การออกแบบสายอากาศล็อกเพอริโอดิก

(Logperiodic Antenna Design)

โดย

นาย กระวี	ศรีสุวรรณ์	38013351
นาย กำพล	สอนดี	38013352
นาย ไตรรัตน์	นิลไพโรจน์	38013356

วัน เดือน ปี 14 ธค 2541
เลขทะเบียน 038940
เลขเรียกหนังสือ โ ม๓๑๑ ก๒๒๔

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038940

การออกแบบสายอากาศล็อกเพอริโอดิก

โดย

นายกระวี ศรีสุวรรณ์ รหัส 38013351
นายกำพล สอนดี รหัส 38013352
นายไตรรัตน์ นิลไพโรจน์ รหัส 38013356

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ดลชัย สุขเจริญผล
อาจารย์จักรี ทีฆภาควิศิษฏ์

ปีการศึกษา 2540

.....

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เสนอสายอากาศล็อกเพอริโอดิก ซึ่งเป็นสายอากาศแบบไดโพลที่วางเรียงกันแบบอาร์เรย์ นิยมใช้ในงานสื่อสารที่ต้องใช้ช่วงความถี่กว้าง เช่น ช่วงความถี่วีเอชเอฟและยูเอชเอฟสำหรับกิจการโทรทัศน์ ความถี่ของสายอากาศแบบนี้จะถูกจำกัดโดยไดโพลตัวที่ยาวที่สุด ไดโพลตัวถัดไปจะมีความสัมพันธ์กับไดโพลตัวที่ยาวที่สุดอย่างสเกลล็อก อัตราขยายสามารถกำหนดเองได้ในการออกแบบ ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากออกแบบ จากการทดลองพบว่ามีอัตราส่วนโลบหน้าต่อโลบหลังสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การออกแบบสายอากาศล็อกเพอริโอดิก
(Logperiodic Antenna Design)

ชื่อนักศึกษา นาย กระวี ศรีสุวรรณ์
นาย กำพล สอนดี
นาย ไตรรัตน์ นิลไพโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจรย์ คลชัย สุขเจริญผล
อาจารย์ จักรี ทีฆภาคย์วิศิษฏ์

ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2540

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

----------ประธานกรรมการ
( )

----------กรรมการ
( )

----------กรรมการ
( )

----------กรรมการ
( )

----------กรรมการ
( )

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Log-periodic Antenna Design

BY MR. Krawee Srisuwan

MR. Kampol Sorndee

MR. Trirat Nilpairot

ADVISOR MR. Dolchai Sookcharoenphol

MR. Jakgree Teekapakvisit

YEAR 1997

.....

ABSTRACT

This project presents logperiodic antenna , which is an array dipole antenna . This logperiodic antenna is mostly used for broadband communication such as in VHF and UHF frequency for television. The frequency of the antenna is limited by the longest dipole in log scale. The gain of antenna can be determined. The input impedance of antenna is able to calculate. The experiment shown that the front to back lobe ratio is high .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเพราะได้รับความร่วมมือจากเพื่อนๆ ภายในกลุ่ม ที่ได้ร่วมแรงร่วมใจทำให้ปริญญานิพนธ์สำเร็จออกมา และต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดลชัย สุขเจริญผล และอาจารย์ จักรี ทีฆภาควิศิษฏ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและข้อมูลตลอดจนการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำโครงงาน ร่วมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ การวัดและทดสอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติทุกท่านที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือต่างๆในการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

ขอบพระคุณ ผู้อุปการะคุณ ที่ได้ให้ความอุปการะและสนับสนุนด้านการเงินและกำลังใจตลอดมา ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และวิทยาการต่างๆ กลุ่มผู้จัดทำขอระลึกถึงไว้ ณ ที่นี่ด้วย

นายกระวี ศรีสุวรรณ์
นายกำพล สอนดี
นายไตรรัตน์ นิลไพโรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
กิตติกรรมประกาศ	
บทที่ 1 ธรรมชาติของคลื่นและชั้นบรรยากาศ	1
บทที่ 2 คุณสมบัติของสายอากาศ	14
บทที่ 3 อาร์เรย์	27
บทที่ 4 สายนำสัญญาณ	32
บทที่ 5 การแมทชิ่งในระบบสายอากาศ	43
บทที่ 6 การออกแบบสายอากาศล็อกเพอริโอดิก	54
บทที่ 7 การวัดคุณสมบัติสายอากาศย่านความถี่VHFและUHF	60
บทที่ 8 ผลการทดลอง	66
บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
ธรรมชาติของคลื่นและชั้นบรรยากาศ

1.1 บทนำ

ผิวโลกถูกห่อหุ้มด้วยชั้นบรรยากาศ ซึ่งไม่ได้มีขอบเขตที่แน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศและความสูง จากการสำรวจของนักวิทยาศาสตร์พอที่จะแบ่งออกเป็นชั้น ๆ ได้ 3 ชั้นคือ *โทรโปสเฟียร์ (tropospher) สตราโตสเฟียร์ (stratosphere)* และไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ด้วยเหตุผลทางคณิตศาสตร์ของนักฟิสิกส์พบว่า เป็นไปไม่ได้เลยที่เราจะรับสัญญาณวิทยุที่ระยะห่างไกล ๆ เพราะพลังงานบางส่วนจะถูกบั่นทอน (attennuated) โดยการดูดซับของผิวโลกและชั้นบรรยากาศ แต่เมื่อมีการทดลองแล้วพบว่าสัญญาณวิทยุสามารถส่งข้ามมหาสมุทรแอดแลนติดได้ ก็เป็นที่สงสัยกันว่าหตุผลดังกล่าวจะยังใช้ได้หรือไม่และเป็นที่ถกเถียงกันอย่างหนัก ในที่สุดก็อธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในเรื่องการเคลื่อนที่ของคลื่น นี่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจศึกษาชั้นบรรยากาศว่าประกอบด้วยอะไรกันแน่

นักวิทยาศาสตร์ 2 คนชื่อ อีวีไซด์ (Heaviside) ชาวอังกฤษ และ เคนเนลลี่ (Kennelly) ชาวอเมริกัน ได้กล่าวว่าพื้นผิวโลกถูกล้อมรอบด้วยชั้นทางไฟฟ้า (electrical layer) ซึ่งกระทำตัวคล้ายกับ ตัวสะท้อน (reflector) และจะป้องกันไม่ให้คลื่นทะลุผ่านไปโดยการโค้งทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นมายังผิวโลก และยังประกอบขึ้นด้วยก๊าซที่แตกตัว (ionized gas) ของชั้นบรรยากาแต่ชั้นที่ค้นพบอย่างแน่นอนและได้รับการศึกษาอย่างจริงจังคือชั้นไอโอโนสเฟียร์

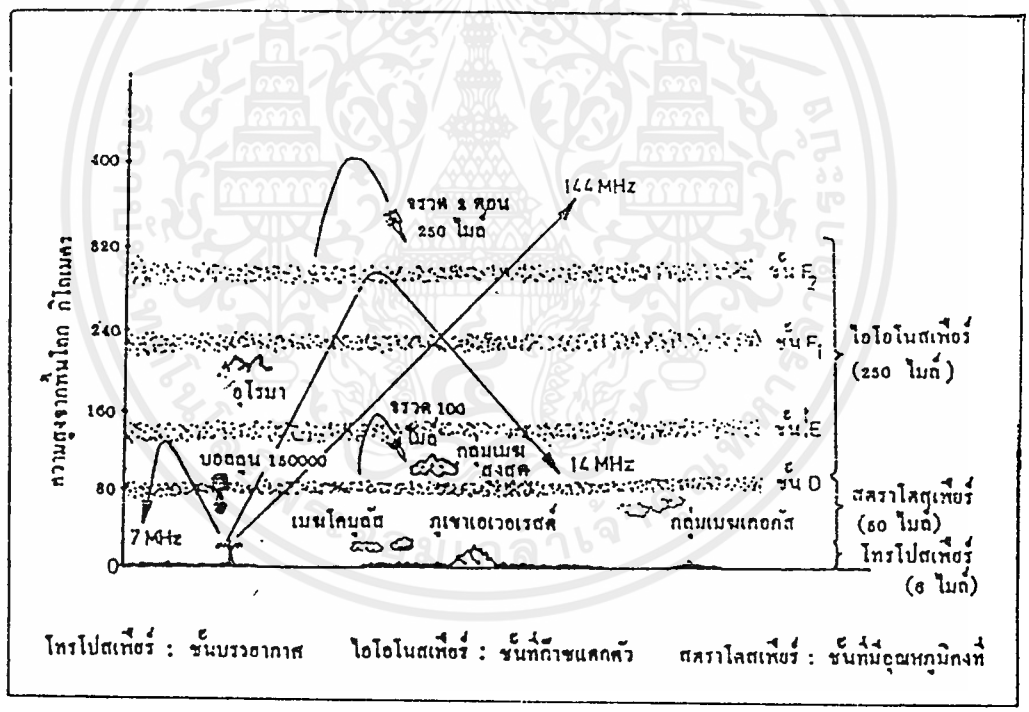
ชั้นบรรยากาศที่เหนือจากผิวโลกเป็นระยะทาง 400 กิโลเมตร ความหนาแน่นของก๊าซที่ประกอบกันเป็นชั้นบรรยากาศนี้จะลดลงที่ระยะทางมากขึ้น การกระจายรังสีจากดวงอาทิตย์จะมีทั้งแสง (lightray) ที่มีความถี่ต่างๆ กันมากมายตั้งแต่ แสงอินฟราเรด (infrared) จนถึงอุลตราไวโอเลท (ultraviolet) ซึ่งประกอบด้วย โพสิตรอน (positron) และ อิเลคตรอน (electron) เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาด้วยความเร็วเกือบเท่ากับความเร็วของแสง ในชั้นบรรยากาศจะมีการแตกตัวและรวมตัวอย่างสลับซับซ้อน อาจจะกล่าวได้ว่าแหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกตัวคือ ดวงอาทิตย์ก็เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่ง ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ผิวรอบนอกของดวงอาทิตย์ซึ่งจะผลต่อการแผ่กระจายรังสีอุลตราไวโอเลทน้อยลงโดยเฉพาะกลางวันตอนเที่ยง ถ้าเกิดจุดบอดบนดวงอาทิตย์แล้วจะทำให้การรับ-ส่ง สัญญาวิทยุรับได้ดีเมื่อรังสีอุลตราไวโอเลททะลุมายังชั้นบรรยากาศ

1.2 การแบ่งชั้นบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อาจแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ที่แตกต่างกันตามความสูงและความเข้ม ตามลำดับ คือ ดี อี เอฟหนึ่งและเอฟสอง ส่วนของเอฟหนึ่งและเอฟสองจะเกิดขึ้นเฉพาะในเวลาตอนกลางวันเท่านั้น เนื่องจากดวงอาทิตย์ส่องไปกระทบส่วนของบรรยากาศชั้นนี้ ในช่วงเวลากลางคืน ชั้นเอฟหนึ่ง (F_1) เอฟสอง (F_2) จะรวมเป็นชั้นเอฟเดียวและชั้นดี อีจะหายไป เพราะเกิดการรวมตัวกันใหม่ของไอออน (ion) เพราะรังสีอุลตราไวโอเลทจากดวงอาทิตย์หมดแล้ว ในตอนกลางคืนแต่อย่างไรก็ตามชั้นที่เกิดขึ้นจริง ๆ ความสูงและความเข้มของไอออนจะเปลี่ยนแปลงค่าไปตลอดเวลา ชั่วโมง วัน เดือน ฤดูกาลและปี

ชั้นดีจะมีความสูงจากพื้นโลกประมาณ 50-90 กม. การแตกตัวในชั้นนี้จะมีน้อยเมื่อเทียบกับชั้นอื่น ๆ ผลของชั้นนี้จะทำให้ความเข้มสนามที่ความถี่สูง ๆ จะถูกบั่นทอนลง และจะดูดซึมความถี่วิทยุปานกลางและต่ำ จะเกิดขึ้นเฉพาะตอนกลางวัน โดยเฉพาะตอนเที่ยงและความเข้มของมัน จะแปรตามความสูงของดวงอาทิตย์จากพื้นโลก ในชั้นนี้จะมีการรวมตัวของไอออนได้เร็ว ในทันทีที่แสง



รูปที่ 1.1 แสดงชั้นบรรยากาศและความสูงของชั้นบรรยากาศ

อาทิตย์น้อยลงจะมีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วมาก ชั้นนี้จะดูดสัญญาณวิทยุที่ความถี่ต่ำและนี่เป็นเหตุผลอย่างหนึ่งที่การสื่อสารกลางวันที่ช่วงความยาวคลื่น 100 เมตร และ 80 เมตร จะไปได้ไกล

ชั้นอีความสูง 90-145 กม. จากพื้นโลก บางครั้งเรียกว่าชั้นเคนเนลลี่-ฮีวีไซด์ (kennelly Heviside layer) ความสูงของชั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ในแนวละติจูดความสูงจะลดลง รังสีอุตราไวโอเลทจะทะลุโดยตรงถึงชั้นนี้ การรวมตัวของไอออนในชั้นนี้ก็เป็นไปได้เร็วเช่นกันโดยเฉพาะตอนเที่ยง และมีค่าน้อยในตอนเย็น การติดต่อที่ความถี่สูงส่วนใหญ่ใช้ในชั้นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

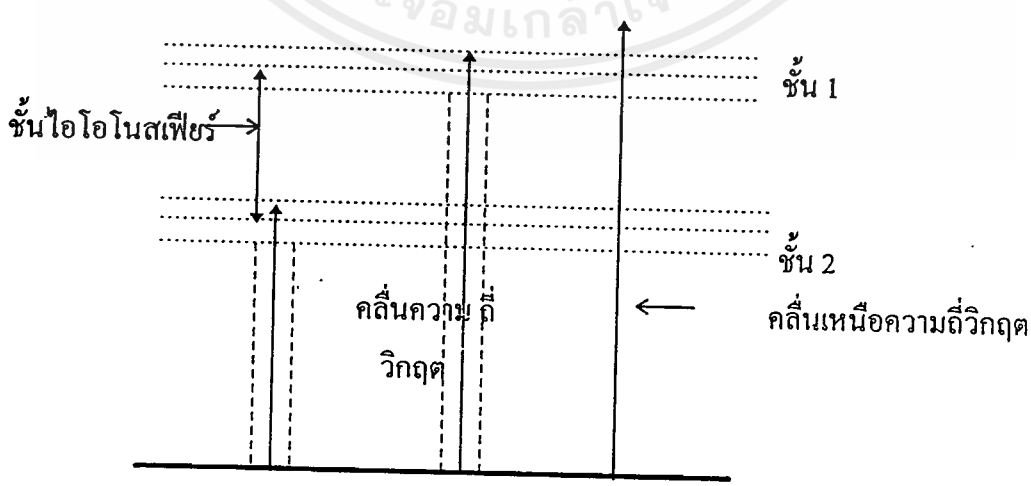
เพราะที่ความถี่มากกว่า 20 MHz คลื่นสามารถสะท้อนมายังโลกได้ ในชั้นนี้จะใช้ติดต่อไปได้ที่ระยะทางน้อยกว่า 2400 กิโลเมตร ที่ระยะทางมากกว่านี้จะติดต่อไม่ได้ดี ชั้นนี้จะดูดซึมความถี่ต่ำ ได้น้อยกว่าโนชั้นดี

ชั้นเอฟห่างจากพื้นโลกประมาณ 145-380 กม. มีการแตกตัวของไอออนตลอดเวลา ในตอนกลางคืนจะมีเฉพาะชั้นเอฟที่ความสูงประมาณ 270 กม. การรวมตัวของไอออนในตอนกลางคืนเกิดได้ช้า เพราะฉะนั้นจะสะท้อนความถี่สูงมายังโลกและที่ความถี่สูงมาก ๆ จะทะลุผ่านชั้นนี้ออกไปเลย

ชั้นเอฟ-หนึ่งและเอฟ-สอง จะเกิดขึ้นโดยเฉพาะเวลากลางวันและประเทศในเขตร้อน เอฟหนึ่งที่ความสูง 144 กิโลเมตร เอฟ-สองที่ความสูง 256-400 กิโลเมตร เอฟ-สองจะมีการไอออนไนซ์มากที่สุดในบรรดาชั้นต่าง ๆ และเป็นชั้นที่มีประโยชน์ในการติดต่อในระยะทางไกล ความเข้มข้นของการแตกตัวจะมีมากที่สุดในตอนบ่าย และจะลดลงที่ละน้อยในตอนกลางคืน เนื่องจากมีความกดดันของอากาศต่ำ จะทำให้การรวมตัวของไอออนเป็นไปได้ช้ามาก และไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของแสงอาทิตย์เป็นสาเหตุหนึ่งที่วิทยุคลื่นสั้นส่งได้ทั้งวันและไปได้ไกล

1.3 คุณสมบัติของชั้นไอโอโนสเฟียร์

ความถี่วิกฤต (Critical frequency) นอกเหนือจากความสูงและคุณสมบัติของการแตกตัวในแต่ละชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดระยะทางของการติดต่อ ที่ระยะทางยิ่งสูงความเข้มยิ่งมากจะทำให้การสะท้อนของคลื่นเกิดได้ดีที่ความสูงไม่มากนัก และที่ความเข้มน้อยกว่าจะเกิดการหักเหของคลื่นที่ระยะทางสูง ๆ จะสะท้อนความถี่สูง ในขณะที่ชั้นดีจะไม่สะท้อนที่ความถี่ 500kHz เพราะฉะนั้นใน



รูปที่ 1.2 แสดงชั้นบรรยากาศกับความถี่วิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

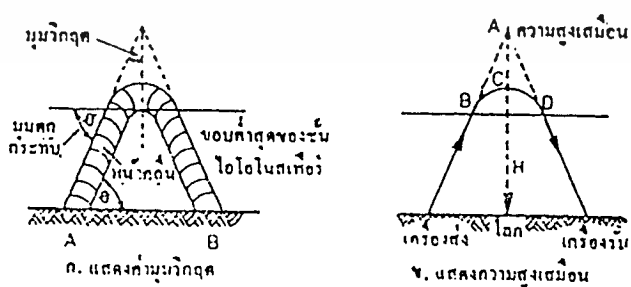
แต่ละชั้นจะมีค่าความถี่สูงสุดที่คลื่นจะสะท้อนมายังโลกเรียกว่า *ความถี่วิกฤต* คลื่นที่ความถี่มากกว่าคลื่นที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่วิกฤตจะสะท้อนกลับมายังโลกนอกจากจะถูกดูดซึม หรือสะท้อนโดยชั้นที่ต่ำกว่า

รูปที่ 1.2 แสดงคลื่นที่ความถี่ต่างกันจะสะท้อนในแนวดิ่งไปในชั้นไอโอไนสเพียร์ สัญญาณ 2 สัญญาณจะสะท้อนกลับมายังโลกโดยตรงและสัญญาณที่ 3 จะผ่านชั้นบรรยากาศทั้ง 2 ไป และจะไม่สะท้อนกลับและความถี่ต่ำกว่าค่านี้จะสะท้อนด้วย ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายให้เข้าใจได้โดยอาศัยเรื่องการที่แสงทะลุผ่านอากาศไปยังแก้ว เมื่อสัญญาณผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วยมุมตกกระทบ 90 องศา สัญญาณจะช้าลงและสะท้อนกลับคล้ายเป็นกระจกเงา ความถี่ยิ่งสูงจะทะลุไปได้ไกล

มุมวิกฤต (Critical angle) คลื่นวิทยุจะตกกระทบที่มุมต่าง ๆ กันกับชั้นบรรยากาศอาจจะถูกหักเหไปเลยโดยไม่มีการสะท้อนกลับก็ได้ จากการที่ได้กล่าวมาในตอนที่แล้วว่า ที่ความถี่เท่ากันหรือน้อยกว่าความถี่วิกฤต คลื่นจะสะท้อนกลับมายังโลก แต่ความถี่ที่สูงกว่าความถี่วิกฤตอาจจะสามารถสะท้อนกลับมายังผิวโลกได้ ถ้ามุมตกกระทบเหมาะสมเรียกมุมนี้ว่า มุมวิกฤต ที่มุมตกกระทบที่อยู่ใกล้แนวดิ่งความถี่จะผ่านชั้นบรรยากาศ แต่ที่มุมน้อยกว่านี้จะทำให้คลื่นที่ความถี่นี้จะ สะท้อนกลับมายังพื้นโลกแต่ระยะทางอาจไปไม่ได้ไกลเรียกว่า ระยะทางสกิพ (skip distance) มุมตกกระทบซึ่งเล็กเท่าไรก็จะไปได้ไกลเท่านั้น จะเข้าใจได้ดี ถ้าเข้าใจการหักเหและการสะท้อนของแสง

ความสูงเสมือน (Virtual height) รูปที่ 1.3 จะทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น จากรูปที่ 1.3(ข)ทิศทางของคลื่นวิทยุบีซีดี ในชั้นไอออนไนซ์ จะเหมือนกับบีเอดี ถ้าไม่มีการแตกตัวและการสะท้อนเป็นไปอย่างสมบูรณ์ที่ความสูงจากผิวโลกถึงจุดตัดคือ ความสูงเสมือน คือระยะเอชซึ่งจะยาวกว่าความสูงของชั้นบรรยากาศ

เพราะว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์ เกิดจากการแผ่กระจายรังสีของดวงอาทิตย์และการเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จะมีผลต่อชั้นไดโอโนสเฟียร์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งที่เป็นปกติตลอดฤดูกาล และการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติคือนาน ๆ จะเกิดครั้ง การเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 1.3

ปกติอาจแบ่งออกเป็น 4 แบบคือ การเปลี่ยนแปลงประจำวัน ประจำฤดู ทุก 11 ปี ทุก 27 วันต่อไปจะเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงและผลต่อการติดต่อและการแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การยังมีการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติ เช่นการเปลี่ยแปลงที่ไม่แน่นอนในชั้น E ไอโอโนสเฟียร์ทันทีทันใด(dellinger fede) หรือพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นต้น

แบบ	ผลต่อชั้นไอโอโนสเพียร์	ผลต่อการสื่อสาร	การทดแทน (การแก้ไข)
ประจำวัน	ชั้นเอฟความสูงและความเข้มจะลดลงหลังดวงอันตกดิน ในช่วงกลางวันจะเกิดเอฟ-หนึ่งซึ่งความหนาแน่นแปรตามความสูง เอฟ-สอง ความสูงเพิ่มขึ้นจนถึงตอนเที่ยง ความเข้มเพิ่มขึ้นในวันต่อไป	ระยะทางที่ส่งเปลี่ยนไปในช่วงความถี่ 1-30MHz การดูดซึมเพิ่มขึ้นในช่วงกลางวัน	ใช้ความถี่สูงในช่วงกลางวัน ใช้ความถี่ต่ำในช่วงกลางคืน
ประจำฤดู	เอฟ-สอง ความสูงเสมือนเพิ่มขึ้นในฤดูร้อน ลดลงในฤดูหนาว	MUF (maximum usable freq.) มีค่าสูงเรื่อย ๆ ในฤดูหนาว มีค่าสูงในตอนบ่ายในปลายฤดูร้อน	
11-ปี เนื่องจากจุดบอดของดวงอาทิตย์	ความเข้มของชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นและลดลงในเนื่องจากจุดบอดบนดวงอาทิตย์มากสุดในปี1947-1947-48 และ 1958-59 น้อยสุดในปี 1944-55	ความถี่วิกฤตสูงขึ้น การเปลี่ยนของเอ็มยูจุดยอด มากสุด 8-42 MHz น้อยสุด 4-22 MHz	ใช้ความถี่สูงในช่วงของจุดบอดมากที่สุดและความถี่ต่ำในช่วงจุดบอดน้อยที่สุด

หมายเหตุ เอ็ม ยู เอฟ ก็คือความถี่วิกฤตนั่นเอง

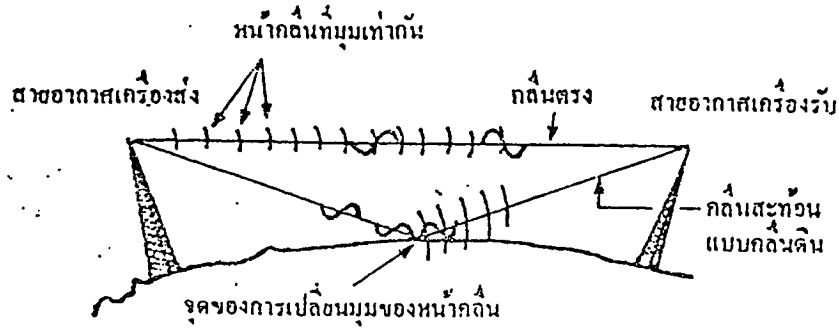
นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติ เช่นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนในชั้น E ไอโอโนสเพียร์ทันทีทันใด (dellinger fade) หรือพายุในชั้นไอโอโนสเพียร์ เป็นต้น

1.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นแบบคลื่นดิน

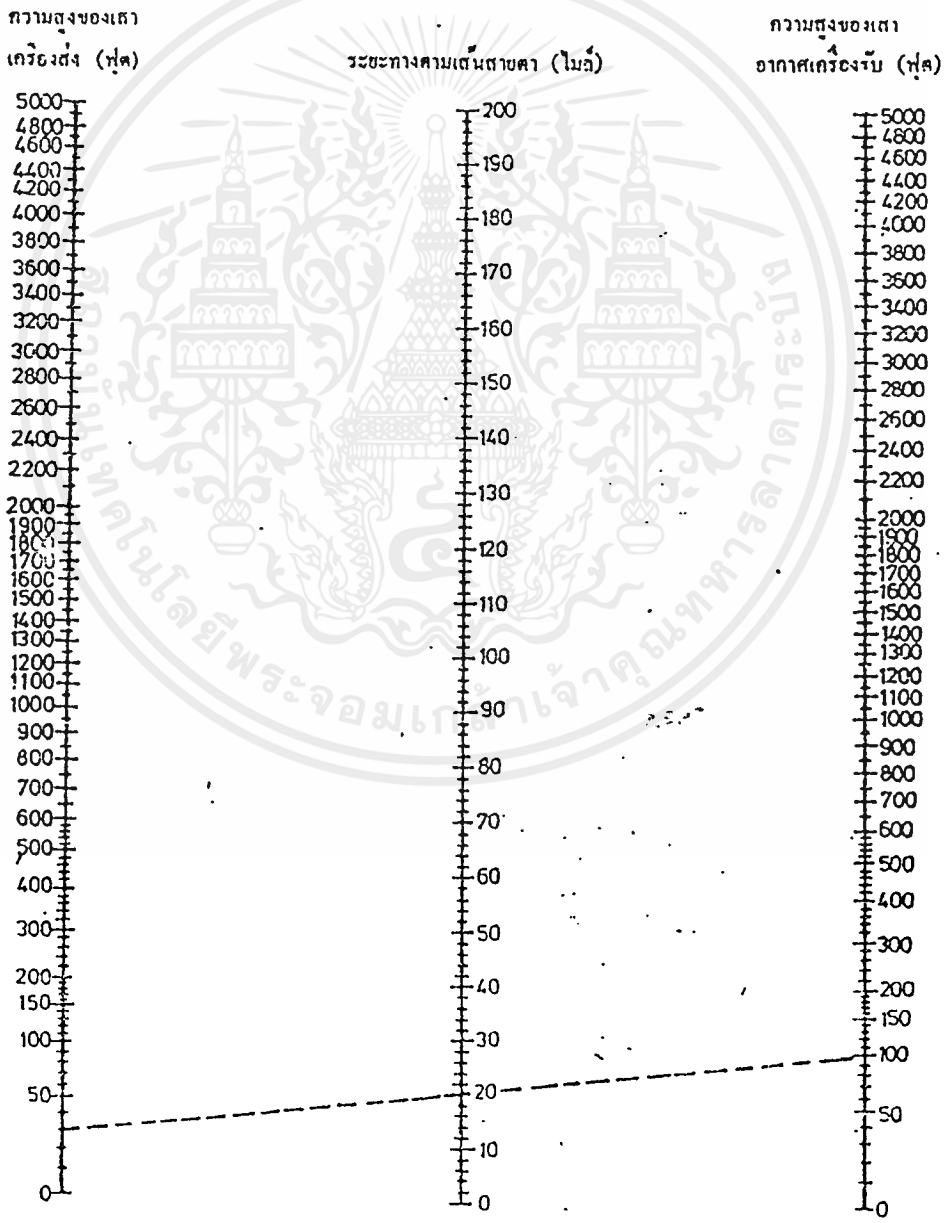
การเคลื่อนที่แบบคลื่นดินหมายถึง การเคลื่อนที่ของคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยการสะท้อนจากชั้นไอโอโนสเพียร์ เพราะฉะนั้นความเข้มสนามจะขึ้นกับองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น กำลังของเครื่องส่งคุณสมบัติของสายอากาศเครื่องส่ง ความถี่ของคลื่น การเคลื่อนที่ของคลื่นรอบส่วนโค้งของโลก(diffraction) ความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศ การเคลื่อนที่แบบนี้เหมาะกับการสื่อสารที่ระยะทางปานกลาง (หลายร้อยกิโลเมตร) ที่ความถี่ต่ำ

รูปแสดงถึงคลื่นดิน 2ชนิด คือ คลื่นตรง (direct wave) และคลื่นสะท้อน (reflected wave) จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ และการหักเหของคลื่นในชั้นโทรโปสเฟียร์ เพราะฉะนั้นคลื่นดินอาจพูดได้ว่าประกอบด้วยคลื่นตรง คลื่นสะท้อน คลื่นตามผิวดิน และคลื่นโทรโปสเฟียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

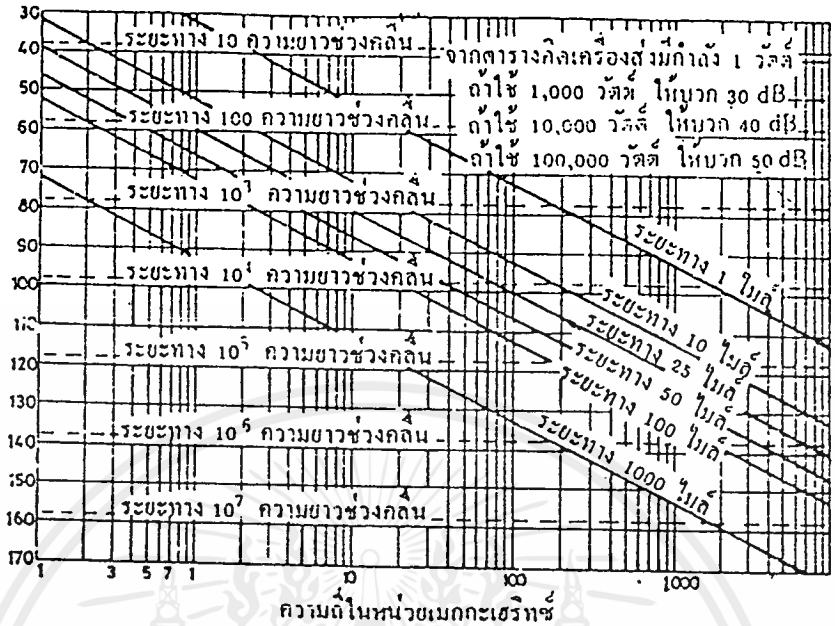


รูปที่ 1.4 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่น

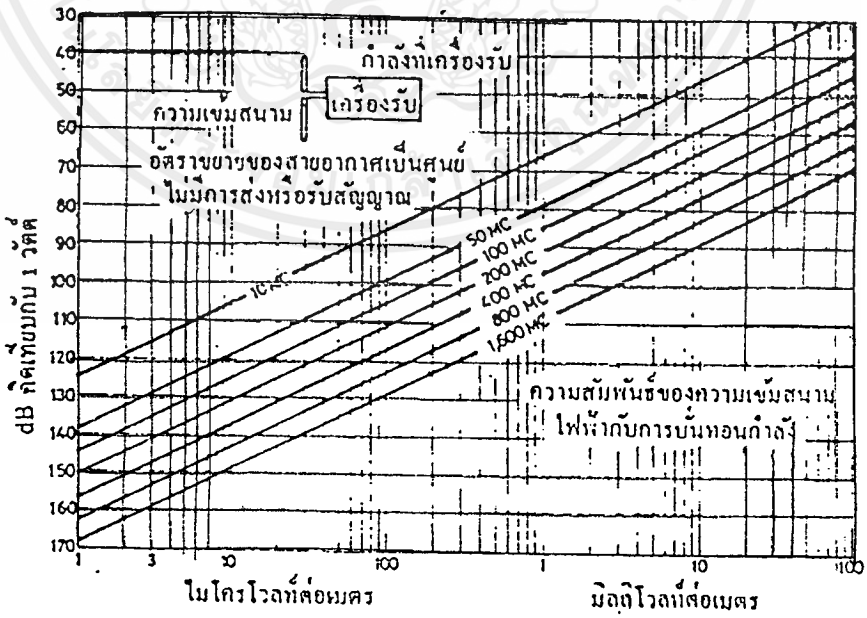


รูปที่ 1.5 แสดงโมโนกราฟ ความสูงของสายอากาศ และระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 การบั่นทอนของกำลังที่ความถี่และระยะทางต่างๆกัน



รูปที่ 1.7 การบั่นทอนของกำลังที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่าง ๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นตรง เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยตรง จะถูกจำกัดโดยระยะทาง *ในแนวราบหรือเส้นสายตา* (Line of sight) ระยะทางที่ไปได้ไกลเพิ่มความสูงของสายอากาศเครื่องส่ง รูปที่ 1.5 จะแสดงค่าโดยประมาณของระยะของการส่งซึ่งประกอบด้วยความสูงของเครื่องส่งและเครื่องรับและระยะทางที่ส่งไปได้ไกล ความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นตรงจะแปรกลับกับระยะทางของการส่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.6

ความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นตรงจะแปรกลับกับระยะทางของการส่ง เช่นที่ 10MHz กำลัง 1 วัตต์ของการส่งจะถูกบั่นทอน 80 เดซิเบล (dB) ที่ระยะทาง 40 กิโลเมตรซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นความเข้มสนามไฟฟ้า (มิลลิโวลท์/เมตร) โดยรูปที่ 1.7 เช่นที่ 10 Mhz กำลังสูญเสีย 30 เดซิเบล เมื่อเทียบกับ 1 วัตต์ ได้ความเข้มสนามไฟฟ้า 200มิลลิโวลท์/เมตร การบั่นทอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแต่การบั่นทอนจะคงที่เมื่อระยะทางแสดงเป็นแลมด้า (λ) เพราะว่าที่ความถี่สูงแลมด้าจะต่ำ

คลื่นสะท้อน เป็นคลื่นวิทยุที่เคลื่อนที่ถึงเครื่องรับหลังจากสะท้อนจากพื้นดินหรือจากผิวทะเล สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างจุด ที่น้อยกว่า 1000 ฟุตเล็กน้อย ผลของการสะท้อนจากพื้นดินจะทำให้ คลื่นมีมุมเฟส (phase) ต่างออกไป 180 องศา ตามรูปที่ 1.8 ซึ่งจะมีผลต่อเครื่องรับมากในการที่จะรวมกับคลื่นตรงเพราะมุมต่างกัน 180 องศา (ทั้งนี้เพราะต้องเคลื่อนที่ด้วยระยะทางที่ไกลกว่า)

คลื่นตามผิวดิน อาจถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นดิน ซึ่งมีผลมาจาก สภาพการนำ (conductirity) และค่าคงที่ไดอิเลคตริค (dielectric constant) ของพื้นดินและสามารถเคลื่อนที่ไปตามความโค้งของ

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของการเคลื่อนที่ของคลื่นที่สภาพต่าง ๆกัน

ชนิดของพื้นผิว	ความนำสัมพันธ์ (Relative Conductivity)	ค่าคงตัวไดอิเลคตริค (Diclectric Constant)
น้ำทะเล	ดีมาก	80
แอ่งน้ำใหญ่	ดี	80
ดินเปียก	ดี	30
Flat, loamy Soil	ดี	15
พื้นที่แห้งเป็นหิน	เลว	7
ทะเลทราย	เลว	4
ป่า	เลวมาก	-

ผิวโลกได้ สายอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่บนพื้นดินหรือใกล้พื้นดิน ความเข้มสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่จะมาจากคลื่นตามผิว ซึ่งบางส่วนจะถูกบั่นทอนไปตามสภาพของภูมิประเทศดังตารางที่ 1.1 ผิวน้ำจะมีสภาพการนำสูงสุด คลื่นตามดินเป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นที่มีคุณสมบัติที่ค่อนข้างจะคงที่

1.5 คุณสมบัติของความถี่ของคลื่นดิน

เอกสารนี้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ระหว่าง (10-30MHz) ค่าไดอิเลคตริคจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของการเคลื่อนที่แบบผิวดิน คือ ค่าไดอิเลคตริคยิ่งมากจะยิ่งดีโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำ

ที่ช่วงความถี่ต่ำ (0.03MHz-0.3MHz) ใช้การติดต่อแบบคลื่นดินได้ระยะทางปานกลาง ในช่วงความถี่นี้คลื่นจะสามารถเคลื่อนไปตามส่วนโค้งของโลกได้หลายร้อยไมล์

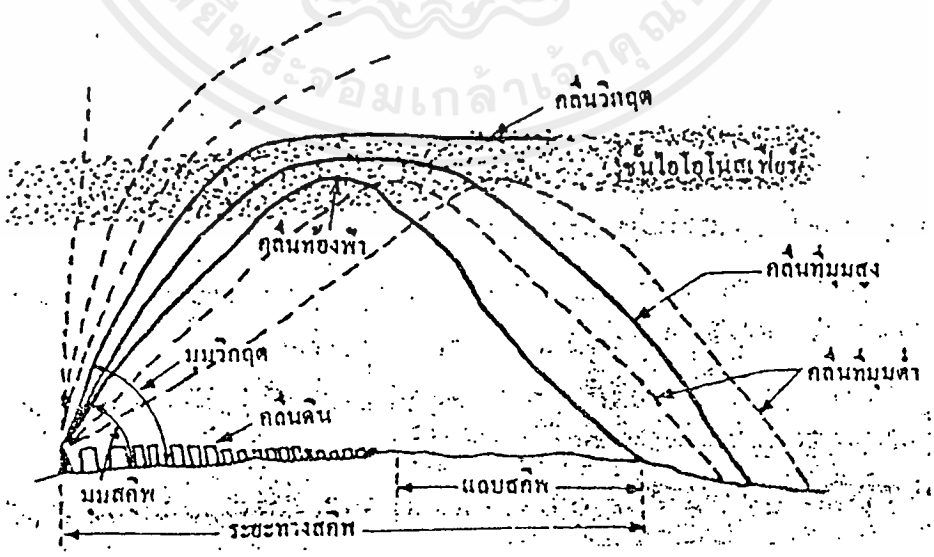
ที่ช่วงความถี่ปานกลาง (0.3MHz-3MHz) ใช้ในการติดต่อในระยะทางปานกลา และที่ระยะทางไกลถึง 1000 ไมล์

ที่ช่วงความถี่สูง (3MHz-30MHz) ใช้ในการติดต่อที่ระยะทางใกล้ๆ ที่ความถี่นี้ค่าไดอิเลคตริคของผิวโลกจะมีส่วนทำให้ความเข้มสนามของคลื่นตามผิวลดลง และเป็นตัวประกอบสำคัญที่ทำให้ความถี่สูงถูกบั่นทอนลง

ที่ความถี่สูงมาก (30MHz) ขึ้นไปในการติดต่อสื่อสารที่เห็นกัน โดยมากเป็นคลื่นตรงซึ่งสามารถเพิ่มระยะทางได้โดยการเพิ่มความสูงของสายอากาศซึ่งต่างกันที่ความถี่ต่ำ คลื่นดินจะเพิ่มระยะทางที่ส่งได้โดยเพิ่มกำลังส่งของเครื่องส่ง

1.6 การเคลื่อนที่ของคลื่นท้องฟ้า

การเคลื่อนที่ของคลื่นท้องฟ้าเป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบที่สองที่สะท้อนในชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ ซึ่งมีบทบาทในการติดต่อระยะทางไกล ๆ ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ คลื่นที่เคลื่อนที่แบบนี้คือ คลื่นที่มีความถี่ปานกลาง 300-3000kHz ซึ่งจะสะท้อนในชั้นโทรโพสเฟียร์ และคลื่นที่ความถี่ย่านคลื่นสั้น (short wave) คือ 3-30MHz สะท้อนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ เพื่อสะดวกในการอธิบายให้ดูรูปที่ 1.8 ประกอบ



รูปที่ 1.8 แสดงการสะท้อนของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากรูปจะสังเกตเห็นว่า จะมีทิศทางที่เป็นไปได้หลายทางที่คลื่นจะเคลื่อนที่จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยสะท้อนในชั้นไอโอโนสเฟียร์
- ระยะทางสกิพ (skip distance) เป็นระยะทางที่ใกล้ที่สุดที่คลื่นที่ความถี่หนึ่งจะสะท้อนในชั้นบรรยากาศมายังพื้นดิน จะมีเฉพาะความถี่นั้นๆ ที่มากกว่าความถี่วิกฤต
- จะเห็นว่าแถบสกิพ (skip zone) เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากช่วงของการเคลื่อนที่ของคลื่นดิน แถบสกิพจะหมดไป เมื่อช่วงของระยะทางของคลื่นดินเท่ากับหรือมากกว่าแถบสกิพ
- ถ้ามุมตกกระทบจากสายอากาศเครื่องส่งกระทำกับชั้นไอโอโนสเฟียร์คงที่และความถี่เพิ่มขึ้นระยะทางสกิพจะเพิ่มขึ้น ถ้าความถี่เหล่านั้นมีค่ามากกว่าความถี่วิกฤตเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะความสูงและการแตกตัวของไอออนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
- มุมวิกฤตเป็นมุมที่คลื่นเริ่มหักเหในชั้นบรรยากาศโดยไม่สะท้อนมายังโลก มุมสกิพ(skip angle) เป็นมุมที่คลื่นเริ่มสะท้อนมายังโลก
- ถ้ามุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต คลื่นจะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศโดยไม่มีการหักเหและสะท้อน มายังพื้นโลก และถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต แต่น้อยกว่ามุมสกิพจะไปได้ไกลกว่าทางสกิพที่ความถี่นั้นแต่ถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่ามุมสกิพ จะไปได้ไกลกว่าระยะทางสกิพแต่จะถูกบั่นทอน
- ที่ความถี่สูงค่าเดียวกัน ถ้าสายอากาศเครื่องส่ง ส่งคลื่นเป็นมุมตกกระทบต่างๆกัน ก็จะมี ผลต่างกันออกไป เช่น ระยะทางใกล้ไกลต่างกันมุมวิกฤตที่ความถี่หนึ่งจะแตกต่างกับความถี่วิกฤต สำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์ความถี่วิกฤต เป็นความถี่สูงสุดในชั้นความสูงนั้นๆที่จะสะท้อนคลื่นกลับมายังโลกโดยมีมุมตกกระทบเป็น องศา ความถี่ที่สูงกว่าความถี่วิกฤตจะไม่สะท้อนมายังโลก แต่อาจสะท้อนได้ถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่า 90 องศา
- ที่ความสูงและความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศที่คงที่ และมีมุมตกกระทบคงที่ (น้อยกว่า90 องศา)จะมีค่าความถี่ที่สูงที่สุดที่คลื่นจะสะท้อนมายังโลกเรียกค่าความถี่นี้ว่า เอ็มยูเอฟ (MUF) และจะมีค่าสูงกว่าความถี่วิกฤต ถ้าระยะทางระหว่างเครื่องส่ง-เครื่องรับเพิ่มขึ้นเอ็มยูเอฟจะเพิ่ม ขึ้นด้วย
- ถ้าความสูง ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับคงที่ความถี่ที่ต่ำกว่าเอ็มยูเอฟจะถูกบั่นทอน จะมีความเข้มของคลื่นมากที่สุดที่เอ็มยูเอฟ และความถี่สูงกว่าเอ็ม ยู เอฟ จะไม่สะท้อนในชั้นบรรยากาศ (นอกจากจะสะท้อนในชั้นอื่นๆ)
- ถ้าที่ความถี่คงที่ และระยะทางเครื่องส่ง-เครื่องรับเปลี่ยนไปที่ระยะทางสกิฟจะรับสัญญาณได้ดีที่สุด ที่ระยะทางไกลกว่าสกิพจะถูกบั่นทอน

1.7 ความเข้มของสัญญาณ

อัตราขยายของสายอากาศ (gain of antenna) ซึ่งจะกล่าวในตอนต่อไป ในบางครั้งการติดต่อต้องการติดต่อในทิศทางเดียว สายอากาศเครื่องส่งก็ต้องมีอัตราขยายสูงในทิศทางนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสนาม (field intensity) จะแปรผันกับระยะทางกำลังสอง

การดูดซึม (absorbtion) เกิดในชั้นอากาศโดยเฉพาะในช่วงกลางวัน การดูดซึมเกิดในชั้นดีของไอโอโนสเฟียร์

ความสูงของเสาอากาศ สัญญาณที่ได้รับจะเป็นสัญญาณรวมของคลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบคลื่นท้องฟ้าและส่วนที่สะท้อนจากดินการเปลี่ยนแปลงของพื้นดินจึงมีผลต่อการรับสัญญาณ

มาตรฐานความถี่ทั่วไป คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศทางฟิสิกส์ มีความสัมพันธ์อย่างใกลชิดกับความถี่ กล่าวคือ *ความยาวของไดโพล (dipole) ไดเรคเตอร์หรือตัวชี้นำ (director) รีเฟรคเตอร์หรือตัวสะท้อน (reflector) ช่องห่าง (spacing) ระหว่างไดโพล-ไดเรคเตอร์และ ไดโพล-รีเฟรคเตอร์* โดยสายอากาศที่ใช้งานที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ กันก็มีขนาดแตกต่างกันไป จึงจะขอกล่าวถึงความถี่ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1.2 และคุณสมบัติที่สำคัญ

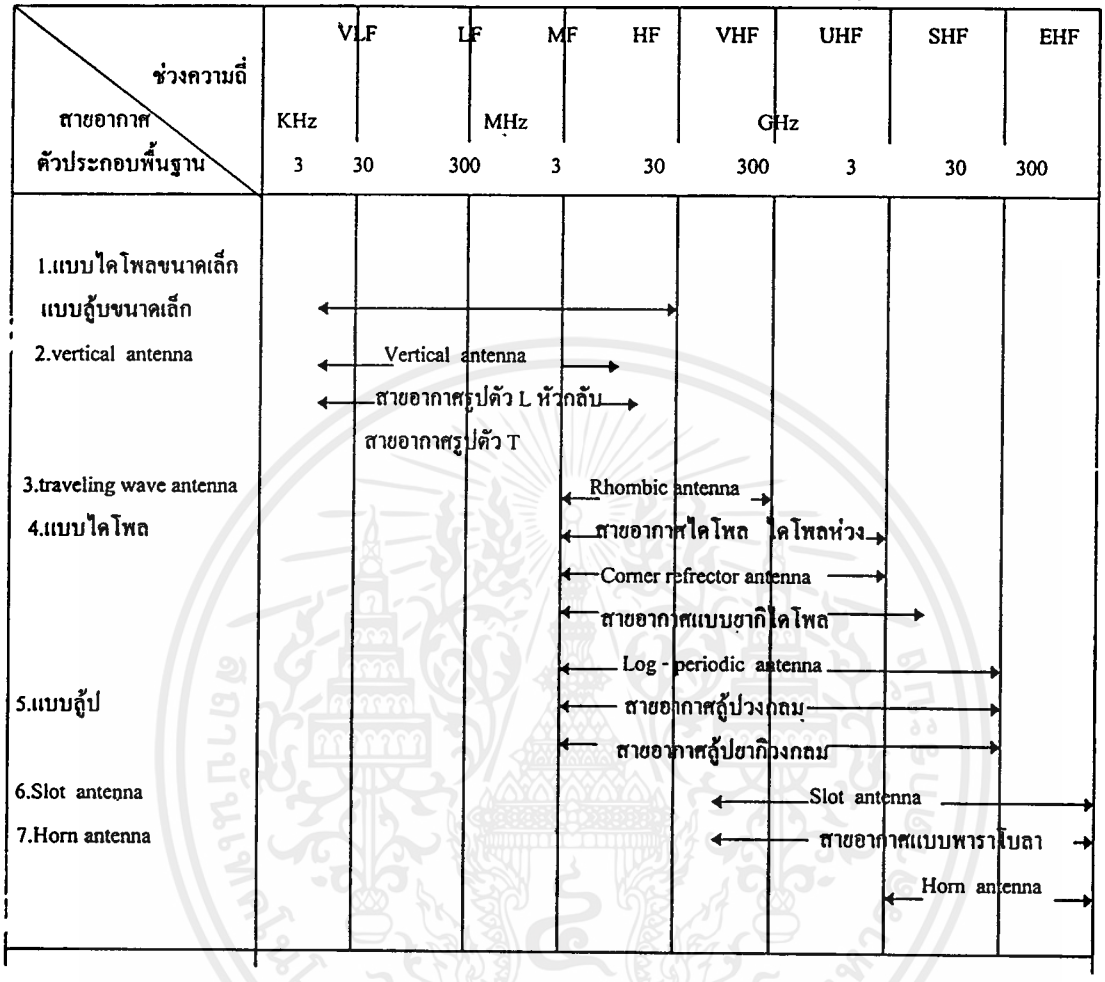
ตารางที่ 1.2 การแบ่งช่วงความถี่

ย่านความถี่	ชื่อเรียก
3-30 KHz	Very low frequency (VLF)
30-300 KHz	Low frequency (LF)
300-3,000 KHz	Medium frequency (MF)
3-30 MHz	High frequency (HF)
30-300 MHz	Very-high frequency (VHF)
300-3,000 MHz	Ultra-high frequency (UHF)
3-30 GHz	Super-high frequency (SHF)
30-300 GHz	Extremely-high frequency (EHF)

นอกจากนี้การแบ่งช่วงความถี่มาตรฐานแต่ละแถบของโลกยังแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เพราะสภาพภูมิประเทศและความเหมาะสมบางประการในการสื่อสาร ดังจะเห็นได้จากการแบ่งช่อง(channel) ของความกถี่วีเอชเอฟและยูเอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.3 ตัวอย่างของสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่ต่าง ๆ



ความถี่ที่ใช้ในการส่งโทรทัศน์ มาตรฐานการส่งโทรทัศน์ตามมาตรฐานสากลมีหลายระบบในแต่ละระบบก็มีใช้กันหลายกลุ่มประเทศแต่ละกลุ่มก็ใช้ทั้งในย่านความถี่ วีเอชเอฟและย่านยูเอชเอฟ โดยแต่ละระบบก็มีจำนวนช่องและความถี่ที่ใช้แตกต่างกัน โดยในระบบวีเอชเอฟมีจำนวนช่องอยู่ประมาณ 12 ช่อง ส่วนในย่านความถี่ยูเอชเอฟ จะมีจำนวนช่องอยู่ประมาณ 83 ช่องระบบใหญ่ๆ ที่ใช้ในการส่งทั่วโลกขณะนี้แบ่งเป็นสองระบบคือในระบบแรกเป็นระบบที่ใช้อักษรย่อว่าเอฟซีซี (FCC) เป็นส่วนหนึ่งของการส่งโทรทัศน์ในระบบย่อยที่เรียกว่าระบบเอ็ม
มาตรฐานสากลของระบบความถี่มาตรฐาน ระบบนี้ใช้กันในประเทศ อเมริกา ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ ฟิลิปปิสส์ ไต้หวัน พม่า กัมพูชา อาร์เจนตินา โบลิเวีย อุรุกวัย จาไมก้า เป็นต้น ส่วนในอีกระบบหนึ่งเป็นระบบซีซีไออาร์ (CCIR) เป็นระบบการส่งทีวีส่วนหนึ่งของระบบบี ที่ใช้ในประเทศแถบยุโรป ตะวันออกกลาง อัฟริกา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งระบบเอฟซีซี (FCC) และระบบซีซีไออาร์ (CCIR) แสดงให้เห็นดังตารางที่ 1.4 ส่วนระบบการส่งทีวีในประเทศไทยใช้ระบบซีซีไออาร์ (CCIR) หรือระบบบี และจำนวนช่องที่ส่งทั้งหมดในขณะนี้มี 6 ช่อง คือ ช่อง 3 ช่อง 5 ช่อง 7 ช่อง 9 ช่อง 11 และ ITV

ตารางที่ 1.4

E EUROPEAN STANDARD (CCIR)	
Band I VHF	
Channel E 2	47 MHz - 54 MHz
Channel E 3	54 MHz - 61 MHz
Channel E 4	61 MHz - 68 MHz
Band III VHF	
Channel E 5	174 MHz - 181 MHz
Channel E 6	181 MHz - 188 MHz
Channel E 7	188 MHz - 195 MHz
Channel E 8	195 MHz - 202 MHz
Channel E 9	202 MHz - 209 MHz
Channel E 10	209 MHz - 216 MHz
Channel E 11	216 MHz - 223 MHz
Channel E 12	223 MHz - 230 MHz
Band IV UHF	
Channel 21	470 MHz - 477 MHz
Channel 22	478 MHz - 485 MHz
Channel 23	486 MHz - 493 MHz
Channel 24	494 MHz - 501 MHz
Channel 25	502 MHz - 509 MHz
Channel 26	510 MHz - 517 MHz
Channel 27	518 MHz - 525 MHz
Channel 28	526 MHz - 533 MHz
Channel 29	534 MHz - 541 MHz
Channel 30	542 MHz - 549 MHz
Channel 31	550 MHz - 557 MHz
Channel 32	558 MHz - 565 MHz
Channel 33	566 MHz - 573 MHz
Channel 34	574 MHz - 581 MHz
Channel 35	582 MHz - 589 MHz
Channel 36	590 MHz - 597 MHz
Channel 37	598 MHz - 605 MHz
Band V UHF	
Channel 38	606 MHz - 613 MHz
Channel 39	614 MHz - 621 MHz
Channel 40	622 MHz - 629 MHz
Channel 41	630 MHz - 637 MHz
Channel 42	638 MHz - 645 MHz
Channel 43	646 MHz - 653 MHz
Channel 44	654 MHz - 661 MHz
Channel 45	662 MHz - 669 MHz
Channel 46	670 MHz - 677 MHz
Channel 47	678 MHz - 685 MHz
Channel 48	686 MHz - 693 MHz
Channel 49	694 MHz - 701 MHz
Channel 50	702 MHz - 709 MHz
Channel 51	710 MHz - 717 MHz
Channel 52	718 MHz - 725 MHz
Channel 53	726 MHz - 733 MHz
Channel 54	734 MHz - 741 MHz
Channel 55	742 MHz - 749 MHz
Channel 56	750 MHz - 757 MHz
Channel 57	758 MHz - 765 MHz
Channel 58	766 MHz - 773 MHz
Channel 59	774 MHz - 781 MHz
Channel 60	782 MHz - 789 MHz
Channel 61	790 MHz - 797 MHz
Channel 62	798 MHz - 805 MHz
Channel 63	806 MHz - 813 MHz
Channel 64	814 MHz - 821 MHz
Channel 65	822 MHz - 829 MHz

A AMERICAN STANDARD (FCC)	
Channel A 2	54 MHz - 60 MHz
Channel A 3	60 MHz - 60 MHz
Channel A 4	66 MHz - 72 MHz
Channel A 5	76 MHz - 82 MHz
Channel A 6	82 MHz - 88 MHz
Channel A 7	174 MHz - 180 MHz
Channel A 8	180 MHz - 186 MHz
Channel A 9	186 MHz - 192 MHz
Channel A 10	192 MHz - 197 MHz
Channel A 11	198 MHz - 204 MHz
Channel A 12	204 MHz - 210 MHz
Channel A 13	210 MHz - 216 MHz
Channel A 14	470 MHz - 476 MHz
Channel A 15	476 MHz - 482 MHz
Channel A 16	482 MHz - 488 MHz
Channel A 17	488 MHz - 494 MHz
Channel A 18	494 MHz - 500 MHz
Channel A 19	500 MHz - 506 MHz
Channel A 20	506 MHz - 512 MHz
Channel A 21	512 MHz - 518 MHz
Channel A 22	518 MHz - 524 MHz
Channel A 23	524 MHz - 530 MHz
Channel A 24	530 MHz - 536 MHz
Channel A 25	536 MHz - 542 MHz
Channel A 26	542 MHz - 548 MHz
Channel A 27	548 MHz - 554 MHz
Channel A 28	554 MHz - 560 MHz
Channel A 29	560 MHz - 566 MHz
Channel A 30	566 MHz - 572 MHz
Channel A 31	572 MHz - 578 MHz
Channel A 32	578 MHz - 584 MHz
Channel A 33	584 MHz - 590 MHz
Channel A 34	590 MHz - 596 MHz
Channel A 35	596 MHz - 602 MHz
Channel A 36	602 MHz - 608 MHz
Channel A 37	608 MHz - 614 MHz
Channel A 38	614 MHz - 620 MHz
Channel A 39	620 MHz - 626 MHz
Channel A 40	626 MHz - 632 MHz
Channel A 41	632 MHz - 638 MHz
Channel A 42	638 MHz - 644 MHz
Channel A 43	644 MHz - 650 MHz
Channel A 44	650 MHz - 656 MHz
Channel A 45	656 MHz - 662 MHz
Channel A 46	662 MHz - 668 MHz
Channel A 47	668 MHz - 674 MHz
Channel A 48	674 MHz - 680 MHz
Channel A 49	680 MHz - 686 MHz
Channel A 50	687 MHz - 692 MHz
Channel A 51	692 MHz - 698 MHz
Channel A 52	698 MHz - 704 MHz
Channel A 53	704 MHz - 710 MHz
Channel A 54	710 MHz - 716 MHz
Channel A 55	716 MHz - 722 MHz
Channel A 56	722 MHz - 725 MHz
Channel A 57	728 MHz - 734 MHz
Channel A 58	734 MHz - 740 MHz
Channel A 59	740 MHz - 746 MHz
Channel A 60	746 MHz - 752 MHz
Channel A 61	752 MHz - 758 MHz
Channel A 62	758 MHz - 764 MHz
Channel A 63	764 MHz - 770 MHz
Channel A 64	770 MHz - 776 MHz
Channel A 65	776 MHz - 782 MHz
Channel A 66	782 MHz - 788 MHz
Channel A 67	788 MHz - 794 MHz
Channel A 68	794 MHz - 800 MHz
Channel A 69	800 MHz - 806 MHz
Channel A 70	806 MHz - 712 MHz
Channel A 71	812 MHz - 818 MHz
Channel A 72	818 MHz - 824 MHz
Channel A 73	824 MHz - 830 MHz
Channel A 74	830 MHz - 834 MHz
Channel A 75	836 MHz - 841 MHz
Channel A 76	842 MHz - 847 MHz
Channel A 77	848 MHz - 853 MHz
Channel A 78	854 MHz - 859 MHz
Channel A 79	860 MHz - 866 MHz
Channel A 80	866 MHz - 872 MHz
Channel A 81	872 MHz - 878 MHz
Channel A 82	878 MHz - 884 MHz
Channel A 83	884 MHz - 890 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
คุณสมบัติของสายอากาศ

2.1 บทนำ

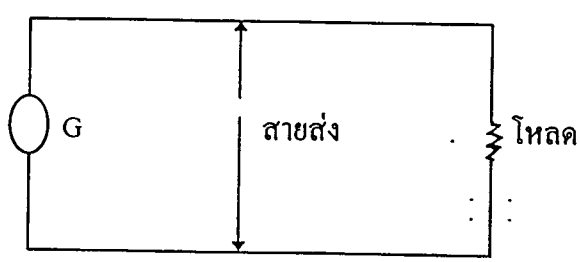
สายอากาศนั่นเป็นส่วนหนึ่งที่จะขาดไม่ได้ในระบบวิทยุสื่อสารที่เกี่ยวข้องกับคลื่นวิทยุและโทรทัศน์ในปัจจุบัน ถ้าจะเปรียบเทียบระบบสายอากาศเข้ากับส่วนประกอบของไฟฟ้ากำลัง ก็เปรียบเสมือนกับสายส่งที่เชื่อมสถานีจ่ายไฟทางด้านต้นทางและสถานีรับทางปลายทาง จะต่างกันก็ตรงที่ว่าไม่ได้จ่ายหรือรับเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านทางสายส่ง แต่จ่ายและรับพลังงานในรูปที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีอากาศเป็นตัวกลางนั้น

เนื่องจากสายอากาศเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าประเภทพาสซีพ (passive) เพราะฉะนั้นการสึกหรอหรือเสื่อมคุณภาพ เมื่อเทียบกับหลอดหรือทรานซิสเตอร์แทบจะไม่มีเลย สาเหตุการสึกหรอจะเนื่องมาจากการผุกร่อนของโลหะ เนื่องจากบรรยากาศที่เป็นกรดหรือด่าง หรือแรงลม เสถียรภาพของการติดตั้ง เพราะฉะนั้นการออกแบบ การติดตั้ง และการป้องกันการผุกร่อนจึงเป็นปัญหาสำคัญในการบำรุงรักษาสายอากาศ

2.2 สายอากาศกับสายส่ง

สายอากาศแบบง่ายที่สุด แบบไดโพลหรือโฟลไดโพล (fold dipole) ถูกนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ ของการสื่อสารทางวิทยุ ไดไพล ชนิด $\lambda/2$ (half wave dipole) เป็นส่วนประกอบขั้นพื้นฐานของระบบสายอากาศ เมื่อมีการเพิ่มชิ้นส่วนบางส่วนจะทำให้การรับหรือส่งสัญญาณไปในทิศทางที่ต้องการได้สายอากาศแบบไดโพลนั้นสามารถเปรียบเทียบได้กับสายส่งชนิดอาร์เอฟ (RF) ที่เป็นวงจรเปิดมีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ โดยต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งต้องรีโซแนนซ์ (resonance) กับเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยจะมีสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ารอบตัวมันมากมายซึ่งความชันของผลตอบสนองของสายอากาศแบบไดโพลคล้ายกับ แอล-ซี (L-C) ของวงจรรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของส่วนที่เป็นไดโพล เช่น ถ้าไดโพลเป็นลวดทองแดงเล็กๆ จะมีคุณสมบัติคล้ายวงจรจูน (tuned circuit) ที่มีค่า Q มากคือ ชันมาก แต่จะมีความกว้างของความถี่ (bandwidth) แคบมาก

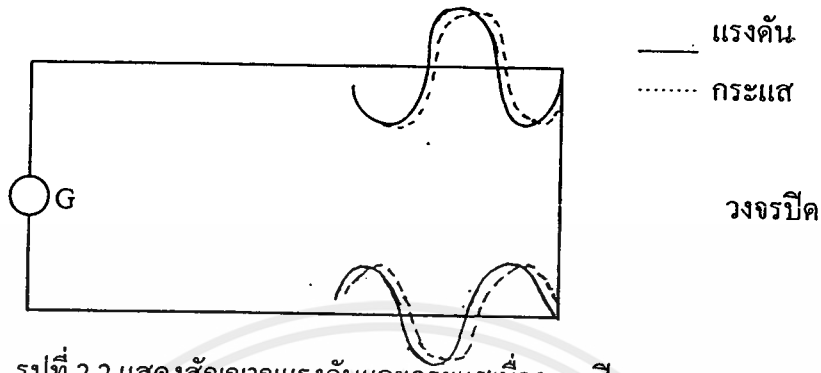
สายอากาศก็เหมือนสายส่งชนิดพิเศษที่ใช้ในการปล่อย หรือรับพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 สายอากาศก็คือโหลดของเครื่องส่ง

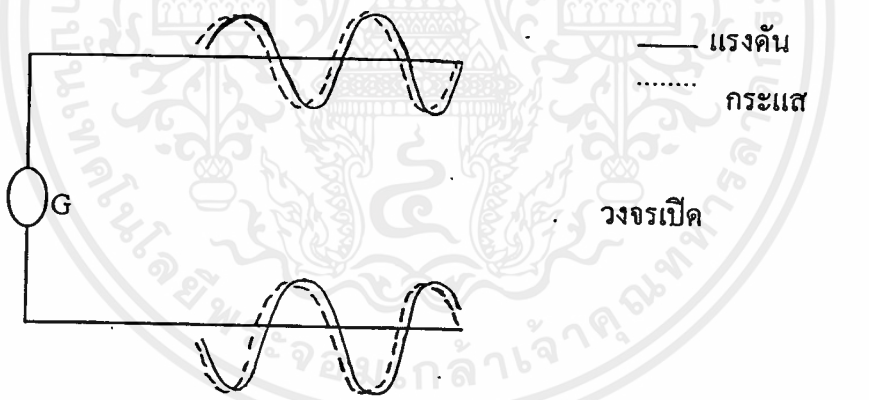
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปรียบเสมือนเครื่องกำเนิดความถี่ของสัญญาณ จะส่งสัญญาณความถี่วิทยุไปยังโหลด (load) โหลดเปรียบเทียบเสมือนสายอากาศซึ่งมีค่าความต้านทานของการแผ่รังสี (radiation resistance) ที่ดีพอเพื่อการส่งพลังงานให้ได้มากที่สุด



รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณแรงกันและกระแสเมื่อวงจรปิด

จากรูป 2.1 ถ้าเอาโหลดออกแล้วทำเป็นวงจรปิด (short circuit) จะได้ดังรูปที่ 2.2 ในขณะสัญญาณเป็นกระแสสลับ เมื่อวงจรเป็นวงจรปิดความต้านทานเท่ากับศูนย์ จะไม่มีการดูดซึมหรือนพลังงานจะสะท้อนออกมาทั้งหมดกลับไปยังแหล่งกำเนิดจะเกิดลูกคลื่นที่ (standing wave) เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา (จากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด) และพลังงานจะสะท้อนกับจากขวาไปซ้าย(จากโหลดไปแหล่งกำเนิด)



รูปที่ 2.3 แสดงสัญญาณและกระแสเมื่อวงจรเปิด

และถ้าเป็นสายส่งแบบวงจรเปิดคือรูปที่ 2.3 เพราะว่าเป็นวงจรเปิดจะมีความต้านทานสูงมากไม่จำกัด จะได้กระแสน้อยที่สุดและแรงดันมากที่สุดที่ปลาย

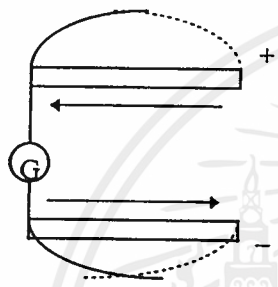
ทั้งสองกรณีที่เกิดขึ้นคือ วงจรเปิดและวงจรปิดเป็นตัวอย่างของการเกิดสแตนดิ้งเวฟ (srtanding wave) บนสายส่ง สายส่งเหล่านี้จะกระจายพลังงานบางส่วนที่อยู่ในสายโดยสายชิลด์ (shield line) จะกระจายพลังงานน้อยกว่าสายที่ไม่ได้ชิลด์ พิจารณาสายที่ไม่ได้ชิลด์สองสายที่ถูกปลายด้วยโหลดที่พอเหมาะ (matching load) คือเท่ากับลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย(characteristic impedance) ปกติของทีวีใช้ทวินลีด (twinlead) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300 โอห์ม และ 75โอห์ม สำหรับสายชิลด์หรือสายโคเอ็กซ์)ถ้ามีการแมทซ์กันพอดีจะทำให้การกระจายพลังงานเพิ่มขึ้นตามเงื่อนไขการทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

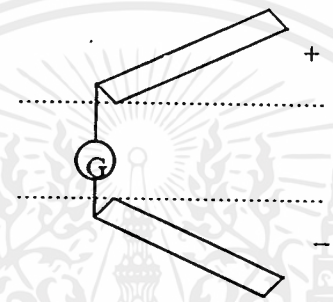
งานคือ เพิ่มเป็นกำลังสองของกระแส เช่น สาย 1 มีกระแส 2 แอมแปร์ และสาย 2 มีกระแส 4 แอมแปร์ สาย 2 จะมีการกระจายรังสีเป็น 4 เท่าของสาย 1

เกิดการเพิ่มเป็นกำลังสองของช่องว่างระหว่างสายที่มีหน่วยเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น เช่น สาย 1 มีช่องว่างระหว่างสายเป็น 0.3λ และสาย 2 มีช่องว่างระหว่างสายเป็น 0.6 λ สาย 2 จะมีการกระจายรังสีเป็น 4 เท่าของสาย 1

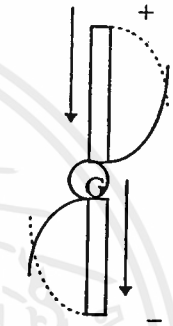
เกิดการเพิ่มเป็นกำลังสองของความยาวคลื่นที่ลดลง เช่น ถ้าสาย 1 ใช้กับคลื่นที่มีความยาวเป็น 6 ซม. และสาย 2ใช้กับคลื่นที่มีความยาว 2 ซม. สาย2จะมีการกระจายคลื่นเป็น 9 เท่าของสาย 1



รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6

รูปที่ 2.7

รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องกำเนิดสัญญาณต่อกับสายส่งยาว λ /4 แต่วางขนานกันและใกล้กัน ในแต่ละเส้นจะสร้างสนามไฟฟ้าซึ่งจะหักล้างซึ่งกันและกัน เพราะฉะนั้นจะไม่มีการกระจายของพลังงาน

รูปที่ 2.5 จะมีการกระจายพลังงานในทิศทางที่เป็นลูกศร ปลายของสายส่งจะอยู่ห่างกันมากกว่ารูปที่ 2.4 พลังงานจะหักล้างกันไม่หมด จะมีพลังงานบางส่วนกระจายออกมาที่ปลายที่เปิดกว้าง

รูปที่ 2.6 จะมีการกระจายพลังงานมากที่สุด เพราะว่าสนามไฟฟ้าทั้ง 2 จะไม่มีทิศทางที่ตรงกันข้ามซึ่งกันและกันเลย ขณะที่ลวดเส้นหนึ่งเป็นบวกอีกเส้นหนึ่งจะเป็นลบ สนามทั้ง 2 จะมีทิศทางอนุกรมกัน จึงจะเป็นปรากฏการณ์ของสายอากาศจริง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ก เป็นการแสดงความ

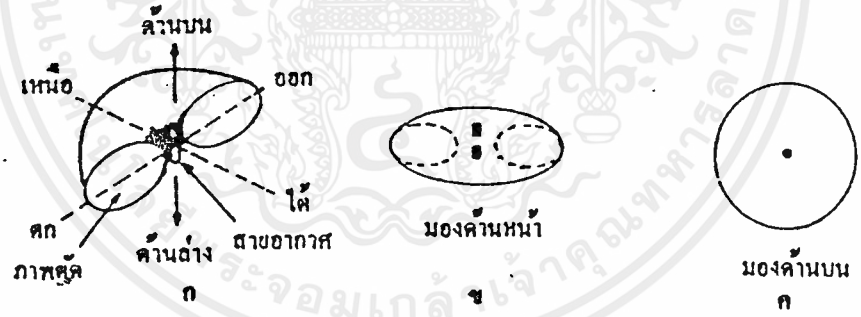
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ รูปที่ 2.7 ข แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

2.3 รูปแบบของการแพร่คลื่นของสายอากาศ

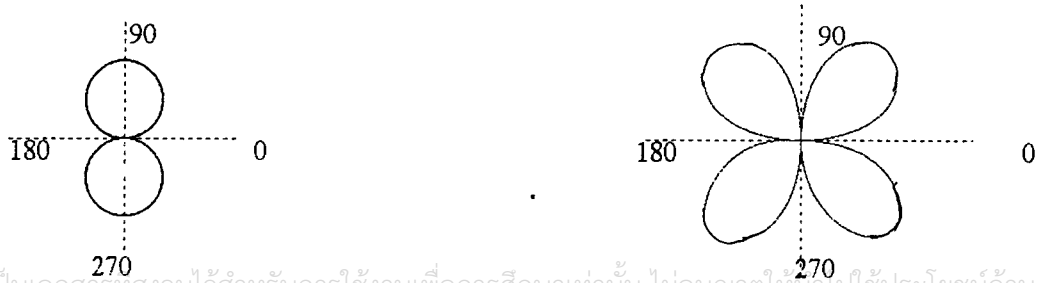
ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าไดโพลเป็นส่วนประกอบขั้นพื้นฐาน ของสายอากาศ ซึ่งจะส่งหรือรับ (สายอากาศของเครื่องส่ง และเครื่องรับจะมีคุณสมบัติเหมือนกัน) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกรอบตัวสายอากาศ ลักษณะรูปร่างของการกระจายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรูปร่างต่างๆ กัน เรียก *รูปแบบหรือเพทเทอร์น* ซึ่งจะเป็นตัวกำหนด *ค่าไดเรคติวิตี้* (directivity) คือ *การกระจายพลังงานไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าในทิศทางอื่นๆ* (หมายถึงไม่ได้กระจายออกรอบตัวเท่ากัน) ซึ่งมีความสำคัญในการรับหรือส่งในทิศทางเดียวและป้องกันการรบกวนจากสถานีอื่นๆ

การหารูปร่างของเพทเทอร์นนั้นหาได้โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ หรือการบวกเวคเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ รูปแบบของการกระจายคลื่นของสายอากาศถ้าพลังงานถูกแผ่กระจายไปทั่วๆในทุกทิศทาง รูปแบบของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศถ้าพลังงานถูกแผ่กระจายไปทั่วๆ ในทุกทิศทาง รูปแบบของการแผ่กระจายจะเป็นรูปทรงกลมซึ่งมีสายอากาศแบบไดโพลอยู่ตรงจุดศูนย์กลางดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงรูปแบบของสายอากาศ $\lambda/2$ ซึ่งรีโซแนนซ์กับความถี่หนึ่งๆ



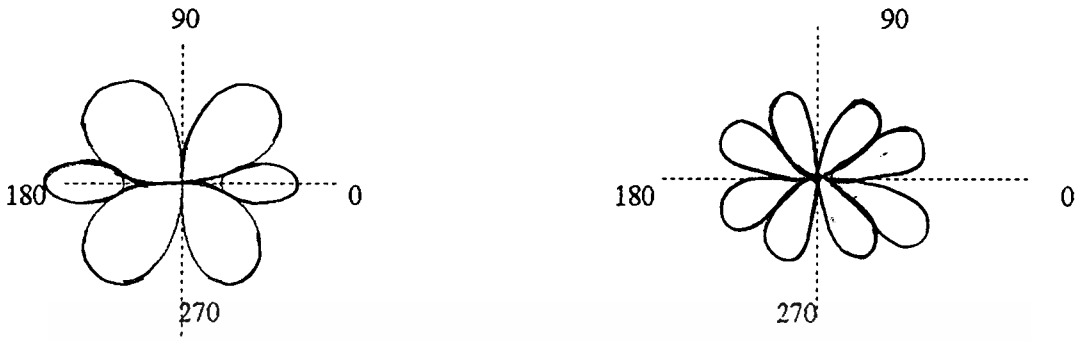
รูปที่ 2.8

ความเข้มของการกระจายพลังงานจะลดลง ในขณะที่ระยะทางจากสายอากาศเพิ่มขึ้น รูปแบบของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ โดยทั่วไปจะเป็นขนมโดนัท ซึ่งไดเรคติวิตี้และรูปแบบจะแปรกับความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงว่าไดโพลซึ่งมีความยาวทางฟิสิกส์(ความยาวจริงๆ)เท่ากันแต่ทำงานที่ความถี่ต่างๆกัน จะสังเกตเห็นว่า รูปแบบที่ได้จะแตกต่างกันด้วย



ก.ความยาว ($\lambda/2$) ข.ทำงานที่ความถี่เป็น 2 เท่า ของรูป ก.มี4โลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



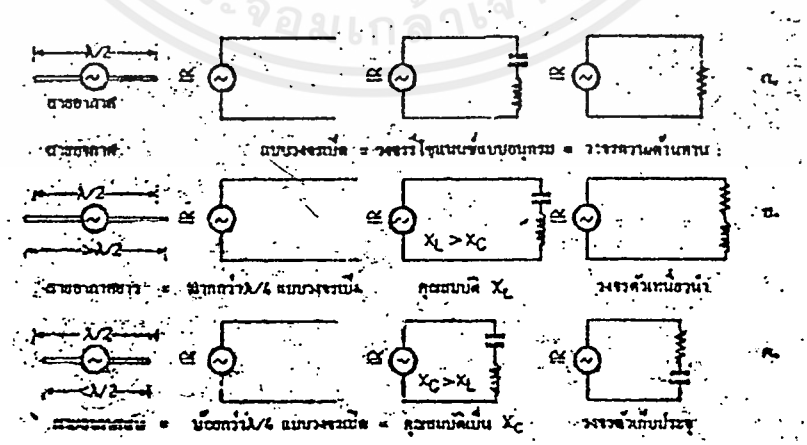
ค.ทำงานที่ความถี่เป็น 3 เท่าของรูป ก.มี 8โลบ ง.ทำงานที่ความถี่เป็น 4 เท่าของรูป ก.มี8โลบ

รูปที่ 2.9

โดยทั่วไปที่ความยาวของสายอากาศตัวหนึ่ง เมื่อให้ทำงานที่ความถี่มีค่ามากขึ้น จำนวนโลบ(loop) จะมากขึ้นด้วย ซึ่งไม่เป็นผลดีนักในแง่การส่งหรือการรับ เพราะกำลังจะได้น้องลง แต่ดีในแง่การติดตั้งถ้าเครื่องรับดีพอ

นอกจากนี้เพื่อปรับปรุงให้รูปแบบมีรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ต้องการก็จะมีการเพิ่ม ส่วนประ กอบอื่นๆ รวมกับไดโพล เช่น ไดเรคเตอร์หรือตัวชี้นำ รีเฟรคเตอร์หรือตัวสะท้อน ซึ่งจะกล่าวในตอนต่อๆ ไป นอกจากนี้รูปแบบของไดโพลชนิดเดียวกันจะแตกต่างกันถ้าต่อ (feed) สายส่งที่ตำแหน่งต่างๆ กัน เช่นตรงปลายกับตรงกลาง

2.4 ความยาวของสายอากาศกับความถี่ ถ้าความยาวของสายอากาศพอดีก็จะเกิดวงจรรีโซแนนท์ขึ้น ซึ่งจะเป็นภาวะพอเหมาะที่จะส่งหรือรับพลังงานได้ดีที่สุด ซึ่งจะสามารถแทนสายอากาศด้วยโหลดที่เป็นความต้านทานล้วน (pure resistance) ดังแสดงในรูป 2.10 ก.



รูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 ข. แสดงสายอากาศที่มีความยาวยาวกว่าที่เหมาะสมเล็กน้อย ก็จะแทนวงจรด้วยความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ และรูป 2.10 ค. ถ้าสั้นกว่าจะแทนด้วยตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

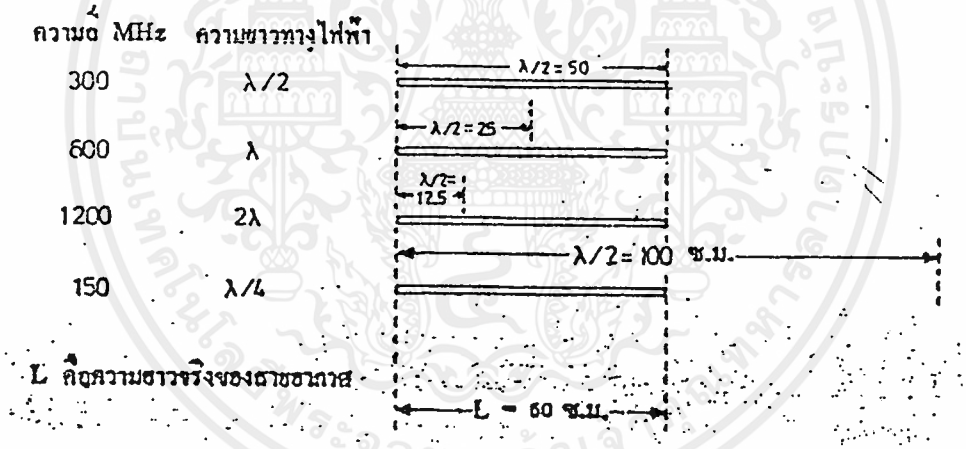
สายอากาศที่ความยาวต่างๆ กันจะนำไปใช้ที่ความถี่แตกต่างกัน สายอากาศแบบ λ/2 จะนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น(λ) สำหรับค่าความถี่ที่ใช้งานค่าหนึ่งเท่านั้น เมื่อค่า *ความถี่ที่ใช้งาน (operating frequency) เปลี่ยนไป ความยาวทางฟิสิกส์ (ความยาวจริงๆ - physical length) ของสายอากาศจะไม่เปลี่ยน แต่ความยาวทางไฟฟ้า (electrical length) จะเปลี่ยน* จะสามารถเห็นได้จากตัวอย่างดังรูปที่ 2.11 ที่ความถี่ใช้งาน 300MHz สายอากาศแบบ λ /2 (จะยาวเท่ากับ 50 ซม.) คือรูป 2.11ก. ซึ่งสายอากาศตัวเดียวกันจะนำไปใช้งานที่ความถี่แตกต่างกัน คือ รูป 2.11 ข. ความถี่เท่ากับ 600mhz λ /2 เท่ากับ 25 ซ (พิจารณาจากสูตร V= fλ เมื่อคิดว่าการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศเท่ากับการเคลื่อนที่ของคลื่นโลหะซึ่งทางปฏิบัติแตกต่างกัน

เมื่อ V เท่ากับความเร็วของคลื่นในอากาศ 3×10^8 เมตร/วินาที

f เป็นความถี่ที่ใช้งาน

λ เป็นความยาวคลื่น

ความยาวของสายอากาศที่ความถี่นี้คือ 2λ



รูปที่ 2.11 แสดงความยาวจริงของสายกับความยาวทางไฟฟ้า

จะแสดงว่าเมื่อความยาวทางฟิสิกส์คงที่ ความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศจะเปลี่ยนตามความถี่และก็เป็นไปได้ที่จะตัดความยาวของสายอากาศเป็น λ /2 ที่ความถี่ที่ใช้งานค่าใดค่าหนึ่ง และทำนองเดียวกันถ้าให้ความยาวทางไฟฟ้าคงที่จะทำให้ความยาวจริงๆ เปลี่ยนไปโดยการตัดออกหรือต่อเข้าเช่นถ้าให้เป็นสายอากาศแบบ λ /2 ที่ความถี่ 300 MHz ดังนั้นความยาวเท่ากับ 50 ซม. ถ้าที่ความถี่ 600 Mhz เพราะฉะนั้นเท่ากับ 25 ซม. ก็ตัดออกเป็นต้น ที่ความถี่แตกต่างกันหรือความถี่เดียวกันก็จะได้ความยาวทางไฟฟ้าแตกต่างกัน (ในขณะที่ความยาวทางฟิสิกส์เท่ากัน) ก็จะได้รูปแบบดังรูปที่ 2.9 ก. ถึง 2.9 ง. ซึ่งบางครั้งเราไม่ต้องการรูปแบบดังกล่าวข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
038940

2.5 ความถี่และความยาวคลื่น

ความถี่และความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์ผกผันกันโดยมีความเร็วเป็นตัวกำหนดความเร็วที่คลื่นวิทยุเคลื่อนที่ผ่านอากาศขึ้นกับคุณสมบัติของอากาศและความเร็วที่คลื่นวิทยุเคลื่อนไปตามสายส่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายส่งด้วย

อากาศมีตัวคงที่ 2 อย่างคือ ค่าคงที่ไดอีเลคตริค (Dielectric constant) ซึ่งเป็น 8.85 ไมโครฟารัดต่อโวลท์ และค่าคงที่เพอมีอะบิลิตี้ (permeabilbty) เป็น 1.256 ไมโครเฮนรี่/โวลท์จะได้ความเร็วของการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศเป็น $3.x10^8$ เมตร/วินาที หรือ 186,000 ไมล์/วินาที เพราะฉะนั้นความถี่ของคลื่นวิทยุและความยาวของโลหะที่นำมาทำเป็นสายอากาศก็อาจจะคำนวณโดยสูตร $V=f\lambda$ ได้ สำหรับสายอากาศแบบไดโพลแบบ $\lambda/2$ ที่ความถี่ปานกลางและความถี่สูงอาจคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ความยาวของสายอากาศ(ฟุต)} = \frac{492}{\text{ความถี่ (MHz)}}$$

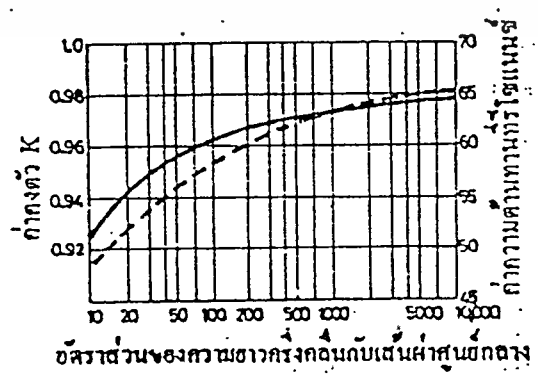
แต่ความยาวจริงของสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ จะไม่เท่ากับ $\lambda/2$ ในอากาศเลยทีเดียว แต่ขึ้นกับความหนาของตัวนำที่นำมาทำเป็นสายอากาศและชนิดของตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.12 ซึ่งเค (K) เป็นค่าที่ต้องนำมาคูณกับ $\lambda/2$ ในอากาศ (frec space) เพื่อจะให้ได้รีโซแนนซ์ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวนำจะไปไม่ได้โดยสะดวก (จะไปได้ช้ากว่า) เพราะค่าความต้านทานของโลหะ(radiation resistance) ในทางปฏิบัติ จึงทำให้สั้นกว่า $\lambda/2$ ในอากาศประมาณ 6%

ที่ความถี่ 3.5 MHz - 30MHz

$$\text{ความยาวของสายอากาศ } \lambda/2 \text{ (ฟุต)} = \frac{492x0.95}{\text{ความถี่(MHz)}}$$

ที่ความถี่มากกว่า

$$\text{ความยาวของสายอากาศ } \lambda/2 \text{ (ฟุต)} = \frac{492xK}{\text{ความถี่ (MHz)}}$$



รูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 อัตราขยายและสภาพการชี้นำของสายอากาศ

ถ้าเรามีสัญญาณที่มีกำลัง 0.00001mW หลังจากส่งสัญญาณนี้ผ่านสายที่ยาว จนเกิดการสูญเสียในสายไป่ เหลืออยู่ที่ด้านเอาท์พุทของสายเพียง 1/10 ของสัญญาณเดิม เราอาจกล่าวได้ว่ากำลังสูญเสียในสายมีค่า -10dB แต่ถ้าสมมติว่าถ้านำสัญญาณนี้ป้อนเข้าเครื่องขยายที่มีอัตราขยาย 10,000,000,000 เท่า เราจะพบว่าสิ่งหนึ่งที่เราจะคำนวณเอาท์พุทของเครื่องขยายทำได้โดยการใช้ตัวเลขมาคิดถึงเป็นจำนวนมากถึงเป็น 10 หลัก แต่ถ้าเราคิดเป็น dB เราจะเห็นว่าอัตราขยายของเครื่องขยายมีเพียง 100dB นั่นคือสัญญาณอินพุทมีค่า 0.000001mW ซึ่งถ้าเทียบสัญญาณ 1mW เราจะพบว่าสัญญาณนี้มีขนาด-60dB เทียบกับสัญญาณ 1mW เมื่อเพิ่มขึ้นด้านอัตราขยาย 100dB นั่นคือสัญญาณเอาท์พุทมีค่า 40 dB (เทียบกับสัญญาณ 1mW) ครั้นหาขนาดสัญญาณเอาท์พุทเราก็ตอบได้ว่ามีค่าเท่ากับ 10W จะเห็นว่าการคิดแบบ dB ทำให้เปลี่ยนการคูณหารมาเป็นบวกลบตามธรรมดา แต่ก็มีข้อเสียที่ต้องแปลงกลับ เป็นหน่วยธรรมดาซึ่งก็ไม่ยากนัก (จะดูจากตารางก็ได้)

ในการวัดกำลัง เราวัดได้โดยใช้มิเตอร์วัดแรงดันที่โหลดที่รู้ค่าความต้านทานแล้วคำนวณกำลังได้ว่า $P = \frac{V^2}{R}$ ถ้าคิดเป็นเดซิเบลจะได้ว่า

$$dB = 10\log(\frac{V_2^2}{R_2} / \frac{V_1^2}{R_1})$$

เมื่อ R_2 เป็นความต้านทานทางด้านเอาท์พุทซึ่งเป็นโหลด

R_2 เป็นความต้านทานทางอินพุทของเครื่องขยาย R_1 ซึ่งเป็นโหลดของแหล่งจ่ายสัญญาณ

ถ้า R_2 เท่ากับ R_1 จะได้ว่า

$$dB = 10\log(\frac{V_2^2}{R_1^2})$$

$$= 10\log(\frac{V}{V_1})$$

$$= 20\log(\frac{V_2}{V_1})$$

dB เป็นหน่วยที่วัดอัตราขยายของสายอากาศโดยเทียบกับสายอากาศชนิดที่เรียกกันว่าสายอากาศไอโซโทรปิค (isothopic antenna) หรือพูดกันง่ายๆ คือ เป็นจุดของต้นกำเนิดสัญญาณแล้วแบ่งออกทุกทิศทางนั่นเอง หรืออาจกล่าวได้ว่า สายอากาศชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่ให้ความเข้มของคลื่นสัญญาณ ณ จุดที่ห่างจากสายมีค่าเท่ากัน จะมีความเข้มของคลื่นสัญญาณเท่ากัน

บางคนอาจจะสงสัยได้ว่าสายอากาศจะมีอัตราขยายได้อย่างไร ในเมื่อตัวสายอากาศนั้นเป็นอุปกรณ์ชนิดพาสซีพ (passive) คำอธิบายง่ายๆ ก็คืออัตราขยายของสายอากาศที่ได้นั้นได้จากการที่เราเพิ่มความเข้มของคลื่นวิทยุเฉพาะทิศทางที่เราต้องการเท่านั้น ส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้เราได้มาจากส่วนที่เราไม่ต้องการให้ความเข้มของคลื่นวิทยุตกในทิศทางนั้น การยกตัวอย่างเกี่ยวกับทางด้านสัญญาณนี้ก็เห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

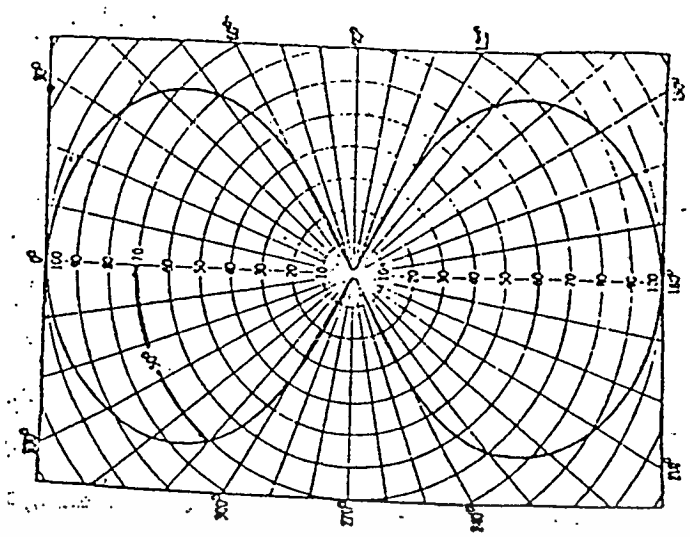
ยากแต่ถ้าทางด้านแสงซึ่งแท้จริงแล้วแสงก็เป็นคลื่นวิทยุชนิดหนึ่ง เมื่อแสงสว่างกระทบกับ วัตถุทำให้จักษุประสาทของคนเราเกิดความรู้สึกว่าสว่างหรือมืดอย่างเห็นได้ชัด

ถ้าเปรียบเทียบสายอากาศชนิดไอโซโทรปิคกับหลอดไฟกลม ซึ่งให้ความสว่างเท่าๆกันทุกๆ ทิศทางเท่ากับของหลอดไฟ เราอาจจะออกแบบให้หลอดไฟสว่างเฉพาะจุดที่เราต้องการให้มันสว่างได้ เช่น การใช้โคมหลอดไฟยาว ซึ่งจะให้แสงสว่างในด้านความยาวมากกว่าทางด้านข้าง สายอากาศมีตัวชี้นำ (director) ก็เสมือนเราใส่เลนส์นูนไว้ข้างหน้าหลอดไฟซึ่งก็จะพยายามบีบแสงให้เป็นลำพุ่งออกไป ทิศทางที่ลำแสงบีบออกไปนั้นเราสามารถจะทำให้เกิดความเข้มของแสงสว่างได้มากขึ้น ถ้าเราใส่เลนส์ที่เหมาะและถูกต้อง *สายอากาศที่เราใส่ตัวสะท้อน (reflecter)* ก็เหมือนกับเราใส่กระจกเว้าไว้สะท้อนแสง ส่วนที่เราไม่ใช้ในด้านหลังของหลอดไฟให้สะท้อนออกไปในด้านหน้า ทำให้ความสว่างมากขึ้น ผลที่เราใส่ตัวชี้นำหรือตัวสะท้อนก็จะทำให้เราเพิ่มความเข้มของคลื่นวิทยุ ณ ทิศทางที่เราต้องการมากขึ้น แต่มุมของการส่งก็จะแคบลงตามลำดับ ถ้าเราพยายามที่จะเพิ่มอัตราขยายออกไปในทางทฤษฎีแล้วสายอากาศของเครื่องรับและของเครื่องส่งไม่มีอะไรผิดแปลกจากกัน

บางคนนิยมที่จะเทียบอัตราขยายของสายอากาศกับไดโพล แทนที่จะเปรียบเทียบกับต้นกำเนิดชนิดไอโซโทรปิค เนื่องจากว่าไดโพลเป็นสายอากาศชนิดง่ายที่สุดที่เราสามารถสร้างและทดสอบคุณสมบัติของมันได้ในทางปฏิบัติ

สภาพการชี้นำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศ จะเป็นตัวบอกว่าสายอากาศจะรับสัญญาณได้ดีในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรืออาจเรียกว่ารูปแบบของสภาพการชี้นำ ถึงแม้ว่าสายอากาศแบบยูนิไดเรคชันจะรับสัญญาณได้ดีในทิศทางหนึ่งทิศทางใดโดยเฉพาะของมัน แต่มันก็สามารถรับสัญญาณจากทิศทางอื่นได้ด้วย แต่ความไวอาจจะน้อยกว่าทิศทางของรูปแบบ สภาพการชี้นำจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของความไวที่ทุกๆ ทิศทางโดยปกติจะแสดงกราฟในเชิงมุม รูปร่างของโลบของ รูปแบบในเชิงมุม (polar pattern) จะแสดงคุณสมบัติสภาพการชี้นำของสายอากาศดังแสดงในรูป 2.13ซึ่งแสดงรูปแบบของสายอากาศแบบไดโพล $\lambda/2$ ในเทอมของแรงดันที่ตำแหน่งๆจะเป็น แบบสองทิศทาง (bidirectional) มีโลบ (lobe) ที่มีขนาดเท่ากันทั้งด้านหน้าและด้านหลัง 2 ทิศทางทิศทางที่ความไวมีค่ามากที่สุดอยู่ในเส้นแนวตั้งฉากกับความยาวของสายอากาศ ซึ่งรูปแบบนี้จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ คือ ซีกแนวตั้งฉากกับกระดาษซึ่งจะมีรูปร่างเหมือนกันโดยการหมุนแนวระนาบของกระดาษรอบตัวมันเอง สังเกตว่าที่จุด 70.7 % บนเส้นศูนย์องศาเรียกจุด ครึ่งกำลังงาน (half power point) และจะเป็นตำแหน่งที่มีความกว้างของโลบมากที่สุด มุมที่แสดงจุดนี้เรียก ความกว้างของลำคลื่นเชิงมุม (beamwidth angle) จะเป็นตัวบอกคุณสมบัติเปรียบเทียบสภาพชี้นำของสายอากาศชนิดต่างๆ จากโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบ $\lambda/2$ ไดโพมาตรฐาน

และจากรูปนี้ความกว้างของลำคลื่นเชิงมุม (beamwidth angle) เป็น 50 องศา ในทางทฤษฎีสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่สมบูรณ์จะมีความกว้างเชิงมุมเป็น 10 องศา ในการออกแบบจะมีค่ามุมนี้มากหรือน้อยกว่า 18 องศาเล็กน้อย นอกจากทิศทางที่มีค่ามากที่สุดแล้วยังมีทิศทางที่รับได้น้อยที่สุดเรียกว่า *นัลโลบ (null lobe)* ซึ่งจะอยู่ระหว่างทิศทางที่การรับดีที่สุดทั้งสองโลบ ที่ตำแหน่งนี้สายอากาศแบบไดโพลจะรับสัญญาณไม่ได้เลย ถึงแม้จะรีโซแนนซ์กับความถี่ของการส่ง

ปกติรูปแบบการชี้ทิศในสามมิติของสายอากาศ จะเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบโอโซโทรปิค (isotropic antenna) ซึ่งเป็นแบบอุดมคติทางทฤษฎีที่จะกระจายพลังงานในทุกทิศทางด้วยความเข้มของคลื่นเท่ากัน (omnidirection) ธรรมดาสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ชนิดไดโพลจะมีอัตราขยายในทุกทิศทางเป็น 2.15dB เมื่อเทียบกับไอโซโทรปิคซึ่งมีอัตราขยาย 0dB คำว่าอัตราขยายของสายอากาศจะคล้ายคลึงกับสภาพการชี้นำ เพราะว่าสภาพการชี้นำหาจากรูปร่างของรูปแบบซึ่งไม่คิดกำลังที่สูญเสียไปคือเป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพ 100% เพราะฉะนั้นจะได้สูตรอัตราขยาย $\text{Gain} = K\frac{P}{Pav}$ คืออัตราขยายเป็น K เท่า เมื่อ P เป็นความเข้มข้นทางพลังงานที่จุดที่รูปแบบมีค่ามากที่สุดบนผิวของทรงกลม (คิด space directivity) และ P_{av} เป็นความหนาแน่นของกำลังเฉลี่ย K เป็นค่าแสดงประสิทธิภาพมีค่ามากที่สุดเป็น 1 , K ได้จากการแพร่พลังงานหารกับพลังงานอินพุท ถ้าสายอากาศมีประสิทธิภาพสูงคือ 100% ค่าอัตราขยายก็จะเท่ากับค่าสภาพการชี้นำ อัตราขยายของสายอากาศในทางปฏิบัติวัดจากกำลังของสัญญาณที่วัดได้จากสายอากาศที่ต้องการหาอัตราขยายเปรียบเทียบกับกำลังที่เหนี่ยวนำจากสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ไดโพล ที่มีขนาดรีโซแนนซ์ (ซึ่งทางทฤษฎีเทียบกับไอโซโทรปิค ถ้าจะหาอัตราขยายสายอากาศที่ เทียบกับไอโซโทรปิคก็บอกค่า 2.15dB กับค่าที่วัดได้เทียบกับ ไดโพล $\lambda/2$)สำหรับความถี่นั้นๆของสัญญาณ โดยวัดที่ระยะห่างเท่ากัน กำลังงานอินพุทเท่ากัน เช่น สายอากาศมีอัตราขยายกำลัง (power gain) เท่ากับ 10 หมายความว่าสายอากาศที่ต้องการเป็น 10 เท่าของไดโพลมาตรฐาน นอกจากนี้ในการทดลองมักจะวัดเป็นความเข้มสนามสัมพันธ์ (relative field strength)

ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับกำลังงานคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{P_1}{P_2}$$

เมื่อ F คือความเข้มสนามสัมพัทธ์ ถ้าจะเปลี่ยนเป็นกำลังงานเพื่อหาอัตราขยายต่อไปก็ต้องยกกำลังสอง

ตารางที่ 2.1

แสดงการเปลี่ยนอัตราส่วนกำลังงานเป็นเดซิเบล

	จุดทศนิยมที่เพิ่มขึ้น									
อัตราส่วน	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
1	0.00	0.41	0.79	1.14	1.46	1.76	2.04	2.30	2.55	2.79
2	3.01	3.22	3.42	3.62	3.80	3.98	4.15	4.31	4.47	4.62
3	4.77	4.91	5.05	5.19	5.32	5.44	5.56	5.68	5.80	5.91
4	6.02	6.13	6.28	6.34	6.44	6.53	6.63	6.72	6.81	6.90
5	6.99	7.08	7.16	7.24	7.32	7.40	7.48	7.56	7.63	7.71
6	7.78	7.85	7.92	7.98	8.06	8.13	8.20	8.26	8.33	8.39
7	8.45	8.51	8.57	8.63	8.69	8.75	8.81	8.86	8.92	8.98
8	9.03	9.08	9.14	9.19	9.24	9.29	9.34	9.40	9.44	9.49
9	9.54	9.59	9.64	9.68	9.73	9.78	9.82	9.87	9.91	9.96
10	10.00	10.04	10.09	10.09	10.13	10.17	10.21	10.25	10.29	10.37
× 10	+ 10									
× 100	+ 20									
× 1000	+ 30									
× 100,000	+ 50									

ตารางที่ 2.2

แสดงการเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันเป็นเดซิเบล

	จุดทศนิยมที่เพิ่มขึ้น									
อัตราส่วน	.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.00	0.88	1.58	2.28	2.92	23.52	4.08	4.61	5.11	5.58
2	6.02	6.44	6.85	7.28	7.60	7.96	8.3	8.63	8.94	9.25
3	9.54	9.83	10.10	10.37	10.63	10.88	11.13	11.36	11.60	10.82
4	12.04	12.26	12.46	12.67	12.87	13.06	13.26	13.44	13.62	13.80
5	13.96	14.15	14.32	14.49	14.65	14.81	14.96	15.12	15.27	15.42
6	15.56	15.71	15.85	25.99	16.12	16.26	16.39	16.52	16.65	16.78
7	16.90	17.03	17.51	17.27	17.38	17.5	17.62	17.73	17.84	17.95
8	18.06	18.17	18.28	18.38	18.49	18.59	18.69	18.79	18.89	18.99
9	19.08	19.18	19.28	19.37	19.46	19.55	19.65	19.74	19.82	19.91
10	20.00	20.09	20.17	20.26	20.34	20.42	20.50	20.59	20.67	20.75
× 10	+ 20									
× 100	+ 30									
× 1,000	+ 60									
× 100,000	+ 100									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความสะดวกในการหาอัตราขยายจะใช้หน่วยเป็น dB (เดซิเบล) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับกำลังงาน ดังนี้คือ

$$dB = 10\log\frac{P_1}{P_2}$$

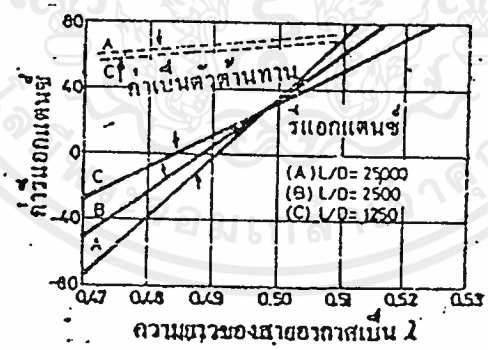
$$= 20\log\frac{E_1}{E_1}$$

ตารางที่ 2-1 จะแสดงการเปลี่ยนจากกำลังงานและอัตราส่วนของแรงดันเป็น dB

อัตราขยายของสายอากาศยังแบ่งออกเป็นอัตราขยายของการส่ง(transmitting gain) โดยเปรียบเทียบกับไดโพลที่เป็นโหลดมีค่าเท่ากัน (ของทีวี 300 โอห์ม) กำลังเท่ากัน ระยะห่างเท่ากันและอัตราขยายของการรับ (receiving gain) โดยเทียบกับไดโพลมาตรฐานที่ความถี่ใดๆ

2.7 ความกว้างทางความถี่

สายอากาศที่มีค่า Q สูง จะทำให้การใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่มีความกว้างทางความถี่แคบ คุณสมบัติของ Q ที่ค่ามากๆจะมีคุณสมบัติเหมือนวงจรจูน (tuned circuit) ซึ่งมีความต้านทานภายในน้อย ความกว้างทางความถี่เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศสามารถรับสัญญาณได้ดี สายอากาศที่มีความกว้างทางความถี่แคบเรียกสายอากาศชนิดแถบแคบ (narrow band antenna) ปกติในการออกแบบสายอากาศเพื่อการใช้งานจะออกแบบให้ทำงานได้ในช่วงความถี่กว้าง คือมีค่า Q น้อยๆหรือเรียกว่าสายอากาศแถบกว้าง (broad band antenna) วิธีที่ง่ายที่สุดในการทำให้ความกว้างทางความถี่(bandwidth) กว้างขึ้นของสายอากาศแบบไดโพล $\lambda/2$ อันเดียวคือเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางของโลหะ ซึ่ง



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ของความยาวของสายอากาศกับค่ารีแอกแตนซ์

จะทำให้อัตราส่วนของความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลางเปลี่ยนไป จะทำให้ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์(reactance) ที่จุดศูนย์กลางของการใส่สายส่งเปลี่ยนไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.14

และความถี่ของการใช้งานก็จะเปลี่ยนไปจากความถี่รีโซแนนซ์เล็กน้อยเพื่อให้เกิดภาวะรีโซแนนซ์เช่นเดิม ต้องตัดสายอากาศให้สั้นลง

เมื่อไดโพล $\lambda/2$ ยาวหรือสั้นเกินไปที่รีโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ ที่จุดส่งสัญญาณจะแตกต่างไปในการแมทช์(match) กับสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งอิมพีแดนซ์จะสูงกว่าคุณสมบัติของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ เกิดไม่แมทช์ในทางปฏิบัติแล้วจะหาได้ โดยวัดอัตราส่วนของคลื่นที่ส่งกับคลื่นที่สะท้อนในสายส่ง

นอกจากนี้เราจะสังเกตได้ง่ายถ้ารับสัญญาณไม่ได้เลยที่ความถี่นั้นๆแสดงว่าสายอากาศยาวหรือสั้นเกินไป สายอากาศแบบยากิตัวแพร่สัญญาณหรือตัวขับจะรีโซแนนซ์กับความถี่และ แมทช์ (match) กับสายส่งได้รีเฟรคเตอร์จะต้องยาวกว่า ตัวแพร่สัญญาณ (radiator) (ไดโพล)ที่รีโซแนนซ์ที่ความถี่นั้น ซึ่งจะทำตัวเหมือนตัวเก็บประจุในการสะท้อนคลื่น

จะสรุปได้ว่า ความกว้างทางความถี่ (bandwidth) ขึ้นกับ ค่าความต้านทานการแพร่ (radiation resistance) และรูปร่างของโลหะคือเส้นผ่าศูนย์กลาง ความกว้างทางความถี่ (band widthจะเพิ่มขึ้น ถ้าค่าความต้านทานการแพร่ (radiation resistance) และเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3
อาร์เรย์

3.1บทนำ

ที่ผ่านมาเราได้ศึกษาคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวซึ่งมีแพทเทอร์นค่อนข้างกว้างและเกนต่ำ แต่ในงานบางอย่างต้องการใช้สายอากาศที่มีเกนสูง การเพิ่มเกนนี้อาจทำได้โดยเพิ่มขนาดของสายอากาศ

แม้ว่าการเพิ่มขนาดของสายอากาศเดี่ยวจะทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้นก็ตามแต่ก็มีวิธีอื่นที่จะเพิ่มขนาดของสายอาศ โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศที่นำมาทำเป็นเอเลเมนท์(Element) ซึ่งทำได้โดยจัดเอเลเมนท์ที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง ซึ่งเรียกว่าอาร์เรย์ (Array) ปกติแล้วจะเลือกให้แต่ละเอเลเมนท์ของอาร์เรย์เหมือนกัน

เมื่อตัดการคัปปลิง (Coupling) ระหว่างเอเลเมนท์ทิ้ง จะหาสนามลัพธ์ของอาร์เรย์ได้โดยบวกเวคเตอร์ของสนามที่แพร่กระจายจากแต่ละเอเลเมนท์ สนามจะรวมกันในทิศทางที่ต้องการติดต่อสื่อสาร และหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการติดต่อสื่อสาร

มีอยู่ 5 วิธีด้วยกันที่จะควบคุมแพทเทอร์นของสายอากาศ ซึ่งทำได้โดยควบคุมสิ่งต่างๆต่อไปนี้ คือ

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

และ $$\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta_n+\beta)\right] = 0-\frac{1}{2}(kd\cos\theta_n+\beta) = \pm\left(\frac{2n+1}{2\pi d}\right)\pi$$

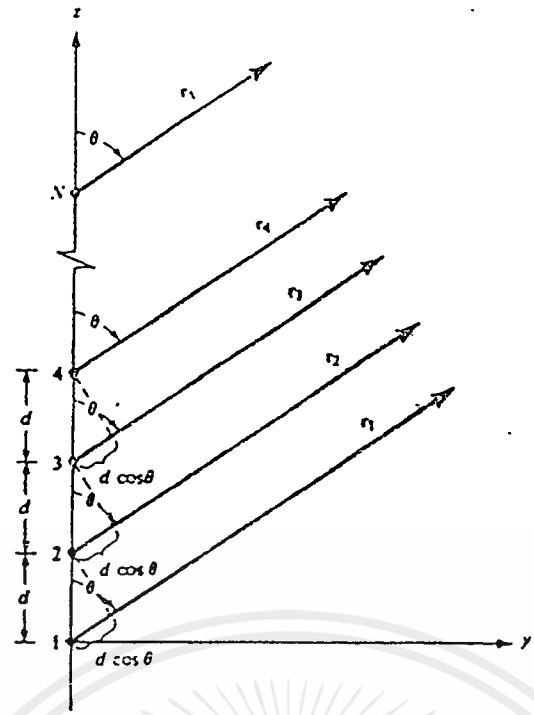
$$-\theta n = \cos^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\pi d}\overline{[\beta\pm(2n+1)\pi]}\right), n = 0,1,2,\ldots$$

จะมีนัลเกิดที่ $\theta = 90^\circ$ ซึ่งเกิดจากเอเลเมนท์แพทเทอร์น ในขณะที่นัลที่เหลือเกิดจากอาร์เรย์แฟคเตอร์ ถ้า $\beta = 0^\circ$ ในที่นี้ d ต้อง $\geq \frac{\lambda}{2}$ ถึงจะเกิดอย่างน้อย 1นัล

3.2 อาร์เรย์ N เอเลเมนท์

เมื่อขนาดของกระแสที่ป้อนแต่ละเอเลเมนท์ละระยะห่างระหว่างเอเลเมนท์มีค่าสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.4 รูปการหาสนามระยะไกลของอาร์เรย์ N เอเลเมนท์ของไอโซโทรปิค ซอร์สวางตามแนวแกน Z

ตามรูป 3.4 มีเอเลเมนท์ที่เหมือนกันอยู่ N ตัว แต่ละเอเลเมนท์มีเฟสต่างกัน B จะเรียกอาร์เรย์แบบนี้ว่ายูนิฟอร์มอาร์เรย์ (Uniform Array)

สนามลัพธ์ของอาร์เรย์นี้จะเป็นการคูณแพทเทอร์นระหว่างเอเลเมนท์แพทเทอร์นกับอาร์เรย์แฟคเตอร์ ในกรณีนี้อาร์เรย์เฟคเตอร์ จะมีค่าดังต่อไปนี้

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

$$AF = \sum_{n=1}^{N} ej(n-1)(kd\cos\theta+\beta) \qquad (3.1)$$

ซึ่งเขียนได้ว่า

$$AF = \sum_{n=1}^{N} ej(n-1)\varphi \qquad (3.2)$$

เมื่อ $\varphi + kd\cos\varphi + \beta$ (3.2a)

เมื่อคูณทั้งสองข้างของ (3.2) ด้วย $e^{j\varphi}$ จะได้

$$(AF)e^{j\varphi} = e^{j\varphi} + e^{2j\varphi} + e^{3j\varphi} + \ldots\ldots + e^{j(N-1)\varphi} + e^{jN\varphi} \qquad (3.3)$$

และเมื่อลบ (3.2) ออกจาก (3.3) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$AF = (e^{j\varphi} - 1) = (-1 + e^{jN\varphi}) \qquad (3.4)$$

หรือเขียนได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

(3.5)

ถ้าจุดเปรียบเทียบเฟสเป็นจุดกึ่งกลางของอาร์เรย์ (3.5) จะกลายเป็นดังนี้

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

(3.5a)

ถ้าค่า φ มีค่าน้อยกว่า ๆ จะประมาณ (3.5a) ได้ว่า

$$AF \approx \left[\frac{\sin(\frac{N\varphi}{2})}{\frac{\varphi}{2}}\right] \qquad (3.5b)$$

(3.5a) และ (3.5b) มีค่าสูงสุดเท่ากับ N และค่านอร์มอไลซ์อาร์เรย์แฟคเตอร์จะมีค่าดังนี้คือ

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

และ

$$(AF)n \approx \left[\frac{\sin(2^{N\varphi})}{\frac{N\varphi}{2}}\right]$$

(3.5d) ถ้าจะหานัลจะกำหนดให้ 3.5c และ 3.5d เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้น

$$\sin(\frac{N\varphi}{2}) = 0 \Rightarrow \frac{N\varphi}{2} \Big| \theta = \theta n = \pm n\pi \Rightarrow \theta n = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}(-\beta \pm \frac{2n\pi}{N})\right] \qquad (3.6)$$

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

$$n \neq N, 2N, 3N \text{ พร้อมกับ} \qquad (3.5C)$$

เมื่อ n=N,2N,3N,... 3.5C จะมีค่าสูงสุด เพราะจะอยู่ในรูปแบบ sin(0)/0 ค่า เป็นตัวกำหนดกำลังของนัล (ที่หนึ่ง, ที่สอง ฯลฯ) สำหรับในกรณีที่มีค่าเป็นศูนย์ อาร์กิเมนท์ของอาร์คโคไซน์ (ArcCosine) ไม่สามารถเป็นหนึ่ง ดังนั้นจำนวนนัลที่มีได้จะเป็นฟังก์ชันของระยะระหว่างเอเลเมนท์ d และความต่างเฟส B

นอกจากนี้ค่าสูงสุดของ (5.10C) จะเกิดขึ้นเมื่อ

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

$$m = 0, 1, 2,..... \qquad (3.7)$$

อาร์เรย์แฟคเตอร์ใน 3.5C มีค่าสูงสุดค่าเดียว ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ m = O ใน (3.7)นั่นคือ

$$\theta m = \cos^{-1}\left(\frac{\lambda\beta}{2\pi d}\right) \qquad (3.8)$$

ซึ่งเป็นมุมที่ทำการสังเกตที่ทำให้ $\varphi = 0$

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุด -3dB ของอาร์เรย์แฟคเตอร์ใน 3.5d จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{N\varphi}{2} = \frac{N}{2}\left(kd\cos\theta + \beta\right) \Big|\theta = \theta h = \pm 1.391$$

$$-\theta h = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right] \tag{3.9}$$

ซึ่งอาจเขียนได้ว่า

$$\theta h = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}(\beta \pm \frac{2.782}{N}\right] \tag{3.9a}$$

ถ้า $d >> \lambda$ จะได้ค่า

$$\theta h = \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d}(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right] \tag{3.9b}$$

จะหาค่า HPBW ได้เมื่อหามุมของ แรก และ HPBW ได้ ซึ่งถ้าแพทเทอร์นมีลักษณะสมมาตรตรงบริเวณบีมหลัก จะได้ว่า

$$\theta_h = 2\left|\theta_m - \theta_h\right|$$

(3.9c)

สำหรับอาร์เรย์แฟคเตอร์ใน (3.5d) จะมีค่าสูงสุดค่าที่สอง (ค่าสูงสุดของไซด์โลบ) ซึ่งเกิดขึ้นโดยประมาณ เมื่อเศษของ (3.5d) มีค่าสูงสุดนั่นคือ

$$\sin(\frac{N\varphi}{2}) = \sin\left[\frac{N}{2}(kd\cos\theta + \beta)\right] \Big|\theta = \theta s \approx \pm 1$$

$$\Rightarrow \frac{N}{2}(kd\cos\theta + \beta) \Big|\theta = \theta s \approx \pm\left(\frac{2s+1}{2}\right)\pi$$

$$\Rightarrow \theta s \approx \cos^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm (\frac{2s+1}{N})\pi\right]\right\}$$

$$S = 1, 2, 3,... \tag{3.10}$$

ซึ่งอาจเขียนได้ว่า

$$\theta s \approx \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right]\right\}$$

$$S = 1,2,3,..... \tag{3.10a}$$

ถ้า $d >> \lambda$ จะหาค่า θ ได้ดังนี้

$$\theta s \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right]$$

$$S = 1,2,3,....$$

ส่วนค่าสูงสุดของไซด์โลบแรกของ (3.5c) เกิดขึ้นโดยประมาณ เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{N\varphi}{2} = \frac{N}{2}\left(kd\cos\theta + \beta\right)\Big|\theta = \theta s \approx \pm\left(\frac{3\pi}{2}\right)$$

(3.11)

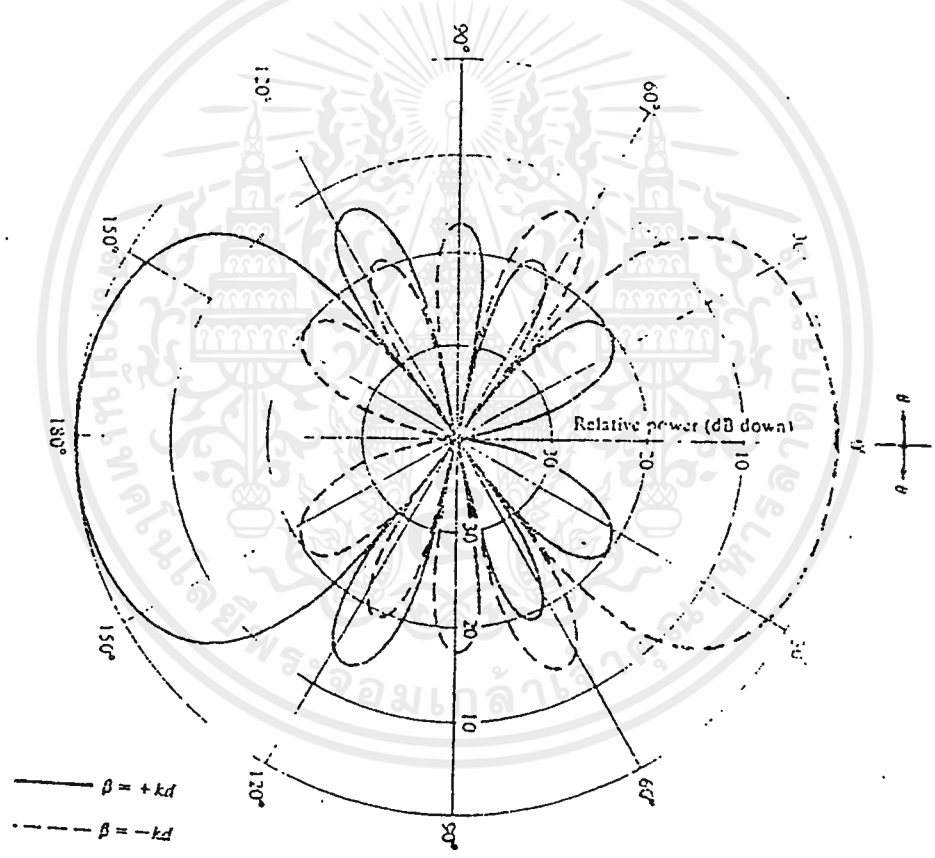
หรือเมื่อ

$$\theta s = \cos^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \frac{3\lambda}{N}\right]\right\} \tag{3.12}$$

ที่จุดนั้น ขนาดของ (5.10d) มีค่าดังนี้

$$(AF)n \approx \left[\frac{\sin(\frac{N\varphi}{2})}{\frac{N\varphi}{2}}\right]\Big|\theta = \theta s = \frac{2}{3\pi} = 0.212 \tag{3.13}$$

$$(AF)n = 20\log_{10}(\frac{2}{3\pi}) = -13.46dB \tag{3.13a}$$



รูปที่ 3.1 แพทเทอร์นของยูนิฟอร์มเอนด์ไฟร์อาร์เรย์ที่มี 10 เอเลเมนท์ (N=10,d= λ /4)

<u>สรุป</u>

จุดประสงค์ของการทำอาร์เรย์ก็คือต้องการเพิ่มขนาดของสายอากาศเพื่อปรับปรุงแพทเทอร์นของสายอากาศนั้น การที่เราเพิ่มขนาดของสายอากาศตัวเดี่ยว ๆ แม้ว่าจะทำให้โลบหลักของสายอากาศแคบลงก็ตาม แต่จะมีผลทำให้โลบข้างมีขนาดสูงขึ้น ซึ่งไม่เป็นสิ่งที่พึงปรารถนาการปรับขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละเอเลเมนท์ จะมีผลทำให้รูปร่างของแพทเทอร์นเปลี่ยน แปลงในขณะที่การปรับเฟสระหว่างเอเลเมนท์ จะเป็นการกำหนดทิศทางของบีมของแพทเทอร์น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
สายนำสัญญาณ

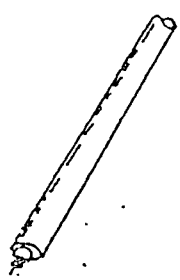
4.1 บทนำ

ปกติการติดตั้งสายอากาศจะต้องไม่ให้ใกล้อาคารหรือสายโทรทัพท์ เพื่อให้คุณภาพของการกระจายของคลื่นหรือการรับาคลื่นมีประสิทธิภาพมากที่สุด และยังต้องป้องกันการรบกวนจากคลื่นที่ไม่พึงปรารถนาด้วย ดังนั้นจึงมักจะต้องติดตั้งสายอากาศในตำแหน่งที่สูงเหนือพื้นดินพอสมควร ด้วยเหตุผลนี้เองเครื่องส่งหรือเครื่องรับจะต้องวางห่างจากสายอากาศซึ่งก็ต้องอาศัยสายนำส่งสัญญาณเป็นตัวเชื่อม ถ้าเรานำตัวนำใดๆมาต่อปัญหาก็จะเกิดขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่า ที่ความถี่ต่างๆ ตัวนำทุกชนิดที่มีความยาวพอเหมาะจะกระจายพลังงานออกรอบๆ ตัว ซึ่งตัวนำนั้นจะกลายเป็นสายอากาศไป *สายส่งสัญญาณ (transmission line)* มีไว้เพื่อเป็นตัวส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศ หรือรับพลังงานไฟฟ้าจากสายอากาศมายังเครื่องรับซึ่งเราไม่ต้องการให้เกิดการสูญเสียจากการกระจายคลื่นที่สายนำสัญญาณ สายนำสัญญาณอาจเรียกสั้น ๆ ว่า “สายส่ง ” หรือเรียกว่าฟีดเตอร์ (feeder)

4.2 ชนิดของสายส่ง

ในทางทฤษฎีแล้วสายส่งประกอบขึ้นด้วยโลหะตัวนำ 2 เส้นวางขนาดกัน แต่ทั้งนี้เพื่อให้ได้คุณสมบัติของสายตามข้อกำหนด (spec)ซึ่งก็สามารถใช้งานได้ในแต่ละประเภทตามความถี่ที่ กำหนด ในทางปฏิบัติจึงอาจแบ่งสายส่งออกเป็นแบบที่นิยมเป็น 4 แบบใหญ่ ๆ คือ

1) ตัวนำชนิดสายเดียว สองสาย (กรณีที่ตัวนำที่วางขนาดกัน)
2) สายโคแอกเชียลหรือสายคู่ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน
3) สายคู่แบบบิด
4) สายคู่ชีลด์



รูปที่ 4.1 สายโคแอกเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.1 แสดงสายนำสัญญาณแบบโคแอกเชียลที่ประกอบด้วยลวดตัวนำภายในตรงแกนกลาง และตัวนำภายนอก เป็นรูปทรงกระบอกและมีฉนวนซึ่งทำด้วยพายเรกซ์โพลีสตายรีน (pyrec polystyrene) คั่นกลาง สายชนิดนี้ส่วนใหญ่จะใช้กับเครื่องส่งในย่านความถี่ VHF และ UHF สายชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้งานที่ความถี่ต่ำ ๆ และมีกำลังต่ำ เพราะยากในการติดตั้งและรักษา บางครั้งอาจจะใช้อากาศเป็นไอดิเลคตริคคั่นกลางซึ่งคุณสมบัติจะขึ้นอยู่กับความชื้นของกาอาศด้วย เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป จะทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำทำให้สภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไปได้มาก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ส่วนบริเวณอากาศทำเป็นฉนวนจึงเป็นท่อ ในท่อใส่อากาศแห้ง เช่น ไนโตรเจนใช้ความดัน 15-30 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งจะต้องรักษาให้คงที่อยู่เสมอโดยการอัดแก๊สเข้าไป ข้อดีของสายส่งแบบนี้คือความสูญเสียของการกระจายพลังงานน้อย ความเข้มสนามแม่เหล็กและไฟฟ้าจะมีอยู่ภายในช่องว่างระหว่างตัวนำเท่านั้น (ซึ่งต่างกับทวินลีดจะมีอยู่รอบนอกตัวนำเป็นระยะทางพอสมควร) นั่นคือวัตถุใกล้เคียงสายโคแอกเชียลจะไม่มีผลเลย แต่สายชนิดนี้ก็ยังมีข้อเสียคือ ราคาแพงเมื่อเทียบกับแบบอื่น ที่ความยาวมาก ๆ จะมีการปั่นทอนสัญญาณสูง (การใช้สายส่วนใหญ่มักไม่ยาวเกินไป) และต้องให้ตัวนำภายในแห้งอยู่เสมอ

ค่า $Z_0 = \frac{138}{\sqrt{K}} \log \frac{D}{d}$

เมื่อ D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำภายนอก

d เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำภายใน

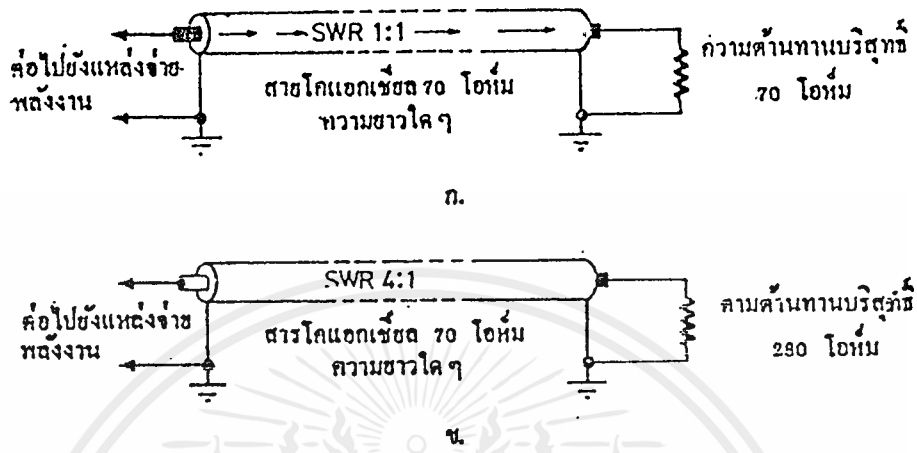
สายคู่ชีลด์ประกอบด้วยตัวนำสองตัวแยกออกจากกัน หุ้มด้วยฉนวน เช่น สายเทฟลอน (tefion) โพลีเอทีลีน (polyetyene) และจะถูกหุ้มด้วยทอทองแดงซึ่งจะกันชีลด์ ความชื้นและไอน้ำจะป้องกันโดยยางรอนน๊อก ข้อดีคือตัวนำทั้งสองจะสมดุลย์กันเมื่อเทียบกับกราวนด์ ค่าตัวเก็บประจุระหว่างตัวนำแต่ละตัว โดยมีฉนวนกั้นจะสม่ำเสมอตลอดความยาว

4.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของสายนำสัญญาณหรือสายส่ง

คุณสมบัติที่สำคัญของสายส่งอย่างหนึ่งคือ*ลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสาย (characteristicimpedance)* ถ้าสายอากาศแบบไดโพล $\lambda/2$ มีอิมพิแดนซ์ที่ตรงจุดต่อ ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง 70 โอห์ม ดังนั้นสายส่งต้องมีลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสาย (characteristic impedance) เท่ากับ 70 โอห์มด้วย เพื่อให้ได้กำลังมากที่สุด ถ้าเราอากาศออกจากสายส่งแล้วนำเอาความต้านทาน 70 โอห์ม ต่อแทนดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะให้ผลแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างสายอากาศและความต้านทาน เพราะถ้าใช้สายอากาศเราจะรู้จักกันในเทอมพลังงานสูญเสียไปใน *ตัวต้านทานการแพร่ (radiationresistance)* ซึ่งไม่ได้สูญเสียไปจริง ๆ แต่สูญหายไปในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกรอบ ๆ ตัว แต่ถ้าใส่ความต้านทานกำลังของความถี่วิทยุจะหายไปจริง ๆ ในรูปความร้อน ถ้ากำลังทั้งหมดสูญเสียไปในโหลด (สายอากาศหรือความต้านทาน) ทั้งหมดจะไม่มีการสะท้อนกลับมายังต้นกำเนิด จะเรียกว่าสายส่งนั้นถ่ายทอดพลังงานได้สูงสุดโดยไม่มีคลื่นสะท้อนหรือเรียกได้ว่าสายนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณนั้น แฟลท (flat)คือมีอัตราส่วนของกระแส (าและแรงดัน) จะเท่ากับทุกตำแหน่งตามความยาวของสายส่งจากเครื่องส่งหรือเครื่องรับไปยังสายอากาศ



รูปที่ 4.2

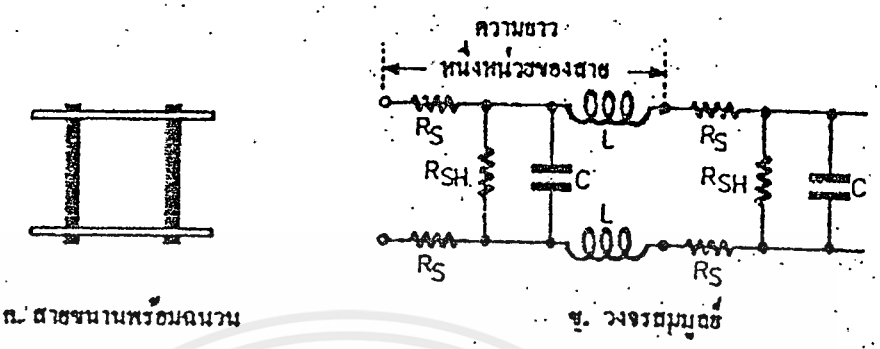
สมมุติว่าไดโพลมีค่าอิมพีแดนซ์ตรงรอยต่อที่จะต่อเข้ากับสายนำสัญญาณ (feedpoint impedance) เท่ากับ 70 โอห์มต่อกับสายส่ง 50 โอห์ม จะเกิดภาวะไม่สมดุลย์ทางอิมพีแดนซ์ (mismatchimpedance) ซึ่งอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์เท่ากับ 70/50 หรือ 1.4:1 จะทำให้คลื่นส่วนหนึ่งที่จะสะท้อนกลับมายังต้นกำเนิดสัญญาณ เพราะว่ากำลังที่เคลื่อนที่ไปตามสายมี 2 ทิศทางคือ จากเครื่องรับไปสายอากาศ และจากสายอากาศไปยังเครื่องรับซึ่งกระแสทั้งสองจะรวมกันทางเวคเตอร์ให้สแตนดิ้งเวฟ (Standing Wave) บนสาย อัตราส่วนของแรงดันหรือกระแสที่มากที่สุดกับสแตนดิ้งเวฟน้อยที่จะเป็น SWR ซึ่งจะเป็นการบอกการไม่สมดุลย์ทางอิมพี(mismatch) ของสายส่งและโหลด

ลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย (Charateristic impedance(z_0)) จากการที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าคุณสมบัติประการแรกสุดที่เราต้องทราบคือ ลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสาย (characteristic impedance) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสายที่ผลิตจากโรงงานตวามแตกต่างของ Z_0 นี้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสาย เช่น โลหะที่นำมาทำเป็นตัวนำ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำระยะห่างตัวนำทั้งสอง ค่า Z_0 จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความถี่ที่ใช้งานเปลี่ยนแปลง ค่า Z_0 จะคงที่ตลอดความยาวของสาย

การหา Z_0 ของตัวนำชนิด 2 สายวางขนานกันเพื่อสะดวกในการวิเคราะห์และอธิบาย จะพิจารณาว่าสายส่งแบบนี้ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ความต้านทานเกิดจากคุณสมบัติของโลหะของตัวนำ ตัวเก็บประจุเมื่อโลหะ 2 ชนิดวางขนานกันก็ย่อมเสมือนตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเหนี่ยวนำเกิดจากมีกระแสไหลในสายเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบ ๆ สาย เพื่อความสะดวกจะคิดที่ละหน่วยความยาวดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3

ในการคำนวณจะต้องมีพื้นความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์เรื่องสนามไฟฟ้า เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นซึ่งค่อนข้างจะยุ่งยาก อาจสรุปเป็นสูตรสำเร็จได้คือ

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

เมื่อ L เป็นค่าเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว

C เป็นค่าตัวเก็บประจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว

จะเห็นว่าเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ ซึ่งจะมีค่า L, C คงที่ค่าหนึ่งซึ่งไม่สะดวกเพื่อความสะดวกอาจหาค่า Z_0 จากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ได้คือ

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{K}} \log_{10} \frac{2D}{d}$$

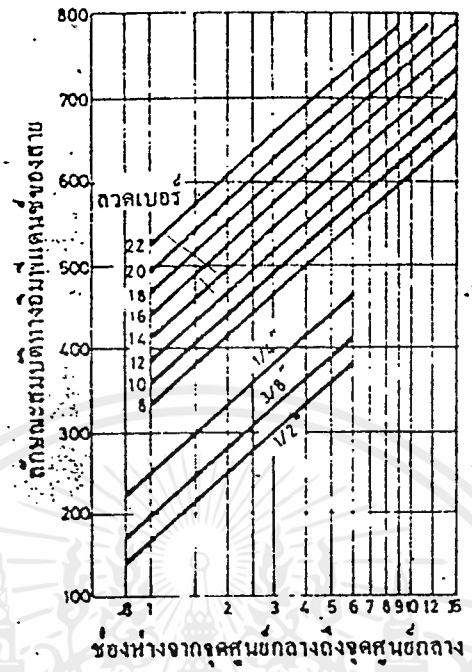
เมื่อ D เป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำทั้งสอง

d เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำทั้งสอง

K เป็นค่าคงที่ไดอิเลคตริคของฉนวน (K = 1 เมื่อใช้อากาศเป็นฉนวน)

จากสูตรดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่า ค่า Z_0 ขึ้นกับระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ และชนิดของฉนวน เพื่อประโยชน์ในการใช้งาน อาจหาค่า Z_0 ได้ทันทีจากรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



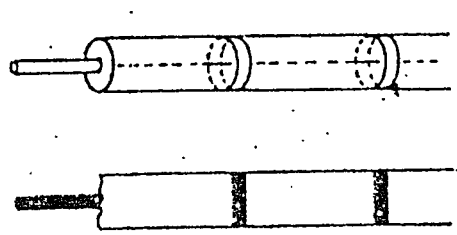
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z_0 กับขนาดของตัวนำและระยะห่างสำหรับสายส่งแบบขนาน

Z_0 ของสายส่งแบบโคแอกเชียลที่มีอากาศเป็นฉนวนมีตัวนำข้างในขนาดเล็กมากเป็นทองแดงยึดกับตัวนำนอกโดยฉนวนเป็นแผ่นยาว ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สายส่งแบบนี้จะมีความสูญเสียน้อยกว่าแบบตัวนำ 2 ตัวขนานกัน (แบบแรก) ที่ความถี่มากกว่า 100MHz แต่ต้องมีเงื่อนไขว่าอากาศภายในตัวนำต้องแห้งอยู่เสมอ

$$Z_0 = 138\log\frac{b}{a}$$

b เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำภายนอก

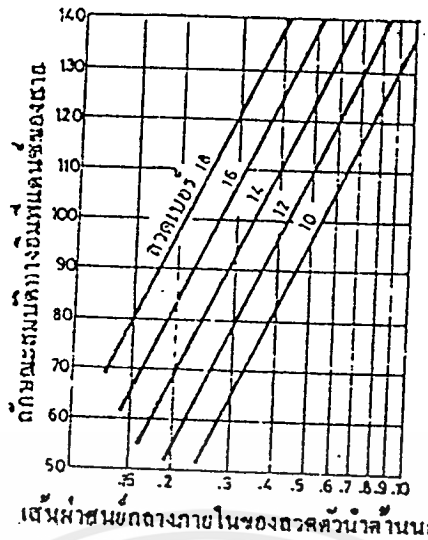
a เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของตัวนำตัวใน



รูปที่ 4.5 สายโคแอกเชียล

อาจหาค่า Z_0 ได้ง่ายตามรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z_0 กับสายโคแอกเชียลแบบอากาศเป็นฉนวน

นอกจากนี้สายโคแอกเชียลยังมีค่า Z_0 แตกต่างกันไปตามเบอร์ บริษัท ที่นิยมใช้คือเบอร์ RG/U ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

1	2	3	4	5	6
ชนิดของสายส่ง	Z_0	ชนิด RG/U	เบอร์ โรงงาน	ϕ ของตัวนำตัวนอก นิ้ว	ขนาดของตัวนำ ตัวใน	ไดอิเลคตริก
	52	8		0.405	7/21	SP
	52	8A		0.405	7/21	SP
	50		621-111	0.405	7/19	FP
โคแอกเชียล	50		T-4-50	0.407	10	FP
ขนาดกลาง	50	213		0.405	–	–
	75	11		0.405	7/26	SP
	75	11A		0.405	7/26	SP
	75		621-100	0.405	14	FP
	75		JT-204	0.407	14	FP
	53.5	58		0.195	20	SP
	50	58A		0.195	19/.0071	SP
	53.5	58B		0.195	20	SP
	50	58C		0.195	19/.0071	SP
ขนาดเล็ก	73	59		0.242	22 CW	SP
	75	58B		0.242	023 CW	SP
	73		621-186	0.242	20 CW	FP
	93	62		0.242	22 CW	SPP
	52	14		0.545		
	50	17A		0.870		
	50	214		0.425		
สายขนาน	75		214-023		7/21	SP
แบบแบน	300		214-056		7/28	SP
หรือรูปไข่	300		214-022		16 CW	SP
บนทรีนผิว	300		214-271		7/28	PA
	300		214-076		7/26	PA
	300		214-103		7/28	FP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7	8	9	10		11	12
ตัวเก็บประจุความยาว 1 ฟุต pF	ค่าคงตัวทางความเร็วคลื่น	แรงดันสูงสุด (rms)	กำลังวัตต์ 30 MHz		อนุกรมตัวนำ	การบั่นทอน dB/100 ฟุต (28 MHz)
			400 MHz	400 MHz		
29.5	0.66	5000	1720	465	UHF, N	1.0
29.5	0.66	5000	1720	465	UHF, N	1.0
24.5	0.80	1500	–	–	UHF	–
–	–	–	–	–	UHF	–
–	–	–	–	–	–	1.0
20.5	0.66	5000	1400	340	UHF, N	–
20.5	0.66	5000	1400	340	UHF, N	1.2
16.5	0.80	3000	–	–	UHF	–
–	–	–	–	–	UHF	–
28.5	0.66	1900	580	138	UHF, BNC, N	1.9
30	0.66	1900	550	105	UHF, BNC, N	1.9
28.5	0.66	1900	580	135	UHF, BNC, N	
30	0.66	1900	550	105	UHF, BNC, N	1.9
21.5	0.66	2306	720	185	UHF, BNC, N	
21	0.66	2300	720	185	UHF, BNC, N	1.8
17.3	0.80	1000	–	–	UHF, BNC	
13.5	0.84	750	850	230	UHF, BNC, N	
						0.7
						0.4
20	0.71		1006			1.0
5.8	0.82					
3.8	0.82					0.6
2	0.82		500			0.6
3.9	0.82		1000			

หมายเหตุ แถวที่ 3 T -4-50 และ JT-240 ผลิตโดยโรงงาน Times Wire & Cable, Wallingford, Conn,เบอร์อื่นผลิตโดย Amphenle,Chaicago,III

แถวที่ 5 ตัวนำเป็นทองแดง CW,Copper Weld ตัวเลขที่เป็นจุดทศนิยมคือเส้นผ่าศูนย์ กลางของลวดเป็นนิ้ว 7/21 หมายถึงลวดทองแดง 7 เส้นเบอร์ 21

แถวที่ 8 SP คือ โพลีเอธีลีนแข็ง FP คือ โฟมโพลีเอธีลีน

แถวที่ 8 สายขนานแบบปิดทั่วไปมีค่าคงตัวทางความเร็วคลื่นระหว่าง 0.95-0.975 ขึ้นอยู่กับระยะห่างและส่วนที่เป็นไดอิเลคตริค

ความยาวของสายส่ง ในการทดลองหา SWR หรือออกแบบการต่อนำสัญญาณของสายส่งมักจะพบกับคำว่า ค่าคงตัวความเร็ว (velocity constant) คงจำได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในอากาศด้วยความเร็วเท่าแสงหรือ เมตร/วินาที ซึ่งถ้าเคลื่อนที่ไปในตัวกลางอื่น ๆ เช่นโลหะ หรือตัวนำที่มีค่าคงที่ ไดอิเลคตริคแตกต่างกันจะได้สูตรทั่วไปคือ

$$\text{ความเร็ว} = \frac{2.998 \times 10^8}{K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K เป็นค่าคงที่ไอโอเลคตริคของตัวกลาง ซึ่งปกติจะมีค่ามากกว่า 1 ค่าคงตัวความเร็ว (velocity constant) เป็นอัตราส่วนของความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ตามสายส่งกับความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามอากาศ ซึ่งในการคำนวณหาความยาวของสายส่งจะมีสัมพันธ์ดังนี้

ความยาวของสายส่งเมื่อเป็น 1 ความยาวคลื่น $\frac{2.998Vc}{f}$ (เมตร)

$$= \frac{984Vc}{f} \quad \text{(ฟุต)}$$

เมื่อ f เป็นความถี่ที่ใช้งาน MHz

Vc เป็น Velocity Constant

ตัวอย่างเช่น เราต้องการหาความยาวจริงเป็นฟุตของสายส่ง เมื่อเป็น $\lambda/2$ ของสายส่งเบอร์ RG8/U จากตารางที่ 4.1

$$Vc = 0.66$$

สมมติความถี่ที่ทำงานเป็น MHz

ความยาวของสายส่งคือ $\frac{492 \times 0.66}{14} = 23.2$ (ฟุต)

ในการพิจารณาว่าจะต้องใช้สายตัวนำของสายส่งยาวเท่าไรจะกล่าวอีกครั้งในตอนต่อไป

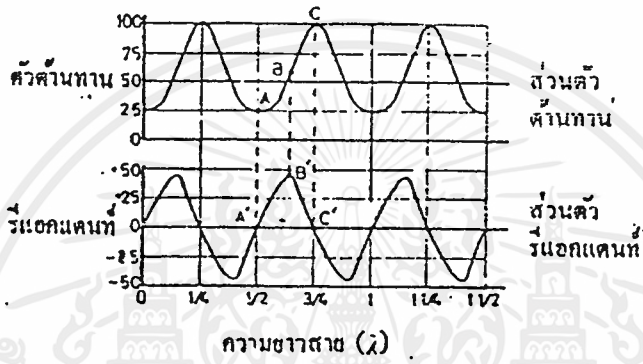
อัตราส่วนทางสแตนดิ้งเวฟ (Standing Wave Ratio) SWR เมื่อเราต่อสายส่งที่มีความยาวพอเหมาะเข้ากับโหลดคือต่อตรงจุดต่อสายของสายอากาศ สิ่งที่เราต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกคือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งจะมีผลในแง่ของการเคลื่อนที่ของคลื่น ประสิทธิภาพ หรือบางครั้งก็รับสัญญาณไม่ได้เลย ในการเข้าใจปัญหานี้ต้องทราบถึง SWR

SWR เป็นอัตราส่วนของแรงดันหรือกระแสที่มีค่ามากที่สุดกับแรงดันหรือกระแสน้อยที่สุดในสายเรียกว่า *อัตราส่วนแรงดันสแตนดิ้งเวฟ VSWR หรือ SWR* ซึ่งจะมีค่าเท่ากันทั้งอัตราส่วนของแรงดันและกระแส SWR เป็นตัวกำหนดว่าสายนำสัญญาณนั้นแมทช์กันหรือไม่กับสายอากาศ ถ้าพูดในทางฟิสิกส์โดยให้โหลดคือ สายอากาศประกอบด้วยความต้านทานล้วน อาจจะพูดได้ว่า $SWR = \frac{R}{Z_0}$ หรือ $\frac{Z_0}{R}$ โดยจะเลือกตัวที่มีค่ามากกว่าเป็นเศษ SWR จะมีค่ามากว่า 1 เสมอถ้าเอาปลายสายส่งมาต่อกันหรือปล่อยเปิดไว้ SWR จะเป็นอนันต์

ถ้าสายส่งถูกต่อปลายด้วยโหลดที่มีความต้านทานหรือเป็นสายอากาศที่มี ตัวต้านทานการแพร่ (radiation resistance) ที่มีค่าเท่ากับ Z_0 ของสายส่ง พลังงานที่ได้ในสายส่งทั้งหมดสูญเสียไปในโหลด จะทำให้สายนำสัญญาณเกิดภาวะ รีโซแนนท์ จะได้อัตราส่วนของแรงดัน (กระแส) ที่จุดต่าง ๆ บนสายเท่ากันตลอด เรียกว่า สายอากาศและสายส่งแมทช์กันพอดี แต่ถ้าค่าตัวต้านทานการแพร่ radiation resistance ของสายอากาศไม่เท่ากับ Z_0 ของสายนำสัญญาณจะเกิดภาวะรีโซแนนท์ บางส่วนของกำลังที่ใส่ในสายจะสะท้อนกลับจากปลายของสายส่งกลับไปยังเครื่องส่ง ดังแสดงใน รูป 4.7 สายส่ง 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอห์มต่อกับสายอากาศ 25 โอห์มแล้ว อินพุทอิมพีแดนซ์จะไม่ได้ 25 โอห์มทุกตำแหน่งบางตำแหน่งของความยาวของสายส่งเป็นหนึ่งความยาวคลื่น เช่น วัดที่ตำแหน่งสายส่งยาว $\lambda/2$ (จุด A-A') จะวัดค่าความต้านทานอินพุทได้ 25 โอห์ม ถ้าวัดที่จุด B-B' จะวัดอิมพีแดนซ์ได้ความต้านทาน 62 โอห์ม และรีแอกแตนซ์เป็นตัวเหนี่ยวนำ 48 โอห์ม ถ้าสายส่งถูกตัดนำมาใช้งานที่ความยาว V-V' นี้ เป็นการยากที่จะหาสายอากาศที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันมาใช้ได้ และที่ความยาวของสายส่ง $3/4\lambda$ คือ จุด C-C' จะสามารถขจัดรีแอกแทนซ์ไปได้แต่จะวัดความต้านทานได้ถึง 100 โอห์ม ถึงแม้ว่าที่กล่าวมาทั้ง 3 กรณีจะมี SWR เท่ากันตลอดสายคือ 2/1 ดังนั้นในทางปฏิบัติจะต้องตัดสายส่ง



รูปที่ 4.7

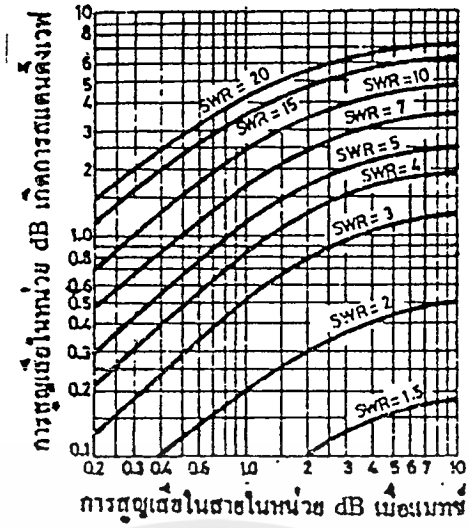
ให้ยาวเป็นจำนวนเท่าของ $\lambda/2$ คือ λ, $3\lambda/2$ เป็นต้นเท่านั้น จึงจะให้อินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 25 โอห์ม (ซึ่งจะได้กล่าวถึงเหตุผลและรายละเอียดในตอนท้าย)

ถึงแม้ว่าสายส่งจะถูกต่อปลายด้วยโหลดที่มีความต้านทานเท่ากับ Z_0 ของสายส่งก็ยังมีบางกรณีที่ SWR มากกว่า 1 คือกรณีที่โหลดมีค่าไม่เป็นตัวต้านทานอย่างเดียวแต่จะมีค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่ของการใช้งานของสายส่ง ถ้าสายอากาศเป็นโหลดก็อาจพูดได้ว่าสายอากาศไม่รีโซแนนซ์ที่ความถี่ของการใช้งาน ความถี่รีโซแนนซ์ของสายอากาศที่เป็นความต้านทานล้วน เช่น ถ้าเครื่องส่งทำงานที่ 14.2 MHz ส่งกำลังผ่านสายส่งไปยังสายอากาศที่เป็นความต้านทานล้วนที่ 13.8 MHz ในการทำให SWR = 1/1 เครื่องส่งต้องจูนใหม่ที่ 13.8 MHz หรือสายอากาศต้องเปลี่ยนแปลงใหม่เพื่อให้ได้ R ล้วนที่ความถี่ของเครื่องส่งคือ 14.2 MHz (แต่ในการทดลองสายอากาศที่มีความต้านทานแล้วนั้นทำลำบากมาก ในการแก้ปัญหานี้จะกล่าวในเรื่องการหาความยาวสายด้วยแผ่น วงกลมของสมิท (smith chart) ปกติค่า SWR ในสายส่งยิ่งต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานดี มีกฎเกณฑ์เบื้องต้น 2 ข้อที่ทำให้ SWR มีค่าต่ำ (ในทางปฏิบัติ SWR ไม่ควรเกิน 1.5/1) คือ

1) สายอากาศต้องรีโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งานของเครื่องส่ง

2) สายอากาศจะต้องต่อโดยตรง (หรือต่อกับ matching) กับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน

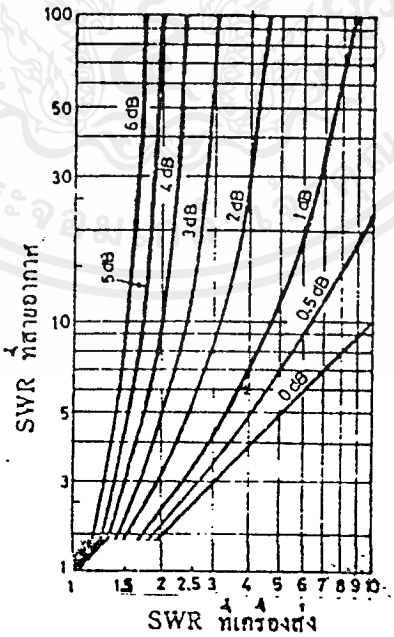
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงความสูญเสียที่เพิ่มเป็น dB

ปกติสายจะมีค่าความสูญเสียต่อความยาวค่าหนึ่งเมื่อแมทช์พอดีซึ่งเป็นค่าที่กำหนดมาจากโรงงานแต่ถ้าต่อสายส่งกับสายอากาศและเครื่องส่งหรือเครื่องรับแล้วSWRจะมีผลต่อความสูญเสียดังแสดงในรูป4.8

รูปที่ 4.8 จะแสดงถึงความสูญเสียที่เพิ่มเป็น dB เนื่องจาก SWR (แกนยืน) เมื่อทราบความสูญเสียของสายเป็น 4dB เมื่อแมทช์พอดี (ค่าจากโรงงาน) เช่น ถ้าสายส่งมีความสูญเสียในสายเพิ่มขึ้น 1.1dB ความสูญเสียทั้งหมดในสายส่งคือ 4+1.1 = 5.1dB(**หมายเหตุ** SWR เป็นค่าที่วัดที่โหลด คือ ระหว่างรอย่อของสายส่งกับปลายที่ต่อของสายอากาศ) แต่การวัด SWR ที่ตำแหน่งนี้จะไม่สะดวกจึงอาจจะวัด SWR ที่รอยต่อของเครื่องส่งหรือเครื่องรับกับสายส่งก็ได้ แต่ค่าที่วัดได้ที่ตำแหน่งนี้จะน้อยกว่าตำแหน่งนี้จะน้อยกว่าตำแหน่งแรกขึ้นกับอัตราการบั่นทอนของสาย ซึ่งความสัมพันธ์ของ SWR ทั้งสองตำแหน่งจะแสดงในรูป 4.9



รูปที่4.9แสดงSWRที่ปลายของสายส่งกับSWRที่โหลดที่ค่าความสูญเสียของสาย เมื่อแมทช์ ต่าง ๆ กัน

จากรูป 4.9 จะหาค่า SWR ที่โหลดได้ จาก SWR ที่เครื่องส่ง เช่น ถ้าวัด SWR ที่เครื่องส่งได้ 3 และรู้ว่าสายมีการบั่นทอน 1dB (ภายใต้เงื่อนไขที่แมทช์กัน) SWR ที่โหลดจากรูปที่ 4.9 เป็น 4.5dB และจากรูป 3.12 SWR ที่โหลด 4.5dB เมื่อสายมีการบั่นทอน 1dB จะได้ความสูญเสียเพิ่มขึ้น (additional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

loss) 1dB ความสูญเสียทั้งหมดในสายส่งที่ใช้งานนี้คือ 2dB จากรูปที่ 4.8 เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อค่าความสูญเสียในสายมีค่ามาก (ขณะที่แมทช์พอดี) ความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าเกือบคงที่ ปัญหาที่มักจะเกิดเสมอโดยมีทางเลือก 2 ทางคือ

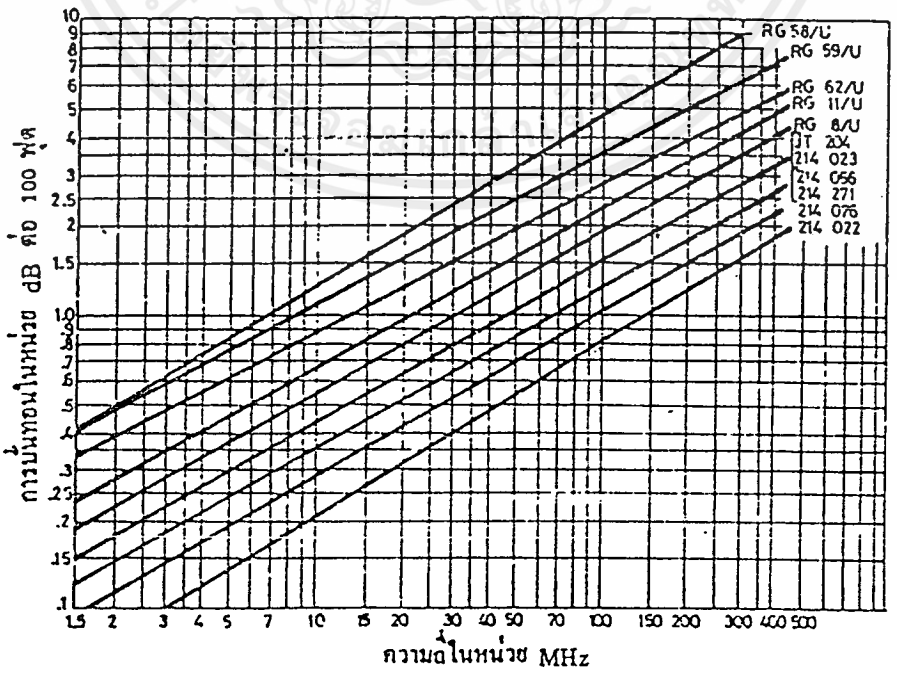
1) ระบบสายอากาศกับสายส่งที่ให้ SWR ต่ำ แต่ทำงานได้ดีที่ความถี่ค่าหนึ่งหรือช่วงความถี่แคบ ๆ (ปกติ SWR ยิ่งต่ำยิ่งดีในทางปฏิบัติจะต้องไม่เกิน 1.5)

2) ระบบสายอากาศกับสายส่งที่รีโซแนนท์กับความถี่พื้นฐาน และความถี่ฮาร์โมนิคต่าง ๆ (bandwidth กว้าง) แต่มีค่า SWR มาก

ความสูญเสียหรือการบั่นทอนในสาย ความสูญเสียในสายส่งจะมีความสัมพันธ์กับความยาวในรูปของสเกลล็อก (logarithm) ซึ่งจะแสดงค่าความสูญเสียเป็น dB ต่อความยาว 100 ฟุต ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการคำนวณหาความสูญเสียทั้งหมด เพราะจะนำเอาค่า dB มาบอกกันได้เลย ความสูญเสียของสายขึ้นอยู่กับชนิดของสาย (ตามตารางที่ 4.1) และความถี่ที่ใช้งาน เพราะความสูญเสียเปลี่ยนไปตามความถี่ที่ใช้งานดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.10

จากรูปที่ 4.8 สายส่งที่เป็นแบบใช้สาร โฟมโพลีเอทีลีน (foam polyethylene dielectric) ที่เทียบเท่ากับสายส่งแบบที่ใช้สารไดอิเลคตริกชนิดของแข็ง ที่ไม่ได้แสดงไว้ในตารางจะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย ความสูญเสีย 100 ฟุตของ RG 58B/U จะเทียบเท่ากับ RG 58/U RG 58A/U และ RG58C/U บวกอีก 10% ของความสูญเสียเป็น dB ของเบอร์ RG58/U RG-8A/U จะเหมือน RG-8/U และ RG-59B/U เหมือน RG-59

ความสูญเสียในสายส่งทั้งหมดเมื่อประกอบกับสายอากาศที่นอกเหนือจากความสูญเสียของสายที่ได้จากโรงงาน (เมื่อแมทช์พอดี) คือเนื่องจาก SWR



รูป 4.10 แสดงการสูญเสียเนื่องจากความถี่ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การแมทช์ชิ่งในระบบสายอากาศ

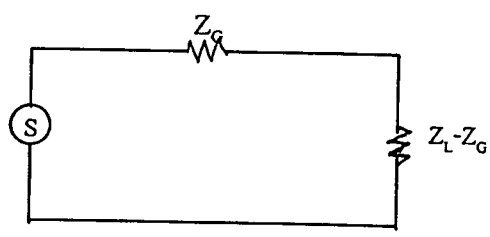
5.1 บทนำ

สัญญาณที่จะรับหรือส่งจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับหลายสิ่งหลายอย่างประกอบกันเข้า รวมทั้งการเลือกชนิดของสายโดยคำนึงถึงลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสาย และสิ่งที่จะช่วยเราในการเลือกสายหรือคำนึงถึงอย่างหนึ่งที่เราจะต้องเข้าใจอย่างดีก็คือ *การแมทช์ชิ่ง*

การแมทช์ชิ่งตามความหมายโดยตรงของมันมีความหมายว่า *ให้เข้าคู่กัน* นั่นก็คือจะต้องมีของสองสิ่งที่จะนำมาเข้าคู่กัน สำหรับสายอากาศแล้ว ถ้าสมมติให้เป็นสายอากาศเครื่องส่ง ถ้าเราป้อนพลังงานให้กับสายอากาศแล้วพลังงานเหล่านี้ถูกส่งออกแพร่ไปในอากาศได้หมดเราก็เรียกได้ว่าเครื่อง ส่งกับสายอากาศมีการแมทช์กันพอดี แต่ถ้าหากมีสัญญาณบางส่วนสะท้อนกลับมาใหม่อีกครั้งทำให้กำลังส่งที่ส่งออกอากาศไปได้เพียงจำนวนเล็กน้อยเราก็เรียกว่า สายอากาศนั้นมิได้แมทช์กับเครื่องส่ง ดังนั้นการแมทช์กันจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบสายอากาศทั้งระบบการส่งและการรับ

5.2 การถ่ายทอดพลังงานสูงสุด

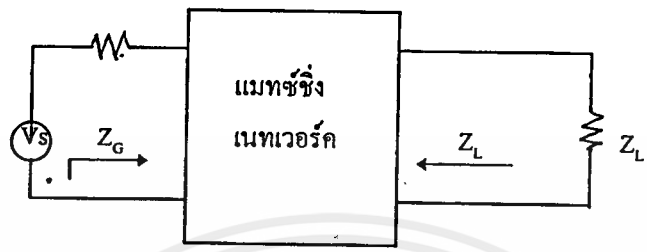
สมมติว่าเรามีแหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่เครื่องหนึ่ง ที่สามารถจ่ายสัญญาณป้อนไปยังโหลดได้ และถ้าหากให้แหล่งกำเนิดสัญญาณนั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ภายใน Z_0 ครั้นเมื่อนำเอาแหล่งกำเนิดสัญญาณนี้มาจ่ายกำลังงานให้กับโหลดตัวหนึ่งซึ่งสามารถที่จะปรับค่าได้ เพราะพบปรากฏการณ์อย่างหนึ่งคือกำลังงานที่ไปยังโหลดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตัวอิมพีแดนซ์ของโหลด ครั้นถ้าเรานำเอาวัตต์มิเตอร์ทำการวัดกำลังงานที่โหลด เมื่อทำการปรับตัวอิมพีแดนซ์โหลดเราจะพบว่าค่าของวัตต์มิเตอร์จะอ่านค่าได้สูงสุด เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดในส่วนที่เป็นตัวต้านทานจะต้องเท่ากับรีแอกแดนซ์ภายในเครื่องกำเนิดสัญญาณ แต่มีข้อแม้ว่าจะต้องเป็นชนิดตรงกันข้ามหรือมีเครื่องหมายประจำรีแอกแดนซ์ตรงข้ามกันนั้นเอง ยกตัวอย่างเช่น ถ้ารีแอกแดนซ์ภายในของแหล่งงจ่ายสัญญาณเป็นเสมือนตัวเก็บประจุ (X_C) ก็จะต้องต่อกับโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำและมีค่ารีแอกแดนซ์เท่ากัน จึงจะได้กำลังงานที่โหลดสูงสุด



รูปที่ 5.1 แสดงการถ่ายทอดพลังงานสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าโหลดที่นำมาต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังงานมีค่าไม่เท่ากับอิมพีแดนซ์ภายในของแหล่งจ่ายกำลังงานพลังงานที่ถูกถ่ายทอดมายังโหลดคล่อมมีค่าไม่สูงสุด แต่หากว่าเราต้องการให้กำลังงานจ่ายไปยังโหลดได้สูงสุด เราต้องสร้างวงจรที่ทำหน้าที่แมทช์ซึ่งระหว่างต้นกำเนิดสัญญาณกับโหลดเข้าด้วยกัน ส่วนของวงจรที่ทำหน้าที่นี้มีชื่อเรียกกว่า ***แมทช์ชิ่งเนทเวอร์ค (matching network)***



รูปที่ 5.2 การใช้แมทช์ชิ่งเนทเวอร์ค

แต่สำหรับระบบสายอากาศต้นกำเนิดสัญญาณคือเครื่องส่งจะส่งสัญญาณผ่านสายนำสัญญาณไปยังโหลดคือตัวสายอากาศ สำหรับสายอากาศนั้นเราจะพบกับคำว่าความต้านทานของสายอากาศนี้มิได้หมายถึง ตัวต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ทั่ว ๆ ไปดังที่เราเห็นในวงจรไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีความหมายถึงความต้านทานทางการแพร่ของคลื่น ในทำนองเดียวกันกับเครื่องรับ สายอากาศก็เปรียบเสมือนตัวรับสัญญาณที่มาจากการแพร่มาในบรรยากาศแล้วส่งต่อมายังเครื่องรับ การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนี้ไม่สามารถใช้วัดกันด้วยโอห์มมิเตอร์ธรรมดาวัดได้ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากโอห์มมิเตอร์หรือบริดส์มิเตอร์นั้นเราวัดได้แต่เพียงความต้านทานในการสูญเสียเท่านั้น

รูปที่ 5.3 แสดงการแมทช์ชิ่งสายนำสัญญาณกับตัวสายอากาศ

สายอากาศทั่วไปจะทำหน้าที่กระจายคลื่น (เครื่องส่ง) หรือรับคลื่นจากรบรรยากาศ โดยปกติการกระจายคลื่นหรือการรับคลื่นจะเป็นไปได้โดยสมบูรณ์นั้น ค่าอิมพีแดนซ์สำหรับการกระจายกับอิมพีแดนซ์ของสายตลอดจนถึงอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งต้องมีค่าเท่ากันตลอด สำหรับอิมพีแดนซ์ของสายนั้นก็คือลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ซึ่งมีความหมายในแง่เป็นคุณสมบัติประจำของสายไม่ว่าจะตัดสายมาใช้งานอย่างไรก็ตาม ค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายจะมีค่าคงที่

นั่นคือถ้าให้สัญญาณจากสายอากาศมายังเครื่องรับเป็นไปได้มากที่สุด จะต้องให้ระบบอยู่ในสภาวะแมทช์ชิ่งกันพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือให้กำลังงานไปถึงโหลดได้ค่าสูงสุด

5.3 การสะท้อนของคลื่นกับการแมทช์ชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

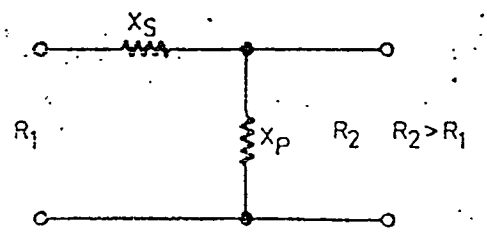
ตามที่กล่าวแล้วว่าสายอากาศจะกระจายคลื่นได้ดีที่สุดหรือเครื่องรับจะรับได้สัญญาณแรงที่สุด จะต้องให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดกับอิมพีแดนซ์ของต้นกำเนิดแมช์กันพอดี ถ้าหากว่าอิมพีแดนซ์ทางโหลดมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ ค่าอิมพีอกนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณต้องมีลักษณะเป็นคอนดูเกทด้วย ในเรื่องสายนำสัญญาณเราจะพบว่ามีสายนำสัญญาณชนิดต่าง ๆ มากมายหลายชนิดแต่ละชนิดก็ให้ลักษณะสำคัญทางอิมพีแดนซ์แตกต่างกันในการใช้กับสายอากาศกับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ถ้าหากว่าสายนำสัญญาณที่ใช้กับตัวสายอากาศหรือเครื่องรับเครื่องส่งมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน การสะท้อนของคลื่นจะเกิดขึ้นทันที นั่นก็คือจะมีพลังงานบางส่วนไปยังโหลดได้ แต่บางส่วนจะสะท้อนกลับมา หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งพลังงานที่รับได้หรือส่งไปจะมีค่าไม่สูงสุด ดังนั้นการที่เราพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของสายจึงเป็นเรื่องจำเป็นมากสำหรับการรับหรือส่ง แต่เรายังมีวิธีแก้ไขในกรณีที่การรับหรือส่งอยู่ในสภาวะไม่แมช์โดยการใส่หรือให้สัญญาณผ่านแมทช์ชิ่งเนทเวอร์ค

5.4 การแมทช์ทางอิมพีแดนซ์ด้วยอุปกรณ์ RLC

ถึงแม้ว่าเทคนิควิธีการแมทช์อิมพีแดนซ์ ด้วยวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ง่ายและให้ผลดีในย่านความถี่วิทยุในแถบความถี่ต่ำเท่านั้น แต่วิธีนี้ก็เป็นวิธีว่าง่ายต่อการออกแบบและใช้ได้ผลดี ซึ่งก็ สามารถอธิบายให้เข้าใจในหลักการทำงานได้โดยง่ายสาเหตุที่การแมทช์ชิ่งด้วยวิธีนี้ใช้ที่ความถี่สูงไม่ได้เพราะค่าอุปกรณ์ที่ใช้คือตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่คงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุล้วน ๆ หรือตัวเหนี่ยวนำล้วน ๆ หาได้ยาก

ในกรณีที่โหลดที่ต้องการมีลักษณะเป็นอิมพีแดนซ์เช่นเยวกับอิมพีแดนซ์ภายในของแหล่งกำเนิดสัญญาณวงจรที่ใช้เป็นตัวแมช์ชิ่งที่ง่าย ๆ แบบหนึ่งคือ วงจรรูปแบบแอล (L section) โดยใช้อุปกรณ์ที่ให้คุณสมบัติเป็นรีแอกแดนซ์สองตัว แต่การใช้วิธีนี้จะทำให้เกิดการต่างเฟสระหว่างสัญญาณจากแหล่งกำเนิดและสัญญาณที่โหลด ซึ่งก็สามารถแก้ไขได้โดยการมช้อุปกรณ์เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัวโดยจัดทำเป็นรูปตัวทีหรือรูปตัวพาย แต่การแมทช์ด้วยอิมพีแดนซ์นี้ควรใช้ต่อเมื่อสัญญาณที่ส่งหรือรับมีเพียงความถี่เดียวเท่านั้น

ตัวอย่างการแมทช์ด้วยรูปแอล



รูปที่ 5.4 การแมทช์ชิ่งรูปตัวแอล

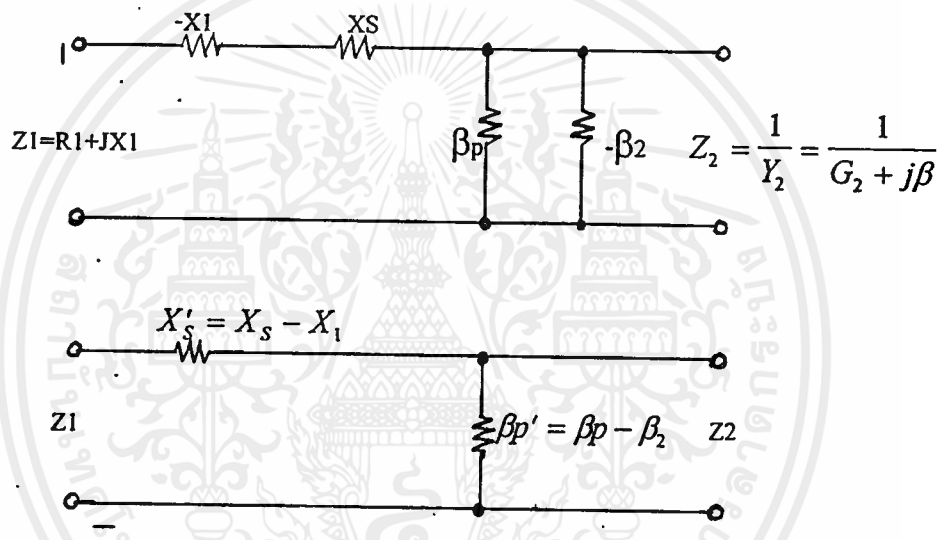
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_P = \pm(R_2 \frac{R_1}{R_2 - R_1}) = -\frac{1}{B_P}$$

$$X_S = \pm(R_1 R_2 - R_1^{\,2})$$

$$\theta = \cos^{-1}(\frac{R_1}{R_2})^{1/2}$$

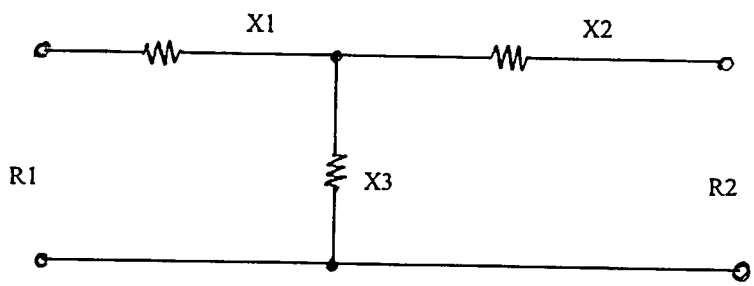
สมการที่ใช้ในการหาค่าตัวอุปกรณ์ที่ใช้ได้แสดงให้เห็นดังรูปข้างบน จะเห็นค่า x คือค่ารีแอกแดนซ์ ซึ่งมีค่าเป็นส่วนกลับของค่าซัสเซฟแดนซ์ B นั่นเอง ค่า x สามารถเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้นั่นเอง ในกรณีเป็นตัวเหนี่ยวนำก็จะได้ค่า x เป็นบวก ถ้าเป็นตัวเก็บประจุก็จะได้ x เป็นลบถ้าหากทราบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดหรือ ของตัวกำเนิดสัญญาณมิใช่เป็นตัวต้านทานล้วน เรามีวิธีการแมทช์ได้อีกแบบหนึ่งดังนี้



รูปที่ 5.5 การแมทช์ชิ่งเมื่อโหลดไม่ได้เป็นค่าตัวต้านทางล้วน

จากรูปข้างบนจะเห็นว่าเราเติมค่า $-x_1$ และ $-\beta 2$ ลงในวงจร ทั้งนี้เพื่อให้ $-x_1$ ไปหักล้างกับค่ารีแอกแดนซ์ทางด้านแหล่งกำเนิดและให้ $-\beta 2$ ไปหักล้างกับค่าซัสเซฟแดนซ์ทางด้านโหลด เมื่อหักล้างแล้ววงจรที่เกิดขึ้นก็จะเป็นตัวต้านทานแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถหาค่าอุปกรณ์มาแทนได้เช่นเดียวกัน ในกรณีที่โหลดและความต้านทานแหล่งกำเนิดเป็นค่าตัวต้านทานล้วน ๆ

วิธีการแมทช์ด้วยรูปตัวทีและรูปตัวพายการออกแบบแมทช์ชิ่งด้วยรูปตัวทีและรูปตัวพาย ระหว่างโหลดที่เป็นตัวต้านทาน และความต้านทานต้นกำเนิดสูตรและการออกแบบแสดงให้เห็นดังรูปที่5.6



รูปที่ 5.6 การแมทช์ชิ่งด้วยรูปตัวแอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_3 = -\frac{\left(R_1 R_2 \right)^{1/2}}{\sin\theta}$$

$$X_1 = \frac{R_1}{\tan} - X_3$$

$$X_2 = -\frac{R_1}{\tan\theta} - X_3$$

รูปแบบตัวที

$$\beta_3 = \frac{(G_1 G_2)^{1/2}}{\sin\theta_2}$$

$$\beta_1 = \frac{G_1}{\tan\theta} - \beta_3$$

$$\beta_2 = \frac{G_2}{\tan\theta} - \beta_3$$

5.5 การแมทช์ด้วยช่วงสายนำสัญญาณยาว (1/4)λ

วิธีการแมทช์ชิ่งด้วยวิธีนี้นับว่าง่ายดีเพราะใช้ความยาวสายที่พอเหมาะ แล้วต่อเชื่อมกันโดยตรงโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นใดประกอบด้วย

ตามที่เราทราบมาแล้วในบทก่อน ๆ ว่า หากตัดความยาวของสายนำสัญญาณ ให้มีขนาดความยาวเพียง (1/2) ของความยาวคลื่น และถ้าให้ปลายด้านหนึ่งลัดวงจร ค่าอิมพีแดนซ์ของสายจะมีค่าเป็นอนันต์และจะไม่ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอีกด้วย อย่างไรก็ดีถ้าหากว่าใช้ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพี แดนซ์ของสายที่เป็นค่าตัวกลางเรขาคณิตยาว (1/4) λ เชื่อมระหว่างโหลดอิมพีแดนซ์และอิมพแดนซ์ และอิมพีแดนซ์ทางด้านแหล่งกำเนิดสัญญาณมาต่อเชื่อม ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวแมทช์ชิ่งได้ นั่นคือค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่นำมาทำเป็นตัวแมช์ชิ่งจะมีสูตรดังนี้

$$Z_{ms} = \sqrt{Z_a Z_1}$$

เมื่อ Z_{ms} คือลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายที่เป็นตัวแมทช์ชิ่ง

Z_a คืออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ

Z_1 คืออิมพีแดนซ์ของตัวเครื่องส่ง

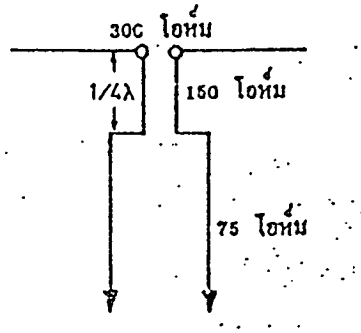
จากรูปที่ 5.7 เป็นตัวอย่างการต่อแมทช์ชิ่งโดยสมมติว่าด้วยสายอากาศเป็นชนิดที่มีอิมพีแดนซ์ 300 โอห์ม เพื่อต่อเข้ากับเครื่องรับ ทีวีสีที่มีอิมพีแดนซ์เพียง 75 โอห์ม/ค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่ต้องการคือ

$$Zms = \sqrt{75 \times 30}$$

= 145 โอห์ม

ซึ่งก็พอเหมาะที่เราจะใช้สายขนาด 150 โอห์มดังแสดงในรูปที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 การแมทช์ชิ่งด้วยสายยาว(1/4)λ

ความยาวของสายที่มีขนาด(1/4) λ สามารถคำนวณได้จากสูตร (4.8)

$$\frac{246 \times Vc}{f} \quad \text{(ฟุต)}$$

เมื่อ f คือค่าความถี่ของสัญญาณ

VC คือค่าคงตัวของความเร็ว (ใช้ค่าประมาณ 0.77 สำหรับสายจำพวกทวินลีด)

ในบางครั้งการที่เราจะหาขนาดของสายมาใช้งานทำใช้งานทำได้ยาก เพราะค่าอิมพีแดนซ์ของสายมีค่าไม่ต่อเนื่องตลอด ดังนั้นถ้าคำนวณได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายแล้วก็อาจจะหาสายมาใช้งานไม่ได้ แต่เราก็ยังมีวิธีแก้ไขได้โดยการใช้ท่ออลูมิเนียมโดยใช้แทนอลูมิเนียมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง d วางห่างกัน D โดยค่าอิมพีแดนซ์ของอลูมิเนียมคู่มีค่าเป็น

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{K}} \log \frac{2D}{d}$$

ค่าความยาวของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ความใช้ความยาว

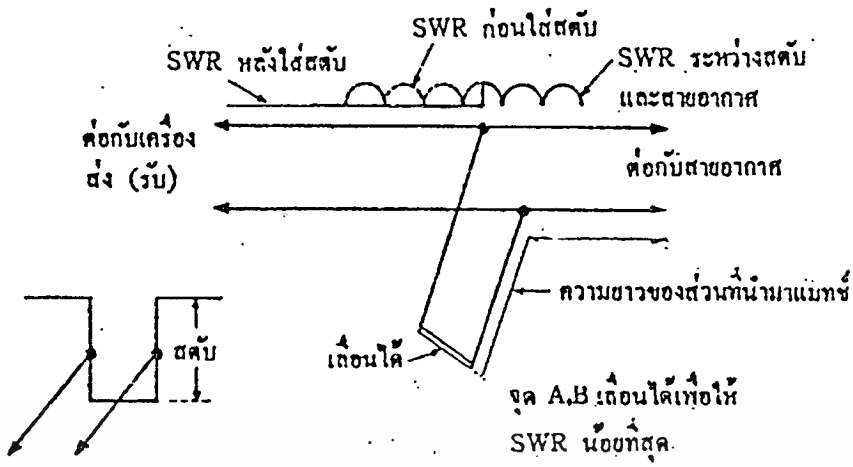
$$\text{ความยาว} \quad \frac{242}{f(MHz)} \quad \text{หน่วยฟุต}$$

5.6 การแมทช์ชิ่งด้วยสตับ

เมื่อนำสายนำสัญญาณสองเส้นมาต่อกันโดยที่อิมพีแดนซ์ของสายไม่เท่ากัน การสะท้อนของคลื่นย่อมเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่า SWR ของการส่งหรือรับมีค่าสูง ซึ่งจะทำให้ส่วนของสัญญาณที่เป็นรีแอกตีฟปรากฏขึ้นมากมาย วิธีหนึ่งที่แก้ไขปัญหานี้ได้ก็คือใช้ *สตับ* ซึ่งก็ต้องมีการหาขนาดของสตับและวิธีการออกแบบ

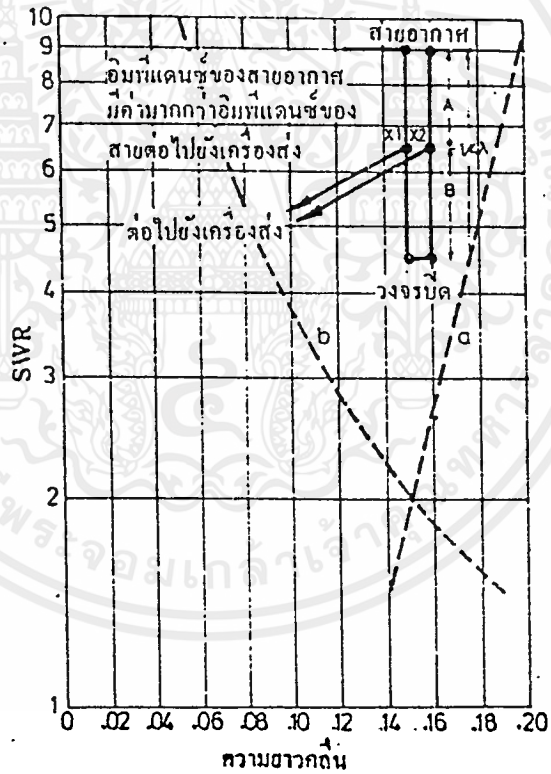
ความหมายของคำว่าสตับก็คือ สายที่นำมาต่อขนาดกับสายนำสัญญาณเพื่อให้อิมพีแดนซ์รวมของสายแมทช์กันได้กับต้นกำเนิดสัญญาณหรือโหลด ถ้าพิจารณาในแง่ของการสะท้อนของคลื่นถ้าหากไม่มีสตับการเคลื่อนที่เหนี่ยวนำของคลื่นในสายนำสัญญาณจะเสมือนเป็นคลื่น ๆ ซึ่งให้ค่า SWR สูง แต่ครั้นเมื่อนำสตับมาต่อก็จะทำให้คลื่นในสายราบเรียบดังรูปที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 สตับที่ในการแมทช์ชิ่ง

การคำนวณหาขนาดของสตับทั้งค่าความยาวและอิมพีแดนซ์แสดงให้เห็นดังกราฟสองรูปดังรูปที่ 5.9 และ 5.10



รูป 5.9 แสดงการหาความยาวสตับ ไปยังเครื่องส่งปิดวงจร

วิธีการใช้กราฟ

1. หาค่า SWR ของสายด้วยวิธีการคำนวณการไม่แมทช์ของสาย ซึ่งอาจจะหาจากวิธีการวัดด้วย Two way Wattmetre หรือ SWR มิเตอร์ก็ได้

2. ถ้าหากว่าโหลดมีค่าความต้านทานสูงกว่าอิมพีแดนซ์ของสายที่ใช้สตับ จะใช้สตับชนิดลัดวงจรดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ถ้าหากว่าโหลดมีค่าความต้านทานน้อยกว่าค่าความต้านทานของสายที่ใช้ทำสตับให้ใช้กราฟ ในรูปที่ 5.10

4. จากค่า SWR ที่รู้ค่าให้เลือกค่า A บนกราฟ

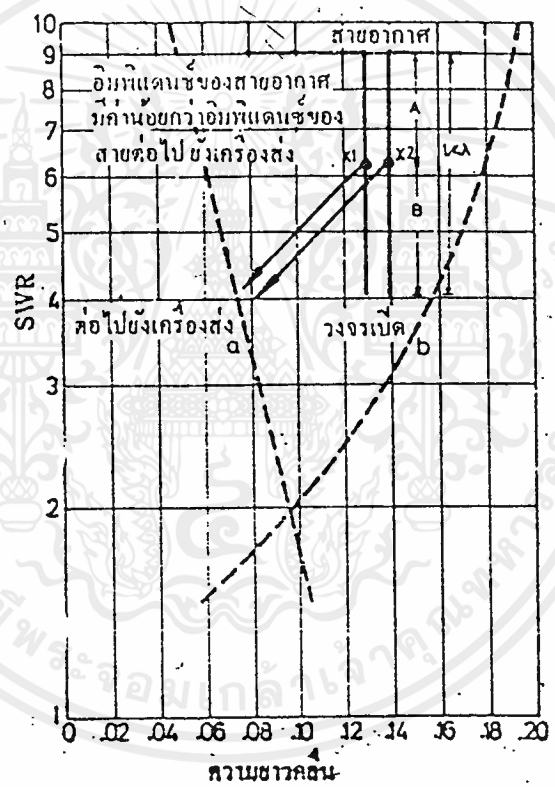
5. จากค่า SWR คำนวณหาค่าความยาว B จากกราฟ

6. คำนวณหาค่า A เป็นฟุตได้จากสูตร

$$A = \frac{984 \times Vc}{f} \times a$$

เมื่อ f มีหน่วยเป็น (MHz)

7. คำนวณหาค่า B เป็นฟุตได้จากสูตร



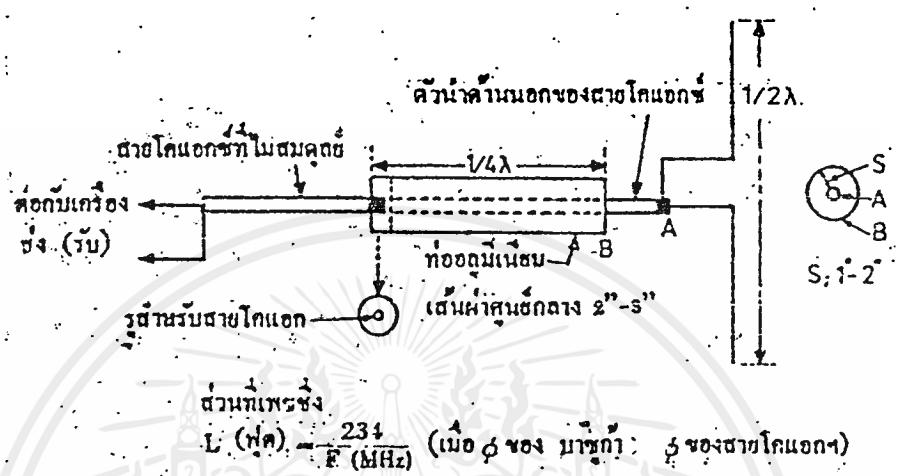
รูปที่ 5.10 แสดงความยาวสตับ ไปยังเครื่องส่งเปิดวงจร

5.7 ใช้บางส่วนของสายนำสัญญาณเป็นตัวแมช์ชิ่ง

เมื่อเราใช้สายที่มีอิมพีแดนซ์ที่มีค่าไม่เท่ากับสายอากาศ เช่น ใช้สายนำสัญญาณ 70 โอห์ม ใช้กับสายอากาศอาล์ฟเวฟไดโพล ซึ่งย่อมทำให้เกอดการสะท้อนของคลื่น การสะท้อนของคลื่นมักจะเหนี่ยวนำออกมาภายนอกในกรณีที่ค่าแรงดันสแตนดิ้งเวฟมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งก็ทำให้เกิดคลื่นในลักษณะในแนวดิ่งเกิดขึ้นคลื่น ในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นจากสายนำสัญญาณนี้จะทำให้สายนำสัญญาณที่ใช้กันตัวสายอยู่ในสภาพที่ไม่แมทช์กันมากยิ่งขึ้น วิธีที่แก้ไขได้เพื่อให้สภาวะการแมทช์เกิดดีขึ้นทำได้ดังนี้

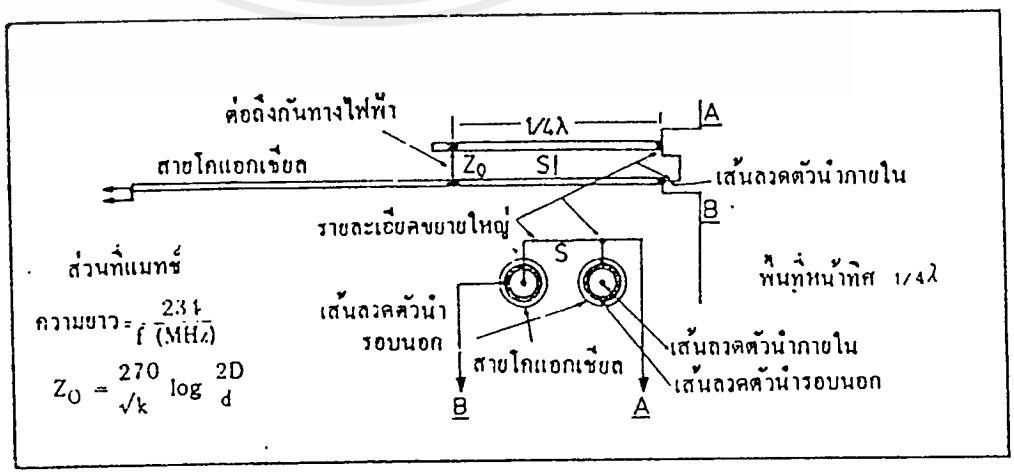
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บาซูก้าบาลัน บาซูก้า บาลันเป็นวิธีหนึ่งในการช่วยทำการแมทช์สายดีขึ้น สาเหตุที่เรียกว่าบาซูก้า ก็เพราะว่ารูปร่างที่ใช้งานมีลักษณะเหมือนกับบีนบาซูก้า โดยใช้ท่ออลูมิเนียมที่มีความยาว (¼)λ สวมใส่สายนำสัญญาณด้วยให้ตอนล่างของท่ออลูมิเนียม เชื่อมติดกับกราวนด์ของสายนำสัญญาณ ท่อที่ใช้ควรจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 1-2 นิ้วดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 บาซูก้า บาลัน

บาลันชนิดฮาล์ฟเวฟบาลันชนิดตัวนำขนานความยาว(1/4)λ บาลันชนิดบาซูก้ามีข้อเสียตรงที่ จะใช้ได้กับความถี่ที่ทำให้ความยาวของตัวบาลันเท่ากับ (1/4) จริง ๆ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับความถี่สูงๆ คือย่านวีเอชเอฟและย่านยูเอชเอฟ ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือต้องใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่จึงจะทำให้รูปร่างใหญ่โต ทางแก้ไขและให้ผลดีโดยใช้บาลันดังรูปที่ 5.12 โดยใช้ตัวนำที่มีความยาวขนาด(1/4) λ วางขนานกับสายนำสัญญาณ ส่วนปลายสุดของแท่ง ตัวนำที่วางขนานเชื่อมต่อติดกับกราวนด์ของสายโคแอกซ์ดังในรูปที่ 5.12



รูปที่5.12 แสดงบาลันชนิดตัวนำขนานความยาว(1/4)λ

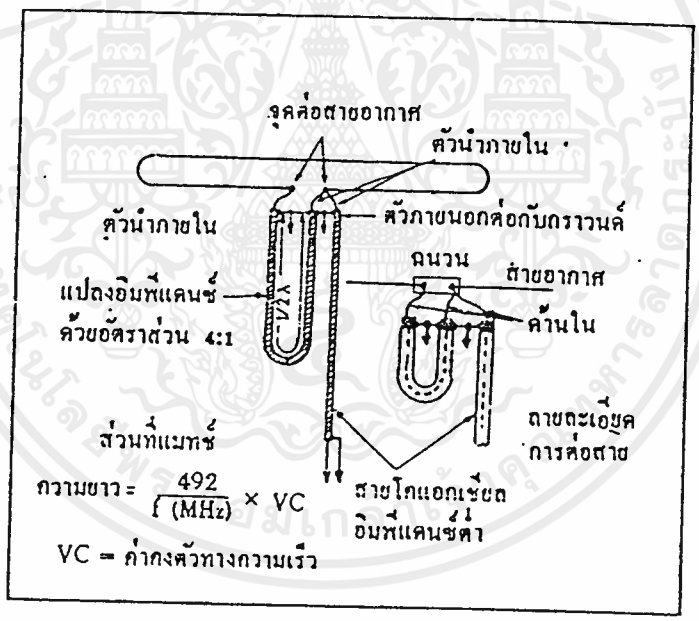
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเมื่อทำการแมทช์แล้วจะมีค่าซึ่งหาได้จากสูตร

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{K}} \log \frac{2D}{d}$$

ซึ่งก็คำนวณให้พอเหมาะกับสายอากาศได้แต่ความยาวของท่ออลูมิเนียมโลหะต้องมีความยาวตามสูตร $\frac{234}{f(MHz)}$ มีหน่วยเป็นฟุตด้วย

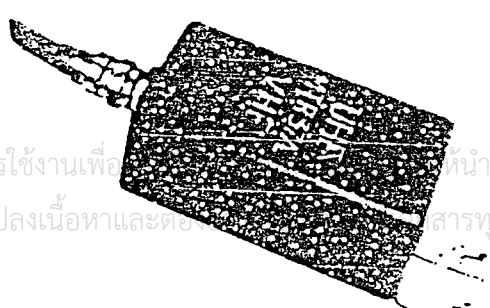
บาลันชนิดฮาล์ฟเวฟ ในการใช้บาลันแบบก่อนเราทำให้ตัวสายนำสัญญาณมีขนาดอิมพีแดนซ์เท่ากับขนาดของสายอากาศ ซึ่งก็เป็นการแมทช์ด้วยอัตราส่วน 1:1 นั่นเอง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการทำให้สายนำสัญญาณไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดสซ์รวมนั่นเอง ส่วนบาลันที่จะกล่าวถึงใหม่นี้จัดรูปขึ้นดังรูปที่ 5.13 โดยทำหน้าที่แมทช์ระหว่างสายได้เป็นอย่างดี แต่จะให้ค่า อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้วยต่าอัตราส่วน 4:1 ซึ่งเหมาะอย่างยิ่ง ในการใช้เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ในระบบสายอากาศคือจาก 75 โอห์ม แต่ก็มีข้อเสียที่ให้คุณสมบัติตอบสนองต่อความถี่ในช่วงแคบๆ เท่านั้น



รูปที่ 5.13 บาลันชนิดฮาล์ฟเวฟ

5.8 หม้อแปลงบาลัน

หม้อแปลงบาลันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์กันมากที่สุด เพราะมีขนาดเล็ก ราคาถูก ติดตั้งง่ายและใช้ได้ผลดี หลักการของบาลันแบบนี้ก็เหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 5.14 หม้อแปลงบาลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ขดลวดพันรอบแกนเฟอร์ไร์ท แต่เกรดของฟอร์ไร์ทต้องใช้ได้ดีที่ความถี่ที่ต้องการ เช่น ถ้าใช้ในความถี่วีเอชเอฟ เฟอร์ไรท์ต้องให้ผลตอบสนองได้ตลอดย่านความถี่นี้ โดยปกติการเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ก็คงใช้หลักการเดียวกับหม้อแปลง แต่จำนวนรอบที่พันรอบเฟอร์ไรท์จะมีค่าเพียงไม่กี่รอบเท่านั้น

5.9 สรุป

การแมทช์ชิ่งระบบสายอากาศมีด้วยกับหลายวิธีแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน โดยปกติแล้วการเลือกใช้งานจะต้องคำนึงถึงเหตุผลหลายประการด้วยกัน ทั้งทางด้านรูปร่าง ความเหมาะสม ราคา และคุณภาพของการรับอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การออกแบบสายอากาศทีวีแบบลอกเพอริโอดิค

6.1 บทนำ

ในการเลือกใช้สายอากาศจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ประกอบกันหลายอย่างเช่น

ก) **ความเข้มของสัญญาณที่บริเวณที่เราอาศัยอยู่ประมาณเท่าไร** (จะไม่เท่าสถานีส่งเนื่องจากความสูญเสียอันเนื่องจากกการเคลื่อนที่ของคลื่น ระยะทางเป็นต้น) เป็นข้อมูลให้รู้ว่าควรให้สายอากาศที่มีอัตราขยายเท่าไร

ข) **รูปแบบของการรับสัญญาณของสายอากาศของเครื่องรับควรเป็นลักษณะใด** ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งของเครื่องรับ และจำนวนของสถานีส่งในบริเวณเครื่องรับ เพื่อให้รับได้มากสถานนีและมีประสิทธิภาพที่ดีด้วย เช่น ถ้าอยู่ในบริเวณกลางเมืองกรุงเทพฯ สายอากาศก็ควรมีเพทเทอร์นที่มีโลปมากเกือบรอบทิศทาง ถ้าเป็นสายอากาศที่ใช้ใน ต่างจังหวังแล้วต้องการรับสัญญาณจากกรุงเทพ เพทเทอร์นที่มีโลปมากเกือบรอบทิศทาง ถ้าเป็นสายอากาศที่ใช้ในต่างจังหวัดแล้วต้องการรับสัญญาณจากรุงเทพฯ เพทเทอร์นของสายอากาศเครื่องรับก็ควร มีทิศทางเดียว (มี beam-width แคบ) เป็นต้น

ค) **ย่านความถี่ที่เราต้องการรับ** เช่น ถ้าต้องการสายอากาศเอฟเอ็มเพื่อใช้งานในต่างจังหวัดเพื่อรับสัญญาณจากสถานีส่งในกรุงเทพฯ ก็ควรใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง ทิศทางการรับแคบ หรือต้องการสายอากาศทีวีแบบรับได้ทุกความถี่ (broadband) คือเป็นสายอากาศตัวเดียวสามารถรับได้หลาย ๆ สถานี หรือต้องการสาย อากาศทีวีที่รวมทั้งเอฟเอ็มด้วย (ความถี่ของการส่งทีวีอยู่ในย่านวีเอชเอฟซึ่งจะรวมเอฟเอ็มอยู่ด้วย)เหล่านี้เป็นต้น

แต่คงเป็นไปได้ยากที่จะให้สายอากาศตัวเดียวกันมีคุณสมบัติทุกอย่างตามที่เราต้องการทั่วไป เรา การให้สายอากาศมีอัตราขยายสูง สามารถรับสัญญาณได้หลายสถานี มี ทิศทางการรับแคบ ก็มิได้หมายความว่าสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงจะใช้งานได้ดีเสมอไป

5.2 สายอากาศแบบไดโพลหลาย ๆ ตัว

โดยทั่วไปเราต้องการที่จะใช้สายอากาศเครื่องรับที่สามารถรับความถี่ได้แบนด์กว้างหลาย ๆ สถานีโดยคำนึงถึงเศรษฐกิจที่จะใช้สายอากาศน้อยตัวที่สุด

สายอากาศแบบไดโพลตัวเดียวมีเพทเทอร์น เป็นลักษณะคล้ายลูกโดนัทจะเป็นลักษณะวงกลมรอบ ๆ ตัวของไดโพล (เมื่อไดโพลวางในแนวดิ่งแล้วมองจากปลายของไดโพลด้านใดด้านหนึ่ง) ในกรณีจะให้เพนเทอร์นของไดโพลไปใน 2 ทิศทางจะกระทำได้โดยใส่ตัวช่วยประกอบไดโพลซึ่งจะทำให้อัตราขยายรวมของสายอากาศดีขึ้น แต่ก็ยังมิได้มีอัตราสูงสุดเพราะมีขอบเขตจำกัด ยังมีอีกวิธีหนึ่งมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าคือ การนำเอาไดโพลอีกตัวหนึ่ง (หรือมากกว่า 1 ตัว) เพิ่มเข้าไปอีก ซึ่งไดโพลที่เพิ่มเข้าไปจะรีโซแนนซ์กับความถี่ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการโดยทั่ว ๆ ไปในการออกแบบสายอากาศแบบตัวกระจายคลื่น (radiator ก็คือไดโพล วางห่างไม่เท่ากันคือ) ต้องพิจารณา

ก) รูปแบบการรับคลื่น ซึ่งตัวกำหนดรูปแบบ คือ ระยะห่างระหว่างไดโพลแต่ละตัว

ข) พยายามทำให้โลปด้านข้าง (คือไมเนอร์โลปที่ไม่ต้องการ) มีค่าน้อยที่สุด

ค) ทิศทางการรับแคบ

การออกแบบที่ถูกหลักด้วยวิธีเพทเทอร์นเบชั่น (perturbation) คือเปลี่ยนตำแหน่งของตัวไดโพลแต่ละตัว ไปแล้วสังเกตดูว่าตำแหน่งใดที่สามารถให้เพทเทอร์นได้ดีที่สุด เริ่มต้นด้วยตำแหน่งของตัวไดโพลอย่างประมาณ ผลการศึกษาพบว่าไซด์โลปมีค่าน้อยที่สุดเมื่อระยะเฉลี่ยระหว่างไดโพลแต่ละตัวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.35λ-0.95λ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของแผงสายอากาศและจำนวนไดโดลที่ใช้) และในการที่จะทำให้ไซด์โลปลดลงนั้น ต้องเพิ่มความหนาแน่นของตัวไดโพลบริเวณใจกลางของแผงสายอากาศให้มีค่าสูงกว่าบริเวณปลาย ช่วงความถี่ของการรับจะลดลงเมื่อไซด์โลปมีค่าสูงขึ้นและการเพิ่มความยาวของแผงสายอากาศจะมีผลทำให้ช่วงความถี่ของการรับลดลงเช่นกัน โดยทั่วไปแล้วไดโพลยิ่งมากเท่าใดเพทเทอร์นที่ได้รับจะยิ่งดีขึ้นเท่านั้น

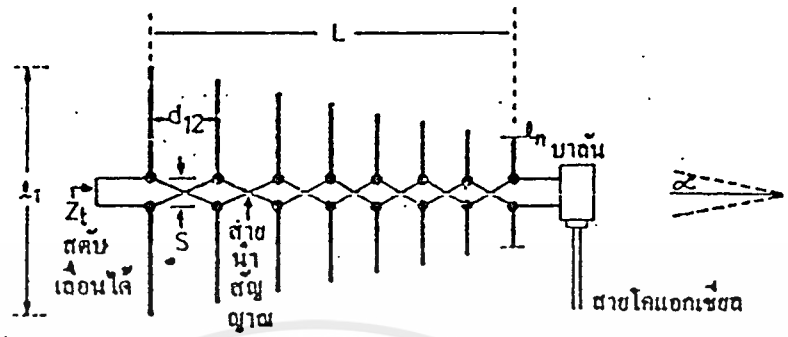
ในการใช้ไดโพลหลายๆตัวจะมีปัญหาที่ตามมาคือ เราจะป้อนให้สายส่งสัญญาณระหว่างไดโพลทั้งหมดในสายอากาศตัวนั้นอย่างไร ในการใช้ไดโพลหลายๆตัวนี้จะทำให้อัตราขยายของสายอากาศสูงขึ้น สามารถใช้งานในย่านความถี่กว้างขึ้น และจำนวนชิ้นส่วน(element) ของสายอากาศแบบนี้จะน้อยกว่าสายอากาศที่แต่ละความถี่หลายตัวมาสแตคกัน ทั้งราคาก็แตกต่างกันด้วยแต่ส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทยจะเป็นแบบยากิ นอกจากนี้ยังมีอีกแบบหนึ่ง ซึ่งยังไม่ค่อยเป็นที่รู้จักกันนักโดยเฉพาะในย่านความถี่โทรทัศน์และเอฟเอ็ม คือ สายอากาศแบบลอกเพอริโอดิค

6.3 สายอากาศแบบลอกเพอริโอดิคไดโพล(LPDA)

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับสายอากาศแบบยากิคือ เมื่อเพิ่มจำนวนชิ้นส่วน (element) แล้วอัตราขยายจะสูงขึ้นแต่ช่วงกว้างของความถี่จะไม่เพิ่มขึ้น หรือบางครั้งก็ลดลงดังนั้นจึงเกิดสายอากาศแบบลอกเพอริโอดิคขึ้นในการแก้ปัญหาช่วงกว้างของความถี่นั้นกระทำโดยใช้หลักมุมเท่ากัน(equiangular principle) คือรูปร่างของสายอากาศขึ้นกับมุมจะไม่ขึ้นกับความถี่ สายอากาศแบบลอกเพอริโอดิคไดโพลเป็นที่นิยมออกแบบสำหรับทีวีและเอฟเอ็ม ทิศทางของการกระจายคลื่นจะมีทิศทางไปยังยอดของมุมแหลมเมื่อใช้เป็นสายอากาศส่ง ความถี่ของสายอากาศแบบนี้จะถูกจำกัดโดยไดโพลตัวนอกสุดที่ยาวที่สุด คือยาว $\lambda/2(492/f)$ ไดโพลตัวถัดไปจะมีความยาวสัมพันธ์กับไดโพลตัวที่ยาวที่สุดอย่างสเกลลอกฯ ไดโพลทั้งหมดจะถูกป้อนสัญญาณ (feed) ที่จุดกึ่งกลางของแต่ละตัวเพื่อให้มุมแตกต่างกัน 180 องศา ชิ้นส่วนตัวที่ยาวที่สุดจะมีกระแสมากที่สุด เมื่อความถี่มากขึ้น ชิ้น(element) กลางจะมีกระแสมากที่สุดและที่ความถี่สูงสุด ชิ้นที่สั้นที่สุด ซึ่งสามารถออกแบบให้ใช้งานในช่วงความถี่อัตราส่วนของความถี่มากที่สุดต่อความถี่น้อยสุดเป็น 2:1 หรือมากกว่า สายอากาศแบบลอกฯ ที่ดีสามารถออกแบบให้ใช้งานได้ตั้งแต่ย่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่แบนด์คลื่นสั้นจนถึงย่านยูเอชเอฟ รูปที่ 6.1 แสดงสายอากาศแบบลอกเพอริโอดิคไดโพลซึ่งประกอบด้วยไดโพลที่ความถี่ความยาวและระยะห่างแตกต่างกันและมีตัวป้อนสัญญาณทุกชิ้น (element)



รูปที่ 6.1 สายอากาศชนิดลอกเพอริโอดิคยากิ

6.3 การออกแบบสายอากาศแบบ LPDA

จากที่ได้กล่าวมาแล้วสายอากาศแบบลอกฯ มีข้อดีหลายประการ อัตราขยายสูงอินพุทอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณตามที่ต้องการได้ อัตราส่วนโลปหน้าต่อโลปหลัง (front-to-back) สูงความกว้างของช่วงความถี่กว้าง ซึ่งค่าที่กล่าวเหล่านี้เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมากเมื่อความถี่ของการทำงานเปลี่ยนไป(ซึ่งจะแตกต่างกับสายอากาศแบบอื่นๆ เมื่อความถี่รีโซแนนซ์เปลี่ยนไปจะทำให้ SWR เพิ่มขึ้น)ซึ่งค่าที่กล่าวมาข้างต้นมีความสัมพันธ์กันอย่างสเกลล็อกเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

ก่อนอื่นจะกล่าวถึงตัวย่อและความหมายเพื่อสะดวกในการคำนวณ

B_o = ช่วงกว้างของความถี่ของการใช้งาน(operating bandwidth)

B_S = ช่วงกว้างของความถี่สำหรับโครงสร้าง (bandwidth for structure)

B_{ar} = ช่วงกว้างของความถี่ของบริเวณแอ็กตีฟ (bandwidth of the active region)

τ = ตัวคงที่ในการออกแบบ (design constant)

σ = ตัวคงที่ระยะห่างสัมพันธ์ (relativee spacing constant)

σ_{opt} = ค่ามากที่สุดของ (optimum ralre for σ)

$\propto$ = มุมที่มีค่าครึ่งหนึ่งของมุมยอด (apex half -angle)

Z_o = ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวพีดเดอร์ของสายอากาศ (antenna - feeder impedance)

R_o = ค่าเฉลี่ยความต้านทานของกระจายคลื่น (the mean rediation resistance level)

Z_a = ค่าเฉลี่ยอิมพีแดนซ์ประจำของไดโพล (average characteristic impedance of a depole)

σ' = ค่าระยะห่างเฉลี่ย (mean spacing factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_l = ความถี่ต่ำสุดของการใช้งาน (lowest frequency, MHz)

f_h = ความถี่สูงสุดของการใช้งาน (highest frequency, MHz)

l = ความยาวของไดโพล (element length)

d = ระยะห่างระหว่างไดโพล (element spacing)

1) เลือกความกว้างของความถี่ที่ต้องการใช้งานตามที่เราต้องการ ระหว่างความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุด ใช้สมการที่ 5 จะได้ว่า B

2) เลือก τ และ σ เพื่อให้ได้อัตราขยายตามที่เราต้องการจากรูปที่ 6.3 โดยค่า τ และ σ ที่เหมาะสมควรเป็น

$$0.8 < \tau < 0.98$$

$$0.5 < \sigma < \sigma_{opt}$$

ค่าของ σ_{opt} อาจคำนวณได้จากสมการที่ 8

3) หาค่ามุม α จากสูตร $\cot\alpha = \frac{4\sigma}{1-\tau}; \alpha = \tan^{-1}(\frac{1-\tau}{4\sigma})$

4) หาค่า B_{ar} จากรูปที่ 6.2 โดยใช้ α และ τ จากข้อ 2

5) คำนวณค่า B_s จากสมการที่ 4

6) คำนวณความยาวของบูม, L, จำนวนของไดโพล N และความยาวของไดโพลตัวที่ยาวที่สุดจากสูตร

$$L = \frac{1}{4}(1-\frac{1}{Bs})\cot\alpha \cdot \lambda_{max}$$

$$N = 1 + \frac{\log_{10} Bs}{\log_{10}(\frac{1}{\tau})}$$

$$l_1 = \frac{492}{f_1} \quad \text{เมื่อ } \lambda_{max} = \frac{984}{f_1}$$

ดูว่าความยาว L, N, l_1 เป็นค่าที่เหมาะสมกับความต้องการของเราหรือไม่ ถ้าความยาวของบูมยาวเกินไป เพิ่มมุม α ทีละ 5 องศาและคำนวณซ้ำจากข้อ 2-6

7) หาค่าสตับ Z_t ที่ความถี่แบนด์ 3-30 MHz (HF) ปิดวงจรตัวไดรเวนที่ยาวที่สุดด้วยเส้นลวดยาว

6 นิ้วทำเป็นวงจรปิด สำหรับความถี่วีเอชเอฟและยูเอชเอฟคำนวณจาก

$$Z_t = \lambda_{inax}/8$$

8)ในที่สุดค่า τ และ σ ก็จะได้ตามที่ต้องการ คำนวณ Z_o จากสมการที่ 9 เพื่อที่จะได้รับ ทราบว่าเราต้องใช้บาลันในการแมทช์ซิ่งเท่าไร โดยหาค่า R_o ได้จากรูปที่ 6.4 และหา ค่า Z_s ได้จากรูปที่6.5สมการที่ 11 จากรูปที่ 6.5 ค่า h/a ต้องเลือกความยาวครึ่ง หนึ่งของไดโพล (h เป็นความของครึ่งหนึ่งของไดโพล a เป็นรัศมีของตัวนำ)ที่ความถี่ ตรงกลางของของแบนด์ได้ใกล้เคียง $\lambda/4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) คำนวณค่าความยาวของไดโพลตัวที่เหลือจากสมการที่ 2

10) คำนวณค่าระยะห่างระหว่างไดโพลแต่ละตัวจากสูตร

$$d_{12} = \frac{1}{2}(l_1 - l_2)\cot\alpha$$

เมื่อ d_{12} เป็นระยะห่างระหว่างไดโพลตัวยาวที่สุดกับไดโพลตัวถัดไปแล้วคำนวณระยะห่างของไดโพลตัวที่เหลือจากสูตร

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาว ความถี่ และระยะห่างจะแสดงในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$f_n = \frac{f_1}{\tau^{n-1}} \qquad (1)$$

$$l_n = \tau d_{(n-1)} \qquad (2)$$

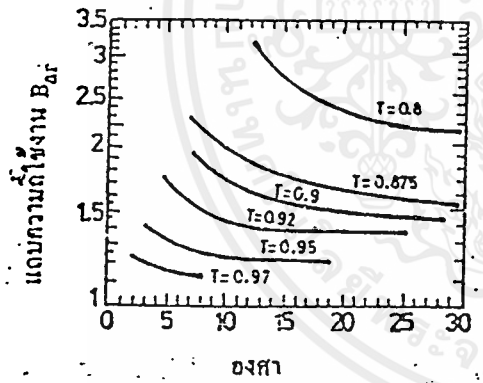
$$d_{n-1,n} = \tau d_{n-2,n-1} \qquad (3)$$

เมื่อ n =1,2,3,.....

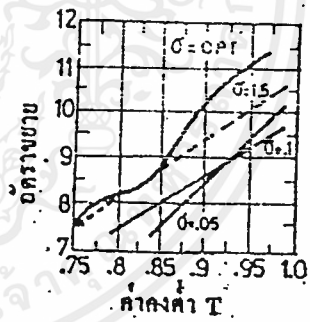
$$\tau = \frac{l_n}{l_{n-1}} = \frac{d_{n-1,n}}{d_{n-2,n-1}}$$

$$B_S = B \times B_{ar} \qquad (4)$$

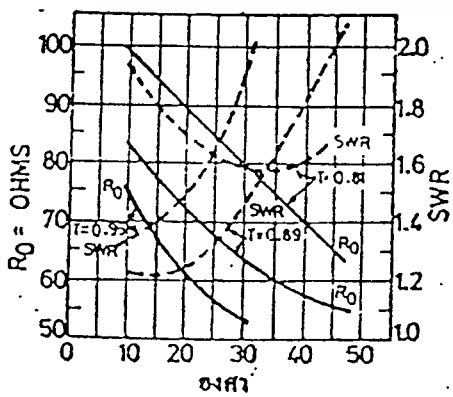
$$B = \frac{f_n}{f_1} \qquad (5)$$



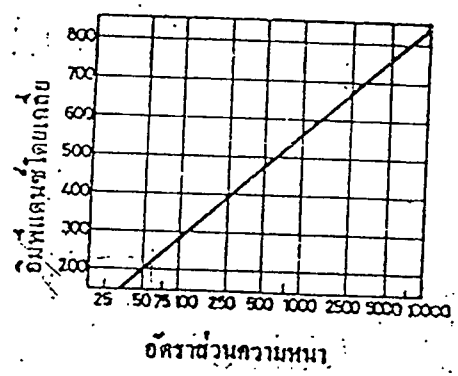
รูปที่ 6.2 แสดงความถี่ที่ใช้งานกับ ∝



รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราขยายกับค่าคงตัว τ



รูปที่ 6.4 แสดงเอาท์พุทอิมพีแดนซ์กับ ∝



รูปที่ 6.5 แสดงอิมพีแดนซ์โดยเฉลี่ยกับอัตราส่วน h/a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B_{gr} จะแปรกับ τ และ $\propto$ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 อัตราขยายของ LFDA หาโดย τ และ σ σ_{opt} จะเกิดขึ้นในช่วงของ τ ระหว่าง $0.8 < \tau < 1.0$ ซึ่งจะให้ค่าอัตราขยายมากที่สุด ในการเพิ่มอัตราขยายทำได้โดยใช้ σ_{opt} และ τ ใกล้เคียง 1.0 (เช่น 0.98) ซึ่งจะเป็น 3dBi เมื่อเทียบกันค่า σ น้อยที่สุด (= 0.05) และ τ =0.9 ดังแสดงในรูปที่ 6.3

การเพิ่ม τ หมายถึงการเพิ่มจำนวนขึ้นมากขึ้น และถ้าใช้ σ_{opt} จะทำให้บูมยาวขึ้น ที่อัตราขยายสูง (8.5dBi) LPDA ที่แบนด์ ความถี่สูง (HF) โดยใช้ τ = 0.9 และ σ = 0.05 ความสัมพันธ์ระหว่าง τ , $\propto$ คือ

$$\sigma = \frac{1}{4}(1-\tau)\cot\alpha \qquad (6)$$

$$\sigma = \frac{d_{n-1,n}}{2l_{n-1}} \qquad (7)$$

$$\sigma_{opt} = 0.258 - 0.066 \qquad (8)$$

การป้อนสัญญาณจากสายอากาศแสดงในรูป 8.1 ตัวไดรเวนแต่ละตัวจะมีเฟส 180° ซึ่งกันและกันกระทำทางปฏิบัติโดยต่อสลับขั้วดังแสดงในรูป

$$Z_0 = \frac{R^2{}_0}{8\sigma Z_a} + R_0\sqrt{\left(\frac{R_0}{8\sigma Za}\right)^2 + 1} \qquad (9)$$

$$Z_a = 120(\ln\frac{h}{a} - 2.255) \qquad (10)$$

$$\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{\tau}} \qquad (11)$$

$$Zt = \frac{\lambda_{max}}{8} \qquad (12)$$

รูปที่ 8.7 จะเห็นว่า R_o จะลดลงเมื่อ τ และ $\propto$ เพิ่มขึ้น VSWR จะมีค่าน้อยสุด (เมื่อเทียบกับ R_o) ประมาณ 1.1-1 ที่ σ_{opt} และมีค่า 1.8-1 ที่ = 0.05 (เมื่อใช้สายส่งแบบ RG-8/U 52 โอห์ม และ RG-11/U 72 โอห์ม แบบโคแอกเชี่ยล ค่า Z_o จะสามารถหาได้ในแต่แบนด์ ควรจะเลือกใช้บาลันและสายให้เหมาะสม เช่น ถ้า Z_o = 100 โอห์ม ถ้าใช้สายโคแอกเชี่ยล 72 โอห์มอาจใช้บาลัน 1:1 ถ้า Z_o = 220 โอห์มเลือกบาลัน 4:1 เมื่อใช้โคแอกเชี่ยลแบบ 52 โอห์ม สำหรับ Z_t (ดูรูปที่ 8.1) ที่ใช้ควรมีความยาวไม่เกิด λ_{maz} /8 เพื่อช่วยทำให้อัตราส่วน F/B (front-to-bach) สูงขึ้นสำหรับความถี่ต่ำสุดที่ใช้งาน

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะใช้กราฟจากข้อมูลรูปที่ 6.2-6.5 ซึ่งก็สามารถใช้คำนวณหาขนาดของสายอากาศที่มีความกว้างของช่วงคลื่น เท่าใดก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

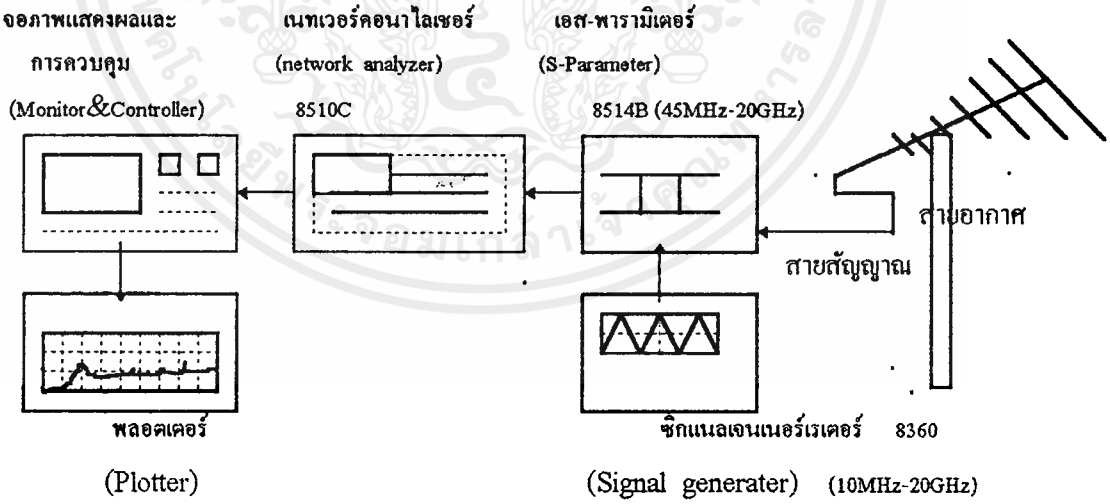
บทที่ 7
การวัดคุณสมบัติของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF

7.1 บทนำ

สายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF นั้น ถึงแม้ความถี่จะสูงขึ้นและความยาวคลื่นจะสั้นลงก็ตาม ผลกระทบจากพื้นดินหรือฝาผนังก็ยังเป็นปัญหาที่จะทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนไปได้ ดังนั้นการวัดก็ต้องให้สูงจากพื้นโลก และห่างไกลจากวัตถุสะท้อนคลื่นมากพอสมควร และถ้าทำการวัดในห้องไร้คลื่นสะท้อนได้ก็จะเป็นการดีที่สุด

7.1.1 การวัดอินพุตอิมพีแดนซ์ และ SWR ของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF

การวัดอินพุตพีแดนซ์ของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF นั้น สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนตเวิร์กเป็นต้น ซึ่งเครื่องวัดนี้จะอาศัยการวัดขนาดและเฟสของคลื่นที่เข้าสู่สายอากาศและคลื่นที่สะท้อนกลับจากสายอากาศ แล้วนำมาเปรียบเทียบและคำนวณออกมาเป็นค่าอิมพีแดนซ์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 7.1 วิธีนี้ก็จะใช้การอ่านค่าอัตราส่วนของคลื่นยืน แล้วนำข้อมูลที่วัดอิมพีแดนซ์มาพลอตออกมาเป็นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ กราฟแสดงSWR และคลื่นที่สูญเสียจากการสะท้อนกลับ(Return loss)การจัดเครื่องมือและอุปกรณ์แสดงดังรูปต่อไปนี้

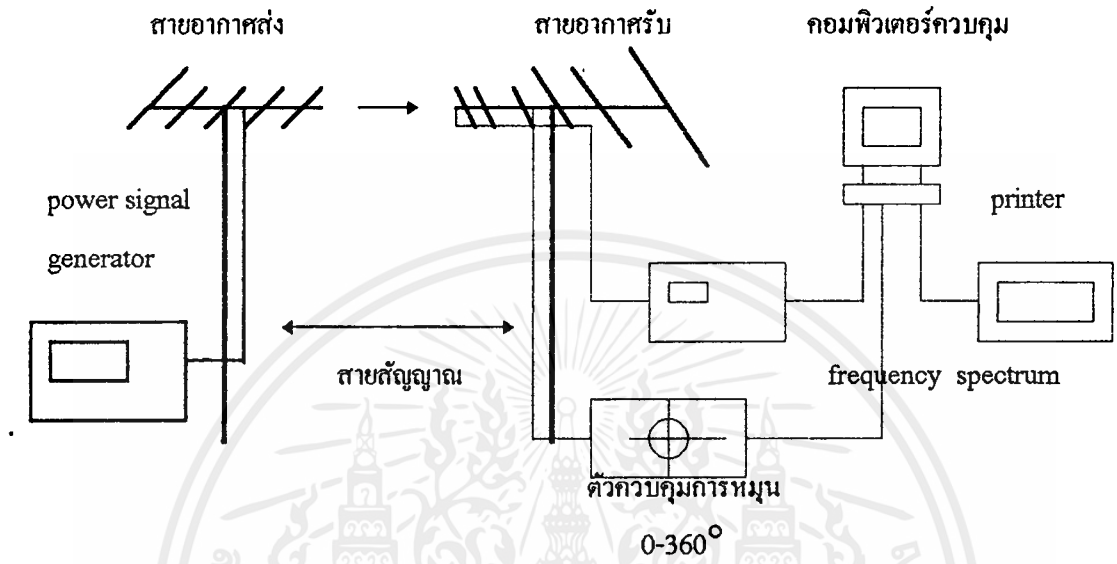


รูปที่ 7.1 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอิมพีแดนซ์ SWR และการสูญเสียจากคลื่นการสะท้อนกลับ

7.1.2 การวัดแพทเทอร์นของการกระจายคลื่นของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF การวัดแพทเทอร์นของการกระจายคลื่นของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF นั้นส่วนใหญ่จะทำการวัดในระบบ E และระนาบ H เพียงสองระนาบเท่านั้น การติดตั้งสายอากาศนั้นจะต้องคำนึงถึงความสูงจากพื้นโลกและระยะห่างระหว่างสายอากาศสายอากาศที่ต้องการวัดแพทเทอร์นจะติดตั้งบนเสาหมุนดังที่แสดงไว้ในรูปที่7.2การวัดนั้นอาจจะใช้สายอากาศที่ต้องการวัดเป็นสายอากาศส่งหรือเป็นสายอากาศที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า

ต้องการวัดแพทเทอร์นเป็นสายอากาศรับ การวัดความเข้มของสนามไฟฟ้านั้นอาจใช้เครื่องวัดความเข้มของสนามไฟฟ้าลักษณะการจัดเครื่องมือดังแสดงในรูป

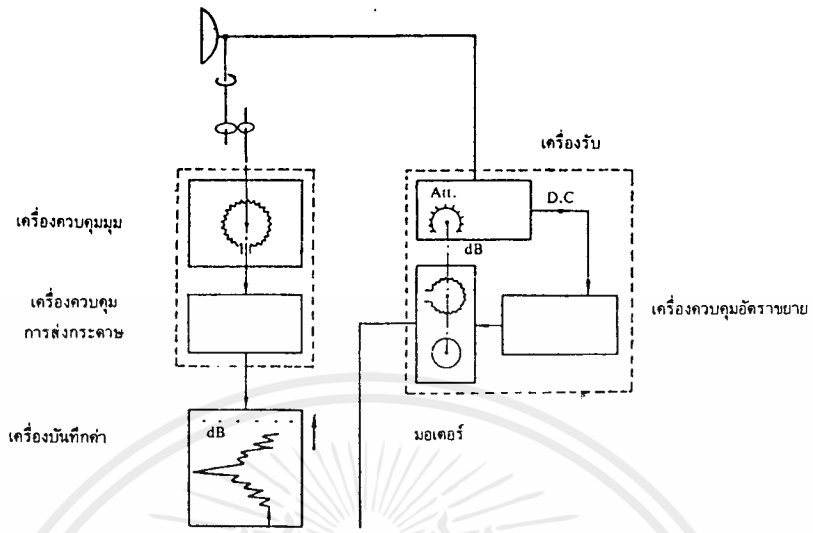


รูปที่ 7.2 การติดตั้งสายอากาศและเครื่องวัดที่ใช้ในการวัดแพทเทอร์นของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF

เนื่องจากการติดตั้งสายอากาศบนแท่นหมุนนั้น แท่นหมุนจะหมุนในแนวนอนเท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการวัดแพตเทินในระนาบ E ก็ต้องติดตั้งสายอากาศให้มีระนาบ E ขนานกับพื้นโลก เช่น ถ้าสายอากาศเป็นแบบไดโพลทั้งหลาย ก็ต้องติดตั้งให้แนวของสายอากาศไดโพลขนานกับพื้นโลก ทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการวัดแพทเทอร์นในระนาบ H ก็จะต้องทำการติดตั้งให้ระนาบ H ขนานกับพื้นโลก ซึ่งจะทำให้โดยติดตั้งให้สายอากาศไดโพลอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก

ในการวัดค่าและบันทึกค่าความเข้มของสนามไฟฟ้านั้น ถ้าการวัดไม่ต้องการรายละเอียดของแพทเทอร์นมากนัก ก็จะทำได้โดยการควบคุมการหมุนของแท่นหมุนด้วยมือ แล้วทำการวัดค่าที่มุมต่าง ๆ ที่เหมาะสม ซึ่งวิธีนี้จะทำการวัดค่าที่มุมต่าง ๆ ที่ไม่ต่อเนื่อง ในกรณีที่ต้องการรู้รายละเอียดของแพทเทอร์นก็จะต้องทำการวัดค่าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำได้โดยใช้ระบบขับแท่นหมุนและเครื่องบันทึกระดับสัญญาณที่ทำงานสัมพันธ์กัน รูปที่ 7.3 แสดงส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของชุดเครื่องมือดังกล่าวนี้ สัญญาณที่นำไปบันทึกบนเครื่องบันทึกสัญญาณนั้นจะได้มาจากเอาต์พุตของเครื่องขยายสัญญาณ IF ในรูปของสัญญาณที่ผ่านการดีเทกต์เรียบร้อยแล้ว คือเป็นสัญญาณกระแสตรง

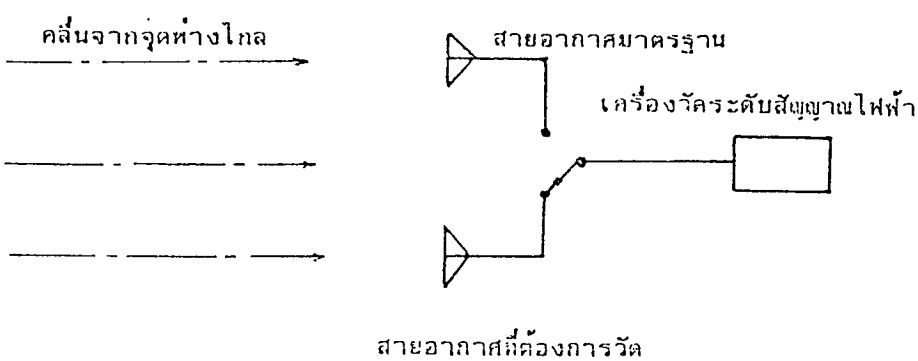
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 ส่วนประกอบของชุดเครื่องวัดที่ใช้วัดแพทเทอร์นในมุมที่ต่อเนื่อง

7.1.3 การวัดอัตราขยายของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF

การวัดอัตราขยายของสายอากาศในย่านความถี่ VHF และ UHF นั้นโดยทั่วไปมักจะทำการวัดโดยเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลมาตรฐาน โดยใช้สายอากาศที่ต้องการวัดกับสายอากาศไดโพลมาตรฐานรับคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเดียวกันที่ตำแหน่งเดียวกัน รูปที่ 7.4 แสดงส่วนประกอบของเครื่องมือที่ใช้ในการวัด สำหรับการวัดความเข้มของสนามไฟฟ้านั้นอาจใช้เครื่องวัดความเข้มของสนามไฟฟ้า หรือใช้วิธีผสมสัญญาณให้เป็นความถี่ IF อย่างใดอย่างหนึ่งแล้วแต่ความเหมาะสม ข้อควรระวังในการวัดอัตราขยายก็คือสายที่ต่อสายจากตัวสายอากาศทั้งสองมายังเครื่องวัดควรจะเป็นสายเส้นเดียวกัน หรือควรจะเป็นสายชนิดเดียวกันที่ยาวเท่ากัน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียในสายที่ไม่เท่ากัน นอกจากนั้นเมื่อทำการวัดการตอบสนองต่อความถี่ ก็ต้องปรับความยาวของสายอากาศไดโพลมาตรฐานให้เหมาะสมตามความถี่นั้น ๆ ด้วย



รูปที่ 7.4 การจัดอุปกรณ์ในการวัดอัตราขยายของสายอากาศ VHF และ UHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

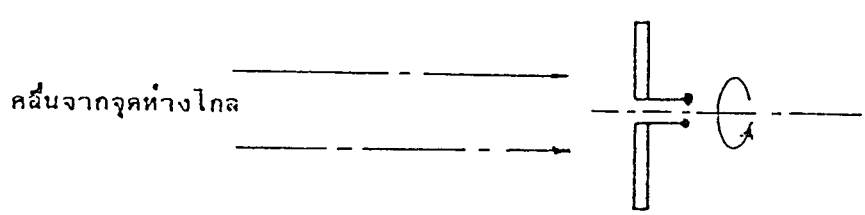
ค่าที่วัดได้ด้วยการใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นตัวเปรียบเทียบนั้นจะเป็นค่าอัตราขยายเปรียบเทียบ ซึ่งถ้าต้องการบันทึกค่าเป็นอัตราขยายสัมบูรณ์ก็ต้องบวกด้วย 2.15 dB

7.2 การวัดโพลาไรเซชันของคลื่น

การวัดโพลาไรเซชันของคลื่นนั้นนับว่าเป็นในกรณีที่เราต้องการส่งคลื่นที่มีโพลาไรเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งออกจากสายอากาศ แล้วทำการตรวจสอบจากการวัดว่าได้คลื่นที่มีโพลาไรเซชันตามที่ต้องการหรือไม่ นอกจากนั้นการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นก็ทำให้รู้สภาพของคลื่นที่บริเวณที่สนใจว่ามีโพลาไรเซชันอยู่ในรูปใด ในกรณีแรกนั้นจะมีความจำเป็นอย่างมาก ถ้าเราต้องการใช้โพลาไรเซชันตั้งฉากกันในการส่งสัญญาณคนละช่องกันโดยใช้สายอากาศตัวเดียวกัน เช่น ในระบบไมโครเวฟซึ่งมีการใช้โพลาไรเซชันในแนวขนานกับพื้นโลกและในแนว ตั้งฉากกับพื้นโลกในการส่งสัญญาณคนละช่องกัน การใช้งานในลักษณะนี้สายอากาศจะต้องสร้างโพลาไรเซชันตรงตามที่ถูกกระตุ้น เช่นถ้าถูกกระตุ้นด้วยโพลาไรเซชันแบบขนานกับพื้นโลกจากฟีดฮอร์น ก็ควรจะส่งคลื่นที่มีโพลไรเซชันแบบขนานกับพื้นโลกออกไปเท่านั้น ถ้ามีคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากกับพื้นโลกออกไปด้วย คลื่นนั้นก็จะเป็นคลื่นรบกวนของโพลาไรเซชันในแนวตั้งฉากของอีกช่องสัญญาณหนึ่ง เราเรียกคลื่นที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับที่ต้องการนี้ว่า โพลาไรเซชันในแนวตั้งฉากกับที่ต้องการ การวัดโพลาไรเซชันของคลื่นส่วนใหญ่จะเป็นการตรวจสอบอัตราส่วนของโพลาไรเซชันนี้ ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่บ่งบอกคุณสมบัติของสายอากาศในเชิงการสร้างโพลาไรเซชัน

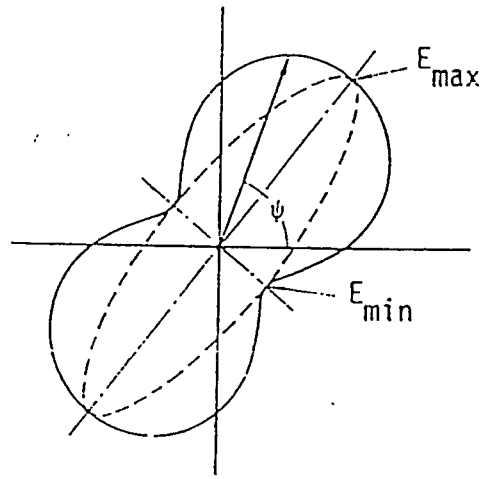
วิธีวัดโพลาไรเซชันของคลื่นนี้จะทำได้โดยใช้สายอากาศที่รับคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเส้นตรงเช่น สายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีระมิด การวัดโพลาไรเซชันก็จะทำได้โดยนำสายอากาศดังกล่าวรับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามา แล้วหมุนสายอากาศนั้นรอบตัวเองดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 7.5 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้ที่มุมต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันของคลื่นนั้น รูปที่ 7.6 แสดงสนามไฟฟ้าที่วัดได้ในกรณีที่โพลาไรเซชันของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก อัตราส่วนของแกนหลักของวงรี r จะได้เป็น

$$r = \left| \frac{E_{max}}{E_{min}} \right|$$



รูปที่ 7.5 การวัดโพลาไรเซชันของคลื่นโดยใช้สายอากาศที่มีโพลาไรเซชันเป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



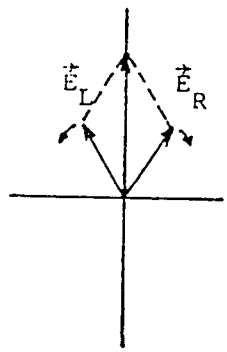
รูปที่ 7.6 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้สายอากาที่มีโพลาไรเซชันแบบเส้นตรงในกรณีที่โพลาไรเซชันของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก

ถ้าโพลาไรเซชันของคลื่นเป็นแบบวงกลม r จะเท่ากับ 1 และถ้าโพลาไรเซชันเป็นแบบเส้นตรง r จะเท่ากับ ∞ การวัดที่ได้ผลตามรูปที่ 7.6 นั้นเพียงแต่บอกรูปร่างของโพลาไรเซชันเท่านั้น ยังไม่ได้บอกว่าเป็นแบบหมุนซ้ายหรือหมุนขวา ซึ่งจะต้องทำการวัดเฟสของคลื่นในทิศตั้งฉากกันด้วยจึงจะระบุออกมาได้ว่าเป็นแบบไหน การวัดทิศทางของการหมุนนี้จะทำได้โดยอาศัยหลักการที่ว่าคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบใดก็ตาม จะสามารถแยกออกเป็นส่วนประกอบของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันวงกลมหมุนขวาและแบบวงกลมหมุนซ้าย ดังนั้นการวัดนั้นจะทำได้โดยใช้สายอากาศแบบโพลาไรเซชันวงกลม เช่น สายอากาศแบบครอสด์ไดโพล และแบบเฮลิกซ์ เป็นต้น โดยใช้แบบที่รับคลื่นวงกลมหมุนขวา และรับคลื่นวงกลมหมุนซ้ายมาวัดทั้งคู่ แล้วพิจารณาจากค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ ถ้าให้ $|E_R|$ และ $|E_L|$ เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้สำหรับแบบหมุนขวาและแบบหมุนซ้ายตามลำดับ อัตราส่วนของแกนหลักวงรี r จะคำนวณได้ดังนี้คือ

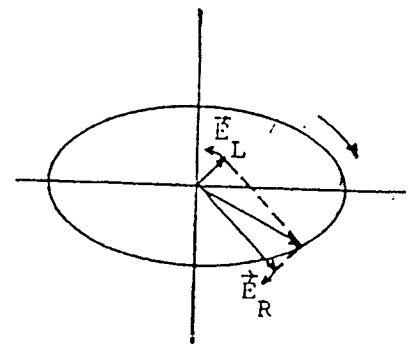
$$r = \frac{|E_R| + |E_L|}{|E_R| - |E_L|}$$

ในขณะเดียวกันก็จะคดไว่า ถ้า $|E_R|$ ใหญ่กว่า $|E_L|$ คือค่า r เป็นบวกคลื่นนั้นก็จะเป็นแบบหมุนขวา และถ้า $|E_R|$ เล็กกว่า $|E_L|$ คลื่นนั้นจะเป็นแบบหมุนซ้าย ในกรณีพิเศษที่คลื่นนั้นมีโพลาไรเซชันแบบวงกลมก็จะมีเฉพาะ $|E_R|$ หรือ $|E_L|$ เท่านั้น และ r จะมีค่าเป็น 1 หรือ -1 สำหรับกรณีที่เป็นโพลาไรเซชันแบบเส้นตรง เนื่องจาก $|E_R| = |E_L|$ ดังนั้น r จะเป็น ∞ และคลื่นนั้นไม่มีการหมุน จะมีแต่การแกว่งในแนวเส้นตรงเท่านั้น รูปที่ 7.7 แสดงการแยกส่วนประกอบของโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายใน คลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กรณีของโพลาไรเซชัน
แบบเส้นตรง



(ข) กรณีของโพลาไรเซชัน
แบบวงรีหมุนขวา

รูปที่ 7.7 ส่วนประกอบของโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่8

ผลการทดลอง

8.1 การออกแบบสายอากาศล็อกเพอริโอดิกไดโพลความถี่ย่าน VHF, UHF

หลักการคำนวณสายอากศล็อกเพอริโอดิกไดโพล

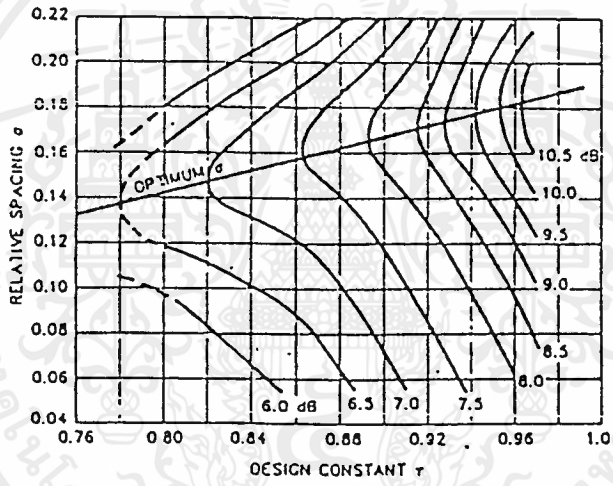
1. จากช่วงความถี่ที่เราต้องการรับสัญญาณช่วงความถี่ต่ำสุดและสูงสุดนำมาหาอัตราช่วงความถี่ใช้งาน

จากสูตร $B = f_u/f_l$

f_l = ความถี่ต่ำสุด (MHZ)

f_u = ความถี่สูงสุด (MHz)

2. กำหนดค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ต้องการนำไปหาค่า σ และ τ ที่เหมาะสมในตารางต่อไปนี้



ค่า σ และ τ ที่เหมาะสมควรมีค่าดังนี้

$0.8 \leq \tau \leq 0.98$

$0.05 \leq \sigma \leq \sigma opt$; $\sigma opt = 0.243\tau - 0.051$

3. คำนวณค่า cot α เมื่อ α เป็นมุมครึ่งหนึ่งของความกว้างทั้งหมดของสายอากาศตามรูป

$$\cot \alpha = 4\sigma / 1-\tau$$

4. คำนวณค่าแบนด์วิดท์แอคทีฟรีเซี่ยน (Bar) จากสมการ

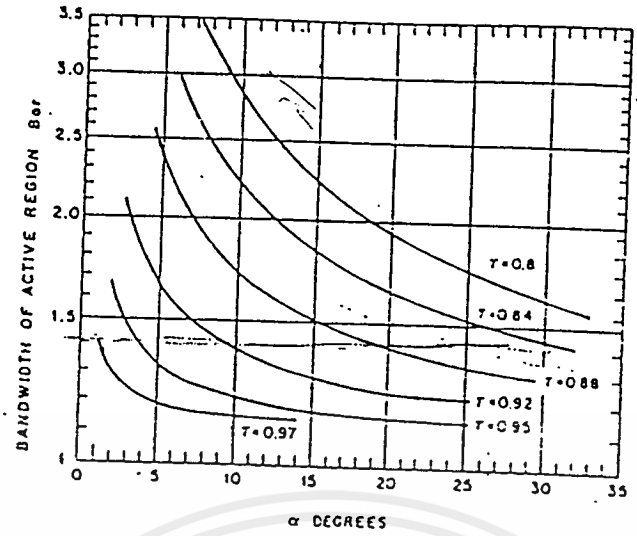
$$Bar = 1.1 + 7.7 (1-\tau)^2 \cot \alpha$$

5. หาค่าแบนด์วิดท์โครงสร้างแบบ Array Bs จากสมการ

$$Bs = B \times Bar$$

6. หาค่าความยาวในการแพร่ของสายอากาศ L จำนวณอิเลเมนต์ทั้งหมด N และความยาวของอิเลเมนต์ที่ยาวที่สุด l_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$L_{(n)} = [\ 1/4\ (1 - 1/Bs)\ \cot \alpha\ ]\ \lambda max$$

$$N = 1 + \log Bs/\log(1/\tau)$$

$$= 1 + \ln Bs/\ln (1/\tau)$$

$$l_1 = 492/f_1$$

จากสูตร $\lambda = v / f = 3 \times 10^{10}$ (cm) / f_1(MHz) = $984 \times 10_1$ (ft) / f_1

เมื่อเป็นสายอากาศ ไดโพลมาตรฐานยาว $\lambda/2$ เพราะฉะนั้น

$$l_1 = 984/2f_1 = 492/f_1$$

λmax = ความยาวคลื่นใน free space ที่ยาวที่สุด = 987/f

หมายเหตุ จำนวณอิเลเมนต์และความยาวสายอากาศสามารถเพื่อหรือลดได้เพื่อความเหมาะสมโดยการเพิ่มหรือลดจากค่า τ และ σ ได้ ขึ้นกับผู้ออกแบบเอง

7. หาค่า Zt (teminating stub) สำหรับสายอากาศ VHF, UHF ค่า Zt จะมีค่าเป็น

$$Zt = \lambda maz/8$$

8. คำนวณหาค่าความถี่และความยาวของ อีเลเมนต์อื่น ๆ จากสมการ

$$f_2 = f_1 / \tau$$

$$f_3 = f_1 / \tau^2$$

$$f_4 = f_1 / \tau^3$$

.

.

$$f_n = f_1 / \tau^{n-1}$$

เมื่อ τ = ค่าคงที่ในกรออกแบบ $0.8 \leq \tau \leq 0.98$

f_1 = ความถี่ต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fn = ความถี่สูงสุด

n = ลำดับอีเลเมนต์ (1,2,3.....n)

$$l_2 = \tau l_1$$

$$l_3 = \tau l_2$$

.

.

$$l_n = \tau\ l(n-i)$$

เมื่อ ln = ความยาวค่าต่ำสุด

9. หาค่าระยะห่างระหว่างอีเลเมนต์ต่าง ๆ โดยหาค่า d12 จากสมการ

$$d12 = l/2\ (l_1 - l_2) \cot \alpha$$

$$d23 = \tau\ d12$$

$$d34 = \tau\ d23$$

.

.

$$dn\text{-}l = \tau\ dn\text{-}2\ ,\ n\text{-}l$$

10. คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศล็อกเพอริโอดิกไดโพล

$$Ro = Zo\ /\ \sqrt{1 + Zo/\ 4\sigma\ Zav}$$

Ro = ระดับความต้านทานเฉลี่ยการกระจายคลื่นอินพุทของสายอากาศ

Zo = characteristic impedance ของสายอากาศ

Zav= characteristic impedance เฉลี่ยประจำของ dipole

$$= 120\ [\ \ln\ (\ln/dn) - 2.25\ ]$$

ln/diam = อัตราส่วนระหว่างอีเลเมนต์ ต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของ dipole

$$\sigma = \sigma/\sqrt{\tau}$$

จะได้ $Zo = Ro^2 / 8\sigma\ Zav + Ro\sqrt{(Ro/8\sigma\ Zav)^2 + 1}$

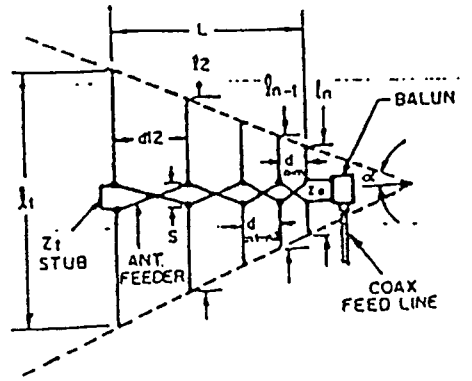
11. หาค่าระยะห่างระหว่างตัวนำ (S)

$$S = (diam/2\ ) \times 10^{Zo\ /\ 27\sigma}$$

S = ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของตัวนำทั้งสอง

Zo = characteristic impedance ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>ขั้นตอนการออกแบบ</u>

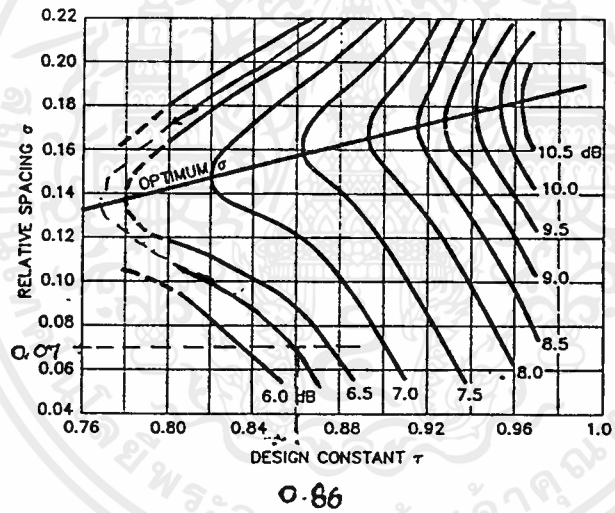
1. ความถี่ช่วง 174MHz-1714MHz

fn=1714MHz

f1=174MHz

$B = fn / f_1 = 1714/174 = 9.85$

2. Gain 6.25 dB , $\sigma = 0.07$, $\tau = 0.86$



0.86

3. $\cot \alpha = 4\sigma / (1-\tau)$

$= (4 \times 0.07) / (1 - 0.86)$

$= 2$

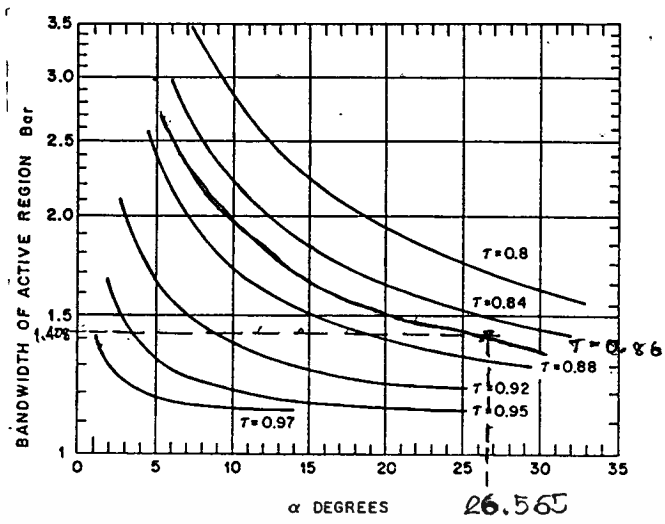
$\alpha = \tan^{-1}(1/2) = 26.565^{\circ}$

4. $Bar = 1.1 + 7.7 (1 - \tau)^2 \cot \alpha$

$= 1.1 + 7.7 (1 - 0.86)^2 2$

$= 1.40184$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5. Bs = B × Bar

= 9.85 × 1.40184

= 13.80

6. L(ft) = [1/4 (1 - 1/Bs) cot α] λ_{max} ; λ_{max} = 984/174 = 5.65

= [1/4 (1- 1/13.80) 2] 5.65

≐ 2.6 ft

= 78.6 cm

N = 1 + (log Bs) / log (1/τ)

= 1 + (log13.80)/ log (1/0.86)

= 18.4 element

$l_{1(ft)}$ = 492/174

= 2.82 ft

= 84.8 cm

7. l_2 = 0.86 × 84.4 = 72.25 cm

l_3 = 0.86 × 72.25 = 62.73 cm

l_4 = 0.86 × 62.73 = 53.95 cm

l_5 = 0.86 × 53.95 = 46.40 cm

l_6 = 0.86 × 46.40 = 39.90 cm

l_7 = 0.86 × 39.90 = 34.318 cm

l_8 = 0.86 × 34.318 = 29.51 cm

l_9 = 0.86 × 29.51 = 25.38 cm

l_{10} = 0.86 × 25.38 = 21.80 cm

l_{11} = 0.86 × 21.80 = 18.77 cm

l_{12} = 0.86 × 18.77 = 16.14 cm

l_{13} = 0.86 × 14.14 = 13.88 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l_{14} = 0.86 × 13.80 = 11.86 cm

l_{15} = 0.86 × 11.86 = 10.16 cm

l_{16} = 0.86 × 10.16 = 8.745 cm

ในความเป็นสามารถสร้างได้เพียง 16 element ตามความยาวของบูมที่เป็นไปได้

8. หาระยะห่างระหว่างแต่ละ element

d1,2 = 1/2 $(l_1 - l_2)$ cot α

= 1/2 (84.8 - 72.25) 2

= 12.55 cm

d2,3 = 0.86 × 12.55 = 10.79 cm

d3,4 = 0.86 × 10.79 = 9.28 cm

d4,5 = 0.86 × 9.28 = 7.90 cm

d5,6 = 0.86 × 7.90 = 6.86 cm

d6,7 = 0.86 × 6.86 = 5.90 cm

d7,8 = 0.86 × 5.90 = 5.07 cm

d8,9 = 0.86 × 5.07 = 4.36 cm

d9,10 = 0.86 × 4.36 = 4.17 cm

d10,11 = 0.86 × 4.17 = 3.59 cm

d11,12 = 0.86 × 3.59 = 3.09 cm

d12,13 = 0.86 × 3.09 = 2.66 cm

d13,14 = 0.86 × 2.66 = 2.28 cm

d14,15 = 0.86 × 2.28 = 1.96 cm

d15,16 = 0.86 × 1.47 = 1.264 cm

9. สายอากาศล็อกเพอริโอดิกไดโพล ใช้สายป้อน 50 Ω ต่อแมทช์ชิ่งกันโดยตรง

Ro = 50 Ω

diam 16 = 5/16 in ; 116 / diam 16 = 8.745 ×(12/ 0.79375) = 132.20

diam 15 = 5/16 in ; 10.16× (12/ 0.79375) =153.6

diam 14 = 5/16 in ; 11.86×(12/ 0.79375) = 179.30

diam 13 = 5/16in ; 13.88 ×(12/ 0.79375) =209.83

diam 12 = 3/8 in ; 16.14 ×(12/ 0.9525) = 203.33

diam 11 = 3/8in ; 18.77 ×(12/ 0.9525) = 236.47

diam 10 = 1/2 in ; 21.80 ×(12/1.27) = 205.98

diam 9 = 1/2 in ; 25.38 ×(12/ 1.27) = 239.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

diam 8 = 1/2 in ; 29.51×(12/1.27) = 278.83

diam 7 = 1/2 in ; 34.318×(12/1.27) = 343.26

diam 6 = 1/2 in ; 39.90× (12/ 1.27) = 377.00

diam 5 = 1/2 in ; 46.40 ×(12/ 1.27) = 438.42

diam 4 = 1/2 in ; 53.95×(12/1.27) = 509.76

diam 3 = 1/2 in ; 62.73 ×(12/1.27) = 592.72

diam 2 = 1/2 in ; 72.25 ×(12/ 1.27) = 682.67

diam 1 = 1/2 in ; 84.8×/ (12/1.27) = 801.25

10. $Zav = 120 [\ln (\ln / diam) - 2.25]$

$= 120 [\ln (132.20) - 2.25]$

$= 316.11$

$\sigma = \sigma / \sqrt{\tau}$

$= 0.07 / \sqrt{0.86}$

$= 0.07548$

$Zo = Ro^2 / 8 \sigma Zav + Ro \sqrt{(Ro/8\sigma Zav)^2 + 1}$

$= 50^2 / (8\times 0.07548 \times 316.11) + 50 \sqrt{(50/ (8\times 0.07548\times 316.11))^2 + 1}$

$= 13.09+51.68$

$= 64.77 \Omega$

11. $VSWR = \dfrac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$

$\Gamma = \dfrac{Z0 - R0}{Z0 + R0}$

$= \dfrac{64.77-50}{64.77+50}$

$= 0.12869$

$VSWR = \dfrac{1 + 0.12869}{1 - 0.12869}$

$= \dfrac{1.12869}{0.87131}$

$= 1.2954$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

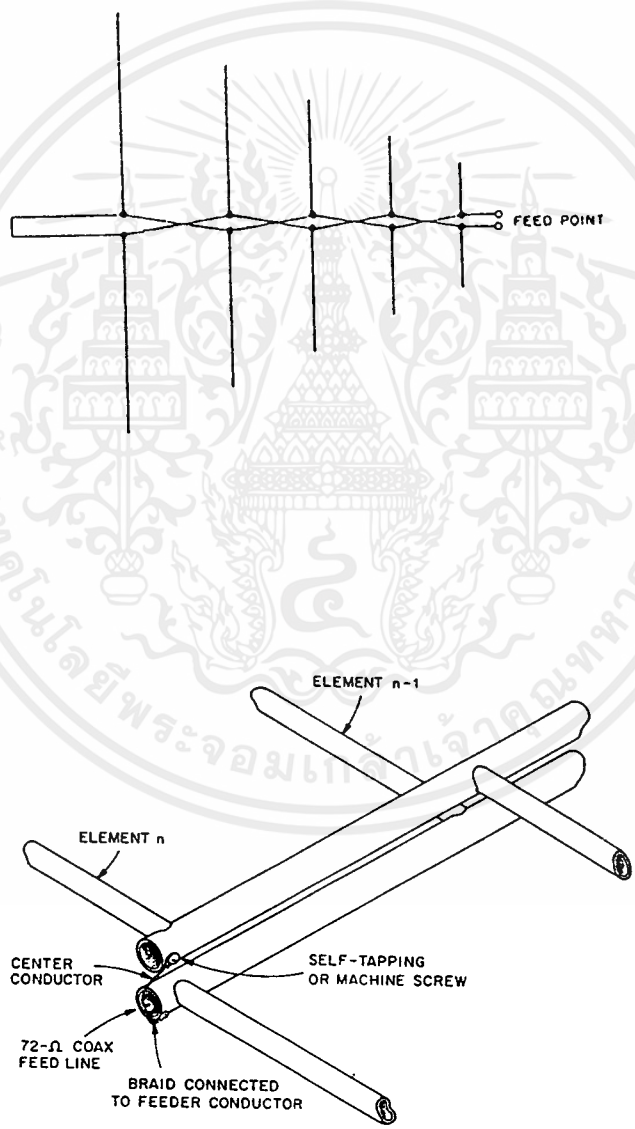
OR VSWR = $\frac{64.77}{50}$

= 1.2954

SWR(dB) = 20 log VSWR

= 20 log 1.2954

= 2.2480 dB

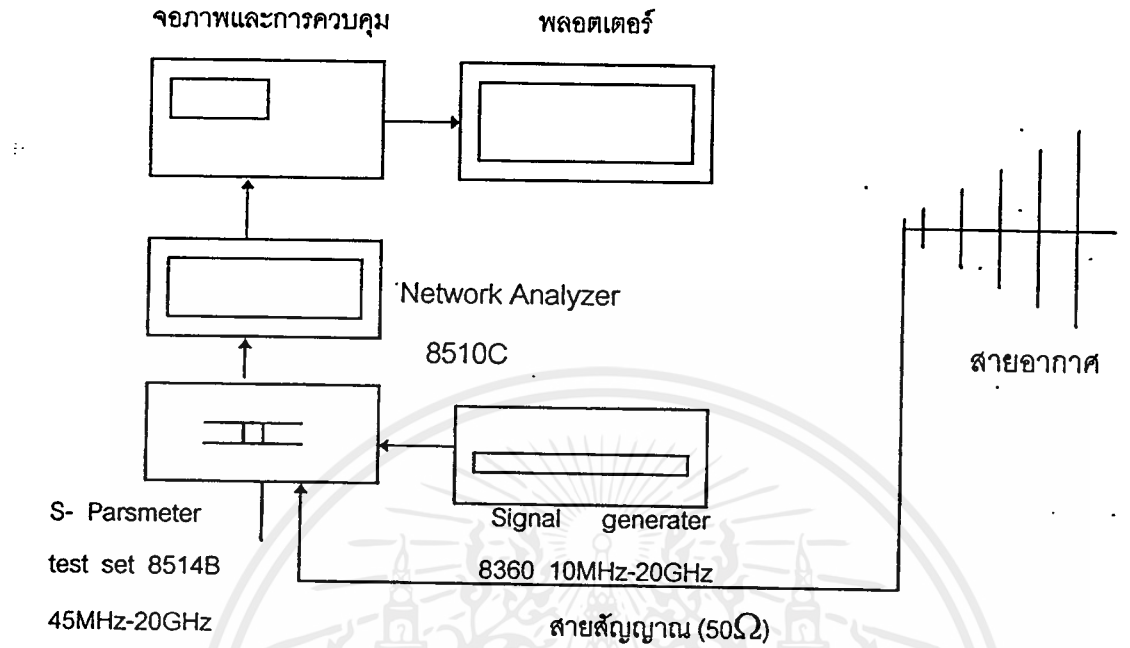


รูปแสดงลักษณะการป้อนของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกย่าน VHF-UHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศล็อกเพอริโอดิก

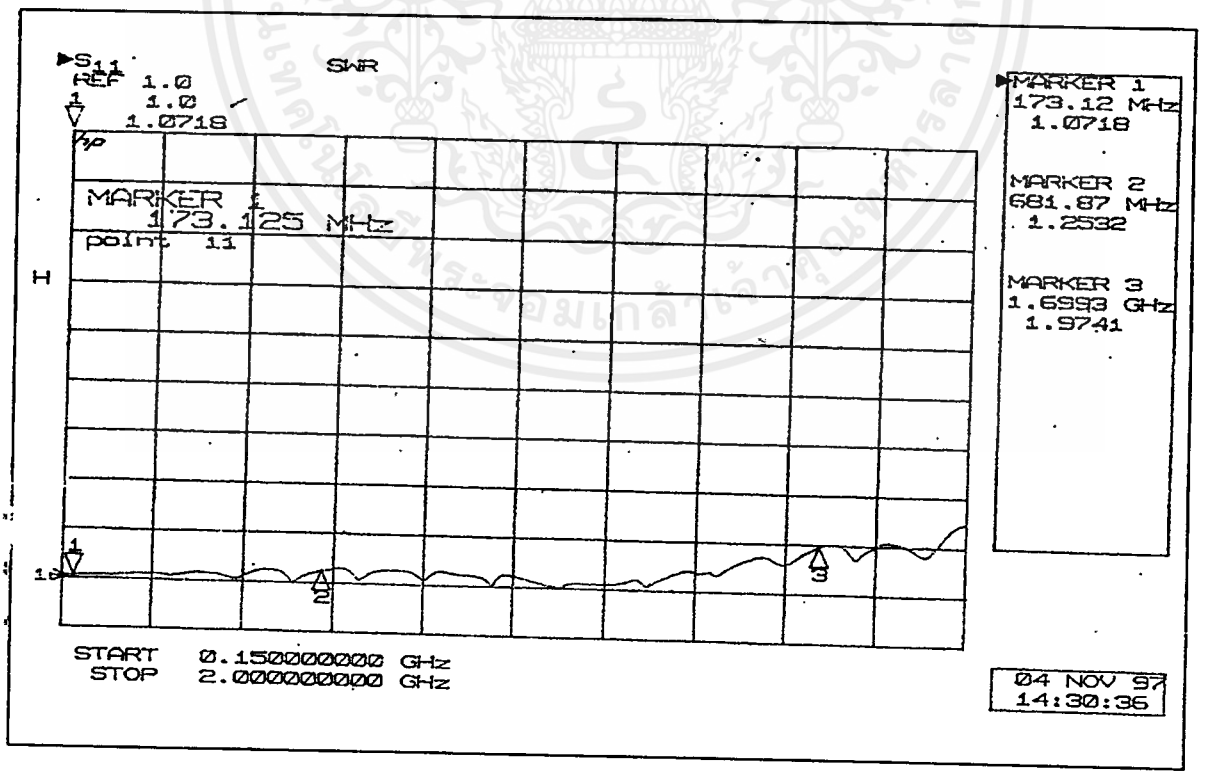
การวัดอิมพีแดนซ์ SWR และการสูญเสียเนื่องจากสะท้อนกลับของคลื่น



สายอากาศต้นที่1

ค่าSWR

เมื่อต่อเครื่องมือตามรูปแล้ววัดค่า SWR ค่าที่วัดได้แสดงดังรูป



รูปแสดงค่า SWR ที่ตำแหน่งความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

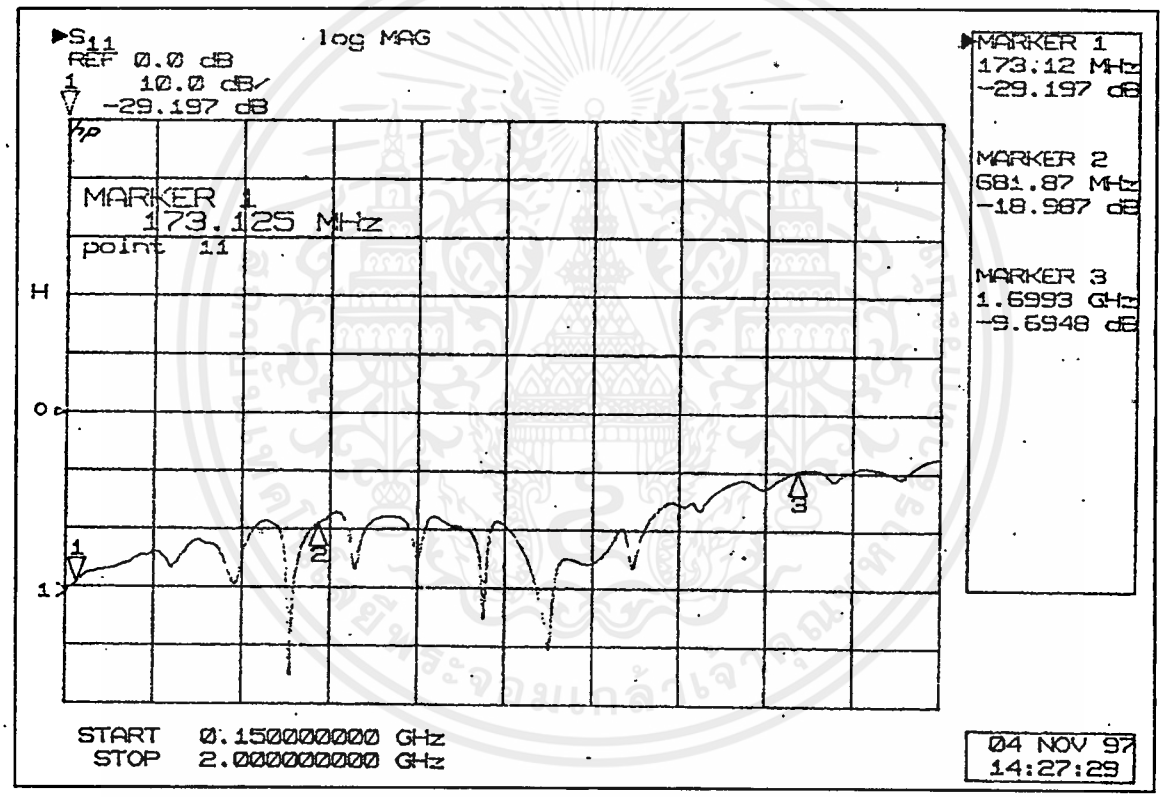
จากรูปเมื่อทำการวัดที่ จุดที่ 1 ความถี่ 173.125MHz ค่า SWR= 1.0718

จุดที่ 2 ความถี่ 681.87 MHz ค่า SWR= 1.2532

จุดที่ 3 ความถี่ 1.6993 GHz ค่าSWR=1.9781

แสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีการแมทซ์กันอยู่ในเกณฑ์ดี ตลอดช่วงความถี่ดังรูป

ค่าสูญเสียจากคลื่นสะท้อนกลับ(Return Loss)



รูปแสดงค่า Return Loss

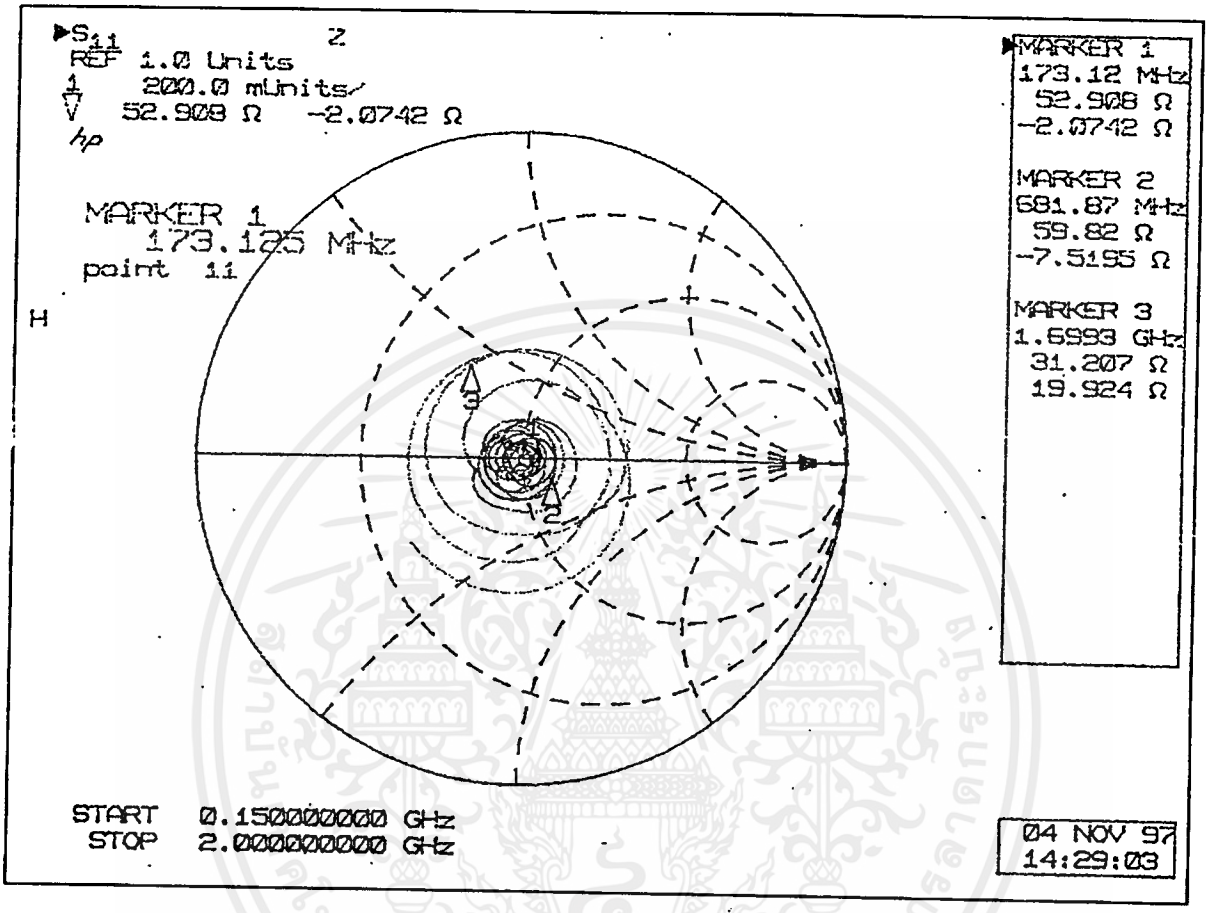
จุดที่ 1 ความถี่ 173.12 MHz return loss = -29.197 dB

จุดที่ 2 ความถี่ 681.87MHz return loss = -18.987 dB

จุดที่ 3 ความถี่ 1.6993 MHz return loss = -9.6948dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์



รูปแสดงค่า อิมพีแดนซ์

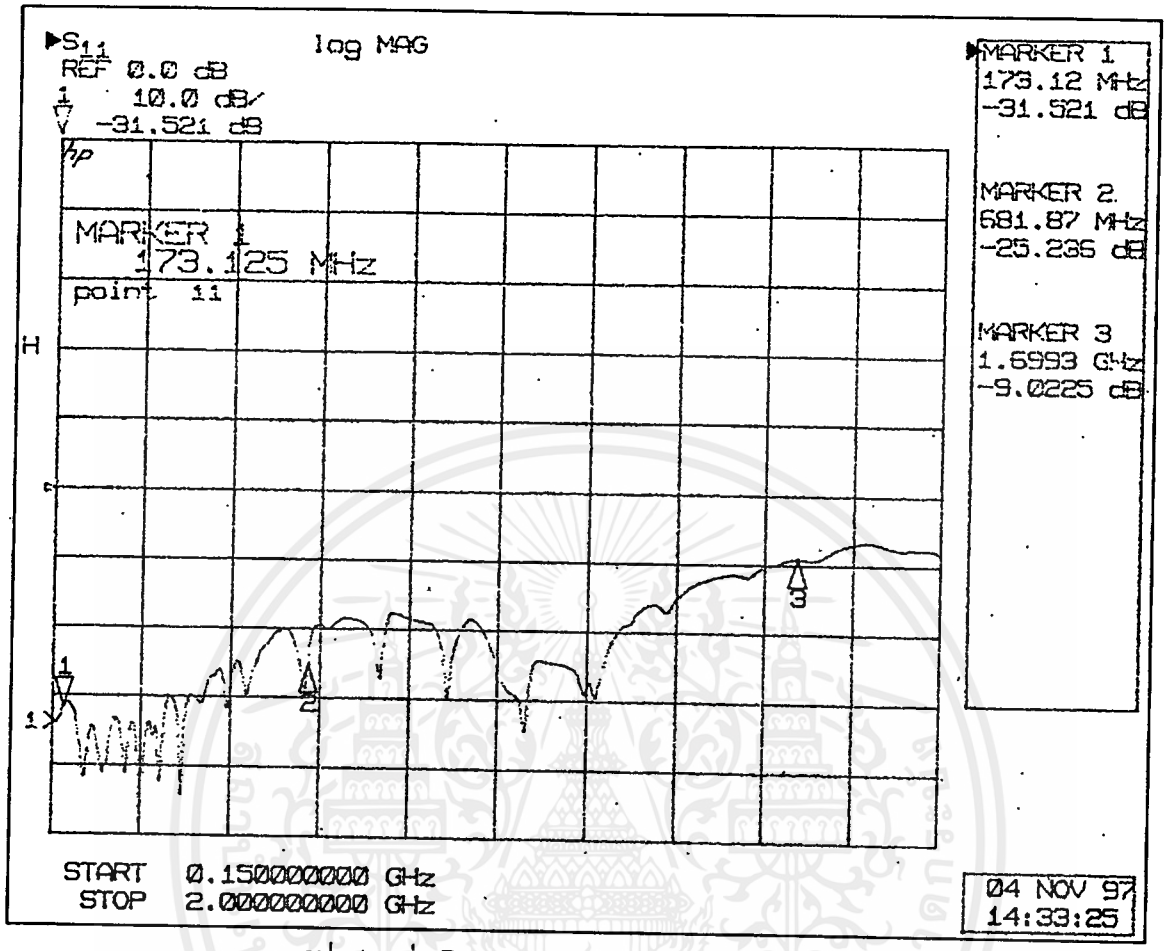
จุดที่ 1 ความถี่ 173.12 MHz Z0=47.604-j0.9883

จุดที่ 2 ความถี่ 681.87MHz Z0=55.664-j1.1875

จุดที่ 3 ความถี่ 1.6993 MHz Z0=31.296+j 23.373

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

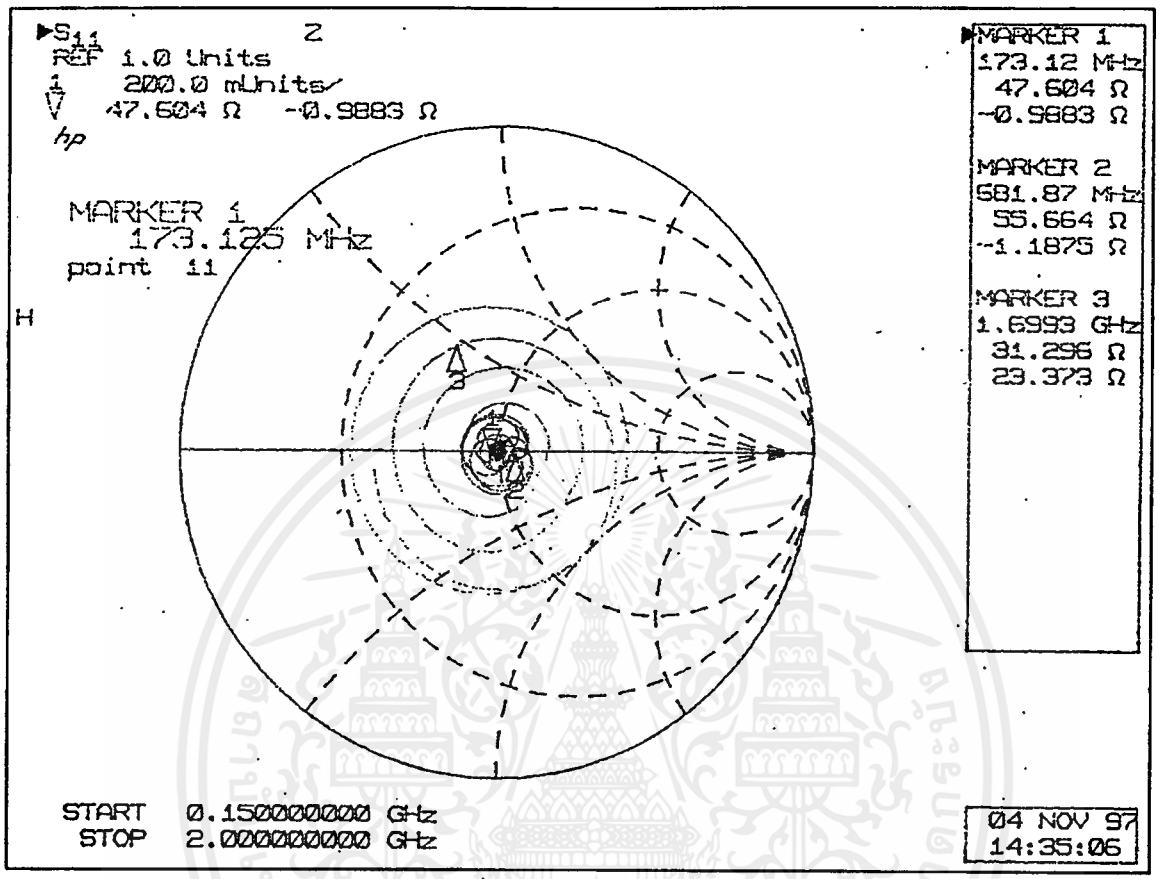
ค่าสูญเสียจากคลื่นสะท้อนกลับ(Return Loss)



รูปแสดงค่า Return Loos

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

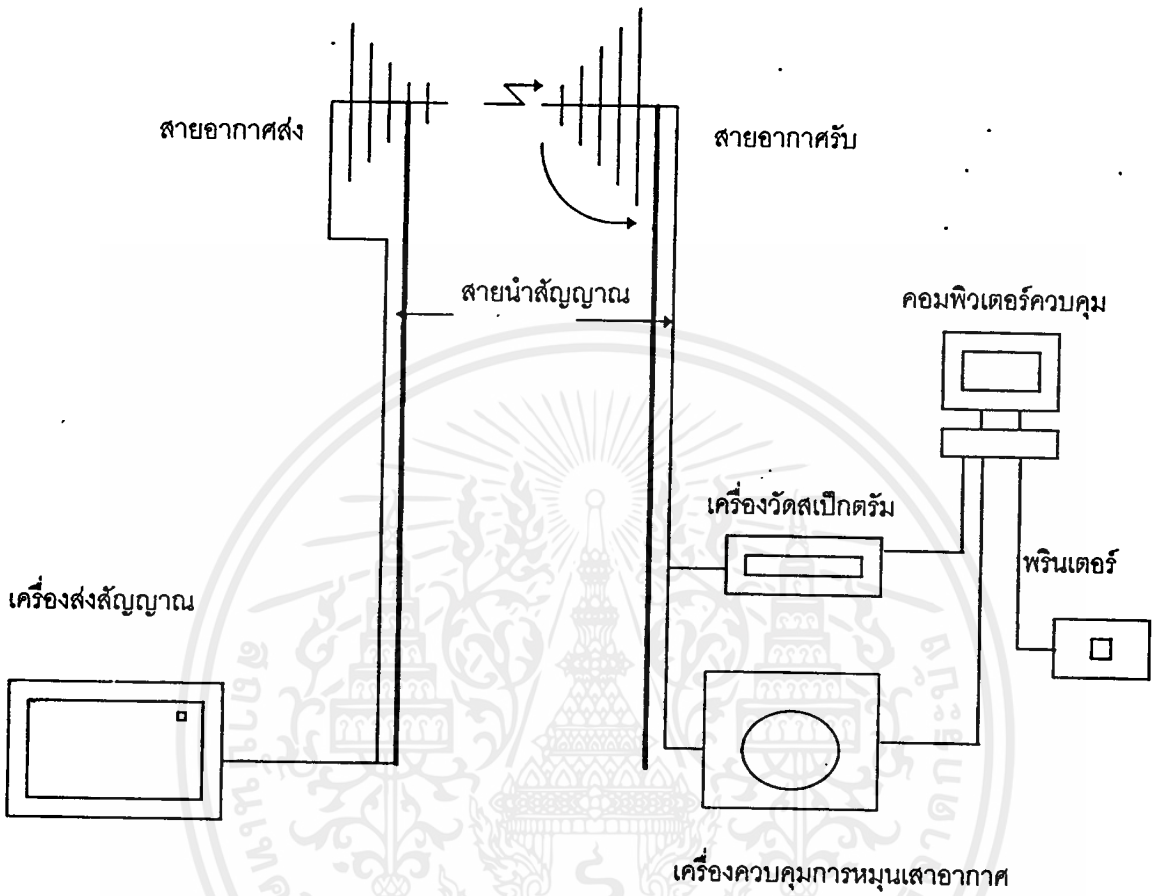
ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์



รูปแสดง ค่า อิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดแพทเทอร์นสายอากาศ



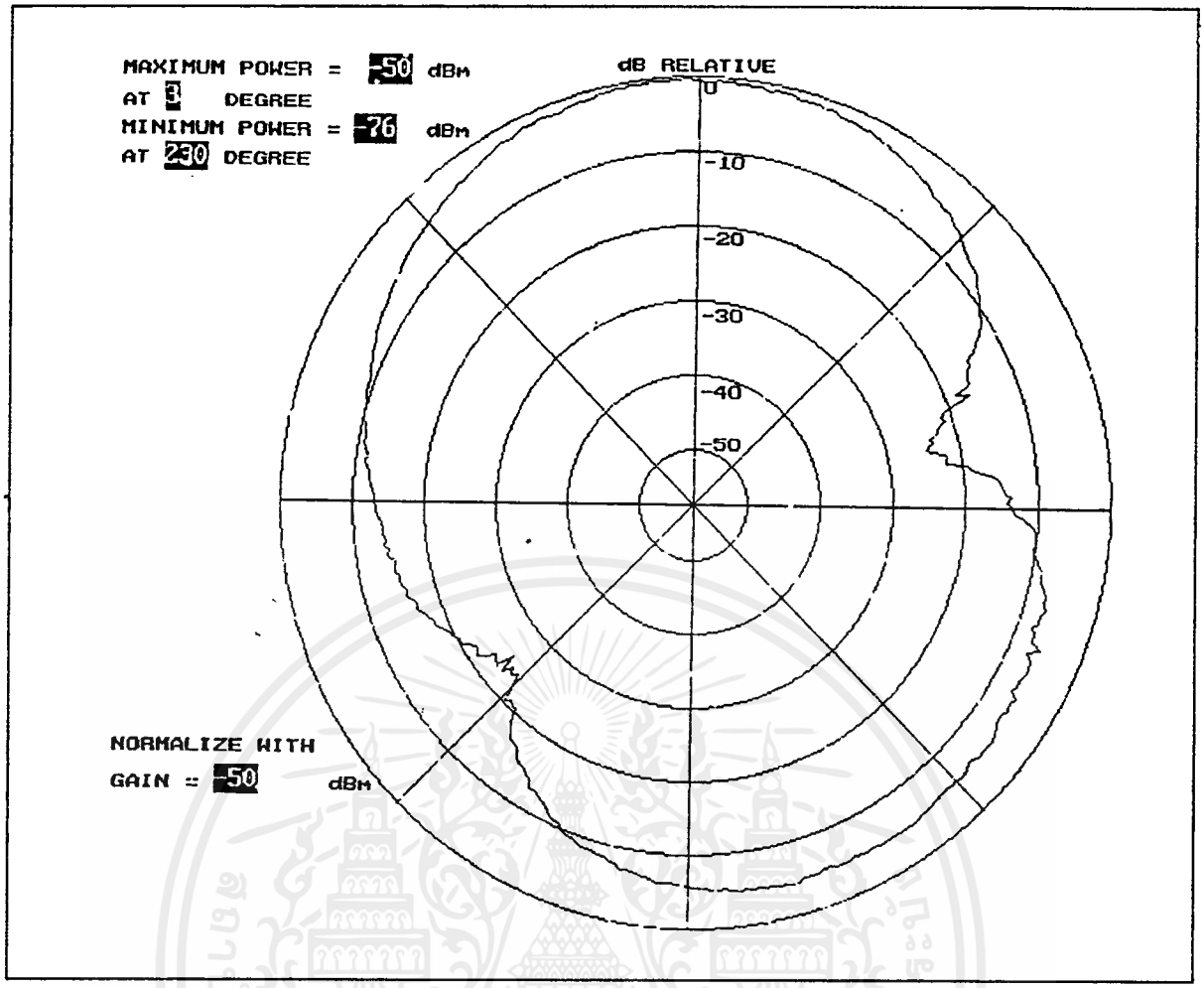
รูปแสดงการจัดเครื่องมือในการวัดแพทเทอร์นสายอากาศ

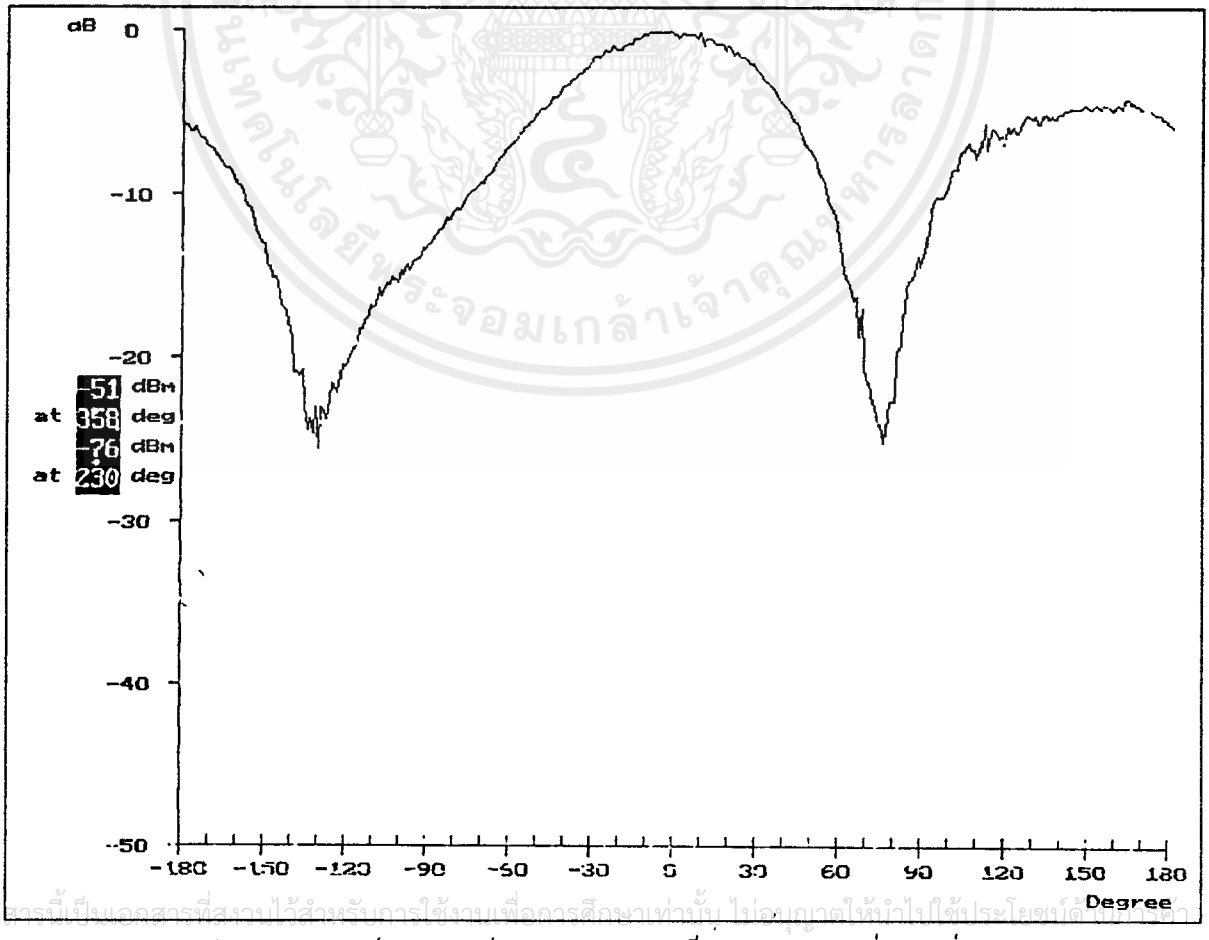
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 177.5 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-50.83	180	-56.33
10	-51.67	190	-57.83
20	-51.83	200	-60.17
30	-53.17	210	-63.83
40	-55.33	220	-69.50
50	-58.33	230	-76.33
60	-63.83	240	-71.33
70	-72.33	250	-67.67
80	-73.33	260	-65.33
90	-64.33	270	-63.83
100	-59.33	280	-61.67
110	-57.83	290	-60.00
120	-56.50	300	-57.67
130	-55.83	310	-55.67
140	-55.67	320	-54.00
150	-55.33	330	-52.33
160	-55.17	340	-51.83
170	-55.33	350	-50.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





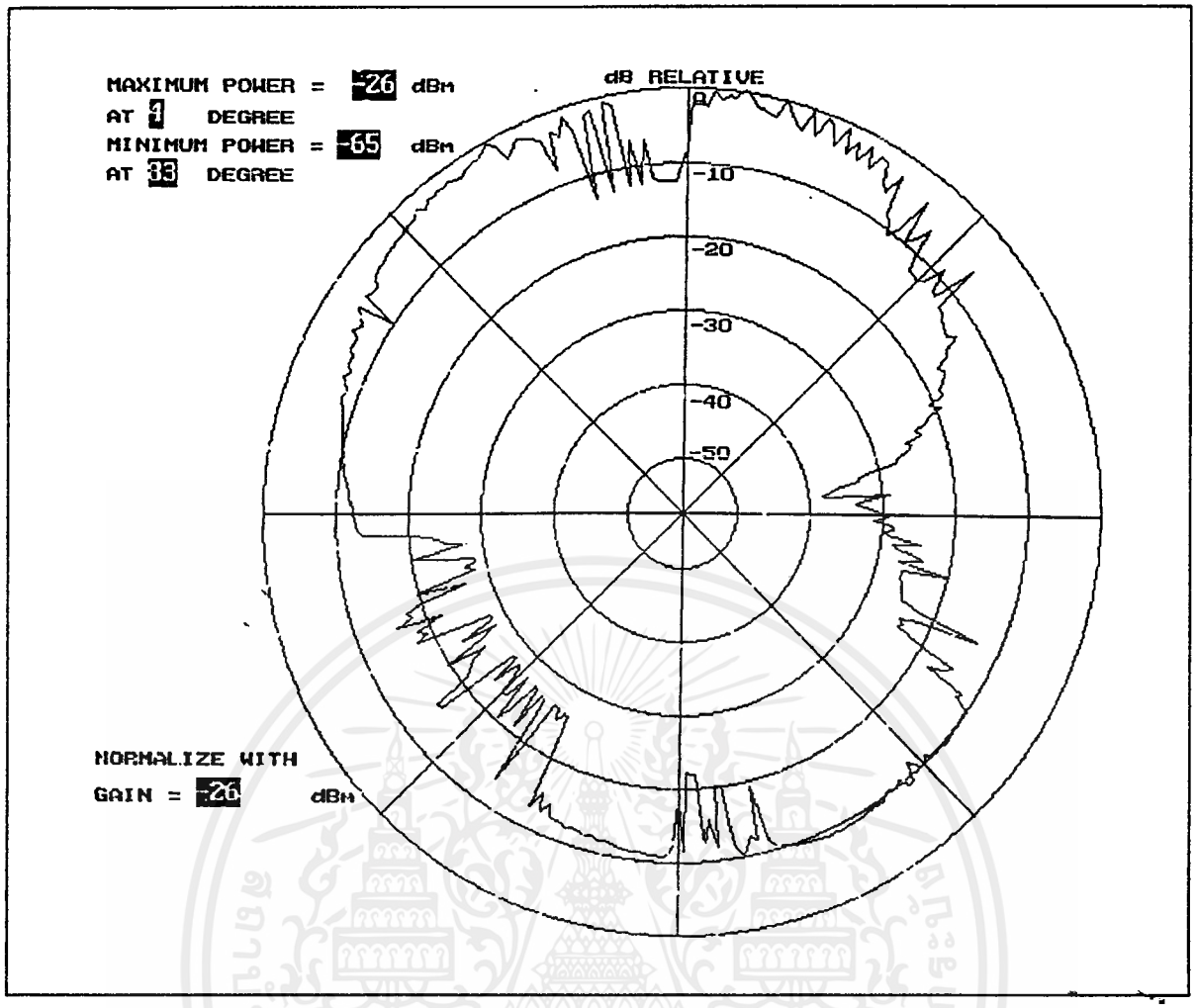
รูปแสดงเพาเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 177.5 MHz

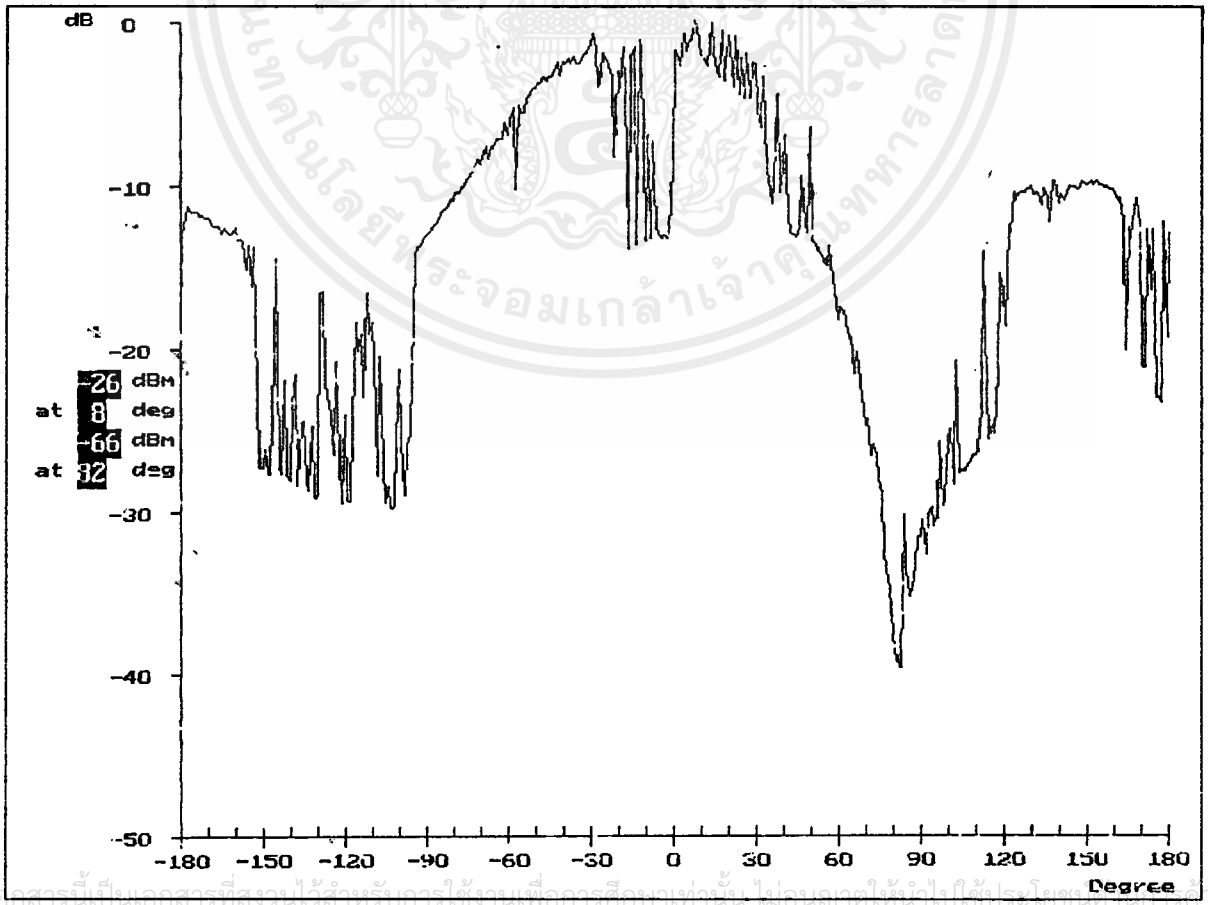
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 191.5 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-34.83	180	-45.33
10	-28.17	190	-38.00
20	-27.00	200	-38.67
30	-28.67	210	-53.33
40	-35.17	220	-54.17
50	-32.50	230	-55.00
60	-44.33	240	-50.17
70	-50.83	250	-44.50
80	-63.83	260	-47.33
90	-57.67	270	-39.17
100	-57.67	280	-37.00
110	-52.67	290	-34.83
120	-42.50	300	-33.00
130	-36.17	310	-30.17
140	-37.17	320	-28.50
150	-36.00	330	-27.50
160	-36.33	340	-29.17
170	-38.50	350	-39.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





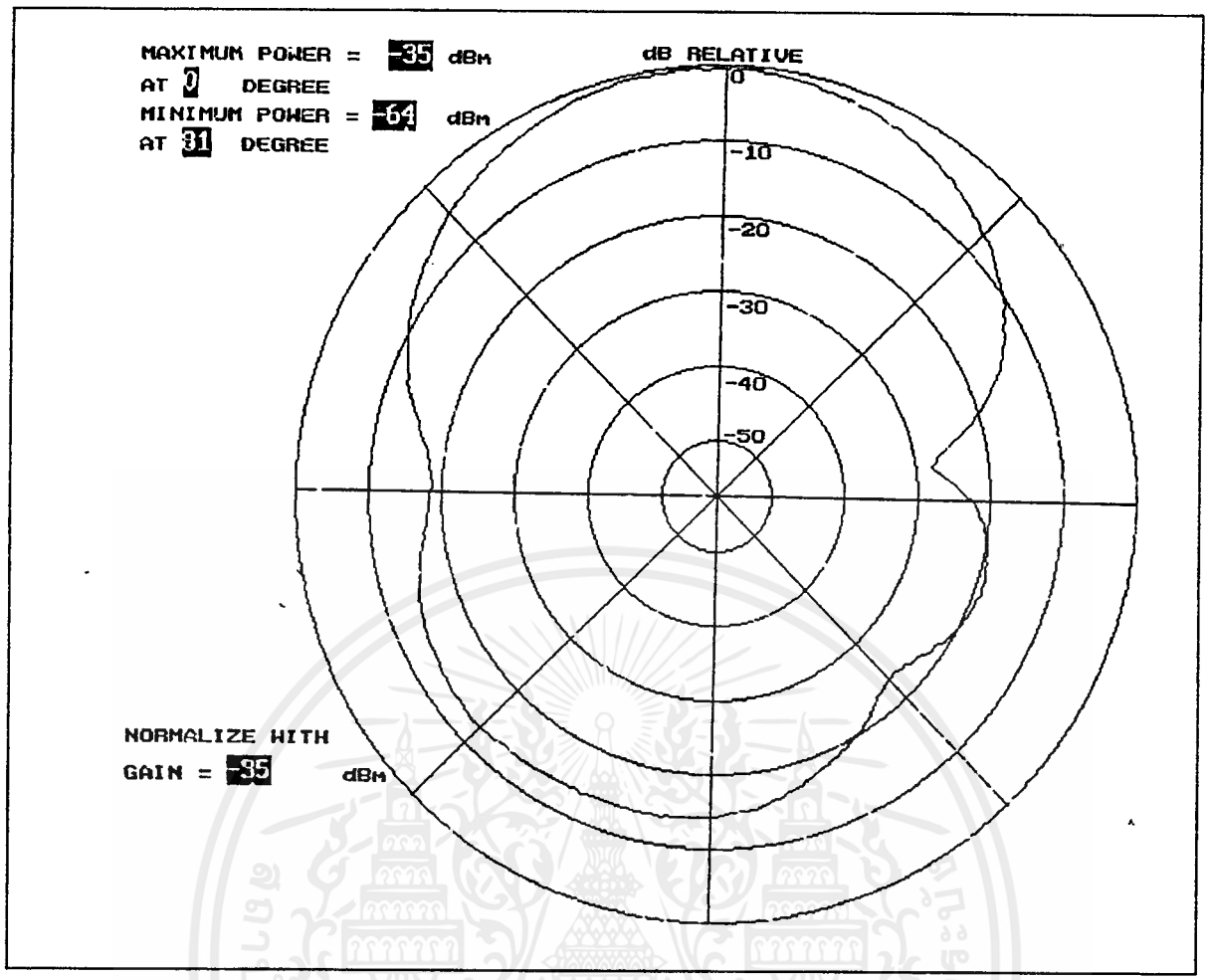
รูปแสดงเพาเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 191.5MHz

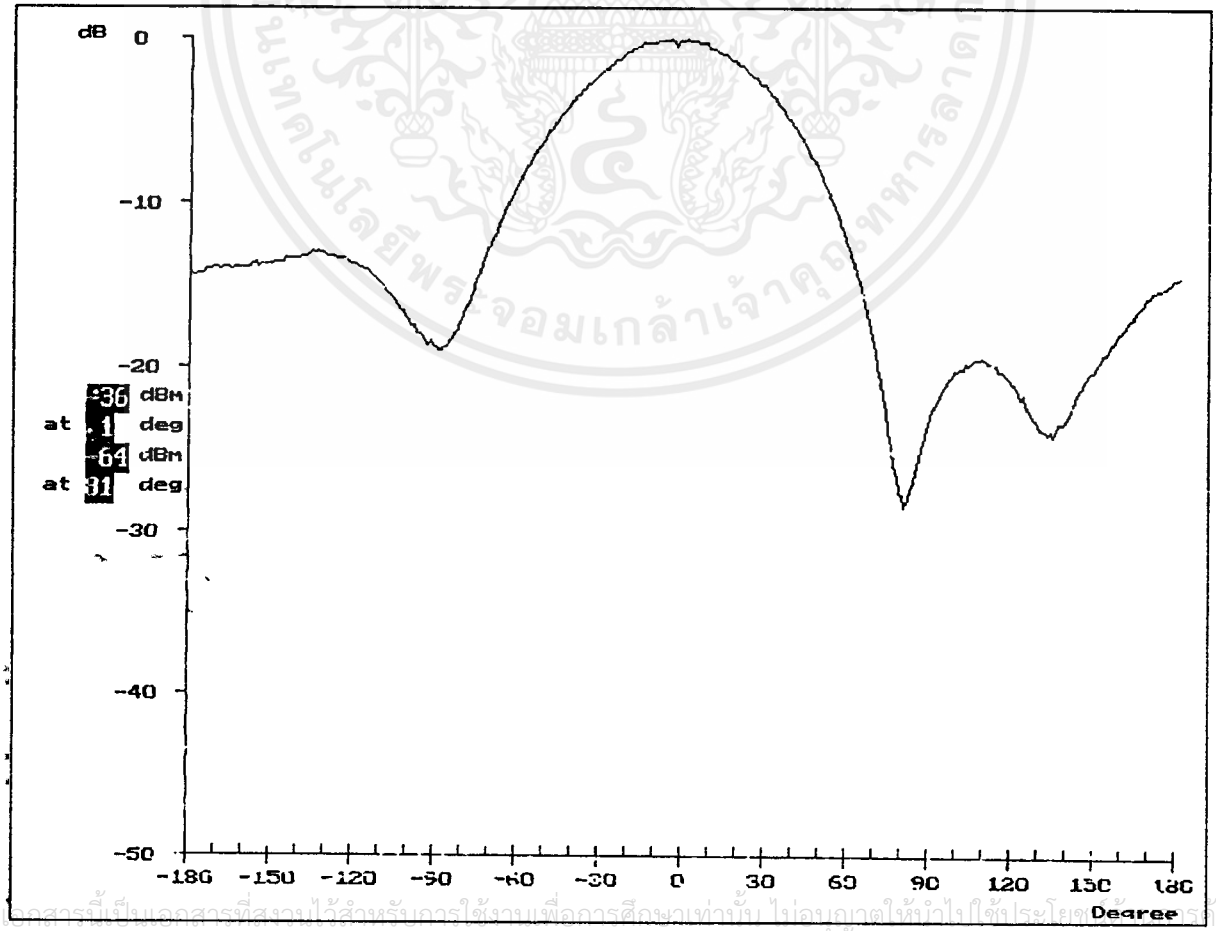
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รวมถึงห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้

ความถี่205.5 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-35.83	180	-50.17
10	-36.33	190	-49.67
20	-37.33	200	-49.67
30	-38.83	210	-49.50
40	-41.00	220	-49.17
50	-44.17	230	-49.00
60	-48.33	240	-49.50
70	-54.67	250	-50.67
80	-63.33	260	-52.83
90	-58.67	270	-54.50
100	-55.83	280	-52.67
110	-55.17	290	-48.33
120	-56.67	300	-44.50
130	-59.33	310	-41.67
140	-58.67	320	-39.33
150	-55.67	330	-37.67
160	-53.33	340	-36.50
170	-51.33	350	-35.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





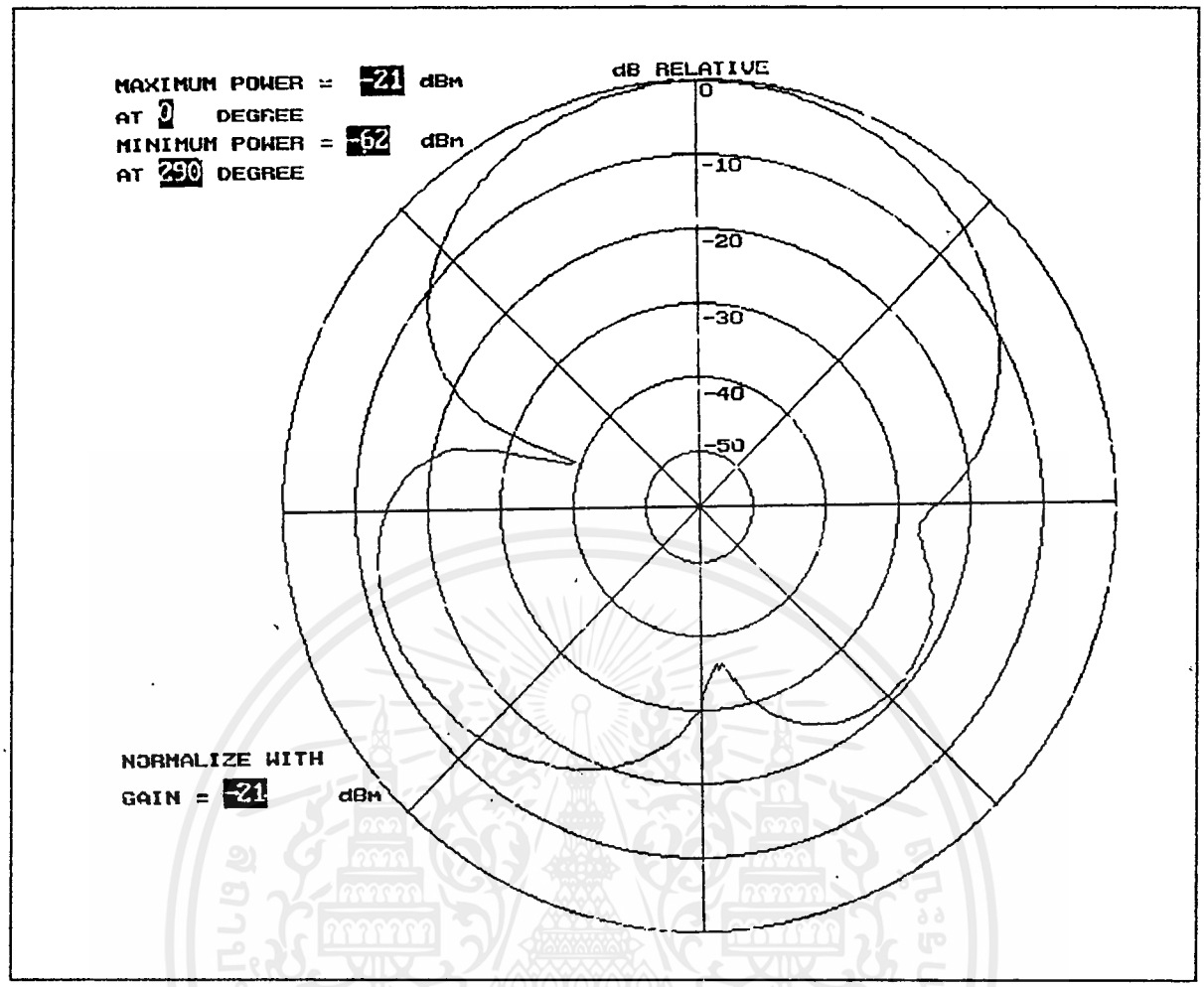
รูปแสดงเพ้นเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 205.5MHz

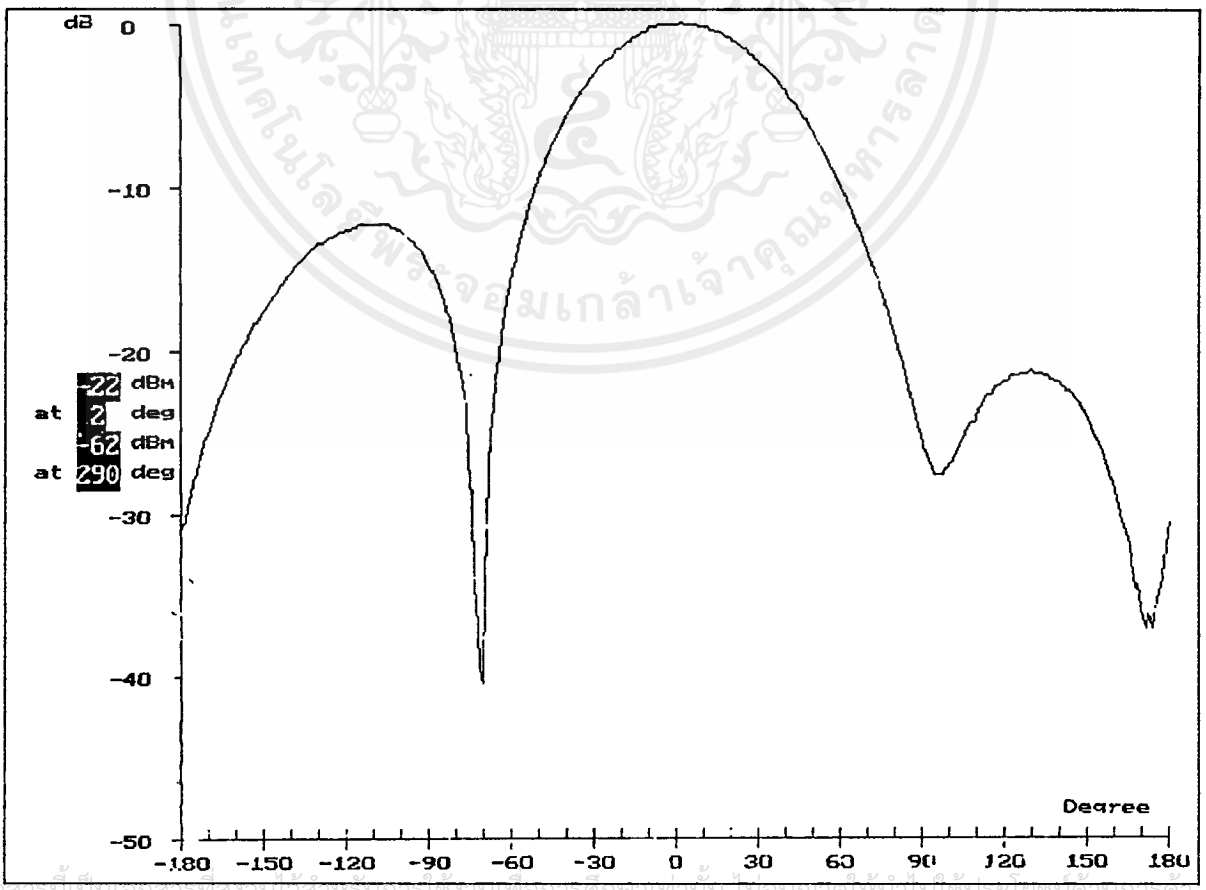
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 219.5 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-21.67	180	-52.83
10	-21.83	190	-46.67
20	-22.50	200	-42.17
30	-23.83	210	-39.17
40	-25.67	220	-36.83
50	-28.17	230	-35.00
60	-31.33	240	-34.17
70	-35.33	250	-33.83
80	-40.50	260	-34.17
90	-46.83	270	-36.17
100	-48.67	280	-41.17
110	-45.83	290	-62.00
120	-43.50	300	-37.50
130	-42.83	310	-31.33
140	-43.50	320	-27.33
150	-45.67	330	-24.83
160	-49.67	340	-23.17
170	-57.50	350	-22.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





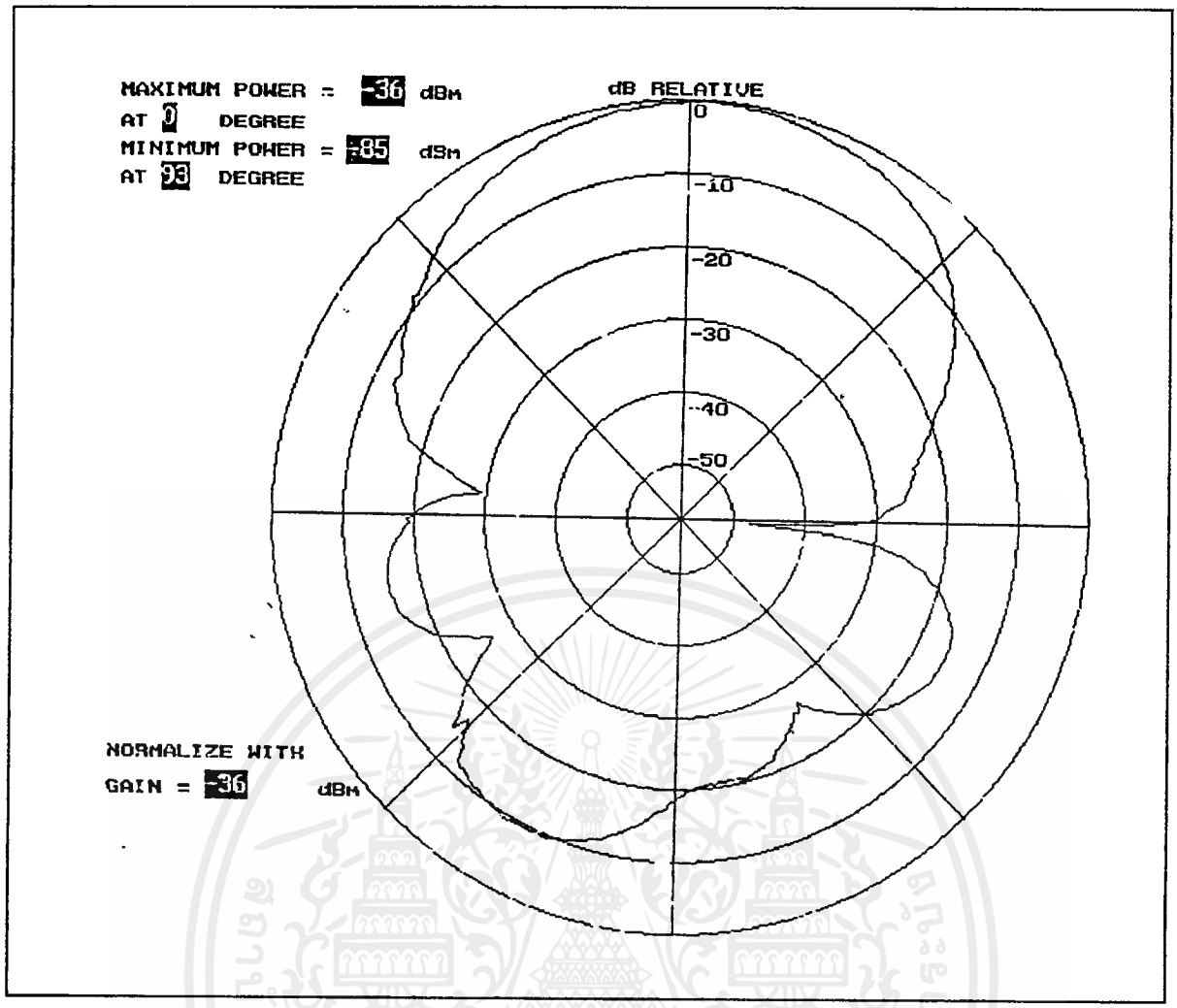
รูปแสดงเพาเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 219.5MHz

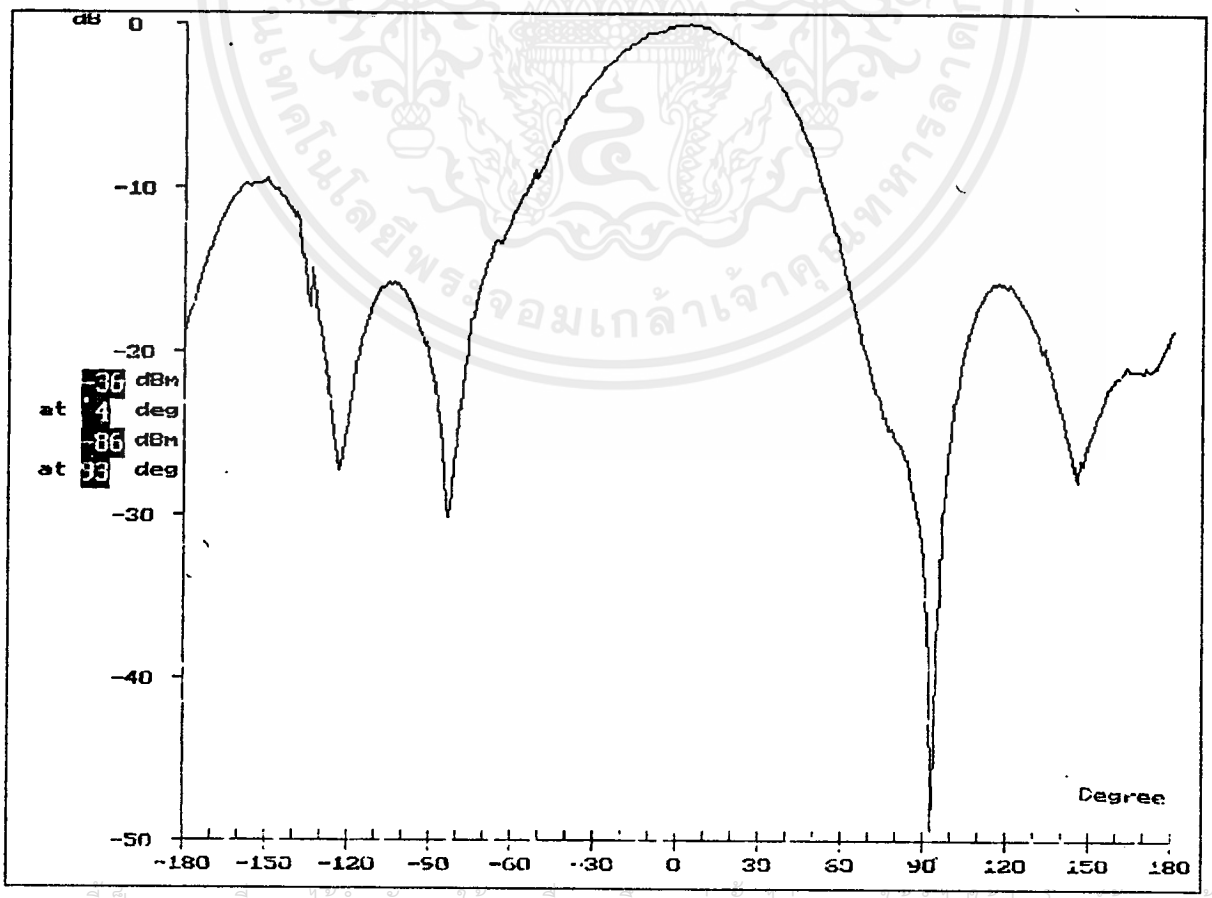
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 513.5 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-36.67	180	-55.33
10	-36.83	190	-50.17
20	-37.67	200	-46.83
30	-39.00	210	-46.00
40	-41.17	220	-48.33
50	-45.17	230	-55.17
60	-51.00	240	-61.00
70	-57.67	250	-53.33
80	-62.00	260	-52.83
90	-69.17	270	-57.33
100	-61.50	280	-62.17
110	-53.67	290	-51.83
120	-52.67	300	-48.33
130	-55.17	310	-45.67
140	-60.33	320	-42.33
150	-62.00	330	-40.00
160	-58.17	340	-38.17
170	-57.83	350	-37.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





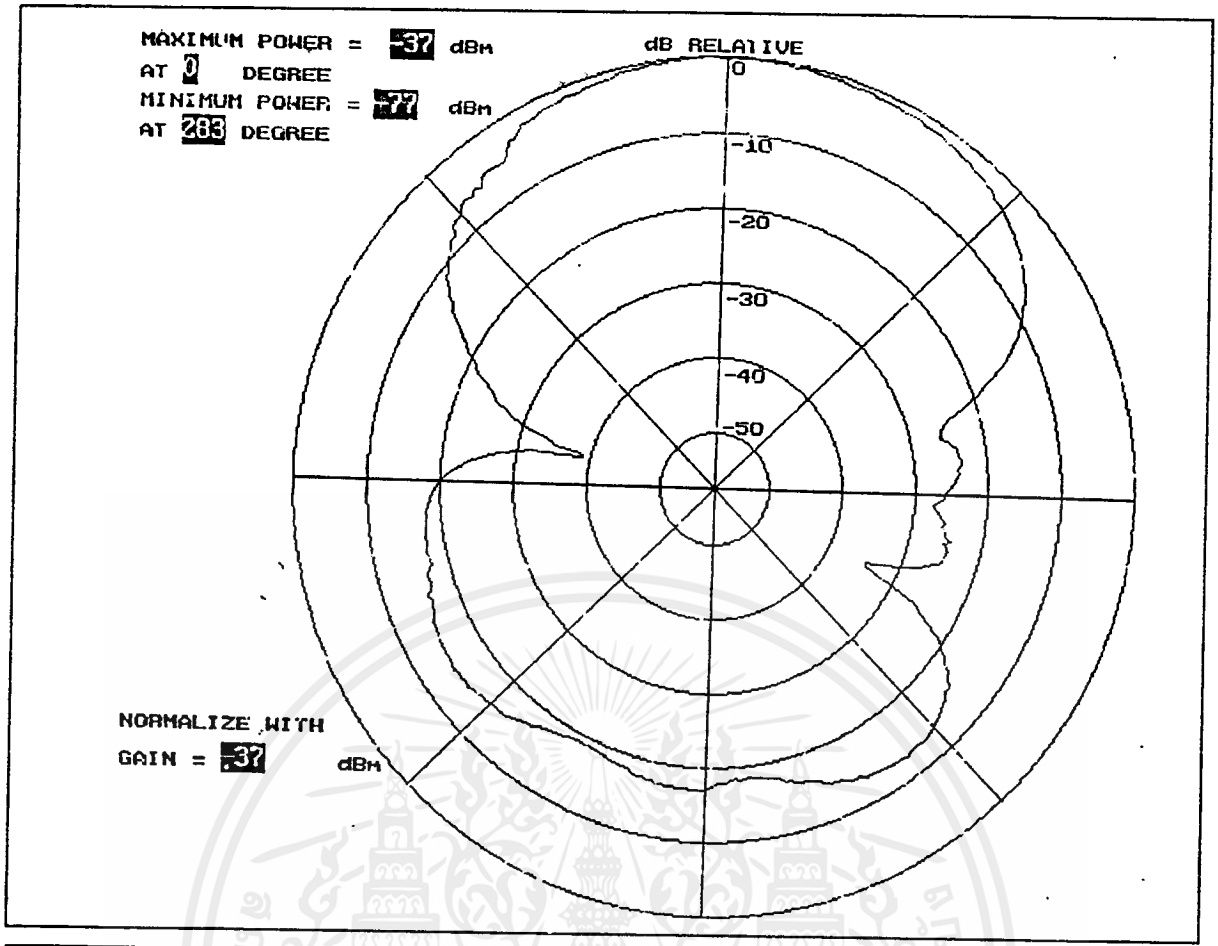
รูปแสดงเพาเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 513.5MHz

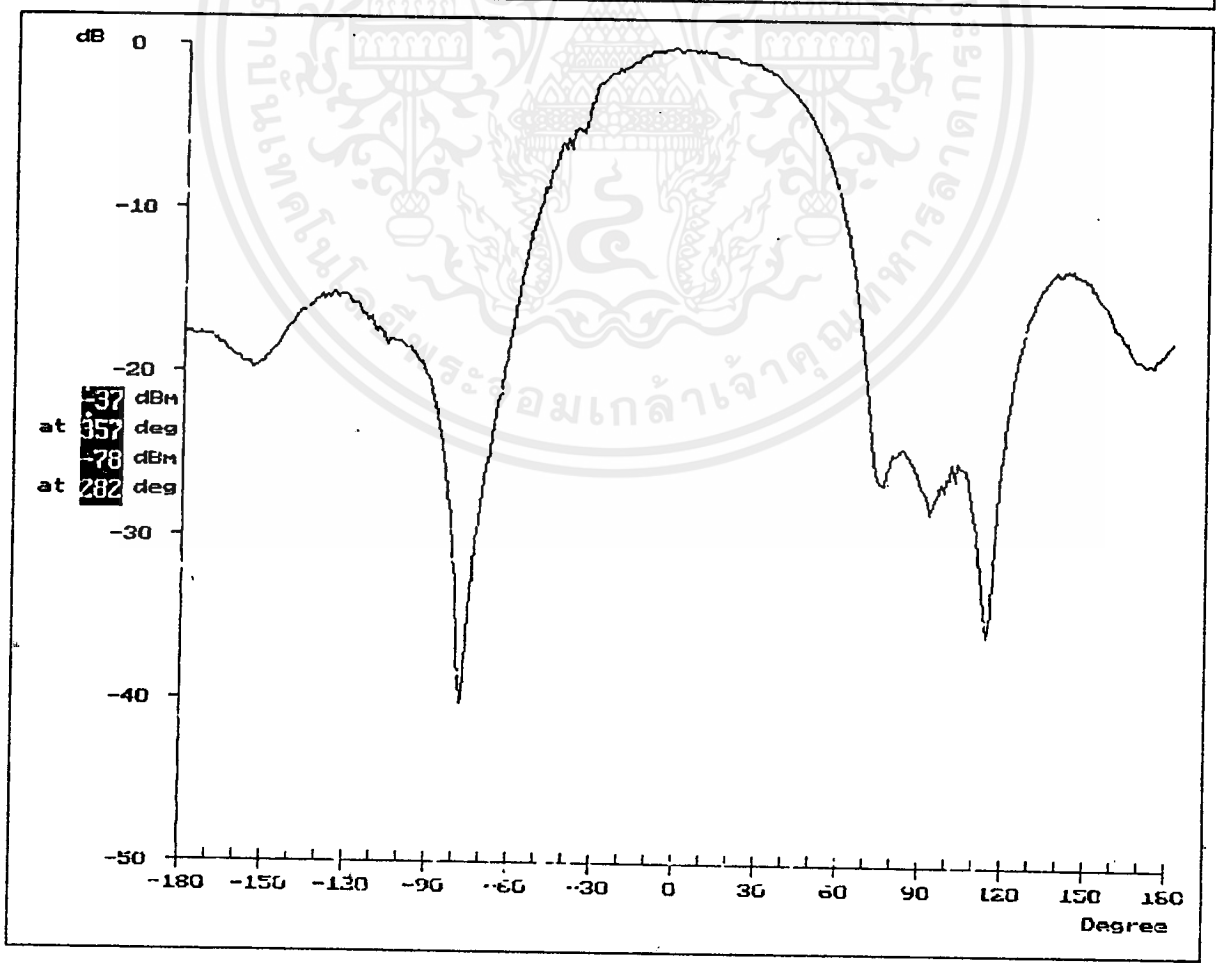
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 681.5 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-37.50	180	-55.17
10	-37.67	190	-55.17
20	-38.00	200	-56.67
30	-38.50	210	-56.50
40	-39.83	220	-54.33
50	-42.33	230	-52.67
60	-47.33	240	-52.83
70	-58.83	250	-54.83
80	-62.17	260	-55.67
90	-64.17	270	-58.00
100	-63.50	280	-70.17
110	-66.83	290	-63.83
120	-61.17	300	-54.50
130	-53.00	310	-46.83
140	-51.00	320	-43.67
150	-51.33	330	-39.50
160	-54.33	340	-38.50
170	-56.33	350	-37.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





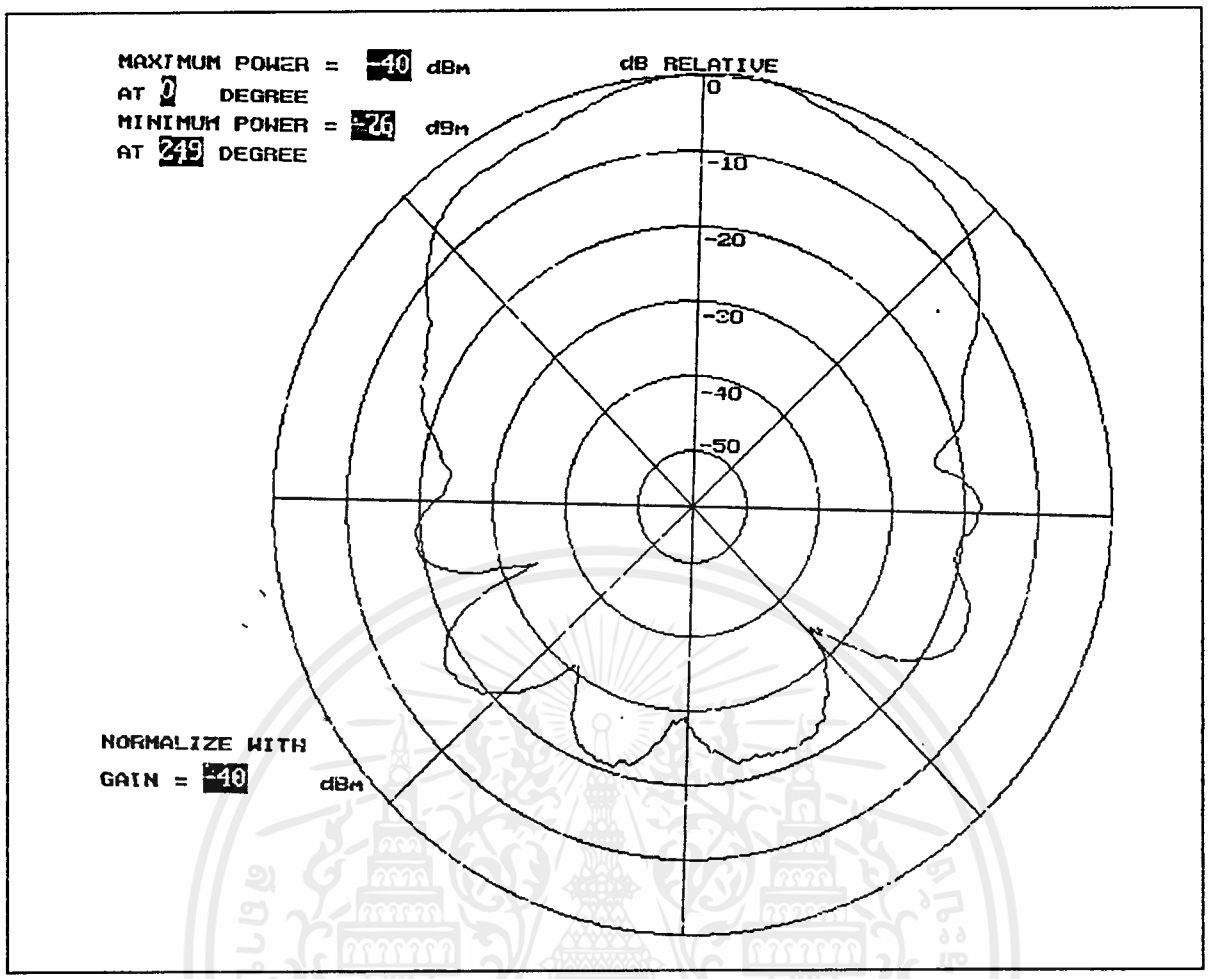
รูปแสดงเพาเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 618.5MHz

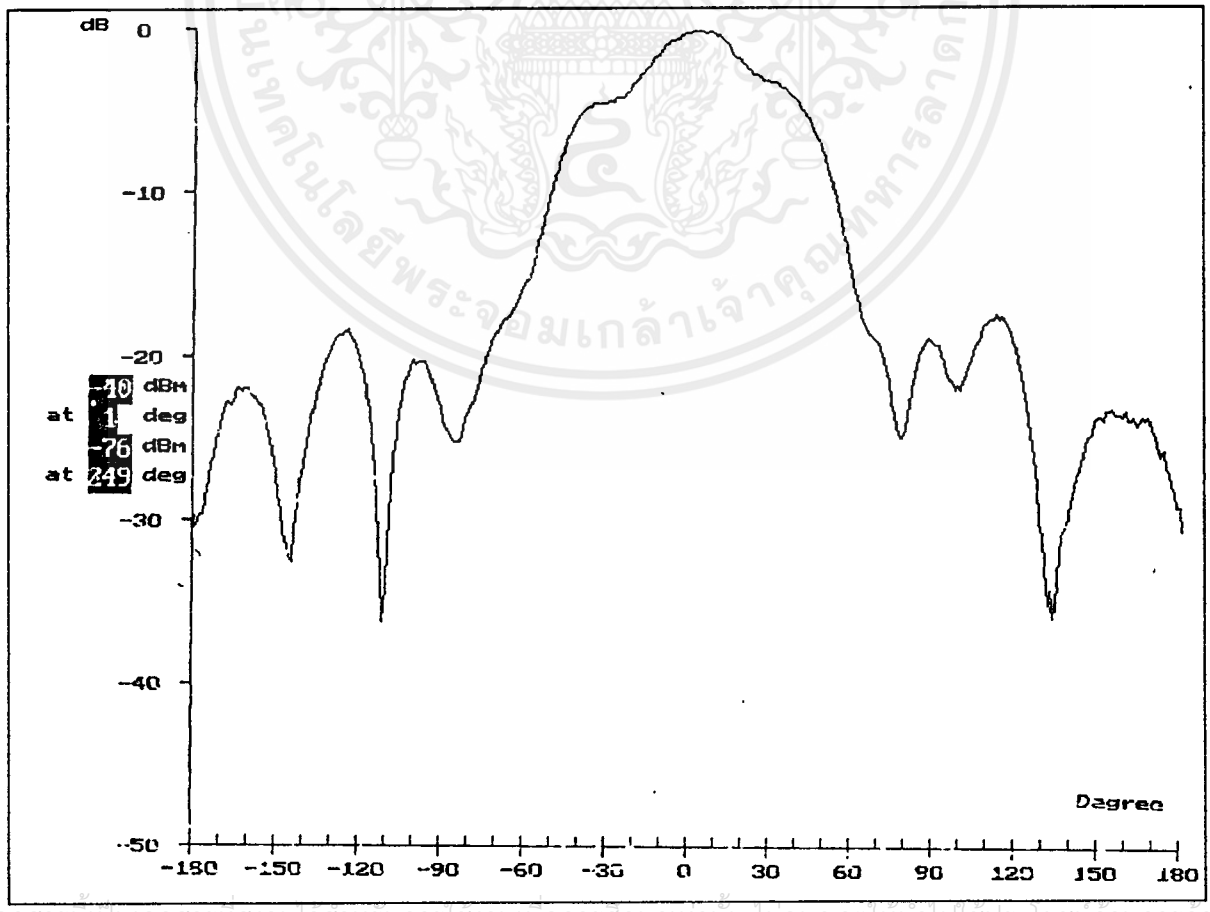
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1000 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-40.17	180	-69.00
10	-40.33	190	-64.33
20	-42.00	200	-62.00
30	-43.17	210	-67.17
40	-44.33	220	-66.67
50	-47.83	230	-59.50
60	-54.67	240	-60.00
70	-59.00	250	-74.17
80	-64.33	260	-60.17
90	-59.00	270	-63.13
100	-61.83	280	-63.33
110	-57.67	290	-58.50
120	-59.33	300	-55.67
130	-70.83	310	-49.67
140	-68.67	320	-45.17
150	-63.50	330	-44.33
160	-63.17	340	-43.17
170	-64.50	350	-41.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





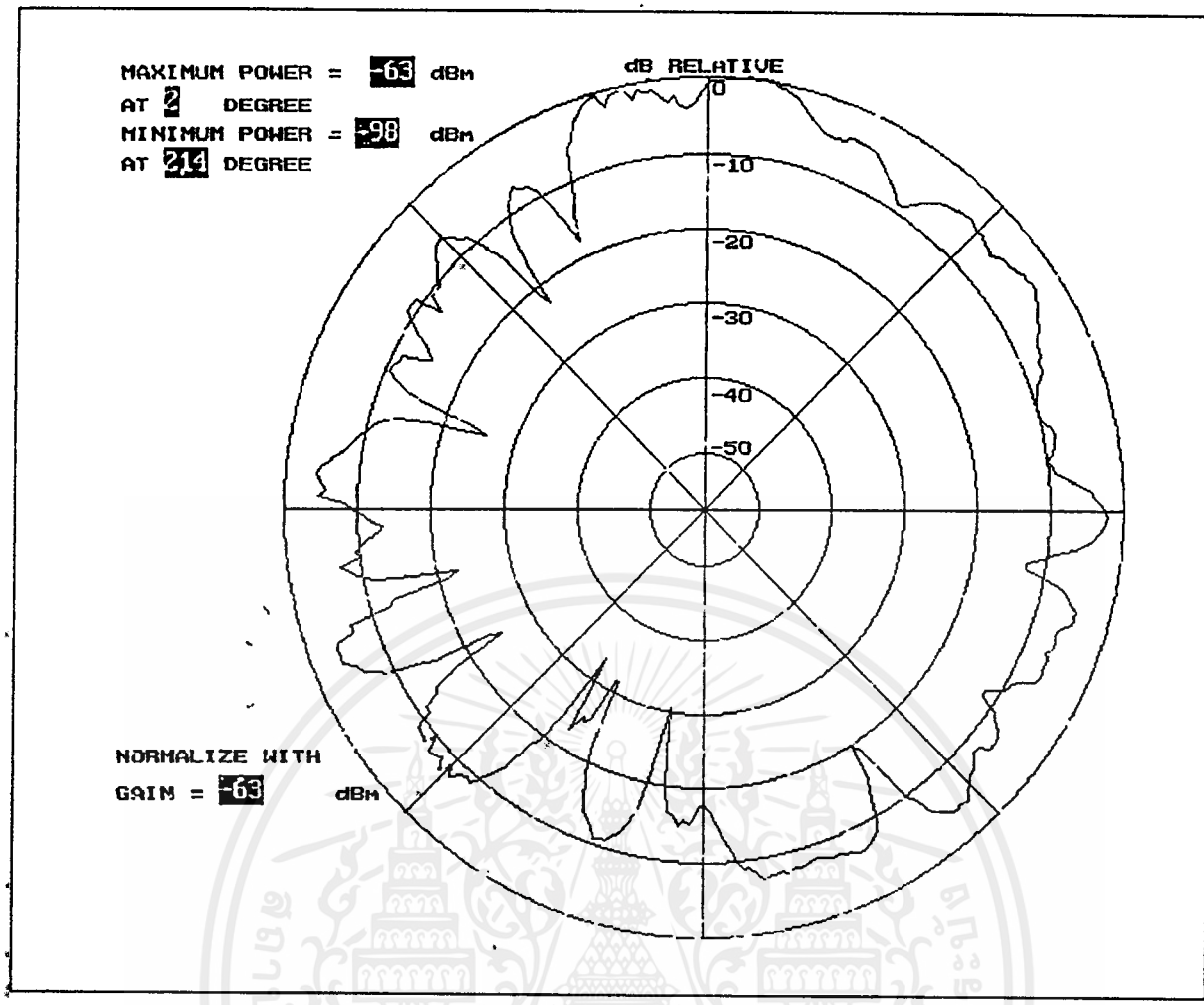
รูปแสดงเพาเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 1GHz

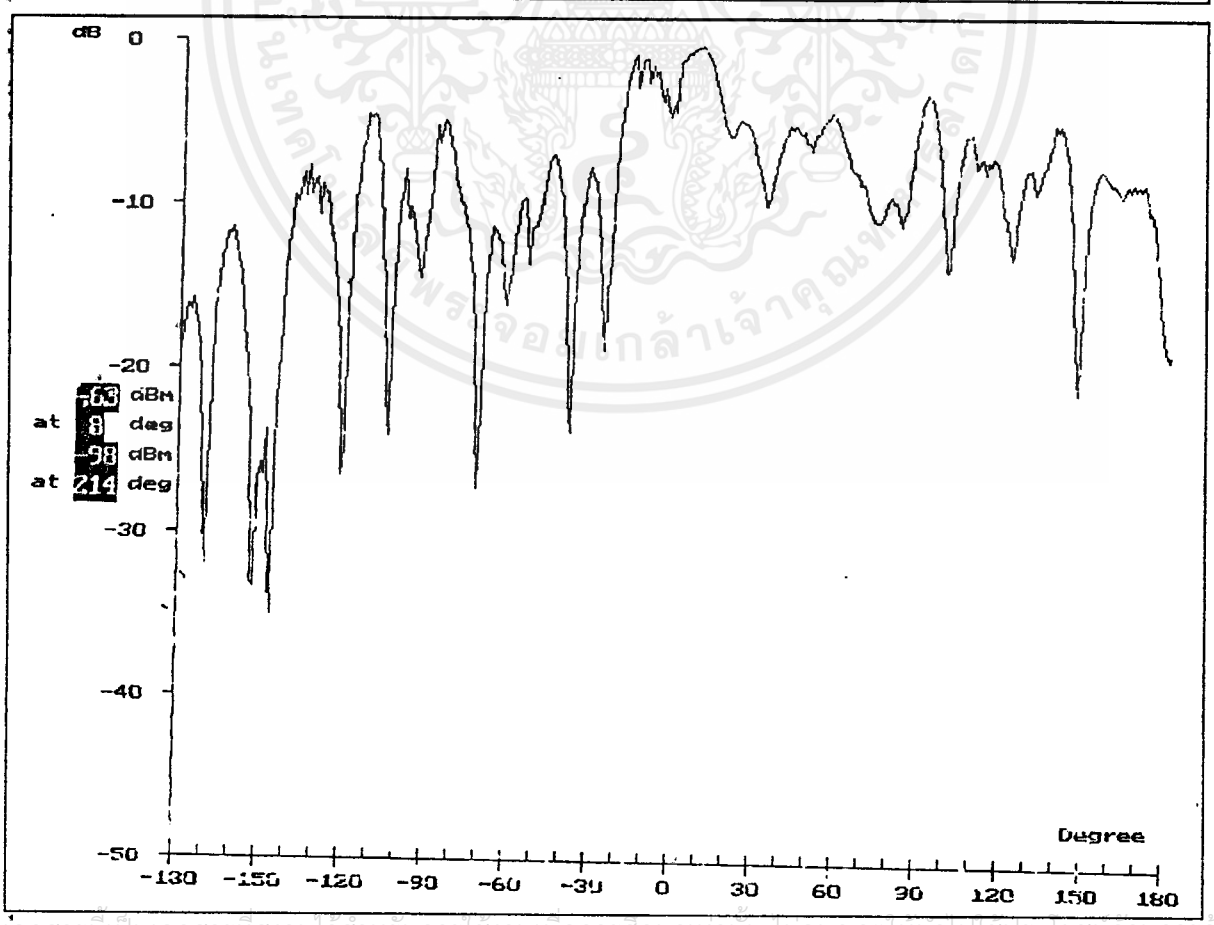
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1700 MHz

องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)	องศา	ระดับพลังงานการแพร่กระจายคลื่น (dBm)
0	-64.17	180	-81.67
10	-63.67	190	-95.00
20	-68.50	200	-75.67
30	-70.50	210	-88.33
40	-68.33	220	-74.33
50	-68.33	230	-73.67
60	-68.50	240	-87.83
70	-72.67	250	-67.83
80	-72.33	260	-72.00
90	-66.17	270	-72.83
100	-76.33	280	-72.00
110	-69.83	290	-81.33
120	-73.33	300	-77.00
130	-71.67	310	-73.33
140	-68.17	320	-78.00
150	-72.83	330	-71.50
160	-71.50	340	-66.50
170	-71.00	350	-64.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

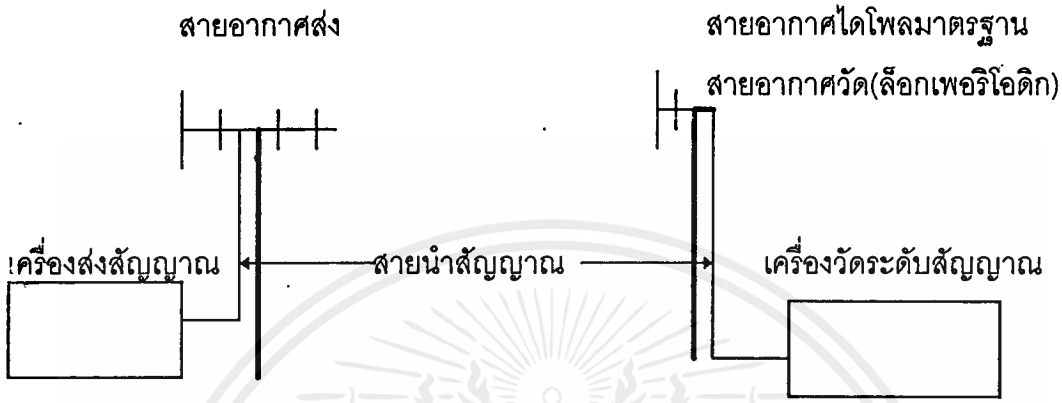




รูปแสดงเพาเวอร์แพทเทอร์นของสายอากาศล็อกเพอริโอดิกที่ความถี่ 1.7GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดอัตราขยายของสายอากาศ



รูปแสดงการวัดระดับสัญญาณของไดโพลมาตรฐานและสายอากาศที่ต้องการวัด

ตารางอัตราขยายเปรียบเทียบสายอากาศล็อกเพอริโอดิกกับไดโพลมาตรฐาน

ความถี่ที่รับสัญญาณ (MHz)	สายอากาศล็อกเพอริโอดิก	สายอากาการไดโพลมาตรฐาน	ผลต่างอัตราขยายที่รับได้	
	อัตราขยายที่รับได้ (dBm)	อัตราขยายที่รับได้(dBm)	(dBd)	(dBi)
205	-23.16	-26.17	3.01	5.16
219	-23.31	-26.33	3.02	5.17
513	-37.30	-40.33	3.03	5.18
618	-39.84	-42.83	2.99	5.14
1000	-39.53	-42.45	2.92	5.07

หมายเหตุ

dBd อัตราขยายเมื่อเทียบกับไดโพลมาตรฐาน

dBi อัตราขยายเมื่อเทียบกับไอโซโซปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในการทำโครงงาน เรื่อง "สายอากาศล็อกเพอริโอดิก" ส่วนใหญ่จะเน้นทฤษฎีและการออกแบบเพื่อที่จะนำมาสร้างและทดลองรับใช้งานจริงได้ นอกเหนือไปจากสายอากาศที่เราเห็นกันอยู่ทั่วๆ ไป ซึ่งในการศึกษาเรื่องสายอากาศให้ลึกซึ้งนั้นนับว่าทำได้ยากมาก เพราะจำเป็นต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากพอสมควร หากผู้ใดสนใจก็สามารถศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมได้

จากหลักการและทฤษฎีเมื่อนำมาออกแบบและสร้างในช่วงย่านความถี่ 174MHz-1700MHzซึ่งอยู่ในช่วงย่านความถี่ VHF,UHF ซึ่งเป็นย่านความถี่สูง เมื่อนำมาทดลองรับสัญญาณโทรทัศน์สามารถรับสัญญาณได้จริง แต่เนื่องเป็นสายอากาศเพียงตัวเดียวจึงมีทิศทางการรับแบบทางเดียวจึงอาจมีทิศทางการรับน้อย แต่โดยรวมแล้วถือว่าเป็นที่น่าพอใจ เมื่อศึกษาลึกลงไปจะเห็นว่ามีคุณสมบัติต่างๆดี คือมีอัตราขยายสูง แพทเทอร์นการแพร่กระจ่ายมีอัตราส่วนโลบหน้าต่อโลบหลังสูง จากข้อเด่นของสายอากาศแบบนี้ที่เพียงต้นเดียวสามารถรับได้หลายช่องนั้นและมีช่วงความถี่การรับสัญญาณกว้าง โดยเฉพาะย่านความถี่UHF ซึ่งปัจจุบันมีการดำเนินกิจการในย่านนี้เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศล็อกเพอริโอดิกมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากในอนาคตข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ "วิศกรรมสายอากาศ." สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ 2537

บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ "คู่มือติดตั้งMATV,CATV" สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)

ยืน ภู่วรวรรณ "เทคนิคการติดทั้งสายอากาศทีวี-เอฟเอ็ม" ซีเอ็ดยูเคชั่น 2527

โมไนย ไกรฤกษ์ , วิวัฒน์ กิรานนท์ "ทฤษฎีสายกาศ" คณะวิศวรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

"THE ARRL ANTENNA BOOK 16th Edition" American Radio Relay Newington ,CT USA 0611

TELEVISION ANTENNA Part II Receiving Antenna NHK COMMUNICATION TRANING INSTITUTE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5
Aluminum Tubing Sizes

6061-T6 (61S-T6) Round Aluminum Tube In 12-Foot Lengths

Tubing Diameter	Wall Thickness Inches	Stubs Ga.	ID, Inches	Approximate Weight Pounds Per Foot	Pounds Per Length
3/16 in.	0.035	(No. 20)	0.117	0.019	0.228
	0.049	(No. 18)	0.089	0.025	0.330
1/4 in.	0.035	(No. 20)	0.180	0.027	0.324
	0.049	(No. 18)	0.152	0.036	0.432
	0.058	(No. 17)	0.134	0.041	0.492
5/16 in.	0.035	(No. 20)	0.242	0.036	0.432
	0.049	(No. 18)	0.214	0.047	0.564
	0.058	(No. 17)	0.196	0.055	0.660
3/8 in.	0.035	(No. 20)	0.305	0.043	0.516
	0.049	(No. 18)	0.277	0.060	0.720
	0.058	(No. 17)	0.259	0.068	0.816
	0.065	(No. 16)	0.245	0.074	0.888
7/16 in.	0.035	(No. 20)	0.367	0.051	0.612
	0.049	(No. 18)	0.339	0.070	0.840
	0.065	(No. 16)	0.307	0.089	1.068
1/2 in.	0.028	(No. 22)	0.444	0.049	0.588
	0.035	(No. 20)	0.430	0.059	0.708
	0.049	(No. 18)	0.402	0.082	0.984
	0.058	(No. 17)	0.384	0.095	1.040
	0.065	(No. 16)	0.370	0.107	1.284
5/8 in.	0.028	(No. 22)	0.569	0.061	0.732
	0.035	(No. 20)	0.555	0.075	0.900
	0.049	(No. 18)	0.527	0.106	1.272
	0.058	(No. 17)	0.509	0.121	1.452
	0.065	(No. 16)	0.495	0.137	1.644
3/4 in.	0.035	(No. 20)	0.680	0.091	1.092
	0.049	(No. 18)	0.652	0.125	1.500
	0.058	(No. 17)	0.634	0.148	1.776
	0.065	(No. 16)	0.620	0.160	1.920
	0.083	(No. 14)	0.584	0.204	2.448
7/8 in.	0.035	(No. 20)	0.805	0.108	1.308
	0.049	(No. 18)	0.777	0.151	1.810
	0.058	(No. 17)	0.759	0.175	2.100
	0.065	(No. 16)	0.745	0.199	2.399
1 in.	0.035	(No. 20)	0.930	0.123	1.476
	0.049	(No. 18)	0.902	0.170	2.040
	0.058	(No. 17)	0.884	0.202	2.424
	0.065	(No. 16)	0.870	0.220	2.640
	0.083	(No. 14)	0.834	0.281	3.372
1-1/8 in	0.035	(No. 20)	1.055	0.139	1.668
	0.058	(No. 17)	1.009	0.228	2.736
1-1/4 in.	0.035	(No. 20)	1.180	0.155	1.860
	0.049	(No. 18)	1.152	0.210	2.520
	0.058	(No. 17)	1.134	0.256	3.072
	0.065	(No. 16)	1.120	0.284	3.408
	0.083	(No. 14)	1.084	0.357	4.284
1-3/8 in.	0.035	(No. 20)	1.305	0.173	2.076
	0.058	(No. 17)	1.259	0.282	3.384
1-1/2 in.	0.035	(No. 20)	1.430	0.180	2.160
	0.049	(No. 18)	1.402	0.260	3.120
	0.058	(No. 17)	1.384	0.309	3.708
	0.065	(No. 16)	1.370	0.344	4.128
	0.083	(No. 14)	1.334	0.434	5.208
	*0.125	1/8 in.	1.250	0.630	7.416
	*0.250	1/4 in.	1.000	1.150	14.832
1-5/8 in.	0.035	(No. 20)	1.555	0.206	2.472
	0.058	(No. 17)	1.509	0.336	4.032
1-3/4 in.	0.058	(No. 17)	1.634	0.363	4.356
	0.083	(No. 14)	1.584	0.510	6.120
1-7/8 in.	0.058	(No. 17)	1.759	0.389	4.668
2 in.	0.049	(No. 18)	1.902	0.350	4.200
	0.065	(No. 16)	1.870	0.450	5.400
	0.083	(No. 14)	1.834	0.590	7.080
	*0.125	1/8 in.	1.750	0.870	9.960
	*0.250	1/4 in.	1.500	1.620	19.920
2-1/4 in.	0.049	(No. 18)	2.152	0.398	4.776
	0.065	(No. 16)	2.120	0.520	6.240
	0.083	(No. 14)	2.084	0.660	7.920
2-1/2 in.	0.065	(No. 16)	2.370	0.587	7.044
	0.083	(No. 14)	2.334	0.740	8.880
	*0.125	1/8 in.	2.250	1.100	12.720
	*0.250	1/4 in.	2.000	2.080	25.440
3 in.	0.065	(No. 16)	2.870	0.710	8.520
	*0.125	1/8 in.	2.700	1.330	15.600
	*0.250	1/4 in.	2.500	2.540	31.200

*These sizes are extruded. All other sizes are drawn tubes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1
Characteristics of Commonly Used Transmission Lines

Type of line	Z_0 Ohms	VF %	pF per foot	OD	Dielectric Material	Max Operating Volts (RMS)
RG-6	75.0	75	18.6	0.266	Foam PE	—
RG-8X	52.0	75	26.0	0.242	Foam PE	—
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
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	800
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	—
Aluminum Jacket, Foam Dielectric						
1/2 inch	50.0	81	25.0	0.500		2500
3/4 inch	50.0	81	25.0	0.750		4000
7/8 inch	50.0	81	25.0	0.875		4500
1/2 inch	75.0	81	16.7	0.500		2500
3/4 inch	75.0	81	16.7	0.750		3500
7/8 inch	75.0	81	16.7	0.875		4000
Open wire	—	97	—	—		—
75-ohm transmitting twin lead	75.0	67	19.0	—		—
300-ohm twin lead	300.0	82	5.8	—		—
300-ohm tubular	300.0	80	4.6	—		—
Open Wire, TV Type						
1/2 inch	300.0	95	—	—		—
1 inch	450.0	95	—	—		—

Dielectric Designation	*Name*	*Temperature Limits*
PE	Polyethylene	−65° to +80°C
Foam PE	Foamed polyethylene	−65° to +80°C
PTFE	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	−250° to +250°C

*Double shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้