลื่น เพิ่มขึ้นตามค่าความถี่

คุณสมบัติข้อนี้พอสังเกตได้ เช่น เราไม่สามารถรับฟังคลื่นสั้น ซึ่งมีความถี่สูงมากจากสถานีส่งที่อยู่ไม่ไกลจากเรานักได้ ทั้งที่สามารถรับฟังคลื่นยาว หรือคลื่นกลางจากสถานีส่งนั้นได้ดี (กรณีที่สถานีนั้นส่งออกอากาศพร้อมกันทั้งคลื่นสั้นและคลื่นยาว). คลื่นดินจัดว่ามีความแน่นอนดีไม่ค่อยมีอาการจางหาย หรือดัง ๆ เบา ๆ เกิดขึ้นและไม่ได้รับการกระทบกระเทือนมากเมื่อลมฟ้าอากาศเปลี่ยนแปลงแต่คลื่นดินมีข้อเสียคือ ส่งได้ไม่ไกลมากนักเนื่องจากผิวโลกมีความต้านทานสูง

ส่วนเหตุผลที่คลื่นสามารถเดินทางตามผิวโค้งของโลกเป็นผลมาจากตัวแปร 2 ค่าด้วยกันคือ

- สภาพการนำของพื้นดิน (conductivity)
- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพื้นดิน (dielectric constant)

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ค่านี้มีดังนี้

ลักษณะของผิว	สภาพการนำ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
น้ำทะเล	ดีมาก	80
แอ่งน้ำขนาดใหญ่	ดี	80
ดินแฉะ	ดี	30
พื้นที่แห้งแล้ง	เลว	7
ทะเลทราย	เลว	4
ป่า	เลวมาก	-

เห็นได้ว่าบริเวณที่เป็นพื้นน้ำมีผลดีต่อการแพร่กระจายคลื่นดินเป็นอย่างมาก

เทคนิคอย่างหนึ่งที่ใช้ส่งคลื่นดินให้ไกลมากขึ้น คือ การส่งคลื่นให้มีโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่งกับผิวโลก แต่อย่างไรก็มีข้อติดขัดอยู่บางประการ คือ ถ้าใช้ในย่าน LF การสร้างสายอากาศขนาดความยาวเท่ากับ /4 นั้นจัดว่าใหญ่โตมาก จึงไม่นิยมใช้งานกันในย่าน LF สำหรับคลื่นดิน นอกจากเป็นงานเฉพาะด้านจริง ๆ เท่านั้น อย่างเช่น งานส่งสัญญาณเรือเดินทะเล, สัญญาณอันตราย, ตรวจสภาพอากาศ และโทรเลข เป็นต้น ที่มีเสาส่งสูงขนาด 50-100 ฟุต (คลื่น LF เป็นย่านความถี่ต่ำกว่าของคลื่นกลาง (MF) หรือคลื่น AM ที่ใช้รับฟังทั่วไป คลื่น LF เริ่มตั้งแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

036934

10 KHz - 550 KHz)

ส่วนในย่าน MF เราใช้คลื่นดินในการส่งได้ เพราะขนาดสายอากาศไม่ใหญ่มากเกินไป

ก่อนอธิบายถึงคลื่นชนิดอื่น ๆ ขอเพิ่มเติมถึงหัวข้อการแบ่งย่านความถี่ของคลื่นวิทยุออกเป็นช่วง ๆ ดังนี้

- ความถี่ 3-30 KHz จัดอยู่ในย่านความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency) เขียนย่อว่า VLF

- ความถี่ 30-300 KHz จัดอยู่ในย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency) เขียนย่อว่า LF (เริ่มมีใช้เป็นคลื่นวิทยุ แต่ระยะส่งยังไปได้ไม่ไกล)

- ความถี่ 300-3,000 KHz จัดอยู่ในย่านความถี่กลาง (Medium Ferquency) เขียนย่อว่า MF (มักมีการใช้ส่งในแบบ A.M. ที่มีระยะไกลกว่า LF)

- ความถี่ 3-30 MHz จัดอยู่ในย่านความถี่สูง (High Frequency) เขียนย่อว่า HF (มักใช้งานประเภทวิทยุคลื่นสั้น, วิทยุตำรวจ และซิงเกิลไซด์แบนด์)

- ความถี่ 30-300 MHz จัดอยู่ในย่านความถี่สูงมาก (Very High Frequency) เขียนย่อว่า VHF (มักใช้งานด้านโทรทัศน์, วิทยุ F.M. และวิทยุราชการ)

- ความถี่ 300-3000 MHz จัดอยู่ในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency) เขียนย่อว่า UHF (มีใช้ในงานด้านโทรทัศน์ของต่างประเทศ, วิทยุ UHF ของหน่วยราชการ)

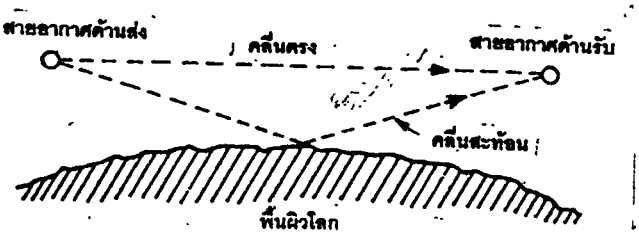
- ความถี่ 3-30 MHz จัดอยู่ในย่านความถี่สูงพิเศษ (Super High Frequency) เขียนย่อว่า SHF

- ความถี่ 3-300 MHz จัดอยู่ในย่านความถี่สูงพิเศษ (Extra High Frequency) เขียนย่อว่า EHF

คลื่นอวกาศ จากรูปเราแยกคลื่นชนิดได้ 2 ส่วน คือ

- คลื่นตรง (direct wave) ที่เดินทางเป็นเส้นตรงระหว่างสายอากาศส่งและรับ

- คลื่นสะท้อน (reflected wave) ที่เกิดการสะท้อนกลับกับพื้นผิวโลกก่อนไปยังสายอากาศรับ



รูปที่ 1.15 แสดงการแพร่กระจายคลื่นอวกาศ

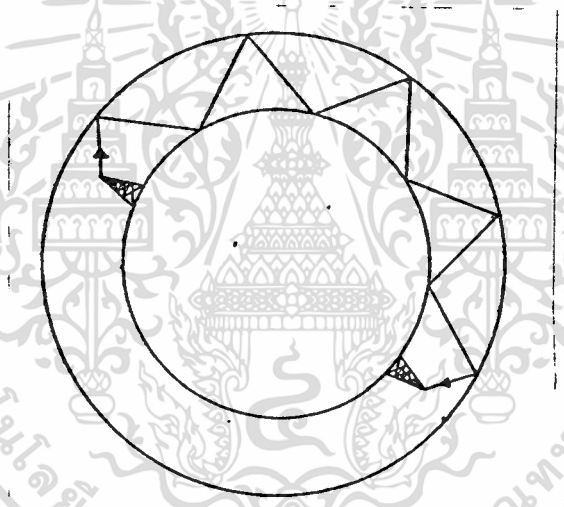
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเป็นการใช้งานในย่าน VHF และ UHF บางส่วน ซึ่งระยะทางในการแพร่กระจายคลื่นทำได้จำกัด เพราะสายอากาศทั้งสองด้านต้องอยู่ในระยะเส้นสายตา มิฉะนั้นถ้าเกินจากระยะนี้ส่วนโค้งของโลกจะบังคลื่นที่เดินทางมาออกไปมีทางแก้โดยเพิ่มความสูงของเสาอากาศขึ้นไปอีก

การรับ/ส่ง ในส่วนของคลื่นตรงต้องไม่มีสิ่งกีดขวางบังอยู่ เช่น ตึก, ภูเขา, ป่า ฯลฯ

งานที่ใช้คลื่นอวกาศ ได้แก่ คลื่นโทรทัศน์, คลื่นเรดาร์ บางกรณีเพื่อเพิ่มระยะทางสื่อสารให้ไกลมากขึ้น อาจใช้วิธีสื่อสารดาวเทียมเป็นสถานีถ่ายทอดอีกที

* คลื่นฟ้า เป็นคลื่นที่มีการหักเหในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับพื้นผิวโลกเป็นทอด ๆ โดยการส่งคลื่นวิทยุทำมุมเฉียงกับชั้นบรรยากาศและผิวโลก ผลจากการสะท้อนแต่ละครั้งทำให้ได้ระยะทางมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังรูป 1.16 ที่ แสดงการแพร่กระจายของคลื่นฟ้า



รูปที่ 1.16 แสดงการส่งคลื่นวิทยุคนละด้านของโลกโดยใช้คลื่นฟ้าได้

ทั่วไปแล้ววิธีของคลื่นฟ้ามักใช้กับย่านความถี่ HF ถ้าใช้ความถี่สูงกว่านี้ อาจจะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไปได้

เนื่องจากการกระจายคลื่นแบบคลื่นฟ้า อาศัยชั้นบรรยากาศเป็นส่วนใหญ่ เมื่อลมฟ้าอากาศเปลี่ยนแปลง หรือเกิดจุดดับบนดวงอาทิตย์จะส่งผลกระทบกระเทือนต่อคลื่นฟ้าอย่างมาก

* การใช้ดาวเทียมสื่อสาร มีปล่อยดาวเทียมเข้าวงโคจรรอบโลก เพื่อรับคลื่นวิทยุ, ทำการขยายสัญญาณ และส่งกลับมายังโลกด้วยความถี่คนละค่ากับตอนขาขึ้น

ส่วนวิธีที่ห้าคือ วิธีสแกตเตอร์ (Scatter) ซึ่งขออธิบายอย่างละเอียดในตอนหลังของบทนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทั้งหมดที่ได้กล่าวมาพอสรุปประเด็นสำคัญได้ดังต่อไปนี้

- คลื่นดินใช้สำหรับการสื่อสารระยะไกลในย่านความถี่ VLE และ LF นอกจากนี้ยังใช้สำหรับการกระจายคลื่นวิทยุในย่านความถี่ MF

- คลื่นฟ้าใช้สำหรับระบบสื่อสารในย่านความถี่ HF อย่างเช่น การติดต่อโทรศัพท์ผ่านคลื่นวิทยุระยะทางไกล หรือการกระจายเสียง

- คลื่นอวกาศใช้สำหรับการกระจายสัญญาณเสียงและโทรทัศน์ รวมทั้งใช้ในการทำงานของระบบสื่อสารคลื่นที่ในย่านความถี่ VHF, UHF และ SHF

- การใช้ดาวเทียมสื่อสารใช้สำหรับระบบสื่อสารโทรศัพท์ระหว่างประเทศ รวมถึงสัญญาณโทรทัศน์ด้วย

- วิธีแบบสแกตเตอร์ ใช้การติดต่อของช่องสัญญาณโทรศัพท์จำนวนมากผ่านย่านความถี่ UHF

1.7 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

อย่างแรกขออธิบายก่อนว่าชั้นบรรยากาศของโลกที่เกี่ยวข้องกับคลื่นวิทยุมีอยู่ 3 ชั้น คือ

- ชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (Troposphere)
- ชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere)
- ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)

โดยเรียงมาจากชั้นที่อยู่ใกล้กับผิวโลกมากที่สุดนั้นคือ ไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ห่างจากผิวโลกมากที่สุด รวมถึงเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ HF มากที่สุด

สิ่งน่าสนใจเกี่ยวกับบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือ ความสามารถหักเหคลื่นวิทยุให้สะท้อนกับมาที่โลกเป็นการเพิ่มระยะทางส่งได้มากขึ้น ซึ่งในชั้นบรรยากาศอื่นไม่มีคุณสมบัตินี้อยู่นิยมใช้งานกันในย่านความถี่ HF ลงไป ถ้าสูงกว่านี้อย่างย่าน VHF ไม่สามารถส่งโดยวิธีนี้ได้เพราะจะทะลุชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไป

การแพร่กระจายของรังสีอุลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ เข้าหาชั้นบรรยากาศของโลกทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานเข้าสู่โมเลกุลของชั้นบรรยากาศไอโอโสนสเฟียร์ให้เกิดการไอออนไนซ์ (ionization) ของโมเลกุลขึ้น

การไอออนไนซ์ คือ ขบวนวิธีดึงอิเล็กตรอนออกจากอะตอม ซึ่งอะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะมีลักษณะทางไฟฟ้าเป็นประจะไฟฟ้าบวก นอกจากนี้ยังได้ประจุไฟฟ้าลบและอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราวัดปริมาณการไอออนไนซ์มากหรือน้อยจากจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระต่อลูกบาศก์เมตร และมีสัดส่วนขึ้นกับความเข้มในการแพร่กระจายรังสีอุลตราไวโอเลต

อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่จำนวนมาก จะเดินทางไปตลอดทั้งชั้นบรรยากาศ ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจทำให้อิเล็กตรอนรวมตัวกับประจุไฟฟ้าบวกกลับเป็นอะตอมใหม่ได้อีก

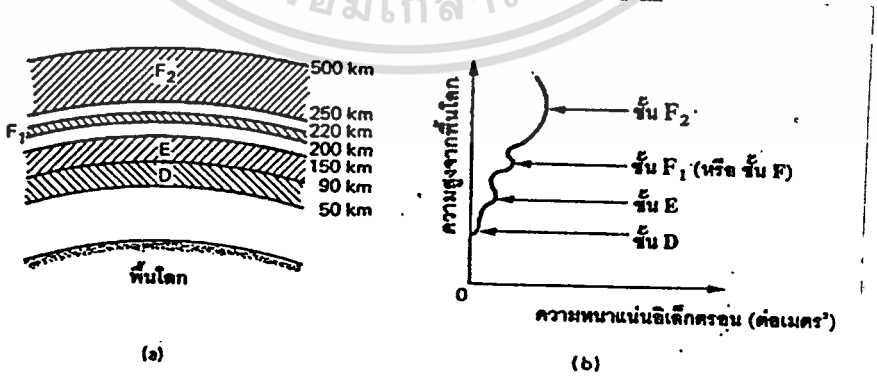
ดังนั้นทั้งขบวนการไอออนไนซ์และการรวมตัวกันใหม่จึงเกิดขึ้นตลอดเวลาสิ่งนี้มีผลต่อการหักเหคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุอย่างมาก เพราะเมื่อมีการแตกตัวของอะตอมมากชั้นไอโอโนสเฟียร์ สามารถหักเหคลื่นวิทยุได้ดี จนกระทั่งเกิดการรวมตัวของประจุไฟฟ้า ทำให้ชั้นบรรยากาศหมดคุณสมบัติในการหักเหคลื่นลงไปด้วย

สำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์ ขบวนการแตกตัวของอะตอมมีมาก ในบริเวณที่อยู่ใกล้กับดวงอาทิตย์ เพราะมีปริมาณแพร่กระจายของรังสีอุลตราไวโอเลตสูงมาก ส่วนในระดับที่ต่ำลงมาพบว่ามีการแตกตัวของอะตอมน้อยกว่า เนื่องจากความเข้มของรังสีถูกลดลงระหว่างทางของชั้นบรรยากาศอื่น ๆ นั่นคือเราพอสรุปเป็นแนวทางได้ว่า

- ในเวลากลางวันพบว่าปริมาณการแตกตัวของอะตอมมีสูง
- ในเวลากลางคืนพบว่าปริมาณการแตกตัวของอะตอมมีน้อย ทำให้การรวมตัวของอะตอมเกิดภายในชั่วเวลาเร็วขึ้น หมายถึง ชั้นบรรยากาศหมดคุณสมบัติในการหักเหคลื่นไวขึ้น

ภายในชั้นไอโอโนสเฟียร์เองยังแบ่งเป็นระดับได้หลายชั้นตามปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ไม่เท่ากัน ตามความสูงภายในชั้นนี้ ได้ 4 ระดับ

พิจารณาจากรูปที่ 1.17



รูปที่ 1.17 แสดงชั้นต่าง ๆ ในไอโอโนสเฟียร์

(a) แบ่งตามระดับความสูงจากผิวโลก

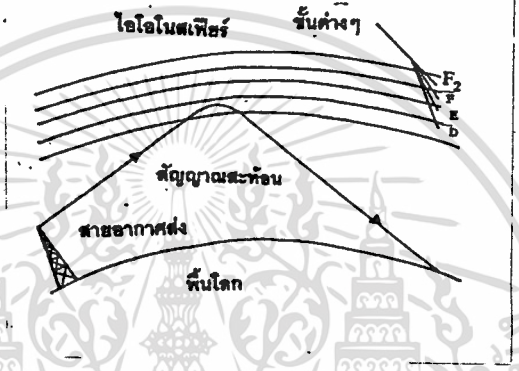
(b) ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแต่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดคลื่นฟ้าเป็นผลลักษณ์จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการหักเหของคลื่นวิทยุได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

- ความถี่ของคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ
- มุมที่คลื่นกระทำกับชั้นไอโอโนสเฟียร์
- ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในชั้นบรรยากาศและตัวแปรอื่นอีกหลายอย่าง

แสดงการหักเหกลับสู่พื้นโลกของคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ดังรูป 1.18



รูปที่ 1.18 แสดงการเดินทางของคลื่นฟ้า

รายละเอียดของระดับชั้นต่าง ๆ ในชั้นไอโอโนสเฟียร์มีดังต่อไปนี้

ชั้นไอโอโสนเฟียร์แบ่งได้ 4 ระดับ คือชั้น D, E, F_1, F_2 ตามลำดับ ซึ่งความสูงตากพื้นโลกของแต่ละระดับจะไม่คงที่ มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดตามชั่วโมง วัน เดือน และฤดูกาลของแต่ละปี ซึ่งตัวแปรสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ คือ ดวงอาทิตย์ อย่างเช่นในเวลากลางวัน รังสีอุลตราไวโอเลตมีการแพร่กระจายสูง เกิดการแตกตัวของอะตอมในปริมาณมาก ทำให้ระดับความสูงเฉลี่ยของชั้นไอโอโนสเฟียร์ต่ำลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงภายในดวงอาทิตย์ (เช่นจุดบอดบนดวงอาทิตย์) ยังมีผลต่อชั้นบรรยากาศด้วย

ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในชั้น D มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบชั้นอื่น เนื่องจากอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์ที่สุด จึงมีการแตกตัวของอะตอมน้อยมาก มีผลให้การหักเหคลื่นวิทยุที่เกิดภายในชั้น D มีน้อยมาก และเกิดได้ไม่นาน นอกจากนี้ยังมีการดูดกลืนคลื่นหักลดลงไปบางส่วน ทำให้ถ้าส่งคลื่นวิทยุผ่านชั้น D มีผลให้คลื่นถูกลดทอนทั้งด้านขึ้นและด้านลงสำหรับเวลากลางคืนจะมีการรวมตัวของอะตอมอย่างรวดเร็วทำให้ชั้น D ไม่สามารถหักเหวิทยุได้พูดง่าย ๆ คือ ในกลางคืน ชั้น D จะหายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนชั้น E อยู่ที่ความสูงประมาณ 100 กิโลเมตร มีลักษณะคล้ายชั้น D คือ มีปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงในเวลากลางวัน และมีน้อยมากในตอนกลางคืนแต่ไม่มีถึงกับทำให้ชั้น E หายไปโดยสิ้นเชิงเหมือนที่เกิดกับชั้น D

ความถี่ของคลื่นวิทยุที่ใช้ในชั้น E แล้วได้ผลดีจะไม่เกินย่าน 20 MHz

ชั้น F แบ่งย่อยได้ 2 ระดับ คือ ชั้น F_1 และ F_2

โดยความสูงของชั้น F_1 จากพื้นโลก มีค่าประมาณ 200-220 กิโลเมตร

ส่วนความสูงของชั้น F_2 พิจารณา ตามฤดูกาลดังนี้

- ในฤดูหนาว ความสูงของชั้น F_2 มีค่าประมาณ 250-350 กิโลเมตร
- ในฤดูร้อน ความสูงของชั้น F_2 มีค่าประมาณ 300-500 กิโลเมตร

ในเวลากลางวัน ชั้น F จะแบ่งเป็น 2 ระดับ (F_1, F_2) แต่ในเวลากลางคืนจะเหลือเพียงชั้นเดียว

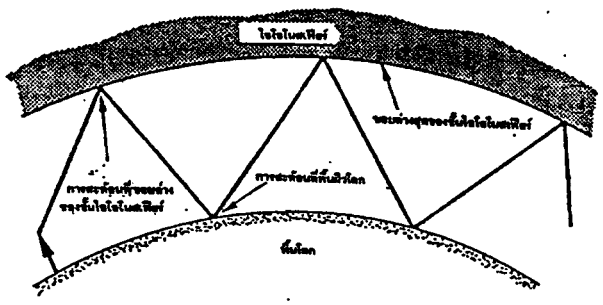
การแตกตัวของอะตอมในชั้นนี้จัดว่ามีปริมาณสูงมากที่สุด ทำให้สามารถหักเหคลื่นวิทยุที่มีความถี่สูงได้ดี (ถึง 30 MHz) และได้ระยะทางไกลกว่า เนื่องจากมีความสูงจากผิวโลกมาก

บริเวณของชั้นอากาศที่อยู่ระหว่างพื้นผิวโลกกับ ขอบล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ เราเรียกว่า ชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (Troposphere)

ลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุ เมื่อผ่านไอโอโนสเฟียร์ ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นที่ใช้ โดยที่ความถี่ต่ำนั้น ชั้นไอโอโนสเฟียร์ ทำหน้าที่คล้ายกับสื่อกลางที่มีสภาพความนำไฟฟ้าสูง และมีการสะท้อนกลับที่ขอบล่างของชั้นบรรยากาศ (มีค่าสูญเสียพลังงานต่ำมาก)

ดังนั้น เราสามารถพิจารณาการเดินทางของคลื่นย่านความถี่ VLF และ LF ว่ามีลักษณะสะท้อนกลับไปมาตลอดขอบล่างสุดของชั้นไอโอโนสเฟียร์กับพื้นผิวโลก

พิจารณาเหตุการณ์ข้างต้นได้ในรูป 1.19



รูปที่ 1.19 แสดงการเดินทางแบบหลายสอปของคลื่นความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* หมายเหตุ : ฮอป (Hop) หมายถึง คลื่นที่ส่งขึ้นไปและสะท้อนกลับมา 1 ครั้ง หรือคลื่นกระโดดได้ 1 ครั้ง

ในการส่งคลื่นวิทยุแบบหลายฮอป (multi-hop) จะมีการลดทอนในการสะท้อนแต่ละครั้งค่อนข้างน้อย ดังนั้นความเข้มของสัญญาณคลื่นวิทยุที่รับได้มีค่าเป็นสัดส่วนกลับกันกับระยะทางที่คลื่นเดินทางมา

สำหรับความถี่ย่าน MF ชั้น D จัดเป็นตัวกลางที่ค่อนข้างมีการลดทอนสัญญาณสูง โดยเฉพาะที่ความถี่ 1.4 MHz พบว่าค่าการลดทอนมีมากที่สุด เราเรียกความถี่ที่ค่านี้ว่า ความถี่ไจโร (gyro-frequency)

เห็นได้ว่าคลื่นย่าน MF จะมีการสูญเสียสูงมากในชั้น D ทำให้เหลือพลังงานเล็กน้อยที่ไปถึงชั้น E หรือ F ส่วนในเวลากลางคืน เมื่อชั้น D หายไป คลื่นย่าน MF สามารถผ่านถึงชั้น E (หรือบางทีถึงชั้น F) และหักเหกลับพื้นโลก

ถ้าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงย่าน HF พบว่าการลดทอนสัญญาณมีน้อยลงมากและมีการหักเหเกิดขึ้นที่ชั้น E และ F ได้ แต่ถ้าคลื่นวิทยุมีความถี่สูงมากกว่านี้ พบว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่สามารถหักเหได้ หมายความถึง ในย่าน VHF ขึ้นไปคลื่นวิทยุเดินทางทะลุชั้นนี้ไปหมด

1.8 คลื่นดินหรือคลื่นผิวโลก (Ground or Suface Wave)

ในความถี่ย่าน VLF และ LF สายอากาศด้านส่งมีขนาดใหญ่มากและต้องติดในแนวตั้งกับพื้นโลกสายอากาศแบบนี้สามารถแพร่กระจายพลังงานไปได้ทุกทิศทาง ทำให้เกิดคลื่นผิวโลกและคลื่นอวกาศ (บางครั้งอาจเกิดคลื่นฟ้าด้วย)

ก่อนอื่นขออธิบายให้เข้าใจก่อนว่า ทำไมในความถี่ย่านนี้จึงพิจารณาเฉพาะคลื่นผิวโลก ? และองค์ประกอบของคลื่นอวกาศหายไปไหน ?

เนื่องมาจากในความถี่ย่านนี้ค่าความยาวคลื่นมีมาก และความสูงของสายอากาศคิดเป็นเศษส่วน (./4) ของค่าความยาวคลื่นนี้ และจากที่ทดลองพบว่าส่วนสะท้อนกลับของคลื่นอวกาศมีการเลื่อนเฟสไป 180 องศาหลังจากที่สะท้อน กล่าวได้ว่าความแตกต่าง (ในแง่ความยาวคลื่น) ของคลื่นตรงกับคลื่นสะท้อนมีค่าน้อยมาก ทำให้คลื่นสองตัวนี้หักล้างกันหมดไปคงเหลือแต่คลื่นผิวโลกที่เด่นมากในความถี่ย่าน VLF และ LF

สายอากาศส่งของคลื่นดิน หรือคลื่นผิวโลกให้มีโพลาไรเซชั่นแนวดิ่งเท่านั้น เพราะโพลาไรเซชั่นแนวนอนจะลัดวงจรกับพื้นโลก (ค่าความต้านทานต่ำ)

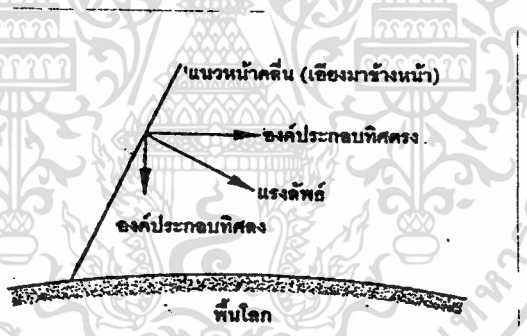
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการเดินทางของคลื่นดินไปตามส่วนโค้งของผิวโลกจากสายอากาศส่ง เราเรียกว่า คลื่นถูกแพร่กระจาย (diffracted)

* หมายเหตุ : การแพร่กระจาย (Diffraction) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับการเดินทางของคลื่นทั่วไป กล่าวคือ คลื่นจะแพร่เป็นแวโค้งรอบสิ่งที่ขวางอยู่ทำให้เดินทางต่อไปได้ และในเรื่องคลื่นดินเราถือว่าพื้นโลกเป็นสิ่งที่ขวางอยู่

นอกจากการแพร่กระจายแล้ว ยังพิจารณาเพิ่มเติมถึงการโค้งของคลื่นว่าเกิดจากองค์ประกอบทางแม่เหล็กของคลื่นตัดกับพื้นผิวโลก ตลอดทางที่ผ่านเกิดเหนี่ยวนำเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างคลื่นกับพื้นโลกตลอดเวลา

ลองพิจารณารูป 1.20



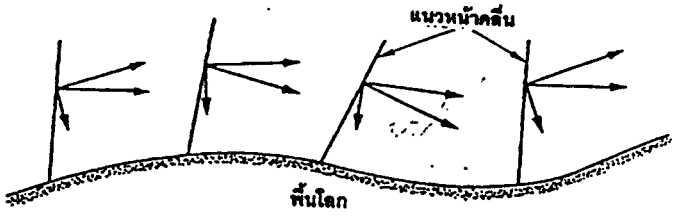
รูปที่ 1.20 แสดงแนวหน้าคลื่นของคลื่นดิน

จากรูปเราวิเคราะห์คลื่นตามแนวหน้าคลื่นได 2 องค์ประกอบ คือ

- องค์ประกอบในทิศทางตรงมาข้างหน้า
- องค์ประกอบในทิศทางลงสู่พื้นโลก

ผลรวมทางเฟสของทั้งสองนี้เป็นทิศทางของคลื่นที่จุดนั้น เราพบว่าองค์ประกอบในทิศทางลงกับทิศทางตรงจะตั้งฉากกัน 90 องศา ทำให้ทิศของแรงลัพธ์ ขึ้นกับลักษณะความสูงต่ำของพื้นโลก แสดงได้ในรูป 1.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1.21 แสดงแนวการเดินทางของคลื่นดิน

การถ่ายเทพลังงานจากคลื่นสู่พื้นโลกจะลดทอนพลังงานบางส่วนของคลื่นไปตามทาง ถ้าแทนความเข้มสนามที่ระยะ d กิโลเมตร ห่างจากสายอากาศส่งด้วย Ed

มีสูตรคำนวณหาจาก $Ed = k \frac{E_1}{d}$

โดย E_1 แทนค่าความเข้มสนามที่ระยะ 1 กิโลเมตรจากสายอากาศส่ง

k เป็นพารามิเตอร์แทนการลดทอนของคลื่น เนื่องจากสูญเสียพลังงานให้กับพื้นโลก ซึ่งผิวโลกเราพบว่าการลดทอนจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อคลื่นเดินทางบนพื้นน้ำ และมีค่ามากที่สุดเมื่อคลื่นเดินทางผ่านพื้นดินที่แห้ง เช่น ทะเลทราย ยกตัวอย่าง การเดินทางของคลื่นผ่านพื้นดินที่มีความชื้นปานกลางโดยมีกำลังส่งคลื่นวิทยุเท่ากับ 1 กิโลวัตต์ จะคำนวณหาระยะทางที่จุดให้ค่าความเข้มสนาม 1 mV / m ในแต่ละค่าความถี่ได้ประมาณดังนี้

ความถี่	ระยะทาง (กิโลเมตร)
100 KHz	200
1 MHz	60
10 MHz	6
100 MHz	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.9 การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากตัวกลางชนิดหนึ่งผ่านไปในตัวกลางอีกชนิดพบว่าทิศทางของการเดินทางของคลื่นเปลี่ยนแปลงจากเดิน

กล่าวคือ คลื่นถูกหักเห (refracted) และค่าอัตราส่วนของ

$$\frac{\text{ค่าไซน์ (sine) ของมุมตกกระทบ, } \phi_i}{\text{ค่าไซน์ (sine) ของมุมหักเห, } \phi_r}$$

จะมีค่าคงที่ในแต่ละคู่ตัวกลาง และเรียกค่าอัตราส่วนนี้ว่า ดัชนีการหักเห (Refractive Index).

ในกรณีที่ตัวกลางด้านหนึ่งเป็นอากาศ เราเรียกค่าอัตราส่วนที่หาได้ว่า เป็นค่าดัชนีการหักเหสมบูรณ์ (absolute refractive index) ของตัวกลางอีกด้าน

ด่านี้สำคัญมากในการพิจารณาถึงคุณสมบัติของตัวกลางแต่ละชนิด

พิจารณารูป 1.22

รูป 1.22 แสดงการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยคลื่นเดินทางผ่านเข้าตัวกลางที่

(a) มีค่าดัชนีการหักเหสมบูรณ์ต่ำกว่า

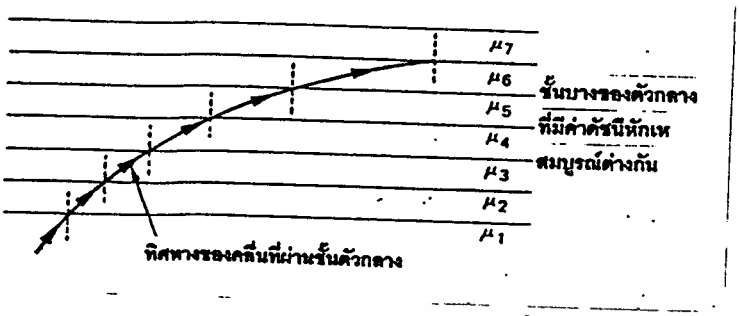
(b) มีค่าดัชนีการหักเหสมบูรณ์สูงกว่า

จากรูปกรณี 1.22 (a) คลื่นผ่านจากตัวกลางชนิดที่ 1 ไปยังตัวกลางชนิดที่ 2 ซึ่งมีค่าดัชนีการหักเหสมบูรณ์ต่ำกว่า มีผลให้คลื่นเบี่ยงทิศทางออกจากแนวปกติมากขึ้น

กรณี 1.22 (b) คลื่นผ่านจากตัวกลางชนิดที่ 1 ไปยังตัวกลางชนิดที่ 2 ซึ่งมีค่าดัชนีการหักเหสมบูรณ์สูงกว่า มีผลให้คลื่นเบี่ยงทิศทางเข้าหาแนวปกติมากขึ้น

สมมุติให้คลื่นถูกส่งผ่านตัวกลางชั้นบาง ๆ หลายชนิดที่วางขนานกันดังรูป 1.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.23 แสดงการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลาง
ที่มีค่าดัชนีการหักเหสมบูรณ์ลดลงอย่างต่อเนื่อง

จากรูปกำหนดให้แต่ละชั้นตัวกลางมีค่าดัชนีหักเหสมบูรณ์ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับชั้นล่างที่อยู่ติดกัน เห็นได้ว่าคลื่นเดินทางจากค่าดัชนีหักเหสมบูรณ์ที่สูงกว่าไปต่ำกว่า ทำให้ทิศทางของคลื่นเบี่ยงออกจากแนวปกติตลอดทุกชั้น

ถ้าความกว้างของแต่ละชั้นตัวกลางมีค่าน้อยมาก ๆ ค่าดัชนีการหักเหสมบูรณ์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง และคลื่นถูกหักเหอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นตามระยะความสูงจากผิวโลกที่เพิ่ม

โดยที่ขอบบนของแต่ละระดับ ค่าความหนาแน่นจะลดลงจนความสูงเพิ่มถึงขอบล่างของระดับถัดมาและที่ความสูงมากกว่าขอบบนของระดับ F_2 ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยลงขนเล็กสนใจได้

ค่าดัชนีการหักเห (n) ของแต่ละชั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นและความหนาแน่นของอิเล็กตรอน คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$n = \frac{\sin\phi_i}{\sin\phi_r} = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}}$$

กำหนด ค่า f แทนความถี่ของคลื่นวิทยุ (Hz)

ค่า N แทนจำนวนอิเล็กตรอนอิสระต่อลูกบาศก์เมตร

ส่วน ϕ_i และ ϕ_r แทนมุมตกกระทบและมุมหักเหตามลำดับ สมการนี้พอบอกคุณสมบัติได้ว่า

- ค่าดัชนีการหักเหมีค่าลดลง เมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความถึงภายในชั้นบรรยากาศ ค่าดัชนีหักเหลดลงตามความสูงจากผิวโลกที่เพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าดัชนีการหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม

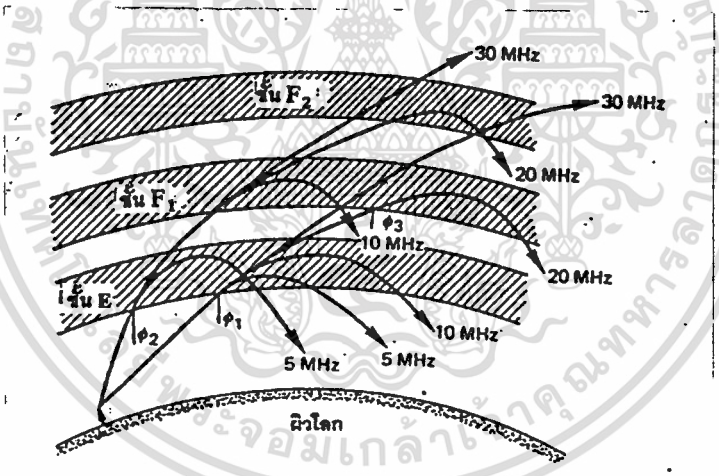
คลื่นวิทยุจะเดินทางผ่านตัวกลางด้วยมุมตกกระทบ ϕi และผ่านจากชั้นที่มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าไปยังชั้นที่มีค่าต่ำกว่า มีผลให้คลื่นเบี่ยงทิศทางออกจากแนวปกติอย่างต่อเนื่อง และยังมีสิ่งน่าสนใจที่จะพิจารณาเพิ่มคือ

ถ้าก่อนที่คลื่นเคลื่อนที่ถึงขอบบนของชั้นบรรยากาศ พบว่าคลื่นถูกหัดเหด้วยมุมหักเห ϕ_r เท่ากับ 90 องศา มีผลให้คลื่นเดินทางกลับพื้นโลกได้

แต่กรณีที่มุมหักเหยังน้อยกว่า 90 องศา คลื่นจะทะลุผ่านไปสู่ชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นจากนั้นจะพิจารณาเหมือนเดิม

ส่วนกรณีความถี่เพิ่มขึ้น มีผลให้คลื่นถูกหักเหน้อยลง และเดินทางทะลุไปยังชั้นบรรยากาศถัดไป จนในที่สุดถูกหักเหเดินทางกลับพื้นโลก

ยกเว้นถ้าความถี่สูงมาก ๆ (เช่นย่าน VHF) คลื่นจะทะลุชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไปเลย มีตัวอย่างอยู่หนึ่งที่ผู้เขียนคิดว่าน่าสนใจมาก ขอให้พิจารณาจากรูป 1.24



รูปที่ 1.24 แสดงความแตกต่างในการหักเหภายในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยมีค่ามุมตกกระทบ และความถี่คลื่นวิทยุไม่เท่ากัน

จากรูปแบ่งเป็นแต่กรณีอธิบายได้ดังนี้

1. กรณีที่มุมตกกระทบเท่ากับ (ที่ขอบล่างของชั้น E) จะได้พฤติกรรมของคลื่นวิทยุในหลาย ๆ ความถี่ เช่น

- ที่ 5 MHz พบว่าคลื่นมีการหักเหอย่างมากทำให้กลับสู่ผิวโลกและทะลุอยู่ภายในชั้น E ได้ระยะเล็กน้อย

- ที่ 10 MHz พบว่าคลื่นสามารถทะลุผ่านภายในชั้น E ได้มากกว่าเดิม จากนั้นถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หักเหกลับผิวโลก

- ที่ 20 MHz มีการทะลุผ่านชั้น E ไปสู่ชั้น F_1 โดยมีค่ามุมตกกระทบกับชั้น F_1 ใหม่เท่ากับ ϕ_3 ซึ่งมีค่ามากกว่า ϕ_1 ($\phi_3 > \phi_1$) และทำให้คลื่นหักเหกลับผิวโลกในชั้นนี้
- ที่ 30 MHz คลื่นวิทยุจะทะลุผ่านเลยชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไป

2. กรณีที่มุมตกกระทบลดลงเท่ากับ ϕ_2 ($\phi_2 < \phi_1$) จะต้องเกิดการหักเหมากขึ้นกว่าเดิม เช่น

- ที่ 5 MHz คลื่นถูกสะท้อนกลับที่ชั้น E
- ที่ 10 MHz คลื่นผ่านจนถึงชั้น F_1 และถูกสะท้อนกลับมาผิวโลก
- ที่ 20 MHz คลื่นผ่านจนถึงชั้น F_2 และถูกสะท้อนกบัลเช่นกัน
- ที่ 30 MHz คลื่นจะทะลุผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไป

สรุปได้ว่าถ้ามุมตกกระทบกับชั้น E มีค่าลดลงอีก คลื่นที่ 30 MHz อาจทะลุผ่านชั้น F_2 ไปเลย และไม่กลับมาผิวโลก ส่วนที่ 5 MHz และ 10 MHz นั้น คลื่นจะถูกสะท้อนกลับในระดับความสูงที่มากกว่าเดิม

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีจำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากที่สุดเท่ากับ 6×10^{11} ตัว / (เมตร^3)

จงคำนวณหาค่าความถี่ที่มากที่สุด ซึ่งคลื่นจะถูกสะท้อนกลับมาผิวโลก ถ้ากำหนดค่ามุมตกกระทบเท่ากับ

(1) 60 องศา

(2) 30 องศา

คำตอบ จากสมการที่ผ่านมา

1) $\sin 60^\circ = 0.866 = \sqrt{\left(1 - \frac{81 \times 6 \times 10^{11}}{f^2}\right)}$

$$0.75 = 1 - \frac{81 \times 6 \times 10^{11}}{f^2}$$

$$f^2 = \frac{81 \times 6 \times 10^{11}}{0.25}$$

$f = 13.943$ MHz (ที่ค่ามุมตกกระทบ 60°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) $\sin 30^\circ = 0.5 = \sqrt{\left(1 - \frac{81 \times 6 \times 10^{11}}{f^2}\right)}$

$$0.25 = 1 - \frac{81 \times 6 \times 10^{11}}{f^2}$$

$$f^2 = 1 - \frac{81 \times 6 \times 10^{11}}{0.75}$$

$f = 8.05$ MHz (ที่ตกกระทบทำมุม 30°) (Ans)

1.10 ความถี่วิกฤต (Critical Frequency)

ความหมายของความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ คือ ค่าความถี่มากที่สุดในการส่งคลื่นจากสายอากาศในแนวทางตรง ๆ ขึ้นไปชั้นบรรยากาศ (มุมตกกระทบเท่ากับ 0°) และคลื่นยังสามารถสะท้อนกลับมายังโลกได้ ซึ่งเราต้องกำหนดเงื่อนไขดังนี้

- คลื่นสะท้อนที่ขอบบนสุดของชั้นไอโอโนสเฟียร์
- จำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่ามากที่สุด
- มุมตกกระทบเท่ากับ 0°
- มุมหักเหเท่ากับ 90°

และจากสมการที่ผ่านมาหาค่าความถี่วิกฤตได้ว่า

(N_{max} = จำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากที่สุด)

(f_{crit} = ความถี่วิกฤต)

$$\sin 0^\circ = 0 = \sqrt{\left(1 - \frac{81 N_{max}}{f_{crit}^2}\right)}$$

ดังนั้น

$$f_{crit}^2 = 81 N_{max}$$

$$f_{crit} = 9\sqrt{N_{max}}$$

ค่าความถี่วิกฤตมีจุดน่าสนใจ 2 ข้อ คือ

1. เป็นค่าที่สามารถวัดได้จากพื้นดิน
2. ใช้คำนวณหาความถี่ใช้งานสูงสุด MUF ในงานคลื่นฟ้า

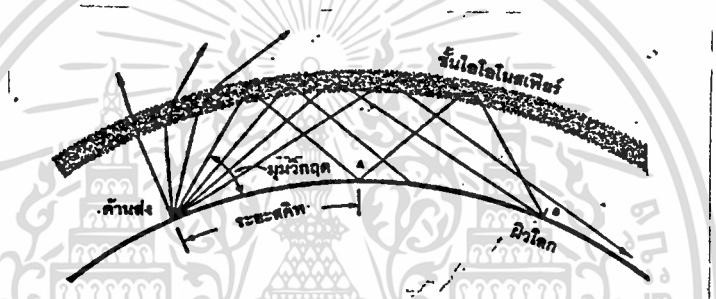
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.11 ความถี่ใช้งานสูงสุด [Maximum Usable Frequency : MUF]

ค่า MUF คือ ความถี่ที่มากที่สุดซึ่งสามารถใช้สื่อสาร (แบบคลื่นฟ้า) ระหว่างจุด 2 จุดได้

ถ้าเราใช้ค่าความถี่มากกว่า MUF คลื่นวิทยุจะทะลุผ่านขอบบนของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ทำให้ด้านรับไม่สามารถรับได้

ในการพิจารณาความถี่ MUF ต่างจากความถี่วิกฤตที่ต้องเกี่ยวข้องกับมุมตกกระทบด้วย เพราะถ้ามุมยิงคลื่นมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต (critical angle) แล้วมีผลให้คลื่นทะลุผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไปได้พิจารณาจากรูป 1.25



รูปที่ 1.25 แสดงพฤติกรรมของคลื่นเมื่อมีมุมตกกระทบต่างกัน

เห็นได้ว่าคลื่นที่มีมุมยิงต่ำกว่ามุมวิกฤตมากขึ้น ระยะทางที่คลื่นเดินทางจะไกลขึ้นแต่ถ้ามีมุมยิงมากกว่ามุมวิกฤต คลื่นจะทะลุผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ไป

สำหรับสูตรคำนวณความถี่ MUF หาจาก

$$MUF = f_{crit} / \cos \phi_i$$

ค่า MUF จัดเป็นตัวแปรสำคัญในการเดินทางของคลื่นฟ้า เพราะว่าการลดทอนคลื่นจะเป็นสัดส่วนกลับกันกับความถี่ของคลื่น ซึ่งเราต้องการใช้ให้สูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

ตัวอย่างการคำนวณ

จงหาความถี่ใช้งานสูงสุด (MUF) ของคลื่นฟ้าที่ส่งด้วยมุมตกกระทบเท่ากับ 45° และมีจำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากที่สุดเท่ากับ 4×10^{11} ตัว / (เมตร)^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำตอบ

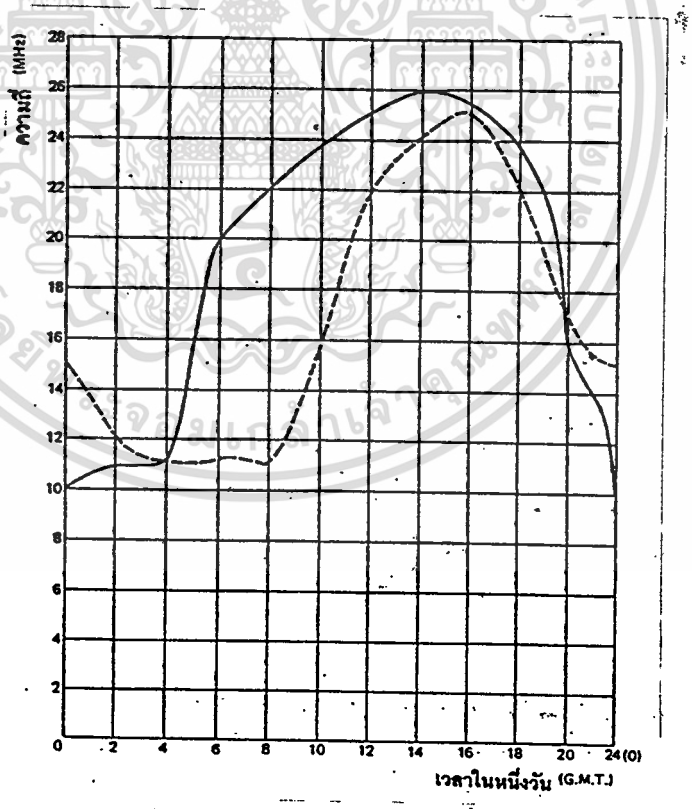
คำนวณหาความถี่วิกฤตก่อนจะได้

$$f_{crit} = 9\sqrt{(4\times10^{11})} = 5.692 \text{ MHz}$$

แล้วจึงหาค่า MUF ได้

$$\text{MUF} = 5.692 \,/\, \cos 45^{\circ} = 8.05 \text{ MUF} \qquad \text{(Ans.)}$$

ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ จัดว่ามีพฤติกรรมไม่คงที่แน่นอนคือ มีค่าขึ้น ๆ ลง ๆ ตลอดตามการเปลี่ยนแปลงของรังสีอุลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ที่มีการแผ่กระจายรังสีสูงสุดในเวลากลางวัน และต่ำสุดในเวลากลางคืน ทำให้ค่าความถี่ MUF เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งวัน พฤติกรรมของความที่ MUF ได้จากรูป 1.26



รูปที่ 1.26 แสดงค่าความถี่ MUF ที่เปลี่ยนแปลงในหนึ่งวัน

เห็นได้ว่าการใช้ค่าความถี่ MUF ที่ค่าใดค่าหนึ่งทำได้ยาก เพราะอาจทำให้ระบบสื่อสารขาดความแน่นอนลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

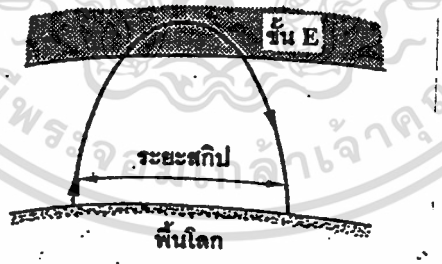
ดังนั้นจึงคิดที่ค่าประมาณ 85% ของค่า MUF เพื่อใช้ส่งคลื่นวิทยุที่ทมีพฤติกรรมค่อนข้างแน่นอนเรียกค่านี้ว่าความถี่ใช้งานที่เหมาะสม (Optimum Working Frequency : OWF) และด้วยเหตุที่ MUF มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทำให้ค่าความถี่ OWF อาจต้องเปลี่ยนไปตามสภาพบรรยากาศด้วย อาจแก้ไขโดยให้ในระบบสื่อสารมีความ OWF ใช้ส่งได้หลายค่าในสภาวะบรรยากาศที่แปรปรวน จนถึงอาจต้องทบทวนการส่งคลื่นใหม่ในสภาวะบรรยากาศที่แย่มาก ๆ

ได้มีการกำหนดค่าความถี่ใช้งานต่ำสุด (Lowest Useful Frequency : LUF) เพื่อป้องกันไม่ให้ใช้ความถี่ต่ำกว่าค่านี้ มิฉะนั้นสายอากาศด้านรับจะไม่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ เพราะถูกลดทอนจนหมด

1.12 ระยะสกิป (Skip Distance)

ความหมายของระยะสกิป คือ ระยะทางที่น้อยที่สุดในการสื่อการโดยวิธีคลื่นฟ้าตามค่าตามถี่แต่ละค่า ซึ่งใช้ค่า MUF ในการพิจารณาระยะสกิป

ถ้าใช้มุมตกกระทบน้อยกว่าที่ระยะสกิป พบว่าคลื่นจะทะลุผ่านชั้น E ออกไปพิจารณาได้ในรูป 1.27



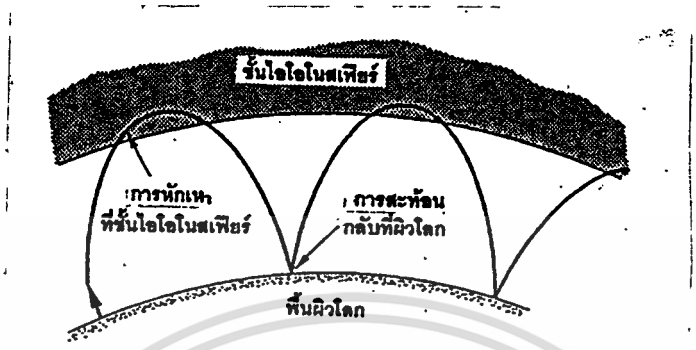
รูปที่ 1.27 แสดงระยะสกิป

มีข้อสังเกตอยู่ว่า ถ้าความถี่ของคลื่นวิทยุมากขึ้น มีผลให้ระยะสกิปมีค่ามากตามไปด้วย

1.13 การสื่อสารแบบหลายฮอป (Multiple-hop)

กรณีที่การสื่อสารโดยใช้คลื่นฟ้า ระหว่างจุด 2 จุด มีระยะทางมากกว่า 4,000 km เราต้องใช้วิธีนี้ (แสดงในรูป 1.28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.28 แสดงการสื่อสารหลายฮอปของคลื่นฟ้า

จากรูปคลื่นฟ้าถูกหักเหจนสะท้อนกลับมายังผิวโลก และที่จุดนี้จะถูกสะท้อนกลับขึ้นไปชั้นบรรยากาศใหม่ เป็นลักษณะนี้ซ้ำ ๆ กันไป

จำนวนของฮอปที่มีได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้

- กำลังส่งคลื่นฟ้า
- การสูญเสียของพลังงาน เนื่องจากการสะท้อนกลับที่ผิวโลก
- การสูญเสียของพลังงาน เนื่องจากการสะท้อนกลับที่ชั้นบรรยากาศ

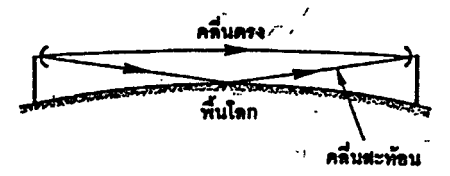
เห็นได้ว่าอุปสรรคใหญ่ในการสื่อสารแบบหลายฮอป คือ การจางหายของสัญญาณ

1.14 คลื่นอวกาศ (Space wave)

ค่าความถี่ในย่าน VHF, UHF และ SHF นั้นพบว่าถ้านำมาใช้กับคลื่นดินจะได้ระยะจำกัดมาก หรือถ้าใช้กับคลื่นฟ้า ชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่สามารถหักเหคลื่นจนสะท้อนกลับได้ รวมทั้งเนื่องจากความยาวคลื่นในย่านความถี่นี้มีขนาดสั้นทำให้สายอากาศด้านส่งและรับสามารถติดตั้งที่ความสูงจากพื้นโลกได้ระดับหลายเท่าของความยาวคลื่น

หลังการของการส่งคลื่นอวกาศ แสดงในรูป 1.29

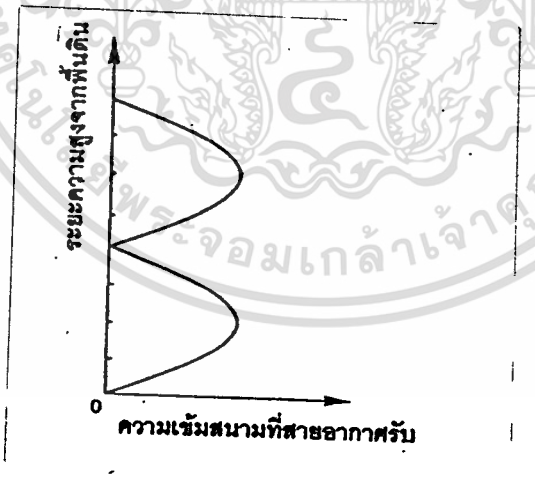
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.29 แสดงคลื่นอวกาศ

มีการค้นพบว่าคลื่นตรงเดินทางในระยะใกล้เคียงกับเส้นสายตามาก อาจจะมีหักเหบ้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและละอองไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์

ส่วนค่าความเข้มสนามทั้งหมดที่จุดสายอากาศด้านรับเป็นผลรวมทางเฟสของความเข้มสนามที่เกิดจากคลื่นตรง และคลื่นสะท้อน มีการทดลองจนพบว่าค่าความเข้มสนามของสายอากาศรับมีเปลี่ยนแปลงตามความสูงจากพื้นดิน ดังรูป 1.30

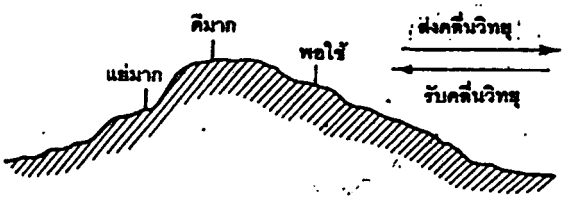


รูปที่ 1.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามของคลื่นอวกาศที่จุดสายอากาศรับตามระดับความสูงจากพื้นโลกที่จัดรับคลื่น

สังเกตได้ว่า ความสูงในการติดตั้งสายอากาศรับจากพื้นโลก เป็นเรื่องสำคัญ การส่งคลื่นตรงต้องไม่มีสิ่งกีดขวางอยู่ เช่น ต้นไม้ ตึก เป็นต้น จุดนี้เองทำให้ต้องคำนึงถึงความสูงของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

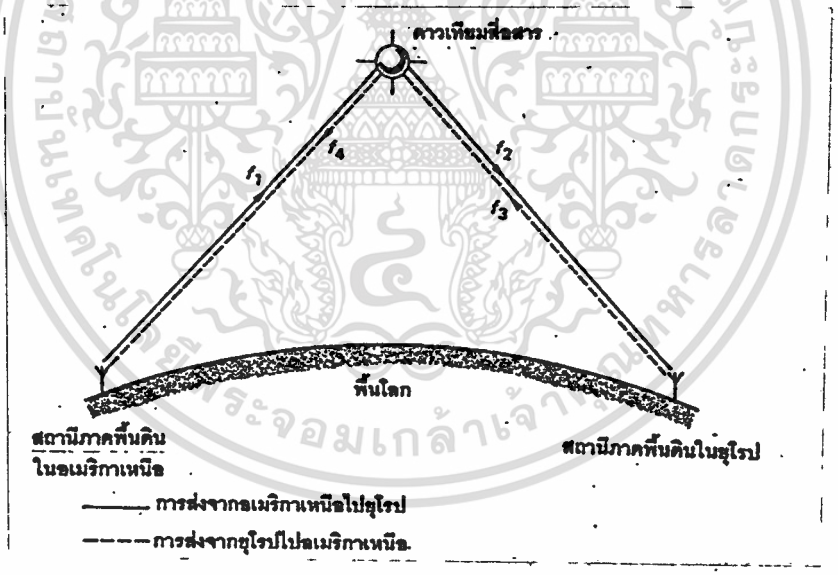
อากาศส่งและรับอย่างมาก ขอให้พิจารณาในรูป 1.31 จะเห็นความจริงข้อนี้ดี



รูปที่ 1.31 แสดงผลการติดตั้งสายอากาศที่ตำแหน่งต่างกันเห็นได้ว่าจุดดีมากเป็นบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวางอยู่

1.15 การใช้ดาวเทียมสื่อสาร

หลักพื้นฐานของการใช้ดาวเทียมสื่อสาร แสดงในรูป 1.32



รูปที่ 1.32 แสดงระบบดาวเทียมสื่อสาร

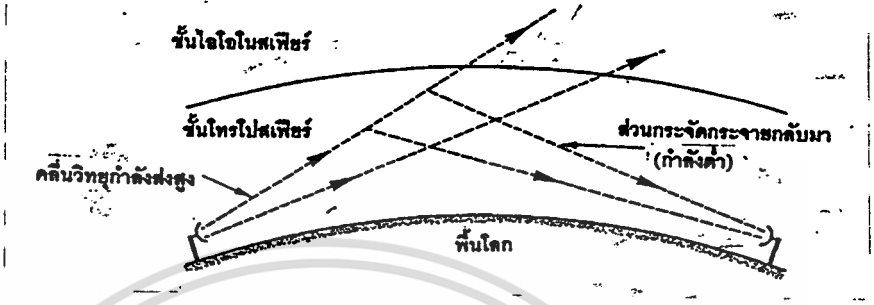
ระบบนี้ใช้ความถี่ย่าน SHF ทั้งสองทิศทาง (สัญญาณขาขึ้นและขาลง) ทำให้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่มีผลต่อคลื่นวิทยุในงานความถี่ขนาดนี้ และคลื่นค่อนข้างเดินทางเป็นเส้นตรง

วิธีสื่อสารชนิดนี้นำไปใช้ในระบบโทรศัพท์แบบมัลติแชนแนล สำหรับระยะหลายพันกิโลเมตร โดยให้ประสิทธิภาพของระบบสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.16 การส่งคลื่นวิทยุแบบโทรโปสแกตเตอร์ (Troposcatter หรือ Tropospheric scatter)

วิธีนี้ใช้ในงานสื่อสารช่องสัญญาณวิทยุ-โทรศัพท์ในระยะทางที่ไกลมากขอนิจารณาในรูป 1.33 ก่อน



รูปที่ 1.33 แสดงการสื่อสารวิธีโทรโปสแกตเตอร์

จากรูปคลื่นวิทยุกำลังสูงถูกส่งขึ้นจากสายอากาศส่งที่พื้นโลกให้ชนกับชั้นโทรโปสเฟียร์จะให้ผลลัพธ์ได้ว่า

- มีพลังงานของคลื่นส่วนมากทะลุผ่านชั้นนี้ไป
- มีพลังงานที่เหลือส่วนน้อยมากที่สะท้อนกลับในแบบกระจัดกระจาย

วิธีนี้เราสนใจในพลังงานส่วนน้อยนี้ ซึ่งเหตุที่คลื่นสะท้อนกลับเกิดจากความไม่แน่นอนของชั้นบรรยากาศนี้

ปรากฏการณ์โทรโปสแกตเตอร์จะเกิดที่ความถี่มากกว่า 600 MHz ขึ้นไป แต่ในการใช้งานจริงมักใช้ที่ 900 MHz , 2GHz และ 5GHz

สายอากาศที่ใช้ต้องมีขีดเด่นเฉพาะ คือ มีอัตราขยายสูงมากและใช้กำลังส่งสูงมากเช่นกัน

ระยะทางระหว่างด้านส่งกับด้านรับมีค่าประมาณจาก 300-500 กิโลเมตร ซึ่งนิยมใช้ในภูมิประเทศที่เป็นภูเขา, ป่า หรือมหาสมุทร ที่ตั้งสถานีทวนสัญญาณได้ลำบาก

เราใช้วิธีโทรโปสแกตเตอร์ต่อเมื่อไม่สามารถใช้การส่งคลื่นแบบต่าง ๆ ไปยังปลายทางได้แล้วเท่านั้น (เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงมาก)

1.17 การจางหายของคลื่นวิทยุ

การลดทอนขนาดหรือแอมปลิจูดของสัญญาณคลื่นวิทยุที่สายอากาศรับได้มีรูปแบบอยู่ 2 ชนิดคือ

- การจางหายแบบคงที่ หมายถึง สัญญาณคลื่นทั้งหมดจางหายไปในขนาดที่คงที่ในทุกความถี่
- การจางหายแบบเฉพาะ หมายถึง ในเวลาเดียวกันความถี่ค่าหนึ่งสัญญาณลูกลดทอน แต่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกค่าสัญญาณถูกเพิ่ม (ทางแอมปลิจูด)

อธิบายแต่ละแบบได้ดังนี้

1. การจางหายแบบคงที่

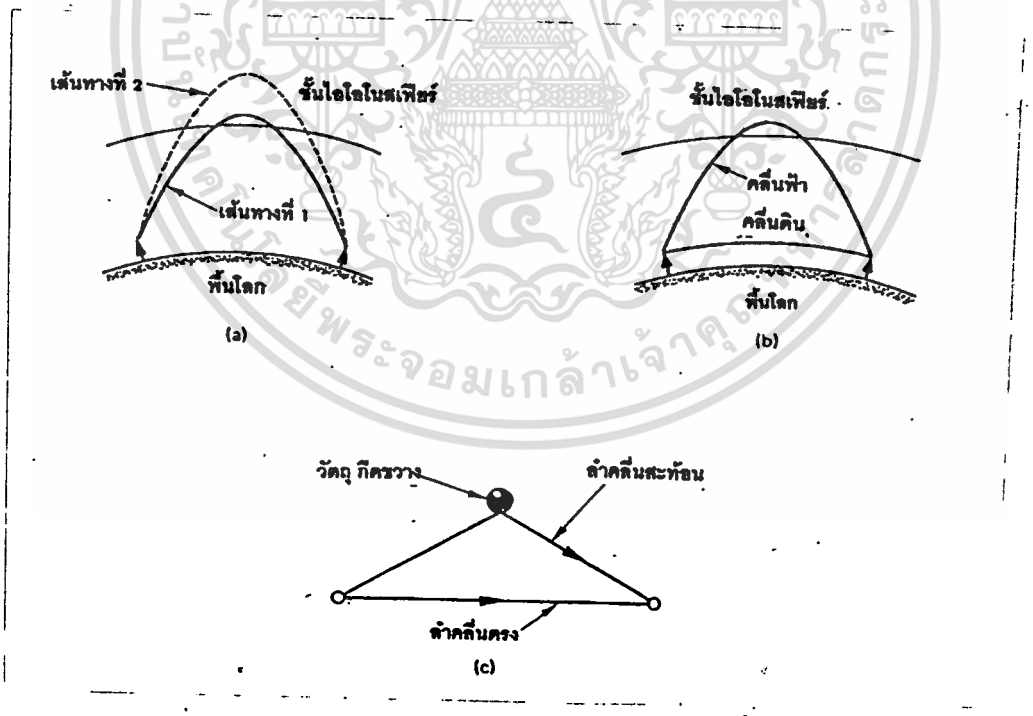
เมื่อคลื่นถูกส่งผ่านไอโอโนสเฟียร์ จะถูกลดทอนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กภายในชั้นนี้มีผลให้ระดับแอมปลิจูดของสัญญาณลดลงในปริมาณที่ค่อนข้างแน่นอน

เราสามารถแก้ปัญหาการจางหายของสัญญาณลักษณะนี้โดยใช้วงจรควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (Automatic Gain Control : AGC) ในเครื่องรับเพื่อชดเชยระดับแอมปลิจูดที่สูญเสียไป

2. การจางหายแบบเฉพาะ

คลื่นวิทยุที่เดินทางถึงด้านรับ (ในแบบคลื่นฟ้า) พบว่ามีเส้นทางไปถึงมากกว่าสองทางขึ้นไป (ผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์) เรียกลักษณะนี้ว่าการเดินทางแบบมัลติพาล (multi-path)

ดังรูป 1.34 (a)



รูปที่ 1.34 แสดงการเดินทางแบบมัลติพาธของคลื่นวิทยุ

ผลรวมของความเข้มสนามที่สายอากาศรับเป็นการรวมทางเฟสของคลื่นแต่ละเส้นทาง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณไอออนไนซ์อยู่ตลอดเวลา สิ่งนี้เองที่เป็นส่วนทำให้เกิดความแตกต่างด้านระยะทางของเส้นทางที่ 1 และที่ 2 ทำให้เกิดผลเปลี่ยนค่าความเข้มสนามทั้งหมดที่เครื่องรับได้

ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่เส้นทางที่ 2 มีขนาดระยะทางมากกว่าเส้นทางที่ 1 อยู่หนึ่งความยาวคลื่น ทำให้ค่าความเข้มสนามของคลื่นแต่ละเส้นทางมีลักษณะเสริมกัน (in phase) และผลรวมทั้งหมดที่สายอากาศรับคิดจากผลบวกของค่าความเข้มสนาม

แต่กรณีที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดการแปรปรวนในการไอออนไนซ์ขึ้น ทำให้ส่วนแตกต่างของระยะทางในเส้นทางที่ 2 กับเส้นทางที่ 1 มีค่าครึ่งความยาวคลื่น แล้วทำให้ความเข้มสนามของคลื่นหักล้างกัน (in antiphase) และผลรวมที่ด้านรับคิดจากผลลบของค่าความเข้มสนาม

การที่เฟสมีค่าแตกต่างกัน ในความเข้มสนามของคลื่นทั้งสองมีส่วนสัมพันธ์กับความถี่ของคลื่นด้วย

กล่าวคือ ผลรวมของความเข้มสนามที่ด้านรับจะมีค่าเปลี่ยนไป เมื่อความถี่ของคลื่นเปลี่ยนไปด้วย อย่างเช่น ในบางความถี่คลื่นถูกลดทอนไป แต่ในอีกความถี่คลื่นถูกเสริมให้มากขึ้นเห็นได้ชัดในระบบ DSB (Double-sideband amplitude-modtlated system) ที่ความถี่บางค่าของคลื่นพาหะ (carrier) ถูกลดทอนลงทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณอย่างมาก

วิธีแก้ไขปัญหาการจางหายแบบเฉพาะนี้ไม่สามารถนำวงจร AGC มาช่วยได้ เรามีอยู่หลายวิธีที่ใช้แก้หลายวิธีที่ใช้แก้จุดเสียนี้ ได้แก่

1. ใช้ค่าความถี่ให้ใกล้เคียงกับค่า MUF
2. ใช้สายอากาศด้านส่งที่มีการแพร่กระจายคลื่นได้เพียงหนึ่งวิธีเท่านั้น
3. ใช้ระบบ SSB (Single-sideband) หรือ FM (Frequency-modulated system) แทนระบบ DSB
4. ใช้อุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่า Lincompex

นอกจากนี้ผลของการจางหายแบบนี้ ยังเกิดขึ้นกับระบบที่มีทั้งคลื่นดินและคลื่นอวกาศได้ ซึ่งเวลากลางวันระดับชั้น D ในไอโอโนสเฟียร์สามารถดูดกลืนคลื่นที่ส่งขึ้นมา โดยใช้สายอากาศสำหรับความถี่ย่าง MF แต่เวลากลางคืนชั้น D หายไปทำให้คลื่นที่ส่งขึ้นไปถูกสะท้อนกลับมารบกวนกับคลื่นดิน ดังแสดงในรูป 1.34(b) พบว่าบริเวณที่คลื่นฟ้าและคลื่นดินเจอกันในเวลากลางคืนเกิดการจางหายอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นถึงการแพร่กระจายคลื่นย่าน MF ในเวลากลางวันให้ผลดีกว่าเวลากลางคืนมาก และอาจแก้ปัญหาโดยใช้สายอากาศส่งที่มีอัตราขยายค่ามากที่สุดในการส่งคลื่นดินและส่งคลื่นฟ้าด้วยกำลังต่ำที่สุด

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรูป 1.34(c) แสดงการเดินทางแบบมัลติพาธของคลื่นย่าน VHF หลังงานที่มาถึงสายอากาศรับมีจากทิศทางตรงและการสะท้อนจากวัตถุขนาดใหญ่ เช่น ยอดเขา หรือบอลลูน, เครื่องบินก็เป็นไปได้ ซึ่งถ้าวัตถุนี้ไม่อยู่กับที่ ทำให้ความแตกต่างทางเฟสเกิดขึ้นได้ (อย่างเร็วมาก) มีผลเกิดการจางหายอย่างรวดเร็วขึ้น

1.18 การใช้งานในย่านความถี่ต่าง ๆ

พอสรุปในส่วนที่น่าสนใจได้ดังนี้

- ความถี่ย่าน VLF และ LF เราต้องใช้สายอากาศที่มีกำลังส่งสูง และมีโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่ว มีการส่งแบบคลื่นดินได้ระยะหลายพันกิโลเมตร (ไม่มีจางหายของสัญญาณ) หรือใช้วิธีสะท้อนหลายครั้งระหว่างชั้นไอโอโสนเฟียร์และพื้นโลก

การใช้งานในย่านความถี่นี้มีโทรเลขระหว่างเรือกับชายฝั่ง, ระบบเดินเรือและการกระจายเสียงวิทยุ (ในย่าน LF)

- ความถี่ย่าน MF วิธีแบบคลื่นดินส่งได้ระยะน้อยลง (ประมาณหลายร้อยกิโลเมตร) และงานที่ใช้ส่วนใหญ่เกี่ยวกับการกระจายเสียงวิทยุ (647-1546 KHz) รวมทั้งการสื่อสารโทรศัพท์/โทรเลขของเรือนในย่าน 405-525 KHz และ 1.6-3.8 KHz

- ความถี่ย่าน HF มักใช้วิธีคลื่นฟ้าในการส่งได้ระยะตามระยะสกิป คลื่นย่านนี้ถูกใช้ในงานติดต่อวิทยุโทรศัพท์ระหว่างชาติ, การกระจายเสียงวิทยุและระบบสื่อสารเคลื่อนที่ของเครื่องบิน และเรือเดินสมุทร

- ความถี่ย่าน VHF หรือสูงกว่าจะใช้วิธีคลื่นอวกาศผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ส่วนย่านความถี่ SHF ต้องใช้กับงานสื่อสารดาวเทียม (อาจมีใช้วิธีสแกตเตอร์บ้าง)

งานที่ใช้มีการกระจายเสียงในย่าน VHF (88.1 - 96.8 MHz) และระบบสื่อสารเคลื่อนที่บนพื้นดิน, อากาศ และมหาสมุทรใช้ย่าน VHF กับ UHF

ส่วนงานแพร่ภาพสัญญาณโทรทัศน์ใช้ย่าน UHF และระบบโทรศัพท์ชนิดมัลติแชนแนลใช้ย่าน UHF และ SHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ (ตอนที่ 1)

2.1 บทนำ

ในระบบสื่อสารวิทยุ หรือระบบกระจายเสียง และสัญญาณโทรทัศน์ มีหลักคล้ายกันอยู่คือ การมอดดูเลทคลื่นพาหะเข้ากับสัญญาณเดิม เพื่อให้เกิดรูปแบบสัญญาณที่เหมาะในการส่งไปในชั้นบรรยากาศได้ (ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) โดยให้สายอากาศส่ง และในการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราใช้สายอากาศรับ

ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับในการใช้งานจริง ๆ คือค่ากำลังคลื่นที่เกี่ยวข้องสายอากาศนั้นต่างกันมาก

นอกจากนี้สายอากาศส่งต้องมีคุณสมบัติสำคัญคือ แม็ชกับสายนำสัญญาณเพื่อให้กำลังมากที่สุดผ่านเข้าสายอากาศ ส่วนในสายอากาศรับต้องมีค่าอัตราขยายให้มากที่สุด (รวมทั้งค่าไดเร็คติวิตี้) และมีไซด์โลบน้อยที่สุดน้อย

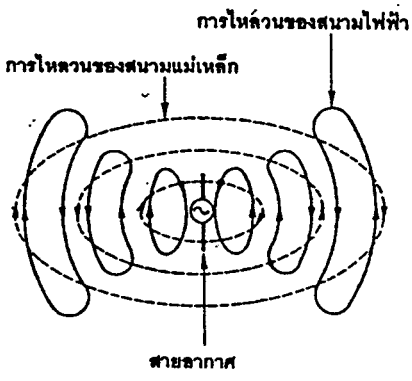
2.2 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำที่มีทิศทางตามทิศทางของกระแส ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนตามไปด้วย และจากการทดลองพบว่า สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสร้างสนามไฟฟ้าให้มีขึ้นมา (ซึ่งถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะไม่เกิดขึ้น)

ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้า พิจารณาจากกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) หรือกฎมือขวานั่นเอง ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของนั่นเอง ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้พิจารณาได้ว่า ถ้าป้องกระแสไฟสลับ (A.C.) ผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กขึ้น

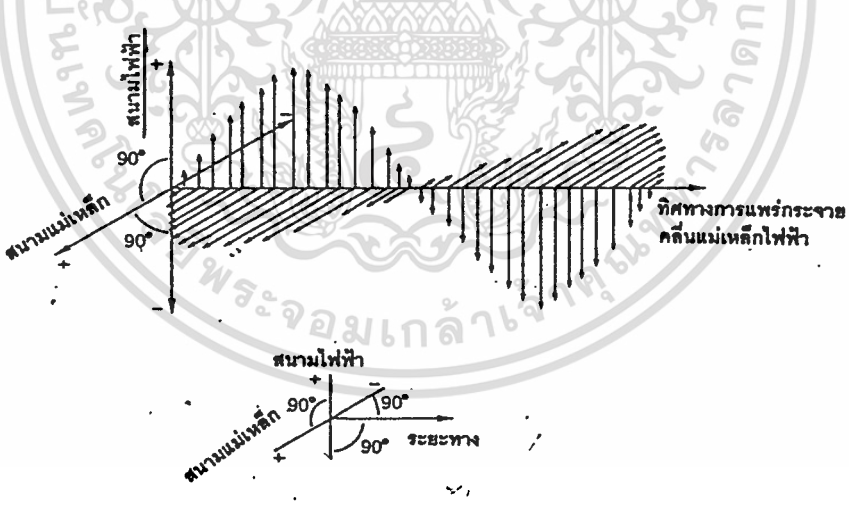
กำหนดให้ใช้กระแสรูปสัญญาณไซน์ผ่านเข้าลวดตัวนำ พบว่าทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามคลื่นไซน์ด้วย โดยทั้งสองสนามแพร่ออกจากลวดตัวนำด้วยความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที) ดังรูป 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

พลังงานที่แพร่กระจายไป มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม ในค่าความถี่เราเรียกพลังงานส่วนนี้ว่า สนามพลังงานที่แพร่กระจาย ซึ่งอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำมุมฉากซึ่งกันและกัน รวมทั้งยังทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระนาบที่มีสนามไฟฟ้า และมีทิศตามการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่าระนาบโพลาไรเซชั่นของคลื่น

ตัวอย่างเช่น ถ้าสนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบแนวดิ่ง (หรือแนวตั้ง) สนามแม่เหล็กอยู่ในระนาบแนวราบ กล่าวได้ว่าคลื่นมีโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่ง

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนคลื่นในโพลาไรเซชั่นแนวดิ่งจะเหนี่ยวนำให้ลวดตัวนำที่อยู่แนวดิ่งเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น เพราะว่ามีสนามแม่เหล็กตัวผ่านลวดตัวนำ และไม่มีผลต่อลวดตัวนำในแนวราบ

เมื่อวิเคราะห์ถึงภายในสายอากาศพบว่ามีสนามพลังงานเกิดขึ้น 2 อย่างดังนี้

- สนามพลังเหนี่ยวนำ แทนพลังงานส่วนที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศ และไม่แหร่กระจายออกไป

- สนามพลังที่แหร่กระจาย แทนส่วนที่แหร่จากสายอากาศไป ที่มีปริมาณเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความถี่ของคลื่น และเป็นสัดส่วนกลับกันของระยะทางที่ไกลจากสายอากาศออกไปพบว่า ในระยะใกล้กับสายอากาศมาก ๆ มีปริมาณของสนามพลังเหนี่ยวนำมากกว่า แต่ที่ระยะทางไกลกว่า $\frac{\lambda}{2\pi}$ จากสายอากาศนั้น ค่าสนามพลังที่แหร่กระจายมีมากกว่า (λ แทนความยาวคลื่นของสัญญาณจากสายอากาศ)

เราแทนขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามไฟฟ้า โดยใช้อักษร E

ขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามแม่เหล็ก โดยใช้อักษร H

และค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กว่าค่าอิมพีแดนซ์ของภาวะสุญญากาศ คิดจากสูตรคำนวณนี้

$$= \frac{E \text{ (โวลต์/เมตร)}}{H \text{ (แอมแปร์-รอบ/เมตร)}} = \frac{E \text{ (V/m)}}{H \text{ (At/m)}}$$

= 120π โอห์ม

= 377 โอห์ม (ค่าคงที่ใช้ในการคำนวณอื่นๆ)

โดยทั่วไป เราหาขนาดของคลื่นวิทยุในเทอมของความเข้มสนามไฟฟ้า

ตัวอย่างการคำนวณ

ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 กิโลเมตร จากสายอากาศส่งมีค่า 0.053 At/Km ให้คำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระยะ 50 กิโลเมตร จากสายอากาศส่งในทิศทางเดียวกัน

คำตอบ

จากค่าคงที่ E/H = 377 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $E = 377\ H = \frac{337 \times 0.053}{10^3} \approx 20$ mV/m

ที่ 50 km จากสายอากาศ คำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้ว่า

$E = 20/5 = 4$ mV/m (Ans.)

2.3 หลักการของสายอากาศ

สายอากาศจัดเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพิเศษได้

ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา ขนาดของขดลวด, ตัวเก็บประจุไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่น ๆ จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของค่าความถี่ที่ใช้ และพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็ยังคงอยู่ภายในวงจร เพื่อนำไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพหรือแปลงออกมาในรูปความร้อน

แต่ถ้าขนาดของตัวนำหรืออุปกรณ์มีขนาดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และถ้าวงจรนั้นถูกออกแบบให้พลังงานส่วนใหญ่ของวงจรถูกแพร่ออกไป เราแทนวงจรชนิดนี้ว่าสายอากาศ (antenna)

โดยทั่วไปสายอากาศประกอบด้วยตัวนำในหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่แล้วมักใช้ลวดตัวนำ (wire) มีบางแบบที่ใช้แท่งตัวนำ (rod) หรือท่อตัวนำ (tube)

ในบทนี้ความหมายของลวดตัวนำ "wire" หมายถึง ตัวนำชนิดที่มีขนาดของภาคตัดขวางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวของมัน

ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากลวดตัวนำ มีค่าขึ้นกับความยาวของลวดตัวนำกับขนาดของกระแสที่ไหลอยู่ภายใน นอกจากนี้ยังขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมลวดตัวนำด้วย แต่จะเป็นการสะดวกมากกว่าถ้าเราวัดในรูปของกระแส

อาจกล่าวได้ว่าความเข้มสนามเป็นสัดส่วน โดยตรงกับขนาดของกระแส ดังนั้นจึงต้องให้มีกระแสในขนาดมากเท่าที่เป็นไปได้ผ่านลวดตัวนำ เพื่อให้เกิดกำลังส่งปริมาณมากขึ้น

ในวงจรทั่วไปจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ (reactance) เป็นค่าทางเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ในวงจรกระแสสลับ

พบว่าถ้าค่ารีแอ็กแตนซ์มีน้อยลงจนหมดไป ทำให้ปริมาณกระแสในวงจรมีค่ามากที่สุดอากาศเมื่อกระแสที่ไหลผ่านที่ค่ามากที่สุด ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด หรือในอีกแง่หนึ่งเรียกว่าวงจรรีโซแนนซ์ (resonant) ที่ความถี่ใช้งาน เช่นเดียวกับกรณีของสายอากาศ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากที่สุดทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด นั่นค่าสายอากาศถูกรีโซแนนซ์

สำหรับวงจรธรรมดาแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) มักมีอยู่ในขดลวดหรือคอยล์, ค่าประจุไฟฟ้า (capacitance) มีอยู่ในตัวเก็บประจุ และค่าความต้านทานมีอยู่ในตัวต้านทาน เราเรียกวงจรลักษณะนี้ว่า มีค่าคงที่แบบเอกเทศ (lumped constant) คือแยกกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในงานหาขนาดความยาวต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งมันแทนครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

2.5 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำ

สมมุติกำหนดให้ความยาวของลวดตัวนำในสายอากาศมีค่าอนันต์พบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ตามระยะที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการจางหายของพลังงานจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวม ทั้งเปลี่ยนเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำเพราะเกิดจากความต้านทานภายในของตัวนำ

แต่ถ้าลวดตัวนำมีขนาดสั้น พบว่าคลื่นมีสะท้อนกลับที่ปลายแต่ละด้าน เช่น เดียวกับลูกบอลกระทบกำแพงกลับมา

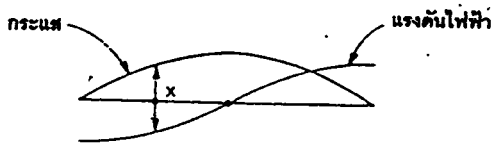
เมื่อผ่านคลื่นวิทยุในสายอากาศแบบ $\frac{1}{4}\lambda$ และแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นป้อนในแบบคลื่นรูปไซน์ ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่า

เมื่อคลื่นลูกแรกเดินทางมาถึงปลายด้านหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ ทำให้ทิศทางการไหลของกระแสเปลี่ยนไปในทิศตรงกันข้าม ขณะเดียวกับที่คลื่นลูกถัดมาเดินทางมาถึงที่ปลายลวดตัวนำพอดี ดังนั้นเราพบว่ามีเหตุการณ์น่าสนใจเกิดขึ้นคือ

- กระแสของคลื่นทั้งสองมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกันที่จุดปลายของลวดตัวนำ ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสที่จุดปลายลวดตัวนำเท่ากับศูนย์

- ถ้าพิจารณาจุดถัดมาจากปลายลวดตัวนำ พบว่าขนาดของคลื่นที่เดินทางไปกับสะท้อนกลับมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการเสริมและหักล้างของกระแสขึ้นจนพิจารณาผลลัพธ์ของกระแสได้ว่าที่ระยะ $\frac{1}{4}\lambda$ จากปลายลวดตัวนำจะมีค่าขนาดกระแสมากที่สุด

สรุปได้ว่า ในสายอากาศแบบ $\frac{1}{4}\lambda$ ขนาดของกระแส เท่ากับศูนย์ที่จุดปลายของลวดตัวนำและมีค่ามากที่สุดที่จุดตรงกลางของลวดตัวนำ ขอให้พิจารณาคำอธิบายข้างต้นได้จากรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายของกระแส และแรงดันไฟฟ้าบนลวดตัวนำขนาด $\frac{1}{4}\lambda$ ครึ่งความยาวคลื่น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในสายอากาศค่าความเหนี่ยวนำ, ค่าประจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานมีอยู่กระจายผสมไปทั่วลวดตัวนำ เราเรียกวงจรลักษณะนี้ว่ามีค่าคงที่แบบกระจาย (distributed constant) ซึ่งวงจรที่มีค่าคงที่แบบนี้มักใช้ตัวนำที่เป็นเส้นตรง และมักนิยมเรียกกันว่า วงจรลิเนียร์ (linear circuits)

2.4 รีโซแนนซ์ในวงจรลิเนียร์

ขนาดสั้นที่สุดของลวดตัวนำที่รีโซแนนซ์ ที่ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับความยาวที่เพียงพอให้สนามไฟฟ้า เดินทางจากปลายหนึ่งไปปลายอีกด้าน และกลับมาที่จุดเดิมภายในเวลาหนึ่งไซเคิล

ถ้าความเร็วที่เดินทางมีค่าเท่าความเร็วแสง คือ 299,793,077 เมตร/วินาที (หรือ 983,573,087 ฟุต/วินาที) จะได้ว่าระยะทางเดินทางไปภายในหนึ่งไซเคิลเท่ากับค่าความเร็วหารด้วยความถี่ ดังสูตรคำนวณอย่างประมาณดังนี้

$$\lambda = \frac{299,800,000}{f\,(Hz)} \quad (\text{เมตร})$$

λ (แลมด้า) คือ ความยาวคลื่น

เนื่องจากคลื่นเดินทางในลวดตัวนำสองครั้ง (ไป – กลับ)

ดังนั้นขนาดความยาวของลวดตัวนำ ที่เดินทางได้ระยะทางเท่ากับ λ ในหนึ่งไซเคิลมีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ หรือครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

กล่าวได้ว่า ลวดตัวนำรีโซแนนซ์ขนาดสั้นที่สุด มีค่าความยาวเท่ากับ 1/2 λ ในกรณีของสายอากาศ เมื่อพิจารณาอย่างถี่ถ้วนจะพบว่าความเร็วแสงเป็นค่าคงที่แน่นอน

ดังนั้นจึงมีทางเลือก 2 วิธี คือ

- ปรับค่าความถี่ให้เข้ากับความยาวของลวดตัวนำที่กำหนดมา
- ปรับความยาวของลวดตัวนำให้เข้ากับความถี่ที่ใช้งานในทางปฏิบัติแล้ว การปรับความยาวลวดตัวนำนิยมใช้กันมากกว่า

ดังนั้นสูตรคำนวณหาขนาดความยาวลวดตัวนำ คิดจากการหาร 2 กับสมการข้างต้น

จะได้ $1 = \frac{491.8}{f(MHz)}$ (ฟุต)

หรือ $1 = \frac{149.9}{f(MHz)}$ (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทึบแทนลวดตัวนำ

จากรูปเส้นโค้งที่ระบุเป็น "กระแส" เราเรียกว่าคลื่นนิ่ง หรือสแตนดิ้งเวฟ (standing wave) ของกระแสที่มีรูปร่างเป็นครึ่งหนึ่งของคลื่นไซน์

สำหรับแรงดันไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมต่างจากกระแสไป คือ ที่ปลายทั้งสองของลวดตัวนำจะมีค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด แต่คนละขั้นและถัดมา $\frac{1}{4}\lambda$ จากปลายแต่ละด้าน พบว่ามีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้างกัน ทำให้ผลลัพธ์ที่จุดนี้เท่ากับศูนย์

ทำให้สรุปทั้งหมดได้ว่า

- แรงดันไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดในจุดที่กระแสมีค่าน้อยที่สุด
- ขั้วของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนทุก ๆ ความยาว 1/2 λ

ส่วนจุดที่คลื่นนิ่งมีมากที่สุด เรียกว่าลูป(Loop)หรือแอบตี้โนด (antinode) และจุดที่มีค่าน้อยที่สุดเรียกว่า โนด (node)

2.6 การเกิดฮาร์โมนิก

กรณีที่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นที่ปลายลวดตัวนำ เราค้นพบว่าจำนวนของคลื่นนิ่งเท่ากับจำนวนเท่าของความยาวลวดตัวนำในหน่วยครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

อย่างเช่น ถ้าลวดตัวนำมีความยาวขนาด 2 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda \times \frac{1}{2}\lambda$) จะมีจำนวนคลื่นนิ่งเท่ากับ 2 หรือลวดตัวนำมีความยาว 3 เท่าของเครื่องความยาวคลื่น ($3 \times \frac{1}{2}\lambda = \frac{3}{2}\lambda$) จะมีจำนวนคลื่นนิ่งเท่ากับ 3 (ดูได้จากรูป 2.4)

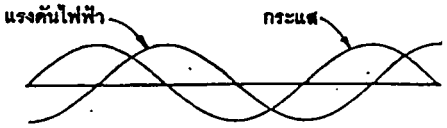
การที่มีลวดตัวนำยาวขึ้น (เป็นจำนวนเท่าของ $\frac{1}{2}\lambda$) พบว่าจะรีโซแนนซ์ที่ความถี่ค่าเดียวกับลวดตัวนำขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ เหมือนเดิม และเรียกรีโซแนนซ์ที่เกิดกับสายอากาศขนาดยาว 2 เท่าหรือมากกว่าของครึ่งความยาวคลื่นว่า Harmonically resonant

ทำนองเดียวกัน จำนวนของฮาร์โมนิกเท่ากับจำนวนของคลื่นนิ่ง

อย่างเช่น ลวดตัวนำยาว 2 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น จะทำงานได้ที่ฮาร์โมนิกลำดับที่สอง (second harmonic) เป็นต้น

การเกิดฮาร์โมนิกบนลวดตัวนำ แสดงได้ในรูป 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดฮาร์โมนิกบนลวดตัวนำที่ยาว 3 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น

2.7 ความยาวทางไฟฟ้า (Electrical length)

ในงานสายอากาศ เราพิจารณาความยาวของสายอากาศออกเป็น 2 อย่างคือ

- ความยาวทางกายภาพ (ความยาวจริง ๆ - physical length)
- ความยาวทางไฟฟ้า

เรามีหลักอยู่ว่า เมื่อค่าความถี่ในการใช้งานเปลี่ยนไป ค่าความยาวทางกายภาพของสายอากาศจะไม่เปลี่ยน แต่ค่าความยาวทางไฟฟ้าจะเปลี่ยน

ตัวอย่างเช่น ในการใช้งานที่ความถี่ 300 MHz ของสายอากาศแบบ $\frac{1}{2}\lambda$ พบว่ามีความยาวกายภาพเท่ากับ 50 cm ($\frac{\lambda}{2}$ = 50 cm) แต่ถ้าความถี่ในการใช้งานเปลี่ยนเป็น 600 MHz พบว่า $\frac{\lambda}{2}$ = 25 cm นั่นคือความยาวทางไฟฟ้าเปลี่ยนเป็น (จากเดิมที่ค่าความยาวทางไฟฟ้าเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$)

ฉะนั้นวิธีแก้อาจตัดความยาวจริงให้เหลือ 25 cm ก็ได้ ขอยกตัวอย่างเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น

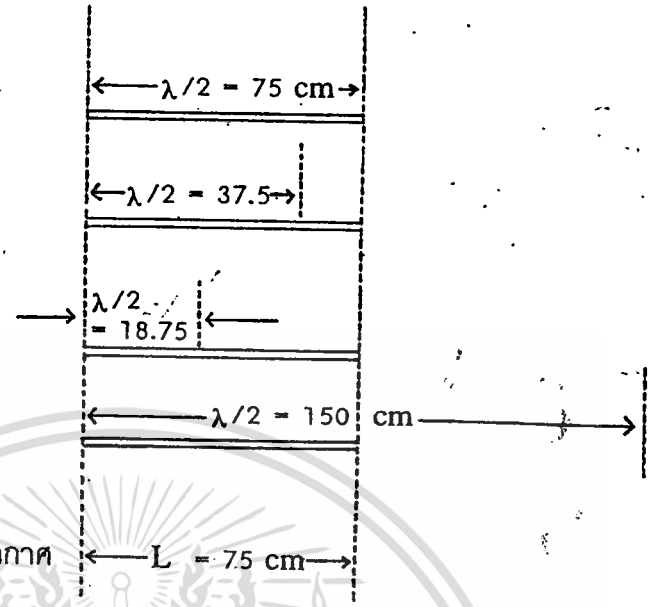
ให้คำนวณจากสูตร $V = f\lambda$

โดย V = ความเร็วของคลื่นวิทยุ = 3×10^8 m/s

กำหนดหนดความถี่ใช้งานมี 200 MHz, 400 MHz, 800 MHz และ 100 MHz พิจารณาความยาวทางไฟฟ้าและความยาวทางกายภาพได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ (MHz)	ความยาวทางไฟฟ้า	ความยาวทางกายภาพ
200	λ/2	λ/2 = 75 cm
400	λ	λ/2 = 37.5
800	2 λ	λ/2 = 18.75
100	λ/4	λ/2 = 150 cm



L = ความยาวทางกายภาพของสายอากาศ ←L = 75 cm→

จากข้างต้นเป็นสายอากาศต้นเดียวกัน แต่นำไปใช้ในความถี่ที่ต่างกันเห็นได้ว่าในแต่ละความถี่จะให้ความยาวทางไฟฟ้าต่างกัน ส่วนความยาวทางกายภาพคงที่เราสามารถกำหนดเงื่อนไขได้ 2 อย่าง คือ

- ให้ความยาวทางกายภาพคงที่ (75 cm) พบว่าความยาวทางไฟฟ้าเปลี่ยนตามความถี่
- ให้ความยาวทางไฟฟ้าคงที่ (λ/2) พบว่าความยาวทางกายภาพเปลี่ยนได้โดยการตัดออกหรือต่อเพิ่ม

ในทางปฏิบัติแล้ว เราไม่นำค่าความยาวทางไฟฟ้าไปตัดท่อตัวนำเพื่อทำสายอากาศ หรือนำไปตัดสายนำสัญญาณ เพราะว่าหากนำค่าตัวเลขนี้ไปตัดที่ค่าหนึ่งแล้ว ผลลัพธ์ที่ออกมาคือสายอากาศนั้นจะรีโซแนนซ์ที่ค่าความถี่ต่ำกว่าที่เราคิดอย่างเช่น เราต้องการสร้างสายอากาศไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น ที่ความถี่ 200 MHz จะพบว่าสายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่ความถี่น้อยกว่านี้เช่นที่ 193 MHz

ดังนั้นทางแก้ คือ ตัดให้สั้นกว่าค่าความยาวทางไฟฟ้าที่ 200 MHz ลงไปเล็กน้อยที่นี้เกิดคำถามขึ้นว่า "จะสั้นกว่าเดิมไปเท่าไร จึงให้ผลดี?" มีการทดลองจนค้นพบว่า ต้องนำค่าคงที่ค่าหนึ่ง (สำหรับตัวนำแต่ละแบบ) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เช่น 0.971 หรือ 0.88 เป็นต้น นำไปคูณกับค่าความยาวทางไฟฟ้า ทำให้ได้ค่าความยาวจริง ๆ ของสายอากาศออกมา คือ ความยาวทางกายภาพ

ค่าคงที่นี้เรียกว่า ค่า k ซึ่งจะอธิบายถึงวิธีคำนวณในตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\# หมายเหตุ ตัวอย่างคำนวณข้างต้นที่ผู้เขียนนำมาอธิบายไม่ได้คิดคำนึงถึงค่า k ด้วยมีจุดประสงค์ให้เกิดความเข้าใจในความแตกต่างของค่าความยาวทั้งสองสองแบบนี้

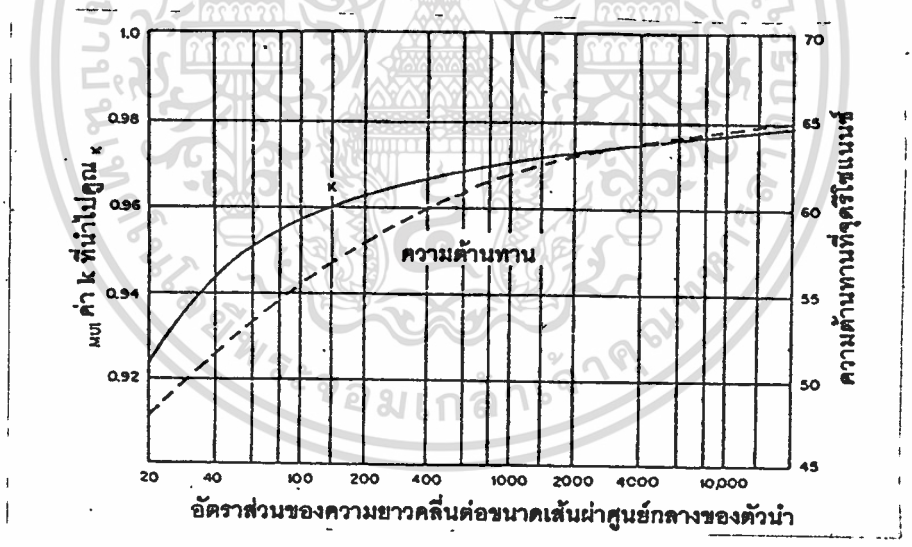
2.8 ความยาวจริงของสายอากาศแบบครึ่งความยาวคลื่น (Half-wave)

ในทางปฏิบัติ พบว่าความยาวจริงของสายอากาศมีค่าน้อยกว่าความยาวทางไฟฟ้าอยู่เล็กน้อย แสดงถึงสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟจะมีค่าความยาวจริงไม่เท่ากับค่าครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda/2$) เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่สุด หรือเกิดรีโซแนนซ์

ความยาวจริงของสายอากาศที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ค่าความถี่ใช้งานพอดี จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความยาวของตัวนำต่อค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง (diameter) ของตัวนำ

เห็นได้ว่าถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยลง (ใช้ตัวนำหนาขึ้น) มีผลให้ความยาวของสายอากาศจะลดลงที่ความถี่ใช้งาน

พิจารณาจากกราฟในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟของค่า k

จากรูปค่า k นี้นำไปคูณกับความยาวทางไฟฟ้า เพื่อหาความยาวจริงของสายอากาศที่เกิดรีโซแนนซ์พอดี

โดยที่ค่า k คือ อัตราส่วนของหนึ่งความยาวคลื่น (ในภาวะสุญญากาศ) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ เขียนอักษรย่อว่า $\frac{\lambda}{dia}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทึบโค้งในกราฟเป็นผลคำนวณจากทฤษฎีที่ช่วยให้เราหาความยาวจริงของสายอากาศได้ และต้องใช้กับท่อตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันตลอดด้วย

สำหรับค่า $\frac{\lambda}{dia}$ ที่ประมาณ 20,000 ขึ้นไป ค่า k เปลี่ยนไปน้อยมากมีการประมาณกันว่า สายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ โดยใช้ลวดตัวนำทำขึ้นจะมีความยาวจริงสั้นกว่าอยู่ 2% ของค่า $\frac{\lambda}{2}$ ที่ความถี่ใช้งาน

ผลของค่า k จะเห็นได้ชัดที่ค่าอัตราส่วนเท่ากับ 200 หรือน้อยกว่านั้น ตัวอย่างเช่น สายอากาศสร้างจากท่อโลหะกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว เพื่อใช้ในความถี่ 144 MHz จะมีค่า k ประมาณ 80 ทำให้ความยาวจริงของสายอากาศสั้นกว่าอยู่ 5 % ของค่า $\frac{\lambda}{2}$ ที่ความถี่นี้

ถ้าสายอากาศทำจากแท่งโลหะตันหรือท่อกลมที่ไม่มีการต่อฉนวนที่ปลายทั้งสองข้างแล้ว มีสูตรคำนวณหาความยาวจริงของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟดังนี้

$$\text{ความยาวจริง (ฟุต)} = \frac{491.8 \times k}{f\ (MHz)}$$

$$\text{หรือความยาวจริง (นิ้ว)} = \frac{5902 \times k}{f\ (MHz)}$$

ค่า k ที่ใช้กันในปัจจุบันมีมาตรฐานอยู่หลายอย่าง แตกต่างกันไป สำหรับในหนังสือเล่มนี้ยึดแนวค่า k ของสมาคมนักวิทยุสมัครเล่นอเมริกา (จาก ARRL) เป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีของสมาคมนักวิทยุสมัครเล่นอังกฤษ (RSGB) ที่ผู้เขียนเห็นว่าเป็นมาตรฐานที่เชื่อถือได้ดี

2.9 ปรากฏการณ์เอนด์ เอฟเฟ็กต์ (End Effect)

มีอยู่กรณีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ ในสายอากาศแบบลวดตัวนำ ถ้ามีการใช้ฉนวน เช่น ลูกยางกันน้ำ หรือจุกยางปิดที่ปลายทั้งสองข้างของลวดตัวนำ มีผลทำให้สายอากาศรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่ใช้งานลงมาเล็กน้อย อาจทำให้อัตราขยายของสายอากาศต่ำลงกว่าที่ควรเป็นทำให้บางครั้งผู้ใช้งานคิดว่าคำนวณความยาวของสายอากาศผิดไป

คำอธิบายของเรื่องนี้คือ ฉนวนที่ใส่เข้าไปเป็นการเพิ่มค่าประจุไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยให้กับระบบ มีผลช่วยจูนสายอากาศในรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำลงมาจากเดิม (เหมือนกับการเพิ่มค่า C ในวงจรจูนทั่วไป) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เอนด์ เอฟเฟ็กต์ ซึ่งมีผลให้ค่ากระแสที่ปลายสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศไม่ใกล้ศูนย์ (ในทางทฤษฎีต้องเท่ากับศูนย์) และจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ความถี่สูงขึ้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ฉนวนในลักษณะนี้

2.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

จากคำอธิบายเบื้องต้นเกี่ยวกับการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ในสายอากาศในตอนแรกนั้นได้ระบุว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ (หรือในอีกแง่คือ กระแสมีค่ามากที่สุด)

แต่ถ้าเจาะลึกไปมากกว่านี้ กล่าวได้ว่าระดับแรงดันแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด (เข้าใกล้ศูนย์) เพราะถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์จริง แสดงถึงวงจรนั้นไม่มีค่าความต้านทานเลยแม้แต่น้อยนั่นคือจะไม่มีพลังงานแพร่กระจายมาจากสายอากาศได้ เพราะวงจรที่ไม่มีความต้านทานอยู่จะเป็นเพียงการส่งผ่านพลังงานเท่านั้น

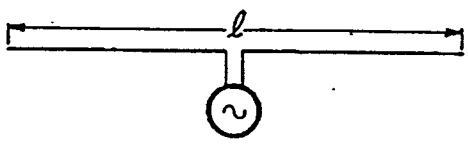
สายอากาศ เราสามารถเปรียบเป็นวงจรไฟฟ้าได้ ที่มีคุณสมบัติคือต้องใช้พลังงาน ดังนั้นกระแสที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศควรถูกจายด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าหนึ่ง

คิดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างง่ายคือ เท่ากับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายผ่านขั้วต่อ หารด้วยปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขั้วเช่นกัน

โดยถ้ากระแสและแรงดันไฟฟ้า มีลักษณะเฟสเหมือนกันทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าความต้านทาน จัดเป็นกรณีที่สายอากาศรีโซแนนซ์

แต่กรณีที่กระแสและแรงดันไฟฟ้ามีเฟสต่างกัน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่ารีแอ็กแตนซ์เพิ่มขึ้นมาจากค่าความต้านทานด้วย ทำให้สายอากาศไม่รีโซแนนซ์

ลองสมมุติให้ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เข้าที่ตัวนำบริเวณจุดกึ่งกลางของสายอากาศดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงสายอากาศที่มีจุดฟีด (feed point) ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสาร... ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา... ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ คำว่า ฟีด (feed) หมายถึง การจ่ายสัญญาณอินพุทให้วงจร, สายนำสัญญาณหรือสายอากาศ

ส่วนฟีดเดอร์ (feeder) หมายถึง สายนำสัญญาณที่ใช้ระหว่างเครื่องส่งกับสายอากาศ การเลือกจุดต่อแหล่งจ่ายสัญญาณต่างกัน จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกันด้วยพิจารณาได้จากรูป 2.3 ที่แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากับกระแส (คือค่าอิมพีแดนซ์) มีค่าแตกต่างกันตามจุดต่าง ๆ บนสายอากาศ

ดังนั้นเพื่อป้องกันมิให้สับสนมาก เราจึงเลือกจุดกึ่งกลางของสายอากาศเป็นการอ้างอิง

2.11 การพิจารณาสายอากาศเป็นวงจร

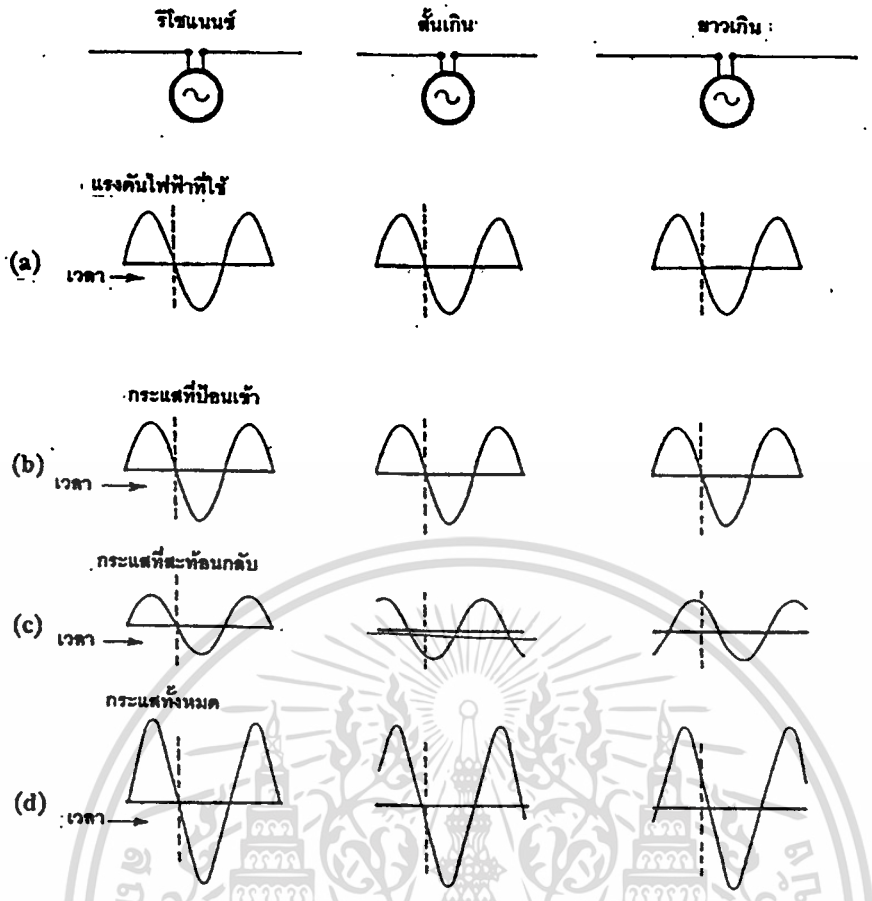
ถ้าค่าความถี่ที่ป้อนให้จุดตรงกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟมีค่ามากหรือน้อยกว่าความถี่รีโซแนนซ์ มีผลให้คุณสมบัติของสายอากาศมีลักษณะไม่เหมือนกัน

- อย่างกรณีเกิดรีโซแนนซ์ พบว่ากระแสมีเฟสเท่ากันกับแรงดันไฟฟ้า
- กรณีใช้ความถี่ต่ำกว่าค่ารีโซแนนซ์ พบว่าเฟสของกระแสนำหน้าเฟสของแรงดันไฟฟ้า ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเป็นค่าประจุไฟฟ้า (capacitance)
- กรณีใช้ความถี่สูงกว่าค่ารีโซแนนซ์ พบว่าเฟสของกระแสตามหลังเฟสของแรงดันไฟฟ้า ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเป็นค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance)

ขอให้พิจารณาในรูป 2.7 ที่แสดงรูปแบบต่าง ๆ โดยให้มี 3 ลักษณะคือ

- ความยาวของสายอากาศเกิดรีโซแนนซ์พอดี
- ความยาวของสายอากาศสั้นเกินไป
- ความยาวของสายอากาศมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงกระแสในสภาวะรีโซแนนซ์และไม่รีโซแนนซ์

จากรูปแต่ละกรณี ป้อนแรงดันไฟฟ้าเหมือนกันหมด ดังรูป (A) และกระแสที่ป้อนเข้าสายอากาศมีลักษณะดังรูป (B) ให้สังเกตว่าทั้งกระแส (B) และแรงดันไฟฟ้ามีเฟสเหมือนกัน (ไม่ว่าความยาวของสายอากาศเป็นเท่าไหร่)

พิจารณาทีละกรณีได้ดังนี้

- กรณีสายอากาศรีโซแนนซ์

พบว่าเฟสของกระแสมีการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

- กระแสเดินทางจากปลายข้างหนึ่งไปอีกปลาย เฟสเปลี่ยนไป 90° ($\lambda/2$)

- กระแสที่สะท้อนกลับมาจากปลายหนึ่งไปจนถึงอีกข้าง เฟสเปลี่ยนไป 90° (คิดเฉพาะ-ตอนกลับ)

ผลรวมทางเฟสของกระแสที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากเดินทางไป-กลับภายในสายอากาศเท่ากับ 180°

และยังมีการเปลี่ยนเฟสไปอีก 180° เนื่องจากทิศทางของกระแสเปลี่ยนกลับตรงข้ามที่ปลายสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ผลรวมทั้งหมดทางเฟสที่เปลี่ยนไปของกระแสในการเดินไป-กลับ คือ 360° แสดงว่ากระแสส่วนที่สะท้อนกลับกับกระแสอินพุทมีเฟสเหมือนกัน (ดังรูป (C) แสดงสัญญาณกระแสสะท้อนกลับ)

ผลรวมทั้งหมดของกระแสภายในสายอากาศ แสดงดังรูป (D)

สรุปได้ว่า กรณีสายอากาศรีโซแนนซ์เป็นการที่รูปสัญญาณของผลรวมกระแสทั้งหมดกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า มีเฟสเหมือนกันทุกประการ และโหลด (สายอากาศ)ถูกพิจารณาจากแหล่งป้อนหลังงานว่าเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียว

-กรณีสายสั้นเกินไป (ที่จะเกิดรีโซแนนซ์)

เฟสที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างจากกรณีแรก เพราะว่ารูปสัญญาณของกระแสที่สะท้อนมาถึงจุดเดิมเร็วกว่าเดิม เนื่องจากระยะเฟสน้อยกว่า 90° ($\lambda/2$) ทำให้การเดินทางทั้งไป-กลับจะมีค่าเฟสที่เปลี่ยนไปน้อยกว่า 180° แสดงถึงค่าสูงสุดของกระแสที่สะท้อนมาเกิดก่อนค่าสูงสุดของกระแสที่เดินทางไป (ความจริงควรเกิดพร้อมกัน) และเมื่อรวมกับการกลับเฟส เนื่องจากเปลี่ยนทิศทางอีก 180° แล้ว พบว่าผลรวมทั้งหมดของเฟสที่เปลี่ยนไปมีค่าน้อยกว่า 360° [ดังรูป (C)] และให้ผลรวมทั้งหมดของกระแสดังรูป (D)

สรุปได้ว่า ผลรวมของกระแสมีรูปสัญญาณนำหน้า (ทางเฟส) กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนทำให้โหลด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาเป็นค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่าประจุไฟฟ้า

- กรณีสายอากาศยาวเกินไป (ที่จะเกิดรีโซแนนซ์)

พบกระแสที่สะท้อนกลับมาถึงจุดเดิมช้ากว่ากรณีปกติ เพราะว่าระยะเฟสมากกว่า 180° (ไป-กลับ) ทำให้ค่ามากที่สุดของกระแสสะท้อน เกิดหลังค่ามากที่สุดของกระแสที่เดินทางไป ดังรูป (C)

ผลรวมทั้งหมดของกระแสมีรูปสัญญาณตามหลัง (ทางเฟส) กับแรงดันไฟฟ้าทำให้โหลด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาเป็นค่าความต้านทานต่อขนาดกับค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ยังมีอีกประเด็นที่น่าสนใจ คือ ถ้าความยาวสายอากาศเพิ่มระยะเฟสเป็น 180° (λ) จะมีความยาวทางเฟสของการเดินทาง ไป-กลับ เท่ากับ 360° บวกกับการเปลี่ยนทิศตรงข้ามอีก 180° รวมการเปลี่ยนเฟสทั้งหมด 540° (มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนเฟสไป 180°)

ในกรณีอย่างนี้ กระแสที่สะท้อนกลับกับกระแสเดิมเกิด เฟสต่างกันหมด ทำให้ผลรวมของกระแสเหลือน้อยมาก (หักล้างกัน) แต่ค่ากระแสที่เหลือนี้ยังมีเฟสเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกลับมาเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียวอีกครั้งและความต้านทานในลักษณะแบบนี้มีค่าสูงมาก ทำให้เปรียบสายอากาศเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน (parallel - resonant circuit) ได้

ส่วนขนาด (แอมปลิจูด) ของกระแสที่สะท้อนกลับ เมื่อเปรียบเทียบกับของเดิมแล้วพบว่ามีขนาดลดลง เนื่องการสูญเสียพลังงานในการเดินทางไป-กลับภานในลวดตัวนำ

2.12 ค่าความต้านทาน

พลังงานที่เราป้อนเข้าสายอากาศ พบว่าถูกนำไปใช้ 2 อย่าง คือ

- การแพร่กระจายคลื่นวิทยุออกอากาศ
- การสูญเสียเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำ

โดยพลังงานที่นำคลื่นวิทยุออกอากาศจัดเป็นการใช้ประโยชน์ แต่ส่วนที่เปลี่ยนเป็นความร้อนจัดเป็นการสูญเปล่า

ถ้าเรากำหนดให้สูตรการใช้พลังงานจาก $P = I^2 R$

ดังนั้นกรณีของการสูญเสียความร้อน ค่า R เป็นค่าความต้านทานจริง ส่วนกรณีของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ค่า R เป็นค่าความต้านทานสมมุติที่อาจแทนด้วยตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากันได้ เราเรียกความต้านทานนี้ว่า ความต้านทานการแพร่คลื่น radiation resistance

เพื่อป้องกันการสับสน กำหนดสูตรให้ $P = I^2 (R_o + R)$

โดย R_o แทนค่าความต้านทานจริง หรือ ohmic resistance

R แทนค่าความต้านทานสมมุติ หรือ radiation resistance

ในทางปฏิบัติสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ ค่าพลังงานสูญเสีย เนื่องจากความร้อนภายในลวดตัวนำมีค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่าทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ ทั้งนี้เกิดจากค่าความต้านทานจริงมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานการแพร่คลื่น

นอกจากนี้ถ้าสายอากาศไม่มีสิ่งกีดขวางรอบตัว และไม่ใกล้พื้นโลกเกินไป เราสามารถละความต้านทานจริง (ohmic resistance) ได้ และค่าความต้านทานทั้งหมดของสายอากาศที่จุดฟีดเท่ากับค่าความต้านทานการแพร่คลื่นอย่างเดียว

การวัดค่าความต้านทานการแพร่คลื่นกระทำที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ โดยมีเงื่อนไขเกี่ยวข้องดังนี้

- ตำแหน่งของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งของหรือวัตถุรอบตัว โดยเฉพาะพื้นโลก
- อัตราส่วนของหนึ่งความยาวคลื่นต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ $\left(\frac{\lambda}{dia}\right)$ ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

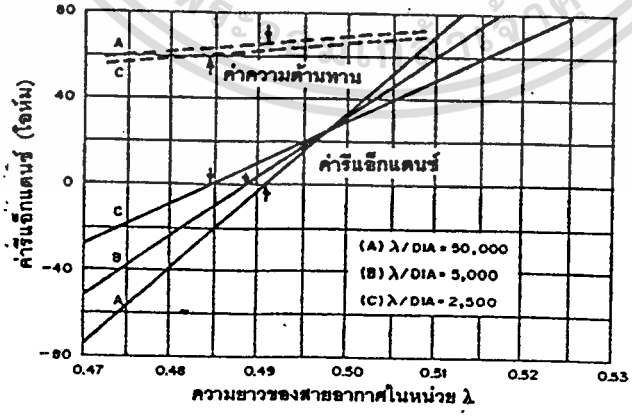
เราพบว่าในสภาวะสุญญากาศ ค่าความต้านทานการแหร่คลื่นของตัวนำมีค่าประมาณ 73 โอห์ม และยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ λ /dia อีก ดังแสดงตามเส้นประในรูปที่ 2.5 ซึ่งพอสรุปได้ว่า ถ้าสายอากาศถูกสร้างให้มีขนาดหนาขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานการแหร่คลื่นมีค่าลดลง

โดยทั่วไปสายอากาศที่ทำจากลวดตัวนำมีค่าความต้านทานการแหร่คลื่นประมาณ 65 โอห์ม ส่วนที่ทำจากแท่งเหล็กหรือท่อตัวนำจะมีค่าระหว่าง 55 และ โอห์ม

ค่าความต้านทานการแหร่คลื่นในการใช้งานจริง (จากค่าประมาณ 50 โอห์มหรือมากกว่า) จะมีผลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพการแหร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งมาจากค่า ohmic resistance มีค่าเพียง 1 โอห์มในช่วงนี้ จนค่าความต้านทานการแหร่คลื่นลดลงต่ำกว่า 10 โอห์ม ค่าความต้านทานจากความร้อนจะมีผลกระทบขึ้นมาทันที อาจพบในกรณีที่สายอากาศต่อกันเป็นแผง หรืออาร์เรย์

ค่าความต้านการแหร่คลื่นของสายอากาศทำหน้าที่ เหมือนโหลดให้กับเครื่องส่งหรือสายนำสัญญาณที่ต่อจากเครื่องส่งกับสายอากาศ ซึ่งค่านี้มีความสำคัญมากในการพิจารณาถึงคุณภาพในการรับ/ส่ง คลื่น

จากที่กล่าวว่าค่าความต้านทานนี้ขึ้นกับความยาวของสายอากาศกับอัตราส่วน λ /dia ถ้าสายอากาศใช้ตามความยาวขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ พบว่าค่าความต้านทานนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยต่อความยาวที่เปลี่ยน ดังเส้นประในรูป 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟของค่าความต้านทานและรีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศที่มีจุดฟีดอยู่กึ่งกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นมีค่าลดลงเมื่อสายอากาศมีความยาวสั้นลง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสายอากาศมีความยาวมากขึ้น

2.13 ค่ารีแอ็กแตนซ์

การเพิ่มของค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศในขณะที่ความยาวสายอากาศเพิ่มจากจุดรีโซแนนซ์ยังขึ้นกับอัตราส่วน λ /dia ของตัวนำที่ใช้ด้วย และพบจากกราฟเส้นทึบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่านี้มีมากกว่าค่าความต้านทานการแพร่คลื่น

กล่าวสรุปจากกราฟว่า ถ้าตัวนำมีขนาดหนาขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์เกิดน้อยลง เทียบกรณี (c) และ (a) ดูจุดที่เส้นทึบแต่ละกรณีตัดกับแกนศูนย์ (แสดงที่จุดมีลูกศรชี้) เราพิจารณาเป็นการที่สายอากาศในแต่ละค่าอัตราส่วน λ /dia เกิดรีโซแนนซ์ได้

ผลจากอัตราส่วน λ /dia ที่มีต่อค่ารีโซแนนซ์ คือ ค่า /dia มีน้อยลงเท่าใดมีผลให้ความยาวของสายอากาศที่เกิดรีแอ็กแตนซ์เท่ากับศูนย์ (รีโซแนนซ์) มีขนาดสั้นลง

คุณสมบัติของสายอากาศที่มีต่ออัตราส่วน λ /dia ที่มีค่าต่างกัน เราพออธิบายเทียบได้กับพฤติกรรมของวงจรรีโซแนนซ์ทั่วไปที่มีค่า Q แตกต่างกัน

กล่าวคือ เมื่อค่า Q ของวงจรมีค่าต่ำ ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์มีค่าน้อย และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ ในกรณีค่า Q ของวงจรมีค่าสูง ผลที่ได้จะตรงข้ามกับข้างต้น

ดังนั้นพอวาดกราฟตอบสนองของวงจรกรณีค่า Q ต่ำ ได้มีลักษณะ "กว้าง" ส่วนกรณีค่า Q สูง จะมีลักษณะ "แคบ"

เช่นเดียวกันกับสายอากาศที่เราพบว่าสายอากาศที่มีขนาดหนา (ตัวนำ) จะสามารถทำงานตอบสนองต่อความถี่ได้ในแถบความถี่กว้าง ขณะที่ขนาดบางอย่างจะทำงานในช่วงแถบความถี่แคบ ทำให้เทียบค่า Q ของสายอากาศแบบหนาว่ามีค่าต่ำ และค่า Q ของสายอากาศแบบบางว่ามีค่าสูง

2.14 การคัปเปิลสายอากาศ

ความหมายของคัปเปิล (couple) ในทางไฟฟ้า คือ การต่อวงจร 2 ชุด เข้าด้วยกัน เพื่อให้ส่งสัญญาณจากวงจรหนึ่งไปอีกวงจรได้ โดยอาจผ่านทางลวดตัวนำ, ตัวต้านทาน, ทรานฟอร์เมอร์, คาปาซิเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางไฟฟ้าเมื่อมีวงจรจูน (tuned circuit) เดี่ยว ๆ ค่า Q ของวงจร และค่าอิมพีแดนซ์จะคิดจาก ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ค่าประจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานภายในวงจรนั้น แต่ถ้าเรามีการต่อหรือคัปเปิลวงจรจูน 2 ชุด ด้วยกัน ค่า Q และค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนไป

ในทำนองเดียวกับการคัปเปิลสายอากาศตั้งแต่ 2 หรือมากกว่านั้น โดยวางใกล้กันในระยะไม่กี่ความยาวคลื่น (หรือน้อยกว่านี้) สายอากาศแต่ละอันในกรณีนี้เรียกว่า อีลีเมนท์ (element) เราพบว่าค่ารีโซแนนซ์และความต้านทานการแพร่คลื่นของแต่ละอีลีเมนท์จะเปลี่ยนไปเนื่องจากการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นภายในทั้งหมด

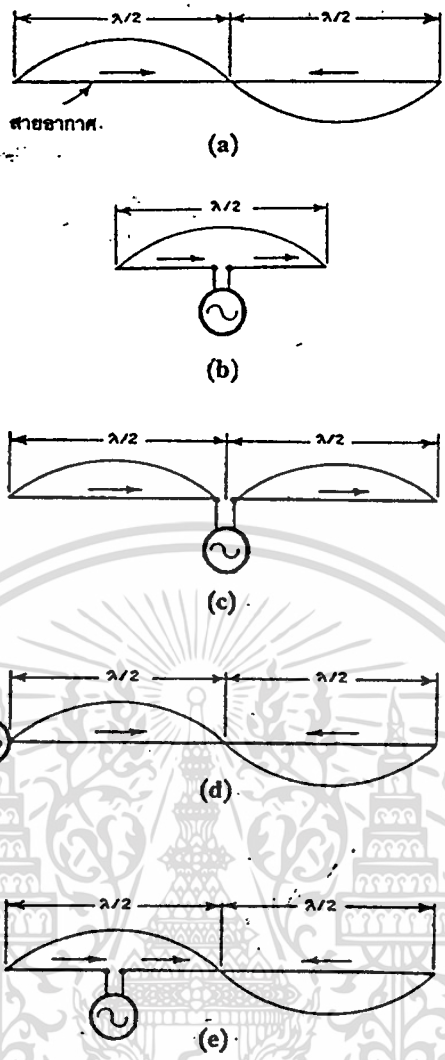
ตัวอย่างของสายอากาศที่มีการคัปเปิลอีลีเมนท์ ได้แก่ แบบยากิ และแบบไดรเว่นอาร์เรย์ เป็นต้น การวิเคราะห์สายอากาศที่ถูกคัปเปิลอีลีเมนท์จะยากกว่าเดิม และอาจใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณด้วย

2.15 การใช้งานสายอากาศในช่วงฮาร์โมนิก

สายอากาศที่ถูกใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกของความถี่พื้นฐาน จะมีคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่เหมือนกับสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ที่ได้อธิบายไปก่อนหน้าแล้ว

ประเด็นที่น่าสใจในการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก คือ มีการกลับทิศทางไหลของกระแสในทางระยะ $\lambda/2$ ของสายอากาศ ซึ่งพิจารณาได้จากรูป 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงการต่อจุดฟีดที่ระยะต่าง ๆ และทำให้การไหลของกระแสเปลี่ยนไปในสายอากาศ

จากรูปที่ 2.9 (a) เส้นโค้งแสดงคลื่นนิ่งที่เกิดจากกระแสในลวดตัวนำโดยเส้นโค้งบนเส้นทึบคือ กระแสที่ไหลในทิศทางหนึ่ง ส่วนเส้นโค้งใต้เส้นทึบแสดงกระแสที่ไหลในทิศตรงข้าม สรุปว่าทิศทางการไหลของกระแสบนลวดตัวนำยาว $\lambda/2$ จะกลับทิศกันในช่วง $\lambda/2$ ต่อไป

สำหรับสายอากาศในรูป 2.9 (a) มีความยาวเท่ากับ 1 ละใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกลำดับที่สอง (second harmonic)

ขอให้พิจารณาสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ที่แสดงในรูป 2.9 (b) มีการต่อจุดฟีดสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของสายอากาศ พบว่ากระแสไหลในทิศทางเดียวกันทั้งสองด้านของจุดฟีด ถ้าเพิ่มความยาวของลวดตัวนำแต่ละด้านของจุดฟีดให้เป็น $\lambda/2$ ดังแสดงในรูป 2.9 (c) พบว่ากระแสในส่วนด้านซ้ายและขวามือมีทิศทางเดียวกัน[เหมือนกับกรณีรูป 2.9(b)] แต่การไหลของกระแสไม่เหมือนกับรูป 2.9 (a) ถึงแม้ว่าความยาวของลวดตัวนำทั้งในรูป 2.9 (a) และ (c) จะเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันก็ตาม และสายอากาศในรูป 2.9 (a) ถูกใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกให้ดีนั้น จำเป็นต้องมีจุดฟีดสัญญาณที่จุดเหมาะสมบนลวดตัวนำ ซึ่งวิธีที่ติดจุดฟีดมี 2 แบบ ดังรูป 2.9 (c) ไม่ใช่

ดังนั้นพอมีแนวคิดว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิกให้ดีนั้น จำเป็นต้องมีจุดฟีดสัญญาณที่จุดเหมาะสมบนลวดตัวนำ ซึ่งวิธีที่ติดจุดฟีดมี 2 แบบ ดังรูป (d) และ (e) ในรูป 2.9

กรณีที่เราจ่ายสัญญาณเข้าที่จุดปลายใดด้านหนึ่ง[ดังรูป 2.9(e)] ทิศทางการไหลของ $\lambda/2$ ส่วนใดส่วนหนึ่ง[ดังรูป 2.9(e)] ทิศทางการไหลของกระแส เหมือนกับกรณีข้างต้น

สรุปได้ว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก เราควรจ่ายสัญญาณเข้าที่จุดปลายใดปลายหนึ่งหรือจุดที่เป็นกระแสลูป (มีขนาดมากที่สุด)

2.16 ความยาวของสายอากาศในการใช้ช่วงฮาร์โมนิก

ความหมายกายภาพของสายอากาศในย่านฮาร์โมนิกจะมีขนาดไม่เท่ากับความยาวทางไฟฟ้า เป็นเนื่องจากเหตุผลเดียวกับที่อธิบายมาแล้ว ในสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ ($\lambda/2$) ความยาวจริงจะสั้นกว่าค่าความยาวที่คิดจากจำนวนเต็มคูณครึ่งความยาวคลื่นเนื่องจากเหตุ 2 อย่างคือ

- อัตราส่วน λ/dia ของตัวนำ
- ปรากฏการณ์ เอนด์ เอฟเฟ็กต์ (end effect)

สำหรับผลจากเอนด์ เอฟเฟ็กต์ เห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มฉนวนที่ปลายตัวนำ (เป็นการเพิ่มค่าประจุไฟฟ้า) และสายอากาศที่ใช้งานช่วงฮาร์โมนิกมักมีฉนวนเพิ่มที่ปลายสายอากาศเท่านั้น

ดังนั้นปรากฏการณ์ เอนด์ เอฟเฟ็กต์ มีผลเฉพาะส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่ปลายสุดแต่ละด้านของสายอากาศ และสมการต่อไปนี้เป็นการหาความยาวของสายอากาศที่ใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกของความถี่พื้นฐาน (เป็นค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติจริงได้)

$$\text{ความยาวของสายอากาศ (ฟุต)} = \frac{492\,(N - 0.05)}{f(MHz)}$$

ค่า N แทน จำนวนเท่าครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda/2$) ของสายอากาศ กรณีเรากำหนดความยาวกายภาพของสายอากาศมีค่าแน่นอนขึ้นมาก่อนจะหาค่าความถี่ เพื่อให้เกิดความยาวทางไฟฟ้าให้ทำงานในลำดับฮาร์โมนิกที่ต้องการได้จากสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{fL}{984} + 0.025$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ λ แทนความยาวของตัวนำในหน่วยความยาคลื่น

f แทนความถี่ในหน่วย MHz

L แทนความยาวกายภาพ (จริง) ของสายอากาศในหน่วยฟุต

2.17 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้งานช่วงฮาร์โมนิก

เราสามารถพิจารณาสายอากาศในย่านฮาร์โมนิกว่าเป็นส่วนขนาด $\lambda/2$ มาเรียงต่อกัน และกระแสที่จ่ายให้ในแต่ละส่วนมีทิศทางกลับกัน (หรือมีเฟสต่างกัน 90°)

ถ้าพิจารณาในแง่นี้ ทำให้กล่าวได้ว่ามีการคัปเปิลระหว่างส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่ติดกัน ด้วยเหตุนี้กับผลกระทบจากการแพร่คลื่นของส่วนอื่น ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัด ณ จุดกระแสลูปบนส่วน $\lambda/2$ มีค่าไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ (เข้าใจด้วยว่าเป็นการเปรียบเทียบส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่เดี่ยว ๆ คือสายอากาศกับอีกแบบที่ต่อกันอยู่)

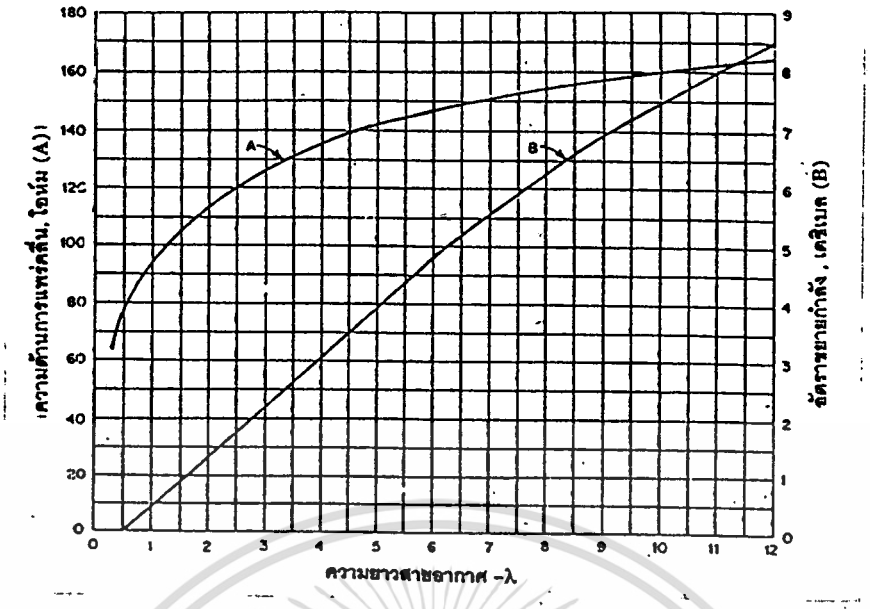
ในกรณีของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ค่าอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยค่า 2 ส่วน คือ ความต้านทานการแพร่คลื่น และรีแอ็กแตนซ์ สำหรับค่าความต้านทานจากความร้อนมีขนาดต่ำเกินไป (สามารถละทิ้งได้) โดยมีเงื่อนไขว่า ถ้าสายอากาศรีโซแนนซ์จะไม่มีค่ารีแอ็กแตนซ์ (เท่ากับศูนย์) ที่จุดหัดลง เหลือเฉพาะค่าความต้านทานการแพร่คลื่นเท่านั้น และมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์

ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นขึ้นกับจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่น และอาจจะปลี่ยนค่าได้จากผลของตัวนำและฉนวนที่อยู่ใกล้ รวมถึงพื้นดินด้วย

เนื้อหาต่อจากนี้จะมุ่งไปที่ขนาดขนาดของค่าความต้านทานนี้โดยใช้สายอากาศในทางทฤษฎีที่มีตัวนำขนาดบางมาก ๆ ในสภาวะสุญญากาศ และมีความยาวในช่วงฮาร์โมนิก (รีโซแนนซ์)

จากการทดสอบพบว่าถ้าสายอากาศยาว 1 λ วัดค่าความต้านทานที่จุดกระแสลูปได้เท่ากับ 90 โอห์ม หากสายอากาศมีขนาดยาวขึ้น เช่นที่ 10 λ จะมีค่าประมาณ 160 โอห์ม แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้องการทานการแพร่คลื่นสัมพันธ์ กับความยาวที่เพิ่มขึ้นของสายอากาศได้ดังกราฟ (A) ในรูป 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการแพร่คลื่นและกำลังของสัญญาณ
โดยกราฟ (A) แทนค่าความต้านทานตามขนาดความยาวสายอากาศ
กราฟ (B) แทนค่าอัตราขยายกำลังสายอากาศ

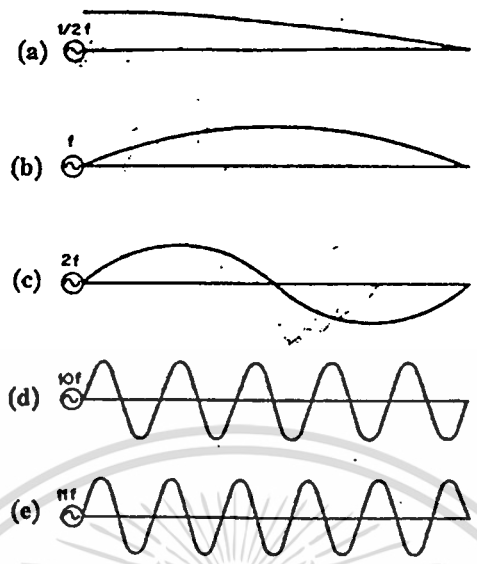
กรณีที่สายอากาศถูกใช้งานในช่วงความถี่คลาดไปจากความถี่รีโซแนนซ์พบว่าจะมีทั้งค่ารีแอ็กแตนซ์และความต้านทานเกิดที่จุดฟีด

โดยทั่วไปค่ารีแอ็กแตนซ์ จะเปลี่ยนตามความถี่คลาดไปจากความถี่รีโซแนนซ์พบว่าจะมีทั้งค่ารีแอ็กแตนซ์และความต้านทานเกิดที่จุดฟีด

โดยทั่วไปค่ารีแอ็กแตนซ์ จะเปลี่ยนตามความถี่ที่ใช้ดังได้กล่าวในสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ ส่วนกรณีสายอากาศที่ใช้ช่วงฮาร์โมนิก พบว่าอัตราการเปลี่ยนค่าของรีแอ็กแตนซ์ตามความถี่มีมากกว่า (เปรียบเทียบจากรูป 2.8 และ 2.10)

ลองพิจารณาในอีกแง่มุมอื่นในสายอากาศจากรูป 2.11 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงผลจากการเปลี่ยนค่าความถี่

จากรูป 2.11 (a) มีการส่งสัญญาณผ่านจุดฟีดที่ปลายด้านหนึ่ง โดยใช้ความถี่เท่ากับ f/2 (ค่า f คือความถี่พื้นฐานของสายอากาศแบบ $\lambda/2$)

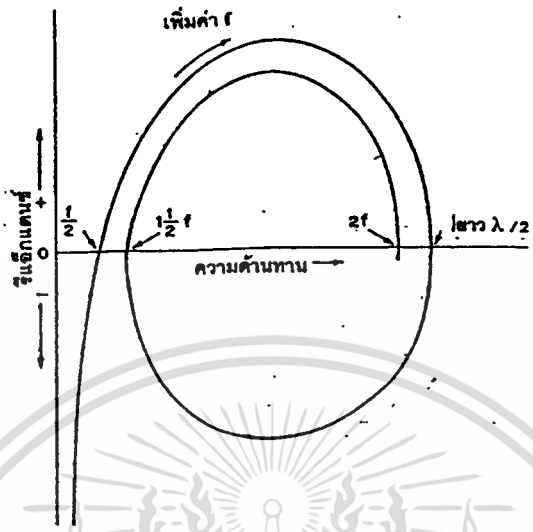
เมื่อจ่ายสัญญาณความถี่ f/2 จะใช้ลวดตัวนำขนาดยาว $\lambda/4$ ทำให้เกิดรูปกระแสดังรูป และที่ค่านี้ถือว่าสายอากาศรีโซแนนซ์ และเกิดค่าความต้านทานต่ำทานต่ำเท่านั้นที่จุดฟีด

ถ้าความถี่ถูกเพิ่มค่าขึ้น ทำให้สายอากาศยาวเกินไป และกระแสที่จุดฟีดมีลักษณะตามหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้า (ดูจากรูป 2.7) มีผลให้สายอากาศเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductive reactance) ไปพร้อมกับค่าความต้านทานด้วย และถ้าความถี่ถูกเพิ่มมากขึ้นไปอีกค่ารีแอ็กแตนซ์นี้จะเพิ่มจนถึงจุดค่ามากที่สุด จากนั้นลดลงจนเท่ากับศูนย์ที่ความถี่ f (ใช้ลวงตัวนำยาว $\lambda/2$) ดังแสดงในรูป 2.11 (b)

เมื่อเราเพิ่มความถี่มากขึ้น จากนี้จะเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงประจุไฟฟ้า (capacitive reactance) ขึ้นและเพิ่มจนถึงค่ามากที่สุด จากนั้นลดลงเท่ากับศูนย์อีกครั้งถ้ายังมีการเพิ่มค่าความถี่ต่อไปจะเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้าใหม่ และมีค่ามากที่สุดจนเหลือศูนย์ ที่จุดความถี่ 2f ณ จุดนี้เกิดคลื่นนิ่งสมบูรณ์สองลูกของกระแส และลวดตัวนำเกิดรีโซแนนซ์อีกครั้งที่ฮาร์โมนิกลำดับที่สอง แสดงดังรูป 2.11 (c)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์ และค่าความต้านทานเมื่อความถี่เพิ่มจาก f/2 ถึง 2f แสดงได้ในกราฟรูป 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรีแอ็กแตนซ์และความต้านทานจากค่าความถี่

จากรูป อธิบายถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศว่ามีการเปลี่ยนค่าเป็นวัฏจักรเมื่อลำดับฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นอีกหนึ่ง โดยเริ่มจาก (คิดที่จุดฟีด) ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าความต้านทานอย่างเดียว (ค่าสูง) ที่ความถี่ f จากนั้นจะมีความรีแอ็กแตนซ์เชิงประจุไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาจนมีค่ามากที่สุดและลดลงจนกลายเป็นความต้านทานอย่างเดียว (ค่าต่ำ) ถัดมาจะมีค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาจนมีค่ามากที่สุด และลดลงจนได้ค่าความต้านทานอย่างเดียว (ค่าสูง) ที่ความถี่ 2f เห็นได้ว่าเกิดวัฏจักรเช่นนี้เสมอเมื่อลำดับฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นหนึ่ง

ลองพิจารณาจากรูป 2.11 (d) และ (e) ค่าความถี่ของรูป (d) คือ 10f (สิบเท่าจากความถี่พื้นฐาน) นั่นคือ สายอากาศใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกลำดับที่สิบ จากนั้นในรูป (e) เพิ่มเป็น 11f ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปอีกหนึ่งวัฏจักร

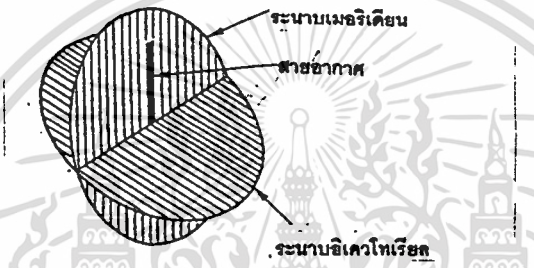
เห็นได้ว่า 11f มีค่ามากกว่า 10f อยู่ 10 เปอร์เซนต์ กล่าวได้คือการเปลี่ยนไป 10 % ของความถี่ทำให้วัฏาจักรของอิมพีแดนซ์เกิดได้หนึ่งรอบ แต่ถ้าเปรียบเทียบการเปลี่ยนจาก f ไป 2f หรือ 100% ของความถี่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ไปเร็วกว่าอยู่ 10 เท่า แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์มีสูงขึ้นเมื่อความถี่ใช้ค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.18 รูปแบบการแพร่คลื่น, อัตราขยาย และไดเร็คติวิตี้

สายอากาศทุกแบบจะมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายพลังงานไปได้มากในบางทิศทาง (เมื่อเทียบกับทิศทางรอบสายอากาศ) คุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า ไดเร็คติวิตี้ (DIRECTIVITY) จัดว่าสำคัญมาก สำหรับการส่งสัญญาณไปยังทิศทางที่ต้องการให้มีขนาดมากกว่าทิศทางที่ไม่ต้องการไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศ แสดงโดยใช้รูปแบบการแพร่คลื่น (RADIATION PATTERN)

รูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศเป็นรูปกราฟที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากสายอากาศตามระยะทางที่ห่างออกไปรอบตัว และเนื่องจากมีการแพร่คลื่นไปทุกทิศทางรอบตัวจึงต้องกำหนดระนาบในการพิจารณรูปแบบคลื่นขึ้น โดยตกลงกันให้มีใช้อยู่ 2 ระนาบดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงระนาบเมอริเดียนและอิเควโทเรียลของสายอากาศ

จากรูป

- ระนาบเมอริเดียน (meridian) คือ ระนาบตามแนวแกนของสายอากาศ
- ระนาบอิเควโทเรียล (equatorial) คือ ระนาบตั้งฉากกับแนวสายอากาศ

ยกตัวอย่าง เช่น สายอากาศชนิดแนวตั้ง (vertical) อธิบายได้ว่า ระนาบเมอริเดียนมีทิศตั้งฉากกับพื้นโลก และระนาบอิเควโทเรียลมีทิศแนวนอน

รูปแบบการแพร่คลื่นสามารถแสดงถึงประสิทธิภาพของสายอากาศได้ดี โดยต้องเป็นในสภาพที่ติดตั้งห่างจากวัสดุต่าง ๆ เช่น ตึก, อาคาร หรือพื้นดิน ที่อาจทำให้เกิดคลื่นสะท้อนขึ้นและมีผลต่อรูปแบบได้

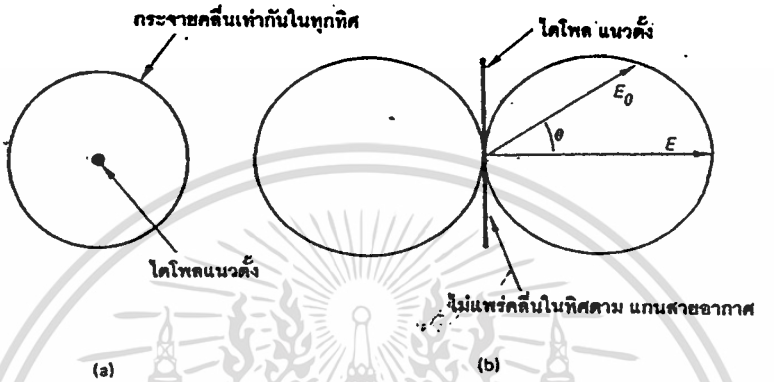
แต่ในการใช้งานจริง สายอากาศถูกติดตั้งไว้ใกล้กับวัสดุต่าง ๆ ทำให้รูปแบบการแพร่คลื่นไม่อาจระบุถึงประสิทธิภาพแท้จริงของสายอากาศได้เต็มร้อยเปอร์เซนต์ ถึงกระนั้นรูปแบบการแพร่คลื่นใช้ประโยชน์ในแง่การเปรียบเทียบความแตกต่างกันของสายอากาศแต่ละชนิด

สายอากาศอาจถูกใช้ในการรับคลื่นได้ และเราสามารถใช้รูปแบบการแพร่คลื่นระบุถึงความสามารถในการรับของสายอากาศได้ โดยเฉพาะคุณสมบัติไดเร็คติวิตี้ที่ทำให้รู้ว่าควรหันเสาหรือติดตั้งในทิศทางใดจึงได้สัญญาณที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไดโพลชนิดแนวตั้งจะแพร่/หรือรับคลื่นได้เท่ากันในทุกทิศตามระนาบแนวนอน ทำให้มีรูปแบบการแพร่คลื่นเป็นวงกลม ดังแสดงในรูป 2.14 (a)

ส่วนระนาบแนวตั้งของสายอากาศชนิดนี้จะไม่แพร่/หรือรับคลื่นตลอดตามแนวสายอากาศ ทำให้รูปแบบการแพร่คลื่นเป็นลักษณะเลขแปด ดังแสดงในรูป 2.14 (b)



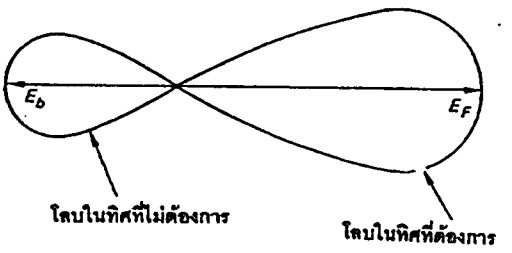
รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแนวตั้ง (ขนาด /)

(a) รูปแบบระนาบแนวนอน

(b) รูปแบบระนาบแนวตั้ง

อัตราส่วนฟรอนต์ทูแบค (Frount-to-Back Ratio)

รูปแบบการแพร่คลื่นส่วนใหญ่แล้วจะมีไดเร็คติวิตี้ไปในทิศทางใดทิศหนึ่งมากกว่าทิศอื่น ดังนั้นอัตราส่วนฟรอนต์ทูแบคของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศโดยคิดจากทิศที่ต้องการกับทิศไม่ต้องการ (ตรงข้ามกัน) แสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงอัตราส่วนฟรอนต์ทูแบคของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าความเข้มสนามที่ระยะ X กิโลเมตร ตามทิศที่ต้องการจากสายอากาศเท่ากับ 10 mV/m และในระยะทางที่เท่ากันแต่ทิศตรงข้ามมีค่าเท่ากับ 1 mV/m

จงคำนวณหาอัตราส่วนฟรอนต์ทูแบคของสายอากาศนี้

คำตอบ

อัตราส่วนฟรอนต์ทูแบค $= E_f / E_b = \frac{10 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = 10$ **(Ans.)**

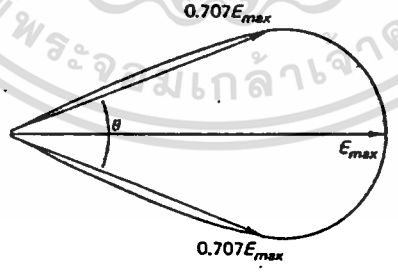
หรือในหน่วยเดซิเบล $= 20 \text{ Log } 10 = 20$ dB **(Ans.)**

 # บีมวิดท์ (Beamwidth)

จัดเป็นการวัดความกว้างของลำคลื่น เพื่ออธิบายถึงไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศได้ดี โดยกำหนดให้มีหน่วยเป็นมุมที่คิดจากกรณีดังนี้ (มีความหมายเหมือนกันทุกกรณี)

- ที่จุดซึ่งค่าพลังงานในการแพร่คลื่นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุด
- หรือจุดที่ค่าความเข้มสนามเหลือ $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
- หรือจุด 3 dB บนรูปแบบการแพร่คลื่น

แสดงค่าบีมวิดท์ (θ) จากรูป 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงบีมวิดท์ของสายอากาศ

 # อัตราขยายของสายอากาศ

ค่านี้ไม่ใช่ค่าอัตราส่วนระหว่างพลังงานเอาท์พุทต่อด้านอินพุท แต่เป็นอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้วัดคุณสมบัติไดเร็คติวิตี้ และสามารถระบุถึงปริมาณของการแพร่คลื่นมีมากในทิศทางใด การคิดค่าอัตราขยายของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอัตราขยายของสายอากาศส่งคือ กำลังสองของค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด เทียบกับค่าความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิงหรืออาจแสดงในรูปอัตราส่วนของค่ากำลังงานที่ต้องใช้ส่งอากาศของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คือ อัตราส่วระหว่างค่าความเข้มสนามของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซทรอปิก (isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณเท่ากัน (ในความเป็นจริงเราไม่สามารถสร้างสายอากาศไอโซทรอปิกได้ มีใช้เฉพาะเป็นหลักการในงานสายอากาศเท่านั้น) มีการทดลองจนได้ผลสรุปว่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$ เทียบค่ากับสายอากาศไอโซทรอปิกได้มากกว่าที่อยู่ 1.64 เท่า หรือ 2.15 dB

ตัวอย่างการคำนวณ #1

สายอากาศทดสอบถูกจ่ายหรือฟีดสัญญาณขนาด 10 kW จะได้ขนาดความเข้มสนาม ณ จุดทดสอบเท่ากับที่สร้างจากสายสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ซึ่งถูกฟีดด้วยสัญญาขนาด 20 kW

จงคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเมื่อ

(a) ใช้สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ อ้างอิง

(b) ใช้สายอากาศไอโซทรอปิกอ้างอิง

ถ้ามีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศทดสอบที่ฟีดสัญญาณขนาด 10 kW ให้สร้างความเข้มสนาม ณ จุดเดิมมากเป็นสองเท่า ให้คำนวณอัตราขยายของสายอากาศหลังจากปรับปรุง (ใช้สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ อ้างอิง)

คำตอบ

(a) ค่าอัตราขยายของสายอากาศสอบเทียบกับแบบ $\lambda/2$

$$= 10 \log_{10} \frac{40 \times 10^3}{10 \times 10^3} = 3 \qquad \text{(Ans.)}$$

(b) เนื่องจากอัตราขยายของไดโพลแบบ $\lambda/2$ เทียบกับไอโซทรอปิก = 2.15 dB

ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศทดสอบกับไอโซทรอปิก = 2.15 + 3 = 5.15 dB (Ans.)

สำหรับสายอากาศที่ปรับปรุงแล้วให้ค่าความเข้มสนามเป็น 2 เท่าจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าอัตราขยายใหม่ = 20 Log_{10} 2 = 6 dB

และเทียบกับไดโพลแบบ $\lambda/2$ จะได้อัตราขยาย = 3+6 = 9 dB (Ans.)

ตัวอย่างการคำนวณ #2

ในการทดสอบสายอากาศชนิดหนึ่งที่ไม่รู้ค่าอัตราขยายกับสายอากาศมาตรฐานแบบหนึ่งที่รู้ค่าอัตราขยาย

กำหนดให้วัดค่าพลังงานที่ถูกส่งมาถึงสายอากาศ และแม็ชท์ได้พอดีกับโหลดได้ดังนี้

สายอากาศทดสอบวัดได้ 2 μ W

สายอากาศมาตรฐานวัดได้ 8 μ W

ถ้าอัตราขยายของสายอากาศมาตรฐานเทียบกันแบบไอโซทรอปิกมีค่า 30 dB

จงคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่ทดสอบนี้

คำตอบ

หาอัตราขยายของสายอากาศมาตรฐานเทียบกับสายอากาศที่ทอสอบได้

$$= 10 \log 10 \left[\frac{8 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-6}} \right] = 6 \ dB$$

ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเทียบกับไอโซทรอปิด = 30-6 = 24 dB

กำลังส่งประสิทธิผล (Effective Radiated Power)

ในทางทฤษฎีสายอากาศไอโซทรอปิก มีคุณสมบัติแพร่กระจายพลังงานได้ทุกทิศรอบตัวและมีขนาดความเข้มสนามเท่ากันหมดตามระยะทางรอบสายอากาศ

ส่วนสายอากาศที่ใช้งานจริง ทุกชนิดจะไม่มีคุณสมบัติเช่นนี้อยู่ โดยมีการอัดคลื่นวิทยุไปในทิศใดทิศหนึ่งเท่านั้น

ดังนั้นสรุปได้ว่า สายอากาศที่ใช้งานจริงต้องการกำลังที่ป้อนให้สายอากาศน้อยกว่าแบบไอโซทรอปิก ในการสร้างความเข้มสนามค่าเท่ากัน ณ จุดเดียวกัน ตามทิศทางที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด

กำลังส่งประสิทธิผล หรือ ERP ของสายอากาศ หมายถึง ค่าพลังงานส่วนที่ไอโซทรอปิกใช้สร้างความเข้มสนามขนาดเท่ากับสายอากาศใช้งานจริง ณ จุดเดียวกัน หรือในอีกนัยคือ ถ้าเรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายกำลังของคลื่นวิทยุที่ออกอากาศจะถูกเพิ่มให้มากกว่ากำลังส่งของเครื่องส่ง ค่าที่มากขึ้นนี้เรียกว่า ERP

ในการคำนวณ ERP ของสายอากาศคิดจากกำลังส่งทั้งที่ถูกส่งให้สายอากาศ (P_t) คูณกับอัตราขยายของสายอากาศ (G) ได้สูตรว่า

$$ERP = P_t G$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สายอากาศที่มีอัตราขยายเท่ากับ 10 dB (เมื่อเทียบกับแบบไอโซทรอปิก) จะแพร่คลื่นขนาด 1000 วัตต์ จงคำนวณหากำลังส่งประสิทธิผลของสายอากาศ

คำตอบ

10 dB คือ พลังงานในอัตราส่วน 10:1

ดังนั้น คิดจากสูตรได้ว่า

ERP = 10 x 1000 = 10 กิโลวัตต์ (Ans.)

แถบความถี่ (Bandwidth)

จัดเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศทำงานได้น่าพอใจซึ่งในหนังสือเล่มนี้พิจารณาโลบหลักของรูปแบบการแพร่คลื่น ซึ่งคิดจากกราฟว่าแถบความถี่คือ ช่วงความถี่ที่ค่าพลังงานของสายอากาศที่แพร่ออกอากาศในทิศทางโลบหลักมีค่าต่ำกว่า 3 dB

ความต้านทานการแพร่คลื่นและประสิทธิภาพสายอากาศ

กำหนดค่าพลังงานที่แพร่จากสายอากาศมีสูตร

$$P = I^2 R_r$$

R_r คือ ความต้างทานการแพร่คลื่น และถ้าคิดความต้านทาน เนื่องจากการสูญเสียความร้อนด้วยให้แทนอักษร R_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศ (เขียนแทนด้วยอักษร) คืออัตราส่วนของพลังงานที่แหร่ออกอากาศต่อส่วนที่ป้อนให้สายอากาศ มีสูตรคำนวณดังนี้ (จะแสดงผลเป็นเปอร์เซนต์)

$$\eta = \frac{I^2 R_r}{I^2 R_L + I^2 R_r} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \times 100\ \%$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สายอากาศส่งความถี่ค่าต่ำ มีความต้านทานการแหร่คลื่น 0.3 โอห์ม และความต้านทานจากการสูญเสียเป็นความร้อน 1.5 โอห์ม ถ้ากระแสที่จ่ายให้สายอากาศมีขนาด 50 แอมป์ ให้คำนวณหากำลังส่งออกอากาศ, กำลังสัญญาณที่จ่ายเข้า และประสิทธิภาพของอากาศ

คำตอบ

กำลังส่งที่ออกอากาศ $= I^2 R_r = (50)^2 \times 0.3 = 750$ วัตต์

กลังสัญญาณที่จ่ายเข้า $= I^2 R_r + I^2 R_L = (50^2 \times 0.3) + (50^2 \times 1.5)$

$= 4,500$, วัตต์

ประสิทธิภาพของสายอากาศ $= \frac{100 R_L}{R_L + R_r} = \frac{100 \times 0.3}{0.3 + 1.5} = 16.67\ \%$

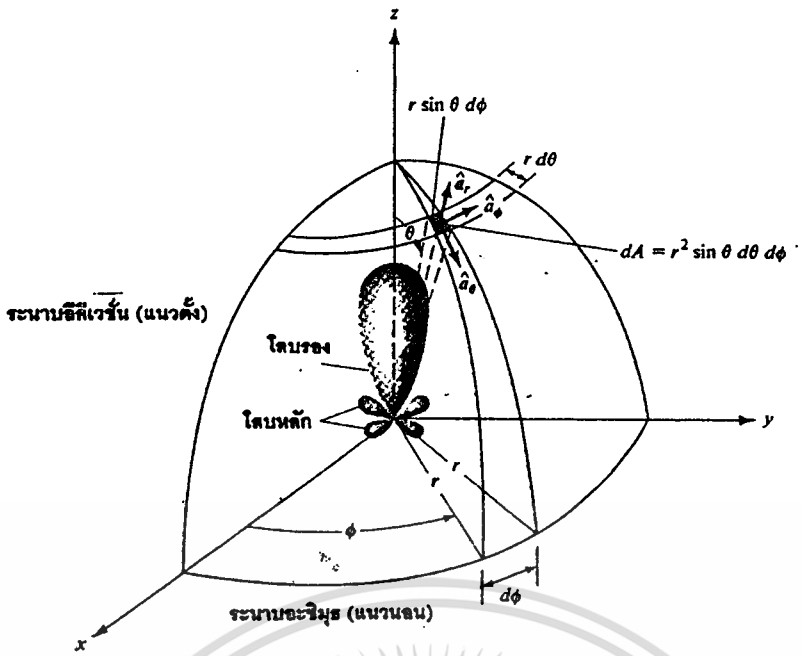
ที่ความถี่ค่าต่ำมาก พบว่าประสิทธิภาพของสายอากาศมีค่าน้อย แต่ที่ความถี่สูงอาจมีค่าเพิ่มมากกว่า 90 % ได้

2.19 รูปแบบการแหร่คลื่น

เป็นการเขียนคุณสมบัติต่าง ๆ ในการแหร่คลื่นลงเป็นภาพขึ้นมา ซึ่งสามารถแสดงถึงความหนาแน่นของการแหร่กระจายคลื่น, ความเข้มสนาม, เฟส หรือโพลาไรเซชั่นได้

คุณสมบัติเหล่านี้มีลักษณะการกระจายค่แบบ 3 มิติ จึงใช้แกนโคโอดิเนตแบบ 3 มิติ (X,Y,Z) แทนได้ดังรูป 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงแกนโคโอดิเนตในการวิเคราะห์สายอากาศ

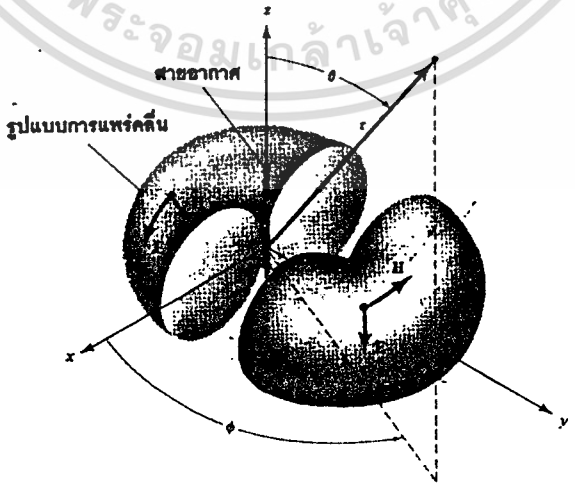
2.20 รูปแบบไอโซทรอปิก, ไดเร็คชั่นแนล และออมนิไดเร็คชั่นแนล

มีคำศัพท์อยู่ 3 คำที่น่าสนใจดังนี้

- ไอโซทรอปิก คือ สายอากาศในทางทฤษฎีที่สามารถแพร่คลื่นในทุกทิศทางด้วยความเข้มสนามเท่ากัน

- ไดเร็คชั่นแนล คือ คุณสมบัติในการแพร่คลื่น หรือรับคลื่นในทิศทางใดทิศหนึ่งได้ดีกว่าทิศทางอื่น

ยกตัวอย่างของสายอากาศแบบไดเร็คชั่นแนลได้ดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแบบไดเร็คชั่นแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

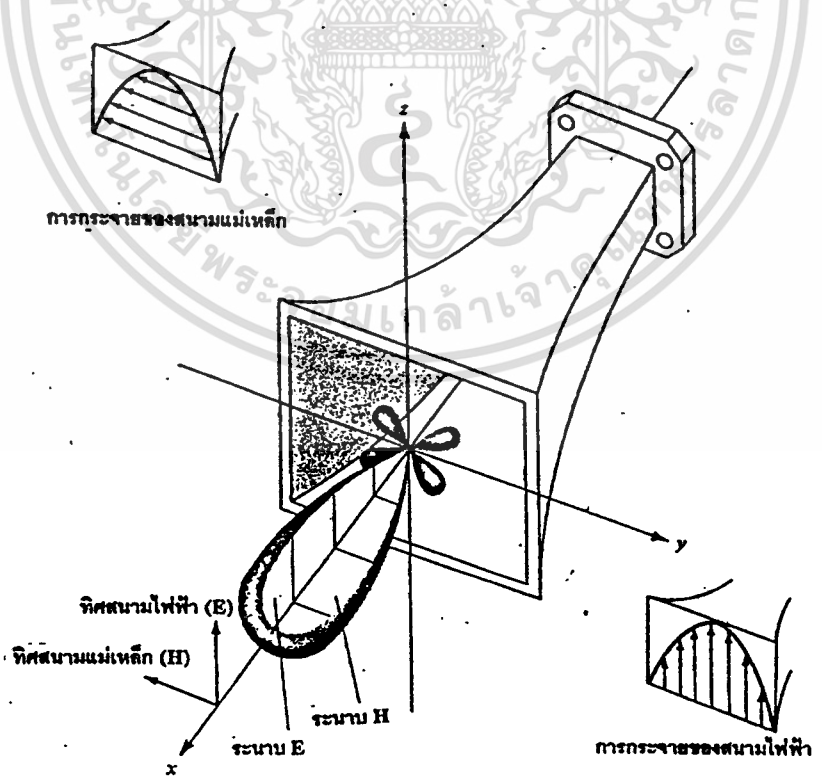
จากรูปวิเคราะห์ได้ว่า ไม่การไดเร็คชั่นแนลในระนาบแนวนอน [f(ϕ),θ = ค่าคงที่] และมีไดเร็คชั่นแนลในระนาบแนวตั้ง [g(θ),ϕ = ค่าคงที่] เราเรียกรูปแบบการแพร่คลื่นลักษณะว่าออมนิไดเร็คชั่นแนล (omnidirectional) ซึ่งหมายถึง "รอบตัว" ทำให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานได้ดีตามแนวราบ

2.21 รูปแบบ E และ H

บางครั้งเราแสดงประสิทธิภาพของสายอากาศในรูปแบบระนาบ E และ H โดยถ้าสายอากาศมีโพลาไรเซชั่นแบบลิเนียร์แล้ว อธิบายความหมายได้ว่า

- รูปแบบระนาบ E คือ ระนาบที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่คลื่นมากที่สุด

- รูปแบบระนาบ H คือ ระนาบที่มีเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่คลื่นมากที่สุด ตัวอย่างแสดงดังรูป 2.19



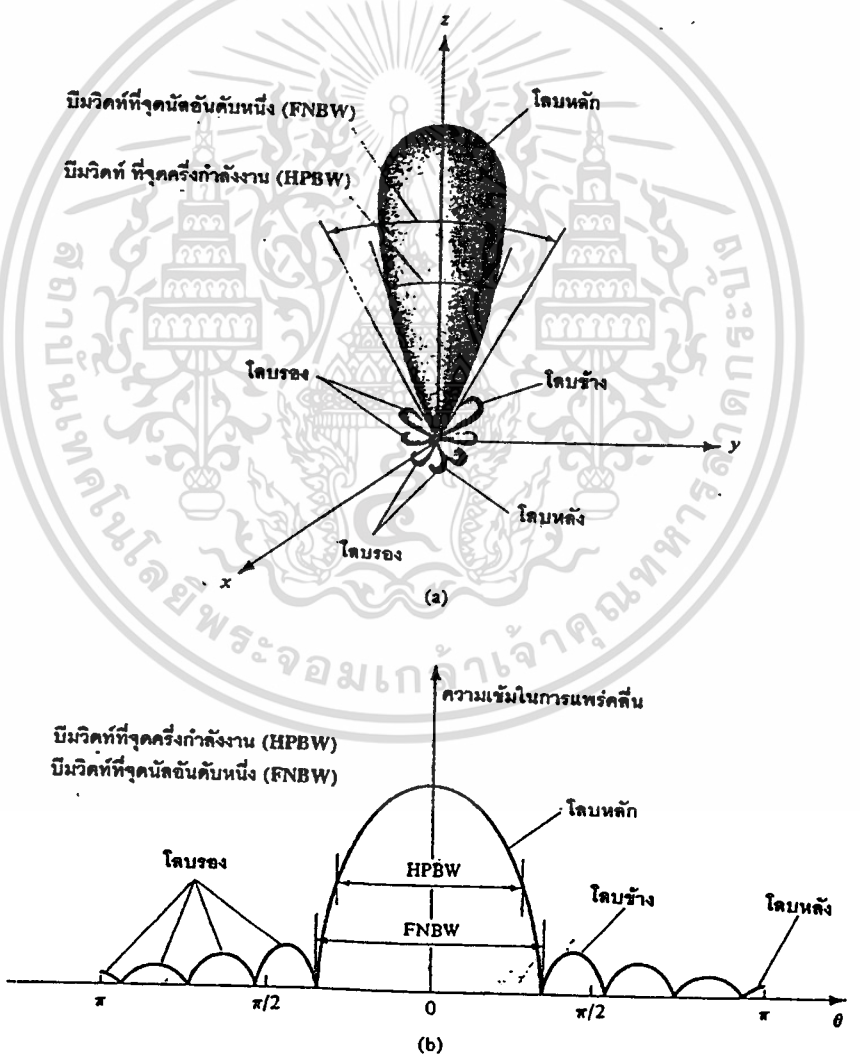
รูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบระนาบ E และ H ของสายอากาศแบบ pyramidal horn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูประนาบ E คือ ระนาบ X-Z (แนวตั้ง ; ϕ = o) และระนาบ H คือ ระนาบ X-Y (แนวนอน ; $\theta = \pi/2$)

2.22 ส่วนต่าง ๆ ในรูปแบบการแพร่คลื่น

แต่ละส่วนของรูปแบบการแพร่เรียกว่า โลบ (Lobe) ซึ่งยังแบ่งย่อยเป็นโลบหลัก, โลบรอง, โลบข้าง และโลบหลังอีกด้วยพิจารณาในรูป 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงส่วนต่าง ๆ ของรูปแบบการแพร่คลื่น

(a) แสดงโลบและบีมวิดท์ (แบบ 3 มิติ)

(b) แสดงระดับกำลังคลื่น และโลบต่าง ๆ (แบบ 2 มิติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายจากรูปได้ว่า ความหมายของโลบ คือ ส่วนของรูปแบบการแพร่คลื่นที่มีความเข้มของกำลังคลื่นสูง (รอบ ๆ เป็นความเข้มต่ำ)

ในรูป 2.20 (a) เป็นการเขียนรูปบนแกนโพลาร์ 3 มิติ ที่มีโลบอยู่หลายขนาดส่วนรูป 2.20 (b) เป็นการเขียนในลักษณะแกน 2 มิติ

โลบหลัก (major lobe) หรืออาจเรียกบีมหลัก หมายถึง โลบที่มีการแพร่ไปในทิศทางที่มีการแพร่มากที่สุด ในรูป 2.20 โลบหลักมีทิศตามจุด θ = o สำหรับสายอากาศบางแบบบีมลำคลื่นมากกว่าหนึ่ง จะมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบได้

โลบรอง (minor lobe) คือ โลบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โลบหลัก ในรูป 2.20 (a) และ (b) ทุกโลบยกเว้นโลบหลัก เราระบุเป็นโลบรองได้

โลบข้าง (side lobe) คือ โลบที่อยู่ในทิศทางอื่น นอกเหนือจากทิศทางของโลบหลัก (ทั่วไปแล้วโลบข้างจะอยู่ติดกับโลบหลัก และมีทิศรอบบีมหลัก)

โลบหลัง (back lobe) คือ โลบรองที่มีทิศตรงข้ามกับโลบหลัก (ต่างกัน 180°) เราพบว่าโลบรองจะเกิดในทิศที่ไม่ต้องการเสมอ จึงควรลดขนาดให้น้อยที่สุด สำหรับโลบข้างจัดเป็นโลบรองที่มีขนาดมากที่สุด (ต้องลดขนาดโลบข้างลง)

โดยทั่วไปถ้าระดับของโลบข้างมีค่าประมาณ -20 dB หรือน้อยกว่านี้ จะไม่มีผลต่อการใช้งานมากนัก จุดที่รับสัญญาณได้เท่ากับศูนย์ (ถึงแม้จะรีโซแนนซ์กับความถี่ในการส่ง) เรียกว่า นัล (null)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
สายนำสัญญาณ

3.1 บทนำ

จุดประสงค์หลักของการใช้สายนำสัญญาณ คือ ส่งพลังงานไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกจุดได้ โดยความยาวของสายนำสัญญาณ อาจมีได้หลายร้อยกิโลเมตรจนเหลือเพียงเศษส่วนของเมตรได้ แล้วแต่กรณีอย่างเช่น

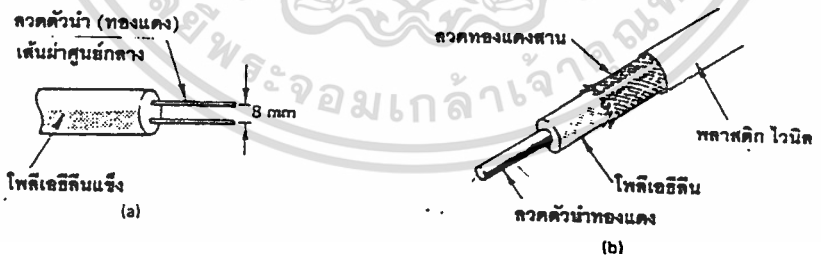
- ถ้าใช้สายระหว่างระบบสื่อสารใหญ่เช่น โทรศัพท์ มีความยาวอาจถึงหลายร้อยกิโลเมตร
- ถ้าใช้เป็นสายฟีดเดอร์ (feeder) หรือสายนำสัญญาณในเครื่องส่งหรือเครื่องรับวิทยุมีได้หลายร้อยเมตร
- ถ้าใช้เป็นส่วนหนึ่งในอุปกรณ์ด้วย UHF มีใช้ในขนาดเศษส่วนของเมตร

โครงสร้างหลักของสายนำสัญญาณประกอบด้วยคู่ตัวนำ 2 เส้น ที่แยกจากกันโดยมีฉนวนคั่นไว้

ประเภทหลัก ๆ ของสายที่เราใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ

- สายแบบเส้นคู่ (two-wire)
- สายแบบโคแอกเชียล (coaxial cable)

ดังแสดงลักษณะของสายจากรูป 3.1 (a) และ (b)



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายนำสัญญาณ

(a) แบบเส้นคู่

(b) แบบโคแอกเชียล

ฉนวนที่ใช้ระหว่างตัวนำทั้งสองมีได้หลายแบบ อย่างเช่น อากาศ (เป็นสายเปลือย), สาร ฉนวนพวกโพลีเอธีลีน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของตัวนำ เมื่อวิเคราะห์ในทางไฟฟ้า พบว่ามีสัมประสิทธิ์ 4 ค่า ด้วยกัน [เราเรียกค่า 4 ตัวนี้ว่า สัมประสิทธิ์ขั้นต้น (primary coefficient)] มีดังนี้

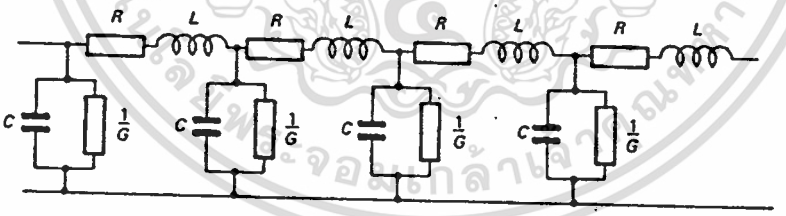
1. รีซิสแตนซ์ หรือความต้านทาน (Resistance) แทนด้วยสัญลักษณ์ R เป็นค่าความต้านทานของตัวนำ และมักใช้เป็นค่ารวมของทั้งสองเส้น

2. อินดัคแตนซ์ หรือความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) แทนด้วยสัญลักษณ์ L มีค่าขึ้นอยู่กับพื้นที่ตัดขวางของตัวนำ

3. คอนดัคแตนซ์ หรือความต้านทานการรั่วไหล (Conductance) แทนด้วยสัญลักษณ์ G เป็นค่าความต้านทานของฉนวนเนื่องจากมีกระแสบางส่วนรั่วไหลระหว่างตัวนำสองเส้น

4. คาปาซิแตนซ์หรือประจุไฟฟ้า (Capacitance) แทนด้วยสัญลักษณ์ C เป็นของทั้งฉนวนและตัวนำ

ค่าทั้ง 4 นี้ มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดทางฟิสิกส์ของตัวนำ และชนิดของฉนวนที่ใช้ นอกจากนี้ค่า R และ G ยังขึ้นกับ ความถี่ของคลื่นที่เดินทางในสายอีกด้วย ถ้านำมาเขียนวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณว่า แทนด้วยค่าทางไฟฟ้า แล้วทั้ง 4 ค่า จะมีกระจายตลอดตามสายไป โดยค่า R และ L ต่ออนุกรมกัน และค่า C และ G ต่อขนานกัน เราแสดงโครงสร้างทางไฟฟ้าของสายนำสัญญาณได้จากรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรสมมูลตลอดทั้งสายนำสัญญาณ

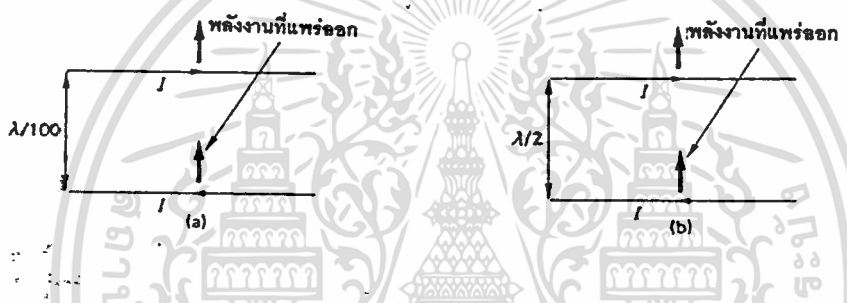
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ขั้นต้นกับสายนำสัญญาณ

ในสายโคแอกเชียล มีตัวนำอยู่ 2 เส้น คือ ตัวนำชั้นในกับตัวนำชั้นนอก (จากรูป 3.1 ตัวนำชั้นในคือลวดทองแดง ส่วนตัวนำชั้นนอก คือ ลวดทองแดงสาน) ซึ่งตัวนำชั้นนอกทำหน้าที่เหมือนฉากกั้น (screen) มีผลทำให้ลดการแพร่ของพลังงานจากภายในสายโคแอกเชียลออกสู่ภายนอกสายไปได้ หรือทำนองกลับกัน คือ กันพลังงานจากภายนอกแทรกเข้ามารบกวนภายในสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นฉากกั้น จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวนำชั้นนอกอย่างเช่น ถ้าใช้ท่อทองแดงเป็นตัวนำชั้นนอกจะมีประสิทธิภาพดีมาก คือไม่มีการรั่วไหลของพลังงานเลย แต่ถ้าใช้ลวดทองแดงสาน พบว่าไม่ดีเท่าที่ควรคือ จะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้น (เราใช้ลวดทองแดงสายในสายโคแอกเชียลแบบอ่อน)

สำหรับกรณีสายแบบเส้นคู่ ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองเส้นมีความสำคัญมากอธิบาย คือ ถ้าตัวนำทั้งสองเส้นมีระยะห่างทางไฟฟ้าใกล้กันมาก พลังงานที่แพร่จากตัวนำเส้นหนึ่งจะไปหักล้างกับส่วนของอีกเส้น สิ่งนี้เกิดขึ้นเพราะที่ทุก ๆ จุดบนสายทั้งสองจะมีกระแสขนาดเท่ากันไหลอยู่ แต่มีทิศทางตรงข้างกัน ดูได้จากรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการแพร่คลื่นจากสายแบบเส้นคู่

พิจารณารูป 3.3 (a) แสดงทิศของกระแสในตัวนำ แต่ละเส้นว่ามีทิศตรงข้ากันและระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ $\lambda/100$ พลังงานที่แพร่ออกจากตัวนำเส้นล่าง จะมีค่าเฟสต่างกับพลังงานที่แพร่ออกจากเส้นบน (เพราะทิศกระแสต่างกัน) และระยะห่างขนาด $\lambda/100$ เทียบเป็นเฟสได้ 3.6° จึงทำให้พลังงานจากทั้งสองเส้น เกือบหักล้างกันหมดไป

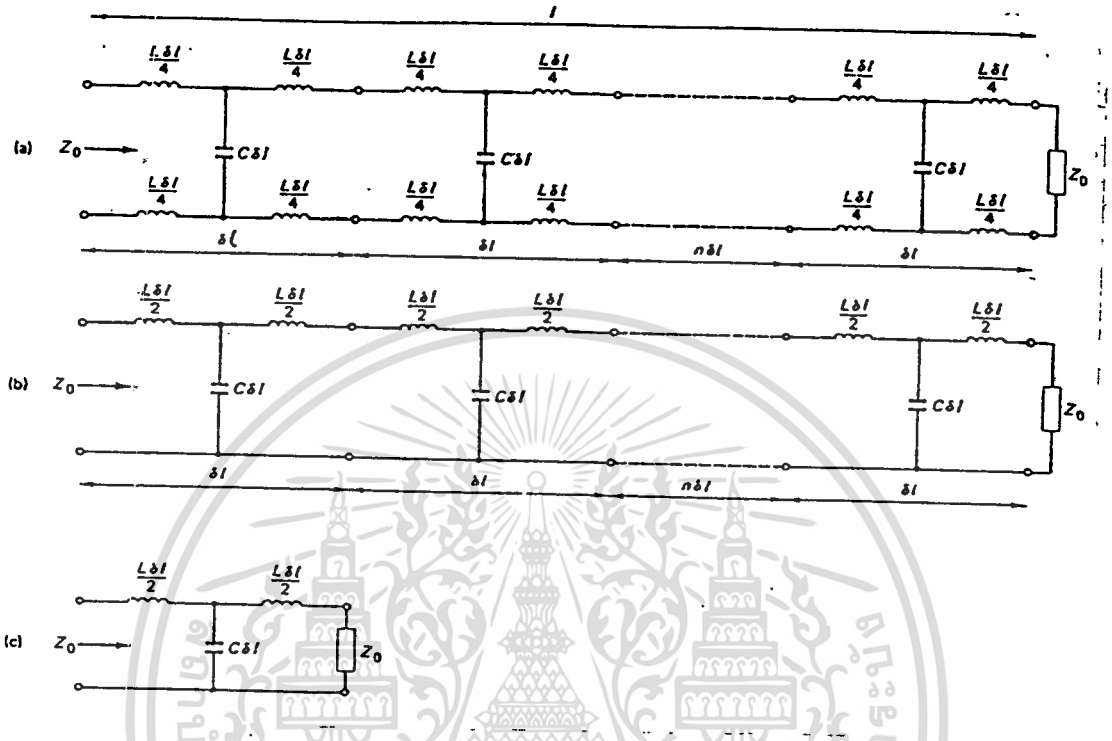
ส่วนรูป 3.3 (b) ระยะห่างมีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ จากเดิมที่พลังงานจากเส้นล่างมีเฟสตามหลังอยู่ 180° เมื่อบวกเพิ่มกับระยะห่างที่พลังงานเดินทางไปเส้นบนอีก $\lambda/2$ หรืออีก 180° ทำให้เฟสที่เปลี่ยนไปทั้งหมดเท่ากับ 180° + 180° หรือ 360° หมายความถึง พลังงานจากทั้งสองเส้นจะเสริมค่ากัน

ในความถี่วิทยุ ค่าการลดทอนของสายที่เกิดจากค่า R และค่า G เราสามารถละทิ้งไม่นำมาคิดได้ เพราะมีค่าน้อยมาก ทำให้เราแทนโครงสร้างทางไฟฟ้าของสายใหม่ได้ในรูป 3.4 (a)

พิจารณาจากรูป 3.4 (a) เราแบ่งสายออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ขนาดเท่ากันจำนวนมากแต่ละส่วนยาวเท่ากับ $\delta 1$ ต่อเรียงกันเป็นแถวยาว แต่ละส่วนเล็กนี้มีคาปาซิแตนซ์ขนาด $C\delta 1$ ต่อขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ และมีอินดัคแตนซ์กระจายเท่า ๆ กันตลอดความยาวของสาย เพื่อเป็นการง่ายขึ้น เราเขียนค่า L ใหม่ตามรูป 3.4 (b) และค่า L ของแต่ละส่วนเล็กมีขนาด $L\delta l$



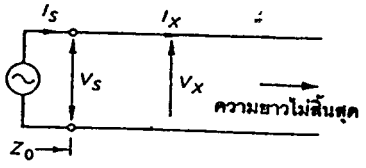
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณที่ไม่คิดการลดทอน

3.3 สายนำสัญญาณ

คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายนำสัญญาณ เมื่อมีการป้อนสัญญาณเข้ามาจะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ขั้นสอง (secondary coefficients) ซึ่งมีอยู่ 4 ค่าดังนี้

1. ลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย

แทนด้วยสัญลักษณ์ Z_0 เป็นค่าอิมพุทอิมพีแดนซ์ของสายที่มีความยาวไม่สิ้นสุดพิจารณารูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงภาพอธิบายเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าคร่อมจุดส่ง (V) กับกระแสที่ไหลบนสาย (I_s) เขียนสมการได้ว่า

$$Z_0 = \frac{V_s}{I_s}$$

หรืออาจคิดค่าที่ทุกจุดใด ๆ บนสาย ค่าอัตราส่วน V_x / I_x เท่ากับ Z_0 ก็ได้ สมมุติให้เราตัดสายให้มีความยาวจำกัดที่จุดส่ง ดังรูป 3.6 (a)

รูปที่ 3.6 แสดงค่า Z_0 ในวงจรทางไฟฟ้าของสาย

ส่วนที่เหลือของสายยังมีความยาวไม่สิ้นสุดอยู่ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดที่จุด 2-2 มี ขนาดเท่ากับค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย ทำให้คิดได้ว่าก่อนตัดสายที่จุด 1-1 ก็มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_0 ดังนั้นถ้าเรานำโหลดมาต่อที่จุด 1-1 ให้มีขนาดโหลดเท่ากับ Z_0 ก็จะไม่ทำให้คุณสมบัติของสายเปลี่ยนไป [เหมือนรูป 3.6 (b)] เราเรียกสายที่ถูกต่อด้วยโหลดขนาด Z_0 ว่ามีการต่อปลายสายที่ถูกต้อง

ทำให้วงจรสมมูลของสายที่ไม่คิดค่าการลดทอน จากรูป 3.4 (a) และ (b) เราสามารถย่อให้เล็กลงโดยการต่อโหลดขนาด Z_0 [ในรูป 3.4 (c)]

ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายที่ใช้งานในความถี่คลื่นวิทยุ คิดค่าได้จาก

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม}$$

โดยค่า L และ C คือ อินดัคแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ที่คิดต่อหนึ่งเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

สายนำสัญญาณที่ใช้ในย่านความถี่คลื่นวิทยุมีค่าอินดัคแตนซ์เท่ากับ 178.57 nH/m และค่าปาซิแตนซ์เท่ากับ 71.43 pF/m

จงคำนวณค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์

คำตอบ

จะได้ $Z_o = \sqrt{\frac{178.57 \times 10^{-9}}{71.43 \times 10^{-12}}} = 50$ โอห์ม (Ans.)

สำหรับสูตรคำนวณค่า Z_o จากสายนำสัญญาณแต่ละแบบมีดังนี้

- สายแบบโคแอกเชียลที่มีอากาศเป็นฉนวน (air-spaced coaxial Line)

$$Z_o = 138 \log_{10} \frac{D}{d} \text{ โอห์ม}$$

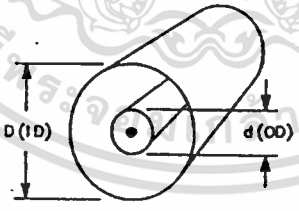
- สายแบบเส้นคู่ที่มีอากาศเป็นฉนวน

$$Z_o = 276 \log_{10} \frac{2S}{d} \text{ โอห์ม}$$

โดยที่ในกรณีสายโคแอกเชียล

ค่า D แทนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำชั้นนอก

d แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำชั้นใน (ดังรูป 3.7)



สายโคแอกเชียล

$Z_O = 138 \text{ LOG} \frac{D}{d}$

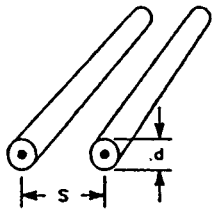
รูปที่ 3.7 แสดงการหาขนาด D และ d ของสายโคแอกเชียล

หรือกรณีสายแบบเส้นคู่

ค่า S แทนระยะห่างตัวนำทั้งสองเส้น

d แทนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำทั้งสองเส้น (เท่ากัน) ดังรูป 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงการหาขนาด S และ d ของสายแบบเส้นคู่

ถ้าสายทั้งสองแบบใช้ฉนวนชนิดอื่นระห่างตัวนำ ค่า Z_0 จะลดลงเหลือ $Z_0 / \sqrt{\varepsilon_r}$ โดย คือค่าเพอร์มิทติวิตี้สัมพันธ์ของฉนวนที่ใช้ ถ้าเป็นอากาศ ค่า $\varepsilon_r = 1$

ตัวอย่างการคำนวน #1

สายแบบเส้นคู่มีตัวนำเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 mm และระยะห่างระหว่างกันเท่ากับ 8 mm โดยใช้ฉนวนชนิดโพลีเอธีลีนแข็ง ถ้าค่าเพอร์มิทติวิตี้สัมพันธ์ของโพลีเอธีลีนแข็งเท่ากับ 2.3 จงคำนวณหาค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายนี้

คำตอบ

จะได้ $Z_0 = \frac{276}{\sqrt{2.3}} \log_{10} \frac{8}{2} = 164.4$ โอห์ม

ตัวอย่างการคำนวณ #2

สายนำสัญญาณสำหรับความถี่คลื่นวิทยุ มีลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ 75 โอห์ม และถูกต่อคร่อมกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ ถ้าเครื่องกำเนิดสัญญาณมีค่าอิมพีแดนซ์ภายในเท่ากับ 75 โอห์ม และให้แรงดันไฟฟ้าได้ถึง 10 โวลต์

จงคำนวณหาในกรณีดังนี้

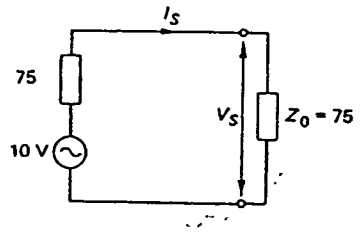
(1) กระแสที่ไหลบนสายนำสัญญาณ

(2) แรงดันคร่อมจุดอินพุทของสาย (สายนี้มีการต่อโหลดอย่างถูกต้าง)

คำตอบ

เนื่องจากมีการต่อโหลดอย่างถูกต้องแสดงถึงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_0 เราเขียนภาพประกอบของโจทย์นี้ได้ดังรูป 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ภาพประกอบ

(1) จากรูป 3.9 จะได้ค่า $I_S = \frac{10}{75+75} = 66.67$ mA **(Ans.)**

(2) หาค่า $v_s = I_s Z_o = 66.67 \times 10^{-3} \times 75 = 5V$ **(Ans.)**

ในการใช้งานจริงเรามีวิธีหาค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ ของสายโดยมีวิธีการคือวัดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายเมื่อเราทำการกับสายดังนี้

1. เปิดวงจร (open circuit) แทนค่าด้วย Z_{oc}
2. ลัดวงจร (short circuit) แทนค่าด้วย Z_{sc}

จะได้สูตรคำนวณว่า $Z_o = \sqrt{(Z_{oc} Z_{sc})}$ โอห์ม

ตัวอย่างการคำนวณ

วัดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายในกรณีที่เราทำการเปิดวงจร และลัดวงจรจะได้ผลลัพธ์ดังนี้ Z_{oc} = 1200 โอห์ม , Z_{sc} = 300 โอห์ม

จงคำนวณค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายเส้นนี้

คำตอบ

จากสูตรจะได้ว่า $Z_o = \sqrt{(1200 \times 300)} = 600$ โอห์ม

2. สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)

เมื่อมีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าไหลบนสายนำสัญญาณ เราพบว่าขนาดของมันจะถูกลดทอนหรือลดลงไปเรื่อย ๆ เนื่องมาจากเกิดการสูญเสียภายในสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราแบ่งชนิดของการสูญเสียภายในสายได้ 3 แบบ ดังนี้

1. การสูญเสียเนื่องจากตัวนำ

2. การสูญเสียเนื่องจากฉนวน

3 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่คลื่น ซึ่งในสายแบบเส้นคู่จะมีการสูญเสียแบบนี้อยู่ แต่ในสายแบบโคแอกเชียล ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำชั้นนอกที่ใช้อย่างเช่น ถ้าเป็นท่อทองแดงจะไม่มีการสูญเนื่องจากการแพร่คลื่นเลย ส่วนถ้าเป็นลวดทองแดงสาน จะมีบ้างในปริมาณเล็กน้อย

เนื่องจากการสูญเสียในแบบที่ 3 จัดว่ายากในการหาค่าและมีขนาดน้อยทำให้สามารถละทิ้งไม่คิดค่านี้ได้

กำหนดให้กระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่จุดปลายด้านส่งของสายแทนด้วย I_s และ V_s ตามลำดับ ดังนั้นเขียนแทนค่ากระแสหรือแรงดันไฟฟ้าต่อหนึ่งเมตร

$$I_1 = I_s e^{-\alpha} \quad \text{หรือ} \quad V_1 = V_s e^{-\alpha}$$

เมื่อค่า e แทนล็อกการิธึมฐานธรรมชาติ (2.7183)

และ α แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนของสาย มีหน่วยเป็นเนเปอร์ต่อเมตร (neper/m) โดยที่ 1 เนเปอร์ = 8.686 dB

ดังนั้นในส่วนเมตรถัดไปของความยาวสาย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเท่าเดิมทำให้คิดค่า I_2 (ระยะ 2 เมตรของสาย) ได้ว่า

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha} = I_s e^{-\alpha} e^{-\alpha} = I_s e^{-2\alpha}$$

ทำนองเดียวกัน กรณีค่า $V_2 = V_s e^{-2\alpha}$

ถ้ากำหนดให้ความยาวของสายเท่ากับ l เมตร ค่ากระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่จุดปลายของสายมีค่าเท่ากับ

$$I = I_s e^{-\alpha l}$$

$$V = V_s e^{-\alpha l}$$

ซึ่งสมการทั้งสองนี้ แสดงถึงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าลดลงตามระยะของสายที่เพิ่มขึ้นที่ความถี่คลื่นวิทยุ เรามีสูตรคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = R/2z_o + Gz_o/2 \text{ เนเปอร์/เมตร}$$

โดยที่ค่า R แทนความต้านทาน (ภายใน) ของสายต่อหนึ่งเมตร

G แทนความดัดแดนซ์ของสายต่อหนึ่งเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนจะมีค่าไม่คงที่ แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น มีอยู่ 2 ตัวแปร ที่มีผลคือ

1. การสูญเสียเนื่องจากตัวนำ จะเป็นสัดส่วนรากที่สองของความถี่

2. การสูญเสียเนื่องจากฉนวน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่

ทั่วไปแล้วขนาดของการสูญเสียในข้อ 1 มากกว่า ข้อ 2 อยู่หลายเท่ามาก ทำให้ค่าการสูญเสียเนื่องจากฉนวนสามารถละทิ้งไม่คิดได้

ดังนั้นกล่าวได้ว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของความถี่ สำหรับการใช้งานในย่าน VHF หรือสูงกว่านี้ ค่าการสูญเสียของสายมีขนาดน้อยจนเราละทิ้งไม่คิดได้ทำให้สายนำสัญญาณในย่านความถี่นี้จัดว่าไม่การสูญเสียเลย (loss-free)

3. สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนเฟส (Phase Change Coefficient)

เมื่อมีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าไหลบนนำสัญญาณจะมีผลต่อเฟส คือ ทำให้เกิดเฟสที่ตามหลัง (lag) กับเฟสเริ่มต้น ณ จุดส่ง ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนเฟส (β) ของสายมีหน่วยเป็นเรเดียน หรือองศาต่อระยะทาง 1 เมตร

ตัวอย่างเช่น ถ้าค่า = 2° ต่อเมตร และในความยาวสายขนาด 10 เมตร จะทำให้เกิดการเลื่อนเฟสไป 20° ที่ความถี่คลื่นวิทยุ คำนวณค่าประสิทธิ์การเปลี่ยนเฟสได้จากสูตร

$$\beta = \omega \sqrt{(LC)} \text{ เรเดียน/เมตร}$$

เห็นได้ชัดว่า ค่า β เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ โดยถ้าความถี่ความขึ้น มักจะมีความยาวทางไฟฟ้าเข้ามาใช้ และเรา βl คิดคำนวณช่วย (l = ความยาวจริงของสาย)

ตัวอย่างการคำนวณ

สายนำสัญญาณมีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนเฟส (β) เท่ากับ 30° ต่อเมตร ถ้าความยาวจริงของสายที่ใช้มีขนาด 1.5 เมตร จงคำนวณหาความยาวทางไฟฟ้า ของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำตอบ

$$\beta_1 = 30^\circ \times 1.5 = 45^\circ$$

ในหนึ่งความยาวคลื่น มีการเลื่อนเฟสไป 360° ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{ความยาวทางไฟฟ้า} = \frac{45}{360}\lambda = \frac{\lambda}{8} \qquad \text{(Ans.)}$$

4. ความเร็วเฟส (Phase Velocity)

ค่าความเร็วเฟส (V_p) ของสายนำสัญญาณเป็นความเร็วที่กระแส หรือแรงดันไฟฟ้า (รูปไซน์) เดินทางไปบนสาย โดยที่คลื่นรูปไซน์เดินทางด้วยความเร็วหนึ่งความยาวคลื่นต่อรอบ และจากที่มี f รอบต่อวินาที (ความถี่) ทำให้หาความเร็วได้เป็น λf เมตรต่อวินาที

ดังนั้นเขียนได้ว่า $V_p = \lambda f$ เมตร/วินาที

เมื่อ แทนความยาวคลื่น

f แทนความถี่ของคลื่นไซน์ และในระยะหนึ่งความยาวคลื่นมีการเปลี่ยนเฟสไป 2 เรเดียน เกิดขึ้นจะได้ $\beta = 2\pi/\lambda$ เรเดียน

ดังนั้น $\lambda = 2\pi/\beta$ และ $V_p = \frac{2\pi}{\beta} \cdot f = \omega/\beta$

ที่ความถี่คลื่นวิทยุ $V_p = \omega/\omega\sqrt{LC} = 1/\sqrt{(LC)}$ เมตร/วินาที พบมีค่าเท่ากันในทุกความถี่ความเร็วเฟสบนสายนำสัญญาณจะน้อยกว่าความเร็วแสง ($C = 3 \times 10^8$ m/s) เสมอ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.6 C และ 0.9 C

ตัวอย่างการคำนวณ

สายนำสัญญาณคลื่นวิทยุมีค่าอินดัคแตนซ์เท่ากับ 263.2 nH/m และค่าคาปาซิแตนซ์เท่ากับ 46.8 pF/m

จงคำนวณหา

(1) ลักษณะคุณสมบัติทางสาย

(2) สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนเฟสที่ความถี่ 30 MHz

(3) ความเร็วเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำตอบ

1) $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{263.2 \times 10^{-9}}{46.8 \times 10^{-12}}} = 75$ โอห์ม (Ans)

2) $\beta = \omega\sqrt{LC} = 2\pi \times 30 \times 10^6 \times \sqrt{(263.2 \times 10^{-9} \times 46.8 \times 10^{-12})}$

$= 0.66$ เรเดียน/เมตร

$= 38$ องศา/เมตร (Ans)

3) $V_p = 1/\sqrt{LC} = 1/\sqrt{(263.2 \times 10^{-9} \times 46.8 \times 10^{-12})}$

$= 2.85 \times 10^8$ เมตร/วินาที (Ans)

ค่า β อาจคิดอีกวิธีได้ดังนี้

$\lambda = \frac{V_p}{f} = \frac{2.85 \times 10^8}{30 \times 10^6} = 9.5$ เมตร

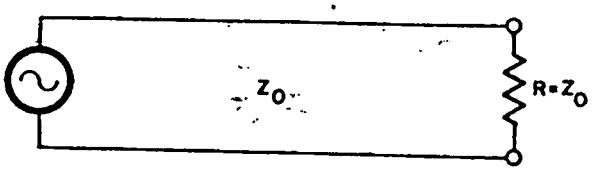
$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{9.5} = 0.66$ เรเดียน/เมตร (เท่ากับที่คำนวณในข้อ 2)

3.4 การต่อโหลดเข้ากับสายนำสัญญาณ

กรณีที่ค่า $Z_0 = \sqrt{L/C}$ ของสายนำสัญญาณนั้น ต้องกำหนดไว้ว่า ไม่มีค่าความต้านทานในตัวนำ และไม่มีการรั่วไหลของกระแสระหว่างกัน โดยที่ L คือ อินดัคแตนซ์ และ C คือ คาปาซิแตนซ์ ค่า L จะลดลงเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำมีขนาดเพิ่มขึ้น ค่า C จะลดลง เมื่อช่องห่างระหว่างตัวนำทั้งสองเพิ่มขึ้น

จึงสรุปได้ว่า ในสายที่มีตัวนำขนาดใหญ่อยู่ใกล้กันมาก จะมีค่า Z_0 ต่ำ หรือสายที่มีตัวนำขนาดเล็กอยู่ห่างกันมาก จะมีค่า Z_0 สูง ในการใช้งานจริงค่า Z_0 ของลวดตัวนำสองเส้นวางขนานกัน มีค่าระหว่าง 200-800 โอห์ม ส่วนสายโคแอกเชียลค่า Z_0 มีค่าระหว่าง 30-100 โอห์ม ถ้าเราต่อโหลดขนาดเท่ากับ Z_0 เข้ากับสายนำสัญญาณที่มีค่าลักษณะคุณสมบัติทางสาย เท่ากับ Z_0 ซึ่งต่อกับแหล่งกำเนิดพลังงาน ดังแสดงในรูป 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงโหลดที่ต่อกับสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_0

อธิบายจากรูป แยกเป็นกรณีดังนี้

 # กรณีที่แม็ชท์กับสาย

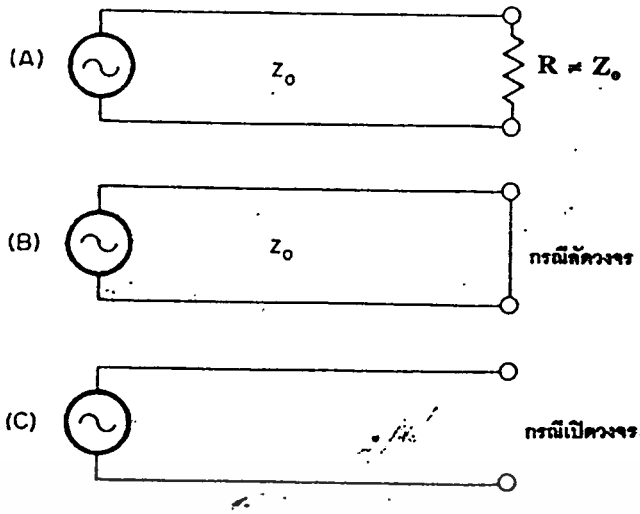
ถ้าเราต่อความต้านทานขนาดเท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสาย เราเรียกการต่อลักษณะนี้ว่า "แม็ชท์" (match)

ในสายนำสัญญาณที่แม็ชท์ ค่าพลังงานที่ส่งจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดจะถูกดูดกลืนหายไปที่โหลดหมด ไม่มีการสะท้อนของพลังงานกลับไป ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียพลังงานบนสายเรียกได้ว่ามีการถ่ายทอดพลังงานอย่างสมบูรณ์ถ้าเรากำหนดให้แรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดเท่ากับ E จะหาค่ากระแส และพลังงานบนสายเท่ากับ E^2/Z_0 และ $I^2 Z_0$ ตามลำดับ (ใช้กฎของโอห์ม)

 # กรณีที่ไม่แม็ชท์กับสาย

ถ้าต่อความต้านทาน (R) ที่ขนาดไม่เท่ากับ Z_0 เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า "ไม่แม็ชท์" (mismatch) ดูจากรูป 3.11 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงกรณีไม่แม็ชท์กับสายนำสัญญาณ

(a) โหลดที่ต่อมีค่าไม่เท่ากับ Z_o

(b) ลัดวงจร (short-circuited line)

(c) เปิดวงจร (open-circuited line)

พลังงานที่มาถึงโหลด R จะไม่ถูกดูดกลืนจนหมด (ต่างกับกรณี $R = Z_o$ ที่พลังงานหายไปในโหลดจนหมด) ทำให้เหลือพลังงานบางส่วนสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิด เหมือนกับการปาลูกบอลไปกระทบกำแพง ซึ่งถ้าเกิดสภาวะ "ไม่แม็ชท์" ระหว่างสายนำสัญญาณกับโหลดมากขึ้น ค่าพลังงานที่สะท้อนกลับจะมากตามไปด้วย (ค่า R แตกต่างกับ Z_o มากขึ้น)

มีอยู่ 2 กรณีที่ถือว่าพลังงานทั้งหมดที่มาถึงโหลดถูกสะท้อนกลับหมด คือ

- กรณีลัดวงจร (รูป 3.11 b)
- กรณีเปิดวงจร (รูป 3.12 b) (รูป 3.11 c)

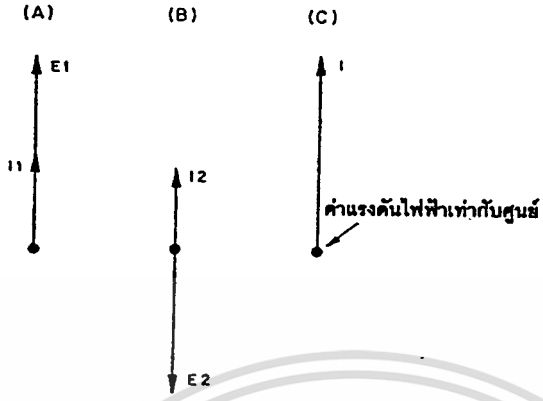
โดยทั่วไปถ้าแหล่งกำเนิดเป็นไฟกระแสสลับ (AC) ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ บนสายนำสัญญาณ เป็นผลรวมทางพีชคณิตระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่วนที่เดินทางไปหาโหลดกับส่วนที่สะท้อนกลับจากโหลด

เราแยกอธิบายแต่กรณีดังนี้

1. กรณีลัดวงจร กำหนดไว้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่โหลดต้องเท่ากับศูนย์ นั่นคือแรงดันไฟฟ้าสะท้อนกลับขนาดเท่ากัน แต่มีเฟสตรงข้ามจะทำให้ผลรวมเท่ากับศูนย์ได้

พิจารณาเวกเตอร์ในรูป 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสของสายที่ลัดวงจร

(a) แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่เดินทางมาโหลด

(b) แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่สะท้อนกลับจากโหลด

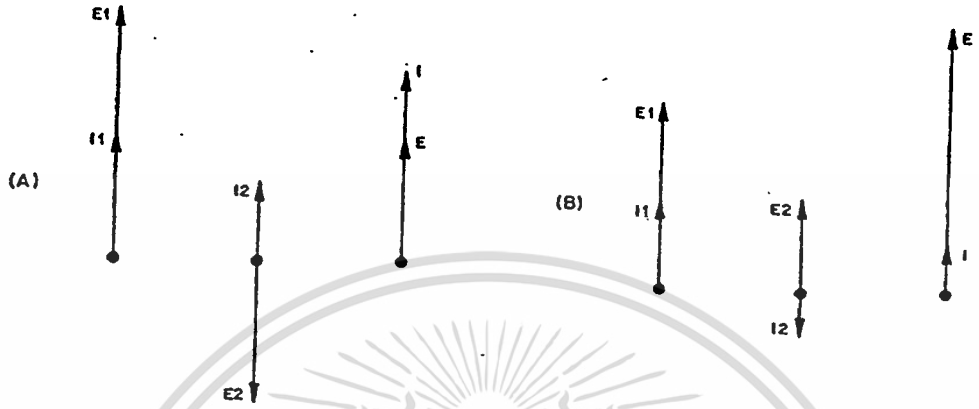
(c) ผลรวมของ (a) และ (b) ที่ให้กระแสสูงขึ้น และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

จากรูปเป็นการแสดงทั้งขนาดและทิศทาง สำหรับกระแสในกรณีลัดวงจร จะไม่หายไปในโหลด ในทางกลับกันกระแสส่วนที่สะท้อนกลับจะไปเสริมค่ากระแสที่เดินทางมาโหลด โดยมีขนาดและเฟสเหมือนกัน

2. กรณีเปิดวงจร กำหนดไว้กระแสที่โหลดต้องเท่ากับศูนย์แสดงว่ากระแสที่สะท้อนกลับต้องมีเฟสต่างกับกระแสที่เดินทางมาโหลดอยู่ 180° และมีขนาดเท่ากัน ในทำนองเดียวกับกรณีลัดวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าส่วนที่สะท้อนกลับต้องมีเฟสเหมือนกับส่วนที่เดินทางมาโหลด (ขนาดเท่ากัน) ทำให้เกิดการเสริมของแรงดันไฟฟ้าให้มากขึ้น

พิจารณาเวกเตอร์ในรูป 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสในกรณีที่มีโหลด (R) ต่ออยู่

(a) กรณี R น้อยกว่า Z_0

(b) กรณี R มากกว่า Z_0

3.5 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)

อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่สะท้อนกลับจากโหลด กับส่วนที่เดินทางมาโหลดเราแทนค่านี้ว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน เขียนเป็นสูตรคือ

$$\rho = \frac{E_r}{E_f}$$

โดยที่ ρ แทนสัมประสิทธิ์การสะท้อน

E_r แทนแรงดันไฟฟ้าสะท้อนกลับที่โหลด

E_f แทนแรงดันไฟฟ้าเดินทางมาโหลด

ค่า P จะเกี่ยวข้องกับตัวแปร 2 ค่า คือ ค่า Z_0 และค่าโหลดที่ต่ออยู่ นอกจากนี้ค่า P จะต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่งและมากกว่าศูนย์เสมอ ถ้าโหลดที่ต่อเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียว (R) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหาได้จาก

$$\rho = \frac{R - Z_0}{R + Z_0}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R เป็นความต้างทานที่นำมาติดกับสายนำสัญญาณค่า P มีเครื่องหมายบวกต่อเมื่อค่า R มากกว่า Z_0 และมีเครื่องหมายลบ ต่อเมื่อค่า R น้อวกว่า Z_0 การเปลี่ยนเครื่องหมายของ P แสดงถึงการเปลี่ยนเฟส ของแรงดันไฟฟ้าที่สะท้อนจากโหลด

ตัวอย่างการคำนวณ

จงคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายที่มีค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายเท่ากับ 50 โอห์ม ถูกต่อเข้ากับโหลดที่มีขนาดดังนี้

(1) 50 โอห์ม (2) 30 โอห์ม (3) 100 โอห์ม

คำตอบ

จากสูตรคำนวณหาได้ว่า

(1) $\rho = \frac{50-50}{50+50} = 0$ (Ans.)

กรณีนี้คำตอบจะถูกยกเว้นไป เพราะค่า $Z_0 = R$ จึงไม่มีการสะท้อนเกิดขึ้น

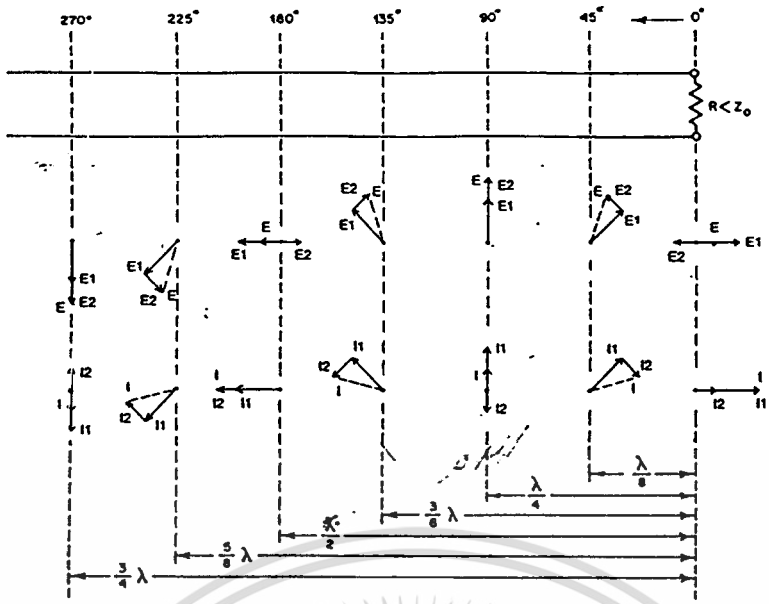
(2) $\rho = \frac{30-50}{30+50} = -0.25 = 0.25 \quad 180^\circ$ (Ans.)

(3) $\rho = \frac{100-50}{100+50} = 0.33 = 0.33 \quad 0^\circ$ (Ans.)

3.6 คลื่นนิ่ง (Standing Waves)

การสะท้อนของคลื่นพลังงานที่โหลดมีผลต่อแรงดันไฟฟ้า และกระแสบนสายนำสัญญาณ ซึ่งอธิบายจากภาพเวกเตอร์ในรูป 3.15 (เป็นกรณีค่า R Z_0) แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ตำแหน่งโหลด (R) เหมือนกับเวกเตอร์ในรูป 3.14 (a)

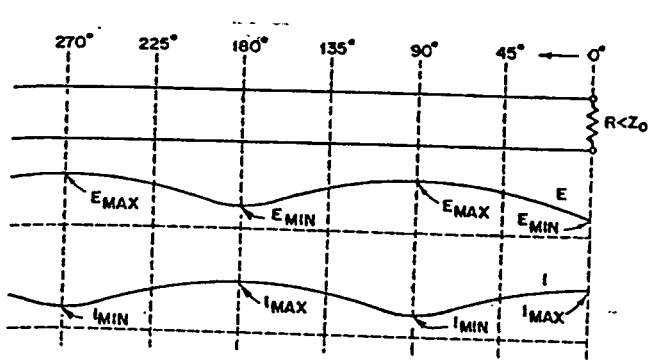
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



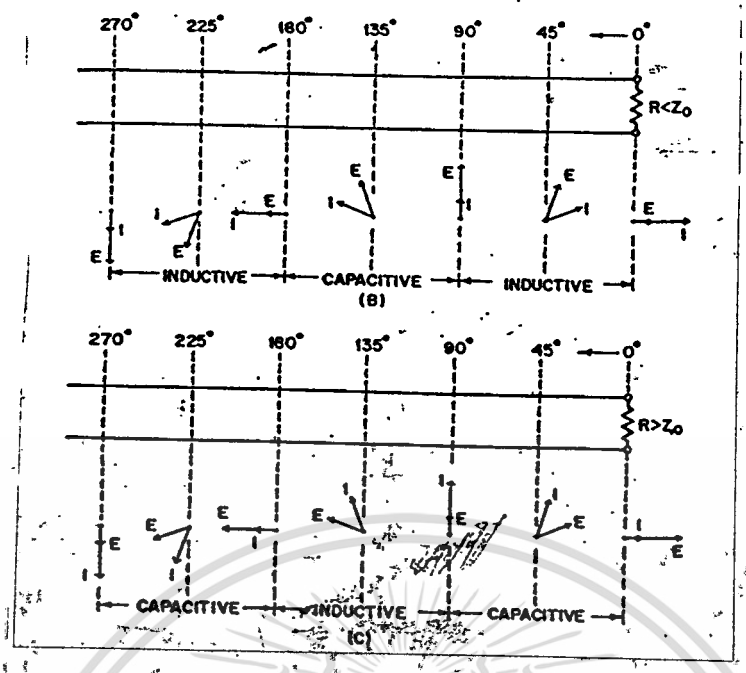
รูปที่ 3.15 แสดงเวกเตอร์ของส่วนประกอบต่าง ๆ บนสายนำสัญญาณ ในกรณีที่ค่า R น้อยกว่า Z_0

จากรูปพิจารณาจากโหลด (R) ไปหาแหล่งกำเนิดพลังงาน เวกเตอร์ของส่วนมาหาโหลด, E1 และ I1, จะนำหน้าเวกเตอร์ที่จุดต่อโหลดตามระยะทางของสายที่วัดในหน่วยองศา (เทียบได้เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) เวกเตอร์ของส่วนสะท้อนจากโหลด, E2 และ I2, จะตามหลังเวกเตอร์เดียวกันนี้ ณ จุดต่อโหลด สำหรับผลลัพธ์ของ E และ I แสดงเป็นเส้นประในแต่ละตำแหน่งเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าส่วนที่เดินทางมาที่โหลดกับส่วนที่สะท้อนจากโหลดจะสามารถรักษาขนาดของ E และ I ได้ก็ตาม (ในรูปนี้ส่วนสะท้อนมีขนาดครึ่งหนึ่งของส่วนมาหาโหลด) แต่ถ้าคิดผลลัพธ์ทั้งหมดแล้ว ค่า E และ I ในแต่ละตำแหน่งบนสายต่างกัน

สรุปคิดขนาดและเฟสเปลี่ยนไปตามตำแหน่งบนสาย ถ้าเราสนใจเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างเดียว จะเขียนกราฟของผลลัพธ์ตามตำแหน่งได้ดังรูป 3.16 (a)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงคลื่นนิ่งที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสบนสายนำสัญญาณ

(a) ผลลัพธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสบนสายที่ไม่แม็ชท์

(b) กรณีค่า R น้อยกว่า Z_0

(c) กรณีค่า R มากกว่า Z_0

ถ้าเรามีโหลดที่แม็ชท์กับสายจะวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสได้เท่ากันตลอดทุกจุดบนสาย แต่กรณีเกิดไม่แม็ชท์ ทำให้ขนาดที่วัดได้เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งบนสายเกิดรูปสัญญาณคล้ายคลื่น เราเรียกว่า คลื่นนิ่ง (standing wave)

ในกรณีที่ R มากกว่า Z_0 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมากที่สุดที่โหลด และค่ากระแสจะน้อยที่สุดที่โหลด ส่วนกรณีค่า R น้อยกว่า Z_0 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะน้อยที่สุดที่โหลด และค่ากระแสจะมากที่สุดที่โหลด (เหมือนรูป 3.16 a)

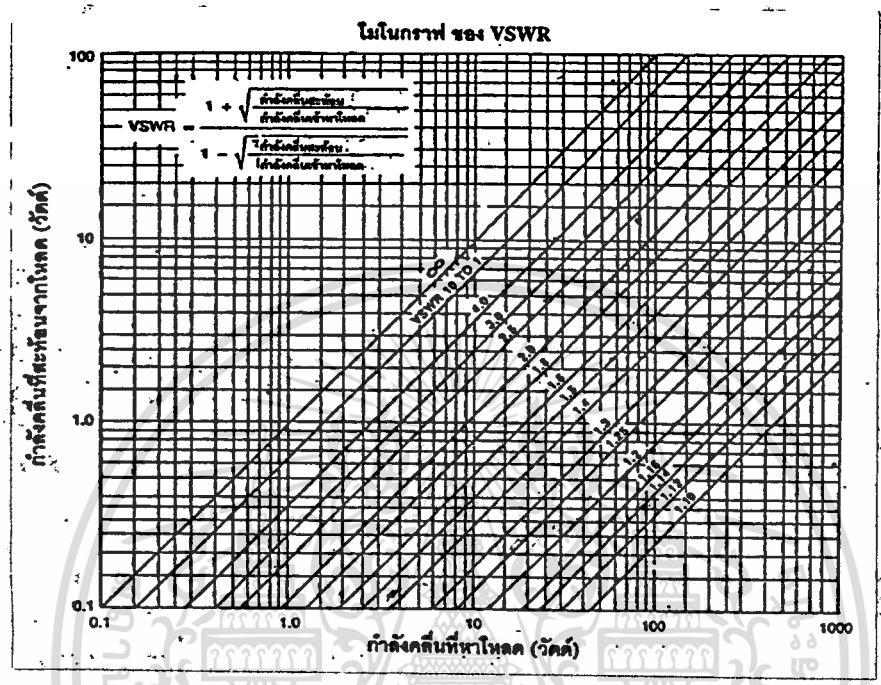
3.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-Wave Ratio : SWR)

อัตราส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดต่อค่าน้อยที่สุด ที่ปรากฏบนสายนำสัญญาณหรือแทนด้วยอัตราส่วนของ E_{max} ต่อ E_{min} (ในรูป 3.16 a) เราเรียกว่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าคลื่นนิ่ง (Voltage-Standing Wave Ratio) เขียนแทนว่า VSWR หรือ ใช้ SWR ก็ได้

เขียนเป็นสูตรว่า $SWR = \frac{E_{max}}{E_{min}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองเดียวกัน ค่ากระแสมากที่สุดต่อค่าน้อยที่สุด (I_{max} / I_{min}) ก็หาเช่นเดียวกับ VSWR พิจารณารูป 3.17 แสดงโนโมกราฟของการหา VSWR โดยคิดจากกำลังคลื่นที่สะท้อนและส่วนมาหาโหล (วัดโดยใช่ อาร์.เอฟ. วัตต์มิเตอร์)



รูปที่ 3.17 แสดงโนโมกราฟของ VSWR

นอกจากนี้ค่า SWR ยังใช้บ่งคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายที่ไม่แม็ชท์ได้ด้วย หรือใช้บอกถึงประสิทธิภาพของสายได้ โดยถ้าโหลดไม่มีค่ารีแอ็กแตนซ์อยู่เลย ค่า SWR จึงคิดได้จากอัตราส่วนระหว่างความต้านทานของโหลด (R) กับอิมพีแดนซ์ประจำตัว (Z_o) ของสาย หรือแยกพิจารณาเป็นกรณี 2 แบบ คือ

– SWR = $\frac{R}{Z_o}$ (ค่า R มากกว่า Z_o)

หรือ = $\frac{Z_o}{R}$ (ค่า R น้อยกว่า Z_o)

เราสรุปได้ว่า การไม่แม็ชท์ของสายนำสัญญาณเกิดมากขึ้น จะมีผลให้ความแตกต่างระหว่างค่า Z_o และ R มีมากขึ้น หรือค่า SWR มีขนาดมากขึ้น ส่วนสายที่มีการแม็ชท์กับโหลดอย่างสมบูรณ์จะไม่มีคลื่นนิ่งเกิดบนสาย และมีลักษณะคลื่นเป็นเส้นตรงตลอดความยาวของสายบางกรณีค่า SWR สามารถหาจากสัมประสิทธิ์การสะท้อน (ρ) ได้จากสูตรต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สายนำสัญญาณชนิดค่าการสูญเสียต่ำ (Low-loss line) มีอิมพีแดนซ์ประจำสายเท่ากับ 70 โอห์ม และถูกต่อกับสายอากาศที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 75 โอห์ม

จงคำนวนหาค่า SWR บนสาย

คำตอบ

หาค่า $\rho = \frac{75-70}{75+70} = 0.035$

(ในที่นี้สายอากาศเทียบได้กับโหลด)

ดังนั้นหาค่า $SWR = \frac{1+0.035}{1-0.035} = 1.07$ (Ans.)

3.8 การวัดค่า VSWR

ค่า VSWR ในทางทฤษฎีคิดจากค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดกับค่าน้อยที่สุด นำมาคำนวณ แต่ในทางอิบัติเราใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือเรียกว่า "VSWR มิเตอร์" หรือ "กัลโวโนมิเตอร์" ใช้วัดค่าบนสาย และนำค่านี้มาคำนวณขนาดอิมพีแดนซ์ของโหลดที่นำมาต่อได้

โดยถ้าโหลดมีอิมพีแดนซ์เป็นค่าความต้านทานอย่างเดียว จะมีวิธีคำนวณง่ายขึ้น

สมมุติให้ $Z_L = R_L = 3R_o$ จะได้ (กรณี R_L มากกว่า Z_o)

$$\rho = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} = \frac{3R_o - R_o}{3R_o + R_o} = \frac{1}{2} \angle 0^\circ$$

ดังนั้น $SWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} = \frac{1+\frac{1}{2}}{1-\frac{1}{2}} = 3$

ในทางกลับกัน ถ้าให้ $Z_L = R_L = \frac{1}{3} R_o$ (กรณี R_L น้อยกว่า Z_o) จะได้

ดังนั้น $SWR = \frac{1+\frac{1}{2}}{1-\frac{1}{2}} = 3$ (เหมือนกับกรณีที่แล้ว)

เห็นได้ว่าค่า VSWR ทั้งของอัตราส่วน R_L/Z_o หรือ Z_o/R_L มีค่าเท่ากันการคำนวณข้างต้นใช้เฉพาะกรณีไม่คิดการสูญเสียในสาย และโหลดที่มาต่อเป็นค่าความต้านทานเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่า VSWR (หรือ SWR) ของสายนำสัญญาณชนิดไม่มีการสูญเสียที่มีค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายเท่ากับ 50 โอห์ม มีค่า 4.2

จงคำนวนหาค่าโหลดที่เป็นความต้านทานอย่างเดียว และมีค่ามากกว่า 50 โอห์ม

คำตอบ

จาก $\frac{R_L}{Z_L}$ = VSWR = 4.2

ดังนั้น R_L = (SWR) x (Z_o) = 4.2 x 50 = 210 โอห์ม (Ans.)

3.9 ชนิดและคุณสมบัติของสายนำสัญญาณ

พื้นฐานของสายนำสัญญาณ เราสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด อย่างแรกได้แก่

1. สายแบบบาลานซ์ (balance line)

จัดเป็นสายที่มีตัวนำ 2 เส้น ที่มีลักษณะเหมือนกัน วางต่อขนานกันโดยมีตัวกลางหรือสายไดอิเล็กตริก (dielectric) กั้นกลางอยู่ เช่น สายแบบโอเพ่นไวร์ หรือสายเปลือยและมีฉนวนต่อยึกสาย (spacers) หรือเรียกว่าสเปสเซอร์เพื่อความแข็งแรงและรักษาการขนานกันของตัวนำไว้

2. สายแบบอันบาลานซ์ (unbalance line)

เป็นสายที่มีตัวนำ 2 เส้นที่มีลักษณะต่างกัน หรือที่นิยมใช้กันมาก คือสายโคเอกเชียล (coaxial cable) สายชนิดนี้ดีกว่าสายแบบบาลานซ์ในแง่ที่สามารถป้องกันการแพร่คลื่นกระจายจากสาย และป้องกันไม่ให้คลื่นวิทยุภายนอกสายแทรกเข้ามาได้ ทำให้สามารถนำไปติดตั้งใกล้กับโลหะได้โดยไม่มีผลการสูญเสียคลื่นออกจากสาย

นอกจากนี้ทั้งสองชนิดยังแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภทตามชนิดฉนวน คือ

1. ฉนวนส่วนใหญ่ระหว่างตัวนำคืออากาศ อาจมีบางส่วนน้อยที่เป็นไดอิเล็กตริกแข็งไว้เสริมโครงสร้างให้แข็งแรง

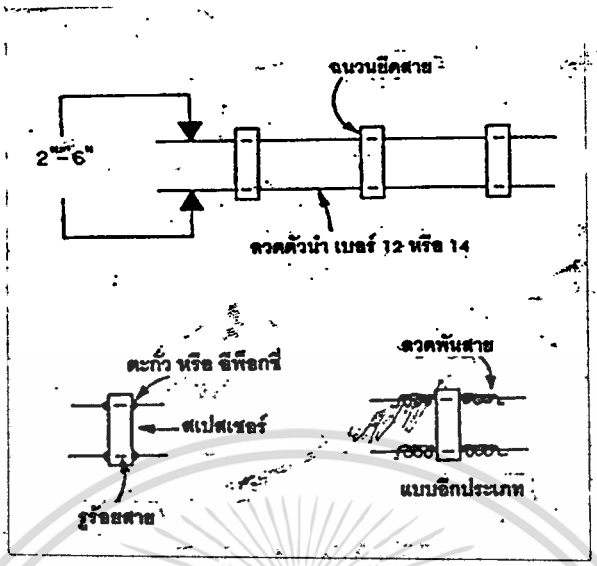
2. ฉนวนที่กั้นระหว่างตัวนำเป็นสารไดอิเล็กตริกแข็ง

เนื้อหาแยกอธิบายตามประเภทฉนวนที่ใช้

3.10 สายแบบใช้อากาศเป็นฉนวน

โครงสร้างเป็นตัวนำ 2 เส้นวางขนานกัน ดังแสดงในรูป 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงลครงสร้างของสายโอเพ่น (open wire)

จากรูปตัวนำถูกยึดด้วยฉนวนยึดสาย เพื่อให้ระยะห่างคงที่สเปสเซอร์อาจใช้ได้หลายแบบ เช่น ทำจาก เทฟล่อน, เพล็กซิแกล็ส, โพลีเอททีลีน หรือลูไซท์ เป็นต้น ความยาวของสเปสเซอร์มีตั้งแต่ขนาด 2 นิ้ว - 6 นิ้ว ในงานวิทยุสมัครเล่น ตัวนำเบอร์ 12 หรือ 14 ที่ใช้ค่าระหว่าง 500-600 โอห์ม

- ค่าอิมพีแดนซ์ประจำสาย (characteristic impedance)
- หาได้จากสูตร (ไม่คิดผลจากสเปสเซอร์)

$$Z_o = 276 \log \frac{2s}{d}$$

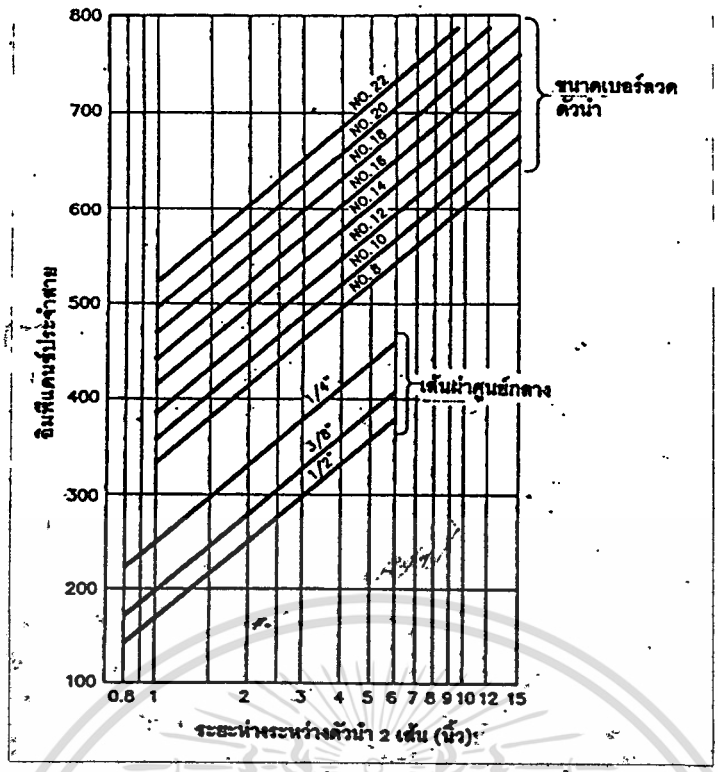
เมื่อ Z_o แทนอิมพีแดนซ์ประจำสาย (โอห์ม)

S = ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของแต่ละตัวนำ

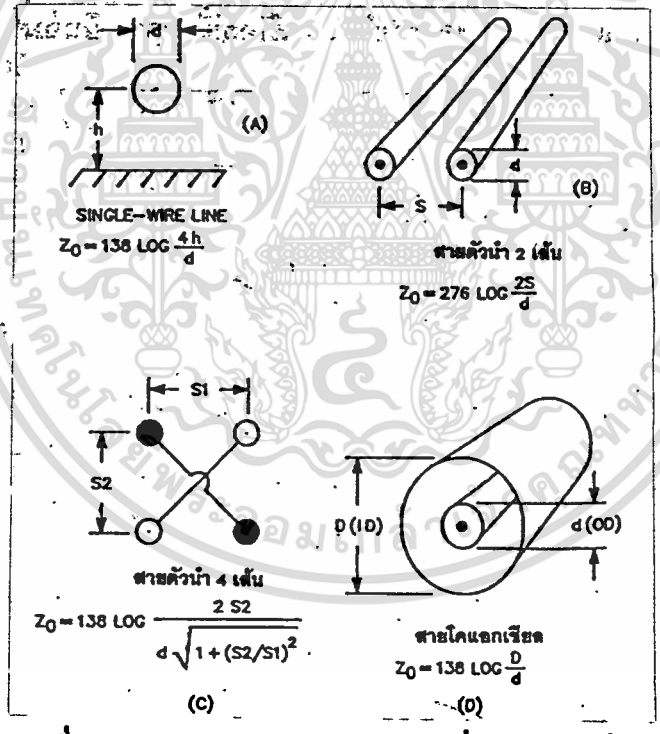
d = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ (มีหน่วยเดียวกับ S)

ค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายของตัวนำเบอร์ต่างดูเทียบได้จากกราฟในรูป 3.19 ส่วนการกำหนดขนาดต่าง ๆ ในสูตรคำนวณ ดูได้จากรูป 3.20 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ประจำสายของสายที่มีตัวนำวางขนานกัน



รูปที่ 3.20 แสดงโครงสร้างของสายที่ใช้อากาศเป็นฉนวน

- สายตัวนำ 4 เส้น

จากรูป 3.20 (c) แสดงภาพตัดขวางของสายตัวนำ 4 เส้น (four-wire line) วางกันในแต่ละมุมเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยตัวนำที่อยู่ตรงข้ามในแนวทแยงมุมจะต่อถึงกัน สายแบบนี้มีค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายต่ำกว่าแบบตัวนำ 2 เส้น เนื่องจากมีโครงสร้างที่สมมาตรจึงมีความสมดุลทางไฟฟ้ากับพื้นดินหรือกราวนด์ และวัตถุอื่นที่อยู่ใกล้สายได้ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายโคแอกเชียล

จากรูป 3.20 (d) สายชนิดนี้มีการสูญเสียบนสายต่ำกว่าแบบอื่นก่อนหน้านี้มีสูตรคำนวณหาอิมพีแดนซ์ประจำสาย คือ

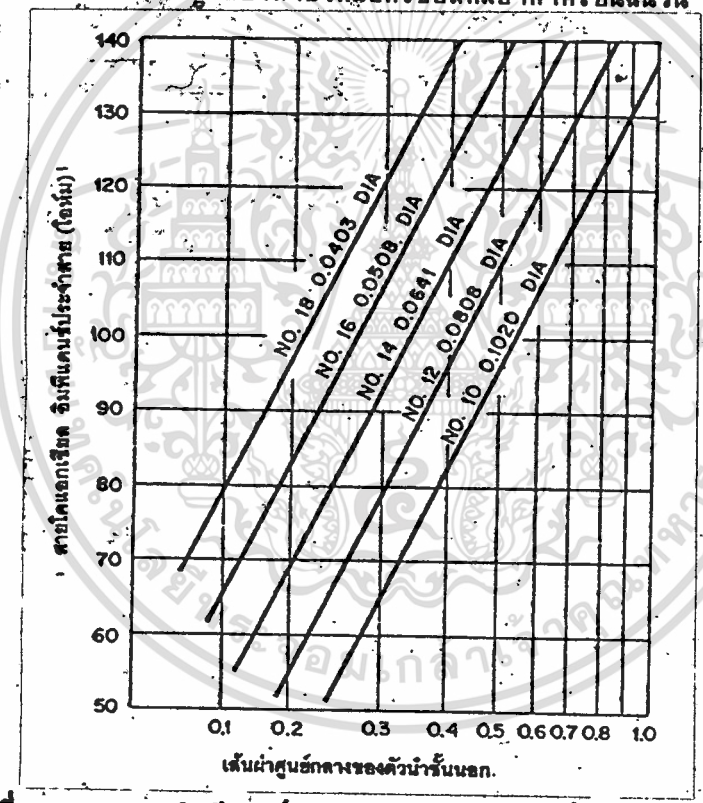
$$Z_o = 138 \log \frac{D}{d}$$

เมื่อ Z_o = อิมพีแดนซ์ประจำสาย (โอห์ม)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำชั้นนอก

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำชั้นใน (มีหน่วยเดียวกับ D

สำหรับกราฟแสดงว่า Z_o ของสายโคแอกเชียลที่มีอากาศเป็นฉนวน แสดงในรูป 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงอิมพีแดนซ์ประจำสายโคแอกเชียลที่มีอากาศเป็นฉนวน

3.11 สายแบบเฟล็กซิเบิล (Flexible lines)

มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถโค้งงอหรือม้วนสายได้โดยง่าย ซึ่งมีสารไดอิเล็กเตริกแบบอ่อนอยู่ และข้อดีกว่าแบบใช้อากาศเป็นฉนวนดังนี้

- มีน้ำหนักเบากว่า
- มีระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองอย่างแน่นอน
- ง่ายในการติดตั้ง

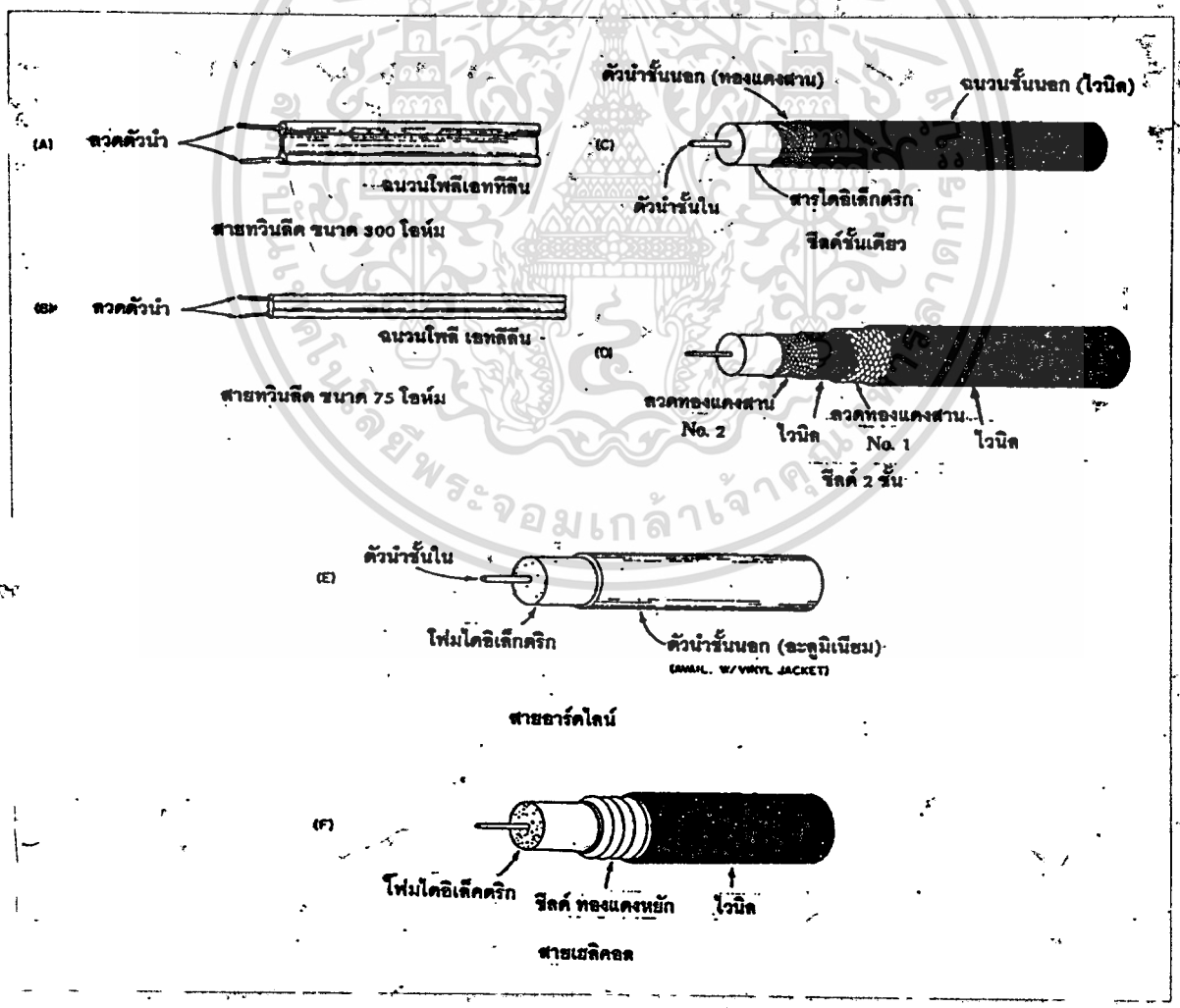
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายแบบตัวนำวางขนานกับสายโคแอกเชียล มีแบบเฟล็กซิเบิลด้วย ข้อเสียที่เห็นชัดของสายแบบเฟล็กซิเบิล คือ ค่าการสูญเสียกำลังต่อหน่วยความยาวมีมากกว่าสายแบบฉนวนเป็นอากาศ โดยกำลังคลื่นสูญเสียไปในรูปความร้อน และถ้าร้อนจนมากเกิน อาจทำให้สายเสียหายทั้งทางกายภาพและทางไฟฟ้าได้

สำหรับสายที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นมาอีก เรียกว่า เซมิเฟล็กซิเบิล (semi flexible) เช่น สายแบบเฮลิคอล (helical line) เป็นต้น และยังมีสายฮาร์ดไลน์ (hard line) โดยใช้ท่อโลหะบาง ๆ เช่น อะลูมิเนียม เป็นตัวนำด้านนอก รายละเอียดของสายแบบต่าง ๆ อธิบายดังต่อไปนี้

1. สายแบบตัวนำวางขนานกัน

โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของสายเฟล็กซิเบิล แสดงดังรูป 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของสายเฟล็กซิเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.22 (a) สายทวินลีดขนาด 300 โอห์ม (หรือเรียกว่าแบบบริบอน-ribbon) จะใช้ลวดตัวนำขนาดเบอร์ 20 และวางขนานโดยมีฉนวนโพลีเอททีลีนหุ้มคั่นห่างกันประมาณ 1/2 นิ้ว สายแบบนี้มีข้อเสียอยู่บ้าง คือ ความชื้นในบรรยากาศจะมีผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายเปลี่ยนไป ทำให้เกิดไม่แม็ชท์กับโหลด และสูญเสียพลังงานไปในสายอาจแก้ไขโดยทำความสะอาดเป็นครั้งคราวหรือใช้สารเคลือบกันน้ำ เช่น ซิลิโคน หรือขี้ผึ้งทางรถยนต์ เป็นต้น

สำหรับรูป 3.22 (b) เป็นสายทวินลีดขนาด 75 โอห์ม ที่ใช้ลวดตัวนำเบอร์ 12 และมีระยะห่างระหว่างตัวนำน้อยกว่า มีข้อดีคือ ทนต่อความชื้นในบรรยากาศได้ดีกว่าแบบ 300 โอห์ม

2. สายโคแอกเชียล

รูปแบบต่าง ๆ ของสายโคแอกเชียล ดูได้จากรูป 3.22 (c), (d), (e), (f) ซึ่งจะมีหลักการเหมือนกัน

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในสายกับขนาดของสาย เป็นสัดส่วนโดยตรงระหว่างกัน อธิบายคือ ถ้าขนาดของไดอิเล็กตริก และตัวนำหนาขึ้น จะสามารถนำไปใช้กับแรงดันไฟฟ้า และกระแสได้ปริมาณมากขึ้น หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าการสูญเสียในสายลดลง ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสายเพิ่มขึ้น รูปร่างของสายโคแอกเชียลโดยทั่วไป เหมือนในรูป 3.22 (c) คือ แกนของสายเป็นตัวนำเส้นกลม อาจเป็นเส้นเดียวหรือเส้นเล็กหลายเส้นพันรวมกัน หุ้มด้วยสารไดอิเล็กตริก โดยถ้าใช้งานในย่าน ความถี่ต่ำ จะใช้สายโพลีเอททีลีน หรือโพลีเอททีลีนโฟมแต่ถ้าใช้งานในความถี่สูงมักใช้สายเทฟล่อนแทน บางกรณี จะใช้ก๊าซเป็นสารไดอิเล็กตริกแทน เช่น ไนโตรเจน ที่มีคุณสมบัติกำจัดความชื้นไปในตัว และต้องคอยควบคุมปริมาณ, ความดันของก๊าซไว้ตลอด

สายโคแอกเชียลบางแบบมีการป้องกัน คลื่นรบกวนจากภายนอก เข้ามาในสายอย่างเป็นพิเศษ คือ สายแบบมีชีลด์ 2 ชั้น [ดูจากรูป 3.22 (D)]

บางครั้งฉนวนที่หุ้นเป็นวัตถุแข็ง เช่น ใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวนำชั้นนอก

* การพิจารณาเลือกใช้สายโคแอกเชียล

ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งคือ การเลือกใช้สายนำสัญญาณที่มีความเหมาะสมกับสายอากาศให้ดีที่สุด เพื่อลดการสูญเสียในสายให้น้อยที่สุด

สายโคแอกเชียลได้จำหน่ายในท้องตลาดมากมาย แต่จะมีมาตรฐานกำหนดอยู่อย่างแน่นอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มาตรฐาน MIL-C-17 เป็นข้อกำหนดทางทหารอเมริกันได้แก่สายที่ขึ้นต้นด้วยเบอร์ RG/U (RG ย่อมาจาก Radio Guide หมายถึง สายนำสัญญาณวิทยุ)

- มาตรฐาน JIS C3501 เป็นของประเทศญี่ปุ่น

ในหนังสือเล่มนี้จะเน้นอธิบายตามมาตรฐาน MIL-C-17 เป็นส่วนใหญ่ ก่อนอื่นขออธิบายให้เข้าใจถึงความหมายของเบอร์สายแต่ละชนิดดังนี้

- มาตรฐาน MIL-C-17 เช่น เบอร์ RG-8 A/U

RG หมายถึง Radio Guide (สายนำสัญญาณวิทยุ)

8 หมายถึง เบอร์ ของสายโคแอกเชียล

A หมายถึง มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น วัสดุทำเปลือกหุ้มเปลี่ยนไป, จำนวนลวดตรงกลางต่างกัน, อิมพีแดนซ์ต่างกันเล็กน้อย, อัตราการสูญเสียต่างกันเล็กน้อย ฯลฯ (ตัวอักษรอาจเป็น B, C ได้หรือไม่มีแล้วแต่กรณี)

U หมายถึง Utility หรือ Universal คือ ใช้งานทั่วไป

- มาตรฐาน JIS C3501 เช่น เบอร์ 3C-2V

3 หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก โดยประมาณของไดอิเล็กตริก

C หมายถึง ค่าอิมพีแดนซ์

โดย C = 75 โอห์ม (เปลือกหุ้มจะมีสีดำหรือขาว)

D = 50 โอห์ม (เปลือกหุ้ม PVC เป็นสีเทาหรือขาว ถ้าเป็น PE จะมีสีดำ)

2 หมายถึง วัสดุที่ทำไดอิเล็กตริก โดยเลข 2 คือ PE (โพลีเอธีลีน) อักษร F คือโฟม (Cellular PE)

V หมายถึง ลักษณะของชีลด์ และเปลือกหุ้มสาย

โดย B คือ ชีลด์ทองแดง + ชีลด์อะลูมิเนียม + PVC (โพลีไวนิลคลอไรด์)

E คือ ชีลด์ทองแดง + PE

L คือ ชีลด์อะลูมิเนียม + PVC

N คือ ชีลด์ทองแดง + ไนล่อนถัก

V คือ ชีลด์ทองแดง + PVC

W คือ ชีลด์ทองแดง 2 ชั้น + PVC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเบอร์ต่าง ๆ ของสายโคแอกเชียล แสดงดังต่อไปนี้

เบอร์สาย	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	ค่าตัวคูณความเร็ว	ค่าความจุไฟฟ้า (pF/ฟุต)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (นิ้ว)	วัสดุใช้ทำไดอิเล็กตริก	แรงดันใช้งานสูงสุด (V_{rms})
RG-6	75.0	75	18.6	0.266	Foam PE	400
RG-8x	52.0	75	26.0	0.242	Roam PE	300
RG-8	52.0	66	29.5	0.405	PE	4000
RG-8 foam	50.0	80	25.4	0.405	Foam PE	1500
RG-8A	52.0	66	29.5	0.405	PE	5000
RG-9	51.0	66	30.0	0.420	PE	4000
RG-9A	51.0	66	30.0	0.420	PE	4000
RG-9B	50.0	66	30.8	0.420	PE	5000
RG-11	75.0	66	20.6	0.405	PE	4000
RG-11 foam	75.0	80	16.9	0.405	Foam PE	1600
RG-11A	75.0	66	20.6	0.405	PE	5000
RG-12	75.0	66	20.6	0.475	PE	4000
RG-12A	75.0	66	20.6	0.475	PE	5000
RG-17	52.0	66	29.5	0.870	PE	11000
RG-17A	52.0	66	29.5	0.870	PE	11000
RG-55	53.5	66	28.5	0.216	PE	1900
RG-55A	50.0	66	30.8	0.216	PE	1900
RG-55B	53.5	66	28.5	0.216	PE	1900
RG-58	53.5	66	28.5	0.195	PE	1900
RG-58 foam	53.5	79	28.5	0.195	Foam PE	600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบอร์สาย	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	ค่าตัวคูณความเร็ว	ค่าความจุไฟฟ้า (pF/ฟุต)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (นิ้ว)	วัสดุใช้ทำไดอิเล็กตริก	แรงดันใช้งานสูงสุด ($V_{max.}$)
RG-58A	53.5	66	28.5	0.195	PE	1900
RG-58B	53.5	66	28.5	0.195	PE	1900
RG-58C	50.0	66	30.8	0.195	PE	1900
RG-59	73.0	66	21.0	0.242	PE	2300
RG-59 foam	75.0	79	16.9	0.242	Foam PE	600
RG-59A	73.0	66	21.0	0.242	PE	2300
RG-62	93.0	86	13.5	0.242	Air space PE	750
Rg-62 foam	95.0	79	13.4	0.242	Foam PE	700
RG-62A	93.0	86	13.5	0.242	Air space PE	750
RG-62B	93.0	86	13.5	0.242	Air space PE	750
RG-133A	95.0	66	16.2	0.405	PE	4000
RG-141	50.0	70	29.4	0.190	PTFE	1900
RG-141A	50.0	70	29.4	0.190	PTFE	1900
RG-142	50.0	70	29.4	0.206	PTFE	1900
RG-142A	50.0	70	29.4	0.206	PTFE	1900
RG-142B	50.0	70	29.4	0.195	PTFE	1900
RG-174	50.0	66	30.8	0.100	PE	1500
RG-213	50.0	66	30.8	0.405	PE	5000
RG-214*	50.0	66	30.8	0.425	PE	5000
RG-215	50.0	66	30.8	0.475	PE	5000
RG-216	75.0	66	20.6	0.425	PE	5000
RG-223*	50.0	66	30.8	0.212	PE	1900
9913 (Belden)*	50.0	84	24.0	0.405	Air space PE	–
9914 (Belden)*	50.0	78	26.0	0.405	Foam PE	–
– เปลือกหุ้มเป็นอะลูมิเนียม , โฟมไดอิเล็กตริก						
1/2 นิ้ว	50.0	81	25.0	0.500		2500
3/4 นิ้ว	50.0	81	25.0	0.750		4000
7/8 นิ้ว	50.0	81	25.0	0.875		4500
1/2 นิ้ว	75.0	81	16.7	0.500		2500
3/4 นิ้ว	75.0	81	16.7	0.750		3500
7/8 นิ้ว	75.0	81	16.7	0.875		4000
โอเพ่นไวน์ (open wire)	–	97	–	–		–
สายทวินลีด	75.0	67	19.0	–		–
สายทวินลีด	300.0	82	5.8	–		–
สายทอบิลาร์	300.0	80	4.6	–		–
สายโอเพ่นไวน์ (ใช้กับงาน TV)						
1/2 นิ้ว	300.0	95	–	–		–
1 นิ้ว	450.0	95	–	–		–

สายเบอร์ที่มีเครื่องหมาย "*" ต่อท้ายเป็นสายแบบมีชีลด์ 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

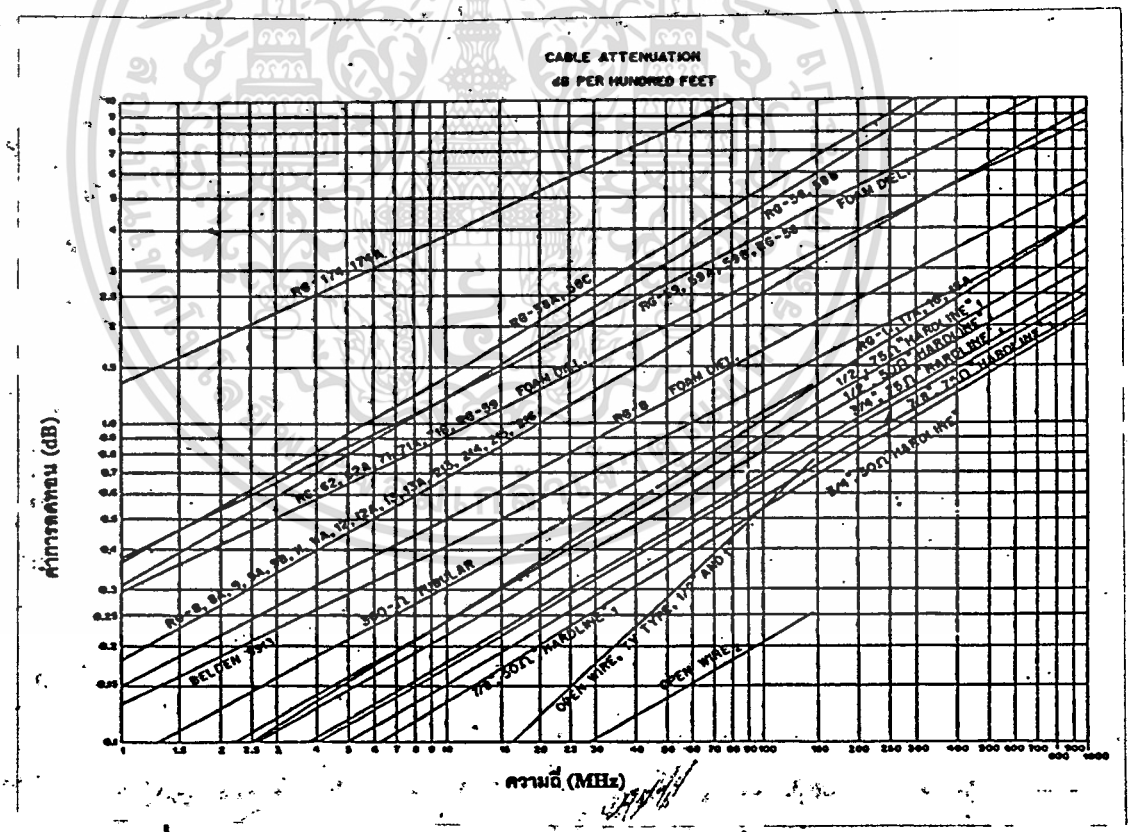
ความหมายของตัวย่อของสายที่ทำเป็นไดอิเล็กตริก

pe	โพลีเอททีลีน	อุณหภูมิใช้งาน (C°)	-65° ถึง + 80°
Foam PE	โฟมโพลีเอททีลีน	อุณหภูมิใช้งาน (C°)	-65° ถึง + 80°
PTFE	เทฟล่อน	อุณหภูมิใช้งาน (C°)	-250° ถึง + 250°

- ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ต่าง ๆ ควรผิดพลาดไม่เกิน $\pm$ 4% และตัวคูณความเร็วที่ความถี่ต่าง ๆ ควรผิดพลาดไม่เกิน $\pm$ 3%

- ค่าความจุไฟฟ้า (pF/ฟุต) ใช้พิจารณาว่าสายโคแอกเซียลไปโหลดการทำงานของเครื่องส่งเพียงใด (เป็นคุณสมบัติสำหรับการออกแบบวงจร)

ลองพิจารณากราฟในรูป 3.23 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนในสายกับความถี่ที่ใช้งาน



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงค่าการลดทอนในสายกับความถี่ใช้งาน

ความยาวของสายที่ใช้งาน นับว่ามีส่วนสำคัญเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าเราเลือกใช้สายเบอร์ RG-58/U ซึ่งมีค่าการลดทอนจากกราฟในรูป 3.23 ที่ความถี่ 150 MHz ในกรณีใช้ความยาวสาย 100 ฟุต เท่ากับ 6 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้าส่งด้วยกำลังส่ง 10 วัตต์ จะถูกลดทอนไปถึง 7.49 วัตต์ ทำให้เหลือกำลังส่งไปถึงสายอากาศเพียง 2.51 วัตต์ เท่านั้น แต่ถ้าเลือกใช้สายเบอร์ RG-8 แบบโฟมจะมีค่าสูญเสียเพียง 2.1 dB และเหลือถึงสายอากาศเท่ากับ 6.17 วัตต์

วิธีคำนวณหากำลังส่งที่ถึงสายอากาศหาได้จากสูตร

$$P_o = P_t \times 10^{(Atten/10)}$$

โดยที่ P_o แทนกำลังส่งที่ไปถึงสายอากาศ

P_t แทนกำลังส่งของเครื่องส่ง

Atten แทนค่าการลดทอนของสายนำสัญญาณ

3.12 ข้อพิจารณาการเลือกใช้สาย

เงื่อนไขที่ใช้พิจารณามีดังนี้

1. การสูญเสียในสาย

สายที่มีอัตราการสูญเสียในสายต่ำถือว่ามีคุณภาพดี ให้กำลังส่งถึงสายอากาศได้ดีมีข้อสังเกตว่า ถ้าใช้โฟมไดอิเล็กตริกจะช่วยลดอัตราการสูญเสียลงได้มาก เช่น สายเบอร์ RG-8/U แบบโฟมมีค่าอัตราการสูญเสียน้อยกว่า RG-8/U ธรรมดา หรือพิจารณาที่จำนวน ลวดตัวนำชั้นในก็ได้ เช่น สายเบอร์ RG-58/U มีลวดตัวนำเป็นเส้นเดี่ยวจะมีการสูญเสียน้อยกว่าสายเบอร์ RG-58/U ที่มีลวดตัวนำเป็นเส้นฝอย 19 เส้น

2. การโค้งงอของสาย

ในงานที่สายถูกใช้แบบบิดหรือโค้งงอบ่อย ๆ เช่น สายอากาศทิศทางที่ต้องมีโรเตอร์หมุนหาทิศทางเราควรใช้สายที่มีลวดตัวนำตรงกลางจำนวนหลายเส้นจะได้ไม่ขาดเร็วเกินไป อย่างเช่น เบอร์ RG-58 C/U หรือพิจารณาที่สารไดอิเล็กตริก ไม่ควรใช้แบบโฟมเพราะไดเล็กตริกจะนิ่มและมีรูพรุน ถ้ามีการบิดสายไปมาอาจทำให้แนวลวดตัวนำไม่อยู่ตรงกลาง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเปลี่ยนไป และค่าการสูญเสียในสายเพิ่มขึ้น

สำหรับสายโฟมและสายเดี่ยว ความใช้กับงงานที่มีการติดตั้งสายในตำแน่งแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การชีลด์ (shield) สายนำสัญญาณ

เราชีลด์สายเพราะต้องการป้องกันไม่ให้คลื่นวิทยุภายนอกมารบกวนคลื่นวิทยุในสายได้ และกันไม่ให้คลื่นวิทยุในสายไปรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกเช่นกัน

ดังนั้นสายโคแอกเชียลที่มีการชีลด์ดี จะให้คุณภาพดีขึ้น

วิธีการชีลด์ที่ใช้มี

- การใช้ลวดทองแดงสานเป็นตัวนำชั้นนอก โดยพิจารณาว่าสามารถครอบคลุมพื้นที่ไดอิเล็กตริกได้มากเท่าใด เช่น อาจครอบคลุมได้ 95% หรือ ในที่การรบกวนสูง ต้องใช้ถึง 100% ก็ได้ โดยดูได้จากความถี่แน่นในการสานลวดทองแดง

- ใช้ท่ออะลูมิเนียม (ในสายฮาร์ด ไลน์) หรือท่อทองแดง (ในสายเฮลิคอล)

- ใช้วิธีทำเป็นชีลด์ 2 ชั้น อย่างเช่น สายเบอร์ RG-214 /U ที่ใช้วิธีชีลด์เป็นลวดทองแดงชุบเงินถักทั้ง 2 ชั้น ครอบคลุมพื้นที่ได้ 100% (มีราคาแพงมาก)

4. ความสามารถในการรับกำลังไฟฟ้า

ระดับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในสายสำคัญมาก เพราะถ้ามีมากเกินขีดกำหนดอาจทำให้สายเสียหายแตกหักได้

ความสามารถในการรับกำลังไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้

- อัตราทนแรงดันของสารไดอิเล็กตริก
- ค่าความต้านทานของลวดตัวนำ
- ขีดจำกัดอุณหภูมิของสารไดอิเล็กตริกและเปลือกหุ้ม
- ระยะเวลาใช้งาน
- อัตราลดทอนที่ความถี่นั้น ๆ

5. อายุการใช้งาน

ขึ้นกับเงื่อนไขต่อไปนี้

- สภาพการใช้งานทางไฟฟ้าและสภาพการติดตั้งสาย
- คุณสมบัติของสารที่ใช้ทำเปลือกหุ้ม เช่น PVC (โพลีไวนิลคลอไรด์), NMV (Non-Migratory PVC) เป็นต้น

เราพิจารณาตามเนื้อสารที่ใช้ทำเปลือกหุ้มดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สาร PVC ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สารที่ผสมใน PVC ซึมผ่านสารไดอิเล็กตริกทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป ค่าอิมพีแดนซ์สูงขึ้นเกิดการลดทอนมากกว่าเดิม การซึมผ่านของสาร PVC ถือเป็นเรื่องปกติ แต่ถ้าได้รับความร้อนจะเกิดเร็วขึ้น มีผลให้สายเสื่อมคุณภาพลงถ้าระยะเวลาที่เกิดการซึมผ่านเกิดขึ้นถึงระดับหนึ่ง

- สาร NMV จัดเป็นสาร PVC ชนิดพิเศษที่ไม่เกิดการซึมผ่านเลย ดังนั้นในสายที่ต้องตากแดดตากฝนตลอดปี ควรเลือกแบบ NMV แทน PVC เช่น สายเบอร์ RG-58 C/U แทน Rg-58 A/U

ส่วนสายที่มีชีลด์เป็นท่อโลหะหุ้มล้อมรอบจะเลือกใช้สารใดก็ได้ เพราะมีโลหะป้องกันสารไดอิเล็กตริกไว้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิธีแม็ชท์ในระบบสายอากาศ

4.1 บทนำ

นักวิทยุสมัครเล่นจำนวนมากยังมีความสับสนเกี่ยวกับสายอากาศคือ ถ้ามีสายอากาศแบบเดียวกันสองชุด และใช้สายนำสัญญาณต่างชนิดกัน หรือใช้ชนิดเดียวกัน แต่วิธีแมทช์ต่างกัน จะมีผลให้งานของสายอากาศนี้ต้องแตกต่างกันไป

ทั้งที่ในความเป็นจริง สายอากาศแบบเดียวกัน ถึงแม้จะใช้สายนำสัญญาณต่างชนิดก็สามารถนำมาใช้งานเดียวกันได้ เพราะว่าถ้าพิจารณาในแง่สายนำสัญญาณแล้ว พบว่าสายอากาศเป็นเพียงโหลดมีคุณสมบัติเป็นความต้านทาน หรือรีแอ็กแตนซ์ต่อสายนำสัญญาณชนิดใด ๆ สามารถนำมาใช้ร่วมกับสายอากาศแบบใดก็ได้ ถ้าวิธีแมท์ระหว่างกันถูกต้อง

4.2 ช่วงของความถี่และอัตราส่วน SWR

เงื่อนไขอย่างหนึ่งที่ใช้พิจารณาการใช้งานของสายนำสัญญาณ คือย่านความถี่ของสายอากาศในขณะใช้งานอยู่ จึงทำให้ผู้สร้างอาจมีตัวเลือกในการทำสายอากาศอยู่ 2 วิธีคือ

1. ระบบสายอากาศที่ใช้ร่วมกับสายนำสัญญาณซึ่งมีค่า SWR ต่ำ แต่จะใช้ในย่านความถี่ได้หนึ่งค่าหรือมากกว่านี้เล็กน้อย (ย่านความถี่แคบ)

2. ระบบสายอากาศที่ใช้ร่วมกับสายนำสัญญาณ ซึ่งมีค่า SWR สูง และใช้ได้หลายความถี่ (ย่านความถี่กว้าง)

ในทางปฏิบัติวิธี (แมทช์) ระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ พอแบ่งได้ 2 ขั้นตอน คือ

-ขั้นตอนหนึ่ง พิจารณาการใช้งานในย่านความถี่หลายย่านเป็นอันดับแรก และพิจารณาค่า SWR ที่ เกิดขึ้นเป็นอันดับรอง ซึ่งโดยปกติค่า SWR จะค่อนข้างสูง และอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณขึ้นอยู่กับความยาวสายและความถี่ใช้งาน

-ขั้นตอนสอง อาจมีความจำเป็นจะต้องปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำสายเพื่อให้แมทช์กัน มีผลทำให้ค่า SWR ต่ำลง และอินพุทอิมพีแดนซ์เป็นความต้านทานอย่างเดียว

โดยทั่วไปเราพิจารณาสายนำสัญญาณที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสเป็นเส้นตรง (flat) โดยดูจากค่า SWR อยู่ในช่วง 1.5-1

#การสูญเสีย (Losses)

เหตุสำคัญในการแมทช์อิมพีแดนซ์ เพื่อให้ได้ระดับของคลื่นในสายเป็นเส้นตรง เพราะจะมีการสูญเสียกำลังต่ำที่สุด

เอกสารนี้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปเรามักจะลดค่าการสูญเสียลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น และค่า SWR จะมีผลเกี่ยวข้องอย่างมาก แต่ข้อความข้างต้นเป็นจริงบางส่วนเท่านั้น ถ้านำมาพิจารณาความถี่ด้านต่ำซึ่งมีการสูญเสียน้อย ถึงแม้ความยาวของสายจะเพิ่มก็ยังจัดว่าน้อยอยู่

ตัวอย่างเช่นสายทวินลีดแบบ 300 โอห์ม ขนาดความยาว 100 ฟุต จะมีการสูญเสียเพียง 0.18 dB ที่ความถี่ 3.5 MHz และถึงแม้ว่าค่า SWR เพิ่มสูงเป็น 10 ต่อ 1 ค่าสูญเสียจะเพิ่มขึ้นมาอีกเพียง 0.7 dB ซึ่งถือว่าน้อยมาก เพราะ 1 dB จะแทนการเปลี่ยนแปลงที่น้อยที่สุดในความเข้มสัญญาณ ดังนั้นในความถี่ขนาดนี้จะไม่เน้นมากนักว่าระดับคลื่นในสายเป็นเส้นตรงหรือไม่

ส่วนความถี่ 144 MHz ค่าความสูญเสียของสายขนาดเดียวกันที่แมทช์ดีแล้วยังมีค่า 2.8 dB และถ้าค่า SWR เพิ่มเป็น 10 ต่อ 1 ทำให้การสูญเสียส่วนที่เพิ่มขึ้นมีขนาด 3.9 dB

จึงพอสรุปว่า ถ้าความถี่สูงขึ้น การแมทช์ระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศเป็นเรื่องสำคัญมาก

*ขีดจำกัดของกำลังคลื่น

เหตุประการหนึ่งที่ต้องมีการแมทช์ คือ สายนำสัญญาณแต่ละชนิดจะมีขีดจำกัดของแรงดันไฟฟ้าอยู่ ดังนั้นการเลือกระดับกำลังคลื่นที่มาใช้กับสายจึงเป็นเรื่องสำคัญไม่เช่นนั้นอาจเกิดความเสียหายกับสายได้

มีหลักการว่า ขนาดกำลังไฟฟ้าที่สายนำสัญญาณใช้งานได้จะเป็นสัดส่วนกลับกันกับค่า SWR อย่างเช่น สายแบบ 300 โอห์ม (ทวินลีด) ใช้กำลังไฟฟ้าได้ 500 W ถ้าถูกแมทช์อย่างดี (SWR = 1:1) แต่จะมีค่าเหลือ 50 W ถ้าค่า SWR เพิ่มขึ้นเป็น 10 ต่อ 1

4.3 การแมทช์สายนำสัญญาณ

การใช้งานสายนำสัญญาณที่ค่าอัตราส่วน SWR ต่ำ ต้องใช้โหลดที่แมทช์กับอิมพีแดนซ์ประจำสายให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด

ปัญหาข้อนี้มีทางแก้ไข 2 วิธี ดังนี้

- วิธีที่ 1 เลือกสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์ประจำสาย แมทช์กับความต้านทานของสายอากาศที่จุดต่อ

- วิธีที่ 2 ปรับค่าความต้านทานของสายอากาศ ให้แมทช์กับค่า Z_0 ของสายนำสัญญาณที่เลือกใช้

วิธีแรกจัดว่าง่ายและไม่ยุ่งยากที่จะต่อโดยตรงเลย แต่ข้อจำกัดของวิธีมีสูงมากเพราะอิมพีแดนซ์ของสายอากาศและสายนำสัญญาณที่มีเท่ากันหาได้น้อยชนิดมาก สำหรับวิธีที่สองให้อิสระในการประยุกต์ใช้งานสูง ข้อเสียประการเดียวคือ ความยุ่งยากในการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*พิจารณาการทำงาน

จากที่ได้กล่าวมาก่อนแล้วว่า ระบบสายอากาศส่วนมากมีการเปลี่ยนค่าความต้านทานอย่างชัดเมื่อความถี่เพิ่มจากค่าพื้นฐานเป็นจำนวนเท่าของค่านี้

ด้วยเหตุนี้การแม็ชท์อิมพีแดนซ์สายนำสัญญาณจึงมักทำได้เฉพาะย่านความถี่เดียวเท่านั้น โดยส่วนใหญ่ระบบสายอากาศที่แมชท์จะใช้ในกิจการหนึ่งแถบความถี่ ถึงแม้ว่าบางกรณีอาจเกินไปจากแถบความถี่ที่กำหนดก็จะไม่มากนัก

แถบความถี่นี้พอพิจารณาได้จากช่วงที่มีค่า SWR ต่ำ หรือดูจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ต่อความถี่โดยค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยเมื่อค่าความถี่เปลี่ยนไปมีผลให้ค่าSWR ต่ำและแถบความถี่กว้าง

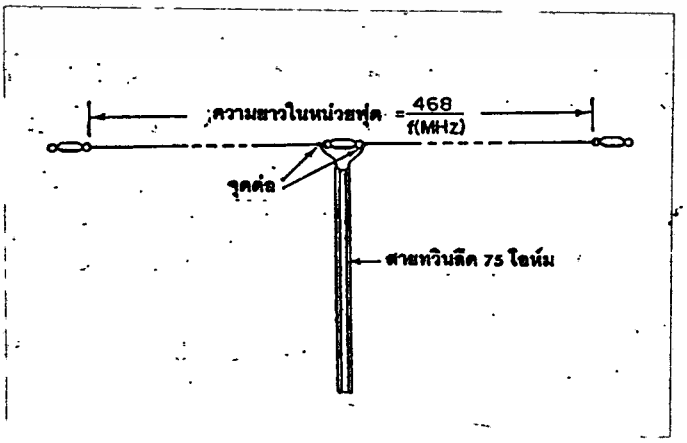
*การรีโซแนนซ์สายอากาศ

จุดที่ควรให้ความสนใจในการแม็ชท์สายอากาศกับสายนำสัญญาณ คือ อิมพีแดนซ์ที่จุดต่อต้องเป็นความต้านทานอย่างเดียวเท่านั้น หมายความว่าระบบสายอากาศจะรีโซแนนซ์ที่ความถี่ในกรณีสายแม็ชท์แล้ว

4.4 การแมชท์โดยตรง

จากที่ได้กล่าวมาบ้างแล้ว ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศรีโซแนนซ์ขนาด 1/2λ ที่ความสูง 1/4λ หรือมากกว่านี้ (จำนวนเท่า) มีค่าเป็นความต้านทานอย่างเดียวและมีค่าประมาณ 70 โอห์ม

เราสามารถนำสายนำสัญญาณ (ส่ง) แบบทวินลีดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายเท่ากับ 75 โอห์ม ก็สามารถใช้งานได้ ถึงแม้จะเกิดค่า SWR ขนาดต่ำก็ตามดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการต่อไดโพลแบบ 1/2λ กับสายทวินลีด 75 โอห์ม

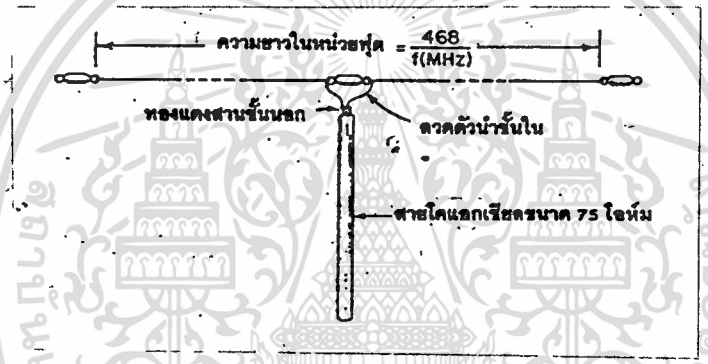
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีต่อในรูป 4.1 ใช้งานได้ดีเมื่อความถี่ใช้งานเป็นจำนวนเท่าเลขคี่ของความถี่พื้นฐาน อย่างเช่น สายอากาศจะรีโซแนนซ์ที่ความถี่ 7 MHz สามารถทำงานในความถี่ 21 MHz โดยเกิดค่า SWR ต่ำได้ดี (3 เท่าจากความถี่พื้นฐาน)

แต่กรณีเป็นจำนวนเท่าของเลขคู่ของความถี่พื้นฐาน จะให้ผลการทำงานไม่ดีเลย

*กรณีใช้สายโคแอกเชียล

แทนที่จะใช้สายทวินลีดเหมือนกรณีก่อน เราสามารถใช้สายโคแอกเชียลแบบ 75 โอห์ม (เช่น ชนิด RG-11) ต่อแทนได้เหมือนในรูป 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการต่อสายอากาศแบบ 1/2λ กับสายโคแอกเชียลขนาด 75 โอห์ม

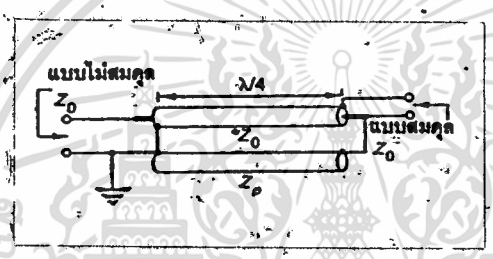
บางครั้งอาจใช้สายโคแอกเชียลที่มีอิมพีแดนซ์ประมาณ 52 โอห์ม เช่น ชนิด (RG-8) เมื่อความสูงของสายอากาศต่ำกว่า 1/4λเพราะจะมีผลลดค่าความต้านทานการแพร่คลื่นของสายอากาศลง

สำหรับหลักการเกี่ยวข้องกับค่า SWR เหมือนกับแบบทวินลีด แต่ส่วนที่แตกต่างกันระหว่างทั้งสองกรณี คือ สายอากาศแบบทวินลีดเป็นสายที่มีความสมดุลทางไฟฟ้าอยู่ ส่วนสายโคแอกเชียลไม่มีความสมดุลทางไฟฟ้า กล่าวอย่างละเอียดคือ ในกรณีต่อกับสายโคแอกเชียลด้านนอกของตัวนำชั้นนอกไม่ได้ต่อกับสายอากาศผิดกับตัวนำชั้นในและด้านในของตัวนำชั้นนอกที่ต่อโดยตรงอยู่มีผลลัพธ์กระแสบางส่วนไหลบนด้านนอกนี้ เป็นการสูญเสียอย่างหนึ่ง ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศนำสัญญาณมีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของสายอากาศ และใช้ในย่านความถี่วิทยุสมัครเล่นช่วงความถี่ต่ำแล้ว ผลจากความไม่สมดุลย์ทางไฟฟ้านี้สามารถละทิ้งไม่คิดได้ เพราะมีขนาดเล็กน้อยมาก แต่ในย่านความถี่ VHF และ UHF จะมีผลอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บาลัน (Balun)

ในย่านความถี่สูง วิธีต่อโดยตรงระหว่างสายที่มีความสมดุล (ทางไฟฟ้า) กับสายที่ไม่มีความสมดุล มีผลทำให้เกิดสูญเสียพลังงานที่แหร่ออกมา หรือเกิดการแทรกจากสัญญาณรบกวนภายนอกได้บาลันจัดเป็นวงจรที่ใช้เชื่อมต่อสายแบบสมดุลกับแบบไม่สมดุล โดยไม่มีผลกระทบใด ๆ สำหรับย่านความถี่คลื่นวิทยุ ถ้ามีใช้กำลังไฟฟ้าจนถึง 5 kW หรือความถี่จนถึง 30 MHz จะใช้บาลันได้ พิจารณาจากรูป 4.3



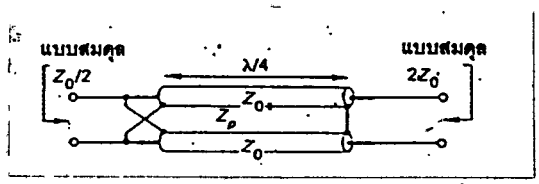
รูปที่ 4.3 แสดงบาลันแบบอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ 1:1

จากรูป ปลายบาลันด้านแบบไม่สมดุล ตัวนำชั้นนอกของสายโคแอกเชียลต่อตรงกับตัวนำแท่งกลม (ตัวล่าง) ซึ่งตัวนำล่างนี้มีค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวนำเท่ากับ Z_0 ทั้งสองมีความยาวขนาด 1/4λ ดังนั้นถ้าพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่มองเข้ามาทางขวามือของบาลันมีค่าเท่ากัน $Z_0^2/0$ หรือเป็นวงจรเปิดนั่นเอง

ส่วนปลายบาลันด้านสมดุล ตัวนำเส้นหนึ่งต่อกับชั้นนอกของโคแอกเชียบ และอีกเส้นต่อกับชั้นในของโคแอกเชียลรวมถึงตัวนำแท่งกลมด้วย (ไม่มีการต่อกราวนด์ในด้านนี้)

โดยทั่วไป สายแบบไม่สมดุลมีค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายในช่วง 50-75 โอห์ม ในขณะที่สายแบบสมดุล (ทวินลีด) มีค่าเกินหลายร้อยโอห์ม จึงมีความจำเป็นที่ต้องปรับขนาดอิมพีแดนซ์ของสายให้เข้ากันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

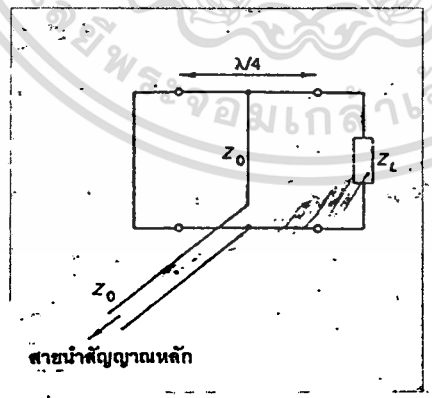


รูปที่ 4.4 แสดงบาลันแบบอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ 4:1

จากรูปเราใช้สายโคแอกเชียล 2 เส้น โดยด้านซ้ายมือมีการต่อตัวนำกับด้านนอกของสายโคแอกเชียลในลักษณะขนานกัน และด้านขวามือมีการต่อตัวนำกับด้านนอกของสายโคแอกเชียลในลักษณะอนุกรมกัน ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายของแต่ละเส้นมีค่าเท่ากันคือ Z_0 โอห์มจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่คร่อมจุดต่อด้านขวามือเท่ากับ $2Z_0$ โอห์มและค่าอิมพีแดนซ์ที่คร่อมจุดต่อด้านซ้ายมือเท่ากับ $Z_0/2$ ตัวอย่างเช่น ค่าอิมพีแดนซ์ขนาด 300 โอห์ม สามารถปรับให้เหลือ 75 โอห์มได้

4.6 การแมชท์โดยวิธีสตับ

มีการแมชท์สายอีกวิธีเรียกว่า สตับ (Stub) ลองพิจารณาจากรูป 4.5



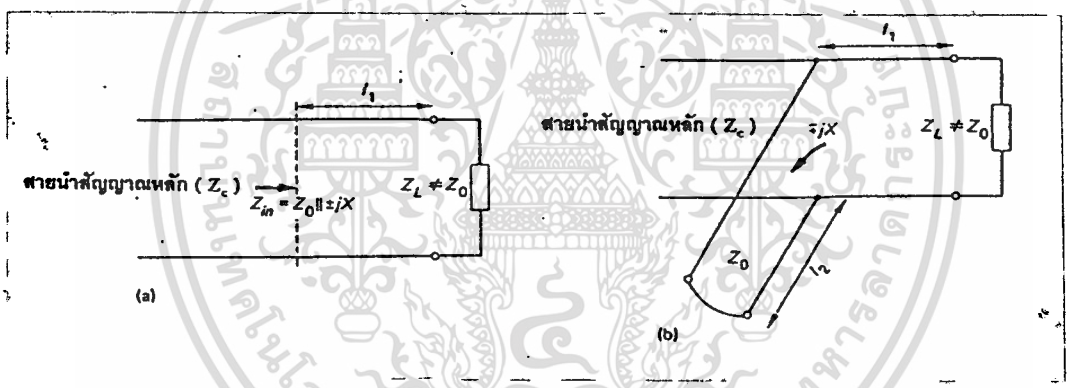
รูปที่ 4.5 แสดงวิธีสตับบนสายยาว $\lambda/4$

พิจารณาสายขนาด $\lambda/4$ พบว่าปลายด้านซ้ายมือลัดวงจรอยู่และปลายด้านขวามือต่อกับโหลดขนาด Z_L ค่าอิมพีแดนซ์บนสาย $\lambda/4$ จะเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากโหลดซึ่งมีค่าตั้งแต่ Z_L ถึงศูนย์และ ณ จุดหนึ่งจะมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำสายของสายของสายนำสัญญาณหลัก ถ้ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อสายนำสัญญาณเข้าที่ ณ จุดนี้ ถือว่ามีการแมชท์เกิดขึ้น พอมองเห็นได้ว่า สายสตับ (Stub line) คือส่วนความยาวของสายด้านที่ลัดวงจร และค่าความยาวนี้มีผลต่อค่าอินพุทรีแอกแตนซ์ด้วยโดยถ้าความยาวทางไฟฟ้าของสตับน้อยกว่าขนาด $\lambda/4$ ทำให้อินพุทรีแอกแตนซ์เป็นค่าความเหนี่ยวนำ (inductive) หรือความยาวทางไฟฟ้าของสตับมากกว่าขนาด $\lambda/4$ ทำให้อินพุทรีแอกแตนซ์เป็นค่าประจุไฟฟ้า (capacitive)

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่ไม่แมชท์กัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากโหลด บางกรณีค่าอิมพีแดนซ์อาจมากกว่าค่า Z_0 ของสายหรือน้อยกว่าก็เป็นได้ สมมุติให้ที่ระยะห่าง l_1 จากโหลด (Z_L) ค่าอิมพิแดนซ์ ณ จุดนั้นมีค่าผลรวมระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ประจำสาย (Z_0) ขนานกับบางส่วนของรีแอกแตนซ์($\pm jx$) ดังแสดงในรูป 4.6(a)



รูป 4.6 แสดงแมชท์โดยวิธีสตับ

(a) แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ระยะห่าง l_1 จากโหลด

(b) ใช้สตับขนาดยาว l_2

จากรูป 4.6(b) มีการต่อสตับคร่อม ณ จุด l_1 โดยความยาวของสตับเท่ากับ l_2 ซึ่งมีค่าอินพุทรีแอกแตนซ์ขนาดเท่ากัน แต่เครื่องหมายตรงข้ามกัน ($\pm jx$) ซึ่งจะเกิดหักล้างค่ารีแอกแตนซ์ทั้งสองหมดเป็นศูนย์ เหลือเฉพาะค่า Z_0 เท่านั้นจึงเกิดการแมชท์ขึ้น

4.7 การแมชท์โดยใช้สายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$

สายนำสัญญาณขนาดยาว มีความสำคัญมากในการปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยกำหนดหาอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายขนาด $\lambda/4$ เป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in} = Z_0^2 / Z_L$$ โอห์ม

โดย Z_{in} แทนค่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุทของสายนำสัญญาณ

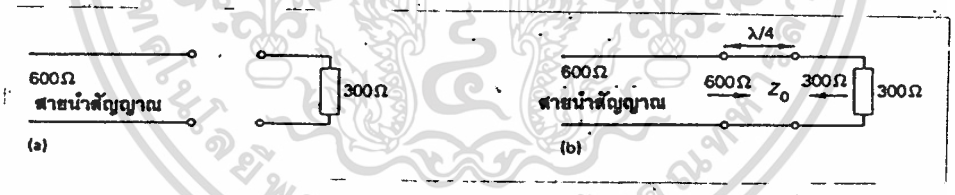
Z_0 แทนค่าอิมพีแดนซ์ประจำสาย

Z_L แทนค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ปลายสาย

หรือเขียนได้ในรูปสมการว่า

$$Z_0 = \sqrt{(Z_L Z_{in})}$$ โอห์ม

การประยุกต์ใช้งานที่เห็นได้ทั่วไปของสายยาว $\lambda/4$ นี้คือการแมชท์สายนำสัญญาณกับโหลดที่มีค่าไม่เท่ากับ Z_0 พิจารณาตัวอย่างในรูป 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างการใช้สายยาว $\lambda/4$

(a) สายนำสัญญาณขนาด 600 โอห์ม และโหลดขนาด 300 โอห์ม

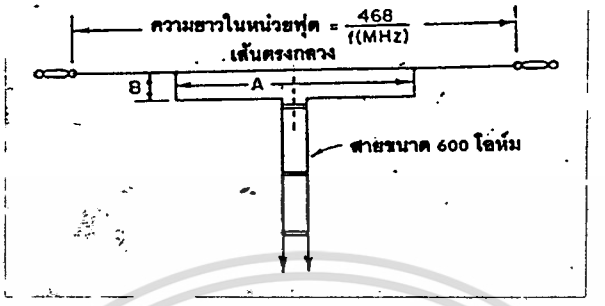
(b) ใช้สายยาว $\lambda/4$ แมชท์เข้ากัน

จากรูปถ้าเราต่อเข้าหากันโดยตรงกับโหลด จะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นขึ้น และเกิดค่าSWR ในสาย ดังนั้นจึงแก้ไขโดยปรับค่าโหลดให้เท่ากับ 600 โอห์มก่อน โดยใช้สายยาวต่อเชื่อมเหมือนในรูป (b) นั่นคือ ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของส่วน $\lambda/4$ เท่ากับ 600 โอห์มด้วยจึงคำนวณหาค่า Z_0 ได้เท่ากับ $\sqrt{(100 \times 300)} = 424.3$ โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 วิธีแมชท์รูปตัวที (T)

แสดงการแมชท์รูปตัวทีในรูป 4.8

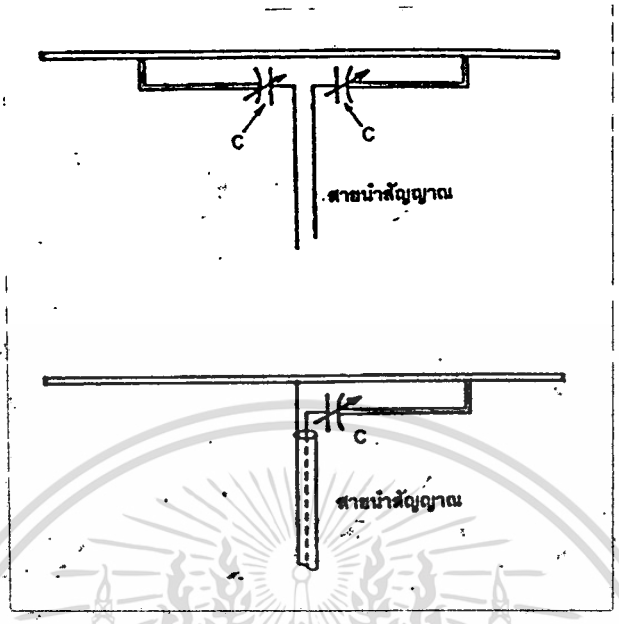


รูปที่ 4.8 แสดงการแมชท์โดยวิธีรูปตัวที (ใช้กับสายอากาศแบบ $\lambda/4$ และสายนำสัญญาณขนาด 600 โอห์ม)

จากรูปมีส่วนคล้ายไดโพลแบบห่วง (folded dipole) เพราะถ้าเราเพิ่มความยาวของ A ให้เท่ากับสายอากาศ ก็เป็นไดโพลแบบห่วงได้ วิธีแมชท์รูปตัวที่จัดว่ามีความยืดหยุ่นในการปรับค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์และง่ายต่อการสร้างด้วย เหมาะที่ใช้กับสายแบบเส้นคู่หรือทวินลีดได้ (แบบสมดุล) ส่วนกรณีโคแอกเชียลต้องใช้อุปกรณ์บาลันร่วมในการติดตั้ง หรือใช้วิธีแมชท์แบบแกมม่าได้ (อธิบายวิธีนี้ในตอนต่อไป) ที่เหมาะกับสายแบบไม่สมดุล

กระแสไฟฟ้าที่ไหล ณ จุดต่อของรูปตัว T ประกอบด้วยกระแสจากสายอากาศที่มาถึงตัวแหล่งกลื่นนี้กับตัวนำรูป T โดยมีค่าขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ และระยะห่างระหว่างทั้งสองเราอาจพิจารณาส่วนตัวนำกับสายอากาศที่ต่อเป็นรูปห่วงว่าเป็นส่วนลัดวงจรของปลายสายนำสัญญาณได้และเนื่องจากการแมชท์รูปตัว T นี้ความยาวของห่วงมีค่าน้อยกว่ารีแอกแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้น ซึ่งถ้าสายอากาศเกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งาน ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของ T จะมีทั้งค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้น เราต้องกำจัดค่ารีแอกแตนซ์นี้ให้หมดไป เพื่อเกิดผลการแมชท์ที่ดีกับสายนำสัญญาณ วิธีทำที่มีคือ ลดขนาดสายอากาศให้เกิดค่ารีแอกแตนซ์เชิงประจุไฟฟ้า เพื่อนำไปหักล้างกันจนหมด หรืออีกวิธีคือ ต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับจุดต่ออินพุท ดังแสดงในรูป 4.9 (รูปบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

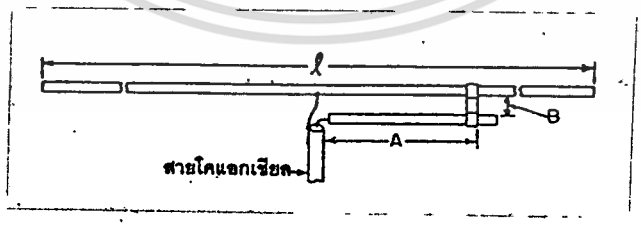


รูปที่ 4.9 แสดงการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเพื่อปรับค่ารีโซแนนซ์

- รูปบน เป็นแบบวิธีตัวที
- รูปล่าง เป็นแบบแกมม่า

4.9 วิธีแมชท์แบบแกมม่า (Gamma)

พิจารณารูป 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงวิธีแมชท์แบบแกมม่าโดยใช้สายโคแอกเชียล ขนาด 52 โอห์ม หรือ 75 โอห์ม

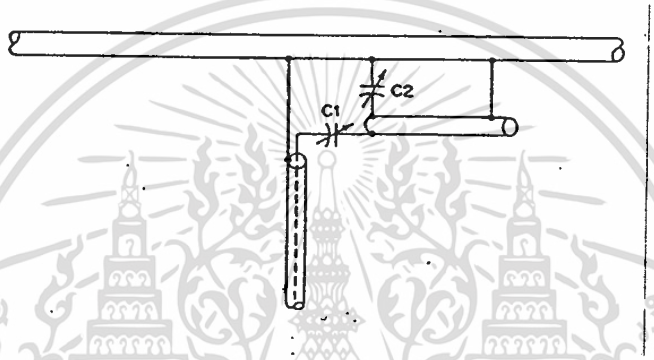
วิธีแกมม่าใช้หลักการเดียวกับวิธีรูปตัวที แต่มีเหยงครึ่งหนึ่งเท่านั้นเหมาะที่ที่ใช้กับสายแบบไม่สมดุล เช่น สายโคแอกเชียลเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีกำจัดค่ารีแอกแตนซ์ก็เช่นเดียวกัน คือลดขนาดสายอากาศ หรือต่อตัวเก็บประจุอนุกรมลงไป เหมือนในรูป 4.9 (รูปล่าง)

4.10 วิธีแมชท์แบบโอเมก้า (Omega)

วิธีนี้มีการปรับปรุงเพิ่มขึ้นจากวิธีแบบแกมม่า โดยใช้ตัวเก็บประจุต่อทั้งขนานและอนุกรม เพื่อกำจัดค่ารีแอกแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้หมดไป ดังแสดงในรูป 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงวิธีแมชท์แบบโอเมก้า

จากรูป C_1 เป็นตัวเก็บประจุอนุกรมที่มีอยู่แต่เดิม

C_2 เป็นตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นมา

การเพิ่มค่า C_2 นี้ทำให้ขนาดแกมม่ารั้อค หรือแท่งตัวนำที่ใช้สั้นลง และยังง่ายต่อกับแมชท์อีกในการปรับแต่ง C_2 ทำหน้าที่ควบคุมความต้านทานของโหลด (สายอากาศ) เมื่อพิจารณาจากสายโคแอกเชียล ส่วน C_1 ทำหน้าที่กำจัดค่ารีแอกแตนซ์ให้หมดไป

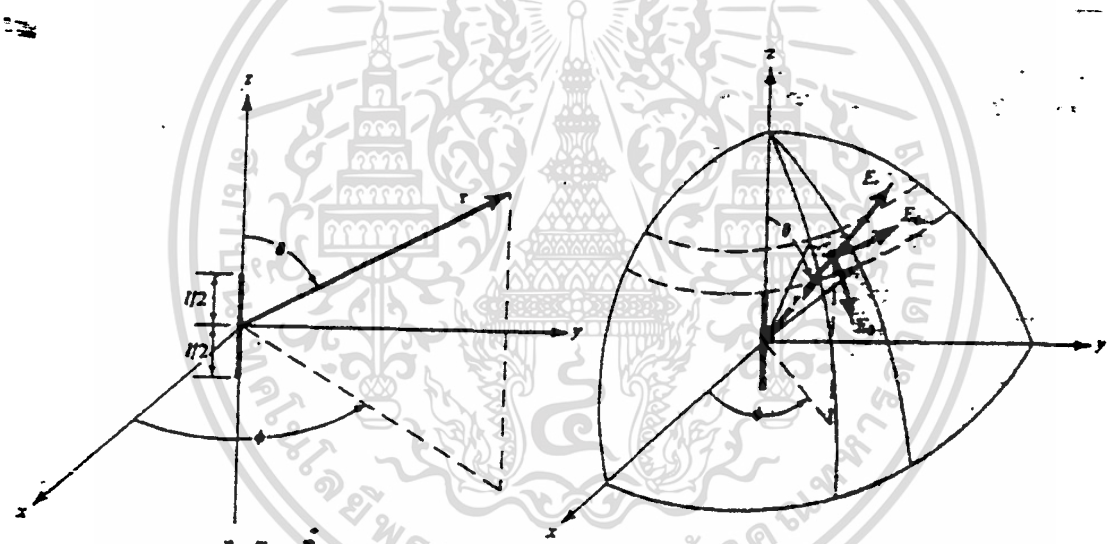
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สายอากาศเส้นลวดเส้นตรง

5.1 ไดโพลจิ๋ว

แม้ว่าไดโพลจิ๋วไม่เหมาะที่จะใช้งาน แต่มักจะใช้เป็นส่วนย่อยของสายอากาศที่มีรูปทรงยุ่งยาก สมมุติว่าลวดขนาดจิ๋ว ($l \ll \lambda$) ถูกวางอย่างสมมาตรที่ออริจินของระบบโคออดิเนทตามแกน Z ดังรูป 5.1(a) นอกจากจะมีความยาวน้อยมากแล้วยังต้องผอมมากด้วย ซึ่งจะสมมุติว่ากระแสที่ไหลในลวดนี้มีค่าคงที่ได้คือ

$$I = I_0 \tag{5.1}$$



a) ไดโพลจิ๋ว b) ทิศทางของสนามไฟฟ้า

รูป 5.1 การจัดวางไดโพลจิ๋ว และสนามไฟฟ้าของไดโพลจิ๋ว

5.1.1 สนามที่แหล่งกระจายจากไดโพลจิ๋ว

ในการหาสนามที่แหล่งกระจายจากไดโพลจิ๋ว จะใช้วิธี 2 ขั้นตอน คือหาศักดาเวคเตอร์ A และ F ก่อน จากนั้นจะหาสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H ตามลำดับ

เนื่องจากต้นกำเนิดนำเฉพาะกระแสไฟฟ้า I_z เท่านั้น ดังนั้น I_ρ และ F จะมีค่าเป็นศูนย์ และ A จะมีค่า

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{A}(x,y,z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \bar{I}_e(x',y',z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \qquad (5.2)$$

เมื่อ (x,y,z) แทนโคออดิเนตของจุดที่สังเกต ในขณะที่ (x',y',z') แสดงโคออดิเนตของต้นกำเนิด R เป็นระยะทางจากจุดใด ๆ บนต้นกำเนิดไปยังจุดสังเกต และ c เป็นเส้นทางเดินตามยาวของต้นกำเนิด จากรูป 5.1

$$\bar{I}_e(x',y',z') = \bar{a}_z I_0 \qquad (5.3a)$$

$$x' = y' = z' = 0 \quad (\text{ได้แหล่งกำเนิด}) \qquad (5.3b)$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

$$= r = \text{ค่าคงที่} \qquad (5.3c)$$

$$dl' = dz' \qquad (5.3d)$$

ดังนั้นจะเขียน (5.2) ได้ว่า

$$\bar{A}(x,y,z) = \frac{\bar{a}_z \mu I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{l/2}^{l/2} dz' = \frac{\bar{a}_z \mu l_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \qquad (5.4)$$

ต่อไปจะหา H_ϕ จากความสัมพันธ์ที่ว่า $\bar{B}_\phi = \mu \bar{H}_\phi = \nabla \times \bar{A}$ และหา E_θ จาก $\bar{E}_\theta = -j\omega \bar{A} - \frac{j}{\omega\mu\varepsilon} \nabla(\nabla \cdot \bar{A})$ ในการคำนวณนี้จะทำในระบบโคออดิเนททรงกลม โดยแปลง (5.4) ซึ่งเป็นโคออดิเนทสี่เหลี่ยมเฉพาะในทิศทาง $\bar{a}_z$ ไปยังโคออดิเนททรงกลม โดยอาศัยแมทริกซ์ (Matrix) ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi & \sin\theta\sin\phi & \cos\theta \\ \cos\theta\cos\phi & \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \qquad (5.5)$$

ในกรณีนี้ $A_x = A_y = 0$ เพราะฉะนั้น (5.4) จะมีเหลือ

$$A_r = A_z \cos\theta = \frac{\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \qquad (5.6a)$$

$$A_\theta = -A_z \sin\theta = \frac{-\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \qquad (5.6b)$$

$$A_\phi = 0 \qquad (5.6c)$$

จาก $\vec{H}_A = \frac{1}{\mu}\nabla \times \vec{A}$ จะได้

$$\vec{H} = \vec{a}_\phi \frac{1}{\mu r}\left[\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta}\right] \qquad (5.7)$$

เมื่อแทน (5.6a)-(5.6c) ลงใน (5.7) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ

$$H_r = H_\theta = 0 \qquad (5.8a)$$

$$H_\phi = \frac{jkI_0 l \sin\theta}{4\pi r}\left[1 + \frac{1}{jkr}\right] e^{-jkr} \qquad (5.8b)$$

และจะหาสนามไฟฟ้า E ได้จาก

$$\vec{E} = \vec{E}_A = -j\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\nabla(\nabla\cdot\vec{A})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{j\omega\varepsilon} \nabla \times \vec{H} \qquad (5.9)$$

เมื่อแทน (5.6a)-(5.6c) หรือ (5.8a)-(5.8b) ลงใน (5.9) จะหาค่า $\vec{E}$ ได้ว่ามีค่าดังต่อไปนี้คือ

$$E_r = \frac{\eta I_o \ell \cos\theta}{2\pi r^2}\left[1 + \frac{1}{jkr}\right] e^{-jkr} \qquad (5.10a)$$

$$E_\theta = \frac{j\eta k I_o \sin\theta}{4\pi r}\left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2}\right] e^{-jkr} \qquad (5.10b)$$

$$E_\phi = 0 \qquad (5.10c)$$

5.1.2 ความหนาแน่นของกำลังงานและความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น

ในสายอากาศที่ไม่มีการสูญเสีย ค่าจริงของอินพุทอิมพีแดนซ์จะเป็นความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น กำลังงานจะถูกส่งผ่านจากคลื่นที่ถูกนำในสายส่งไปยังคลื่นในฟรีสเปสด้วยความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น เมื่อจะหาความต้านทานอินพุทของสายอากาศที่ไม่มีการสูญเสีย จะต้องหาพอยติ้งเวคเตอร์ก่อน จากนั้นอินทิเกรทพอยติ้งเวคเตอร์ตลอดพื้นผิวปิด (ทรงกลมที่มีรัศมีคงที่) ก็จะได้กำลังงานที่กระจายออกจากสายอากาศนั้น

สำหรับไดโพลจิ๋ว จะหาพอยติ้งเวคเตอร์เชิงซ้อนได้จาก

$$\vec{W} = \frac{1}{2}(\vec{E} \times \vec{H}^*) = \frac{1}{2}\left[(\vec{a}_r E_r + \vec{a}_\theta E_\theta) \times (\vec{a}_\phi H_\phi^*)\right]$$

$$= \frac{1}{2}(\vec{a}_r E_\theta H_\phi^* - \vec{a}_\theta E_r H_\phi^*) \qquad (5.11)$$

จะได้ส่วนประกอบพอยติ้งเวคเตอร์ในแนวรัศมี เป็นดังนี้คือ

$$W_r = \frac{\eta}{8}\left|\frac{I_o \ell}{\lambda}\right|^2 \frac{\sin^2\theta}{r^2}\left[1 - j\frac{1}{(kr)^3}\right] \qquad (5.12a)$$

และส่วนประกอบของพอยติ้งเวคเตอร์ในแนวขวาง จะมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_\theta = \frac{j\eta |I_0 l|^2 \cos\theta \sin\theta}{16\pi^2 r^3}\left[1+\frac{1}{(kr)^2}\right] \qquad (5.12b)$$

จะหากำลังงานเชิงซ้อน ซึ่งเดินทางในแนวรัศมีได้โดยอินทิเกรท $\vec{W}$ ตลอดผิวทรงกลมปิดที่มีรัศมี r ดังนี้

$$P = \oint\!\!\oint_S \vec{W}.d\vec{s} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} (\vec{a}_r W_r + \vec{a}_\theta W_\theta).\vec{a}_r r^2 \sin\theta\, d\theta\, d\phi \qquad (5.13)$$

ซึ่งจะได้

$$P = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} W_r r^2 \sin\theta\, d\theta\, d\phi = \eta\frac{\pi}{3}\left|\frac{I_0 l}{\lambda}\right|^2\left[1-j\frac{1}{(kr)^3}\right] \qquad (5.14)$$

จะเห็นว่าส่วนประกอบในแนวขวาง W_θ ไม่มีส่วนในการอินทิเกรท ดังนั้น (5.14) ไม่ได้เป็นกำลังงานเชิงซ้อนทั้งหมดที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ เนื่องจาก W_θ ใน (5.12b) เป็นค่าจินตภาพล้วนๆ มันจึงไม่มีส่วนในกำลังงานค่าจริงที่แพร่กระจาย แต่มีส่วนในค่าจินตภาพ (ค่ารีแอคทีฟ) ของกำลังงาน ซึ่งคิดได้ว่าเทอมที่สองใน (5.14) เป็นกำลังงานรีแอคทีฟของสายอากาศ เมื่อ K_r มีค่าน้อย ความหนาแน่นของกำลังงานรีแอคทีฟ จะมีค่ามากจนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะมีทั้งส่วนประกอบในแนวรัศมีและแนวขวาง จะเพียงแสดงทิศทางระหว่างคลื่นที่เดินทางไปและคลื่นที่เดินทางเข้ามา เพื่อให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ด้วยอัตราเป็น 2 เท่าต่อ 1 รอบคลื่น และเคลื่อนที่ในทิศทางแนวขวาง ดังแสดงด้วย (5.12b)

(5.13) ซึ่งให้กำลังงานจริง และจินตภาพซึ่งเคลื่อนที่ออกไป จะเขียนได้ดังนี้

$$P = \frac{1}{2}\iint_S \vec{E}\times\vec{H}^* d\vec{s} = \eta\frac{(\pi)}{3}\left|\frac{I_0 l}{\lambda}\right|^2\left[1-j\frac{1}{(kr)^3}\right]$$

$$= P_{rad} + j2\omega(\tilde{W}_m - \tilde{W}_e) \qquad (5.15)$$

เมื่อ P = กำลังงาน (ในทิศทางแนวรัศมี)

Prad = กำลังงานเฉลี่ยต่อเวลาที่กระจายออก

$\tilde{W}_m$ = พลังงานแม่เหล็กเฉลี่ยต่อเวลา (ในทิศทางแนวรัศมี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\tilde{W}_m$ = หลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเวลา (ในทิศทางแนวรัศมี)

$2\omega(\tilde{W}_m-\tilde{W}_e)$= ค่ากำลังงานจินตภาพเฉลี่ยต่อเวลา (ในทิศทางแนวรัศมี)

จาก (5.15)

$$Prad = \eta\left(\frac{\pi}{3}\right)\left|\frac{I_o\ell}{\lambda}\right|^2\frac{1}{(k_r)^3} \tag{5.16}$$

และ

$$2\omega\left(\tilde{W}_m-\tilde{W}_e\right) = -\eta\left(\frac{\pi}{3}\right)\left|\frac{I_o\ell}{\lambda}\right|^2\frac{1}{(k_r)^3} \tag{5.17}$$

จะเห็นว่าพลังงานไฟฟ้าในแนวรัศมีต้องมากกว่าพลังงานแม่เหล็กในแนวรัศมี และเมื่อ K_r มีค่ามากๆ ($K_r>>1$ หรือ $r>>\lambda$) กำลังงานรีแอคทีฟจะหายไป และเป็นศูนย์ เมื่อ $K_r=\infty$

เนื่องจากสายอากาศแหร่กระจายกำลังงานจริงผ่านความต้านทาน การแหร่กระจายคลื่นสำหรับไดโพลจิ๋ว จะหาได้โดยจับ (5.16) เท่ากับ $\frac{1}{2}|I_o|^2R_r$ จะได้

$$Prad = \eta\left(\frac{\pi}{3}\right)\left|\frac{I_o\ell}{\lambda}\right|^2 = \frac{1}{2}|I_o|^2R_r \tag{5.18}$$

เมื่อ R_r เป็นความต้านทานการแหร่กระจายคลื่น

$$R_r = \eta\left(\frac{2\pi}{3}\right)\left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2 = 80\pi^2\left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2 \tag{5.19}$$

ในฟรีสเปส η มีค่า = 120π Ω นอกจากนี้ไดโพลจิ๋วต้องมีความยาว $\ell \le \frac{\lambda}{50}$

5.1.3 บริเวณสนามระยะใกล้ ($K_r<<1$)

จากสมการของสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ และสนามแม่เหล็ก H ที่แหร่กระจายจากไดโพลจิ๋วใน (5.8) และ (5.10) พบว่าถ้า $K_r<<1$ หรือ $r<<\lambda$ จะอยู่ในลักษณะที่ง่ายมากเช่น เทอมที่สองในวงเล็บของ (5.8b) และ (5.10a) จะมีค่ามากกว่า 1 มากๆ ซึ่งสามารถตัดทิ้งได้ ในสมการ (5.10b) เทอมที่สามในวงเล็บมีค่าเป็นส่วนสำคัญกว่าเทอมที่สอง และเทอมที่สองสำคัญกว่าเทอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่หนึ่ง จะได้ว่าถ้า $K_r << 1$ จะประมาณสนามได้ดังนี้

$$E_r \simeq -j\eta \frac{I_o l e^{-jkr}}{2\pi k r^3} \cos\theta \qquad (5.20a)$$

$$E_\theta \simeq -j\eta \frac{I_o l e^{-jkr}}{4\pi k r^3} \sin\theta \qquad (5.20b)$$

$$E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \qquad (5.20c)$$

$$H_\phi \simeq \frac{I_o l e^{-jkr}}{4\pi r^2} \sin\theta \qquad (5.20d)$$

$\left.\right\} kr << 1$

ทั้ง E_r และ E_θ ต่างก็มีเฟสเดียวกัน แต่มีเฟสต่างกับ H_ϕ อยู่ 90 องศาสนามจะมีลักษณะเป็นคลื่นนิ่ง แทนที่จะเป็นคลื่นเดินทาง (Travelling Wave) และจะไม่มีกำลังงานเฉลี่ยไหล ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\vec{W}_{av} = \frac{1}{2} Re\left[\vec{E} \times \vec{H}^*\right] = \frac{1}{2} Re\left[\vec{a}_r E_\theta H_\phi^* - \vec{a}_\theta E_r H_\phi^*\right] \qquad (5.21)$$

จาก (5.20a) ถึง (5.20d) จะได้ว่า

$$\vec{W}_{av} = \frac{1}{2} Re\left[-\vec{a}_r j\frac{\eta}{k}\frac{|I_o l|^2}{4\pi}\frac{\sin^2\theta}{r^5} + a_\theta j\frac{\eta}{k}\frac{|I_o l|^2}{8\pi^2}\frac{\sin\theta\cos\theta}{r^5}\right] = 0 \qquad (5.22)$$

สภาวะที่ $K_r << 1$ อาจใช้ได้ที่ระยะห่างปานกลางจากสายอากาศ ถ้าความถี่ที่ใช้งานต่ำมาก (5.20a) ถึง (5.20d) เหมือนกับไดโพลไฟฟ้าสถิตย์ และ (5.20d) เหมือนกับเอเลเมนท์กระแสสถินย์ จึงมักเรียก (5.20a) ถึง (5.20d) ว่าเป็นสนามกึ่งอยู่กับที่ (Quasistationary Field)

5.1.4 บริเวณระยะปานกลาง ($K_r > 1$)

เมื่อค่าของ K_r มีค่าเพิ่มขึ้นและกลายเป็นมากกว่า 1 เทอมที่มีค่าเป็นส่วนใหญ่ เมื่อ $K_r << 1$ จะมีค่าน้อยลง และในที่สุดจะหายไป เมื่อ K_r มีค่าปานกลาง ส่วนประกอบของสนาม E จะไม่มีเฟสเดียวกัน และจะกลายเป็นมีเฟสต่างกัน 90 องศา เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วส่วนประกอบของสนามมักจะมีค่าไม่เท่ากัน มันจะทำให้เกิดเวคเตอร์ที่หมุน และมียอดกวาดเป็นวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเปรียบเทียบได้กับในเรื่องของโพลาไรเซชัน แต่ต่างกันตรงที่เวคเตอร์หมุนในระนาบที่ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และเรียกว่าสนามขวาง (Cross Field)

ในบริเวณที่ K_r มีค่าปานกลางนี้ E_θ และ E_ϕ จะมีค่าเฟสเดียวกัน ซึ่งหมายถึงว่ามันจะก่อให้เกิดกำลังงานเฉลี่ยไหลในทิศทางพุ่งออกไปจากสายอากาศ นั่นคือมีการแผ่กระจายคลื่น

เมื่อ $K_r>1$ ค่าโดยประมาณของสนามจะแตกต่างไปจากเมื่อ $K_r<<1$ คือเทอมแรกในวงเล็บใน (5.8b) และ (5.10a) จะมีค่าเป็นส่วนใหญ่ และตัดเทอมที่สองทิ้ง และใน (5.10b) ก็เช่นกัน เมื่อเทอมที่สองและเทอมที่สามมีความเป็นส่วนใหญ่น้อยลงกว่าเทอมแรก ดังนั้นเมื่อ $K_r>1$ จะได้ว่า

$$E_r \simeq \eta \frac{I_o l e^{-jkr}}{2\pi r^2} \cos\theta \qquad (5.23a)$$

$$E_\theta \simeq j\eta \frac{k I_o l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \qquad (5.23b)$$

$$E_\phi \simeq H_r = H_\theta = 0 \qquad (5.23c)$$

$$H_\phi \simeq j\frac{k I_o l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \qquad (5.23d)$$

$k_r>1$

สนามไฟฟ้ามีค่ารวมเป็นดังนี้คือ

$$\vec{E} = \vec{a}_r E_r + \vec{a}_\theta \vec{E}_\theta \qquad (5.24)$$

ซึ่งมีขนาดเป็น

$$|\vec{E}| = \sqrt{|E_r|^2 + |E_\theta|^2} \qquad (5.25)$$

5.1.5 บริเวณสนามระยะไกล

เนื่องจาก (5.23a) ถึง (5.23d) จะเป็นจริงเมื่อ $K_r>1$ ($r>$) ดังนั้น E_r จะมีค่าน้อยกว่า E_θ เพราะ E_r แปรผกผันกับ r^2 ในขณะที่ E_θ แปรผกผันกับ r ในบริเวณที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_r >> 1$ จะประมาณ (5.23a) ถึง (5.23d)

$$E_\theta \simeq j\eta \frac{kI_o l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \qquad (5.26d)$$

$$E_r \simeq E_\phi \simeq H_r \simeq H_\theta \simeq 0 \qquad (5.26b)$$

$$H_\phi \simeq j\frac{kI_o l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \qquad (5.26c)$$

$$k_r \gg 1$$

อัตราส่วนของ E_θ ต่อ H_ϕ จะมีค่าประมาณ

$$Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \eta \qquad (5.27)$$

เมื่อ Z_w เป็นอิมพีแดนซ์ของคลื่น

η เป็นอินทรินสิคอิมพีแดนซ์ ($=120\pi\ \Omega$)

ส่วนประกอบของสนาม $\vec{E}$ และ $\vec{H}$ จะตั้งฉากซึ่งกันและกันอยู่ในแนวขวางกับแนวรัศมีของการเดินทางของคลื่น และการเปลี่ยนแปลงของ r สามารถแยกออกจาก θ และ ϕ แพทเทอร์นจะไม่เป็นฟังก์ชั่นของ r และจะเป็นคลื่น TEM (Transverse Electromagnetic Wave) ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ของคลื่นเท่ากับอินทรินสิคอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง

5.2.6 ไดเรคติวิตี

ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานที่แผ่กระจายจากสายอากาศไดโพลจิ๋ว มีค่าดังนี้คือ

$$\vec{W}_{av} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\vec{E}\times\vec{H}^*\right)$$

$$= \vec{a}_r \frac{1}{2\eta}\left|E_\theta\right|^2$$

$$= \vec{a}_r \frac{\eta}{2}\left|\frac{kI_o l}{4\pi}\right|^2 \frac{\sin^2\theta}{r^2} \qquad (5.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออินทิเกรท (5.28) ตลอดผิวทรงกลมปิดที่มีรัศมี r จะได้ Prad = และความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น U ที่หาได้จาก (5.28) จะมีค่า

$$U = r^2 W_{av}$$

$$= \frac{\eta}{2}\left(\frac{k I_0 l}{4\pi}\right)^2 \sin^2\theta$$

$$= \frac{r^2}{2\eta}\left|E\theta\,(r,\theta,\phi)\right|^2 \qquad (5.29)$$

ในรูป 5.2 แสดงนอร์มอไลซ์แพทเทอร์นของ (5.29) ซึ่งมีค่าสูงสุดเกิดที่ $\theta = \pi/2$ มีค่าเท่ากับ

$$U_{max} = \frac{\eta}{2}\left(\frac{k I_0 l}{4\pi}\right)^2 \qquad (5.30)$$

จาก

$$P_{rad} = \eta\left(\frac{4\pi}{3}\right)\left|\frac{I_0 l}{\lambda}\right|^2 \text{ และ } U_{max} = \frac{\eta}{2}\left(\frac{k I_0 l}{4\pi}\right)^2$$

จะหาไดเรคติวิตีได้ว่ามีค่า

$$D_0 = 4\pi\frac{U_{max}}{P_{rad}} = \frac{3}{2} \qquad (5.31)$$

และเอฟเฟคทีฟอะเพอร์เจอร์ค่าสูงสุดมีค่าดังต่อไปนี้

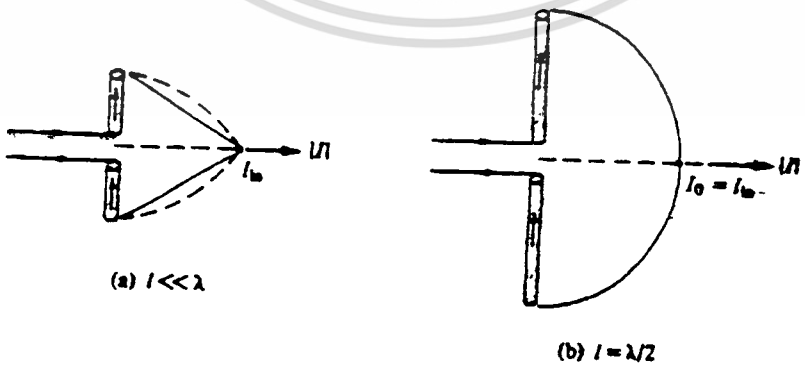
$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 = \frac{3\lambda^2}{8\pi} \qquad (5.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.2 รูปแพทเทอร์น 3 มิติของไดโพลจิ๋ว

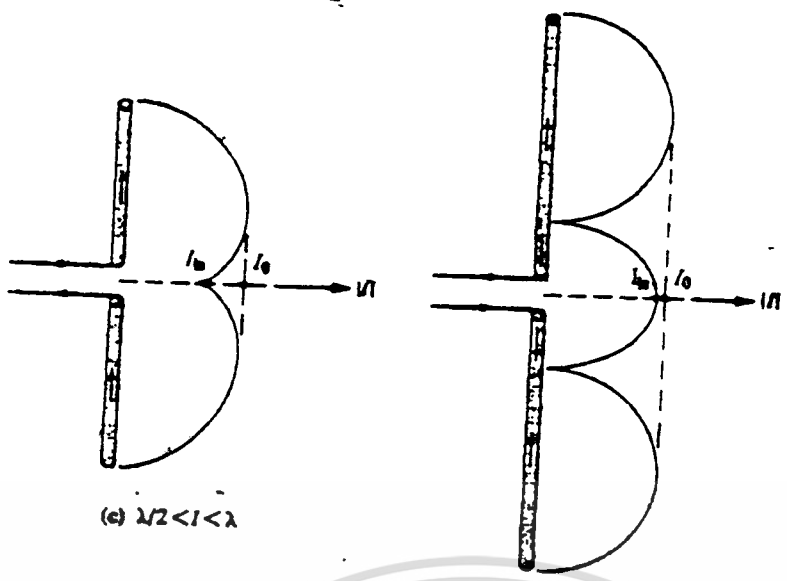
5.2 ไดโพลขนาดเล็ก

ในสายอากาศไดโพลขนาดจิ๋วซึ่งมีความยาว $\ell \leq \lambda/50$ จะมีการแจงรูปกระแส (Current Distribution) คงที่ตลอดความยาวของไดโพลจิ๋ว แม้ว่าจะสร้างสายอากาศให้มีการแจงรูปกระแสของสายอากาศที่ใช้งานจริงๆ หากจะประมาณสายอากาศแบบเส้นลวดซึ่งมีความยาว $\lambda/50 \leq \ell \leq \lambda/10$ ได้ดีแล้ว จะสมมุติให้มีการแจงรูปกระแสเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูป 5.4b สำหรับสายอากาศที่มีความยาวใดๆ จะมีการแจงรูปกระแสเป็นไซนูซอยดอล (Sinusoidal) ดังแสดงในรูป 5.3b,c,d



(a) $l \ll \lambda$ (b) $l = \lambda/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) $\lambda/2<l<\lambda$

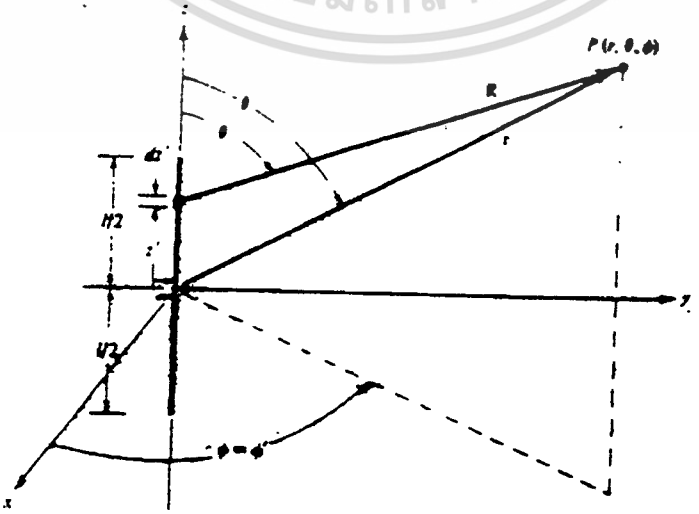
(d) $\lambda<l<3\lambda/2$

รูป 5.3 การแจงรูปกระแสของไดโพลเส้นตรง

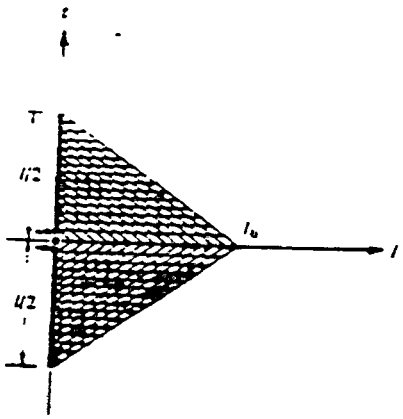
ในการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลสั้น การจัดวางไดโพลที่สะดวกที่สุดทำได้ดังแสดงในรูป 5.4a ส่วนรูป 5.4b แสดงการแจงรูปกระแสของไดโพลขนาดเล็ก $(\lambda/50 \le l \le \lambda/10)$ ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\vec{I}_e(x',y',z') = \begin{cases} \bar{a}_z I_0\left(1-\frac{|z|}{l}\right) & 0 \le z \le \frac{l}{2} \\ \vec{a}_z I_0\left(1+\frac{|z|}{l}\right) & -\frac{l}{2} \le z \le 0 \end{cases} \qquad (5.33)$$

เมื่อ I_0 = ค่าคงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



b) การแจงรูปกระแส

รูป 5.4 การจัดวางไดโพลและการแจงรูปกระแส

จาก (5.2) และ (5.33) จะคำนวณค่าศักดาเวคเตอร์ได้ดังนี้

$$\bar{A}(x,y,z) = \vec{a}_z \frac{\mu}{4\pi}\left[\int_{-l/2}^{0} I_0\left(1+\frac{dz'}{l}\right)\frac{e^{-jkR}}{R}\,dz' + \int_{0}^{l/2} I_0\left(1-\frac{dz'}{l}\right)\frac{e^{-jkR}}{R}\,dz'\right] \quad (5.34)$$

เนื่องจากไดโพลมีความยาวน้อยมาก ($l \leq \lambda/10$) ทำให้สามารถประมาณได้ว่า R r ซึ่งค่าผิดพลาดมากที่สุดของเฟส ใน (5.34) เมื่อใช้ R=r เมื่อ $l = \lambda/10$ จะเป็น เรเดียน = 10 องศาส่วนที่ความยาวอื่นความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่านี้ ดังนั้นจึงสามารถคิดได้ว่าค่าผิดพลาดของเฟสนี้มีค่าน้อยจนตัดทิ้งได้ และมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นน้อยมาก ฉะนั้นเมื่ออินทิเกรท (5.34) จะได้

$$\vec{A} = \vec{a}_z A_z = \vec{a}_z \left\{\frac{\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r}\right\} \quad (5.35)$$

ซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่า $\vec{A}$ ของไดโพลจิ๋ว

จากนั้นจะหาสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ และสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ ที่แพร่กระจายจากสายอากาศไดโพลสั้นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E\theta \simeq j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{8\pi r} \sin\theta \qquad (5.36a)$$

$$E_r \simeq E\phi \simeq H_r \simeq H\theta \simeq 0 \qquad (5.36b)$$

$$H\phi \simeq j\frac{kI_0 l e^{-jkr}}{8\pi r} \sin\theta \qquad (5.36c)$$

ซึ่งหมายถึง $K_r >> 1$ สนามระยะไกล

ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ของคลื่นเป็น $Z_w = \frac{E\theta}{H\phi} \simeq \eta$

เนื่องจากไดเรคติวิตีของสายอากาศถูกควบคุมด้วยรูปร่างสัมพัทธ์ของสนามหรือแพทเทอร์นสายอากาศนี้ของกำลังงาน เพราะฉะนั้นไดเรคติวิตีและเอฟเฟคทีฟอะเพอร์เจอร์ค่าสูงสุดของสายอากาศนี้ จะเหมือนกับเอฟเฟคทีฟอะเพอร์เจอร์ค่าสูงสุดของสายอากาศที่มีการแจงรูปกระแสสม่ำเสมอ ตาม (5.31) และ (5.32) ตามลำดับ จะหาว่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นสัมพันธ์กับการแจงรูปกระแส ได้โดยใช้วิธีเดียวกับที่หาได้ในสายอากาศไดโพลจิ๋ว กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ จะมีค่าเป็น 1/4 เท่าของ (5.18) ทำให้ได้ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นมีค่า

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} = 20\pi^2\left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \qquad (5.37)$$

5.3 สายอากาศที่มีความยาวจำกัด

ต่อไปจะกล่าวถึงสายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด ซึ่งจะเป็นสายอากาศที่ใช้งานจริงเพื่อลดความยุ่งยากของสมการ จะสมมุติว่าไดโพลมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมากๆ (ตามอุดมคติ=0)

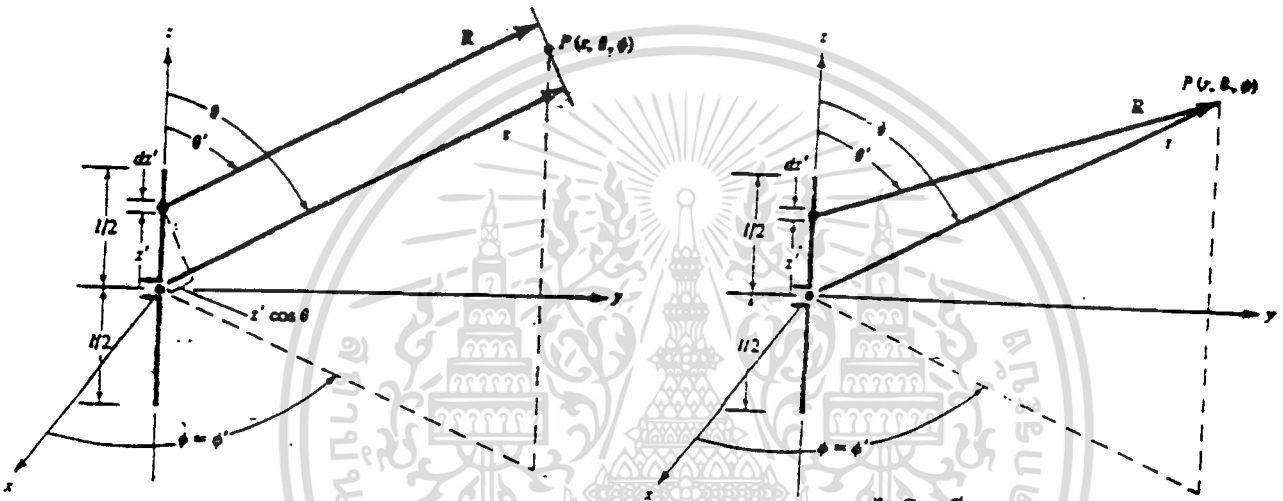
5.3.1 การแจงรูปกระแส

สายอากาศไดโพลผอม (ตามอุดมคติจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นศูนย์) จะมีการแจงรูปกระแสดังนี้

$$I'_e(x',y',z') = \begin{cases} \bar{a}_z I_0 \sin\left[k\left(\frac{l}{2}-z\right)\right], & 0 \le z' \le l/2 \\ \bar{a}_z I_0 \sin\left[k\left(\frac{l}{2}+z\right)\right], & -l/2 \le z' \le 0 \end{cases} \qquad (5.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้จะสมมุติว่ามีการป้อนกระแสตรงกึ่งกลางของไดโพล และกระแสจะต้องเป็นศูนย์ที่ปลายสายอากาศ จากการทดลองได้ยืนยันว่ากระแสในสายอากาศเส้นลวดที่ป้อนตรงกลางจะมีการแจงรูปเป็นไซนูซอยดอล และมีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายสายอากาศ รูป 5.5 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศนี้



b) การประมาณสนามระยะไกล

c) ไดโพลมีความยาวจำกัด

รูป 5.5 ไดโพลมีความยาวจำกัด และประมาณสนามระยะไกล

5.3.2 สนามที่แพร่กระจายจะเอเลเมนท์แฟคเตอร์, สเปสแฟคเตอร์ และการคูณแพทเทอร์น

เนื่องจากหาคำตอบของ $\vec{A}$ ได้ยาก เพื่อให้ง่ายเข้าในที่นี้จะสนใจเฉพาะสนามระยะไกล สายอากาศไดโพลซึ่งมีความยาวจำกัด ถูกแสดงไว้ในรูป 5.5 สายอากาศดังกล่าวถูกแบ่งเป็นไดโพลจิ๋วจำนวนมากมายที่มีความยาว $\Delta z'$ ยิ่งแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ มากขึ้น ความยาวจะลดลงเป็น dz' จาก (5.26a) ถึง (5.26c) จะแสดงสนามที่แพร่จากไดโพลจิ๋วซึ่งเป็นส่วนย่อยของไดโพลที่มีความยาวจำกัดได้ดังนี้

$$dE_\theta \simeq j\eta \frac{k\bar{I}_e(x',y',z')\, e^{-jkR}}{4\pi R} \sin\theta\, dz' \qquad (5.39a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dE_r \simeq dE_\phi = dH_r = dH_\theta = 0 \qquad (5.39b)$$

$$dH_\phi \simeq j \frac{kI_e(x',y',z')e^{-jkR}}{4\pi R} \sin\theta\, dz \qquad (5.39c)$$

เมื่อ $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} = \sqrt{x^2+y^2+(z-z')^2}$

ซึ่งกระจายได้ว่า

$$R = \sqrt{(x^2+y^2+z^2) + (2rz' + z'^2} = \sqrt{r^2(-2rz'\cos\theta + z'^2)}$$

เมื่อเป็นสนามระยะไกล จะประมาณได้ว่า สำหรับเทอมเฟส และ R=r สำหรับเทอมขนาด ซึ่งทำให้เขียน (5.39a) ได้ใหม่ว่า

$$dE_\theta \simeq j\eta \frac{kI_e(x',y',z')e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta\, e^{jkz'\cos\theta}\, dz' \qquad (5.40)$$

$$E_\theta = \int_{-l/2}^{l/2} dE_\theta = j\eta \frac{ke^{-jkr}\sin\theta}{4\pi r} \left[\int_{-l/2}^{l/2} I(x',y',z') e^{jkz'\cos\theta}\, dz' \right] \qquad (5.40a)$$

เรียกแฟคเตอร์นอกวงเล็บว่าเอเลเมนต์แฟคเตอร์ (Element Factor) และแฟคเตอร์ภายในวงเล็บเป็นสเปสแฟคเตอร์ (Space Factor) ในกรณีนี้เอเลเมนต์แฟคเตอร์มีค่าเท่ากับสนามของไดโพลจิ๋วหนึ่งหน่วยความยาวที่วางอยู่ที่จุดเปรียบเทียบ (คือออริจิน) โดยทั่วไปเอเลเมนต์แฟคเตอร์มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดและทิศทางการไหลของกระแส ในขณะที่สเปสแฟคเตอร์เป็นฟังก์ชั่นของการแจงรูปกระแสบนสายอากาศ

สนามรวมของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับผลคูณของเอเลเมนต์แฟคเตอร์กับสเปสแฟคเตอร์ วิธีนี้เรียกว่าการคูณแพทเทอร์นสำหรับต้นกำเนิดที่มีการแจงรูปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเขียนได้ว่า

สนามรวม = (เอเลเมนต์แฟคเตอร์) x (สเปสแฟคเตอร์) (5.51)

จากการแจงรูปกระแสใน (5.38) จะเขียน (5.50a) ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E\theta \simeq j\eta \frac{k I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \left[\int_{-l/2}^{0} \sin\left[k\left(\frac{l}{2}+z'\right)\right] e^{jkz'\cos\theta} dz' + \int_{0}^{l/2} \sin\left[k\left(\frac{l}{2}-z'\right)\right] e^{jkz'\cos\theta} dz' \right] \quad (5.42)$$

ซึ่งจะอินทิเกรทโดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\int e^{\alpha x} \sin(\beta x+\gamma)\, dx = \frac{e^{\alpha x}}{\alpha^2+\beta^2}\left[\alpha \sin(\beta x+\gamma) - \beta\cos(\beta x+\gamma)\right] \quad (5.43)$$

เมื่อ

$$\alpha = jk\cos\theta \quad (5.43a)$$

$$\beta = \pm k \quad (5.43b)$$

$$\gamma = kl/2 \quad (5.45c)$$

จะได้ว่า

$$E\theta \simeq j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r}\left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta}\right] \quad (5.44a)$$

ในทำนองเดียวกัน จะหา H_ϕ ได้จาก

$$H\phi \simeq \frac{E\theta}{\eta} \simeq j\frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r}\left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta}\right] \quad (5.44b)$$

5.3.3 ความหนาแน่นของกำลังงาน, ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น และความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น

สำหรับสายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัด วิธีการคำนวณหาความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น ก็ยังคงเหมือนกับวิธีการที่ใช้กับสายอากาศไดโพลจิ๋วและไดโพลสั้น โดยเริ่มจากการหาพอยติงเวคเตอร์เฉลี่ย ซึ่งพอยติงเวคเตอร์เฉลี่ยมีค่าดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\overline{W_{av}} = \frac{1}{2} Re\left[\vec{E} \times \vec{H}^*\right] = \frac{1}{2} Re\left[\vec{a}_\theta E_\theta \times \vec{a}_\phi H_\phi^*\right]$$

$$= \frac{1}{2} Re\left[\vec{a}_\theta E_\theta \times \vec{a}_\phi \frac{E_\theta}{\eta}^*\right]$$

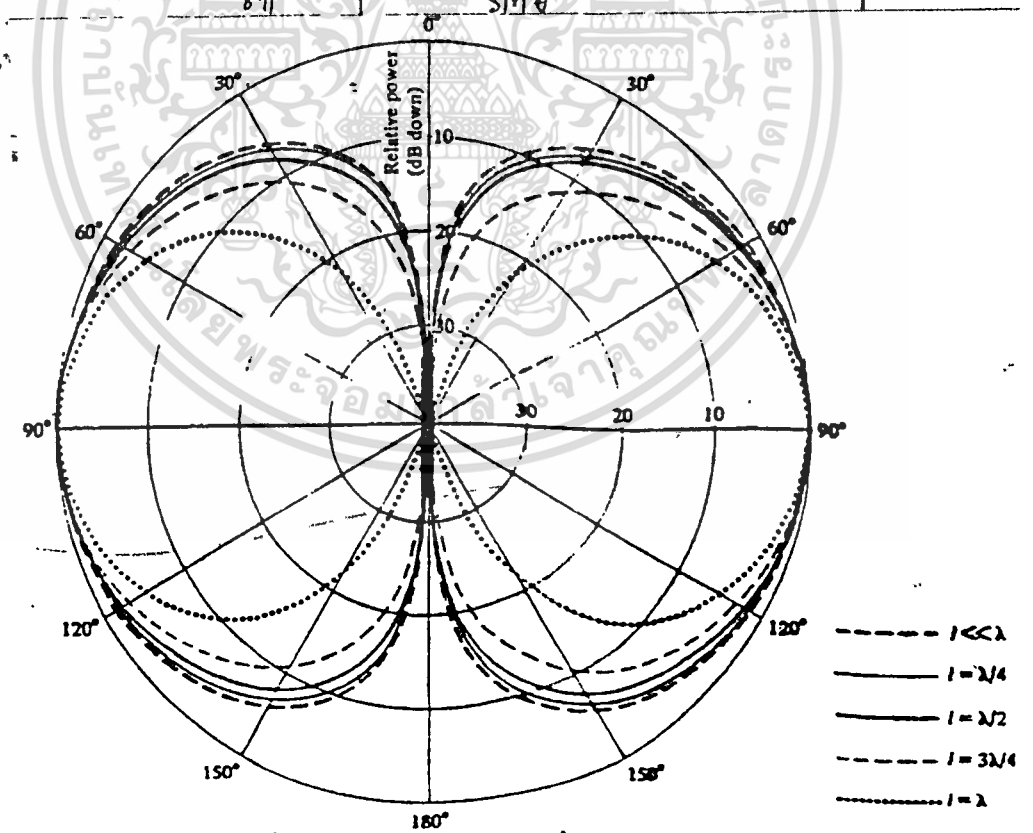
$$\overline{W_{av}} = \vec{a}_r W_{av} = \vec{a}_r \eta |E_\theta|^2$$

$$= \frac{\eta |I_0|^2}{8\pi^2 r^2}\left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta}\right] \qquad (5.45)$$

จากนั้นจะหาความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้ว่ามีค่า

$$U = r^2 W_{av}$$

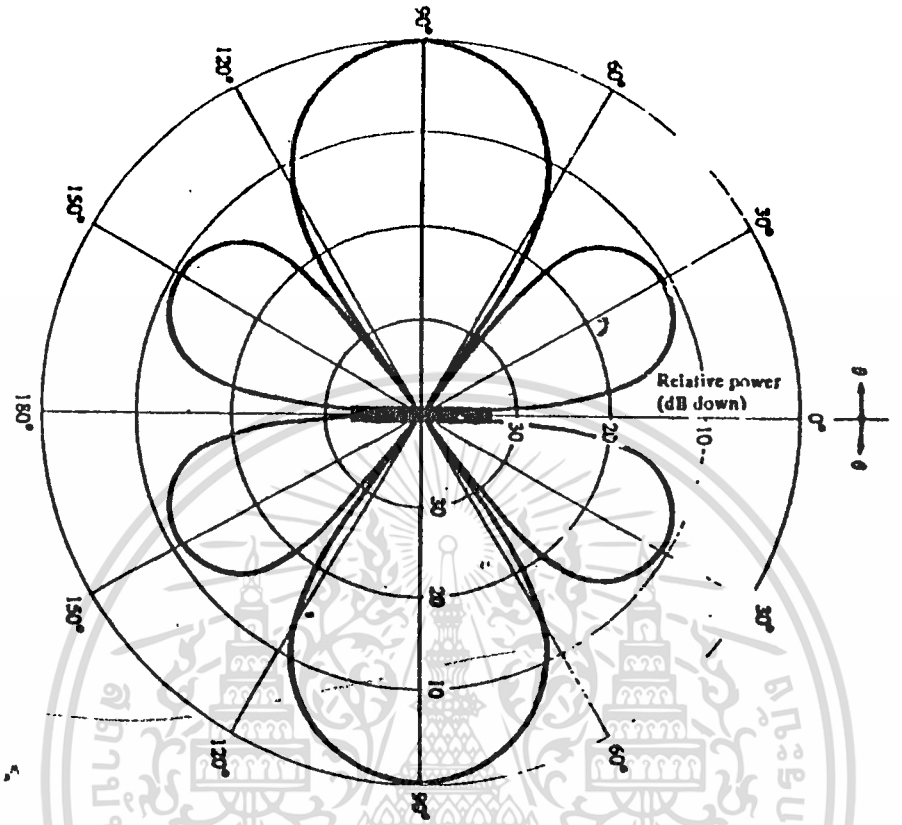
$$= \frac{\eta |I_0|^2}{8\pi^2}\left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta}\right]^2 \qquad (5.46)$$



รูป 5.6 แพทเทอร์นของสายอากาศไดโพลที่มีการแจงรูปกระแสเป็นแบบไซนูซอยดอล ($l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4, \lambda$)

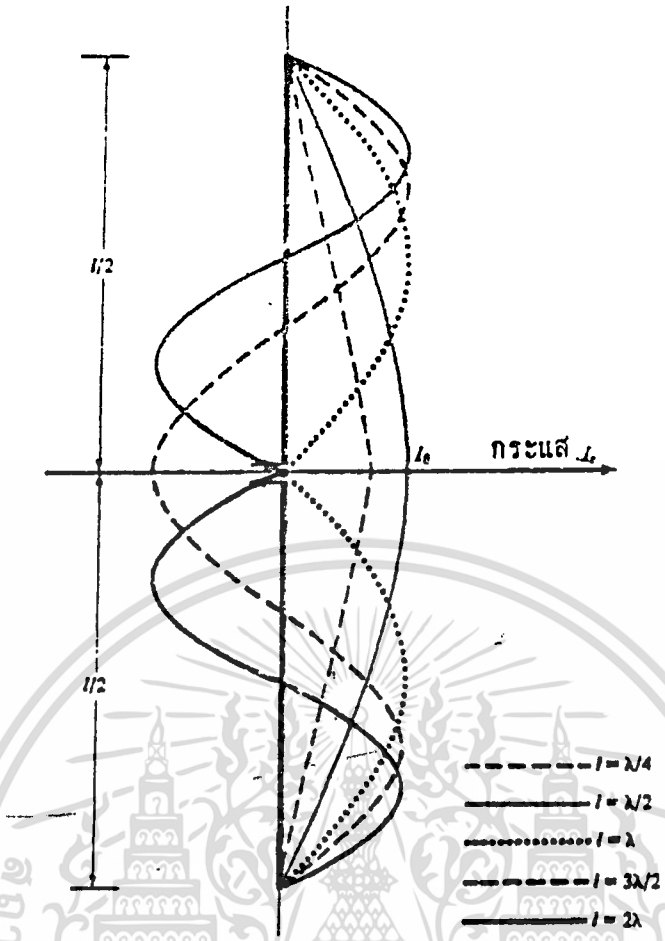
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ จำนวนโลบจะเพิ่มขึ้น ค่านอร์มอไลซ์ของแพทเทอร์นของกำลังงานได้แสดงไว้ใน รูป 5.7 ส่วนการแจงรูปกระแสที่มีความยาวต่างๆ แสดงในรูป 5.8



รูป 5.7 แพทเทอร์นของสายอากาศไดโพลยาว 1.25λ ที่มีการแจงรูปกระแสเป็นแบบไซนูซอยดอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.8 การแจงรูปกระแสตามไดโพลที่ความยาวต่างๆ

$$P_{rad} = \oint_S \vec{W}_{av} \cdot d\vec{s} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} \vec{a}_r W_{av} \cdot \vec{a}_r r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

$$= \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} W_{av} r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \qquad (5.47)$$

จาก (5.46) จะได้ว่า

$$P_{rad} = \frac{\eta |I_0|^2}{4\pi} \int_0^{\pi} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl\cos\theta}{2}\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]^2 d\theta \qquad (5.48)$$

$$= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left(C + \ln(kl) - Ci(kl) + \frac{1}{2}\sin(kl)\left[Si(2kl) - 2Si(k\right.\right.$$

$$+ \frac{1}{2}\cos(kl)\left[C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) + Ci(2kl) - 2Ci(kl)\right] \qquad (5.49)$$

C = 0.5772 (ค่าคงที่ของอูเลอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Ci(x)$ และ $Si(x)$ เป็นโคไซน์และไซน์อินทีกรัลตามลำดับ มีค่า

$$Ci(x) = -\int_x^\infty \frac{\cos y}{y}\, dy = \int_\infty^x \frac{\cos y}{y}\, dy \qquad (5.49a)$$

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin y}{y}\, dy \qquad (5.49b)$$

$$Cin(x) = \ln(\gamma x) = Ci(x) = \ln(y) + \ln(x) - Ci(x)$$

$$= 0.5772 + \ln(x) - Ci(x) \qquad (5.50)$$

เมื่อ $$Cin(x) = \int_0^x \left(\frac{\cos y}{y}\right) dy \qquad (5.50a)$$

และความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่าดังต่อไปนี้

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} = \frac{\eta}{2\pi}\left\{ C + \ln(kl) - Ci(kl) + \frac{1}{2}\sin(kl) \right.$$

$$\times \left[Si(2kl) - 2Si(kl) \right] + \frac{1}{2}\cos(kl)$$

$$\left. \times \left[C + \ln(kl/2) + Ci(2kl) - 2Ci(kl) \right] \right\} \qquad (5.51)$$

ในรูป 5.9 แสดงความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นและไดเรคติวิตี เป็นฟังก์ชั่นความยาว (λ) ไดเรคติวิตีมีสมการเป็นดังนี้คือ

$$D_0 = 4\pi \frac{F(\theta,\phi)|_{max}}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta\, d\theta\, d\phi} \qquad (5.52)$$

เมื่อ $F(\theta,\phi)$ สัมพันธ์กับความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นด้วยสมการ

$$U = U_0 F(\theta,\phi) \qquad (5.53)$$

จาก (5.46) สายอากาศไดโพลยาว ℓ จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(\theta,\phi) = F(\theta) = \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta}\right]^2 \qquad (5.54)$$

และ

$$U_o = U_o \frac{\eta |I_o|^2}{8\pi^2} \qquad (5.54a)$$

เนื่องจากแมกเทอร์นไม่เป็นฟังก์ชั่นของ θ (5.52) จะกลายเป็น

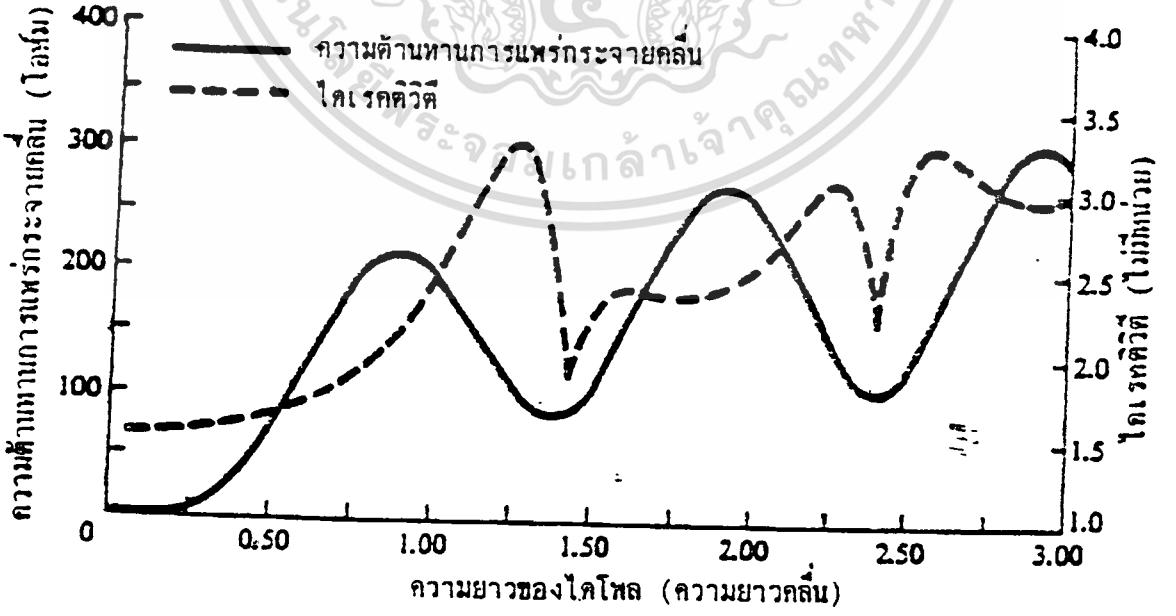
$$D_o = \frac{2\pi(\theta)|_{max}}{\int_0^{\pi} F(\theta)\sin\theta d\theta} \qquad (5.55)$$

จาก (5.48) และ (5.54) จะได้ว่า

$$D_o = \frac{2F(\theta)|_{max}}{Q} \qquad (5.56)$$

เมื่อ $Q = \left\{C + \ln(kl) + Ci(kl) + \frac{1}{2}\sin(kl)\left[Si(2kl) - 2Si(kl)\right]\right.$

$$\left. + \frac{1}{2}\cos(kl) + C + \ln(kl/2) + Ci(2kl) + 2Ci(kl)\right] \qquad (5.56a)$$



รูป 5.9 ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น และไดเรคติวิตีของสายอากาศไดโพลที่มีการแจงรูปกระแสเป็นแบบไซนูซอยดอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ไดเรคติวิตี

จากรูป 5.6 จะเห็นได้ว่าแนทเทอร์นของไดโพล จะมีการชี้ทิศทางดีขึ้นเมื่อมันมีความยาวมากขึ้น และเมื่อ $l > \lambda$ จะมีจำนวนโลบมากขึ้น และคุณสมบัติเกี่ยวกับการชี้ทิศทางจะเสียไป

จะเห็นว่า $F(\theta)$ ค่าสูงสุดขึ้นอยู่กับความยาวสายอากาศและเอฟเฟคทีฟอะเพอร์เจอร์ค่าสูงสุดจะมีค่า

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 \qquad (5.57)$$

5.3.5 ความต้านทานอินพุท

(5.51) เป็นค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น ณ ตำแหน่งซึ่งกระแสมีค่าสูงสุด มิได้เป็นค่าความต้านทานที่ขั้วอินพุทของสายอากาศ ดังนั้นถ้าสมมุติว่าไม่มีการสูญเสีย ($R_L=0$) จะหาความต้านทานอินพุทได้ดังนี้

$$\frac{|I_{in}|^2}{2} R_{in} = \frac{|I_0|^2}{2} R_r \qquad (5.58)$$

หรือ

$$R_{in} = \left[\frac{I_0}{I_{in}}\right]^2 R_r \qquad (5.58a)$$

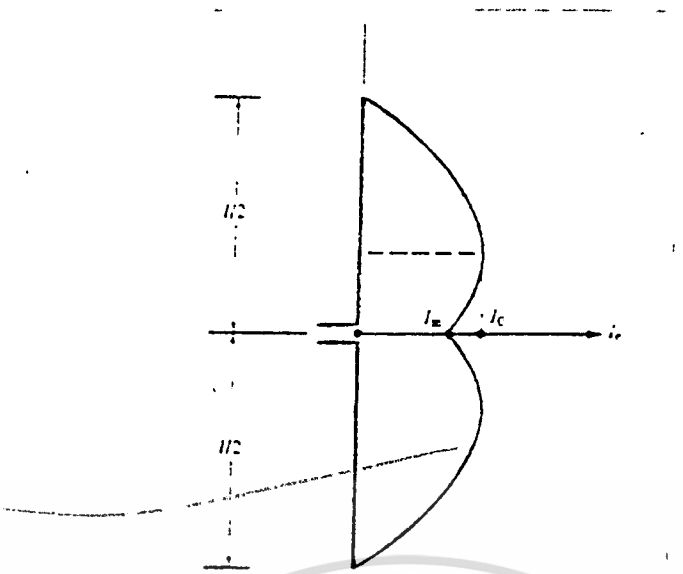
เมื่อ R_{in} = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่อินพุท (จุดป้อนกระแส)

R_r = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่กระแสมีค่าสูงสุด [(5.51)]

I_0 = ค่ากระแสสูงสุด

I_{in} = กระแสที่ขั้วอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 การแจงรูปกระแสของสายอากาศเมื่อค่ากระแสสูงสุดไม่ได้อยู่ที่ขั้วของสายอากาศ

สำหรับไดโพลที่ยาว l I_{in} จะสัมพันธ์กับ I_o ตามรูป (5.10) ด้วยค่า

$$I_{in} = I_o \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \tag{5.59}$$

จะได้ความต้านทานอินพุทมีค่าเป็น

$$R_{in} = \frac{R_r}{\sin^2\left(\frac{kl}{2}\right)} \tag{5.60}$$

5.3.6 ไดโพลความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

พบว่าใช้ไดโพลความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นมาก เพราะมีความต้านทาน 73 โอห์ม ซึ่งใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายส่ง 75 โอห์ม ซึ่งทำให้สมพงษ์ได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดรีโซแนนซ์ (Resonance)

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของไดโพลยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น หาได้จาก (5.44a) และ (5.44b) เมื่อให้ $l = \lambda/2$ จะได้ว่า

$$E_\theta \simeq j\eta \frac{I_o e^{-jkr}}{2\pi r}\left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta}\right] \tag{5.61}$$

$$H_\phi \simeq j\frac{I_o e^{-jkr}}{2\pi r}\left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta}\right] \tag{5.62}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{av} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \left[\frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin^2\theta} \right] \tag{5.63}$$

$$U = r^2 W_{av} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin^2\theta} \right] \tag{5.64}$$

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^{\pi} \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} d\theta \tag{5.65}$$

$$= \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1-\cos y}{y} \right) dy = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} \mathrm{Cin}(2\pi) \tag{5.66}$$

$$\mathrm{Cin}(2\pi) = 0.5772 + \ln(2\pi) - \mathrm{Ci}(2\pi) = 0.5772 + 1.838 - (-0.01) \simeq 1.435 \tag{5.67}$$

$$D_0 = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi U|_{\theta=\frac{\pi}{2}}}{P_{rad}}$$

$$= \frac{4}{\mathrm{Cin}(2\pi)} = \frac{4}{1.435}$$

$$\simeq 1.643 \tag{5.68}$$

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi}(1.643) \simeq 0.13\lambda^2 \tag{5.69}$$

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} = \frac{\eta}{4\pi} \mathrm{Cin}(2\pi) = 30(1.435)$$

$$\simeq 73\ \Omega \tag{5.70}$$

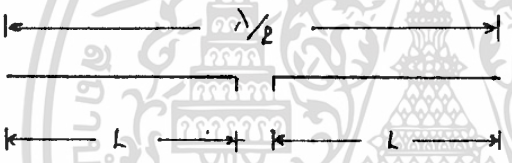
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การออกแบบและการทดลอง

จุดประสงค์

เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ J Pole เปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไดโพลห่วงและยาร์เวฟไดโพล ที่ความถี่ที่วีช่อง 8 (198.5Mhz) เพื่อใช้ในงานนิทรรศการลาดกระบัง แต่เนื่องจากมีปัญหาที่เครื่องส่งที่ความถี่ 198.5Mhz ของรุ่นพี่ที่ทำไว้เสีย จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนความถี่ใช้งานเป็น 145Mhz เพื่อใช้ในการออกแบบและทดสอบแทนความถี่เดิม

6.1 ขั้นตอนการออกแบบ Half wave dipole



หาความยาวของสายอากาศได้จาก

จาก λ = ความเร็วแสง/f(Mhz) (เมตร)

= $300*10^{6}$/f(Mhz)

f(Mhz) ในที่นี้เราใช้ค่า = 145(Mhz)

λ = 2.07 เมตร

แต่เนื่องจากความยาวคลื่นที่ได้นี้เป็นความยาวคลื่นในอากาศ โดย Vr มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นเมื่อคิดความยาวคลื่นในตัวนำต้องหาค่า Vr จาก

λ = ($300*10^{6}$ * Vr) / f(Mhz)

โดย k = λ /r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r คือ รัศมีของท่อตัวนำ (0.5)

k = 2.07/0.5 = 4.14 เมตร = 414 cm.

หาค่า Vr จากตารางค่า k ได้ = 0.948

L = $\lambda/4$ = 49 cm.

K	Vr
$3*10$	0.887
$1*10^{2}$	0.927
$3*10^{2}$	0.946
$1*10^{3}$	0.958
$3*10^{3}$	0.966
$1*10^{4}$	0.971
$3*10^{4}$	0.974
$1*10^{5}$	0.978
$3*10^{5}$	0.980
$3*10^{6}$	0.982

ตาราง k สำหรับหาค่า Vr

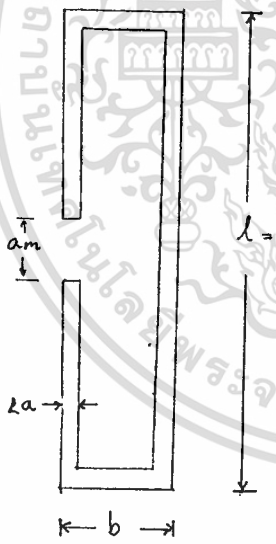
หลังจากออกแบบเสร็จและทำการตัดโครงสร้างสายอากาศเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการแมชท์สายอากาศโดยใช้วิธีแมชท์แบบแกมม่าแมชท์ และทำการวัดค่า SWR ผลการวัดค่า SWR จะเป็นดังตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่(Mhz)	SWR
143	1.50
144	1.39
145	1.30
146	1.39
147	1.45
148	1.41

ตารางที่ 5.1

5.2 ขั้นตอนการออกแบบ Folded dipole



จาก λ = 207 cm.

หาค่าต่างๆ ตามรูปข้างบนได้ดังนี้

$L = \lambda/2 =$ 98 cm.

ในที่นี้ใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ขนาด b = 10a = 5 cm.

$$a_m = \sqrt{ab} = 1.5 \text{ cm.}$$

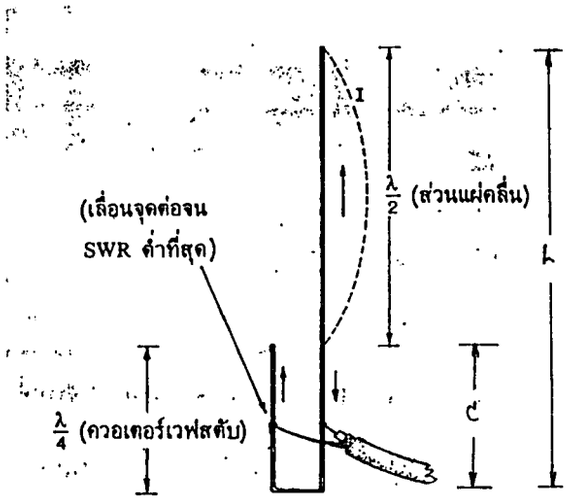
หลังจากออกแบบเสร็จและทำการตัดโครงสร้างสายอากาศเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการแมชท์สายอากาศโดยใช้วิธีแมชท์แบบอาร์ฟเวฟบาลัน และทำการวัดค่า SWR ผลการวัดค่า SWR จะเป็นดังตารางที่ 6.2

ความถี่(Mhz)	SWR
143	1.50
144	1.45
145	1.40
146	1.40
147	1.60
148	1.70

ตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ขั้นตอนการออกแบบ J pole



รูปที่ 1 หลักการทางไฟฟ้าของสายอากาศแบบ J

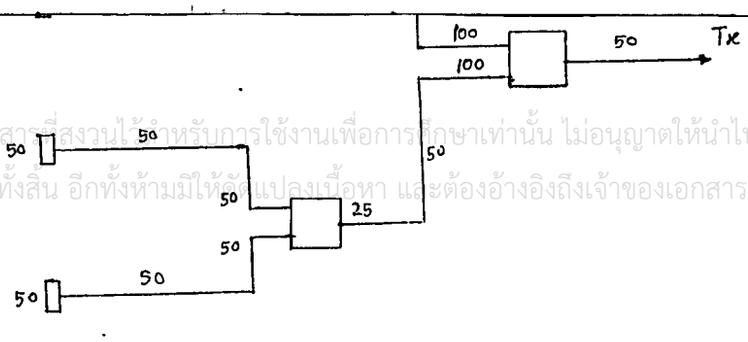
สายอากาศแบบเจ เป็นสายอากาศดั้งเดิมแบบครึ่งคลื่น (λ/2) ที่สัญญาณถูกป้อนเข้ามาทางปลาย แล้วถูกแมตช์ impedance ให้เหมาะกับเครื่องรับ/ส่ง ด้วยควอเตอร์สตับ ดังรูป โดยกระแสที่ขาทั้งสองของสตับนั้นมีค่าเท่ากัน และมีเฟสตรงข้ามกัน จึงทำให้การแพร่คลื่นออกจากสตับมีน้อยมาก และด้วยหน้าตาของสายอากาศมีรูปตัว J จึงถูกตั้งว่าสายอากาศแบบตัวเจ สายอากาศแบบนี้ให้การกระจายคลื่นแบบรอบตัวสำหรับการรับ/ส่ง แบบ เวอร์ติคอลโพลาไรเซชั่น ข้อดีของสายอากาศแบบนี้ คือไม่ต้องใช้กราวร์เพลน เพราะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมันสามารถเรโซแนนซ์ได้อยู่แล้ว และการแผ่คลื่นสูงสุดไปในแนวราบ ขณะที่สายอากาศทั้งหลายที่ใช้กราวร์เพลนนั้น การแผ่คลื่นมักจะเอียงขึ้นฟ้า จึงทำให้รับความนิยมมากในอเมริกา และถูกดัดแปลงไปเป็น สลิมจิม ในทวีปยุโรป

การปรับอิมพีแดนซ์นั้น จะเห็นว่าที่ตำแหน่งลัดวงจรจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด และเมื่อเลื่อนขึ้นไป จะทำให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จึงทำให้หาจุดที่มีอิมพีแดนซ์เหมาะสมได้ง่าย

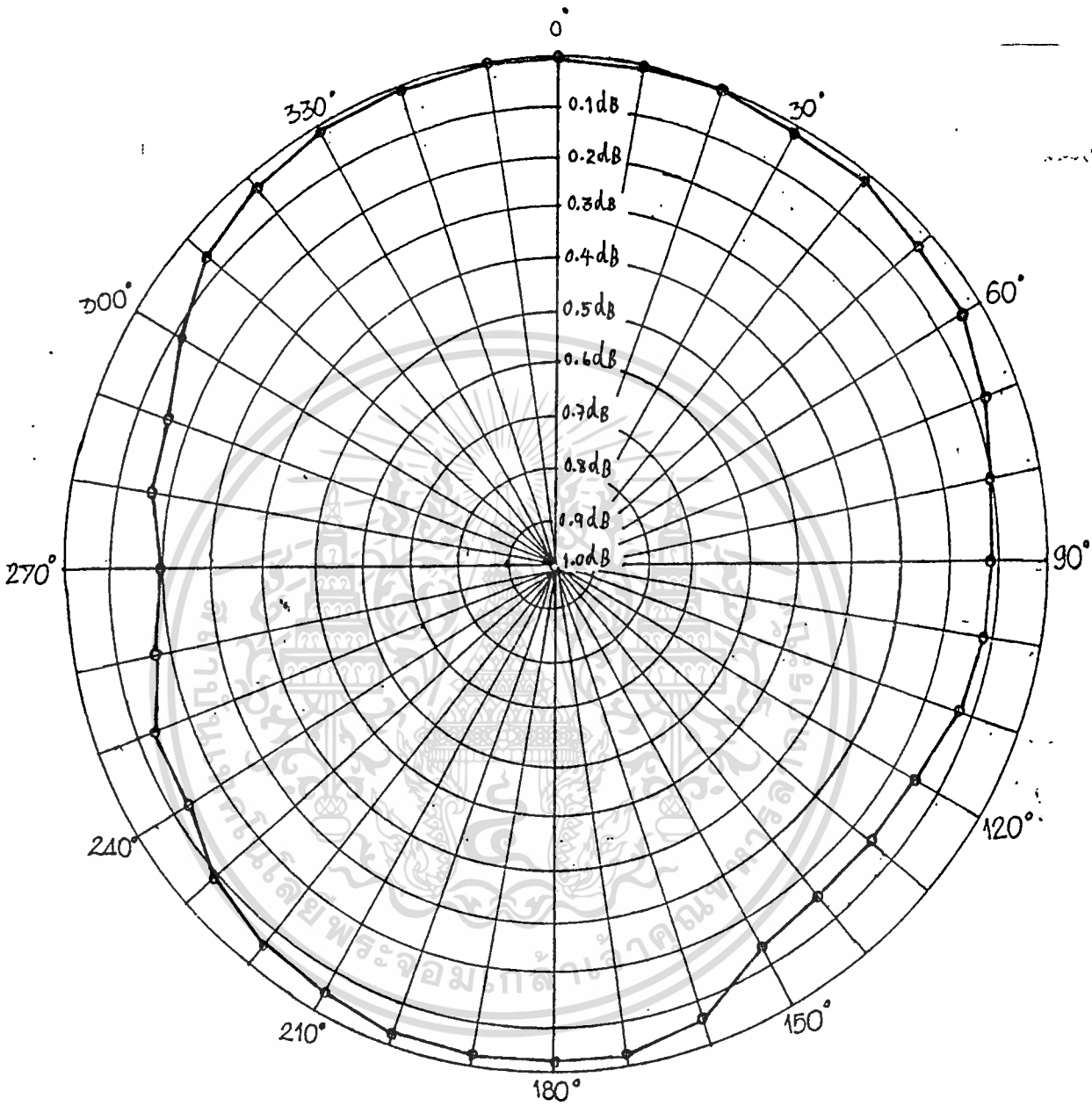
หาค่าต่างๆ ตามรูปข้างบนได้ดังนี้

L = ((λ /2)+(λ /4)) * Vr = 147 cm.

C = 49 cm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป Pattern ของ J Pole 4 Stack

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

(SUMMARY)

จุดมุ่งหมายของปริญญานิพนธ์นี้ เพื่อออกแบบสายอากาศเจโพล นำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพล จากผลการออกแบบและการทดลอง สรุปได้พอสังเขปดังนี้

1. ค่า SWR ของ เจโพลจะปรับได้ค่อนข้างง่ายกว่าของไดโพล และ จะได้ค่าต่ำกว่านิดหน่อย

2. ค่า Gain ของ เจโพลจะได้มากกว่าไดโพลห่วงประมาณ 0.1 dB และมากกว่า Half Wave Dipole ประมาณ 0.2 dB ซึ่งนับดูแล้วจะไม่ค่อยแตกต่างกันเท่าไร

3. ค่า Gain ของ เจโพล 4 สแตกซ์ จะมีค่ามากกว่า เจโพลต้นเดียวประมาณ 2 dB

จากการทดลองนี้มีปัญหามากมายหลายประการไม่ว่าจะเป็นการแมทช์สายอากาศก็ดี ปัญหาจากเครื่องส่งก็ดีซึ่งทำให้ project นี้เรียกได้ว่ายังไม่สมบูรณ์ 100% แต่ก็คิดว่าพอจะเป็นแนวทางเพื่อให้รุ่นน้องได้สานต่องานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] John D. Kraus, Electromagnetics, 1992

[2] สุชาติ กังวาลจิต, เครื่องรับส่งวิทยุและระบบวิทยุสื่อสาร, 2532

[3] ทนง โชติสรยุทธ์, CQ...CQ...CQ..., 2536

[4] วสันต์ อาชาเดโชพล, สายอากาศและเทคนิคการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้