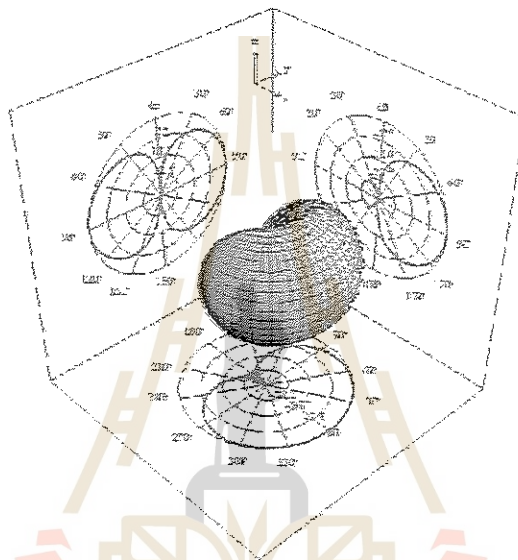




สรุปเนื้อหารายวิชา
วิศวกรรมสายอากาศ



ผลิตโดย

นายพงษ์วัฒน์ สีลาเหลี่ยม นายสันติพงศ์ แต่งขาว

และนายจักรพันธ์ ศรีรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สวรรค์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการส่งเสริมให้นิสิต/นักศึกษาจัดทำสรุปเนื้อหารายวิชาในรูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

สารบัญ

คำอธิบายรายวิชา	ก
แนวคิดและวัตถุประสงค์	ก
สารบัญ	ข
บทที่ 1 ทฤษฎีวิศวกรรมสายอากาศพื้นฐาน.....	1
หน่วยที่ 1-1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น.....	2
หน่วยที่ 1-2 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นเปิด.....	8
หน่วยที่ 1-3 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด.....	14
หน่วยที่ 1-4 การทดลองด้วยสายอากาศไดโพลความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$	22
หน่วยที่ 1-5 สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับและการเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ด้วยบาลูน.....	28
บทที่ 2 ทฤษฎีเชิงปฏิบัติการสายอากาศชนิดต่างๆ.....	38
หน่วยที่ 2-1 สายอากาศโมโนโพล.....	39
หน่วยที่ 2-2 สายอากาศแบบบ่วง.....	45
หน่วยที่ 2-3 การโพลาริซ์แบบวงกลมและสายอากาศแบบเกลียว.....	52
หน่วยที่ 2-4 สายอากาศแถวลำดับปรสิต (ยาเกิ-อูตะ).....	60
บทที่ 3 ทฤษฎีเชิงปฏิบัติการ สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศแบบแถวลำดับ.....	65
หน่วยที่ 3-1 สายอากาศแบบแถวลำดับ: สายอากาศแบบร่อง.....	66
หน่วยที่ 3-2 เทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริป: สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	73
หน่วยที่ 3-3 สายอากาศแถวลำดับระนาบแบบไมโครสตริป.....	82
เอกสารอ้างอิงและแหล่งวิทยาการ	88

คำอธิบายรายวิชา

สำหรับเนื้อหาของรายวิชาวิศวกรรมสาขาอากาศจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีสาขาอากาศขั้นพื้นฐานของ สาขาอากาศแบบเส้นลวด สาขาอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ สาขาอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นทั้งแบบเส้นตรง และแบบพับ พารามิเตอร์ที่สำคัญของสาขาอากาศ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราขยาย และการโพลาไรซ์ของสาขาอากาศ นอกจากนี้จะมีการอธิบายถึงสาขาอากาศที่มีคุณภาพสูง เช่น สาขาอากาศแถวลำดับปรสิติก สาขาอากาศแถวลำดับชนิดร่อง และชนิดไมโครสตริป เทคนิคการแมตซ์สาขาอากาศด้วยบอดี้

แนวคิดและวัตถุประสงค์

ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ หลากหลายรูปแบบ มาช่วยทำให้ระบบสื่อสารมีประสิทธิภาพสูงสุดและทันสมัยอย่างไม่หยุดยั้ง แต่เทคโนโลยีเกือบทั้งหมดยังคงมีความจำเป็นต้องใช้คลื่นวิทยุมาเป็นตัวกลางในการรับส่งข่าวสารไปสู่จุดหมายเช่นเดิม ซึ่งอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดที่ใช้ในการแผ่กระจายกำลังงานคลื่นวิทยุออกไปสู่จุดหมายปลายทางที่ต้องการ ก็คือ สาขาอากาศ นั่นเอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาเอกสารหรือสื่อที่ใช้ในการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมสาขาอากาศ ที่มีระดับของการเรียนรู้ที่อยู่ในระดับที่สามารถให้ผู้ศึกษาสามารถศึกษาด้วยตนเองได้ โดยสามารถศึกษาได้จากรูปแบบที่เป็นสื่ออิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยสื่อที่เป็นตำราขนาดที่พอเหมาะประกอบกันไป

สำหรับสื่อการศึกษาในรูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์วิชาวิศวกรรมสาขาอากาศชุดนี้ ได้สรุป เรียบเรียง และพัฒนาจากการเรียนการสอนในวิชาวิศวกรรมสาขาอากาศ และบางส่วนที่เป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติ จากการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคม 1 ของสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ได้ใช้ประกอบการเรียนการสอนภาคทฤษฎีขั้นพื้นฐานที่จำเป็นควบคู่ไปกับการศึกษาภาคทฤษฎีที่เน้นหนักในแนววิเคราะห์และคำนวณไปพร้อมๆ กัน เพื่อมาช่วยเสริมสร้างความรู้ให้กับนักศึกษาได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งจะได้ประโยชน์โดยตรงก็คือ นักศึกษาสามารถนำไปทบทวนเมื่อไปพบกับปัญหาขณะทำงานจริงได้เป็นอย่างดี

ทั้งนี้ทางคณะผู้ผลิตหวังว่าสื่อการศึกษาอิเล็กทรอนิกส์วิชาวิศวกรรมสาขาอากาศชุดนี้ คงจะให้ประโยชน์ทางการศึกษาแก่ผู้ที่ศึกษาและนำไปใช้งานได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีเนื้อหาที่เข้าใจง่ายและเรียนแบบสนุก คุณความดีของสื่อการศึกษาชุดนี้นี้ ขอมอบอุทิศให้กับบูรพคุณาจารย์ บิดามารดา และผู้มีพระคุณ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพทุกท่าน

นักศึกษา : นายพงษ์วัฒน์ สีลาเหล็กม นายสันติพงศ์ แดงขาว

และนายจักรพันธ์ ศรีรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

ทฤษฎีวิศวกรรมสายอากาศพื้นฐาน (Basic Antenna Engineering Theory)

กล่าวนำ

ในบทนี้นักศึกษาจะได้ศึกษาและทำความเข้าใจสายอากาศพื้นฐานสองประเภท ได้แก่ สายอากาศแบบเส้นลวด (Wire Antenna) และสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture Antenna) โดยจะเรียนรู้คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) อัตราขยาย (Gain) อิมพีแดนซ์ (Impedance) และการโพลาไรซ์ (Polarization)

การศึกษาค้นคว้าพื้นฐานของสายอากาศในบทเรียนนี้ จะใช้วิธีการวัดคุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ และนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศที่แตกต่างกัน โดยสายอากาศไดโพลจะถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างของสายอากาศแบบเส้นลวด (Wire Antenna) และสายอากาศปากแตรจะถูกใช้เป็นตัวอย่างของสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture Antenna) โดยขนาดของสายอากาศจะสัมพันธ์กับความถี่ปฏิบัติการ (Operating Frequency) หรือความยาวคลื่น (Wavelength) ด้วยเหตุนี้ขนาดของสายอากาศที่ความถี่ใดๆ จึงมักจะกำหนดจากความยาวคลื่นของความถี่นั้นๆ สำหรับหัวข้อที่จะศึกษาในบทนี้ มีดังต่อไปนี้

หน่วยที่ 1-1 เป็นการศึกษาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) ของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น ($\lambda/2$) ทำงานที่ความถี่ 1 GHz

หน่วยที่ 1-2 เป็นการศึกษาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของท่อนำคลื่นปลายเปิด (Open Waveguide) และคำจำกัดความของคุณลักษณะต่างๆ ที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ

หน่วยที่ 1-3 เป็นการศึกษาสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna) ซึ่งในทางปฏิบัติจะถูกนำไปใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ

หน่วยที่ 1-4 เป็นการศึกษาสายอากาศไดโพลที่มีความยาวขนาดต่างๆ กัน ซึ่งมีผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและค่าอิมพีแดนซ์อินพุต (Input Impedance) ของสายอากาศ

หน่วยที่ 1-5 เป็นการศึกษาสายอากาศไดโพลแบบพับ (Folded Dipole) ซึ่งสายอากาศที่จะทำการทดลองนี้ประกอบด้วยสายอากาศไดโพลขนานกันคู่หนึ่งที่ถูกต่อให้เป็นบ่วงแคบๆ สายอากาศชนิดนี้สามารถพิจารณาให้เป็นสายอากาศที่มีหลายๆ ส่วนประกอบ (Multiple Element Antenna) หรือเป็นแบบแถวลำดับ (Array) ได้ ซึ่งจะทำให้สามารถเรียนรู้ของการแปลงอิมพีแดนซ์ได้ดียิ่งขึ้น

หน่วยที่ 1-1

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น

(Radiation Pattern of a $\lambda/2$ Dipole)

1.1 วัตถุประสงค์

สำหรับการเรียนรู้ในหน่วยนี้ นักศึกษาสามารถศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น (Half-Wave Dipole) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (E-planes and H-planes)

1.2 ทฤษฎี

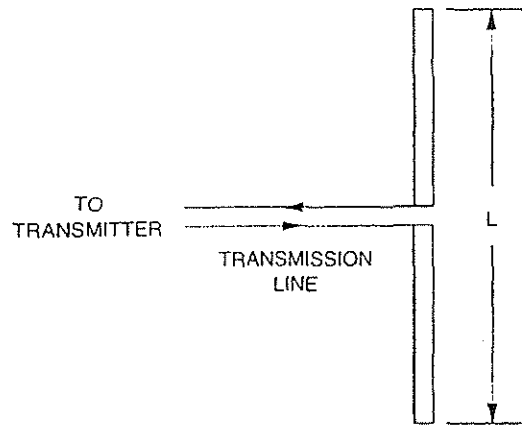
สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการแผ่กระจายกำลังงานและรับคลื่นวิทยุ โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านระหว่างท่อนำคลื่นหรือสายส่งกับอากาศอิสระ (Free Space) โดยทั่วไปสายอากาศชิ้นหนึ่งๆ สามารถใช้ในการส่งหรือรับสัญญาณได้เหมือนกัน แต่สิ่งที่สำคัญมากสำหรับการใช้งานทั้งสองกรณีนั้นก็คือ ทิศทางและการวางตัวของสายอากาศทั้งสองในขณะที่ทำการรับส่งสัญญาณนั้น ระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ในทิศทางที่ถูกต้องจะมีมากกว่าในทิศทางอื่นๆ หากใช้เป็นสายอากาศส่งก็จะมีกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปในทิศทางดังกล่าวสูงกว่าทิศทางอื่นๆ ด้วยเช่นกัน นั่นแสดงว่าทิศทางที่แผ่กระจายคลื่นได้สูงสุดของสายอากาศส่งจะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสายอากาศรับที่รับคลื่นได้สูงสุด

ในกรณีที่เป็นแหล่งจ่ายแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Source) จะเป็นสายอากาศสมมติที่ไม่มีทิศทาง โดยจะมีความแรงในการแผ่กระจายกำลังงานเท่ากันทุกทิศทาง สายอากาศแบบไอโซทรอปิกจะไม่มีอยู่จริงในทางปฏิบัติ แต่มีไว้ใช้สำหรับเป็นสายอากาศอ้างอิงเมื่อมีการกล่าวถึงสายอากาศชนิดอื่นๆ ที่มีทิศทาง (Directional Antenna)

1.2.1 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด มีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 1.1 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะถูกต้องเข้ากับเครื่องส่ง โดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพล ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

การแจกแจงของกระแส (Current Distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (Magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



รูปที่ 1.1 สายอากาศไดโพล

ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่นๆ สามารถพิจารณาให้เป็นส่วนประกอบเล็กๆของความยาวไดโพล (Infinitesimal Dipole) ที่มีการแจกแจงของกระแสที่เท่ากันตลอดความยาว คุณสมบัติทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็กๆ

1.2.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern)

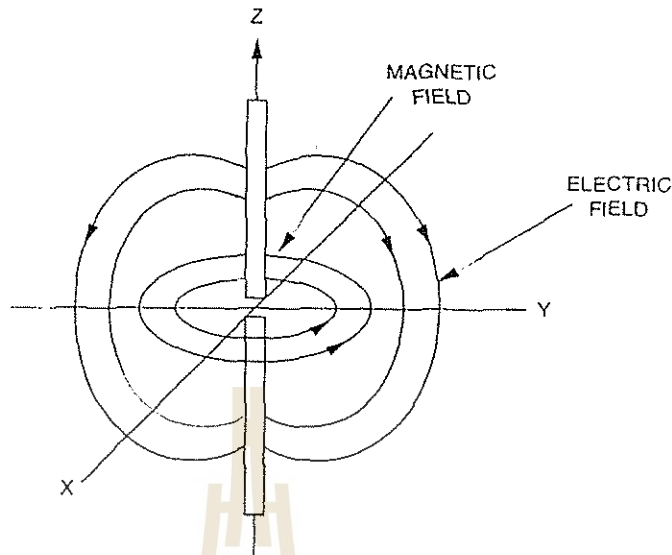
แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานคือ การแสดงรูปแบบของกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากตัวสายอากาศเป็นรูปภาพ 3 มิติ ที่วัดได้ในบริเวณสนามระยะไกล คุณสมบัติการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง (Space Coordinates) บริเวณของสนามระยะไกลคือ บริเวณที่ไกลเพียงพอสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ซึ่งจะไม่นับอยู่ใกล้ระยะทางที่อยู่ห่างจากสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศใดๆ สามารถที่จะทราบได้ด้วยการวัดทดลองและถ้าเราทราบลักษณะการแจกแจงของกระแสนในตัวสายอากาศ ก็จะสามารถคำนวณหาจากการคำนวณได้เช่นเดียวกัน

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับสัมพัทธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายกำลังงาน” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem)

ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติ ก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะวัดในแต่ละระนาบที่ตั้งฉากกัน คือระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก โดยเรียกว่า E-plane และ H-plane ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.2

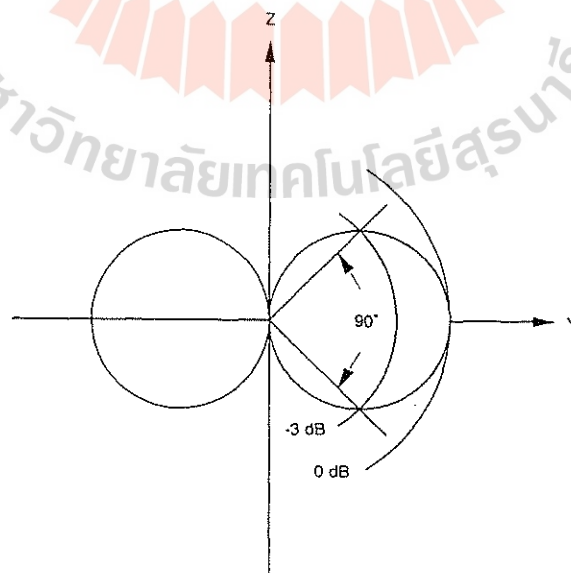
แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่งๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่

กระจายกำลังงานที่ถูกต้องควรจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

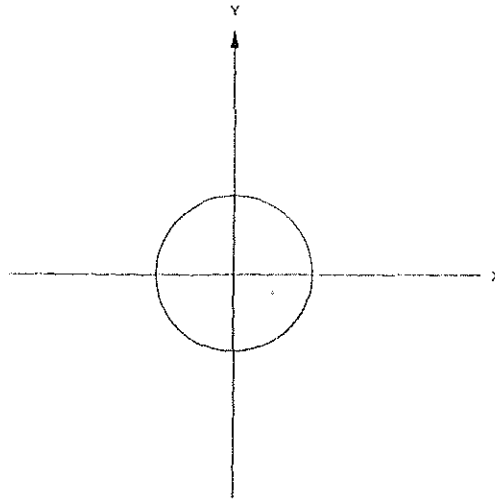


รูปที่ 1.2 ระนาบสนามไฟฟ้า: E-plane (y-z) และระนาบสนามแม่เหล็ก: H-plane (x-y)
ของสายอากาศไดโพล

รูปที่ 1.3 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานนี้แสดงให้เห็นว่าไดโพลอุดมคตินั้นมีทิศทางด้วย เพราะว่าการแผ่กระจายกำลังงานจะมีความแรงของสัญญาณสูงในบางทิศทางเมื่อเทียบกับทิศทางอื่นๆ ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.4 ซึ่งในแบบรูปนี้การแผ่กระจายกำลังงานจะเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 1.3 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)
ของไดโพลอุดมคติ



รูปที่ 1.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลอุดมคติ

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth: HPBW) ของสายอากาศ คือ การพิจารณามุมในลำคลื่นหลัก โดยคิดที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3 dB) ของกำลังงานที่แผ่ออกในทิศทางของกำลังงานสูงสุด

$$\text{HPBW} = \left| \theta_{\text{HPBWleft}} - \theta_{\text{HPBWright}} \right| \quad (1.1)$$

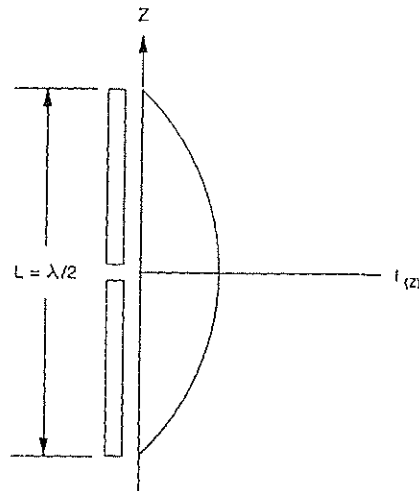
ค่า HPBW ของไดโพลอุดมคติในระนาบสนามไฟฟ้า E-plane จะเท่ากับ 90 องศาซึ่งดูได้จากรูปที่ 1.3

สำหรับสายอากาศไดโพลในทางปฏิบัติซึ่งใช้กันทั่วไป จะมีความยาว L เท่ากับ $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ค่า λ เป็นค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ การแฉงรูปของกระแสที่เกิดขึ้นบนไดโพล $\lambda/2$ จะมีรูปร่างของสัญญาณเป็นรูปไซน์ครึ่งคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 1.5 โดยกระแสจะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางและมีค่าศูนย์ที่จุดปลายสุด

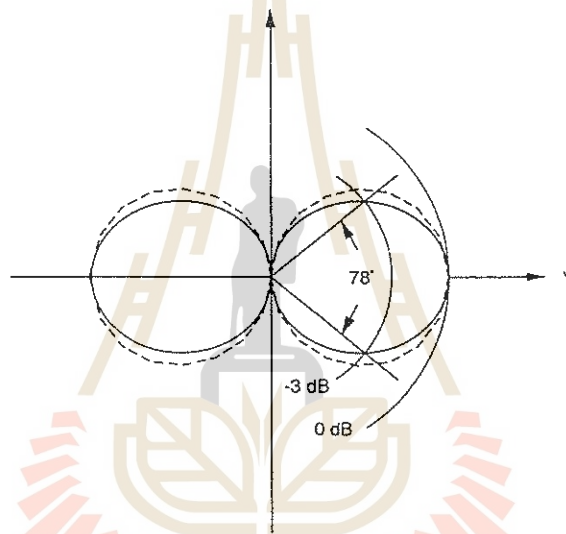
รูปที่ 1.6 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และในไดโพลอุดมคติ โดยสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW 78 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และให้ผลที่แคบและบางกว่าลักษณะของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ส่วนการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ จะมีลักษณะเป็นวงกลมดังรูปที่ 1.4

1.2.3 การโพลาไรซ์ของสายอากาศ (Antenna Polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศ จะใช้ในการอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุดและวัดได้ในสนามระยะไกล การสายอากาศจำนวนมากจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (Cycle) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และยังถูกแบ่งออกเป็น การโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical Polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal Polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular) และแบบรูปวงรี (Elliptical) ซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

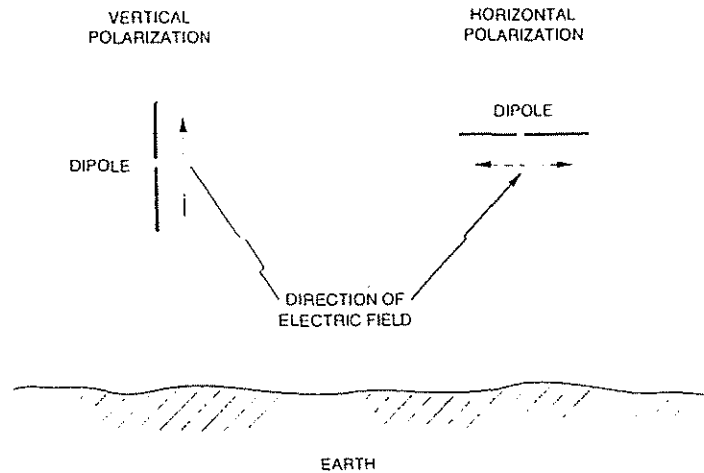


รูปที่ 1.5 การแจกแจงรูปของกระแสบนสายอากาศไดโพล $\lambda/2$



รูปที่ 1.6 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)
ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุคมคติ (เส้นประ)

บ่อยครั้งที่การโพลาริซชันของสายอากาศ จะพิจารณาจากรูปทรงของตัวสายอากาศเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะมีส่วนประกอบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัววางขนานกัน เช่น สายอากาศแบบไดโพลและยาگی เราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีการโพลาริซชันแบบเชิงเส้นขนานไปกับส่วนประกอบของตัวสายอากาศ แต่ก็มีสายอากาศบางชนิดซึ่งมีการโพลาริซชันแบบเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของโครงสร้างมาทำนายการโพลาริซชันได้ เช่น สายอากาศปากแตร (Horn) แบบบ่วง (Loop) และแบบร่อง (Slit) เป็นต้น



รูปที่ 1.7 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสัญญาณที่ส่งมา หากเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นของการโพลาไรซ์ทางแนวตั้งแต่สายอากาศที่ใช้มีการจัดการโพลาไรซ์ทางแนวนอน) เราเรียกว่า เกิดการแยกการโพลาไรซ์แบบไขว้ (Cross-Polarization Isolation)

1.3 สรุป

ในบทนี้ผู้ศึกษาจะรู้จักสายอากาศไดโพลขนาดความยาว $\lambda/2$ และวิธีการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศชนิดนี้ทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ได้เข้าใจถึงหลักการของการโพลาไรซ์ ของสายอากาศไดโพลและสายอากาศยาก็ และวิธีคำนวณหาความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (HPBW) ของสายอากาศชนิดนี้ด้วย

1.4 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) จุดประสงค์ของสายอากาศคืออะไร
- 2) แหล่งจ่ายแบบโอโซทรอปิก คืออะไร และนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างไร
- 3) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานคืออะไร ให้อธิบายความแตกต่างระหว่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของการรับกับการส่งของสายอากาศ
- 4) ให้อธิบายลักษณะและการทำงานของสายอากาศไดโพล
- 5) การโพลาไรซ์ของสายอากาศหมายถึงอะไร และสายอากาศไดโพลมีการโพลาไรซ์เป็นอย่างไร

หน่วยที่ 1-2

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของท่อนำคลื่นปลายเปิด

(Radiation Pattern of an Open Waveguide)

2.1 วัตถุประสงค์

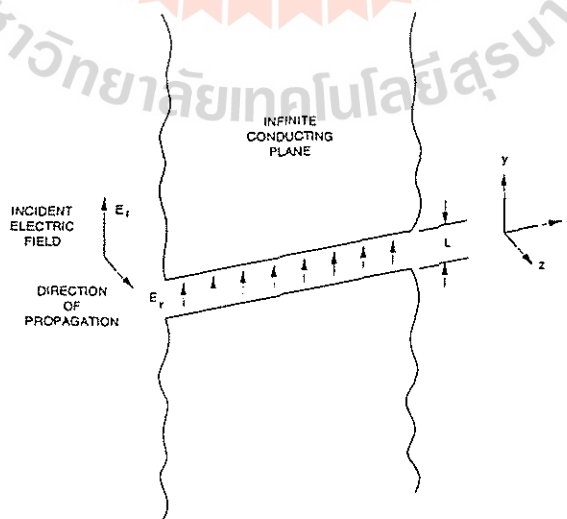
สำหรับทฤษฎีในหน่วยนี้ นักศึกษาจะได้ศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมของท่อนำคลื่น (Rectangular Aperture) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane)

2.2 ทฤษฎี

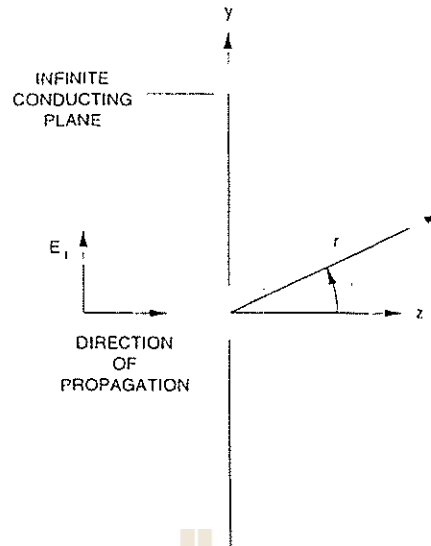
สายอากาศไดโพล (Dipole) คือ ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศเส้นลวด ที่มีการแผ่กระจายกำลังงานจากองค์ประกอบกระแสไฟฟ้า ส่วนสายอากาศชนิดอื่นๆ ที่แตกต่างจากหลักการของสายอากาศแบบเส้นลวด ก็คือสายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna) สายอากาศชนิดนี้จะมีช่องเปิดเพื่อให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านออกไปได้ ซึ่งท่อนำคลื่นปลายเปิด คือ ตัวอย่างแบบง่ายที่สุดของสายอากาศลักษณะนี้ ส่วนตัวอย่างอื่นๆ ก็คือ ท่อนำคลื่นที่มีการเจาะร่องบนผิวของโลหะที่ใช้เป็น โครงสร้าง ที่เรียกว่าสายอากาศแบบร่อง (Slot Antenna)

2.2.1 การแผ่กระจายกำลังงานจากร่องยาวอนันต์ (Infinite Slit)

จากรูปที่ 2.1 แสดงระนาบของคลื่นซึ่งเกิดขึ้นบนช่องในระนาบของตัวนำ โดยที่ช่องจะมีความยาวเป็นอนันต์ในทิศทางของแกน X ความกว้าง L ในทิศทางของแกน Y จะแคบมาก ส่วนระนาบของคลื่นจะเดินทางในทิศทางตามแกน Z



รูปที่ 2.1 การแผ่กระจายกำลังงานจากร่องยาวอนันต์ (Infinite Slit)



รูปที่ 2.2 มุมมองด้านข้าง (Side View) ของร่องที่ยาวอนันต์ (Infinite Slit)

การแผ่กระจายของสนามในทิศทางของแกน Y กำหนดได้โดย

$$E_y = E_o e^{-j\beta z} \quad (2.1)$$

เมื่อ E_y คือ สนามในทิศทางของแกน Y

E_o คือ ค่าสูงสุดของ E_y

β คือ $2\pi/\lambda$ ค่าคงที่ของการเดินทางของคลื่น (Propagation Constant)

การแผ่กระจายของสนามในทิศทางของ θ ได้แก่

$$E_\theta = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} E_o L \frac{\sin[(\beta L/2)\sin\theta]}{(\beta L/2)\sin\theta} \quad (2.2)$$

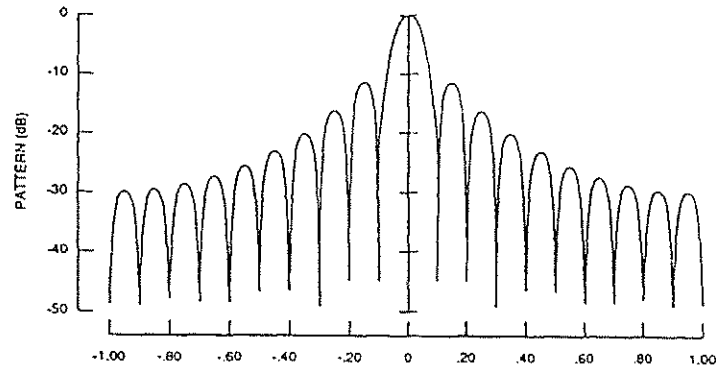
เมื่อ θ คือ มุมที่แสดงในรูปที่ 2.2

r คือ ระยะทางจากร่อง (Slit)

ส่วนที่ 2 ของสมการ (2.2) คือส่วนที่เราต้องสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบนอร์แมไลส์ (Normalized Radiation Pattern): $F(\theta)$

$$F(\theta) = \frac{\sin[(\beta L/2)\sin\theta]}{(\beta L/2)\sin\theta} \quad (2.3)$$

แม้ว่าสมการนี้จะดูเหมือนเป็นสมการที่ซับซ้อน แต่จริงๆ แล้วก็คือมาจากสมการ $(\sin x)/x$ นั่นเอง ซึ่งมีรูปแบบในรูปของกราฟในรูปที่ 2.3

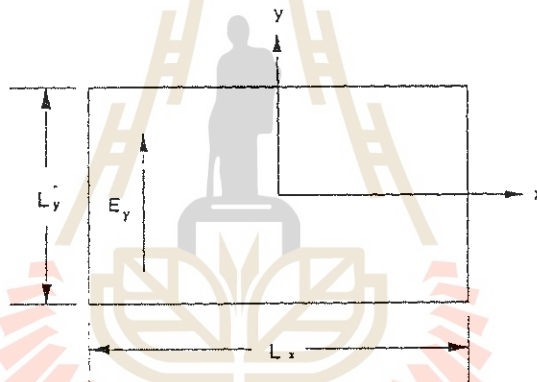


รูปที่ 2.3 กราฟของ $(\sin x)/x$

2.2.2 การแผ่กระจายกำลังงานจากช่องแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากสม่ำเสมอ

(Uniform Rectangular Aperture)

พิจารณาท่อนำคลื่นเปิดรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna) โดยมีภาพตัดขวางแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สนามในระนาบสนามไฟฟ้า จะหาได้จากสมการ

$$E_o = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} E_o L_x L_y \frac{\sin[(\beta L_y / 2) \sin \theta]}{(\beta L_y / 2) \sin \theta} \quad (2.4)$$

ซึ่งจะให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานนอร์มัลไลซ์ ดังสมการ

$$F_E(\theta) = \frac{\sin[(\beta L_y / 2) \sin \theta]}{(\beta L_y / 2) \sin \theta} \quad (2.5)$$

ส่วนสนามในระนาบสนามแม่เหล็ก จะหาได้จากสมการ

$$E_\phi = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} E_o L_x L_y \frac{\sin[(\beta L_x / 2) \sin \theta]}{(\beta L_x / 2) \sin \theta} \quad (2.6)$$

ซึ่งจะให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานออร์เมทัลไลซ์ ดังสมการ

$$F_{\theta}(\theta) = \cos\theta \frac{\sin[(\beta L_{\lambda}/2)\sin\theta]}{(\beta L_{\lambda}/2)\sin\theta} \quad (2.7)$$

สมการที่แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานออร์เมทัลไลซ์ทั้งสองสมการ จะอยู่ในรูปของ $(\sin x)/x$ ดังนั้นผลรวมของสมการแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานออร์เมทัลไลซ์ ก็คือ ผลรวมของ $(\sin x)/x$ ในระนาบสนามไฟฟ้า และ $(\sin x)/x$ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

2.3 ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในการอธิบายพารามิเตอร์ของสายอากาศ

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้อธิบายคุณสมบัติ มีดังต่อไปนี้

P_o คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศตัวส่ง (หน่วยเป็น วัตต์)

P_{rad} คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกไปโดยสายอากาศตัวส่ง (หน่วยเป็น วัตต์)

η คือ ประสิทธิภาพการแผ่กระจายกำลังงาน $\eta = P_{rad} / P_o$ (ไม่มีหน่วย)

“สายอากาศส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Efficiency) จะมีค่าใกล้เคียง 1 หรือ 100% อย่างไรก็ตามสำหรับสายอากาศบางชนิดเช่น สายอากาศแบบเส้นลวดสั้น (Short-Wire) ตัวอย่างเช่น สายอากาศไดโพลอุดมคติ ที่ได้อธิบายไปแล้วในแบบฝึกหัด 1-1 จะมีประสิทธิภาพการแผ่กระจายกำลังงานค่อนข้างต่ำ”

ϕ คือ ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Intensity) (หน่วยเป็น วัตต์ต่อสเตอริแอดเดียน)

“สเตอริแอดเดียน (Steradian; sr) คือ หน่วยของมุมตัน (Solid Angle) ซึ่งทรงกลมหนึ่งๆจะมีค่า 4π สเตอริแอดเดียน ดังนั้นเราสามารถกำหนดให้ค่าเฉลี่ยของความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานได้เป็น”

$$\phi_{avg} = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (\text{W/sr}) \quad (2.8)$$

D คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) (ไม่มีหน่วย)

“ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ ค่าความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดในทิศทางที่กำหนด โดยเทียบกับความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานเฉลี่ย (Average Radiation Intensity) ของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Antenna)”

$$D = \frac{\phi_{max}}{\phi_{avg}} = \frac{\phi_{max}}{P_{rad}/4\pi} \quad (2.9)$$

G คือ อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) หรือ อัตราขยายเจาะจงทิศทาง (Directive Gain) (ไม่มีหน่วย)

“สำหรับสายอากาศแบบไม่มีการสูญเสีย ค่าอัตราขยายของสายอากาศหรืออัตราขยายเจาะจงทิศทาง จะมีค่าเท่ากับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อย่างไรก็ตามสำหรับสายอากาศที่มีค่าประสิทธิภาพการแผ่กระจายน้อยกว่า 1 (100%) จะมีค่าอัตราขยายแตกต่างกัน นั่นคือ”

$$G = \eta D \quad (2.10)$$

Ω_a คือ มุมตันของลำคลื่นของสายอากาศ (Antenna Beam Solid Angle) (หน่วยเป็นสเตอเรเดียน)

“ Ω_a จะสอดคล้องกันกับมุมตัน (Solid Angle) จะนำมาใช้ในการหาค่ากำลังงานที่แผ่กระจายออกมาทั้งหมด (P_{rad}) ที่ระดับความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุด ϕ_{max} ”

$$P_{rad} = \Omega_a \phi_{max} \quad (2.11)$$

จะได้สมการสำหรับหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางอีกสมการหนึ่ง คือ

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_a} \quad (2.12)$$

A_e คือ พื้นที่ประสิทธิผล (Effective Area) หรือ ช่องเปิดประสิทธิผล (Effective Aperture)

(หน่วยเป็นตารางเมตร)

“ค่าพื้นที่ประสิทธิผลจะเป็นไปตามขนาดพื้นที่การดูดกลืนคลื่น ซึ่งแสดงโดยตัวสายอากาศเมื่อคลื่นเข้ามาตกกระทบตัวมัน ในกรณีของสายอากาศแบบช่องเปิดนั้น จะมีค่า A_e เท่ากันหรือน้อยกว่าพื้นที่ของช่องเปิดทางกายภาพ (Physical Aperture) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับความยาวคลื่น (λ และ A_e อยู่ในหน่วยที่เหมือนกัน) จะเท่ากับ”

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \quad (2.13)$$

η_{ap} คือ ประสิทธิภาพของช่องเปิด (Aperture Efficiency) หรือ ประสิทธิภาพสายอากาศ (Antenna Efficiency)

(ไม่มีหน่วย)

“ η_{ap} คือ อัตราส่วนระหว่างค่าพื้นที่ประสิทธิผล A_e และค่าพื้นที่ทางกายภาพของช่องเปิดของสายอากาศแบบช่องเปิด ซึ่งบ่อยครั้งจะประมาณการไว้ที่ค่า 50% ของ A_e ซึ่งเป็นค่าประมาณสำหรับคิดค่าประสิทธิภาพของช่องเปิด”

$$\eta_{ap} = \frac{A_e}{A_p} \quad (2.14)$$

F/B คือ อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front-to-Back Ratio) (หน่วยเป็น เดซิเบล)

“เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่ต้องการส่งในทิศทางที่ต้องการกับความแรงของสัญญาณในทิศทางตรงกันข้าม ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งคือใช้อธิบายความสามารถของสายอากาศ เพื่อให้เห็น

ถึงความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่เข้ามาจากด้านหน้าและสัญญาณที่ได้มาจากด้านหลัง เมื่อสายอากาศถูกใช้เป็นตัวรับ”

$$F/B = \text{Main Lobe (dB)} - \text{Back Lobe (dB)}$$

(2.15)

2.4 สรุป

จากการศึกษาทฤษฎีที่ผ่านมาในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาจะมีความรู้เกี่ยวกับสายอากาศแบบท่อนำคลื่น โดยเฉพาะสายอากาศปากแตรทรงพีรามิดและท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากปลายเปิด รวมทั้งได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของสายอากาศชนิดนี้ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศท่อนำคลื่นปลายเปิด ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (HPBW) ของระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก การโพลาไรซ์ (Polarization) ของสายอากาศปากแตรทรงพีรามิดและแบบท่อนำคลื่นปลายเปิด ค่าสภาพเจาะงทศทางและค่าพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศท่อนำคลื่นปลายเปิด และสามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าตอบของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้

2.5 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) ให้อธิบายลักษณะของสายอากาศชนิดท่อนำคลื่นปลายเปิด และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศชนิดนี้
- 2) ให้อธิบายคำจำกัดความของคำว่า สภาพเจาะงทศทางของสายอากาศ (Antenna Directivity) ทำไมจึงสามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศแบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless Antenna) อัตราขยายเท่ากับสภาพเจาะงทศทาง
- 3) เราจะสามารถกล่าวได้หรือไม่ว่าสายอากาศชนิดท่อนำคลื่นปลายเปิดมีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (Front-to-Back) ให้อธิบาย
- 4) หน่วย Radian ต่างจาก Steradian อย่างไร

หน่วยที่ 1-3

อัตราขยายของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

(Gain of Pyramidal Horn Antennas)

3.1 วัตถุประสงค์

สำหรับทฤษฎีในหน่วยนี้ นักศึกษาจะได้ศึกษาถึงคุณลักษณะของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดได้อย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น และจะทราบถึงเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณและเทคนิคสำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศชนิดนี้ด้วย

3.2 ทฤษฎี

3.2.1 ค่าการสูญเสียจากการแผ่กระจายกำลังงานในอากาศอิสระ (Free-Space Propagation Loss)

การที่สายอากาศรับถูกเลื่อนให้ห่างออกไปจากตัวสายอากาศส่ง ทำให้ระดับของกำลังงานที่รับได้ มีค่าลดลงนั้น เป็นผลมาจากการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายกำลังงานในอากาศอิสระ ซึ่งค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าระยะทางยกกำลังสองระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับ ค่าการสูญเสียนี้ เรียกว่า ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายกำลังงานในอากาศอิสระ (Free-Space Propagation loss) ซึ่งแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$L_p \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{4\pi r^2}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \frac{4\pi r}{\lambda} \quad (3.1)$$

โดยที่ r คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ
 λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศอิสระ (มีหน่วยเท่ากับ r)

เมื่อกำหนดค่าความยาวคลื่น สมการ (1) จะแสดงให้เห็นว่า L_p ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองเท่านั้น ความสัมพันธ์นี้สามารถพิจารณาได้ด้วยการทดลองโดยการส่งสัญญาณจากสายอากาศอันหนึ่ง และวัดกำลังงานที่รับได้ที่ระยะห่างต่างๆกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสายอากาศโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติเจาะจงทิศทาง ดังนั้นทิศทางสายอากาศต้องเหมือนเดิมตลอดการทดลอง ถ้าเราทราบระยะห่างระหว่างสายอากาศที่แตกต่างกันออกไป เราจะทราบค่าการลดทอนของกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะทางหนึ่งสัมพันธ์กันกับค่าการลดทอนที่รับได้จากอีกระยะทางหนึ่ง จึงสามารถคำนวณได้โดยง่าย โดยใช้สมการ

$$A \text{ (dB)} = 20 \log \frac{r_1}{r_2} \quad (3.2)$$

เมื่อ A คือ ค่าการลดทอนกำลังงานที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)
 r_1 และ r_2 คือ ค่าระยะห่างที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

การกำหนดคุณลักษณะเชิงเลขของคุณสมบัติเชิงทิศทางของสายอากาศนั้น หลักการของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) หรือค่าอัตราขยายเจาะจงทิศทาง (Directive Gain) จะถูกนำมาใช้พิจารณาเสมอ จากที่ได้ทำการศึกษามาแล้วในปฏิบัติการที่ 2 เราทราบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ก็คือ ค่าความเข้มในการแผ่กระจายกำลังงานสูงสูงในทิศทางที่กำหนดให้สัมพันธ์กับค่าความเข้มในการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศส่งแบบไอโซทรอปิก ซึ่งมีกำลังงานเท่ากันทุกทิศทาง และสายอากาศที่ไม่มีการสูญเสีย นั้น อัตราขยายของสายอากาศ (Directive Gain) จะมีค่าเดียวกันกับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

3.2.2 การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain Measurement)

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีที่ง่ายที่สุด ก็คือวิธีที่เรียกว่า วิธีแบบใช้สายอากาศอ้างอิง (Reference Antenna Method) หรือ วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method) หรือวิธีการแทนที่ (Substitution Method) ซึ่งสามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับด้วยสายอากาศอ้างอิง (P_{ref}) กับกำลังงานที่รับได้จากสายอากาศที่ทำการทดสอบ (P_{test}) ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ต้องการทราบ จะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$G_{test} = \frac{P_{test}}{P_{ref}} G_{ref} \quad (3.3)$$

เมื่อต้องการคำตอบ ให้มีหน่วยเป็น dB ก็จะได้จากสมการ

$$G_{test} \text{ (dB)} = P_{test} \text{ (dB)} - P_{ref} \text{ (dB)} + G_{ref} \text{ (dB)} \quad (3.4)$$

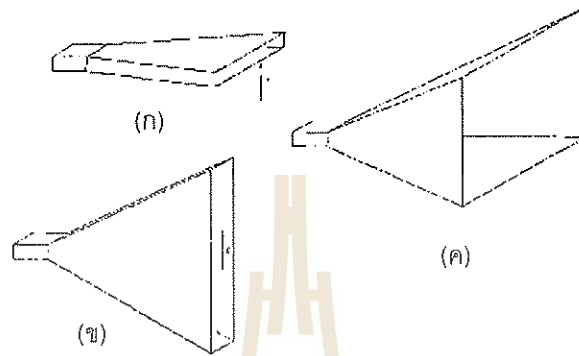
ก่อนที่จะนำวิธีการแทนที่มาใช้ นั้น เราจะต้องปรับเทียบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงเสียก่อน โดยการใช้สายอากาศสองตัวที่เหมือนกันทุกประการมาเป็นสายอากาศรับและส่ง จากนั้นวัดค่ากำลังงานที่ส่งออกไปและค่าของกำลังงานที่รับได้ นำมาคำนวณหาค่าอัตราขยาย ซึ่งจะเป็นอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ดังสมการ

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{rec}}{P_o}} \quad (3.5)$$

- เมื่อ G คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิง
 r คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศทั้งสอง
 P_{rec} และ P_o คือ กำลังงานที่รับได้และกำลังงานที่ส่งออกไป ตามลำดับ
 λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ (หน่วยเดียวกันกับ r)

3.2.3 สายอากาศปากแตรชนิดต่างๆ (Types of Horn Antennas)

สายอากาศปากแตรจะมีการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างท่อนำคลื่นกับอากาศอิสระค่อนข้างจะต่อเนื่อง สายอากาศชนิดนี้ได้ถูกสร้างขึ้นมาในหลายรูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าอัตราขยาย แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ตามรูปที่ 3.1 ได้แสดงชนิดของสายอากาศปากแตรที่มีใช้อยู่ทั่วไป



รูปที่ 3.1 สายอากาศปากแตร ชนิดท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

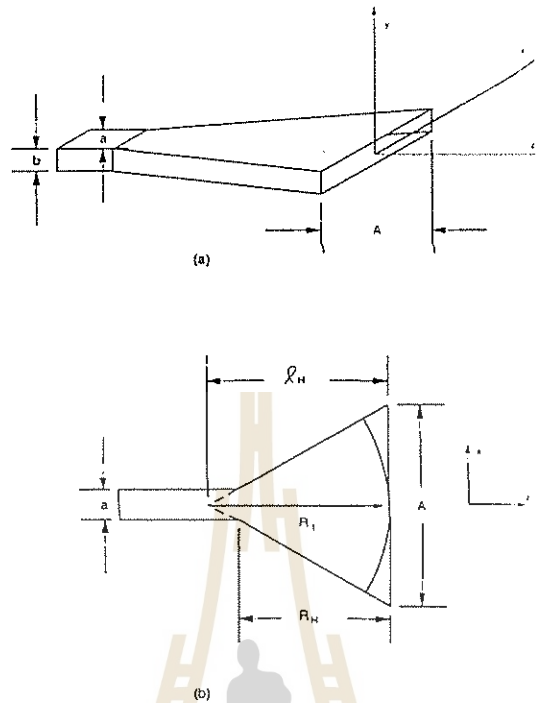
- (ก) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก
- (ข) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า
- (ค) ปากแตรทรงพีระมิด

สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดมักจะถูกใช้เป็นสายอากาศอ้างอิงในการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ เนื่องจากค่าอัตราขยายของสายอากาศสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำจากขนาดทางกายภาพของตัวสายอากาศเอง สำหรับสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์นั้น ส่วนของปากแตรจะกางออกไปในระนาบใดระนาบหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจัดเป็นสายอากาศแบบปากแตรทรงพีระมิดกรณีพิเศษ ส่วนสายอากาศปากแตรชนิดที่ไม่ได้แสดงในที่นี้ ได้แก่ สายอากาศปากแตรทรงกรวย ซึ่งจะใช้กับท่อนำคลื่นวงกลม

คุณลักษณะของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์จะใกล้เคียงกับสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดอย่างมาก ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศเซกเตอร์ดังกล่าวจะใช้วิธีการประมาณค่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดจากขนาดทางกายภาพของมัน

3.2.4 สายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane Sectoral Horn Antenna)

รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็กได้แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก

- (ก) รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศ
- (ข) ภาพตัดขวางในระนาบสนามแม่เหล็ก

ความสัมพันธ์ของขนาดทางกายภาพสามารถแสดงโดยสมการต่อไปนี้

$$l_H^2 = R_1^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2 \tag{3.6}$$

$$R_1 = A \sqrt{\left(\frac{l_H}{A}\right)^2 - \frac{1}{4}} \tag{3.7}$$

$$\frac{A}{R_1} = \frac{A-a}{R_H} \tag{3.8}$$

$$R_H = (A-a) \frac{R_1}{A} \tag{3.9}$$

แทนค่า R_1 ด้วยค่าจากสมการ (3.7) จะได้

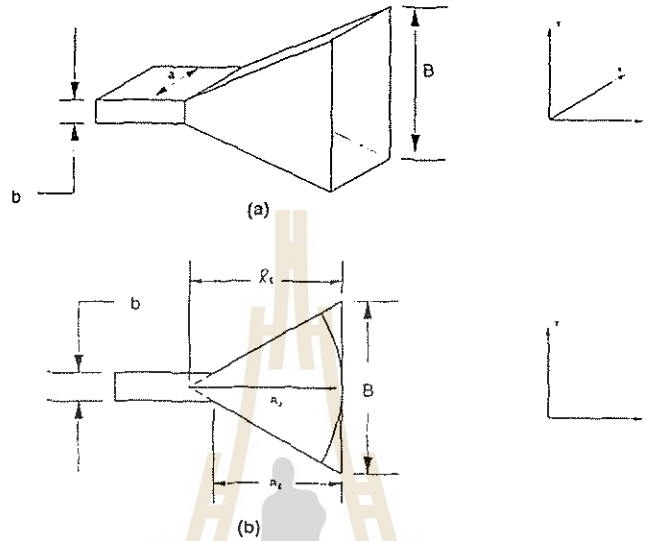
$$R_H = (A-a) \sqrt{\left(\frac{l_H}{A}\right)^2 - \frac{1}{4}} \tag{3.10}$$

ซึ่งแสดงว่าสายอากาศปากแตรที่มีค่าอัตราขยายสูงสุดนั้น จะมีขนาดของ A เท่ากับ

$$A = \sqrt{3\lambda R_1} \quad (3.11)$$

3.2.5 สายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane Sectoral Horn Antennas)

รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า

(ก) รูปทรงเรขาคณิต

(ข) ภาพตัดขวางในระนาบสนามไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของขนาดทางกายภาพสามารถแสดงได้ โดยสมการ

$$\ell_E^2 = R_1^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 \quad (3.12)$$

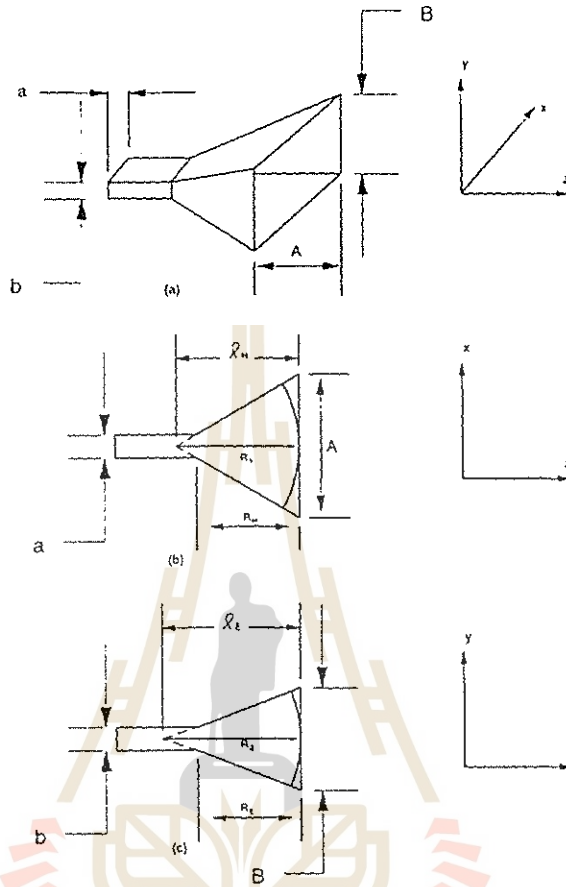
$$R_2 = (B-b) \sqrt{\left(\frac{\ell_E}{B}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad (3.13)$$

ขนาดของสายอากาศปากแตรที่มีอัตราขยายสูงสุด จะมีขนาดของ B เท่ากับ

$$B = \sqrt{2\lambda R_2} \quad (3.14)$$

3.2.6 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด (Pyramidal Horn Antenna)

สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดเป็นสายอากาศชนิดอิมพีแดนซ์แมตชิ่งชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง มีรูปทรงเรขาคณิต ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

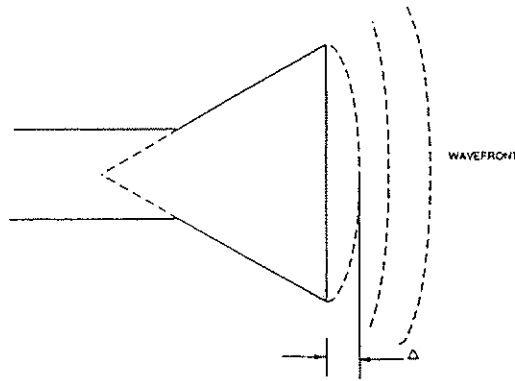
(ก) รูปทรงเรขาคณิต

(ข) ภาพตัดขวางในระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ภาพตัดขวางในระนาบสนามไฟฟ้า

ท่อนำคลื่นสามารถแผ่กระจายกำลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้หลายโหมด (Mode) โดยมีจำนวนของโหมดที่ไม่สิ้นสุด แต่แต่ละโหมดจะมีองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นเอกลักษณ์ของตัวเอง ถ้ามุมเปิดของปีกของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดมีขนาดเล็กเพียงพอ ก็จะมีเพียงโหมดการกระจายคลื่นเป็นใหญ่ที่เรียกว่า Dominant Mode เท่านั้น ที่สำคัญที่สุด

เส้นสนามของโหมดเป็นใหญ่นี้ ในกรณีที่เป็นสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ จะถูกแผ่ขยายออกไปในลักษณะของรูปทรงกระบอก (Cylindrical Form) และในกรณีที่เป็นสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดถูกแผ่ขยายออกไปในรูปของทรงกลม (Spherical Form) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ค่าผิดพลาดเชิงเฟส (Phase Errors: Δ) อันเนื่องมาจาก
ความโค้งของหน้าคลื่นในสายอากาศปากแตร

ในรูปที่ 3.5 ลักษณะของหน้าคลื่น (Wave Front) จะมีความโค้งไม่แบบราบ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดเชิงเฟส (Phase Errors) ซึ่งต้องนำมาคิดในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศด้วย เราสามารถอธิบายค่าผิดพลาดเชิงเฟสนี้โดยใช้ค่าผิดพลาดของวิถีอินอร์เมลไลซ์ (Normalized Path Errors) s และ t

$$s = \frac{\Delta_E}{\lambda} = \frac{B^2}{8\lambda \ell_E} \quad (3.15)$$

$$t = \frac{\Delta_H}{\lambda} = \frac{A^2}{8\lambda \ell_H} \quad (3.16)$$

เมื่อ s และ t คือ ค่าความผิดพลาดของวิถีอินอร์เมลไลซ์

λ คือ ความยาวคลื่น

A , B , ℓ_E และ ℓ_H คือ ขนาดที่แสดงในรูปที่ 3.4

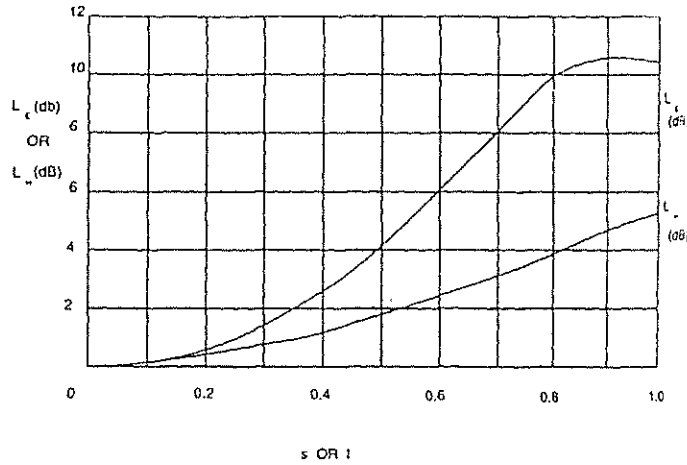
ค่าอัตราขยายโดยประมาณของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$G = \frac{32}{\pi} \left(\frac{A}{\lambda} \right) \left(\frac{B}{\lambda} \right) L_E L_H \quad (3.17)$$

เมื่อ L_E และ L_H แสดงค่าสูญเสียเนื่องจากค่าผิดพลาดเชิงเฟส ที่เกิดจากการกางออกของปากแตรซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการในหน่วย dB ได้คือ

$$G(\text{dB}) = 10.08 + 10 \log \left[\left(\frac{A}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{B}{\lambda} \right) \right] - L_E(\text{dB}) - L_H(\text{dB}) \quad (3.18)$$

ค่าของ $L_E(\text{dB})$ และ $L_H(\text{dB})$ สามารถหาได้ โดยคำนวณค่าของ s และ t โดยใช้สมการ (3.15) และ (3.16) ออกมาก่อน จากนั้นอ่านค่า $L_E(\text{dB})$ และ $L_H(\text{dB})$ จากกราฟในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ค่าส่วนประกอบการสูญเสีย (Loss Factor) ที่เกิดขึ้นใน ระบายสนามไฟฟ้าและระบายสนามแม่เหล็ก

3.3 สรุป

จากการศึกษาที่ผ่านมาในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาได้เข้าใจถึง ค่าการสูญเสียกำลังงานที่เรียกว่า ค่าการสูญเสียจากการแผ่กระจายในอากาศอิสระ (Free-Space Propagation Loss) ซึ่งเกิดจากการแยกจากกันระหว่างสายอากาศสองตัว และได้เรียนรู้คุณลักษณะของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะค่าความกว้างลำครึ่งกำลัง ค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง ค่าพื้นที่ประสิทธิผลและค่าอัตราขยายของสายอากาศชนิดนี้ และที่สำคัญได้เข้าใจวิธีการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศด้วยวิธีแทนที่ (Substitution Method)

3.4 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) เมื่อกำหนดค่าความยาวคลื่น มีพารามิเตอร์ตัวใดที่มีอิทธิพลต่อค่าการสูญเสียจากการแผ่กระจายกำลังงานในอากาศอิสระ (Free-Space Propagation Loss) L_F
- 2) ถ้าต้องการออกแบบสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระบายสนามแม่เหล็ก สำหรับใช้งานที่ความถี่ 10.52 GHz ขนาดภายในของท่อนำคลื่น $a = 2.3$ เซนติเมตร $b = 1$ เซนติเมตร และปากแตรมีความลึกด้านใน $R_i = 5$ เซนติเมตร ให้หาความกว้างของช่องเปิด (A) และค่าความลึกด้านนอก (R_H) ของปากแตร
- 3) ให้อธิบายว่าทำไม $G = \frac{26000}{HPBW_E \cdot HPBW_H}$ จึงให้ค่าอัตราขยายโดยประมาณของสายอากาศปากแตรได้เป็นอย่างดี
- 4) สิ่งใดคืออิทธิพลของมุมเปิดของปีก (Opening Angle Flare) ของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด ที่มีผลต่อโหมดการแผ่กระจายคลื่น
- 5) ค่าพารามิเตอร์ตัวใดที่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

หน่วยที่ 1-4

สายอากาศไดโพลความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$

(The $\lambda/2$, λ and $3\lambda/2$ Dipole Antennas)

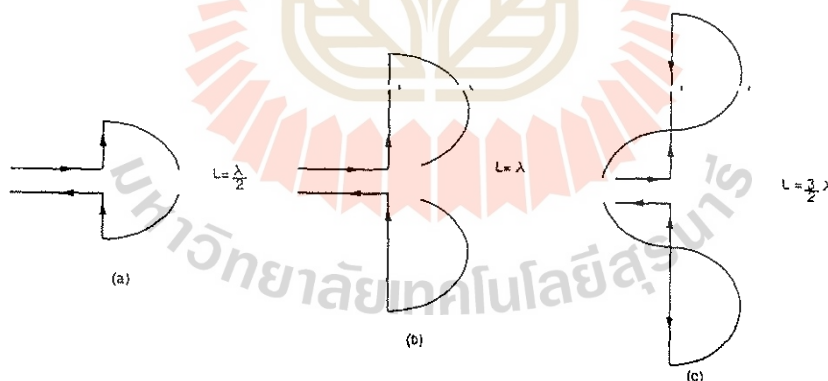
4.1 วัตถุประสงค์

สำหรับเนื้อหาในหน่วยนี้ เมื่อผู้ศึกษาได้ผ่านการเรียนรู้เรียบร้อยแล้ว จะสามารถเข้าใจคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศไดโพลซึ่งมีขนาดความยาวแตกต่างกัน เช่น มีความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ได้เป็นอย่างดี

4.2 ทฤษฎี

4.2.1 เรโซแนนซ์ในไดโพล (Resonance in Dipole)

เนื่องจากการแจกแจงรูปของกระแสบนสายอากาศไดโพลจะมีค่าไม่คงที่ โดยจะมีค่าของกระแสเป็นศูนย์ที่ปลายของสายอากาศและอาจจะมีค่าของกระแสสูงที่สุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือจุดอื่นๆบนตัวสายอากาศก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของตัวไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องส่ง จากรูปที่ 4.1 (ก) (ข) และ (ค) แสดงให้เห็นการแจกแจงรูปของกระแสของสายอากาศไดโพลแบบป้อนตรงกลาง (Center-Fed) ซึ่งมีความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ตามลำดับ โดยในรูปได้แสดงลูกศรกำกับทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นตามขนาดความยาวของไดโพลที่แตกต่างกัน ขนาดและขั้วของกระแสที่เกิดขึ้นตลอดตัวไดโพลจะแสดงเป็นรูปของสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal)



รูปที่ 4.1 การแจกแจงรูปของกระแสในสายอากาศไดโพลแบบป้อนตรงกลาง

4.2.2 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

ไดโพลที่มีความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพได้ จะต้องมีคุณลักษณะเหมือนกับอิมพีแดนซ์แบบตัวต้านทาน (Resistive Element) กระแสและแรงดันจึงจะมีเฟสเดียวกัน จึงจะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) ของสายอากาศมีค่าน้อยมากๆ อย่างไรก็ตามการปรับแต่งสายอากาศไดโพลที่มีความยาว λ ให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับเครื่องส่งนั้น จะทำได้ค่อนข้างยาก

หากวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลขนาดความยาว $\lambda/2$ หรือ $3\lambda/2$ จะพบว่าค่ารีแอกแตนซ์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และค่าความต้านทาน (Resistance) ทางทฤษฎีจะเท่ากับ 73 โอห์ม

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = 73 + j0 \quad \Omega \quad (4.1)$$

สำหรับไดโพลที่มีขนาดความยาวอื่น ๆ (มากกว่า $\lambda/2$ แต่ไม่ถึง λ หรือ $3\lambda/2$) จะมีอินพุตอิมพีแดนซ์มากกว่า 73 โอห์ม และค่ารีแอกแตนซ์มีค่าไม่เข้าใกล้กับศูนย์ จึงทำให้แรงดันกับกระแสมีเฟสต่างกัน ทำให้สายอากาศไม่มีประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่น สำหรับตารางที่ 4.1 คือ สูตรสำหรับใช้คำนวณหาค่าความต้านทานอินพุตโดยประมาณของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวต่างๆ กัน

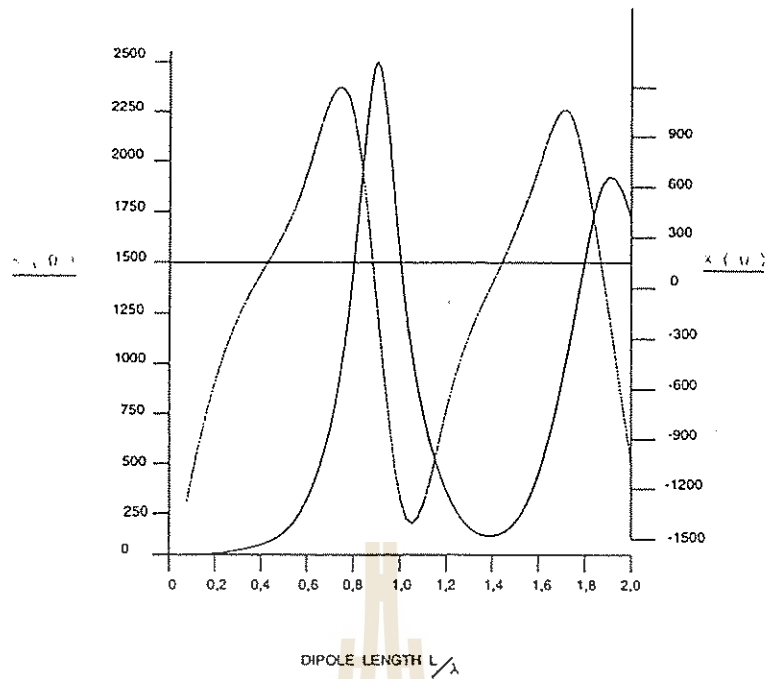
ตารางที่ 4.1 สูตรสำหรับคำนวณค่าความต้านทานอินพุต (Input Resistance) ของสายอากาศไดโพล

ความยาวของไดโพล (L)	ค่าความต้านทานอินพุต (R_{in})
$0 < L < \frac{\lambda}{4}$	$20\pi \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2$
$\frac{\lambda}{4} < L < \frac{\lambda}{2}$	$24.7 \left(\pi \frac{L}{\lambda}\right)^{2.4}$
$\frac{\lambda}{2} < L < 0.637\lambda$	$11.14 \left(\pi \frac{L}{\lambda}\right)^{4.17}$

รูปที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานอินพุต R_{in} และค่าอินพุตรีแอกแตนซ์ X_{in} ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวของสายอากาศ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความยาวของไดโพลอยู่ที่ประมาณ $\lambda/2$ หรือ $3\lambda/2$ ค่าอินพุตรีแอกแตนซ์จะเท่ากับศูนย์และค่าความต้านทานอินพุตจะเข้าใกล้ค่า 73 โอห์ม โดยกราฟนี้จะสามารถใช้กับสายอากาศที่มีขนาดเส้นลวดที่เล็กมากๆ เท่านั้น

นอกจากนี้ในรูปที่ 4.2 ยังได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวของไดโพลอยู่ที่ประมาณ λ ค่าความต้านทานอินพุตจะสูงมากและค่าอินพุตรีแอกแตนซ์จะแสดงเป็นค่าประจุ (Capacitive) และค่าอินพุตรีแอกแตนซ์เป็นส่วนหนึ่งของค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นี้สามารถลดค่าลงให้เป็นศูนย์ได้ โดยการลดความยาวของไดโพลให้อยู่ที่ประมาณ 0.9λ แต่ในขณะเดียวกัน ที่ขนาดความยาวนี้จะให้ค่าความต้านทานอินพุตสูงที่สุด ด้วยเหตุผลนี้สายอากาศไดโพลความยาว λ จึงจัดว่าเป็นสายอากาศที่ปรับแต่งค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ยากที่สุด

หมายเหตุ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของไดโพล λ ที่มีค่าสูง สามารถดูได้จากรูปที่ 4.1 ซึ่งจะแสดงกระแสที่มีค่าเป็นศูนย์ที่จุดกึ่งกลางสาย ซึ่งเป็นจุดที่จะต้องต่อสายส่งสัญญาณเข้ามาที่จุดนี้ ในทางทฤษฎีความต้านทานตรงจุดนี้จึงมีค่าเป็นอนันต์



รูปที่ 4.2 ค่าความต้านทานอินพุต (เส้นทึบ) และค่าอินพุตรีแอกแตนซ์ (เส้นประ) ของไดโพลซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวสายอากาศ

4.2.3 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของไดโพลนี้จะมีลักษณะเป็นวงกลมโดยประมาณส่วนในระนาบสนามไฟฟ้าถูกอธิบายด้วยสมการ (4.2)

$$E_{\theta} = E_o \frac{\cos[(\beta L/2) \cos \theta] - \cos(\beta L/2)}{\sin \theta} \quad (4.2)$$

โดยที่ E_o เป็นค่าสูงสุดของ E_{θ}

$$\text{และ } \beta = 2\pi/\lambda$$

ในกรณีที่ $L = \lambda/2$ สมการ (4.2) จะเท่ากับ

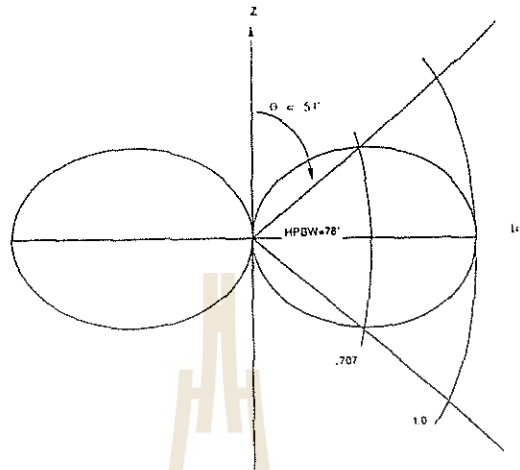
$$E_{\theta} = E_o \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \quad (4.3)$$

จะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค่าสูงสุดของ E_{θ} อยู่ที่ $\theta = 90^{\circ}$ และที่ $\theta = 51^{\circ}$, $E_{\theta} = 0.707E_o$ ซึ่งตำแหน่งนี้ก็คือ จุดที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของกำลังงานสูงสุด ดังนั้นความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width: HPBW) จึงหาได้จาก

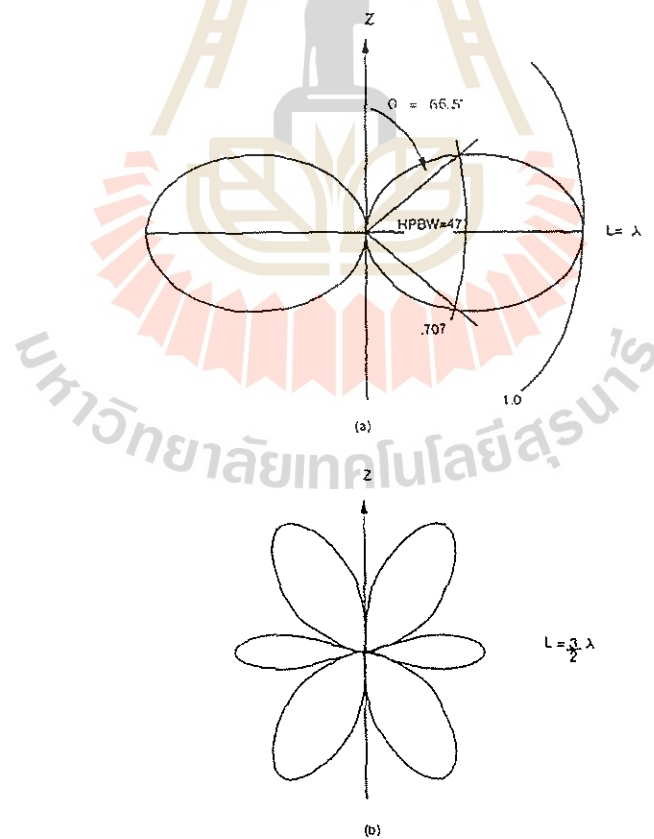
$$\text{HPBW} = 2(90 - 51) = 78^{\circ} \quad (4.4)$$

ดังนั้น ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางของสายอากาศ จะเท่ากับ $D = 1.64 = 2.15 \text{ dB}$

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลความยาว λ และ $3\lambda/2$ ได้ถูกพล็อตและแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของไดโพลที่มีความยาวมากกว่า 1.25λ จะลดลงเมื่อความยาวของไดโพลเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่ากระแสที่อยู่ในส่วนที่แตกต่างกันของไดโพล จะเกิดการหักล้างกันเองของสนาม ทำให้แบบรูปของการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้จึงเกิดลวดลายขึ้นจำนวนมาก



รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพล

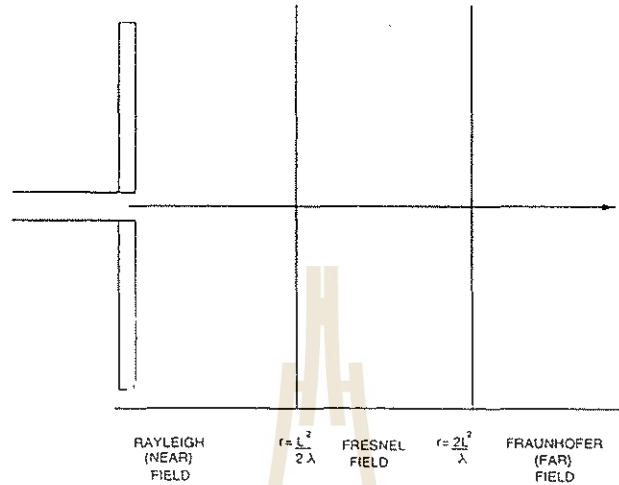


รูปที่ 4.4 (ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของไดโพลความยาว λ

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของไดโพลความยาว $3\lambda/2$

4.2.4 สนามของสายอากาศ (Antenna Fields)

หลักการของสนามคือสิ่งสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของสายอากาศ ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ (Regions) ได้แก่ สนามเรย์ลีหรือสนามระยะใกล้ (Rayleigh or Near Field) สนามเฟรสเนล (Fresnel Field) และสนามฟรอนโฮเฟอร์หรือสนามระยะไกล (Fraunhofer or Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การแบ่งบริเวณสนามของสายอากาศ

สนามระยะไกล (Far Field) หาค่าได้จาก

$$r > \frac{2L^2}{\lambda} \quad (4.5)$$

โดยที่ r เป็นระยะจากสายอากาศ

L เป็นความยาวของสายอากาศ (หรือขนาดที่ใหญ่ที่สุดของช่องเปิด)

บริเวณสนามระยะไกล คือ บริเวณที่เราสนใจเพื่อทำการศึกษารื่องของสายอากาศ เพราะเป็นบริเวณที่ใช้จัดวางสายอากาศเพื่อทำการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานหรือทำการวัดคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ ในกรณีที่ความยาวของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีขนาดแตกต่างกัน จะต้องแทนค่า L ด้วยขนาดของสายอากาศที่มีความยาวสูงสุด เพื่อจะได้มั่นใจว่าเป็นบริเวณสนามระยะไกลที่ถูกต้อง

หมายเหตุ ไม่ควรวางสายอากาศในบริเวณที่เป็น Rayleigh เมื่อกระทำการวัดคุณลักษณะใดๆ แต่ในบางกรณีอาจจะยอมรับได้เมื่อวางสายอากาศในบริเวณที่เป็น Fresnel

4.3 สรุป

ในหน่วยเรียนที่ผ่านมา ผู้ศึกษาจะเข้าใจลักษณะการแผ่กระจายคลื่นจากแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลขนาดที่ความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ โดยจะสังเกตเห็นค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีความยาวต่างกันและมีผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศด้วย และสุดท้ายผู้ศึกษาจะเข้าใจวิธีการหาค่าสภาพแอมพลิจูดของสายอากาศไดโพลความยาว $\lambda/2$

4.4 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) สายอากาศไดโพลทั้งสามชนิดที่ได้ทำปฏิบัติการผ่านไปแล้วนั้น ความยาวเท่าใดที่เราสนใจและให้ประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น
- 2) ถ้าค่าสภาพเจาะงทศทางของไดโพลขนาดความยาว λ ดีกว่าไดโพลความยาว $\lambda/2$ ทำไมไม่เลือกสายอากาศนี้มาเป็นคำตอบในข้อที่ 1
- 3) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการแฉงรูปของกระแส อิมพีแดนซ์และความยาวของไดโพลมาพอสังเขป ระยะห่างที่ 1 เมตร จะเป็นเงื่อนไขของสนามระยะไกลที่ใช้กับสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ และ λ ที่ความถี่ 915 MHz ได้หรือไม่และระยะห่างที่น้อยที่สุดของสายอากาศในเงื่อนไขนี้มีค่าเท่าใด
- 4) ให้แสดงว่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (HPBW) ของสายอากาศไดโพลความยาว $\lambda/2$ มีค่าเท่ากับ 78 องศา



หน่วยที่ 1-5

สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับและการเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ด้วยบาลัน

(Half-Wave Folded Dipole Antennas and Impedance Transformation with Baluns)

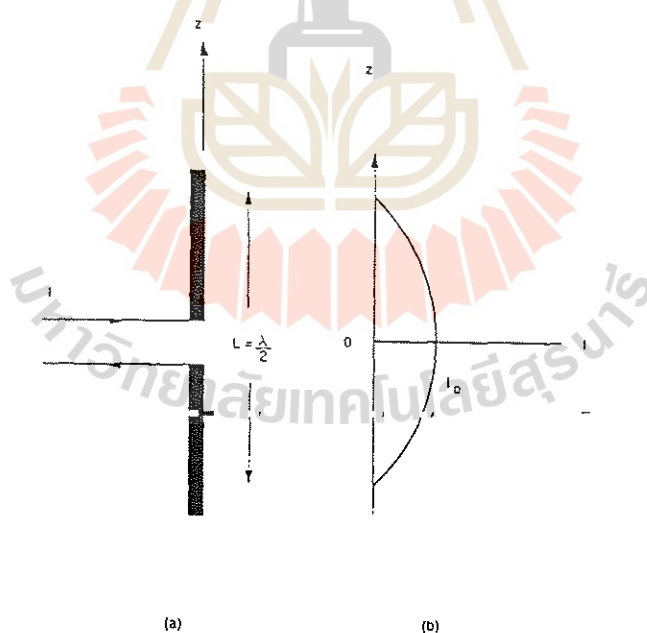
5.1 วัตถุประสงค์

ในหน่วยนี้จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับ (Half-Wave Folded Dipole Antennas) ซึ่งมีความยาวของตัวไดโพลเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ต่อจากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงวิธีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยใช้บาลัน (Baluns)

5.2 ทฤษฎีพื้นฐาน

5.2.1 พื้นฐานสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับ

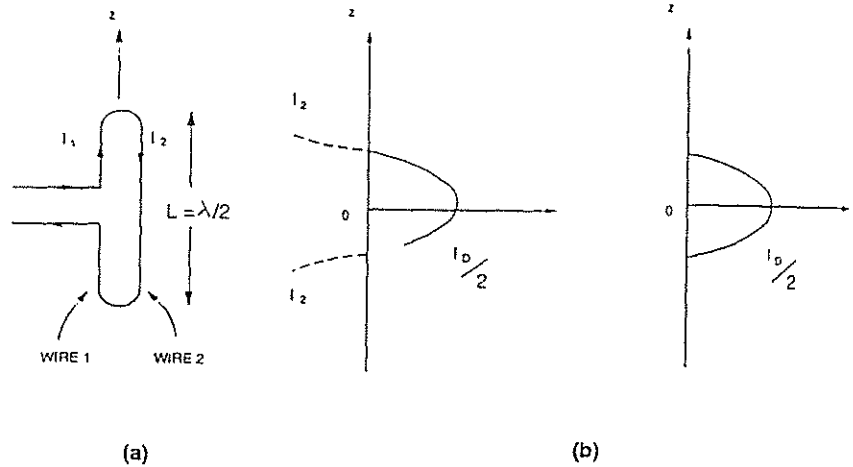
สายอากาศไดโพลแบบพับ (Folded Dipole) จะประกอบด้วยตัวไดโพลสองตัววางขนานกันโดยต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันในลักษณะที่เป็นห่วงแคบๆ ในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ได้แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบปกติกับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับ



รูปที่ 5.1 สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น (Half-Wave Dipole Antennas)

(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) การแจกแจงรูปของกระแส



รูปที่ 5.2 สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับ (Half-Wave Folded Dipole Antennas)

(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) การแจกแจงรูปของกระแส

จากรูปที่ 5.1 เป็นไดโพลครึ่งคลื่น (Half-Wave Dipole) กระแสที่ป้อนให้แก่ไดโพลจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายสายทั้งสองด้าน กระแสที่แจกแจงรูปนี้จะเป็นสัญญาณลักษณะไซน์ (Sinusoidal) โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของไดโพล

การแจกแจงรูปของกระแสนบน ไดโพลสามารถแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ คือ

$$I(Z) = I_D \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{L}{2} - |Z|\right)\right], \quad |Z| < \frac{L}{2} \tag{5.1}$$

โดยที่ Z และ L ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 5.1

ไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับ (Half-Wave Folded Dipole) ในรูปที่ 5.2 จะมีการแจกแจงรูปของกระแสนบน Wire 1 เป็นสัญญาณลักษณะไซน์เหมือนกัน แต่จะมีค่าสูงสุดของกระแสบริเวณจุดกึ่งกลางเท่ากับ $I_D/2$ แทนที่จะเท่ากับ I_D กระแสรูปไซน์จะมีค่าตกลงเป็นศูนย์เมื่ออยู่ที่ปลายทั้งสองของ Wire 1 จากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจาก Wire 1 ไปสู่ Wire 2 จนกระทั่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่กึ่งกลางของ Wire 2

การแจกแจงรูปของกระแสทั้งสองบน Wire 1 และ Wire 2 ของสายอากาศไดโพลแบบพับ จะเกิดการเสริมกันจนมีลักษณะเหมือนกับการแจกแจงรูปของกระแสนบนสายอากาศไดโพลแบบปกติ กำลังของคลื่นที่แผ่กระจายออกไปสามารถเขียนในรูปของสมการได้ คือ

$$P_D = \frac{1}{2} Z_D I_D^2 = P_F = \frac{1}{2} Z_F I_F^2 = \frac{1}{2} Z_F \left(\frac{I_D}{2}\right)^2 \tag{5.2}$$

โดยที่ P_D , Z_D และ I_D คือ ค่ากำลังงาน ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าของกระแสของสายอากาศไดโพลแบบปกติ

P_F , Z_F และ I_F คือ ค่ากำลังงาน ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าของกระแสของสายอากาศไดโพลแบบพับ

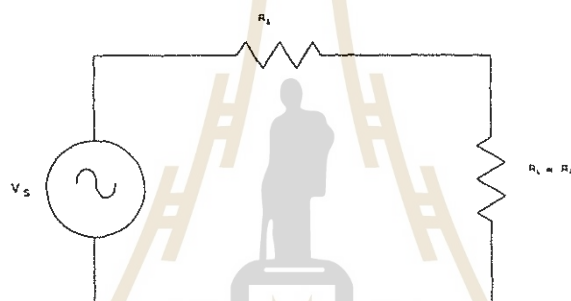
ผลจากสมการ (5.2) จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ที่แกนซ์มากกว่าของสายอากาศไดโพลแบบปกติอยู่ประมาณ 4 เท่า (ปกติจะอยู่ที่ 73 โอห์ม) ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่แกนซ์ของไดโพลแบบพับจึงเท่ากับ

$$Z_F = (5.4)Z_D = (5.4)(73) = 292 \quad \Omega \quad (5.3)$$

หมายเหตุ ค่าอิมพีแดนซ์ที่แกนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบปกติจะมีค่าอยู่ประมาณ 70, 72 หรือ 73 Ω (ขึ้นอยู่กับบางตำรา) ผลที่ตามมาคือค่าอิมพีแดนซ์ที่แกนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบพับจึงมีค่าแตกต่างกันออกไปด้วย โดยจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 280 Ω ถึง 300 Ω

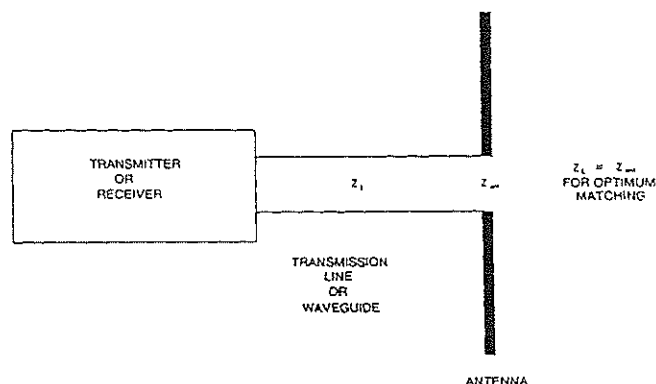
5.2.2 การแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Matching)

เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานได้สูงสุด ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายจะต้องเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด จากรูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างของวงจรแบบง่ายที่มีการต่อกันของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_s) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (R_s) ต่ออยู่กับความต้านทานที่เป็นโหลด (R_L) การถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อค่า $R_s = R_L$



รูปที่ 5.3 การแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกับของโหลด
เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานได้สูงสุด

ระบบสายอากาศก็มีหลักการเช่นเดียวกัน การถ่ายโอนกำลังงานจะได้ผลดีที่สุดเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_{ant}) ต้องเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง หรือท่อนำคลื่น (Waveguide) (Z_L) ดังในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ค่าอิมพีแดนซ์ที่สายส่งและที่จุดต่อสายอากาศ

ถ้าการแมตช์ระหว่างสายส่งและสายอากาศทำได้อย่างไม่สมบูรณ์ กำลังงานบางส่วนของกำลังงานจะเกิดการสะท้อนกลับไปที่เครื่องส่งแทนที่จะถูกส่งไปให้สายอากาศเพื่อทำหน้าที่แผ่คลื่นออกไป ในกรณีของสายอากาศรับก็เช่นกัน จะเกิดสัญญาณส่วนหนึ่งที่รับได้โดยสายอากาศจะไม่ถูกส่งไปยังเครื่องรับ เมื่อเกิดการมิสมแมตช์ของค่าอิมพีแดนซ์ สมการ (5.4) จะแสดงความสัมพันธ์ของกำลังที่ถูกส่งออกไปยังจุดต่ออิมพีแดนซ์กับกำลังงานที่ถูกสะท้อนกลับมา

$$P_T = 1 - P_{Rfl} = 1 - \frac{|SWR - 1|^2}{|SWR + 1|^2} = 1 - \frac{|Z_{ant} - Z_L|^2}{|Z_{ant} + Z_L|^2} \quad (5.4)$$

เมื่อ P_T คือ กำลังที่ส่งผ่านไปยังจุดต่อของอิมพีแดนซ์

P_{Rfl} คือ กำลังที่สะท้อนกลับที่จุดต่อของอิมพีแดนซ์

SWR คือ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

สำหรับกรณีที่มีการแมตช์ที่สมบูรณ์ $Z_{ant} = Z_L$ และจะไม่เกิดคลื่นนิ่ง เนื่องจาก $SWR = Z_{ant}/Z_L = 1$ ซึ่งจะไม่เกิดการสะท้อนกลับของกำลังงาน นั่นคือ

$$P_{Rfl} = \frac{|SWR - 1|^2}{|SWR + 1|^2} = \frac{|0|^2}{|1|^2} = 0 \quad (5.5)$$

และกำลังงานทั้งหมดจะสามารถส่งผ่านไปได้

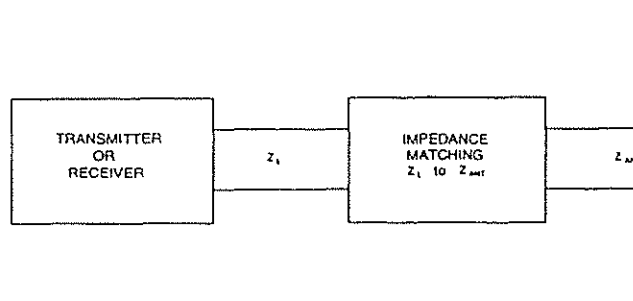
เมื่อสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์ 73 โอห์มต่อกับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับ (Half-Wave Folded Dipole Antennas) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น 4 เท่าของสายส่ง ($4 \times 73 = 292$ โอห์ม) มีผลทำให้เกิดคลื่นนิ่งและค่า SWR คือ

$$SWR = \frac{Z_{ant}}{Z_L} = \frac{4}{1} = 4 \quad (5.6)$$

$$P_T = 1 - P_{Rfl} = 1 - \frac{|SWR - 1|^2}{|SWR + 1|^2} = 1 - \frac{|3|^2}{|5|^2} = 0.64 \quad (5.7)$$

ในกรณีนี้ กำลังงานทั้งหมดสามารถส่งผ่านไปได้ 64% และจะถูกสะท้อนกลับประมาณ 36% ปรากฏการณ์นี้ไม่ทำให้เกิดผลรุนแรง (ถึงแม้ว่าจะอยู่ที่ระดับกำลังงานสูงๆ) แต่ก็เป็นที่เราไม่ต้องการ การทำงานจะกระทำได้อย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศเกิดการแมตช์กันมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.5

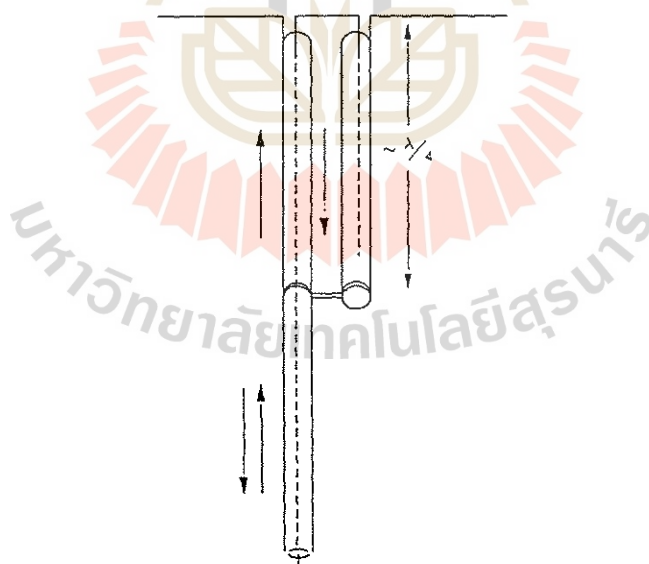
ปัญหาหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับปัญหาของการแมตช์อิมพีแดนซ์ก็คือ การต่อสายอากาศแบบสมดุล (Balanced Antenna) เช่น สายอากาศไดโพลชนิดป้อนตรงกลาง (Center-Fed) เข้ากับสายส่งที่ไม่สมดุล (Unbalanced Transmission Line) เช่น สายแบบคู่ขนาน (Parallel-Wire Pair) ปัญหาของการต่อสายอากาศที่สมดุลกับสายส่งที่ไม่สมดุลก็จะไม่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.5 การแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ระหว่างสายอากาศและสายส่ง

ถ้าสายอากาศโคโพลแบบป้อนตรงกลางถูกต่อเข้ากับสายโคแอกเซียล ความสมดุลของสายอากาศก็จะสูญเสียไป โดยด้านหนึ่งของโคโพลจะถูกต่อเข้ากับสายตัวนำเส้นใน (Inner Conductor) ของสายโคแอกเซียล และอีกด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับส่วนที่เป็นฉล็ดของสายเส้นเดียวกัน กรณีนี้จะทำให้กระแสที่ไหลบนด้านนอกของฉล็ดสร้างสนามขึ้นมา ซึ่งสนามนี้จะไม่สามารถถูกหักล้างจากสนามที่เกิดจากกระแสที่ไหลในสายตัวนำเส้นในได้ เนื่องจากการฉลัดนั่นเอง ดังนั้นจึงเกิดการแผ่กระจายคลื่นออกมาจากกระแสที่ไหลบนด้านนอกของฉล็ดของโคแอกเซียลด้วย

ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้สายโคแอกเซียลยาวประมาณ $\lambda/4$ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 มีการต่อส่วนที่เป็นฉล็ดด้านนอกเข้าด้วยกันที่จุดที่ต่ำลงมาจากขั้วต่อของสายอากาศประมาณ $\lambda/4$ ดังนั้นกระแสในส่วนที่สองจะถูกเหนี่ยวนำบนด้านนอกของฉล็ด ทำให้กระแสองชุดเกิดหักล้างซึ่งกันและกัน การจับสายโคแอกเซียลในลักษณะนี้เรียกว่า บาลัน (Balun) ซึ่งมาจากคำเต็มว่า Balanced to Unbalanced



รูปที่ 5.6 บาลันสำหรับต่อสายอากาศโคโพลเข้ากับสายโคแอกเซียล

หลักการของสายส่งซึ่งมีความยาว $\lambda/4$ จะปรากฏเสมือนค่าอิมพีแดนซ์ที่ตัวโคโพลเป็นอนันต์ และจะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของสายอากาศ อย่างไรก็ตามกระแสซึ่งไหลบนตัวบาลันจะสมดุลกับกระแสที่ไหลบนด้านนอกของสายโคแอกเซียล

บาลันที่ใช้กันอยู่มีอยู่หลายชนิด สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติการนี้ บาลันจะถูกติดตั้งเอาไว้แล้วที่ขั้วต่อที่ใช้สำหรับโคโพล ซึ่งเป็นบาลันที่มีโครงสร้างคล้ายกันกับที่แสดงในรูปที่ 5.6 แต่ก็มีบาลันแบบอื่นๆ อีกเหมือนกันที่นอกจากจะทำหน้าที่ช่วยในการสร้างสมดุลระหว่างสายอากาศที่สมดุลกับสายส่งที่ไม่สมดุลแล้วยังมีหน้าที่แปลงค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศและสายส่งให้เท่ากันได้อีกด้วย ซึ่งต่อไปจะเป็นการศึกษาถึงกรณีที่สายอากาศโคโพลครึ่งคลื่นแบบพับต่อเข้ากับสายโคแอกเซียล โดยกรณีแรกเป็นแบบไม่ต้องใช้บาลัน ส่วนกรณีที่สองจะเป็นบาลันที่สามารถแปลงค่าอิมพีแดนซ์ในอัตราส่วน 4:1 ได้ด้วย

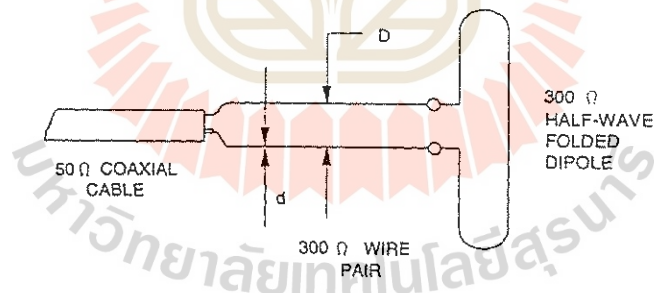
5.2.3 สายอากาศครึ่งคลื่นแบบพับของชุดปฏิบัติการ

สำหรับอุปกรณ์ในชุดปฏิบัติการจะมีสายอากาศโคโพลครึ่งคลื่นแบบพับ (Half-Wave Folded Dipole) ซึ่งมีความถี่ใช้งานที่ 1 GHz โดยทั่วไปสายอากาศชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ประมาณ 292 โอห์ม

สายส่งสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศที่ความถี่ 1 GHz ของชุดปฏิบัติการนี้จะเป็นสายโคแอกเซียล 50 Ω โดยจะมีตัวแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทั้งสองชนิดเพื่อแปลงค่าอิมพีแดนซ์จากสายโคแอกเซียล 50 Ω ไปหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโคโพลแบบพับที่ 292 Ω ได้ โดยชนิดแรกนั้นจะเป็นตัวแปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่ต้องใช้บาลัน ส่วนชนิดที่สองจะเป็นบาลันที่สามารถแปลงค่าอิมพีแดนซ์ในอัตราส่วน 4:1 ได้ด้วย

5.2.4 การส่งผ่านโดยไม่ต้องใช้บาลัน

จากรูปที่ 5.7 เป็นการส่งผ่านโดยไม่ต้องใช้บาลัน จากสายโคแอกเซียลอิมพีแดนซ์ 50 Ω ไปยังสายส่งคู่ขนานที่มีอิมพีแดนซ์ 300 Ω ซึ่งเป็นสายส่งแบบสมดุลและต่อเข้ากับสายอากาศโคโพลครึ่งคลื่นแบบพับ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ประมาณ 300 Ω



รูปที่ 5.7 การส่งผ่านโดยไม่ต้องบาลันจากสายโคแอกเซียล 50 Ω ไปยังสายคู่ขนาน 300 Ω และต่อกับสายอากาศโคโพลครึ่งคลื่นแบบพับที่มีอิมพีแดนซ์ 300 Ω

หมายเหตุ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายคู่ขนานจะเป็นฟังก์ชันของ อัตราส่วนของ D/d เมื่อ D คือ ระยะห่างระหว่างสายสองเส้นซึ่งขนานกัน และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสายแต่ละเส้น สำหรับ 300 Ω ค่า D/d ประมาณ 6 และที่ 75 Ω ค่า D/d ประมาณ 1.25

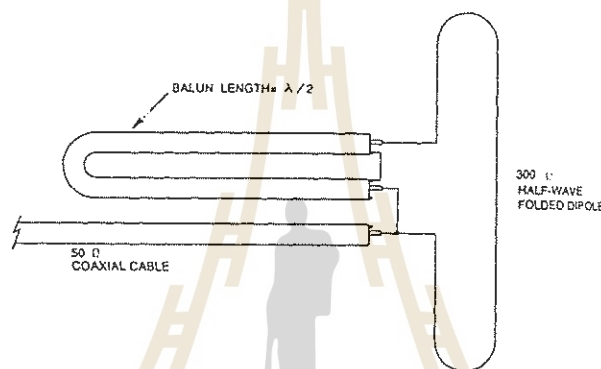
ในกรณีรูปที่ 5.7 เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีสแควร์ระหว่าง 50 Ω และ 300 Ω ค่า SWR จะได้เท่ากับ $300/50 = 6$ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ถูกส่งออกไป (P_T) และกำลังที่สะท้อนกลับ (P_{RP}) จะเท่ากับ

$$P_r = 1 - P_{RL} = 1 - \left| \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right|^2 = 1 - 0.51 = 0.49 \quad (5.8)$$

เมื่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทำได้สมบูรณ์แบบ กำลังงานทั้งหมด (100%) จะสามารถส่งผ่านไปได้ แต่ในกรณีนี้กำลังงานสามารถส่งผ่านไปได้ประมาณ 50% ของกำลังงานทั้งหมด ที่เหลืออีกครึ่งหนึ่งจะสูญเสียโดยสะท้อนกลับ 3 dB เมื่อเทียบกับกรณีที่มีอิมพีแดนซ์อยู่ในสถานะที่แมตซ์

5.2.5 การส่งผ่านโดยการต่อบาลันที่แปลงอิมพีแดนซ์ 4:1

จากรูปที่ 5.8 เป็นการส่งผ่านโดยใช้สายโคแอกเซียล อิมพีแดนซ์ 50 Ω ไปยังสายคู่ขนาน 300 Ω ต่อกับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับ อิมพีแดนซ์ 300 Ω โดยใช้บาลันที่แปลงอิมพีแดนซ์แบบ 4:1 บาลันของไดโพลแบบพับบางครั้งจะใช้สายโคแอกเซียลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 72 Ω เช่น RG59U



รูปที่ 5.8 การส่งผ่านจากสายโคแอกเซียล 50 Ω กับสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 300 Ω โดยผ่านบาลันแบบแปลงอิมพีแดนซ์

สังเกตว่าในกรณีนี้การแปลงอิมพีแดนซ์แบบ 4:1 ยังไม่ใช่วางอุดมคติเสียทีเดียวนัก เพราะในทางอุดมคติจะต้องมีอัตราส่วนในการแปลงอิมพีแดนซ์เท่ากับ 6:1 จึงจะเกิดการแปลงอิมพีแดนซ์จาก 50 Ω ไปสู่ 300 Ω อย่างแท้จริง ถึงแม้ว่าอัตราส่วนการแปลงอิมพีแดนซ์แบบ 4:1 จะยังไม่สมบูรณ์แบบนั้น แต่ก็สามารถนำมาใช้งานได้เนื่องจากยังถือว่าไม่รุนแรงเท่าใดนัก เพราะการแปลงอิมพีแดนซ์จะแปลงจาก 300 Ω ให้เป็น 75 Ω แล้วจึงส่งผ่านสัญญาณไปยังสายโคแอกเซียล 50 Ω ดังนั้นจุดต่ออิมพีแดนซ์ตรงจุดนี้จึงมีค่า SWR เท่ากับ 75/50 หรือ เท่ากับ 1.5 ซึ่งยังเป็นค่าที่พออนุมารับได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่ส่งออกไป และกำลังงานที่สะท้อนกลับในขณะนี้ คือ

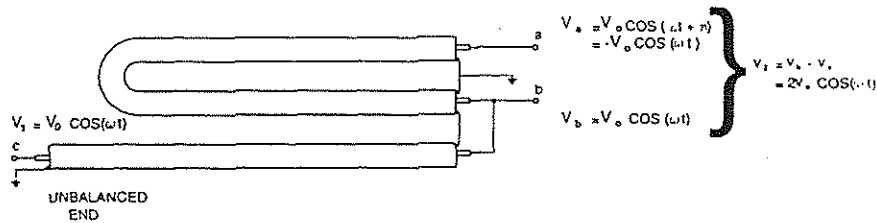
$$P_r = 1 - P_{RL} = 1 - \left| \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right|^2 = 1 - 0.04 = 0.96 \quad (5.9)$$

นั่นคือ กำลังงานประมาณ 96% จะสามารถส่งออกไปได้ และมีการสะท้อนกลับเพียง 4% ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับทางอุดมคติ ซึ่งจะต้องให้ส่งผ่านได้ทั้ง 100% แต่ก็กระทำได้อย่างมาก

สายอากาศแบบไดโพลครึ่งคลื่นแบบพับที่ต่อกับบาลัน จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าที่ต่อกับตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่ไม่มีบาลัน จึงให้ผลในการวัดต่างกันถึง 3 dB

5.2.6 การทำงานของบาลันที่มีการแปลงอิมพีแดนซ์แบบอัตราส่วน 4:1

จากรูปที่ 5.9 สามารถอธิบายการทำงานของบาลันได้ โดยการสมมติให้มีแรงดันระหว่างเส้นลวดตัวนำตรงกลางของสายโคแอกเซียลกับส่วนที่เป็นชิลด์กราวด์ด้านนอกเท่ากับ $V_1 = V_o \cos(\omega t)$ ซึ่งอยู่ที่ปลายของสายแบบไม่สมดุลที่จุด c ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 การทำงานของบาลันที่มีการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์อัตราส่วน 4:1

หากไม่คิดค่าความสูญเสียภายในสายเคเบิล แรงดันระหว่างลวดตัวนำตรงกลางสายกับกราวด์ชิลด์จะเท่ากับ $V_b = V_o \cos(\omega t)$ ณ ที่จุด b ไม่ว่าสายเคเบิลจะมีความยาวเท่าใดก็ตาม ระหว่างจุด b และ a จะมีระยะห่าง $\lambda/2$ และจุด 2 จุดนี้จะต่างเฟสกัน π หรือ 180° อย่างไรก็ตามระหว่างจุด b กับ จุด a จริงๆ แล้วจะมีความยาว $\lambda/2$ ซึ่งจะทำให้ระหว่างสองจุดนี้มีความต่างเฟส 180° ($\pi = 180^\circ$) และแรงดันระหว่างตัวนำตรงกลางและกราวด์ชิลด์ที่จุด a จะเท่ากับ

$$V_a = V_o \cos(\omega t + \pi) = -V_o \cos(\omega t) \tag{5.10}$$

ดังนั้น

$$V_2 = V_b - V_a = 2V_o \cos(\omega t) \tag{5.11}$$

เนื่องจากเราไม่ได้คิดค่าความสูญเสียในสายโคแอกเซียล กำลังงานที่ถูกแผ่กระจายออกมา (P_2) ซึ่งวัดได้ที่ปลายของจุดสมดุล (ที่จุดป้อนสัญญาณของสายอากาศหรือที่จุด a, b) จะมีค่าเท่ากับกำลังงาน P_1 ซึ่งวัดได้ที่ปลายของจุดที่ไม่สมดุล (ที่ปลายสายโคแอกเซียลจุด c) และเมื่อใช้ความสัมพันธ์ของ $P = \frac{V_{rms}^2}{Z}$ จะเขียนสมการใหม่ได้ในรูปของ

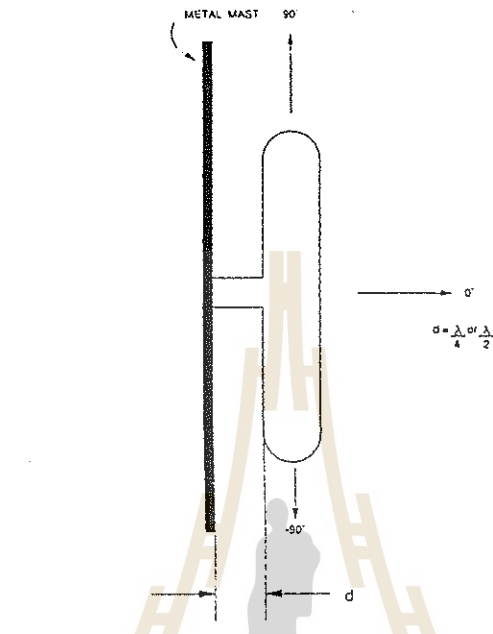
$$P_1 = \frac{(V_{1rms})^2}{Z} = P_2 = \frac{(V_{2rms})^2}{Z} \tag{5.12}$$

หรือ
$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{(V_{2rms})^2}{(V_{1rms})^2} = 2^2 = 4 \tag{5.13}$$

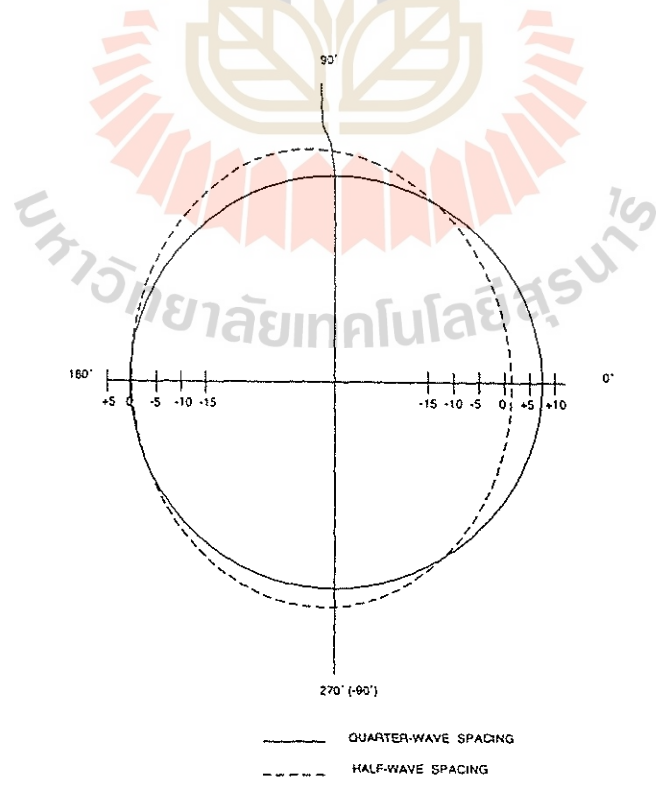
ดังนั้น
$$Z_2 = 4Z_1 \tag{5.14}$$

5.2.7 การใช้สายอากาศไดโพลแบบพับกับเสาโลหะ (Folded Dipole with Metal Mast)

ตามหลักการในทางปฏิบัตินั้น แบบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไดโพลและไดโพลแบบพับจะมีลักษณะเป็นรูวงกลมเหมือนกัน แต่ลักษณะของวงกลมอาจจะถูกทำให้ผิดรูปไปจากเดิม คือ อาจจะถูกยืดออกไปที่ด้านใดด้านหนึ่ง เมื่อมีการนำไปติดตั้งใกล้เสาโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 สายอากาศไดโพลแบบพับติดตั้งบนเสาโลหะ



รูปที่ 5.11 ผลของเสาโลหะที่มีต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบพับ

ดังที่แสดงในรูปที่ 5.11 การเว้นช่องระยะช่องว่างประมาณ $\lambda/4$ ระหว่างสายอากาศไดโพลกับเสาโลหะจะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะยาวออกไปในทิศทางด้านข้าง (0°) เมื่อเว้นช่องระหว่างสายอากาศแบบไดโพลกับเสาโลหะเท่ากับ $\lambda/2$ จะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะถูกขยายออกไปในทิศทาง $+90^\circ$ และ -90° อัตราขยายในสภาพเจาะจงทิศทางสามารถจะมีค่าได้ตั้งแต่ 3-5 dB ซึ่งเหมาะแก่การใช้งาน

5.3 สรุป

จากที่ได้ศึกษาในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาได้ทราบถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศไดโพลแบบพับ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดนี้ทั้งแบบที่มีบาลันและแบบไม่มีบาลัน และจะเข้าใจถึงสาเหตุที่อัตราขยายมีค่าเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากการใช้บาลันแบบ 4:1 กับสายอากาศที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 300Ω นอกจากนี้ผู้ศึกษาจะทราบถึงความหมายของอัตราขยายในหน่วยของ dBd เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแบบพับ สุดท้ายผู้ศึกษาจะได้เรียนรู้ถึงผลกระทบจากเสาโลหะหรือที่เรามักจะเรียกว่า บูม (Boom) ที่วางอยู่ด้านหลังของไดโพล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ของสายอากาศได้

5.4 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) ทำไมค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบพับจึงมีค่ามากกว่าสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นถึงสี่เท่า
- 2) การแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์อย่างสมบูรณ์หมายถึงอะไร ทำไมการแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกับสายส่งจึงมีความสำคัญมาก และถ้าเกิดการมิสแมตซ์ขึ้น จะเกิดอะไรขึ้น
- 3) ถ้าสายอากาศมี $HPBW_E = 28$ องศา และ $HPBW_H = 32$ องศา ให้คำนวณอัตราขยายของสายอากาศนี้ อ้างอิงกับอัตราขยายของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นทางทฤษฎี
- 4) การใช้บาลันอัตราส่วน 4:1 เป็นการปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแบบพับที่ป้อนด้วยสายส่ง 75Ω ให้อธิบายว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น
- 5) ให้อธิบายเหตุผลในการติดตั้งเสาโลหะเข้ากับสายอากาศไดโพลแบบพับ และระยะระหว่างตัวสายอากาศกับเสาโลหะมีความสำคัญอย่างไร

บทที่ 2

ทฤษฎีของสายอากาศชนิดต่างๆ (Different Antenna Types Theory)

กล่าวนำ

ในบทที่ 2 นี้จะเป็นการศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติของสายอากาศที่พัฒนามาจากสายอากาศพื้นฐาน ได้แก่ สายอากาศแบบโมโนโพล (Monopole Antenna) สายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) สายอากาศแบบเกลียว (Helical Antenna) และสายอากาศแบบแถวลำดับปรสิติก (Parasitic Array Antenna)

ในบทนี้จะครอบคลุมทฤษฎีขั้นพื้นฐานอีกรูปแบบหนึ่งของสายอากาศชนิดต่างๆ ดังกล่าวทั้งหมด แต่จะมีรายละเอียดน้อยกว่าในบทที่ 1 เนื่องจากได้อธิบายคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศโดยทั่วไปแล้วในบทดังกล่าว โดยบทนี้จะประกอบไปด้วย

หน่วยที่ 1 จะเป็นการศึกษาทฤษฎีของสายอากาศแบบโมโนโพล ซึ่งมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพลแบบความยาวครึ่งคลื่น สายอากาศชนิดนี้จะมีแผ่นระนาบกราวด์ (Ground Plane) มาทำหน้าที่เป็นแผ่นสะท้อนเพื่อทดแทนส่วนของตัวไดโพลอีกครึ่งหนึ่งที่หายไป

หน่วยที่ 2 จะเป็นทฤษฎีของสายอากาศแบบบ่วง ซึ่งปกติทั่วไปจะมีหลายรูปแบบทั้งแบบบ่วงวงกลม บ่วงสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน บ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นต้น

สายอากาศที่จะได้ศึกษาในหน่วยที่ 1 และ 2 จะให้การโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linearly Polarized Waves) ทั้งหมด ซึ่งจะมีทั้งการโพลาไรซ์ในแนวนอน (Horizontal) ในแนวตั้ง (Vertical) หรือในแนวเอียง (Oblique) ดังนั้นในหน่วยต่อไปจึงเป็นการศึกษาสายอากาศที่ให้การโพลาไรซ์ที่แตกต่างกันออกไป

หน่วยที่ 3 จะครอบคลุมเนื้อหาในเรื่องของสายอากาศแบบเกลียวที่สามารถกำเนิดคลื่นให้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเกลียวทั้งแบบวนทางซ้ายมือหรือวนทางขวามือ (Left-hand or Right-hand Circularly Polarized Waves)

หน่วยที่ 4 จะกล่าวถึงสายอากาศแบบแถวลำดับปรสิติก โดยเฉพาะสายอากาศแบบยาเกอ-อูดะ (Yagi-Uda) หรือที่มักจะเรียกสั้นๆ ว่าสายอากาศแบบยาเกอ (Yagi) ซึ่งจะประกอบด้วยองค์ประกอบแอคทีฟ (Active Element) และองค์ประกอบพาสซีฟ (Passive Element) หรือองค์ประกอบปรสิติก (Parasitic Element) สายอากาศแบบนี้จะให้อัตราขยายและค่าสภาพเจาะจงทิศทางทางที่ดีกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ ที่ได้กล่าวไปแล้ว

หน่วยที่ 2-1

สายอากาศโมโนโพล

(Monopole Antenna)

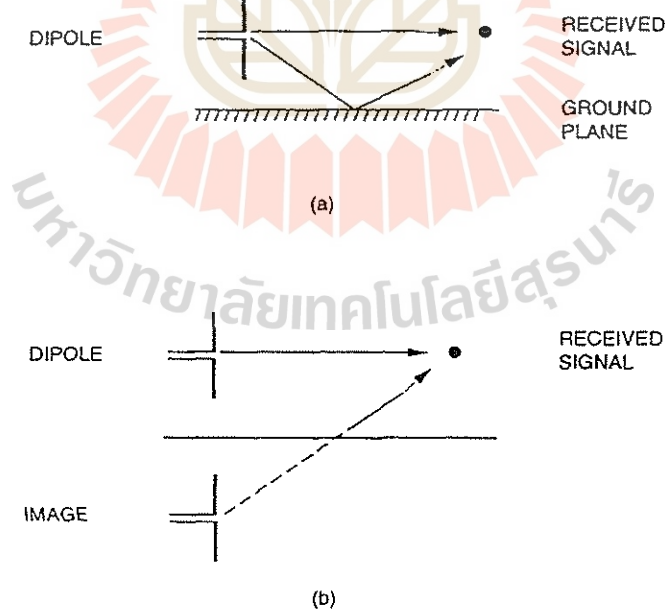
1.1 วัตถุประสงค์

เมื่อผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาในบทนี้แล้ว จะมีความเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญของสายอากาศแบบโมโนโพลมาตรฐาน และสายอากาศโมโนโพลแบบมีระนาบกราวด์ (Drooping Monopole Antennas)

1.2 ทฤษฎี

1.2.1 ทฤษฎีเชิงเงา (Image Theory)

ระนาบกราวด์ที่เป็นตัวนำสมบูรณ์ (Perfectly Conducting Ground Plane) จะทำหน้าที่เสมือนกระจกเงา ตัวอย่างก็คือ ถ้ามีไดโพลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งคลื่นอยู่เหนือแผ่นระนาบกราวด์ที่เป็นตัวนำ สัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้จะเป็นผลรวมของสัญญาณที่ส่งเข้าไปโดยตรงกับสัญญาณที่ถูกสะท้อนโดยแผ่นระนาบกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1(ก) ส่วนในรูปที่ 1.1(ข) จะเป็นการสมมูลด้วยการแทนแผ่นระนาบกราวด์ด้วยกระจกเงา ซึ่งลักษณะนี้คือทฤษฎีเชิงเงาในรูปแบบที่ง่ายที่สุด

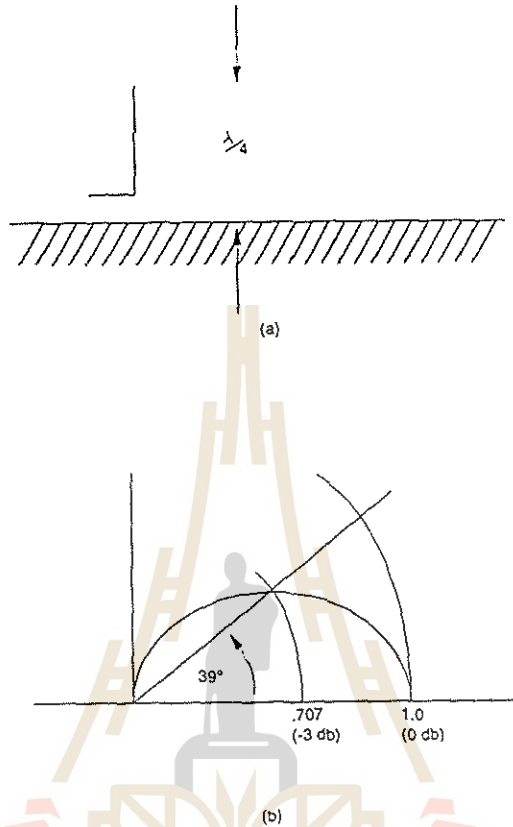


รูปที่ 1.1 (ก) ไดโพลที่วางอยู่เหนือแผ่นตัวนำที่สมบูรณ์

(ข) แบบสมมูลโดยใช้ทฤษฎีเชิงเงา

1.2.2 สายอากาศโมโนโพล

รูปที่ 1.2 แสดงสายอากาศแบบโมโนโพลที่มีความยาว l ใน 4 ของความยาวคลื่น ($\lambda/4$) ที่ลิดจากความถี่ปฏิบัติการ วางอยู่บนแผ่นตัวนำสมบูรณ์ซึ่งมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลที่มีความถี่หนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$)



รูปที่ 1.2 สายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$ ที่วางอยู่บนแผ่นตัวนำสมบูรณ์

(ก) ลักษณะทางกายภาพ

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

กระแสไฟฟ้าที่เกิดการแ่งรูปในสายอากาศโมโนโพล จะเหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในครึ่งใดครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ อย่างไรก็ตามแรงดันที่ขั้วอินพุตของสายอากาศโมโนโพลจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ ดังนั้นค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพลจึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล

$$Z_{in} = 37.5 \ \Omega \quad (1.1)$$

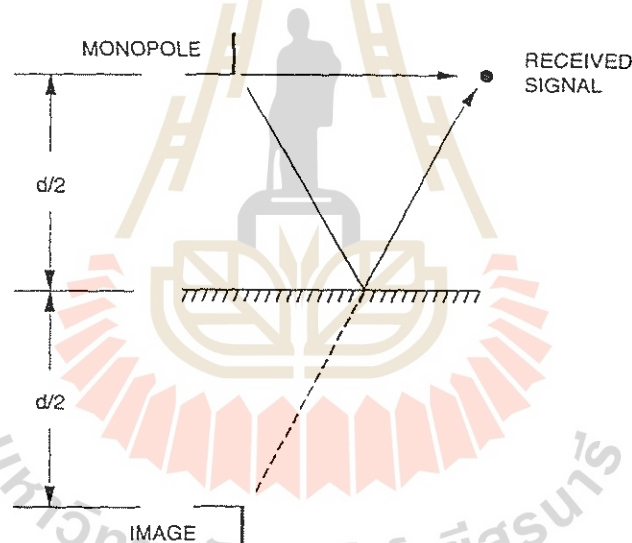
การที่การแ่งรูปของกระแสไฟฟ้าในสายอากาศโมโนโพลมีลักษณะเหมือนกับสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ ดังนั้นกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปจึงมีลักษณะเหมือนกับของสายอากาศไดโพลด้วย แต่เนื่องจากแผ่นระนาบกราวด์ได้ตัดผ่านจุดกึ่งกลางของแบบรูปการกระจายกำลังงาน ความกว้างลำคลื่นจึงมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของไดโพล ดังนั้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยาย จึงมีค่าเป็นสองเท่าของสายอากาศไดโพล นั่นคือ

$$G = 2 \times 1.64 = 3.2 = 5 \text{ dB} \quad (1.2)$$

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$ ซึ่งอยู่ที่ผิวของแผ่นระนาบกราวด์จะมีรูปร่างเหมือนกับของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ ที่มุมเหนือจากศูนย์กลางขึ้นไป แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้จากทฤษฎีได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.2 (ข) ซึ่งหาได้จากสมการ (1.3) ซึ่งเป็นของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ ที่ได้อธิบายผ่านไปแล้ว

$$F(\theta)_{\lambda/4 \text{ monopole}} = \frac{1}{2} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta}, \quad \theta > 0 \quad (1.3)$$

ถ้าสายอากาศโมโนโพลถูกยกขึ้นเหนือแผ่นกราวด์ที่ความสูง $d/2$ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ตัวของสายอากาศจะแสดงตัวเหมือนกับสายอากาศแถวลำดับแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Element Array) การแผ่กระจายกำลังงานจากองค์ประกอบด้านบนและจากตัวล่างจะพุ่งเข้ามารวมกันที่จุดรับสัญญาณ ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันมากเท่าใดนั้น จะขึ้นอยู่กับระยะความสูงจากแผ่นกราวด์ที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดค่าตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ขึ้นมา ซึ่งจะศึกษาต่อไปในปฏิบัติการที่ 3

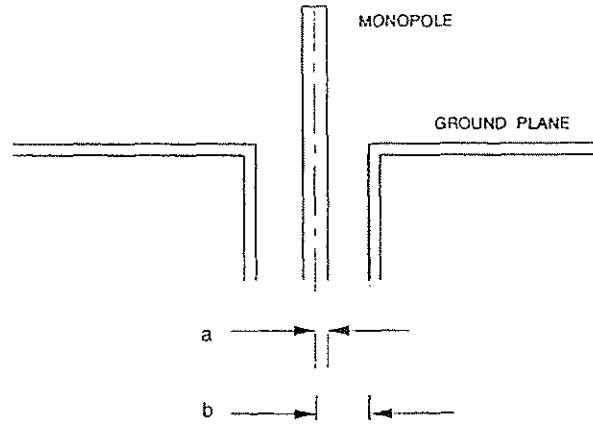


รูปที่ 1.3 การรวมกันของคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศโมโนโพลและที่มาจากเงาของมัน

กรณีนี้จะคล้ายกันกับกรณีของสายอากาศไดโพลที่วางอยู่เหนือแผ่นตัวนำสมบูรณ์ ซึ่งยังไม่ได้กล่าวถึงมาก่อน เพราะว่าได้ทำการทดลองสายอากาศไดโพลในอากาศอิสระ (Free Space) เท่านั้น ไม่ได้ทดลองในกรณีที่วางอยู่เหนือแผ่นกราวด์

1.2.3 สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน

สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน ที่ใช้ในการปฏิบัติการได้แสดงไว้รูปที่ 1.4 ซึ่งจะมีการป้อนสัญญาณโดยผ่านสายโคแอกเซียล 50 โอห์ม ผ่านช่องของแผ่นระนาบกราวด์ขนาดใหญ่เข้าไปที่ขั้วอินพุตของสายอากาศโมโนโพล



รูปที่ 1.4 สายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยสายโคแอกเซียลและระนาบกราวด์

แผ่นระนาบกราวด์ คือ ส่วนที่จำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศโมโนโพล ในทางอุดมคตินั้นจะต้องมีขนาดเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติจะกำหนดให้มีรัศมีเท่ากับ 5λ ก็เพียงพอที่จะให้เกิดเงื่อนไขใกล้เคียงกับขนาดในอุดมคติได้ หรือจะใช้ขนาดที่ต่ำที่สุดซึ่งจะให้เงื่อนไขใกล้เคียงอุดมคติได้เช่นกัน ก็คือที่ 0.5λ ซึ่งสายอากาศโมโนโพลที่ใช้ในปฏิบัติการ จะใช้แผ่นระนาบกราวด์ที่มีขนาดดังกล่าวนี้

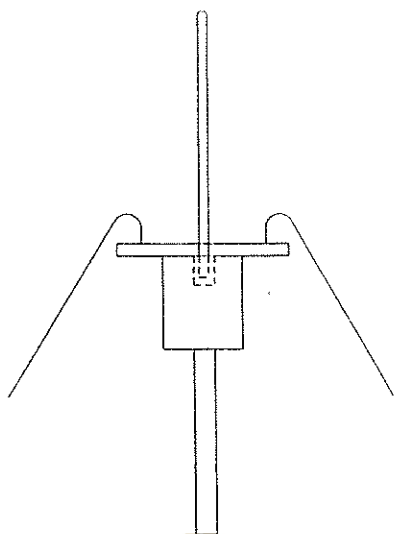
สายเคเบิลที่ใช้สำหรับป้อนสัญญาณให้กับตัวสายอากาศจะเป็นสายโคแอกเซียลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ซึ่งจะต้องมีการแปลงค่าอิมพีแดนซ์นี้ให้ลดลงไปอยู่ที่ 37.5 โอห์ม เพื่อให้เกิดการแมตช์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพล ในกรณีนี้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จะเปลี่ยนไปจะเป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่อยู่ตรงกลางกับระยะห่าง b ระหว่างตัวนำตรงกลางกับขอบของช่องวงกลมในแผ่นระนาบกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 และสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์นี้ ได้แสดงไว้ในสมการ (1.4)

$$Z_0 = 60 \log\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1.4)$$

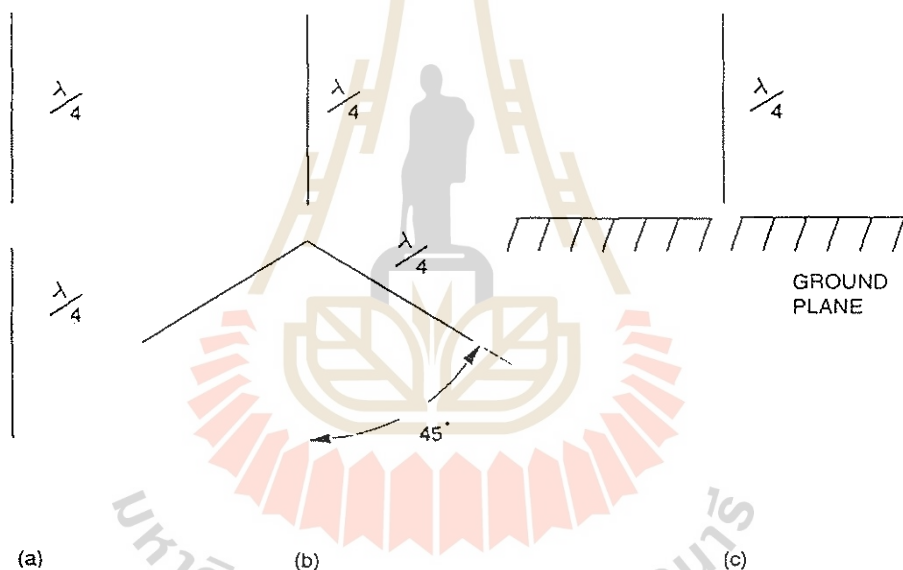
เมื่อ $a = 0.159$ ซม. และ $b = 0.317$ ซม. อิมพีแดนซ์ที่ได้จะเท่ากับ 41.5 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าตรงกลางระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียลและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพล 37.5 โอห์ม

1.2.4 สายอากาศโมโนโพลแบบดรูปปิ่ง (Drooping Monopole)

นอกจากสายอากาศโมโนโพลแบบมาตรฐานแล้ว ในระบบของสายอากาศชนิดเดียวกันนี้ยังมีสายอากาศที่เรียกว่าสายอากาศโมโนโพลแบบดรูปปิ่งด้วย หรืออาจจะเรียกว่าสายอากาศแบบระนาบกราวด์ (Ground Plane Antenna) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งเป็นการสร้างสายอากาศโมโนโพลให้มีความง่ายยิ่งขึ้น



รูปที่ 1.5 สายอากาศโมโนโพลแบบครูป้าง (Drooping Monopole)



รูปที่ 1.6 (ก) สายอากาศไดโพลครีงคลีน

(ข) สายอากาศโมโนโพลครูป้าง

(ค) สายอากาศโมโนโพลมาตรฐาน

เพื่ออธิบายคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลครูป้าง ให้พิจารณาลักษณะของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 73 โอห์ม ในรูปที่ 1.6(ก) ถ้าเราจัดเส้นลวดที่อยู่ด้านล่างของตัวไดโพลให้แยกออกจากกัน โดยให้กางออกไป 180 องศา ดังรูปที่ 1.6(ค) เราก็จะได้สายอากาศโมโนโพลแบบมาตรฐานที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์ 37.5 โอห์ม แต่เมื่อปรับมุมของลวดลงมาด้านละ 45 องศา (ลวดทั้งสองจะทำมุมซึ่งกันและกัน 90 องศา) ดังรูปที่ 1.6(ข) จะทำให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใกล้เคียง 50 โอห์ม เราเรียกรูปแบบของสายอากาศแบบนี้ว่า สายอากาศโมโนโพลแบบครูป้าง ซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเมตซ์กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายโคแอกเซียล

1.3 สรุป

จากการศึกษาในหน่วยการเรียนรู้นี้ ผู้ศึกษาจะเข้าใจแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$ ที่วางอยู่บนแผ่นระนาบกราวด์ตัวนำ และสายอากาศโมโนโพลครึ่งปี่ $\lambda/4$ และได้ศึกษาพฤติกรรมของสายอากาศโมโนโพลเมื่อมีแผ่นระนาบกราวด์และไม่มีแผ่นระนาบกราวด์ นอกจากนี้ยังทราบถึงความแตกต่างของค่าอัตราขยายแบบเจาะจงทิศทาง (Directive Gain) ของทั้งสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ และสายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$

1.4 คำถามหลังปฏิบัติการ

- 1) ให้อธิบายทฤษฎีที่มาของโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบมาตรฐาน
- 2) จงอธิบายว่าทำไมค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศโมโนโพลที่วางอยู่บนแผ่นระนาบกราวด์ขนาดอนันต์จึงมีค่าเป็น 2 เท่าของสายอากาศไดโพล
- 3) ให้ออกแบบสายอากาศแบบโมโนโพลที่ความถี่ 800 MHz (ย่านความถี่ UHF) พร้อมแผ่นระนาบกราวด์ที่มีขนาดใกล้เคียงในอุดมคติ โดยแสดงการคำนวณขนาดของสายอากาศนี้ด้วย
- 4) ในการคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบโมโนโพล ค่าพารามิเตอร์ตัวใดที่สมควรต้องพิจารณา
- 5) เส้นลวดที่มีมุมเอียง 45 องศาทั้งสี่เส้น ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่แต่ละมุมของสายอากาศโมโนโพลแบบครึ่งปี่ มีไว้เพื่อวัตถุประสงค์ใด

หน่วยที่ 2-2

สายอากาศแบบบ่วง

(Loop Antennas)

2.1 วัตถุประสงค์

การศึกษาในหน่วยนี้จะเป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศแบบบ่วง (Loop Antennas) ที่มีความยาวของเส้นรอบวงของบ่วงเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น และสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กที่มีเส้นรอบวงน้อยกว่าหนึ่งความยาวคลื่น

2.2 ทฤษฎี

2.2.1 สายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น (Full-Wave Loop Antennas)

สายอากาศแบบบ่วงที่มีความยาวของบ่วงเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น จะถูกเรียกว่าสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น เป็นสายอากาศที่นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง เพราะมีค่าอัตราขยายและอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสามารถแปลงกลับให้ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม หรือ 75 โอห์มได้โดยง่าย สายอากาศแบบบ่วงที่ใช้งานในปัจจุบันจะมีรูปร่างหลายรูปแบบ เช่น แบบวงกลม แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ซึ่งแต่ละรูปแบบจะให้อัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานมากน้อยแตกต่างกันไป

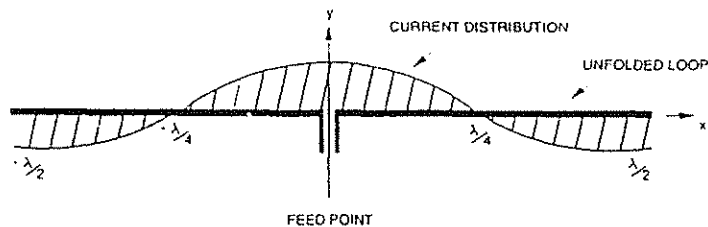
2.2.2 การแจกแจงของกระแสตลอดความยาวของสายอากาศที่มีความยาวเต็มความยาวคลื่น

วิธีที่จะศึกษาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบบ่วงที่มีขนาดเต็มความยาวคลื่น ได้อย่างเข้าใจ ก็คือ จะต้องเข้าใจการแจกแจงของกระแสที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของบ่วง และต้องเข้าใจผลของสนามที่เกิดการเสริมกันหรือหักล้างกันตลอดความยาวของบ่วงด้วย

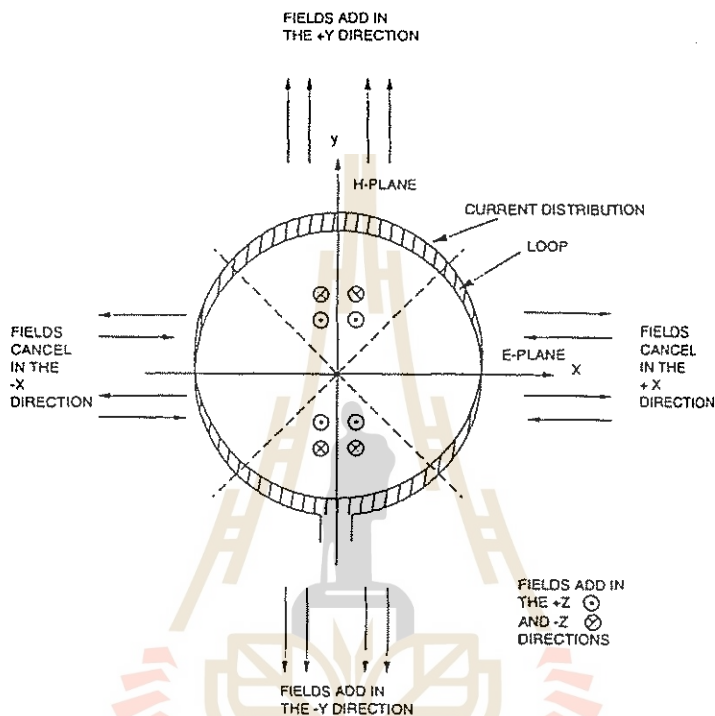
การพิจารณาสายอากาศแบบบ่วงที่มีความยาวของบ่วงเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่นในระนาบ X-Y นั้น จุดป้อนสัญญาณสามารถจะพิจารณาให้อยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งรอบๆ บ่วงได้ อย่างไรก็ตามตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณที่แตกต่างกันจะมีผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานด้วย

สมมติว่าจุดป้อนสัญญาณอยู่ที่บริเวณส่วนที่เป็นค่าลบของแกน Y จากนั้นแบ่งสายอากาศให้แยกออกจากกันโดยมีความยาวเท่ากันและคลี่ออกในแนวแกน X ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงการแจกแจงของกระแส ซึ่งมีลักษณะเหมือนคลื่นรูปโคไซน์ (Cosine Wave) ซึ่งมีจุดที่กระแสสูงสุดอยู่ตรงจุดป้อนสัญญาณ

รูปที่ 2.1 แสดงการแจกแจงของกระแสในสายอากาศแบบบ่วงวงกลม และแสดงการเสริมกันและหักล้างกันของสนามบนตัวของบ่วง ในกรณีนี้สนามจะเสริมกันในทิศทาง +Y, -Y และ +Z, -Z แต่จะหักล้างกันในทิศทาง +X และ -X



รูปที่ 2.1 การแจกแจงรูปของกระแสตลอดความยาวเต็มความยาวคลื่นของสายอากาศแบบบ่วงที่ถูกคลี่ออก

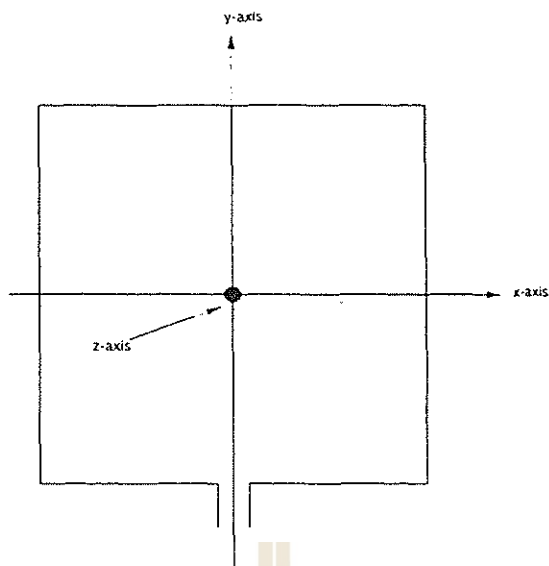


รูปที่ 2.2 การแจกแจงรูปของกระแสในสายอากาศแบบบ่วงวงกลมที่มีความยาวหนึ่งความยาวคลื่น

2.2.3 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น

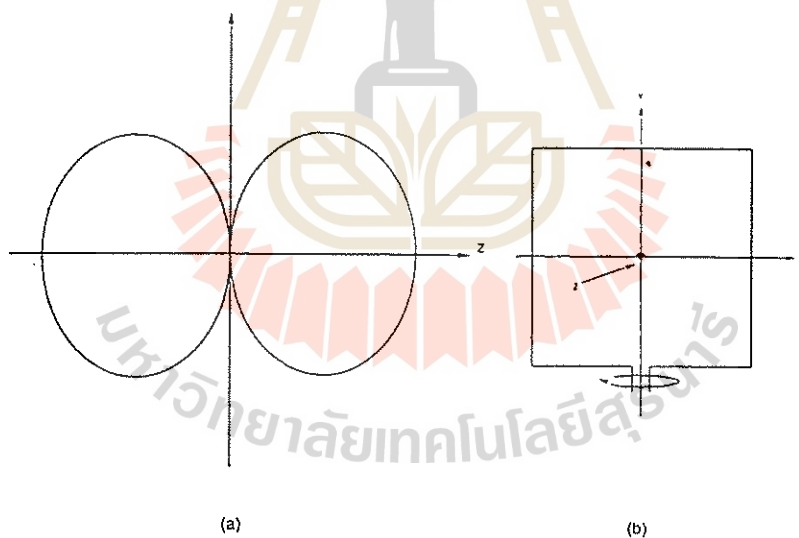
สายอากาศแบบบ่วงจะมีแนวระนาบที่ต้องทำการพิจารณาอยู่สามระนาบ คือ ระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็ก และระนาบของบ่วง ซึ่งเป็นระนาบการวางตัวของสายอากาศบ่วงเอง และเพื่อแสดงให้เห็นระนาบเหล่านี้ เราจะพิจารณาตัวอย่างจากสายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สมมติว่าสายอากาศแบบบ่วงนี้วางอยู่ในแนวตั้ง โดยมีระนาบ X-Y วางอยู่ด้านหน้าของเรา นั่นคือ แกน Z จะพุ่งเข้าหาตัวเรา ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้าเราเปรียบเทียบสายอากาศแบบบ่วงกับสายอากาศไดโพลที่มีจุดป้อนตรงกลาง จะเห็นว่าระนาบ X-Z ก็คือ ระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบ Y-Z ก็คือ ระนาบสนามแม่เหล็ก ส่วนระนาบของบ่วง ก็คือ ระนาบ X-Y นั่นเอง



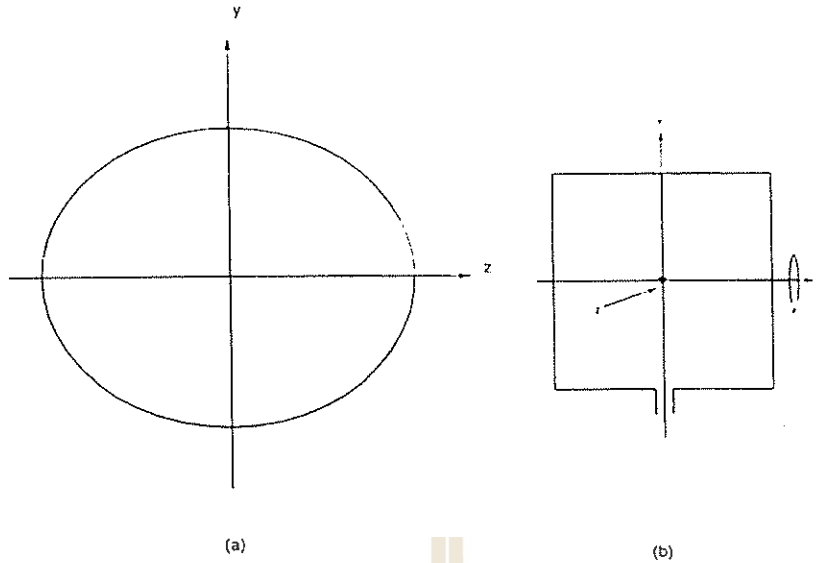
รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบบ่วงที่ได้จากทฤษฎีในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ X-Z) นั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4(ก) และเพื่อที่จะทำการวัดในระนาบนี้ ตัวของบ่วงจะต้องถูกหมุนไปรอบๆแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข)



รูปที่ 2.4 (ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น (ข) แสดงการหมุนของบ่วงเพื่อที่จะวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

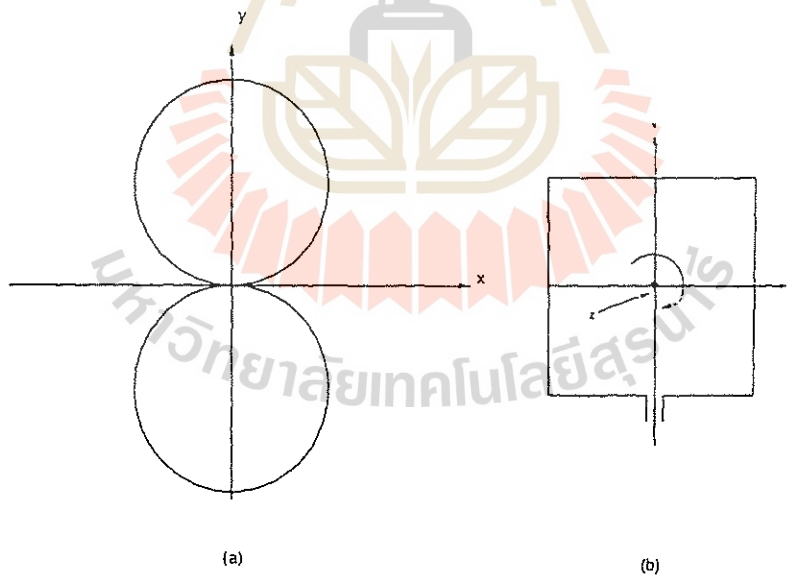
สำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ Y-Z) นั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5(ก) ตัวของบ่วงจะต้องถูกหมุนรอบแกน X ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข)



รูปที่ 2.5 (ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วงเต็ม ความยาวคลื่น

(ข) แสดงการหมุนของบ่วงเพื่อวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

สุดท้ายเป็นการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของตัวบ่วง (ระนาบ X-Y) ซึ่งได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 2.6(ก) ตัวของบ่วงจะต้องถูกหมุนรอบแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข)



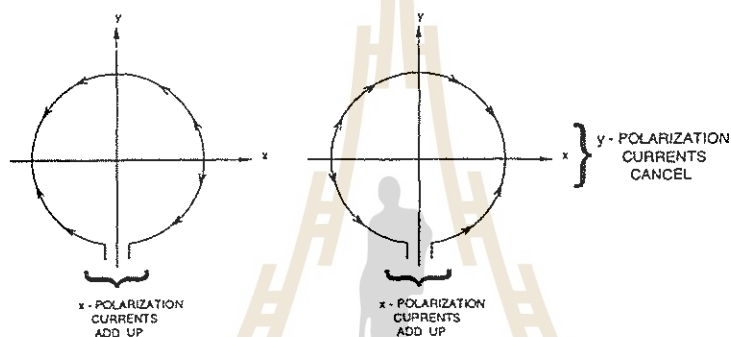
รูปที่ 2.6 (ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของตัวบ่วงของสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น (ข) แสดงการหมุนของบ่วงเพื่อวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของตัวบ่วง

ต่อไปจะเป็นการพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้จากทฤษฎีทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็ก และระนาบของบ่วงให้มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก), 2.5(ก) และ 2.6(ก) ตามลำดับ แม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบของบ่วงจะมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่

ระดับของแอมพลิจูดจะแตกต่างกัน ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.2 ผลของสนามที่เกิดขึ้นบริเวณจุดกึ่งกลางของบ่วงจะได้มาจากการเสริมกันของสนามที่เกิดจากกระแสที่มีเฟสเดียวกัน ส่วนบนแกน X ที่อยู่ภายนอกบ่วงสนามก็จะเสริมกันเช่นกันแต่จะมีเฟสแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเป็นสาเหตุให้สนามในระนาบของบ่วงมีค่าต่ำกว่าสนามในระนาบสนามไฟฟ้าอยู่ 3 dB

2.2.4 การโพลาไรซ์ (Polarization)

ในรูปที่ 2.7(ก) และ 2.7(ข) แสดงให้เห็นทิศทางของกระแสที่ไหลในสายอากาศแบบบ่วงซึ่งมีความแตกต่างกันในช่วงเวลา จากรูปได้แสดงให้เห็นว่า ในทิศทางของ X นั้นกระแสจะเสริมกันทั้งในครึ่งบนและครึ่งล่างของบ่วง ขณะที่ในทิศทางของ Y นั้นกระแสจะหักล้างกันหมด จากเหตุผลนี้ทำให้คลื่นที่เกิดขึ้นในระนาบสนามไฟฟ้าจึงมีการโพลาไรซ์ในทิศทาง X



รูปที่ 2.7 การโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าในทิศทาง X

จากกรณีดังกล่าว ในทางปฏิบัตินั้นหมายความว่า ถ้าบ่วงถูกวางในแนวตั้งและมีการป้อนสัญญาณอยู่ที่ด้านข้างหรือด้านบนของบ่วง คลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีการโพลาไรซ์ทางแนวนอน แต่ถ้าบ่วงวางในแนวตั้งแต่มีจุดป้อนสัญญาณที่ด้านขวาหรือด้านซ้ายของบ่วง คลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีการโพลาไรซ์ทางแนวตั้ง

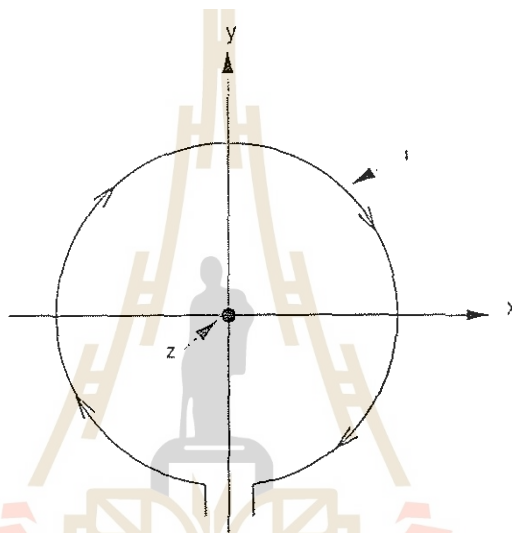
2.2.5 อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราขยาย และความกว้างของลำคลื่น

ความต้านทานอินพุต (Input Resistance) ของสายอากาศแบบบ่วงจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 100 โอห์ม เมื่อความยาวของบ่วงมีค่าใกล้เคียงกับหนึ่งความยาวคลื่น ในขณะที่มีความยาวนี้ ค่ารีแอกแตนซ์อินพุตจะมีค่าต่ำลงมาก ๆ ซึ่งถ้าบ่วงมีเงื่อนไขตามนี้ สายอากาศแบบบ่วงก็จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และมีความกว้างลำที่กว้างพอสมควร สายอากาศแบบบ่วงจะมีค่าอัตราขยาย 3.09 dB ซึ่งน้อยกว่าค่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแบบเต็มความยาวคลื่น ซึ่งมีค่าอัตราขยายประมาณ 3.82 dB แต่ก็มากกว่าของสายอากาศไดโพลแบบความยาวครึ่งคลื่น ซึ่งมีอัตราขยาย 2.15 dB ซึ่งเป็นผลมาจากความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศนั่นเอง ในทางทฤษฎีนั้นจะมีค่าอยู่ระหว่างความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบเต็มความยาวคลื่นและแบบความยาวครึ่งคลื่น ซึ่งมีความกว้างของลำคลื่น 47 องศา และ 78 องศา ตามลำดับ

2.2.6 สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก (Small Loop Antenna)

สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเป็นสายอากาศที่มีความยาวเส้นรอบวงของบ่วงประมาณ $\lambda/8$ หรือน้อยกว่า สายอากาศแบบนี้จะมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แตกต่างจากของสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่นอย่างมาก และจะนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างจากงานปกติ เช่น สายอากาศสำหรับใช้ในการหาทิศทาง เป็นต้น

เนื่องจากความยาวของบ่วงมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นมาก กระแสที่เกิดขึ้นในทุกส่วนของตัวบ่วงสามารถที่จะพิจารณาให้เป็นเฟสเดียวกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ด้วยเหตุนี้สนามไฟฟ้าในแนวแกน Z จึงมีค่าเป็นศูนย์ สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กจึงแตกต่างจากสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น ซึ่งมีสนามไฟฟ้าในแนวแกน Z สูงที่สุด



รูปที่ 1.8 กระแสที่ไหลในสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

ส่วนในทิศทางอื่นๆ ที่ไม่ใช่ในแนวแกน Z แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เช่นเดียวกับสายอากาศไดโพลขนาดสั้น (Short Dipole) ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กจะเป็นสายอากาศที่เป็นทวิภาค (Dual) กันกับสายอากาศไดโพลขนาดสั้น (มีคุณลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเหมือนกัน) ดังนั้นหากเราเปลี่ยนจากสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมาเป็นสายอากาศไดโพลสั้น โดยวางตัวไดโพลไว้ที่จุดกำเนิด (Origin) และวางตัวของไดโพลขนาดสั้นไปตามแนวแกน Z แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้จะไม่แตกต่างกันเลย สำหรับค่าความต้านทานอินพุตของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กนี้จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีค่าเป็นเศษส่วนของโอห์ม

2.3 สรุป

จากเนื้อหาการศึกษาที่ผ่านมาในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาจะเข้าใจถึงความสัมพันธ์กันระหว่างจุดป้อนสัญญาณบนตัวสายอากาศแบบบ่วงกับการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบบ่วง การโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบบ่วง อิมพีแดนซ์อินพุต อัตราขยาย ความกว้างลำคลื่น และสามารถคำนวณ

หาค่าอัตราขยายของสายอากาศชนิดนี้ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กันระหว่างรูปร่างของบ่วงกับค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เกิดขึ้น

2.6 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) จงอธิบายการแจกแจงรูปของกระแสตลอดความยาวเส้นลวดของสายอากาศแบบบ่วงที่มีความยาวเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น (λ)
- 2) หากนักศึกษาต้องการสร้างสายอากาศแบบบ่วงซึ่งมีความยาวเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น เพื่อรับสัญญาณความถี่ 28 MHz ที่มีการโพลาไรซ์ทางแนวตั้ง ให้อธิบายลักษณะของสายอากาศนี้
- 3) หากนำสายอากาศแบบบ่วงที่มีความยาวเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น มาใช้กับสายเคเบิลที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 โอห์ม ให้คำนวณหาค่า SWR แล้วคำนวณหาค่ากำลังงานที่ถูกส่งออกไปจากสายอากาศนี้ มีค่าเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังงานทั้งหมด (ให้อ้างอิงกับปฏิบัติการที่ 5 ในบทที่ 1)
- 4) ถ้านักศึกษาต้องการใช้สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเพื่อรับสัญญาณเช่นเดียวกับในข้อที่ 2 สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กของนักศึกษา จะต้องมีความยาวสูงสุดเท่าใด จงอธิบาย
- 5) ให้อธิบายว่าเหตุใดจึงมีการกล่าวว่าสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กนั้นเป็นทวิภาคของสายอากาศไดโพลแบบสั้น

หน่วยที่ 2-3

การโพลาไรซ์แบบวงกลมและสายอากาศแบบเกลียว

(Circular Polarization and Helical Antenna)

3.1 วัตถุประสงค์

ในหน่วยนี้จะช่วยให้ผู้ศึกษาได้เรียนรู้ในเรื่องของการโพลาไรซ์แบบวงกลม รวมทั้งจะได้ศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศแบบเกลียว ซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานที่ให้การโพลาไรซ์เป็นแบบเกลียวทั้งแบบวนซ้ายมือและวนขวามือ

3.2 ทฤษฎี

3.2.1 การโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization)

สายอากาศที่ได้ศึกษาผ่านมาทั้งหมดในหนังสือทฤษฎีวิศวกรรมสายอากาศเล่มนี้ จะมีการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น โดยเฉพาะในกรณีที่สายอากาศมีลักษณะเป็นเส้นตรง เช่น สายอากาศแบบไดโพล สายอากาศไดโพลแบบพับ และสายอากาศโมโนโพล ซึ่งจะมีสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เหมือนกันโดยมีแนวของการโพลาไรซ์ทอดไปตามลักษณะทางกายภาพของเส้นลวดที่ใช้ทำสายอากาศ สายอากาศไดโพลที่มีสนามไฟฟ้าในระนาบทางแนวอนก็จะมีสนามแม่เหล็กในระนาบทางแนวตั้ง ดังนั้นหากต้องการรับสัญญาณจากสายอากาศชนิดนี้ให้ดีที่สุด สายอากาศภาครับจะต้องมีระนาบของสนามไฟฟ้าในทางแนวอนด้วย

สายอากาศแบบบ่วงก็เช่นเดียวกันจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ตัวอย่างจากสายอากาศแบบบ่วงที่วางในแนวตั้งจะมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านล่างของตัวสายอากาศ จะมีพฤติกรรมเหมือนกับสายอากาศไดโพลที่วางในแนวอน ซึ่งจะให้การโพลาไรซ์ในระนาบทางแนวอนด้วย และถ้าเราป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านซ้ายหรือด้านขวาของตัวบ่วง เราจะได้การโพลาไรซ์ในระนาบทางแนวตั้ง

ในกรณีที่เป็นการท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม จะมีการส่งสัญญาณที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ซึ่งการวัดสนามในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นได้ทำปฏิบัติการไปแล้วในบทที่ผ่านมา และได้พิสูจน์แล้วว่าทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับจะต้องมีการโพลาไรซ์ที่เหมือนกันทุกประการ ดังนั้นการวางตัวของสายอากาศทั้งสองจึงต้องปรับให้มีการโพลาไรซ์ที่ตรงกันด้วย จึงจะทำให้รับส่งสัญญาณได้ผลดีที่สุด อย่างไรก็ตามหากสายอากาศด้านใดด้านหนึ่งถูกหมุนไป 90 องศา จะมีสัญญาณที่มีระดับต่ำมาก ๆ ส่วนหนึ่งเท่านั้น ที่สายอากาศภาครับจะสามารถรับเข้ามาได้ ซึ่งกรณีนี้เกิดจากการแยกโคเดเดี่ยวจากการโพลาไรซ์ไขว้ (Cross Polarization Isolation) ในทางทฤษฎีแล้วค่าการแยกโคเดเดี่ยวชนิดนี้จะต้องมีค่าเป็นอนันต์และไม่ควรรับสัญญาณได้เลย แต่ในทางปฏิบัติการแยกโคเดเดี่ยวจะไม่สามารถกระทำได้อย่างสมบูรณ์

การโพลาไรซ์ของคลื่นที่เดินทางออกจากสายอากาศนั้น สามารถกำหนดให้มีลักษณะที่เป็นวงรีหรือวงกลมก็ได้ (ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายอากาศด้วย) การโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization) จะเกิดจากการรวมกันของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าสองเวกเตอร์ (โดยพิจารณาให้ทั้งสองเวกเตอร์มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น) ซึ่งมีความถี่เดียวกัน แต่วางตั้งฉากซึ่งกันและกันและเดินทางไปในทิศทางเดียวกัน และในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ออกไปนั้น ความสัมพันธ์เชิงเฟสและเชิงแอมพลิจูดของเวกเตอร์ทั้งสองจะมีค่าแตกต่างกัน อีกกรณีหนึ่งก็คือ ถ้าแอมพลิจูดของทั้งสองเวกเตอร์มีค่าเท่ากัน และทั้งสองเวกเตอร์มีเฟสต่างกัน 90 องศาอย่างแท้จริง โพลาไรซ์ที่ได้จะเปลี่ยนไปเป็นการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม (Circular Polarization) แต่ถ้าเวกเตอร์ใดเวกเตอร์หนึ่งมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์ การโพลาไรซ์ก็จะกลายเป็นแบบเชิงเส้น จะเห็นว่าการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและแบบวงกลมจะเป็นกรณีพิเศษที่เป็นผลจากการโพลาไรซ์แบบวงรี

วิธีการที่จะได้การโพลาไรซ์แบบวงกลมนั้น สนามไฟฟ้าจะต้องถูกทำให้หมุนและเคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีหลายวิธีที่สามารถจะทำให้เกิดขึ้นได้

วิธีแรก ก็คือ การส่งคลื่นออกไปทั้งที่เป็นการโพลาไรซ์ทางแนวตั้งและการโพลาไรซ์ทางแนวนอน โดยให้มีความต่างเฟสของคลื่นเท่ากับ 90 องศา คล้ายกับการสร้างภาพวงกลมให้ปรากฏบนออสซิลโลสโคป โดยการป้อนสัญญาณรูปไซน์ที่ต่างเฟสกัน 90 องศาเข้าที่อินพุตของแกน X และแกน Y

อีกวิธีหนึ่ง ก็คือ การส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดรูปเกลียวซึ่งมีขนาดที่เหมาะสม คลื่นดังกล่าวจะเดินทางเข้าไปในเกลียวของขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนของสนามไฟฟ้าไปตามแนวเกลียวของขดลวดอย่างรวดเร็ว ซึ่งวิธีนี้ ก็คือ หลักการทำงานพื้นฐานของสายอากาศแบบเกลียวนั่นเอง

การหมุนของสนามไฟฟ้านั้น สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา ถ้าเรากำมือขวาและให้นิ้วชี้ถึงนิ้วก้อยของมือขวาชี้แสดงทิศทางของการหมุนของสนามไฟฟ้า โดยให้นิ้วหัวแม่มือชี้ไปในทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นที่เดินทางออกไปในอากาศ เราจะเรียกการโพลาไรซ์ในลักษณะนี้ว่าการโพลาไรซ์แบบวนขวา (Right-Hand Circular Polarization) สำหรับในทิศทางที่หมุนตรงกันข้ามกัน เราจะเรียกลักษณะนี้ว่า การโพลาไรซ์แบบวนซ้าย (Left-Hand Circular Polarization)

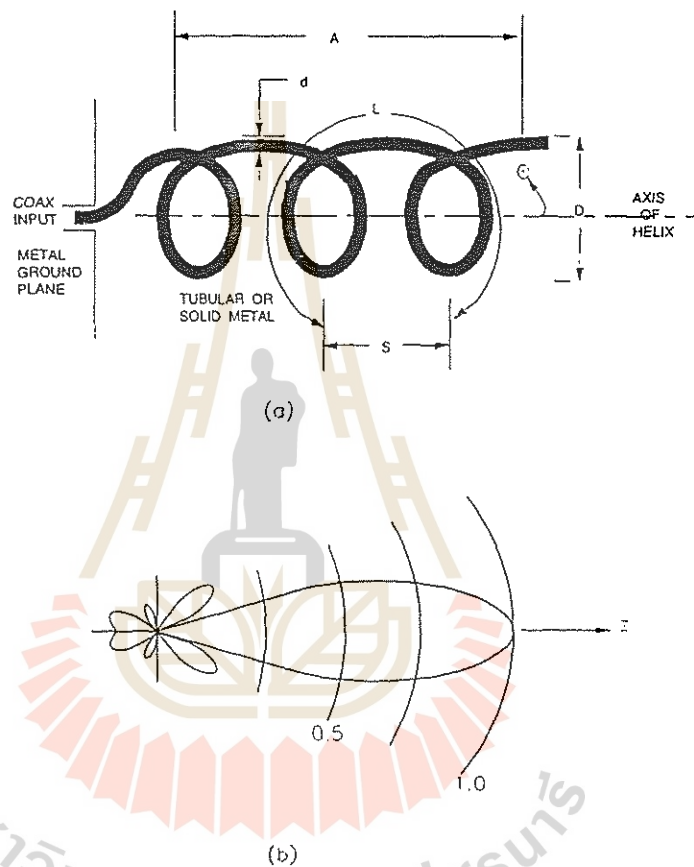
สำหรับการโพลาไรซ์แบบวงกลมนี้ ผลกระทบของการแยกโคเคเดียมแบบข้ามขั้วจะเห็นได้อย่างชัดเจนมาก สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมวนขวาย จะไม่สามารถรับสัญญาณที่ส่งมาด้วยการโพลาไรซ์วงกลมแบบวนซ้ายได้ รวมทั้งในทางกลับกันด้วย แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศเหล่านี้สามารถที่จะรับสัญญาณจากสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นได้เช่นกัน แต่จะเกิดการลดทอนของสัญญาณถึงหนึ่งเท่าตัว (3 dB)

ถึงแม้ว่าการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นน่าจะเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้งานในหลายๆ สถานการณ์ แต่การโพลาไรซ์แบบวงกลมจะมีประโยชน์อย่างมากในการสื่อสารที่ต้องการความแน่นอน ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน ก็คือ การติดต่อสื่อสารระบบดาวเทียม ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะกำหนดให้ลักษณะการวางตัวของสายอากาศให้คงที่ได้ ดังนั้นถ้าใช้สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น อาจจะทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณเมื่อการวางตัวของสายอากาศเปลี่ยนไป แต่ถ้าเป็นการโพลาไรซ์แบบวงกลม ความแรงของสัญญาณที่รับได้ค่อนข้างที่จะคงที่ โดยไม่สนใจว่าสายอากาศของดาวเทียมจะหมุนตัวไปอย่างไร

3.2.2 สายอากาศแบบเกลียว (Helical Antenna)

ในรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นลักษณะโดยทั่วไปของสายอากาศแบบเกลียวที่มีโหมดตามแกน (Axial-Mode Helical Antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศแบบเกลียวที่ถูกออกแบบให้มีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นรูปดินสอ (Pencil Beam) พุ่งไปตามแนวแกนของเกลียวออกจากแผ่นระนาบกราวด์

สายอากาศแบบเกลียวชนิดนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายลักษณะงาน ซึ่งนอกจากจะมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ดีเยี่ยมแล้วยังให้ความกว้างแถบความถี่ (Frequency Bandwidth) ที่กว้างพอสมควร และมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์อยู่ในช่วงระหว่าง 120-140 โอห์ม



รูปที่ 3.1 สายอากาศแบบเกลียวที่มีโหมดตามแกน

(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานรูปดินสอ

สัญลักษณ์ต่อไปนี้จะใช้สำหรับอธิบายสายอากาศแบบเกลียว

N = จำนวนรอบของขดลวด

S = ระยะห่างระหว่างขดลวด = $C \tan \alpha$

A = ความยาวของแกน = NS

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของขดลวด

d = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นลวดตัวนำ

$$C = \text{เส้นรอบวง} = \pi D$$

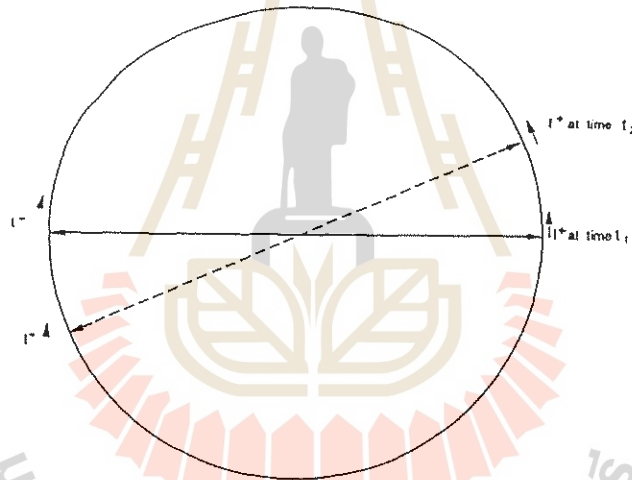
$$L = \text{ความยาวของลวดต่อ 1 รอบ}$$

$$\alpha = \text{มุมพิทช์} = \tan^{-1}(S/C)$$

เกลียวขดลวดจะแผ่กระจายกำลังงานออกในโหมดตามแกน เมื่อเส้นรอบวงของเกลียวเป็นค่าจำนวนเต็มของค่าความยาวคลื่น ย่านความถี่ใช้งานที่ได้จะมีค่าค่อนข้างกว้าง โดยย่านความถี่นี้จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{3}{4}\lambda < C < \frac{4}{3}\lambda \quad (3.1)$$

คลื่นรูปไซน์จะเดินทางไปตลอดความยาวของขดลวดเกลียวที่พุ่งออกจากระนาบกราวด์ไปที่ปลายอีกด้านหนึ่งของขดลวด จึงเป็นที่มาของการเรียกสายอากาศแบบเกลียวนี้อีกชื่อหนึ่งว่า สายอากาศคลื่นจร (Traveling-Wave Antenna) และเพื่อที่จะทำความเข้าใจถึงการทำงานของสายอากาศแบบเกลียว เราจะพิจารณาจากขดลวดที่มีเส้นรอบวงเท่ากับ λ เพียงหนึ่งรอบก่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



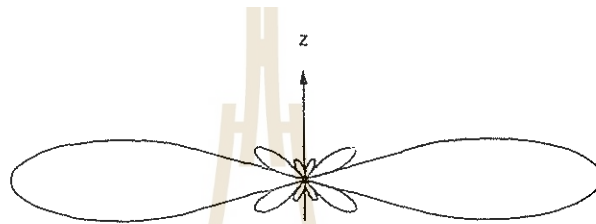
รูปที่ 3.2 แสดงสายอากาศแบบเกลียว ($C = \lambda$) จำนวนหนึ่งรอบ

ที่เวลา t_1 ที่ด้านหนึ่งของบ่วงกระแสจะมีค่าเป็นบวกและจะมีค่าเป็นลบที่ด้านตรงข้าม เนื่องจากเส้นรอบวงมีความยาวเท่ากับ λ จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าจุดของ I^+ และ I^- หัวของลูกศรจะชี้ไปในทิศทางที่อยู่บนรูปทรงเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของสายอากาศไดโพล และต่อมาที่ช่วงเวลาสั้นๆ t_2 กระแสจะเดินทางเป็นระยะทางสั้นๆ บนขดลวด ตัวของไดโพลก็จะหมุนไปอีก ซึ่งไดโพลนี้จะหมุนครบรอบที่หนึ่งความยาวคลื่นของความถี่ที่เครื่องส่งส่งออกมา

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่พุ่งออกไปทางด้านข้างของขดลวดในรูปที่ 3.2 นั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ การแผ่กระจายกำลังงานจะเดินทางออกไปในแนวแกนของเกลียวขดลวดเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นเหตุให้สนามที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบวงของเกลียวขดลวดซึ่งมีเฟสเดียวกันเกิดการทับซ้อนกัน และจะรวมกันขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละวง ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานพุ่งออกจากปลายทั้งสองด้านของเกลียวขดลวด ดังแสดงในรูป

ที่ 3.3 อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงนั้น จะเกิดการหน่วงเวลาขึ้นในขณะที่มีการแผ่กระจายกำลังงาน ทำให้เกิดความต่างเฟสขึ้น ส่งผลให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเปลี่ยนแปลงไป จากที่ควรจะมีลำคลื่นทั้งสองลำคลื่น (Lobe) ก็จะเหลือเพียงลำคลื่นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) สายอากาศแบบเกลียวนี้สามารถจะพิจารณาให้เป็นแถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (Endfire Array) ได้ เนื่องจากตำแหน่งขององค์ประกอบของสายอากาศและเฟสของกระแสทำให้เกิดลำคลื่นเพียงลำคลื่นเดียวในทิศทางแบบเอนด์ไฟร์

ทิศทางในการพันเกลียวของขดลวดนั้น จะพิจารณาจากทิศทางของการไหลกระแส เมื่อมองจากแผ่นระนาบกราวด์ออกไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ลวดที่พันเกลียวในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะทำให้เกิดการไหลกระแสแบบวงกลมวนขวา และถ้าลวดมีการพันเกลียวในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ก็จะทำให้เกิดการไหลกระแสแบบวงกลมวนซ้าย



รูปที่ 3.3 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบเกลียวที่มีลำคลื่นแบบพัด

3.2.3 อัตราส่วนแกน และอัตราขยาย (Axial Ratio and Gain)

การใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีการไหลกระแสแบบวงกลมในการรับสัญญาณนั้น สายอากาศแบบเกลียวจะให้ผลตอบสนองที่ดีมาก สนามไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าสนามจะหมุนเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาก็ตาม

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นปรากฏการณ์นี้ ให้จินตนาการถึงสายอากาศที่มีการไหลกระแสแบบเชิงเส้น เช่น สายอากาศไดโพลทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และให้สายอากาศแบบเกลียวเป็นสายอากาศภาครับ จากนั้นทำการเปลี่ยนการไหลกระแสของสัญญาณที่สายอากาศภาคส่ง โดยการหมุนตัวไดโพลด้วยมุมที่แน่นอนและคงที่ สายอากาศแบบเกลียวที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับจะให้ผลตอบสนองสอดคล้องกับการไหลกระแสของไดโพลในทุกๆ มุมขณะที่ทำการหมุน นั่นคือ สามารถตอบสนองได้ทุกๆ การไหลกระแสที่แน่นอน และเนื่องจากความยาวของเกลียวขดลวดมีระยะที่จำกัด การไม่สมมาตรจึงเกิดขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจจะมีการตอบสนองกับการไหลกระแสบางตำแหน่งดีกว่าตำแหน่งอื่นๆ เพียงเล็กน้อย

การวัดผลการตอบสนองของเกลียวขดลวดต่อการไหลกระแสที่แตกต่างกันนั้น จะเรียกว่า อัตราส่วนแกน (Axial Ratio) ซึ่งใช้บ่งบอกคุณสมบัติของความเป็นวงกลม (Circularity) ของการไหลกระแส ซึ่งกำหนดจากอัตราส่วนของแอมพลิจูดของการไหลกระแสที่ทำให้ผลตอบสนองสูงสุดเทียบกับแอมพลิจูดของการไหลกระแสที่ให้ผลตอบสนองต่ำสุด สายอากาศที่ให้ผลตอบสนองเท่ากันทุกๆ การไหลกระแส จะมีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 1.0 หรือ 0 dB

ค่าของอัตราส่วนแกน จะถูกกำหนดโดย

$$AR = \frac{2N + 1}{2N} \quad (3.2)$$

โดยที่ AR คือ ค่าอัตราส่วนแกน

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

ค่าอัตราส่วนแกนสามารถวัดได้ด้วยการรับส่งสัญญาณระหว่างสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เชิงเส้นกับสายอากาศแบบเกลียว จากนั้นให้หมุนสายอากาศตัวใดตัวหนึ่งเพื่อวัดหาค่าแอมพลิจูดที่สูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณที่วัดได้ จากนั้นจึงนำค่าของแอมพลิจูดทั้งสองค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนแกน

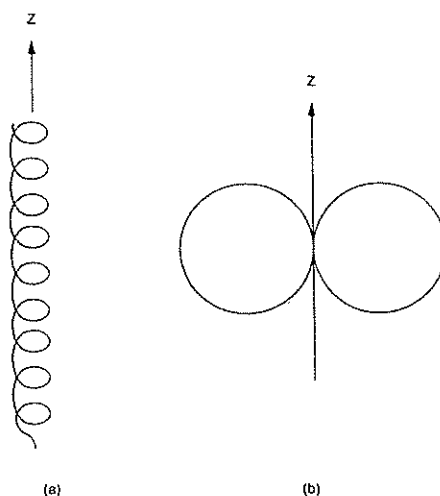
ในทางอุดมคติ สายอากาศแบบเกลียวจะมีค่าอัตราส่วนแกนอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 1.1 (0-0.83 dB) เพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนแกนดังกล่าว เทคนิคที่มักจะใช้กัน ก็คือ การทำให้ส่วนปลายของเกลียวขดลวดมีขนาดเรียวลง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นถ้าให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวขดลวดมีค่าคงที่ จะได้ค่าอัตราส่วนแกนประมาณ 1.2 (1 dB) และค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบเกลียว สามารถคำนวณได้จากสมการซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองดังนี้

$$G = 8.3 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^{\left[(N+2)^{1/2} - 1 \right]} \cdot \left(\frac{NS}{\lambda} \right)^{0.8} \cdot \left[\frac{\tan(12.5^\circ)}{\tan(\alpha)} \right]^{(N/2)^{1/2}} \quad (3.3)$$

3.2.4 โหมดตั้งฉากของการแผ่กระจายกำลังงาน (Normal Mode of Radiation)

มีความเป็นไปได้ที่จะสร้างสายอากาศแบบเกลียวให้มีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้มีความแตกต่างออกไปจากเดิมทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สายอากาศแบบเกลียวจะให้การแผ่กระจายกำลังงานในโหมดตั้งฉาก นั่นคือ ทิศทางที่มีการแผ่กระจายกำลังงานออกมาสูงสุดจะตั้งฉากกับแกนของสายอากาศ

วิธีการกำหนดให้สายอากาศแบบเกลียวทำงานในโหมดตั้งฉากได้นั้น เส้นรอบวงของเกลียวขดลวดจะต้องมีความยาวสั้นกว่าความยาวคลื่น ซึ่งจะทำให้การแจกรูปของกระแสมีแอมพลิจูดและเฟสค่อนข้างจะคงที่ตลอดเกลียวขดลวด ซึ่งขดลวดชนิดนี้จะมีขนาดทางไฟฟ้าเล็กและมีประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 3.4 โหมดตั้งฉากของสายอากาศแบบเกลียว

(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

3.2.5 ราโดม (Radome)

ในบางครั้งสายอากาศแบบเกลียวที่ใช้ในงานที่มีความถี่สูงจะมีขนาดเล็กมาก ทำให้ยากต่อการจัดสร้างโครงสร้างเพิ่มเติมเพื่อให้สายอากาศมีความแข็งแรงและไม่เปลี่ยนรูปได้ วิธีที่นิยมใช้กันก็คือ การป้องกันเกลียวขดลวดโดยใช้ราโดม (Radome) ราโดมหรือเรดาร์โดม (Radar Domes) เป็นโครงสร้างสำหรับป้องกันสายอากาศย่านคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter-Wave) หรือย่านไมโครเวฟ จะถูกสร้างให้มีรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับครอบลงบนตัวสายอากาศ วัสดุที่ใช้ทำราโดมนั้นส่วนใหญ่จะทำมาจากไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียต่ำ และมีความหนาแน่นน้อยกว่าขนาดของความยาวคลื่น

เนื่องจากการรับส่งคลื่นผ่าน โครงสร้างของราโดม จะเกิดการสะท้อน การเลี้ยวเบน และการสูญเสียเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำตัวราโดม ทำให้ราโดมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศที่ถูกครอบอยู่ด้วย สิ่งที่เกิดขึ้นเสมอก็คือ จะไปรบกวนแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศในบางส่วนผิดเพี้ยนไป ทำให้อัตราขยาย ความกว้างแถบความถี่ ระดับของลำคลื่นด้านข้าง และคุณสมบัติของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งราโดมที่ใช้ อาจจะมีผลทำให้ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งลดลงเพียงเล็กน้อย แต่จะไปเพิ่มระดับของลำคลื่นด้านข้างของสายอากาศให้สูงขึ้นจากปกติที่ไม่ได้ใส่ราโดม

3.3 สรุป

เนื้อหาในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาจะทราบถึงความแตกต่างระหว่างสายอากาศแบบเกลียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมวนขวา (RHP) และแบบวงกลมวนซ้าย (LHP) ทั้งสองแบบ และต้องคำนวณหาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าอัตราขยาย และค่าอัตราส่วนแกน ซึ่งจะแสดงความเป็นวงกลมของสายอากาศแบบเกลียวได้

3.4 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) จงอธิบายคำว่า การโพลาริซ์แบบวงกลม
- 2) ให้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการโพลาริซ์แบบวงรี แบบเชิงเส้น และแบบวงกลม
- 3) สายอากาศแบบเกลียวที่มีจำนวนรอบ 4 รอบนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศเพื่อรับสัญญาณที่มีการโพลาริซ์แบบเชิงเส้นได้ดีหรือไม่ จงอธิบาย
- 4) ให้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโหมคตั้งฉากกับอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบเกลียว
- 5) ราโดม (Radome) มีไว้เพื่อวัตถุประสงค์อะไร และมีผลกระทบต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศอย่างไร



หน่วยที่ 2-4

สายอากาศแถวลำดับปรสิติก (ยาเกิ-อุดา)

(Parasitic Array (Yagi-Uda) Antenna)

4.1 วัตถุประสงค์

เมื่อได้ศึกษาทฤษฎีเรื่องสายอากาศแถวลำดับปรสิติกในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาจะมีความรู้และเข้าใจคุณลักษณะและโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับปรสิติก (Parasitic Array Antennas) ชนิดยาเกิ-อุดา (Yagi-Uda) ได้เป็นอย่างดี

4.2 ทฤษฎี

สายอากาศแบบยาเกิ มีชื่อเรียกเต็มๆ ว่าสายอากาศแบบยาเกิ-อุดา ซึ่งตั้งชื่อตามชื่อของนักวิจัย S. Uda และศาสตราจารย์ H. Yagi ซึ่งเป็นผู้ค้นคว้าวิจัยและทำการทดลองเกี่ยวกับโครงสร้างของสายอากาศแบบแถวลำดับปรสิติกในประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี พ.ศ. 2463

จากหน่วยการเรียนรู้ที่ผ่านมา ได้เคยกล่าวถึงโครงสร้างของสายอากาศที่มีการพิจารณาในลักษณะหลายองค์ประกอบ (Multiple Elements) โดยแต่ละองค์ประกอบจะมีการแจกแจงของกระแสเป็นลักษณะเฉพาะของตัวเอง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศดังกล่าวจะเกิดจากการเสริมกันและหักล้างกันเองของกระแสที่กระจายอยู่ในแต่ละองค์ประกอบ

ในหน่วยที่ 5 ของบทที่ 1 ได้แสดงให้เห็นว่า การแจกแจงของกระแสนบนเส้นลวดสองเส้นที่วางอยู่ใกล้กันและขนานกัน ซึ่งประกอบขึ้นมาเป็นสายอากาศไดโพลแบบพับนั้น จะเกิดการเสริมกันของกระแสทำให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแผ่ออกไปในทิศทางที่แน่นอน ส่วนในหน่วยที่ 2 ของบทที่ 2 จะแสดงให้เห็นการแจกแจงของกระแสนสายอากาศแบบบ่วง ซึ่งมีอยู่สองส่วนที่แตกต่างกันแต่มีความยาวในแต่ละส่วนเท่ากัน ทำให้เกิดการเสริมกันและหักล้างกันของกระแสที่เกิดขึ้นบนแต่ละส่วนของเส้นลวด ทำให้เกิดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในอีกลักษณะหนึ่ง สุดท้ายคือหน่วยที่ 3 ของบทที่ 2 เป็นการศึกษาคูณลักษณะของสายอากาศแบบเกลียว โดยได้แสดงให้เห็นผลของคลื่นจร (Traveling Wave) ซึ่งเกิดการเสริมกันจากบ่วงหนึ่งไปสู่อีกบ่วงหนึ่งของเกลียว ทำให้เกิดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่มีลำคลื่นเป็นรูปดินสอ (Pencil Beam)

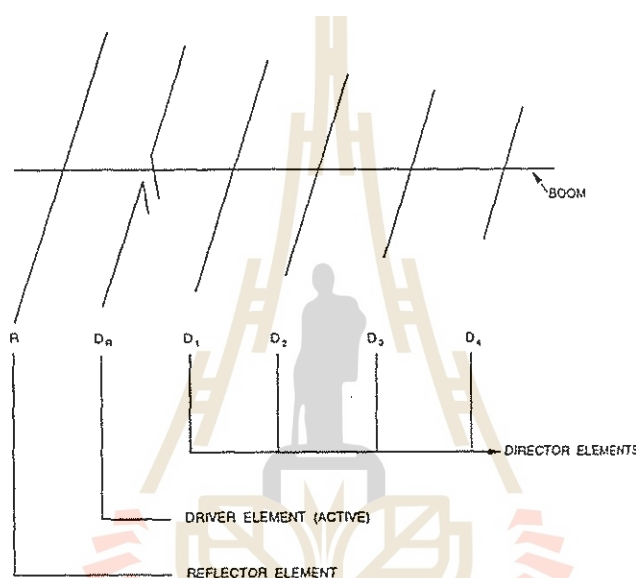
จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ คือ ตัวอย่างที่เป็นผลจากแถวลำดับของสายอากาศแบบแอคทีฟ (Active Antenna Array Effects) ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของสายอากาศที่ถูกต่อเข้ากับโครงข่ายที่มีการป้อนสัญญาณชนิดใดชนิดหนึ่ง โดยที่สายอากาศหนึ่งตัวจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลายตัววางแยกออกจากกัน ซึ่งจะเรียกลักษณะของการจัดองค์ประกอบแบบนี้ว่า แถวลำดับของสายอากาศ (Antenna Array)

การจัดองค์ประกอบของสายอากาศให้เป็นแบบแถวลำดับ อาจจะใช้องค์ประกอบของสายอากาศแบบปรสิติก (Parasitic Antenna Elements) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโลหะหรือเส้นลวด แต่ไม่ได้ถูกต่อเข้ากับโครงข่ายของการป้อนสัญญาณโดยตรง ซึ่งถ้าเป็นกรณีนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จากแถวลำดับจะพิจารณาในลักษณะของกระแสที่

ถูกเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันในรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศปรสิต องค์ประกอบเหล่านี้จะถูกกระตุ้นด้วยสนามระยะใกล้ (Near-Field) ที่มีการเชื่อมร่วม (Coupling) มาจากตัวที่ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบตัวขับ (Driven Elements)

ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศแถวลำดับที่มีลักษณะนี้ก็คือ สายอากาศที่ได้ศึกษาในหน่วยที่ 5 ของบทที่ 1 ซึ่งเป็นสายอากาศไดโพลแบบพับและนำไปติดตั้งกับเสาโลหะในแนวตั้ง ให้มีระยะห่าง $\lambda/4$ ทำให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับเสาโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเสาโลหะนี้ ถูกจัดให้เป็นองค์ประกอบปรสิตตัวหนึ่งของสายอากาศแถวลำดับเช่นกัน

4.2.1 หลักการพื้นฐานของสายอากาศแบบยาคี



รูปที่ 4.1 ลักษณะของสายอากาศแบบยาคีขนาด 6 องค์ประกอบ

สายอากาศแบบยาคีจะประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

- องค์ประกอบสายอากาศแอกทีฟ (Active Antenna Element) หรือองค์ประกอบตัวขับ (Driver) ซึ่งจะต่อเข้ากับโครงข่ายการป้อนสัญญาณ (Feed Network) องค์ประกอบตัวนี้อาจจะเป็นสายอากาศไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 4.1 หรืออาจจะเป็นสายอากาศแบบอื่นๆ เช่น สายอากาศไดโพลแบบพับหรือแบบวงก็ได้

- องค์ประกอบตัวสะท้อน (Reflector Element) จะถูกวางอยู่ที่ด้านหนึ่งขององค์ประกอบแอกทีฟโดยจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นที่แผ่กระจายออกในทิศทางด้านหลังขององค์ประกอบแอกทีฟ ให้ย้อนกลับไป ในทิศทางด้านหน้า โดยหลักการดังกล่าว เราสามารถจะเพิ่มจำนวนขององค์ประกอบตัวสะท้อนนี้ ให้มีจำนวนมากกว่าหนึ่งตัวก็ได้ โดยติดตั้งไว้ที่ด้านเดียวกันกับองค์ประกอบตัวสะท้อนตัวแรก และมีความยาวกับระยะ

ห่างระหว่างองค์ประกอบเท่าเดิม อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้น การเพิ่มจำนวนขององค์ประกอบตัวสะท้อน จะให้ผลของการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยายทำได้น้อยมาก จึงนิยมที่จะใช้เพียงองค์ประกอบเดียวเท่านั้น

- องค์ประกอบไดเรกเตอร์ (Director Elements) จะอยู่อีกด้านหนึ่งขององค์ประกอบแอกทีฟ จะช่วยทำให้สายอากาศมีการแผ่กระจายกำลังงานออกไปในทิศทางด้านหน้าได้มากขึ้น

องค์ประกอบตัวสะท้อนโดยทั่วไปแล้วจะยาวกว่าองค์ประกอบแอกทีฟประมาณ 5% ในขณะที่องค์ประกอบไดเรกเตอร์ตัวแรกจะสั้นกว่าองค์ประกอบแอกทีฟประมาณ 5% เช่นกัน ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่เหมาะสม จะจะทำให้เกิดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) มีค่าสูงสุดได้นั้น ทั้งระยะห่างระหว่างองค์ประกอบตัวสะท้อนกับองค์ประกอบแอกทีฟและระยะห่างระหว่างองค์ประกอบไดเรกเตอร์กับองค์ประกอบแอกทีฟ จะอยู่ที่ประมาณ 0.15 λ ถึง 0.25 λ

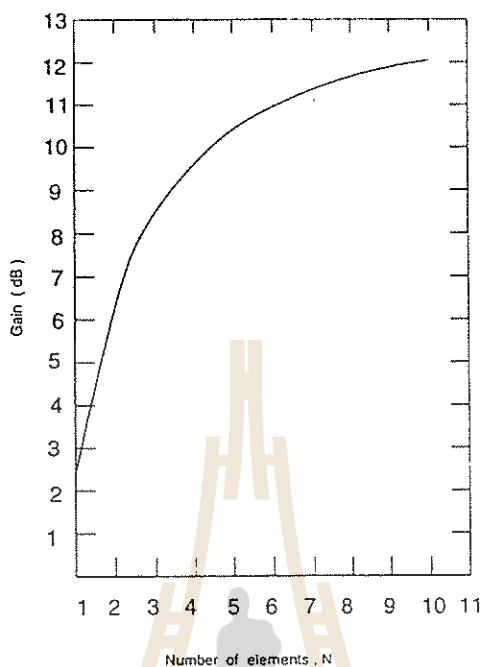
เมื่อมีองค์ประกอบไดเรกเตอร์หลายๆ ตัว ความยาวของแต่ละองค์ประกอบที่อยู่ห่างออกไปจากองค์ประกอบแอกทีฟจะมีขนาดสั้นลงและมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้น ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบตัวสะท้อนกับองค์ประกอบไดเรกเตอร์ตัวแรกจะมีความสำคัญที่สุด ในขณะที่เดียวกันต้องพิจารณาระยะห่างสำหรับองค์ประกอบไดเรกเตอร์ตัวอื่นๆ ด้วย ซึ่งจะมีผลต่อการแมตช์มากที่สุด อย่างไรก็ตามระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเหล่านี้จะต้องไม่มากจนเกินไป ผลขององค์ประกอบแอกทีฟที่มีต่อองค์ประกอบปรสิติที่อยู่ใกล้กันมากๆ ก็คือ จะเกิดการเหนี่ยวนำกระแสในองค์ประกอบเหล่านี้ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าแอมพลิจูดใกล้เคียงกันและมีเฟสตรงกันข้ามกับเฟสของสนามไฟฟ้าที่พุ่งมาตกกระทบ การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวขององค์ประกอบตัวสะท้อนและการลดความยาวขององค์ประกอบไดเรกเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวขององค์ประกอบแอกทีฟ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพเจาะจงทิศทางอย่างชัดเจน

ข้อดีของสายอากาศแถวลำดับปรสิติที่สำคัญอย่างหนึ่ง ก็คือ เมื่อมีการเพิ่มจำนวนขององค์ประกอบไดเรกเตอร์มากกว่าหนึ่งตัว จะทำให้อัตราขยายของสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าอัตราขยายนี้จะลดลงทีละน้อยเมื่อจำนวนขององค์ประกอบไดเรกเตอร์ยังมีจำนวนมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าองค์ประกอบไดเรกเตอร์ที่เป็นปรสิติที่อยู่ห่างออกไปจากองค์ประกอบแอกทีฟมากๆ จะเกิดการเหนี่ยวนำกระแสลดลง ผลที่ตามมาก็คือ จะไม่ช่วยในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศมากเท่าใดนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบยาคินี จะเป็นฟังก์ชันของค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบตัวขับ (Driven Element) แต่จะได้รับผลกระทบมาจากองค์ประกอบปรสิติด้วย จากทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับแบบไดโพล 3 องค์ประกอบ จะมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณ 25 Ω การเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์จะแปรตามโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 20 Ω ถึง 100 Ω

จากที่อธิบายมาข้างต้นจะเห็นว่า คำว่ายาคินีนั้นเป็นการบอกถึงโครงสร้างของสายอากาศชนิดหนึ่งเท่านั้นมากกว่าที่จะบอกรูปร่างหรือลักษณะเฉพาะตัวของสายอากาศ ซึ่งในทางปฏิบัติ สายอากาศยาคินีมีรูปร่างหรือลักษณะหลากหลายรูปแบบ

เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศยากด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) นั้น จะทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นในการที่จะวิเคราะห์หรือหาค่าองค์ประกอบและปัจจัยต่างๆ ให้เหมาะสม มักจะการใช้การคำนวณเชิงเลข (Numerical Method) และการจำลองสถานการณ์ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เสมอ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าอัตราขยายเมื่อเทียบกับจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศแบบยาคีทั่วไป

ตารางที่ 4.1 อัตราขยายของสายอากาศแบบยาคีที่มีจำนวนขององค์ประกอบต่างกัน (ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ 0.15λ)

จำนวนองค์ประกอบ	ค่าอัตราขยาย (dB)
3	8.7
4	9.9
5	10.5
6	11.1

การใช้วิธีเชิงเลขและการทดลองเพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศยาคีนี้ ได้กระทำกันอย่างมากมาย ซึ่งผลจากการศึกษาวิจัยและทดลองได้มีการนำเสนอเอาไว้อย่างมากมายในรายงานการวิจัย วารสาร หนังสืออ้างอิง และคู่มือต่างๆ เป็นจำนวนมาก (ดูรายชื่องานวิจัยได้จากบรรณานุกรมของหนังสือเล่มนี้)

4.3 สรุป

ในหน่วยนี้ นักศึกษาได้เรียนรู้หลักการพื้นฐานและโครงสร้างของสายอากาศขาคี-อูตะ ผู้ศึกษาได้เข้าใจถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ เช่น ค่าอัตราขยาย ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (HPBW) และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B Ratio)

4.6 คำถามหลังการทดลอง

- 1) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสายอากาศไดโพลแบบพับ แบบบ่วง แบบเกลียว และแบบขาคี-อูตะ
- 2) สายอากาศแบบขาคี ต่างจากสายอากาศที่ได้กล่าวไว้ในคำถามข้อที่ 1 อย่างไร
- 3) อธิบายวัตถุประสงค์ขององค์ประกอบแต่ละตัวของสายอากาศแบบขาคี-อูตะ
- 4) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขององค์ประกอบกับค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบขาคี
- 5) ทำไมเมื่อเพิ่มจำนวนองค์ประกอบไดเรกเตอร์ของสายอากาศขาคีให้มีจำนวนมากขึ้น แต่กลับไม่ได้ทำให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศมากขึ้นกว่าเดิมเท่าใดนัก

บทที่ 3

สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศแถวลำดับ

(Microstrip and Array Antennas)

กล่าวนำ

ทฤษฎีวิศวกรรมสายอากาศในบทสุดท้ายนี้ จะเป็นการศึกษาลักษณะของสายอากาศแถวลำดับ และเทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริปซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศแถวลำดับต่อไปได้ เช่นเดียวกัน

สายอากาศอย่างง่ายที่พบเห็นโดยทั่วไป เช่น สายอากาศไดโพล สายอากาศชนิดนี้จะมีการแจกแจงรูปของกระแสที่ทำให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าสนามเดียว ส่วนสายอากาศชนิดอื่นๆ นั้นอาจจะมีจำนวนสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นสองสนามหรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งลักษณะของสนามดังกล่าวจะเกิดการเสริมกันหรือหักล้างกันในทิศทางที่สังเกตก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายอากาศชนิดนั้นๆ ด้วย ซึ่งตัวอย่างของกรณีดังกล่าว ได้แก่ สายอากาศไดโพลแบบพับ (Folded Dipole) สายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) และสายอากาศแบบเกลียว (Helical Antenna) ซึ่งการเสริมกันหรือหักล้างกันของสนามดังกล่าวมานั้น จะมีผลโดยตรงต่อลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ

การนำสายอากาศหลายตัวมาวางเรียงกันในรูปทรงต่างๆ เราจะเรียกว่า เป็นสายอากาศแถวลำดับ (Array Antenna) ซึ่งสามารถออกแบบได้โดยอาศัยคุณลักษณะการรวมของสนามที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาทำเป็นแถวลำดับ ซึ่งสายอากาศเหล่านี้จะประกอบด้วยสายอากาศแบบพื้นฐานที่มีลักษณะเหมือนกันมาจัดวางเรียงกัน โดยมีตำแหน่งที่แน่นอนและมีการแผ่กระจายกำลังงานออกมาในแต่ละตัว อนึ่งลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ จะมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งขึ้นอยู่กับแบบการจัดเรียงแถวลำดับนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor)

ในหน่วยที่ 1 ของบทที่ 3 นี้ จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศชนิดที่เรียกว่า สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง (Slot Array Antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศพื้นฐานที่ทำจากท่อนำคลื่นในย่านความถี่ไมโครเวฟ นักศึกษาจะได้ทำความเข้าใจในเรื่องตัวประกอบแถวลำดับที่เกิดขึ้นจากสายอากาศชนิดนี้

ในหน่วยที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึงเทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริป โดยจะทำการศึกษายานอากาศไมโครสตริปชนิดแผ่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Patch Antenna) แม้ว่าสายอากาศชนิดนี้จะเป็นสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยวซึ่งไม่ได้เป็นแบบแถวลำดับ แต่เราสามารถที่จะพิจารณาให้เป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีลักษณะเป็นร่องจำนวนสองร่องได้ ซึ่งเทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริปนี้ จะมีประโยชน์อย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่าย และมีความสะดวกมากที่จะนำมาสร้างเป็นแถวลำดับ

ส่วนในหน่วยที่ 3 จะเป็นการให้ความรู้เกี่ยวกับการสร้างสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริปสองชนิด ได้แก่ แถวลำดับที่มีการป้อนสัญญาณไฟฟ้าแบบอนุกรม และแถวลำดับที่มีการป้อนสัญญาณไฟฟ้าแบบขนาน ซึ่งในหน่วยนี้ จะได้นำเสนอรายละเอียดของตัวประกอบแถวลำดับด้วย

หน่วยที่ 3-1

แถวลำดับของสายอากาศ: สายอากาศแบบร่อง

(Antenna Arrays: The Slot Antenna)

1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาทฤษฎีขั้นพื้นฐานของสายอากาศแบบแถวลำดับ ซึ่งในหน่วยนี้จะเน้นเฉพาะการศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศแบบแถวลำดับ ที่เป็นสายอากาศแบบร่องและถูกเจาะลงบนหน้าคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

1.2 ทฤษฎี

1.2.1 แถวลำดับของสายอากาศ (Antenna Arrays)

แถวลำดับของสายอากาศ (Antenna Array) หมายถึง การนำเอาสายอากาศหลายๆ ตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกว่า องค์ประกอบ (Element) ซึ่งการนำเอาองค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ จะให้สมรรถนะคล้ายคลึงกับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก แต่การจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นจะสามารถขจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆ อันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่เทอะทะของสายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ โดยการใช้สายอากาศที่มีลักษณะเหมือนกันหลายๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้ การเปลี่ยนเฟสอย่างต่อเนื่องของสายอากาศเมื่อเทียบกับเวลาจะทำให้สายอากาศสามารถกวาดลำคลื่นออกไปในทิศทางต่างๆ ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกแถวลำดับแบบนี้ว่า แถวลำดับแบบปรับเฟส (Phased Array)

แถวลำดับแบบปรับเฟส ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายๆ ประเภท โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้ในงานระบบเรดาร์ การปรับเฟสของแถวลำดับจะใช้วิธีการปรับเฟสโดยอาศัยวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์อีกระดับหนึ่ง เพื่อปรับเฟสให้มีผลทำให้ทิศทางการแผ่กระจายกำลังงานสามารถกวาดไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว

เราสามารถแบ่งการจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับตามรูปร่าง ได้หลายประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ประเภทต่อไปก็คือ แถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปร่าง

กลมก็ได้โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีอยู่ เมื่อพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเรียงแถวลำดับมีลักษณะไม่แบนราบ เช่น ที่ส่วนหัวของจรวดหรือเครื่องบิน การจัดเรียงแถวลำดับก็จะต้องมีรูปร่างเป็นไปตามลักษณะของพื้นที่ดังกล่าวด้วย แถวลำดับแบบนี้จะถูกเรียกว่า แถวลำดับแบบคงรูป (Conformal Array)

ถ้าทิศทางของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดมีทิศทางตั้งฉากหรือเกือบจะตั้งฉากกับเส้นหรือระนาบของแถวลำดับ แถวลำดับแบบนี้จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แถวลำดับแบบบรอดไซด์ (Broadside Array) แต่ถ้าทิศทางในการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดมีทิศทางที่ขนานกับระนาบของแถวลำดับ จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (End-fire Array)

1.2.2 ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor)

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่แตกต่างกันบางตัวประกอบ ได้แก่ ชนิดขององค์ประกอบที่ใช้ และการวางตัวขององค์ประกอบในแถวลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นส่วนเฉพาะขององค์ประกอบ ดังนั้นจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบเท่านั้น ตัวประกอบตัวอื่นๆ จะเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแถวลำดับนั้นคือ จำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ตำแหน่งขององค์ประกอบ รวมทั้งขนาดแอมพลิจูดและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบนั้นๆ

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาในทางทฤษฎีของแถวลำดับที่กำหนดในเบื้องต้น เราจะไม่พิจารณาผลของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบ เนื่องจากต้องการพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของแถวลำดับเท่านั้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการพิจารณาให้แต่ละองค์ประกอบที่นำมาทำเป็นแถวลำดับเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) ที่เป็นมีลักษณะจุด ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแถวลำดับที่มีองค์ประกอบเป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุดแบบไอโซทรอปิก จะเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ของแถวลำดับภายใต้การวิเคราะห์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบแถวลำดับซึ่งมีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสามารถทำได้เพียงแค่การเปลี่ยนรูปร่างหรือลักษณะของแถวลำดับเท่านั้น

เมื่อหาค่าตัวประกอบแถวลำดับได้แล้ว ต่อไปจะพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบ จากนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งหมดของแถวลำดับจะสามารถทำได้โดยใช้หลักการคูณแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Pattern Multiplication) ซึ่งเป็นการคูณกันระหว่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของแต่ละองค์ประกอบกับตัวประกอบแถวลำดับ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราพิจารณาสายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่นซึ่งประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ $\lambda/2$ และมีการแผ่กระจายกำลังงานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งหมดจะเท่ากับ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่นที่ประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง	=	แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของแต่ละองค์ประกอบ	×	ตัวประกอบแถวลำดับสำหรับ 6 องค์ประกอบที่วางห่างกัน $\lambda/2$ และมีการแผ่กระจายกำลังงานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน
---	---	--	---	---

ตัวประกอบแอมพลิจูดในกรณีนี้จะเป็นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก 6 ตัว ซึ่งวางห่างกัน $\lambda/2$ และแผ่กระจายคลื่นด้วยขนาดและเฟสเท่ากัน

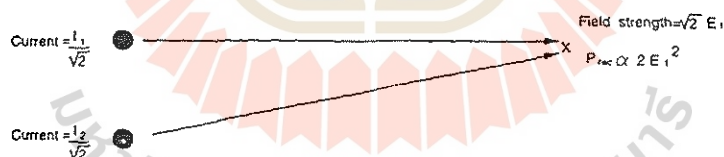
1.2.3 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแอมพลิจูด (Gain of Array Antennas)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแอมพลิจูด มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับจุดนั้นๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากทิศทางอื่นๆ

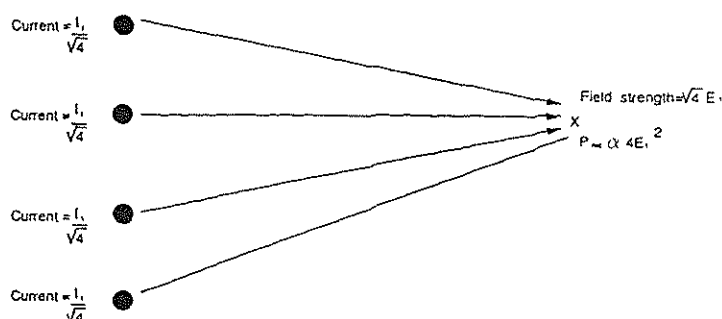
เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแอมพลิจูด ในเบื้องต้นจะพิจารณาองค์ประกอบเดี่ยวของสายอากาศไอโซทรอปิกซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงาน P_t ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศนี้มีค่า I_1 ณ จุดที่ไกลออกไปกำหนดให้เป็นจุด X ค่ากระแสนี้จะสร้างความเข้มของสนาม (ศักดาไฟฟ้า) เป็น E , ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศ



รูปที่ 1.1 สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีการส่งกำลังงาน P_t



รูปที่ 1.2 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_t



รูปที่ 1.3 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_t

ค่ากำลังงานที่รับได้โดยสายอากาศที่จุด X จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มสนามทั้งหมด E_T ที่จุดนั้น กล่าวคือ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = E_1^2 \quad (1.1)$$

ต่อไปจะแทนองค์ประกอบเดี่ยวด้วยสายอากาศชนิดแถวลำดับ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไอโซทรอปิกที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 องค์ประกอบ และมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงานที่เท่ากันทั้งหมดคือ P_I ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ค่ากำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $P_I/2$ แต่เนื่องจากค่าของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของกำลังงาน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจึงเท่ากับ $I_1/\sqrt{2}$

ความเข้มของสนามที่จุด X ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบนั้น ดังนั้นความเข้มของสนามที่จุด X จากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $E_1/\sqrt{2}$ และถ้าคลื่นจากทั้งสององค์ประกอบมาถึงที่จุด X โดยมีเฟสตรงกันอย่างสมบูรณ์ ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่จุด X จะเป็นผลรวมของความเข้มของสนามดังนี้

$$E_T = \frac{2E_1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}E_1 \quad (1.2)$$

กำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{2}E_1)^2 = 2E_1^2 \quad (1.3)$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสมการ (1.1) และสมการ (1.3) จะเห็นว่ากำลังสองของค่าความเข้มของสนามทั้งหมด (E_T^2) ที่จุด X จะมีค่าเป็นสองเท่า ด้วยเหตุผลนี้สามารถแสดงได้ว่าค่ากำลังงานที่รับได้ที่จุด X ก็จะมีค่าเป็นสองเท่า ดังนั้นเมื่อใช้แถวลำดับที่มีองค์ประกอบสององค์ประกอบแทนองค์ประกอบเดี่ยวจะทำให้ได้ค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานมีค่าเป็นสองเท่า

สมมติว่าเราเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นสองเท่าดังแสดงในรูปที่ 1.3 ก็จะได้แถวลำดับที่มีขนาด 4 องค์ประกอบ ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่กระจายกำลังงานทั้งหมดเป็น P_I กระแสในแต่ละองค์ประกอบจะมีค่าเป็น $I_1/\sqrt{4}$ ดังนั้นความเข้มของสนามที่ถูกสร้างขึ้นจากแต่ละองค์ประกอบที่จุด X จึงกลายเป็น $E_1/\sqrt{4}$

ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่เกิดจากแถวลำดับซึ่งประกอบด้วย 4 องค์ประกอบจะเท่ากับ

$$E_T = \frac{4E_1}{\sqrt{4}} = \sqrt{4}E_1 \quad (1.4)$$

และกำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะมีค่าเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{4}E_1)^2 = 4E_1^2 \quad (1.5)$$

ดังนั้นค่าของ E_z^2 และค่ากำลังงานที่รับได้ทั้งหมดก็จึงมีค่าเป็นสองเท่า

ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดในตัวอย่างจะถูกพิจารณาภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของสายอากาศทุกตัวจะต้องมีลักษณะเหมือนกันและมีกระแสเท่ากัน
2. สนามที่แผ่กระจายออกจากองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมดจะต้องมีเฟสตรงกันที่จุดรับ
3. กระแสที่เหนี่ยวนำในแต่ละองค์ประกอบจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

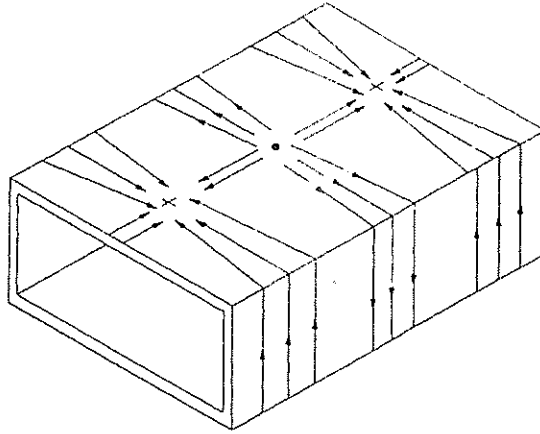
เงื่อนไขที่สองจะเป็นจริงได้ถ้าเฟสของกระแสแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน และจุดสังเกต X ซ้ำไปในทิศทางที่ตั้งฉากโดยตรงกับสายอากาศแถวลำดับ และให้สมมุติว่าที่สนามระยะไกลซึ่งมีระยะห่างจากจุด X ของทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน ส่วนเงื่อนไขที่สามจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นสำคัญ

สำหรับสายอากาศแถวลำดับในทางปฏิบัติ เงื่อนไขเหล่านี้จะเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น แม้ว่าการสูญเสียซึ่งเกิดจากการป้อนสัญญาณและจากตัวประกอบอื่นๆ จะมีส่วนในการจำกัดการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยาย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเหล่านี้จะดีขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพบว่าค่าอัตราขยายของแถวลำดับจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (เพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB) ทุกๆ ครั้งที่จำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบถูกกำหนดไว้ให้คงที่

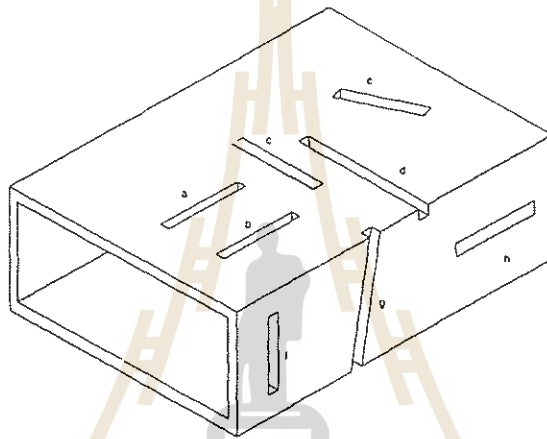
1.3 สายอากาศแบบร่อง (The Slot Antenna)

อีกวิธีการหนึ่งในการสร้างแถวลำดับก็คือ โดยการตัดร่องแบบอนุกรมบนท่อนำคลื่นซึ่งจะเรียกว่า สายอากาศแบบร่อง (Slot Antenna) หรือสายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่น (Slotted Waveguide Antenna) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานในหลายๆแบบ เช่น ในเรดาร์ และการสื่อสาร ไมโครเวฟ เพราะว่าสายอากาศชนิดนี้มีข้อดีที่น้ำหนักเบาและมีขนาดเล็ก

ร่องที่เจาะบนผนังของท่อนำคลื่น โดยปกติจะไปขัดขวางการไหลของการกระแสนผนังของท่อนำคลื่นและเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะแผ่กระจายเป็นคลื่นความถี่วิทยุต่อไป ขนาดและเฟสของกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปนั้น สามารถหาได้จากขนาดมิติของท่อนำคลื่น และการจัดเรียงตำแหน่งของร่อง ดังรูปที่ 1.4 แสดงถึงการไหลของกระแสที่ผนังของท่อนำคลื่น ส่วนรูปที่ 1.5 แสดงลักษณะที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตำแหน่งของร่อง ซึ่งตำแหน่งของร่องที่มีการใช้งานมากที่สุด คือร่อง b (ร่องที่เจาะบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นและมีระยะห่างจากกึ่งกลางของท่อนำคลื่น) ร่อง e (เป็นร่องที่เจาะเฉียงบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น) และร่อง g (เป็นร่องที่เจาะเฉียงบนผนังด้านแคบของท่อนำคลื่น)



รูปที่ 1.4 การไหลของกระแสบนผนังท่อนำคลื่น



รูปที่ 1.5 ร่องบนผนังท่อนำคลื่น

จากรูปที่ 1.4 และ 1.5 จะเห็นว่าร่อง c , d และ e จะถือว่าเป็นร่องที่วางในแนวอนุกรมในท่อนำคลื่น เพราะว่าร่องเหล่านี้จะไปตัดกับกระแสในแนวยาวของผนังท่อนำคลื่น ส่วนร่อง b , g และ h จะไปตัดกับกระแสในแนวขวางซึ่งขนานกับผนังท่อนำคลื่น และร่อง a และ f จะไม่มีการตัดกับกระแส ดังนั้นจึงไม่มีการแผ่กระจายกำลังงานออกมา และถ้าความยาวของร่องมีขนาดใกล้เคียงกับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น (โดยทั่วไปประมาณ $0.47\lambda_g$ โดยที่ λ_g เป็นความยาวคลื่นของคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่น) ร่องดังกล่าวจะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ (Resonant) และให้ผลลัพธ์เหมือนกับการแผ่กระจายกำลังงานออกจากสายอากาศชนิดเส้นลวดที่ยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยร่องโดยทั่วไปจะมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งเราจะถือว่าทิศทางของสนามไฟฟ้าจะมีเฉพาะในทิศทางตลอดทางด้านกว้างของร่องเท่านั้น

แถวลำดับที่มีองค์ประกอบวางห่างกัน $\lambda_g/2$ จะเรียกว่า แถวลำดับเรโซแนนซ์ (Resonant Arrays) เนื่องจากระยะห่างที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น แถวลำดับเรโซแนนซ์จะมีความกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานแคบมาก ซึ่งแถวลำดับเรโซแนนซ์นี้จะมีลักษณะที่ไม่เกี่ยวข้องกับร่องที่เรโซแนนซ์แต่ประการใด เป็นเนื่องจากในทางปฏิบัติร่องที่ใช้งานจริงจะเป็นร่องที่เรโซแนนซ์เท่านั้น

ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ก็คือ สายอากาศแบบร่องมักจะถูกลัดวงจรที่ปลายด้านหนึ่งด้วยการปิดด้วยแผ่นตัวนำ หรืออาจจะถูกต่อด้วยโหลดที่ออกแบบมาให้สร้างคลื่นนิ่งที่มีกระแสสูงสุดที่แต่ละร่อง ซึ่งการกระทำดังกล่าวนี้ จะทำให้เกิดค่าการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดออกมาจากร่อง

สายอากาศแบบร่องที่ใช้ในการปฏิบัติการจะเป็นชนิดที่เรียกว่า แถวลำดับแบบคลื่นนิ่ง (Standing Wave Array) ซึ่งหมายความว่า เป็นแถวลำดับที่ถูกปิดปลายท่อนำคลื่นด้วยการลัดวงจร เพื่อให้ได้เงื่อนไขการแผ่กระจายกำลังงานที่ดีที่สุด การลัดวงจรต้องกระทำที่ระยะ $d = \lambda_g / 4 + n\lambda_g / 2$ โดยที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz จะมี $\lambda_g = 3.6455$ ซม. ซึ่งความยาวคลื่นของคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมได้ถูกกำหนดโดยสมการ

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_c - f)^2}} \quad (1.6)$$

โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่นของคลื่นในช่องว่างอิสระ

f เป็นความถี่ของสัญญาณ

f_c เป็นความถี่คัตออฟของท่อนำคลื่น (สำหรับท่อนำคลื่นชนิด WR-90, $f_c = 6.557$ GHz)

1.4 สรุป

จากที่ศึกษาผ่านมาทั้งหมดในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาจะเข้าใจ โครงสร้างและคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศชนิดร่องแถวลำดับ ได้เรียนรู้เกี่ยวกับตำแหน่งของจุดลัดวงจรของสายอากาศชนิดร่องแถวลำดับแบบคลื่นนิ่ง ค่าอัตราขยายของสายอากาศชนิดนี้ และเกิดความเข้าใจในหน้าที่การทำงานของสายอากาศแถวลำดับให้มากขึ้น

1.7 คำถามหลังปฏิบัติการ

- 1) จงอธิบายความหมายขององค์ประกอบแถวลำดับมาพอสังเขป
- 2) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศสามารถคำนวณหาได้อย่างไร
- 3) ถ้าเราต้องการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับที่ประกอบด้วย 6 องค์ประกอบขึ้นไปอีกประมาณ 6 dB นักศึกษาจะต้องเพิ่มจำนวนองค์ประกอบเข้าไปอีกเป็นจำนวนเท่าไร
- 4) จงอธิบายการทำงานของสายอากาศแบบร่องของสายอากาศมาโดยย่อ
- 5) จากทฤษฎีจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของร่องควรอยู่ที่บริเวณใด จึงจะทำให้เกิดการแผ่กระจายกำลังงานมากที่สุด

หน่วยที่ 3-2

เทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริป: สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

(Microstrip Technology: The Rectangular Patch Antenna)

2.1 วัตถุประสงค์

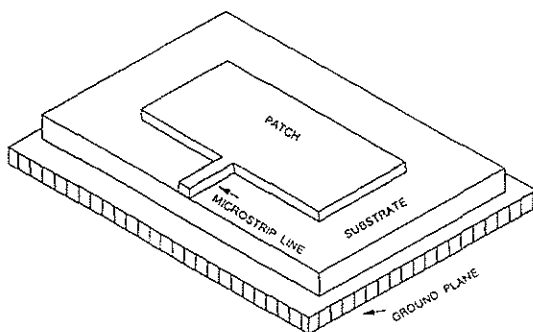
สำหรับเนื้อหาในหน่วยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้ผู้ศึกษาได้เข้าใจคุณสมบัติของสายอากาศแบบแพทช์และเทคโนโลยีของไมโครสตริปที่จะใช้ในการนำมาสร้างสายอากาศแบบแพทช์

2.2 ทฤษฎี

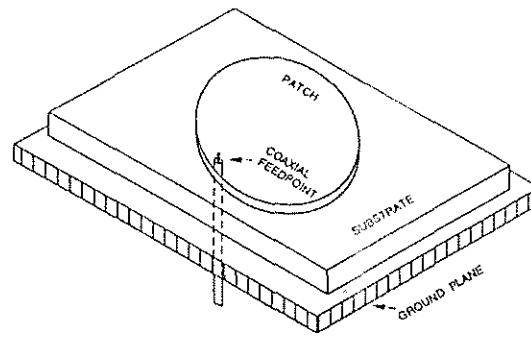
2.2.1 เทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna Technology)

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เราเรียกว่าแพทช์ (Patch) ซึ่งเป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระบายกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าเป็นซับสเตรท (Substrate) ของสารไดอิเล็กตริก ไมโครสตริปได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งาน เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ค้ำค่อม และสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ นอกจากนี้ยังมีข้อดีในแง่ที่ราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง แต่ขณะเดียวกันการออกแบบก็มีความยุ่งยากเช่นกัน

รูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 แสดงสายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปวงกลม ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed-Circuit Board) โดยที่แพทช์จะถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยสัญญาณความถี่วิทยุจะถูกป้อนเข้าที่สายป้อนสัญญาณที่เป็นสตริปโลหะแคบๆ ในรูปที่ 2.2 แสดงแพทช์รูปวงกลมที่ป้อนด้วยตัวนำผ่านช่องในระนาบกราวด์ ซึ่งการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้จะเรียกว่าการเชื่อมต่อแบบช่องเปิด (Aperture Coupling) ผ่านช่องเปิดเล็กๆ ในระนาบกราวด์

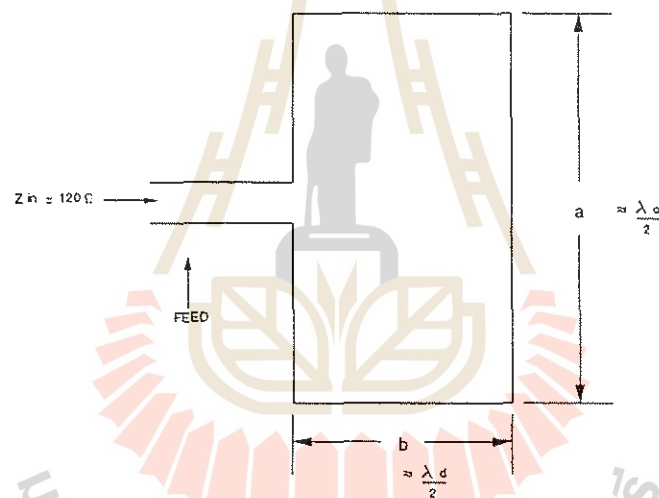


รูปที่ 2.1 แพทช์ของไมโครสตริปที่ป้อนผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป



รูปที่ 2.2 สายอากาศไมโครสตริปรูปวงกลมที่มีการป้อนกระแส
ผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นสเตรทถือว่ามีความสำคัญมากเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าคงที่ของการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 2.3 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

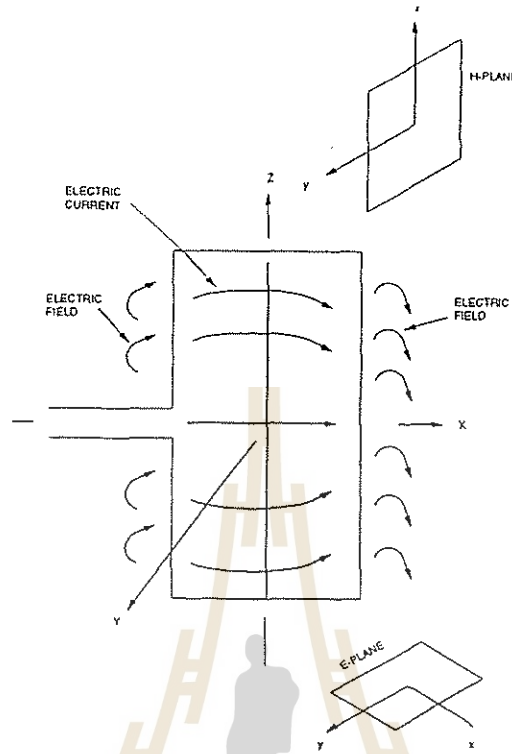
2.2.2 คุณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Characteristics of a Rectangular Patch)

รูปที่ 2.3 แสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปซึ่งเป็นแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยค่าความนำของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง a โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว b ซึ่งความยาว b จะถูกกำหนดโดย

$$b = 0.49\lambda_d = 0.49\frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

โดยที่ λ_d, λ_0 คือ ความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริกและในอากาศอิสระ ตามลำดับ
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ของชั้นสเตรท

เนื่องจากการแปรผันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความนำของตัวป้อนสัญญาณ การทดสอบเพื่อหาความยาวที่แท้จริงของแพทช์จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 2.4 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์

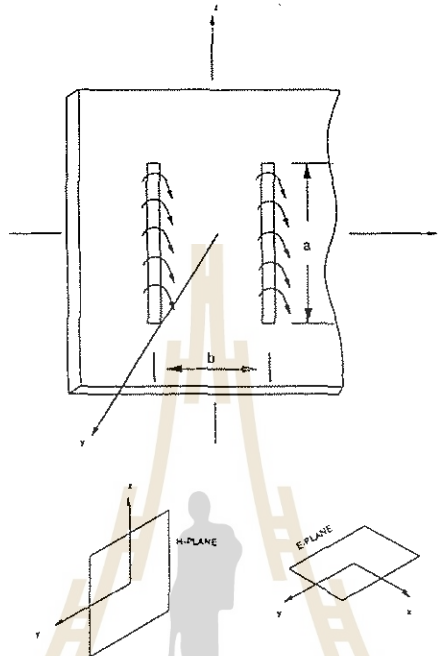
ในรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงของสนามไฟฟ้าภายในและบริเวณรอบๆ แพทช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพทช์ที่ถูกต้องด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ คลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 2.4 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (ระนาบ x-y) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (ระนาบ y-z) จะมีทิศทางในแนวตั้ง

ระยะห่าง b ซึ่งเป็นระยะของขอบทั้งสองด้านของแพทช์จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่เดินทางภายในสารไดอิเล็กตริก ($0.49\lambda_d$) ซึ่งที่ระยะห่างขนาดนี้จะมีผลทำให้ร่องที่อยู่ตรงข้ามมีการป้อนด้วยเฟสที่ตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากองค์ประกอบทั้งสองจะมีการเสริมกันเนื่องจากเฟสตรงกัน ทำให้ทิศทางการแผ่กระจายคลื่นออกมาในทิศตั้งฉากกับองค์ประกอบ (มีทิศทางบรอดไซด์ ในทิศทาง y)

2.2.3 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องสองร่องบนท่อนำคลื่น

(Radiation Pattern for an Array of Two Waveguide Slots)

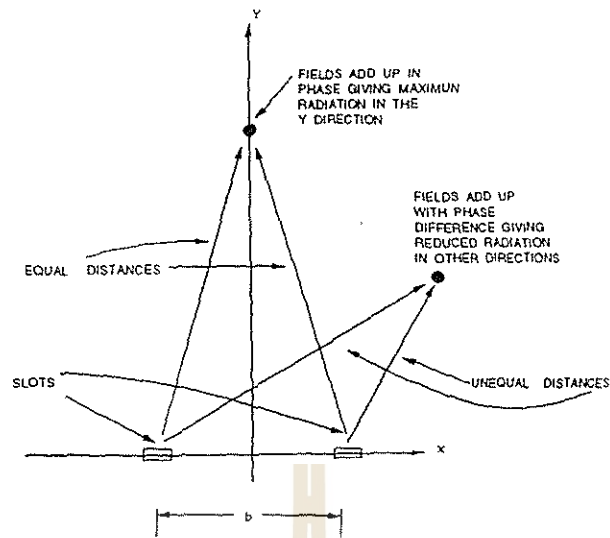
มีวิธีที่จะช่วยในการคำนวณคุณลักษณะของสายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากได้อย่างถูกต้องสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสายอากาศแพทช์จากรูปที่ 2.3 กับสายอากาศแบบร่องสองร่องบนท่อนำคลื่นในรูปที่ 2.5



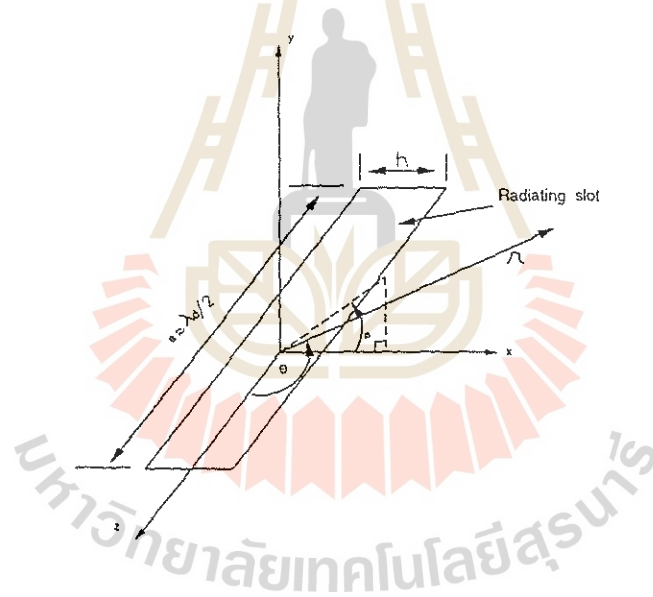
รูปที่ 2.5 ร่องสองร่องที่ขนานกันบนท่อนำคลื่น

เนื่องจากสายอากาศแบบร่องสองร่องบนท่อนำคลื่นในรูปที่ 2.5 จะมีลักษณะที่สมมูลกับสายอากาศแพทช์ในรูปที่ 2.3 ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของทั้งสองจึงมีลักษณะเหมือนกัน

เพื่อความเข้าใจในแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดร่องสองร่องบนท่อนำคลื่นที่มีระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ b และสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายมาจากร่องทั้งสองนั้นจะมีเฟสตรงกัน ลักษณะการกระจายของสนามได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ณ ที่จุดใดๆ บนแกน y ระยะทางจากแต่ละร่องจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสนามจากร่องทั้งสองจะมีการเสริมกันที่บริเวณสนามระยะไกลเพราะมีเฟสตรงกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายคลื่นสูงสุด ส่วนในทิศทางอื่นๆ ระยะจากร่องทั้งสองจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นสนามจะไม่เสริมกันอย่างสมบูรณ์เพราะเฟสจะไม่ตรงกันพอดี ด้วยเหตุนี้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจึงมีลำคลื่นหลักที่มีค่าสูงสุดในทิศทางตามแนวแกน y



รูปที่ 2.6 ลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระยะไกล
ในระนาบสนามไฟฟ้าจากแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก



รูปที่ 2.7 โครงร่างที่ใช้ในการคำนวณแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ
สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของร่องที่แผ่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.7 เป็นการแสดงโครงร่างแบบสามมิติของร่องเดี่ยวโดยมุม ψ และ θ สำหรับใช้ในการพิจารณาให้เป็นจุดอ้างอิงในการเขียนสมการ มิติของ a และ b ในสมการ (2.2) และ (2.3) จะสอดคล้องกับความกว้าง a และความยาว b ของสายอากาศแพทช์ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.3 ความกว้างของร่อง h ในรูปที่ 2.7 จะสอดคล้องกับความหนาของชั้นสเตรทที่เป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างแพทช์จากแผ่นระนาบกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในรูปของสนามไฟฟ้าสำหรับร่องสองร่อง ซึ่งมีการป้อนด้วยกระแสที่มีเฟสตรงกันและมีแอมพลิจูดเท่ากัน จะสามารถกำหนดได้ด้วยสมการ

$$F_{patch}(\phi) = \frac{\sin\left(\frac{\beta h}{2} \cos \phi\right)}{\frac{\beta h}{2} \cos \phi} \cos\left(\frac{\beta b}{2} \cos \phi\right) \quad (2.2)$$

โดยที่ h คือ ความกว้างของร่อง (ซึ่งมีค่าเท่ากับความหนาของสารฉาบสเตรทที่เป็นไดอิเล็กตริกของสายอากาศแพทช์ที่สมมูลกัน)

b คือ ระยะห่างระหว่างร่องสองร่อง (มีค่าเท่ากับความยาวของสายอากาศแพทช์)

$$\text{และ } \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กได้ถูกกำหนดโดย

$$F_{patch}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\beta a}{2} \cos \theta\right)}{\frac{\beta a}{2} \cos \theta} \sin \theta \quad (2.3)$$

โดย a เป็นความยาวของร่อง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.8

2.2.4 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna Impedance)

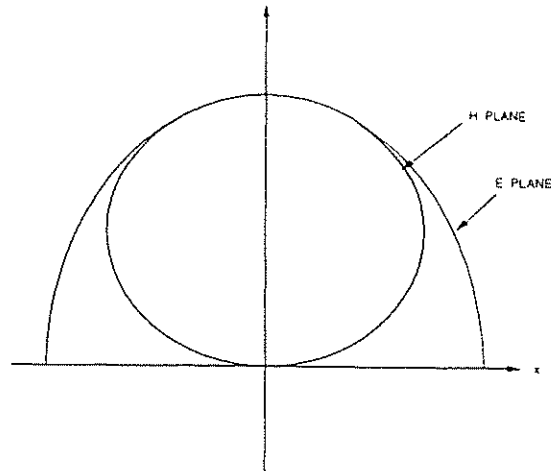
อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบร่องสองร่อง และของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากยาว $\lambda/2$ จะถูกแสดงในรูปของค่าความต้านทานที่มีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นที่ดี โดยที่ค่าความต้านทานที่อินพุต สามารถประมาณค่าได้ด้วยสมการ

$$R_{in} = \frac{60/\lambda_0}{a} = \frac{60/\lambda_0}{\lambda_0/2} = 120\Omega \quad (2.4)$$

โดยที่ a เป็นความยาวของร่อง

λ_0 เป็นความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ

ในทางอุดมคติค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพทช์จะมีค่าประมาณ 120Ω ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปหรือของสายโคแอกเซียลที่นำมาต่อก็ควรจะมีค่า 120Ω ด้วย อย่างไรก็ตามในการที่จะต่อสายโคแอกเซียล 50Ω เข้ากับเครื่องมือวัดและทดสอบสายอากาศ จำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50Ω ด้วย

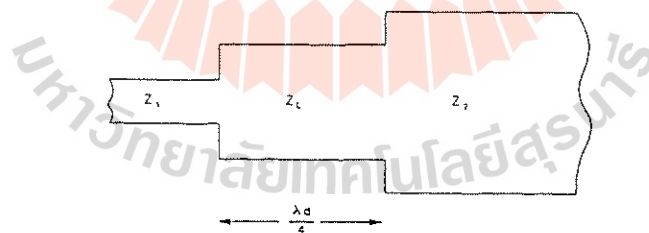


รูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทางทฤษฎี
ของร่องสองร่องที่ถูกป้อนด้วยกระแสที่มีเฟสตรงกันและแอมพลิจูดเท่ากัน
($b = \lambda_d/2$ โดยที่ $\lambda_d < \lambda$)

เพื่อที่จะแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป 50 Ω กับสายอากาศแพทช์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 120 Ω จำเป็นต้องใช้เส้นสตริปที่มีความยาว $\lambda/4$ ของความยาวคลื่น เทคนิคต่างๆที่จะทำการแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่แคบๆ สามารถทำได้โดยใช้สมการซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Z_1 และ Z_2 และอิมพีแดนซ์ Z_L ของเส้นสตริปที่ยาว $1/4$ ของความยาวคลื่น นั่นคือ

$$Z_L = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (2.5)$$

$$Z_L = \sqrt{Z_1 Z_2}$$

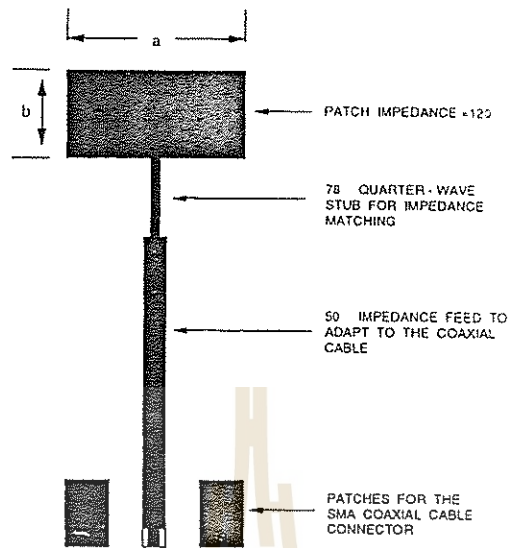


รูปที่ 2.9 เส้นสตริปที่ยาว $1/4$ ของความยาวคลื่นสำหรับแปลงอิมพีแดนซ์ Z_L
เพื่อไปแมตซ์กับ Z_1 และ Z_2

ถ้า Z_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียลหรือสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งมีค่า 50 Ω และถ้า Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีค่า 120 Ω ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีความยาว $1/4$ เท่าของความยาวคลื่นที่ใช้ต่อระหว่างสายนำสัญญาณ แบบไมโครสตริปและแพทช์จะมีค่าเท่ากับ

$$Z_L = \sqrt{Z_1 Z_2} = \sqrt{(50)(120)} = 78 \Omega \quad (2.6)$$

ในรูปที่ 2.10 เป็นการแสดงลักษณะของสายอากาศแพทช์เดี่ยวที่ใช้ในปฏิบัติการ รวมทั้งเส้นสตริปที่มีความยาว $1/4$ เท่าของความยาวคลื่นและมีอิมพีแดนซ์เป็น 78Ω



รูปที่ 2.10 สายอากาศแพทช์เดี่ยวที่ใช้ในปฏิบัติการ

2.2.5 สารไดอิเล็กตริกที่ใช้เพิ่มความแข็งแรงและป้องกันไม่ให้สายอากาศเสียหาย

(Dielectric Materials used for Antenna Protection and Strengthening)

ในบางครั้งเรามีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความแข็งแรงและป้องกันความเสียหายให้สายอากาศ ซึ่งความต้องการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของสายอากาศ รวมทั้งความต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน มีวัสดุหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยมีราโดม (Radome) ซึ่งเป็นตัวอย่างหนึ่งที่ใช้ในวัตถุประสงค์นี้ โดยทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานสูง ในขณะที่ด้วยกันต้องยอมให้สัญญาณความถี่วิทยุผ่านไปได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย

ในบางสถานการณ์ ความโปร่งใสของวัสดุก็ถือว่ามีความจำเป็นต่อการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย เช่น สไตรโฟฟัม (Styrofoam) ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับเพิ่มความแข็งแรงให้กับสายอากาศชนิดเกลียวที่ความถี่สูง (~10 GHz) เพราะพบว่าสัญญาณย่านความถี่วิทยุสามารถผ่านได้ดี

ในการเลือกวัสดุที่ใช้สำหรับเพิ่มความแข็งแรงและใช้ในการป้องกันความเสียหายของสายอากาศ สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือ ค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริกของวัสดุและค่าการสูญเสียสัมผัส (Loss Tangent) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่และความหนาแน่นของสารไดอิเล็กตริก การเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอและให้ประสิทธิภาพสูงสุด ตารางที่ 2.1 จึงได้แสดงชนิดของวัสดุต่างๆ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของมัน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบต่อไป

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ (ที่ความถี่ 10 GHz)

Material	Dielectric constant
Porcelain	4.74
E glass	6.11
Water (room temperature)	80
Styrofoam 103.7	1.03
Bakelite	3.52
Duroid 5650	2.65
Epoxy resin RN-48	2.91
Fiberglass, laminated BK-174	4.37
Lexan	2.86
Plexiglass	2.59
Teflon	2.08

ในบางกรณีการสะท้อนกลับของคลื่นจะมีผลกับวัสดุที่ใช้ในการป้องกันความแข็งแรงด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างวัสดุที่ใช้เสริมความแข็งแรงและป้องกันการสะท้อนกลับของสายอากาศที่เกิดขึ้นว่า สัญญาณที่รับได้จะหักล้างกันเพียงบางส่วนหรือมีการเสริมกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับเฟสสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้ และสัญญาณที่สะท้อนกลับ

2.3 สรุป

ในหน่วยการเรียนรู้นี้ ผู้ศึกษาได้เข้าใจและรับทราบถึงเทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริป ได้ศึกษาคุณลักษณะที่สำคัญต่างๆ ของสายอากาศชนิดนี้ เข้าใจผลกระทบจากขนาดของแพทช์ที่มีต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และสุดท้ายได้ศึกษาผลกระทบของราโดมที่มีต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.6 คำถามหลังการเรียนรู้

- 1) พารามิเตอร์อะไรบ้างที่มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป
- 2) ลักษณะที่คล้ายคลึงกันแบบใดที่ใช้ในการคำนวณหาคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปที่เป็นแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก
- 3) จงอธิบายโหมดการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก
- 4) จะทำอย่างไร จึงจะสามารถเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีอิมพีแดนซ์ 120 โอห์ม เข้ากับสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์ 72 โอห์ม
- 5) จงอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่รับได้ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศและราโดมที่เป็นแผ่นกระจกเพ็กซ์ซี่

หน่วยที่ 3-3

สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบไมโครสตริป

(Microstrip Planar Array Antennas)

3.1 วัตถุประสงค์

ในหน่วยสุดท้ายนี้ ต้องการให้ผู้ศึกษาได้ศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศแบบแถวลำดับแบบระนาบ ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีของสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) ผู้ศึกษาจะได้เข้าใจถึงหลักการในการสร้างแถวลำดับของสายอากาศ ผลของตัวประกอบแถวลำดับที่เกิดจากองค์ประกอบแต่ละตัวและการป้อนแหล่งกำเนิดที่มีแอมพลิจูดแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบเชิงขั้ว (Polar Radiation Pattern) นอกจากนี้จะได้ศึกษาคุณลักษณะของการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ทั้งวิธีการป้อนสัญญาณแบบขนานและการป้อนสัญญาณแบบอนุกรม

3.2 ทฤษฎี

จากหน่วยที่ 1 ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแนวความคิดทางทฤษฎีของตัวประกอบแถวลำดับ ซึ่งตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) นี้ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นโดยรวมของสายอากาศอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อกำหนดรูปร่างของแถวลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นโดยรวมของสายอากาศสามารถหาได้จากหลักการคูณแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งได้จากผลคูณระหว่างแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นขององค์ประกอบเดี่ยวและตัวประกอบแถวลำดับ

ในหน่วยที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Microstrip Antenna) กับสายอากาศแบบท่อนำคลื่นที่ประกอบด้วยร่อง 2 ร่อง (Two-Slot Waveguide Antenna) เนื่องจากสายอากาศทั้งสองมีลักษณะเป็นคู่สมมูลย์กัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจึงเหมือนกัน

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าสำหรับร่องทั้งสองร่องที่ป้อนด้วยแหล่งกำเนิดที่มีเฟสเดียวกันและแอมพลิจูดที่เท่ากันจะมีค่าเท่ากับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของร่องเดี่ยวคูณกับตัวประกอบแถวลำดับสำหรับสององค์ประกอบ ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้คือ

$$F_{\text{patch}}(\phi) = \underbrace{\frac{\sin\left(\frac{\beta h}{2} \cos \phi\right)}{\frac{\beta h}{2} \cos \phi}}_{E\text{-plane radiation array factor}} \underbrace{\cos\left(\frac{\beta h}{2} \cos \phi\right)}_{\text{Pattern of one slot}} \quad (3.1)$$

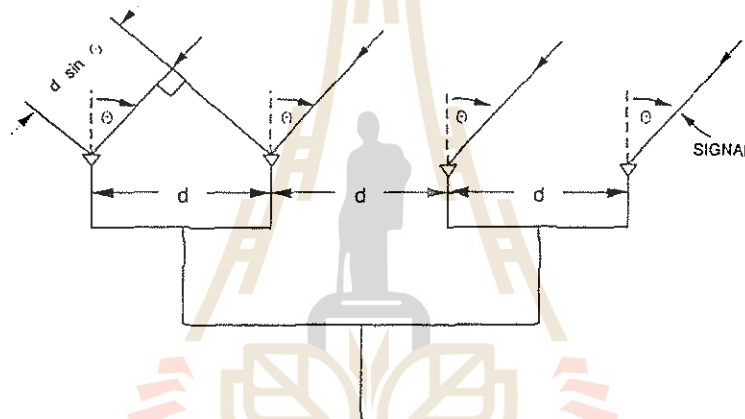
โดยที่ h คือ ความกว้างของร่อง (จะเท่ากับความหนาของสารขับเคลื่อนที่เป็น ไดอิเล็กทริกของสายอากาศแบบแผ่นที่สมมูลกัน)

b คือ ระยะห่างระหว่างร่อง

$$\text{และ } \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

3. 2.1 ตัวประกอบแถวลำดับ (The Array Factor)

เพื่อทำความเข้าใจในการคำนวณตัวประกอบของแถวลำดับให้มากขึ้น เราจะพิจารณาในกรณีของแถวลำดับเชิงเส้นที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ d ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสัญญาณที่รับได้จะเป็นสนามระยะไกลและชี้ในทิศทางบรอดไซด์ (Broadside; $\theta = 0$) และระยะห่างระหว่างองค์ประกอบไปยังแหล่งกำเนิดถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจะเสริมกันเมื่อมีเฟสเหมือนกัน



รูปที่ 3.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ

ในรูปที่ 3.1 เมื่อ θ มีค่ามากกว่าศูนย์ ระยะห่างจะไม่เท่ากัน ซึ่งองค์ประกอบขวามือจะมีระยะมากกว่าองค์ประกอบซ้ายมือที่อยู่ติดกันเป็นระยะ $d \sin \theta$ ซึ่งความแตกต่างของระยะห่างดังกล่าวจะมีผลให้เกิดความแตกต่างของเฟสของกระแสในแต่ละองค์ประกอบนั้น โดยความต่างเฟส ψ จะมีค่าเท่ากัน

$$\psi = \beta d \sin \theta \quad (3.2)$$

ตัวประกอบแถวลำดับ AF สำหรับแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่ประกอบไปด้วย N องค์ประกอบ สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$AF = e^{j(N-1)\psi/2} \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (3.3)$$

ตัวประกอบ $e^{j(N-1)\psi/2}$ จะแสดงถึงการเลื่อนเฟสของแถวลำดับจากจุดศูนย์กลางเมื่อเทียบกับจุดกำเนิดเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งตัวประกอบเฟสสามารถตัดทิ้งได้ ผลที่ได้จะกลายเป็น

$$AF = A_0 \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (3.4)$$

เมื่อ $\psi = 0$ สมการ (3.4) จะมีค่าสูงสุดเป็น $A_0 N$ โดยการหารสมการ (3.4) ด้วยค่าสูงสุดดังกล่าว ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ n ของอนุกรมเรขาคณิต $f(\psi)$ ของตัวประกอบแถวลำดับที่ประกอบด้วย N องค์ประกอบที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันและมีการป้อนแหล่งกำเนิดที่มีเฟสเดียวกัน โดยมีจุดศูนย์กลางของแถวลำดับอยู่ที่จุดกำเนิดจะมีค่าดังสมการ

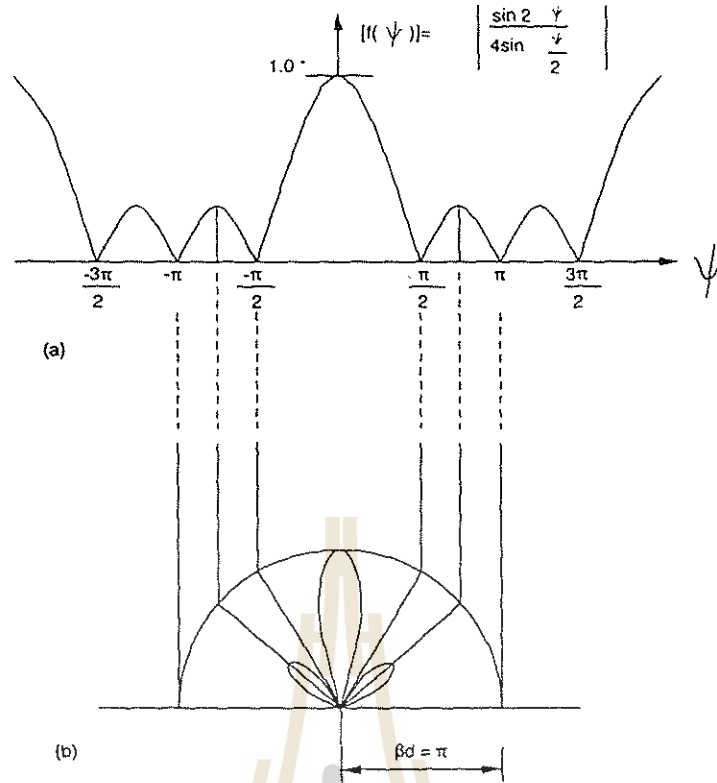
$$f(\psi) = \frac{\sin(N\psi/2)}{N \sin(\psi/2)} \quad (3.5)$$

กราฟของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่อนุกรมเรขาคณิตได้แสดงในรูปที่ 3.2(ก) ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงการตอบสนองของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความต่างเฟส ψ ระหว่างองค์ประกอบที่อยู่ติดกันของแถวลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองจะมีค่าสูงสุดเมื่อความแตกต่างเฟสเป็นศูนย์ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้ชี้ไปในทิศทางบรอดไซด์

ด้วยวิธีเชิงกราฟ เราจะได้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบเชิงขั้ว แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบนี้สามารถสร้างได้โดยการวาดครึ่งวงกลมที่มีรัศมี βd ดังแสดงถัดลงมาจากแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ตัวอย่างเช่น ถ้าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ค่ารัศมีจะเป็น $\beta d = (2\pi/\lambda)(\lambda/2) = \pi$

เมื่อวาดครึ่งวงกลมเสร็จ จะต้องวาดเส้นตรงในแนวตั้งจากจุดบนเส้นตัวประกอบแถวลำดับไปยังเส้นรอบวงของครึ่งวงกลมจากจุดตัดของเส้นแนวตั้ง และที่เส้นรอบวงนี้จะลากเส้นอีกเส้นหนึ่งที่ต่อจากจุดกำเนิดของวงกลมไปยังเส้นรอบวง การลากเส้นสุดท้ายซึ่งเป็นระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังจุดบนเส้นรอบวงนี้ จะเรียกว่า แอมพลิจูดของแถวลำดับ

ตัวอย่างเช่น ที่ $\psi = \pi/2$ ตัวประกอบของแถวลำดับจะเป็นศูนย์เนื่องมาจากจุดบนกราฟเชิงขั้วจะอยู่ที่จุดกำเนิด ระหว่าง $\psi = \pi/2$ และ $\psi = \pi$ จะมีจุดสูงสุดของตัวประกอบแถวลำดับซึ่งเป็นจุดสูงสุดของกราฟเชิงขั้วด้วย



รูปที่ 3.2 (ก) ตัวประกอบแฉกลำดับสำหรับ 4 องค์ประกอบ
(ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น $d = \lambda/2$

3.2.2 แฉกลำดับแบบอนุกรมและแบบขนาน (Parallel and Series Arrays)

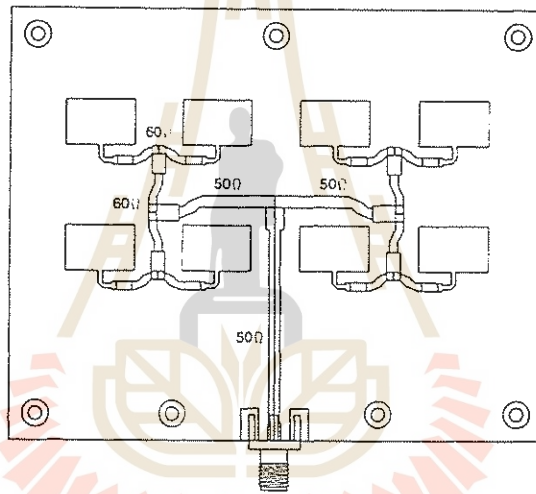
สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) ที่ใช้เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของแฉกลำดับ ในปฏิบัติการนี้ได้แบ่งเป็น 2 แบบ คือ สายอากาศแฉกลำดับไมโครสตริปที่มีการป้อนกระแสเป็นแบบอนุกรม (Series-Fed) และที่มีการป้อนแบบขนาน (Parallel-Fed)

สายอากาศแฉกลำดับแบบไมโครสตริปจะรวมถึงองค์ประกอบของไมโครสตริปหลายๆ ชั้นและโครงข่ายการป้อนสัญญาณให้กับไมโครสตริป ซึ่งโครงข่ายการป้อนสัญญาณนี้จะรวมถึงองค์ประกอบแบบพาสซีฟ เช่น ตัวแบ่งกำลังงานและสายนำสัญญาณ รวมทั้งองค์ประกอบแบบแอกทีฟ เช่น ตัวเลื่อนเฟส ตัวขยายสัญญาณ ตัวกำเนิดสัญญาณ และตัวผสมสัญญาณ สำหรับเส้นสตริปที่ใช้ในการป้อนสัญญาณจะถูกต้องโดยตรงกับองค์ประกอบการแผ่กระจายคลื่น แต่จะไม่มีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

ข้อดีอย่างหนึ่งของสายอากาศไมโครสตริปก็คือ ทุกๆ องค์ประกอบของแฉกลำดับและวงจรโครงข่ายการป้อนสัญญาณ สามารถที่จะอยู่รวมกันบนด้านเดียวของแผ่นวงจรพิมพ์ ดังนั้นองค์ประกอบเป็นจำนวนร้อยๆ องค์ประกอบ สามารถรวมกันเป็นแฉกลำดับได้โดยสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยมาก และส่วนที่เป็นแฉกลำดับยังมีลักษณะที่บาง และที่สำคัญคือ สามารถบรรจุจำนวนองค์ประกอบได้เป็นปริมาณมาก จึงถือว่าแฉกลำดับชนิดนี้จะมีสมรรถนะที่สูงมากเช่นกัน ข้อดีอีกประการหนึ่งของสายอากาศแฉกลำดับก็คือ ความแม่นยำซึ่งเกิดจากแฉกลำดับทั้งหมดได้ถูกสร้างจากส่วนของทองแดงเพียงชั้นเดียว ดังนั้นปัญหาจากการหลอมละลายของการเชื่อมต่อกันจึงมีน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปที่เป็นแพทช์อย่างง่ายเมื่อประกอบ

กันเป็นแถวลำดับของไมโครสตริปแล้วจะมีแถบความถี่ใช้งานแคบมาก ดังนั้นแถวลำดับไมโครสตริปจะใช้งานเพียงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้น

ในสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปที่มีการป้อนแบบขนาน องค์ประกอบจะถูกป้อนในแนวที่ขนานกัน จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่แท้จริงของเฟส ซึ่งโดยปกติจะมีการป้อนให้มีเฟสตรงกันเพื่อที่จะสร้างลำคลื่นหลักให้ตั้งฉากกับระนาบของตัวแถวลำดับ และเพื่อหลีกเลี่ยงความต่างเฟสที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างองค์ประกอบ จึงต้องทำให้เกิดความสมมาตรระหว่างสายนำสัญญาณและองค์ประกอบด้วย ซึ่งโครงสร้างที่มีลักษณะรูปต้นไม้ (Tree-Like Structure) หรือที่เรียกว่า การป้อนสัญญาณแบบเป็นกลุ่ม (Corporate Feed) มักจะให้กำลังงานที่แต่ละกระจายออกไปมีเฟสเดียวกัน ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะสัมพันธ์กับเนื้อที่บนแผ่นพิมพ์เมื่อจำนวนองค์ประกอบมีขนาดใหญ่มาก สำหรับในการปรับแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์จะใช้ตัวแปลงที่เรียกว่า ตัวแปลงชนิดที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (Quarter-Wavelength Transformers) ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบทั้งหมดมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น 50 โอห์ม เพื่อใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ



รูปที่ 3.3 แถวลำดับของแพทช์ไมโครสตริป

อีกวิธีการหนึ่งซึ่งใช้ในการป้อนกระแสให้กับแพทช์ไมโครสตริปก็คือ เชื่อมต่อแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับแบบอนุกรม แต่การเชื่อมต่อแถวลำดับแบบอนุกรมนี้จะมีผลข้างเคียงในการออกแบบมากกว่าแถวลำดับที่ถูกป้อนหรือเชื่อมต่อแบบขนานเพราะว่าจะไม่เกิดความอิสระระหว่างองค์ประกอบ โดยแต่ละแพทช์จะถูกมองให้เป็นร่องสองร่องและผลของการเชื่อมต่อระหว่างแพทช์จะถูกพิจารณาในการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปด้วย

สำหรับแถวลำดับที่มีป้อนแบบขนานนั้น การสูญเสียจากการป้อนสัญญาณจะไปจำกัดการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบเป็นสองเท่า การสูญเสียเหล่านี้เป็นการสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อชนิดตัวเหนี่ยวนำและชนิดตัวเก็บประจุระหว่างสายนำสัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก สำหรับแพทช์ที่มีการป้อนสัญญาณแบบอนุกรมการเชื่อมต่อระหว่างแพทช์จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และมีปัญหาน้อยกว่า

การป้อนสัญญาณทั้งสองแบบสามารถนำมารวมกันได้ เพื่อให้เป็นการป้อนสัญญาณของแถวลำดับแบบผสมหรือแบบขนานอนุกรม ซึ่งได้รวมข้อดีของการรวมสัญญาณข้างต้นไว้ แต่อาศัยการป้อนสัญญาณแบบอนุกรมจำนวนมากๆ มาต่อขนานกัน ทำให้เราสามารถออกแบบแถวลำดับขนาดใหญ่โดยลดความซับซ้อนของวงจรป้อนสัญญาณ และลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นได้

3.3 สรุป

จากความรู้ที่ผ่านมาในหน่วยนี้ ผู้ศึกษาได้เข้าใจวิธีการสร้างสายอากาศไมโครสตริปให้เป็นแบบแถวลำดับทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน ได้ศึกษาถึงการควบคุมแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศชนิดนี้ด้วยการปรับที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศและวิธีการป้อนแหล่งกำเนิดให้กับแต่ละองค์ประกอบ

3.4 คำถามหลังปฏิบัติการ

- 1) จงอธิบายการโพลาริซชันของสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบชนิด ไมโครสตริปที่ใช้ในการทดลองนี้
- 2) จงอธิบายสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับเพื่อให้มีทิศทางของลำคลื่นแผ่กระจายไปในทิศทางที่ตั้งฉาก
- 3) ข้อดีที่สำคัญของการพัฒนาสายอากาศแถวลำดับโดยใช้เทคโนโลยีไมโครสตริปคืออะไร
- 4) การป้อนแบบเป็นกลุ่ม (Corporate Feed) คืออะไร และทำไมจึงนิยมใช้ในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับของไมโครสตริปที่มีการป้อนแบบขนาน
- 5) องค์ประกอบที่ควรพิจารณาในการปรับปรุงสายอากาศแถวลำดับ ไมโครสตริปที่มีการป้อนสัญญาณแบบอนุกรมคืออะไร

เอกสารอ้างอิง

1. Lab-Volt's Staff, *Antenna Fundamentals*, 1st Ed., Quebec, Canada, 1996
2. C.A.Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997

แหล่งวิทยากร

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคต์, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000, โทรศัพท์/โทรสาร 0-4422-4392
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, โทรศัพท์ 0-2737-3000

