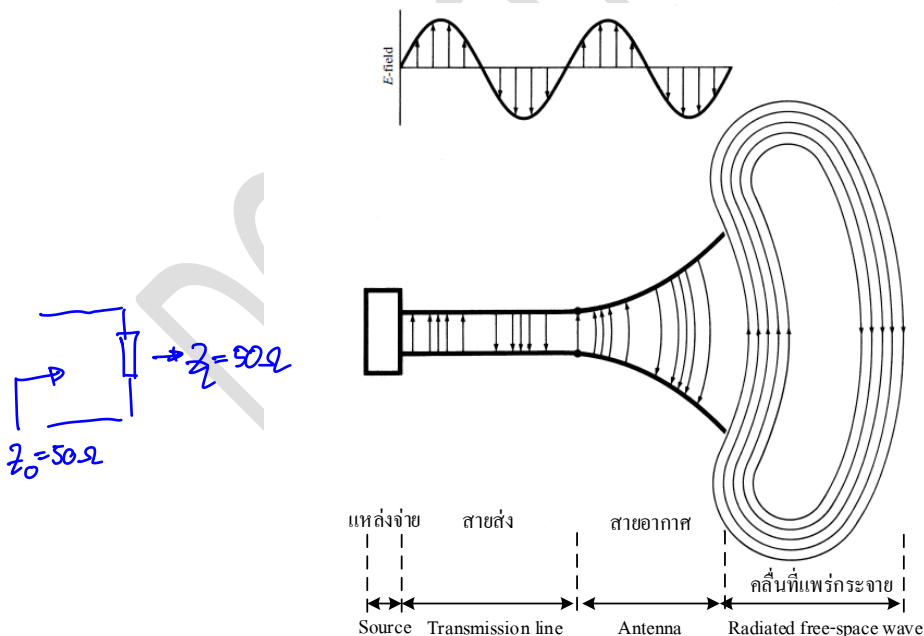


บทที่ 1 บทนำสายอากาศ

1.1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าประจุไฟฟ้า (Electric charge) คือแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics field: EMF) หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อแหล่งกำเนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปจากแหล่งกำเนิด โดยทั่วไปการแผ่กระจายพลังงาน (Radiation) ได้ถูกพิจารณาเป็นกระบวนการของการส่งพลังงาน ซึ่งการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องอาศัยโครงสร้างของตัวนำหรือไดอิเล็กตริกที่ถูกเรียกว่า **สายอากาศ (Antenna)** หรือ **ตัวแผ่กระจายพลังงาน (Radiator)** โดยสายอากาศได้ถูกให้คำจำกัดความอย่างหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น “เป็นอุปกรณ์ตัวนำที่ใช้ในการแผ่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุ” รวมทั้งตามนิยามของมาตรฐาน IEEE “**สายอากาศ คือ สิ่งที่แผ่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุ**” ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นตัวแปลงระหว่างอวกาศว่างกับอุปกรณ์นำทาง (Guiding device) เช่น สายนำสัญญาณ (Transmission line) หรือท่อนำคลื่น (Waveguide) ดังแสดงได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สายอากาศทำหน้าที่เป็นตัวแปลงระหว่างอวกาศว่างกับอุปกรณ์นำทาง

สายอากาศ (Antenna) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแผ่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุ

หน้าที่หลักของสายอากาศคือ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานของคลื่นที่เดินทางในอุปกรณ์นำทางให้เป็นคลื่นที่แผ่กระจายออกไปในอวกาศว่างในกรณีที่เป็นสายอากาศส่ง (Transmitting antenna) ในทำนองเดียวกันจะทำหน้าที่แปลงพลังงานของคลื่นในอวกาศว่างที่เดินทางมาตกกระทบให้อยู่ในรูปของคลื่นที่เดินทางในอุปกรณ์เดินทางในกรณีที่เป็นสายอากาศรับ (Receiving antenna) โดยการทำงานทั้งในกรณีที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับจะต้องทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกันเท่าที่จะเป็นไปได้

การจำลองการทำงานของสายอากาศในกรณีทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งสามารถแสดงได้โดยใช้วงจรสมมูลทวินินของสายส่ง (Transmission-line Thevenin equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยที่เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) มีแรงดันของสัญญาณ V_g และมีอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ Z_g ต่อกับสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) ของสายส่ง Z_c และมีโหลดเป็นสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ Z_A ซึ่งอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ

$$Z_A = (R_r + R_L) + jX_A$$

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (1.1) \quad \rightarrow \text{Ideal.}$$

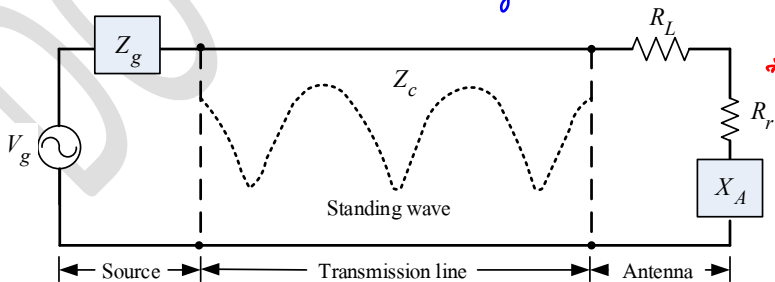
โดยที่ R_r คือ ความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation resistance) ของสายอากาศ

R_L คือ ความต้านทานการสูญเสีย (Loss resistance) ที่เกิดจากการสูญเสียของตัวนำและ

ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของสายอากาศ เกิดการสูญเสียไม่เหมาะสม \rightarrow Dielectric

X_A คือ รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของสายอากาศ

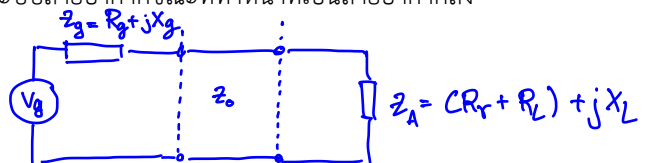
Matching Impedance



* ถ้าไม่ Match จะเกิด Standing wave ที่ใน Antenna ไม่ Radiated

$$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$$

รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลทวินินของระบบสายอากาศขณะที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง



Conjugated Matching \Rightarrow Impedance is conjugated-pair

ในระบบของสายอากาศส่งภายใต้เงื่อนไขการทำงานแบบอุดมคตินั้น พลังงานจากเครื่องกำเนิดสัญญาณทั้งหมดจะถูกส่งไปยังสายอากาศผ่านตัวต้านทานการแผ่พลังงาน R_r ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้แสดงการแผ่พลังงาน อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วจะมีการสูญเสียในสายส่งและสายอากาศเองซึ่งเกิดจากตัวนำและไดอิเล็กตริก ทำให้เกิดการสะท้อนที่จุดเชื่อมต่อระหว่างสายส่งและสายอากาศอันเกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่เท่ากัน ถ้าจุดเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายส่งรวมถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสายส่งกับสายอากาศมีอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับป้อนกลับมามีการหักล้างและเสริมกันของคลื่น จึงทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing wave) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ โดยในทางปฏิบัติมักจะใช้ค่าที่เรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) มาเป็นตัวกำหนดการแมตช์ของสายอากาศ ซึ่งกำลังงานสามารถจ่ายไปยังสายอากาศได้สูงสุดนั้นจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่เรียกว่า การแมตช์คอนจูเกต (Conjugate matching)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น สายอากาศจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในระบบการสื่อสารแบบไร้สายสำหรับทำหน้าที่รับหรือส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นสายอากาศจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น การแพร่ภาพสัญญาณ การสื่อสารวิทยุ เครือข่ายโทรศัพท์มือถือ เครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ระบบเก็บค่าผ่านทางและระบบนำทาง และระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น นอกจากนี้สายอากาศยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านการทหาร เช่น เรดาร์ตรวจสอบอากาศภาคพื้นดิน เรดาร์ค้นหาเส้นทาง และเรดาร์สอดแนม เป็นต้น รวมทั้งสายอากาศยังถูกนำมาใช้ในระบบรับวิทยุดาราศาสตร์ อุตุนิยมวิทยาและการตรวจจับสัญญาณเรดาร์อีกด้วย

อย่างไรก็ตามสายอากาศมักจะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่และแพงในระบบไมโครเวฟเนื่องจากขนาดของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน จึงทำให้มีการศึกษาออกแบบและพัฒนาสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเล็กกระทัดรัดอย่างต่อเนื่อง โดยการออกแบบสายอากาศให้ได้คุณสมบัติตามต้องการนั้นอาจจำเป็นต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีวัสดุและกระบวนการผลิตสายอากาศด้วยเช่นกัน และในบางครั้งอาจต้องมีการปรับเปลี่ยนความต้องการบางอย่างของระบบเพื่อให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศขั้นสูงและการพัฒนาสายอากาศให้เหมาะสมกับระบบการสื่อสารไร้สายต่าง ๆ จึงต้องเกี่ยวข้องกับวิศวกรรมระบบ วิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้งานสายอากาศในระบบสื่อสารไร้สายส่วนใหญ่มักต้องการสายอากาศที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูกลง จึงต้องอาศัยวิศวกรที่มีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีสายอากาศเพื่อให้เกิดความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบและสร้างสายอากาศ โดยในการออกแบบสายอากาศใน

อุตสาหกรรมสามารถทำได้ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองผลทางคลื่นแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับการวัดทดสอบจริง ซึ่งกระบวนการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) และคุณสมบัติการชี้ทิศทางของสายอากาศนั้นค่อนข้างมีความซับซ้อน จึงต้องใช้ความรู้พื้นฐานและประสบการณ์เกี่ยวกับสายอากาศเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้สายอากาศแต่ละประเภทยังมีความแตกต่างกันทั้งรูปร่าง ขนาด และคุณลักษณะการแผ่พลังงาน โดยสายอากาศอาจมีส่วนประกอบของเส้นลวด จานสะท้อนขนาดใหญ่ และอาจมีการนำมาต่อแบบอาร์เรย์หรือต่อร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงต้องมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับคุณลักษณะของสายอากาศประเภทต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน

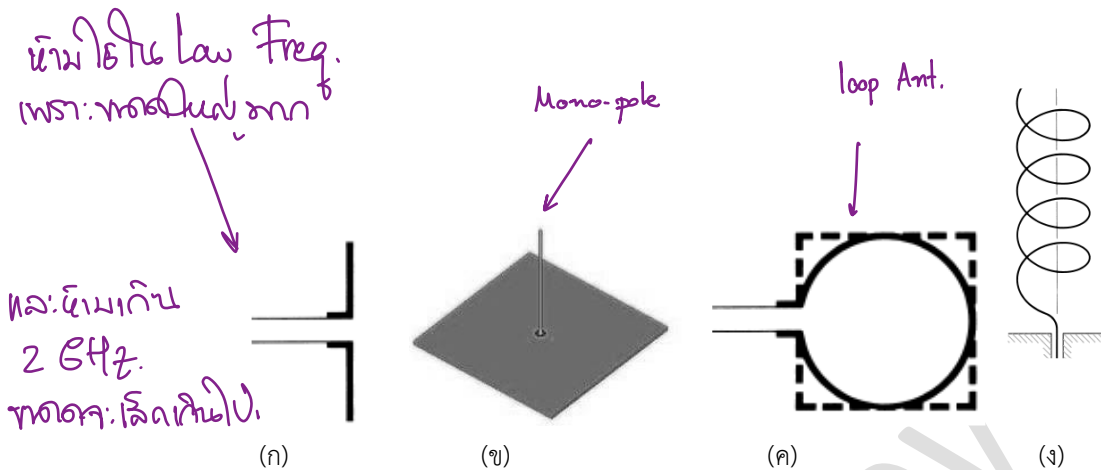
1.2 ประเภทของสายอากาศ

ทางของสายอากาศ ขึ้นอยู่กับความถี่ $\rightarrow \boxed{f = \frac{c}{\lambda}}$ โดยที่ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
 $\rightarrow f \uparrow \rightarrow \lambda \downarrow \rightarrow \text{Antenna size} \downarrow$
 $\rightarrow f \downarrow \rightarrow \lambda \uparrow \rightarrow \text{Antenna size} \uparrow$
 ↳ ความยาวไฟฟ้า (Electrical Length)

สายอากาศมีหลากหลายรูปแบบและแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของสายอากาศที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้

1.2.1 สายอากาศเส้นลวด

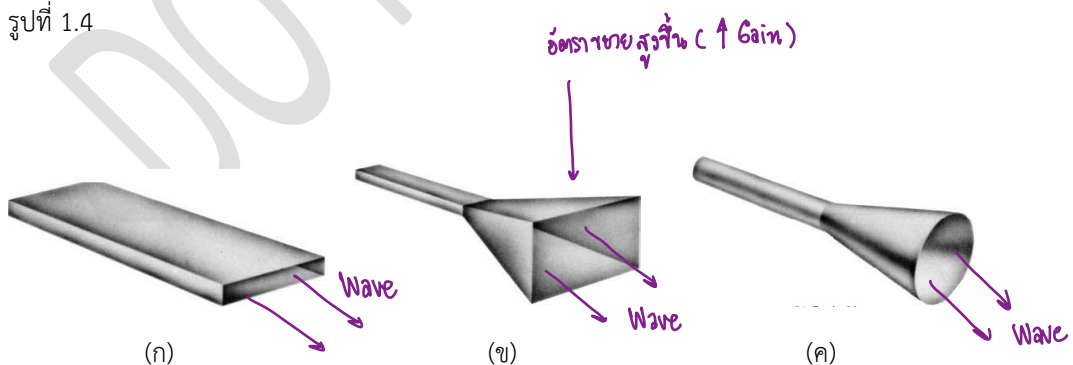
สายอากาศเส้นลวด (Wire antenna) เป็นสายอากาศพื้นฐานที่สุด โดยสร้างขึ้นจากเส้นลวดตัวนำที่เป็นเส้นตรงหรือถูกนำมาดัดโค้ง และยังสามารถสร้างจากท่อตัวนำกลวงได้อีกด้วย สายอากาศประเภทนี้มีหลายรูปแบบ เช่น สายอากาศไดโพล (Dipole) สายอากาศโมโนโพล (monopole) สายอากาศบ่วงหรือลูป (Loop) และสายอากาศเกลียว (Helix) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 1.3(ก) สายอากาศไดโพลสร้างขึ้นจากเส้นลวดตัวนำตรงสองเส้นที่วางอยู่ในแนวแกนเดียวกันและมีการป้อนสัญญาณเข้าบริเวณกึ่งกลางระหว่างเส้นลวดตัวนำทั้งสอง ส่วนสายอากาศโมโนโพลสร้างขึ้นจากเส้นลวดตัวนำที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลและถูกวางอยู่บนระนาบกราวด์ที่สร้างจากตัวนำดังแสดงในรูปที่ 1.3(ข) สำหรับสายอากาศแบบบ่วงแสดงในรูปที่ 1.3(ค) ถูกสร้างขึ้นจากเส้นลวดตัวนำที่นำมาขดให้เป็นบ่วงจำนวนหนึ่งรอบหรือหลายรอบก็ได้ ซึ่งพบว่าสนามที่สร้างจากบ่วงขนาดเล็กจะเหมือนกับสนามที่สร้างจากไดโพลจิ๋ว (Small dipole) ส่วนสายอากาศเกลียวถูกสร้างขึ้นจากเส้นลวดตัวนำมอดเป็นเกลียวและถูกวางอยู่บนระนาบกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 1.3(ง) ซึ่งสายอากาศเส้นลวดที่ไดกล่าวมาทั้งหมดนี้นิยมใช้ในบ้านเรือน เครื่องบิน เรือขนาดใหญ่ รถยนต์ และอื่น ๆ อย่างไรก็ตามความยาวของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน ดังนั้นข้อจำกัดของสายอากาศชนิดนี้คือ จะสามารถใช้งานได้กับย่านความถี่ช่วงแรกของย่านความถี่ไมโครเวฟ (สูงสุดที่ 1 – 2 GHz) เท่านั้น เพราะสายอากาศจะสั้นมากหากใช้งานที่ความถี่สูงและในทางตรงข้ามสายอากาศจะมีขนาดที่ยาวมากหากใช้งานที่ความถี่ต่ำเกินไป



รูปที่ 1.3 สายอากาศเส้นลวด (ก) สายอากาศไดโพล (ข) สายอากาศโมนโพล (ค) สายอากาศบ่วง
(ง) สายอากาศเกลียว

1.2.2 สายอากาศอะพอร์เจอร์

สายอากาศอะพอร์เจอร์ (Aperture antenna) หรือสายอากาศช่องเปิด โดยทั่วไปสายอากาศประเภทนี้จะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนตัวออกมาจากอะพอร์เจอร์ มักนิยมใช้งานในย่านความถี่สูง ตั้งแต่ 1 - 20 GHz ซึ่งสายอากาศประเภทนี้นอกจากถูกนำไปใช้เป็นสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ๆ แล้ว ยังถูกนำไปใช้คู่กับสายอากาศแบบตัวสะท้อน โดยทำหน้าที่เป็นตัวป้อนสัญญาณ (Feed) ตัวอย่างสายอากาศกลุ่มนี้ เช่น สายอากาศปากแตร (Horn) ลักษณะต่าง ๆ เช่น สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด (Pyramidal horn) สายอากาศปากแตรทรงกรวย (Conical horn) และท่อนำคลื่น เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.4

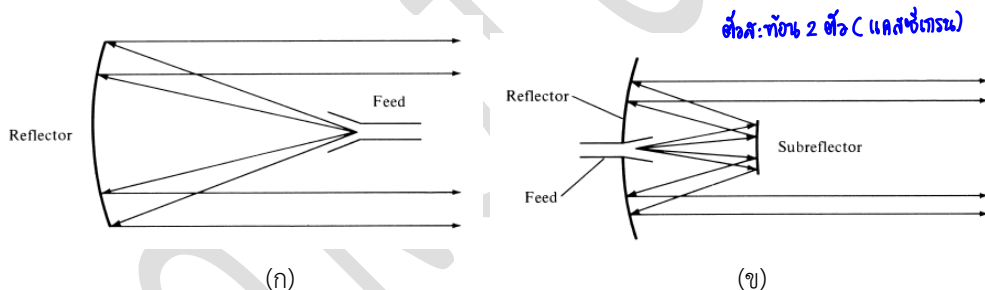


รูปที่ 1.4 สายอากาศอะพอร์เจอร์ (ก) ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (ข) สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด
(ค) สายอากาศปากแตรทรงกรวย

1.2.3 สายอากาศตัวสะท้อน

↗ 9 ธันวาคมที่ Microwave

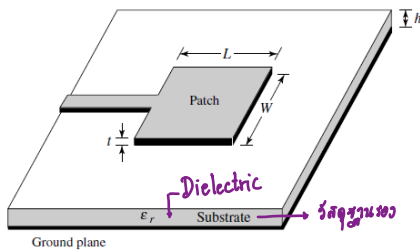
สายอากาศตัวสะท้อน (Reflector antenna) เป็นสายอากาศที่นิยมใช้มากในย่านความถี่ไมโครเวฟ เพราะเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง สายอากาศชนิดนี้โดยทั่วไปแล้วมีโครงสร้างซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ตัวสะท้อนหรือจานสะท้อนซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นแบบพาราโบลา และสายอากาศป้อนซึ่งทำหน้าที่ป้อนกำลังงานเข้าสู่ตัวสะท้อน สายอากาศตัวสะท้อนได้ใช้หลักการพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางมาตกกระทบกับผิวตัวนำจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเกิดขึ้น ดังนั้นจึงใช้สายอากาศป้อน เช่น สายอากาศไดโพล หรือสายอากาศปากแตรวางที่ตำแหน่งจุดโฟกัสของตัวสะท้อนพาราโบลา จากนั้นตัวสะท้อนพาราโบลาจะสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแผ่กระจายพลังงานออกไป นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศตัวสะท้อนเดียวให้สูงขึ้นได้ด้วยการใช้ตัวสะท้อนคู่ที่ถูกรเรียกว่า สายอากาศตัวสะท้อนแบบแคสซีเกรน (Cassegrain reflector antenna) ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนแสดงได้ดังรูปที่ 1.5 เนื่องจากสายอากาศตัวสะท้อนมีอัตราขยายและสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงมาก จึงนิยมนำมาใช้ในการสื่อสารคลื่นความถี่วิทยุระยะไกลมาก ๆ เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น



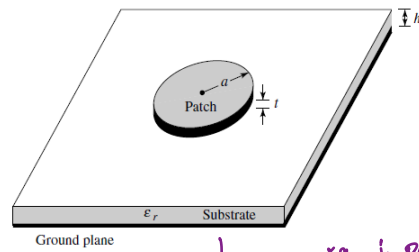
รูปที่ 1.5 สายอากาศตัวสะท้อน (ก) แบบพาราโบลา (ข) แบบแคสซีเกรน

1.2.4 สายอากาศไมโครสตริป (Favorite)

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna) เป็นสายอากาศที่ถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) ซึ่งประกอบด้วยแพทช์ (Patch) เป็นแผ่นโลหะวางบนวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่มีระนาบกรวดด้านอยู่ล่าง โดยแพทช์โลหะจะเป็นส่วนที่ใช้ในการแผ่พลังงาน อาจมีรูปร่างได้หลายรูปแบบ เช่น สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงกลม เป็นต้น ตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน สายอากาศประเภทนี้มีข้อดีคือ ขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบา มีความแบนราบทำให้มีความสามารถที่จะติดตั้งบนโครงสร้างต่าง ๆ ได้ง่าย และราคาถูก ปกติมักใช้งานที่ความถี่ค่อนข้างสูง และนิยมนำไปใช้งานกับดาวเทียม จรวด รถยนต์ และงานด้านอื่น ๆ ตัวอย่างของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 1.6



(ก)



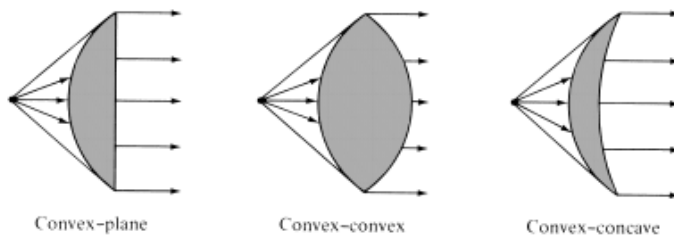
(ข)

→ เนมา: ก ข แผ่น PCB 2 หน้า

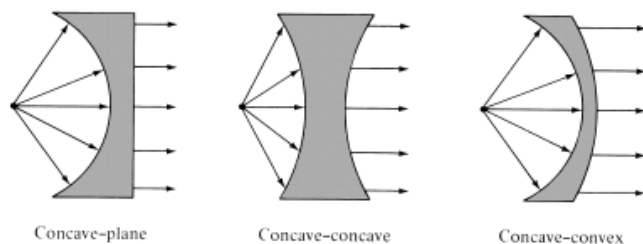
รูปที่ 1.6 สายอากาศไมโครสตริป (ก) แพทช์รูปสี่เหลี่ยม (ข) แพทช์รูปวงกลม

1.2.5 สายอากาศเลนส์

สายอากาศเลนส์ (Lens antenna) จะมีหลักการทำงานคล้ายกับตัวสะท้อนที่ใช้ในสายอากาศแบบตัวสะท้อน โดยทำหน้าที่รวมเอาพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายทิศทางที่ไม่คงที่ให้อยู่ในรูปของคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic plane wave) โดยทั่วไปมักจะนำเลนส์มาใช้เป็นตัวสะท้อนในงานความถี่สูงมาก ๆ (สูงกว่า 100 GHz) และมีการแบ่งชนิดและตั้งชื่อของเลนส์ตามรูปร่างและชนิดของวัสดุที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 1.7



(ก)



(ข)

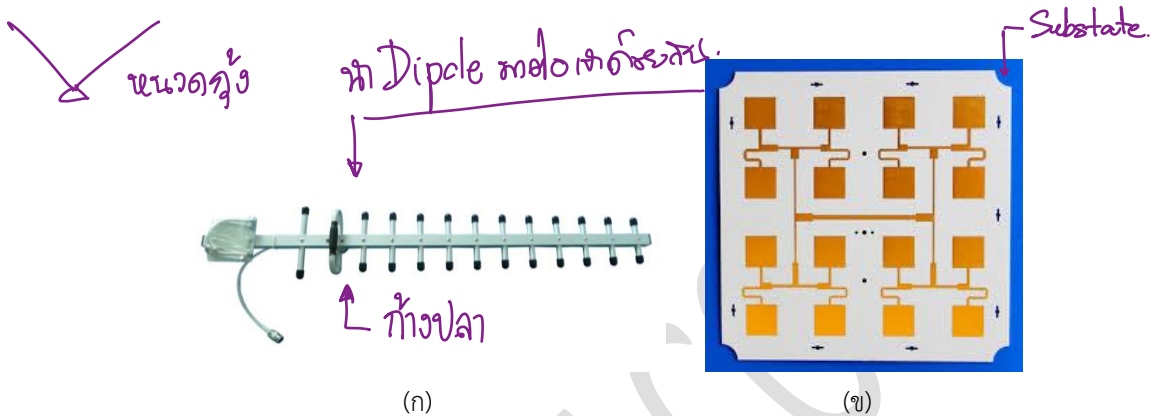
ไม่ต้องพบเจอในไทย เพราะความถี่ที่ใช้งานสูง

รูปที่ 1.7 สายอากาศเลนส์ (ก) ดัชนีการหักเห (Index of refraction) $n > 1$

(ข) ดัชนีการหักเห (Index of refraction) $n < 1$

1.2.6 สายอากาศอาร์เรย์

สายอากาศอาร์เรย์ (Array antennas) เป็นการนำเอาสายอากาศหรือตัวแผ่พลังงานที่มีลักษณะเหมือนกันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป มาจัดวางเรียงลำดับกันตามรูปทรงเรขาคณิต (การอาร์เรย์) เพื่อให้ได้คุณลักษณะของการแผ่พลังงานตามลักษณะเฉพาะที่ผู้ออกแบบต้องการซึ่งแตกต่างจากการใช้คุณสมบัติของสายอากาศเพียงตัวเดียว ตัวอย่างของสายอากาศอาร์เรย์แสดงดังรูปที่ 1.8

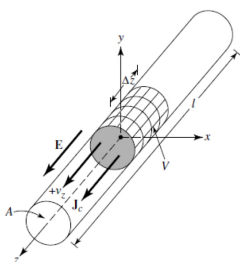


รูปที่ 1.8 สายอากาศแถวลำดับ (ก) แบบยาگی-อุดะ (ข) แบบไมโครสตริปแพทช์

1.3 กลไกการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกลไกการแผ่พลังงานของสายอากาศหรือการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวกำเนิดสัญญาณผ่านสายส่งสัญญาณและสายอากาศ จนกระทั่งหลุดหรือแยกออกมาจากสายอากาศไปยังอากาศ ซึ่งกลไกการแผ่พลังงานแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบเส้นลวดเส้นเดียวและแบบเส้นลวดสองเส้น โดยก่อนจะกล่าวถึงกลไกการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากสายอากาศนั้น จะขอทบทวนทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อน

จากพื้นฐานในทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประจุสามารถเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีในวัสดุตัวนำ เช่น เส้นลวดตัวนำ จึงทำให้มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นบนเส้นลวดตัวนำ สมมติให้ประจุมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในเส้นลวดตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมพื้นที่ A และปริมาตร V ดังแสดงในรูปที่ 1.9 โดยประจุทั้งหมด Q ที่กระจายอย่างสม่ำเสมอในปริมาตร V สามารถพิจารณาในรูปของความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร ρ_v และถ้าประจุนี้มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง z ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ v_z ดังนั้นสามารถหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดได้คือ



$$J_z = \rho_v v_z \quad J_z = \rho_v v_z \quad (1.2n)$$

Fig. 19

Wanwisa Thaiwirot

Velocity

Charge Density

$$J_z = J_0 V_z = \frac{C}{m^3} \cdot \frac{m}{s} = \left[\frac{C}{s} \right] \cdot \frac{1}{m^2} = A/m^2$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{C}{s} = A$$

โดยที่ ρ_v คือ ความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m^3)

J_z คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลตัดผ่านพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดในทิศทาง z
มีหน่วยเป็นแอมป์ต่อตารางเมตร (A/m^2)

v_z คือ ความเร็วของประจุที่เคลื่อนที่ในทิศทาง z มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

ถ้ามีประจุกระจายบนพื้นผิวของเส้นลวดที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor) ดังนั้นสามารถหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้คือ

$$J_z = \rho_s v_z \quad (1.2ข)$$

โดยที่ ρ_s คือ ความหนาแน่นประจุบนพื้นผิว มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อตารางเมตร (C/m^2) และถ้าเส้นลวดตัวนำมีขนาดเล็กมาก ๆ (ในทางอุดมคติรัศมีของเส้นลวดตัวนำจะเท่ากับศูนย์) ดังนั้นสามารถหากระแสที่ไหลในเส้นลวดตัวนำแสดงได้คือ

$$I_z = \rho_l v_z \quad (1.2ค)$$

โดยที่ ρ_l คือ ความหนาแน่นประจุบนเส้นลวด มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อเมตร (C/m)

เมื่อพิจารณาเส้นลวดที่มีขนาดเล็กมาก ๆ และกระแสมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นสามารถหาอนุพันธ์ของสมการที่ (1.2ค) ได้คือ

$$\frac{dI_z}{dt} = \rho_l \frac{dv_z}{dt} = \rho_l a_z \quad (1.3)$$

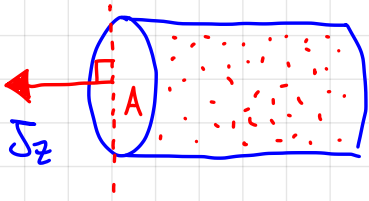
เมื่อ $dv_z / dt = a_z$ คือ ความเร่งประจุ มีหน่วยเป็น (m/s^2) ซึ่งในสมการที่ (1.3) แสดงให้เห็นถึงแหล่งกำเนิดของกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนประจุบนเส้นลวด ดังนั้นถ้าเส้นลวดมีความยาว l จะสามารถเขียนสมการที่ (1.3) ได้คือ

$$l \frac{dI_z}{dt} = l \rho_l \frac{dv_z}{dt} = l \rho_l a_z \quad (1.4)$$

สมการที่ (1.4) เป็นสมการพื้นฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับกระแสไฟฟ้า และยังสามารถนำมาใช้อธิบายการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ นั่นคือ การแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการที่กระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเกิดจากการที่ประจุที่อยู่ภายในโครงสร้างของสายอากาศมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

กลไกการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

① ประจุกระจายสม่ำเสมอในตัวกลาง



Formula :

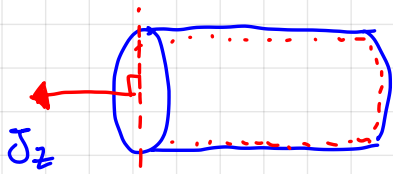
$$J_z = \rho_v v_z$$

→ ความหนาแน่นประจุ / ปริมาตร (Q/m^3)

→ Velocity (m/s)

→ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m^2)

② ประจุกระจายสม่ำเสมอบนพื้นผิว (Perfect Electric Conductor)

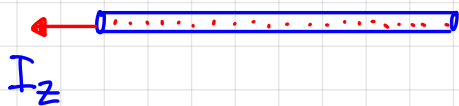


$$J_z = \rho_s v_z$$

→ A/m

→ ความหนาแน่นประจุ / พื้นผิว (Q/m^2)

③ ประจุกระจายสม่ำเสมอในตัวกลางเล็กมาก ๆ



$$I_z = \rho_l v_z$$

→ ความหนาแน่นประจุ / ความยาว (Q/m)

→ Current (A)

ถ้าเส้นลวดยาวเล็กมาก ๆ ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงความยาวเวลา

จะเกิด

$$\frac{dI_z}{dt} = \frac{d}{dt} \rho_l v_z$$

$$\frac{dI_z}{dt} = \rho_l \frac{dv_z}{dt}$$

→ velocity

$$\frac{dv}{dt} = a$$

→ acceleration

ถ้าเส้นลวดยาวมาก ๆ ;

$$l \frac{dI_z}{dt} = l \rho_l \frac{dv_z}{dt} = l \rho_l a_z$$

โดยทั่วไปแล้วในการอธิบายการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามักกล่าวถึงกระแสในรูปของฮาร์โมนิกส์ทางเวลา (Time-harmonic current) หรือกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาในลักษณะของไซน์ซอยด์ (Sinusoid) แต่ในกรณีของการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการทำให้ประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งนั้น จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดที่เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า รวมถึงมีตัวกลางที่ทำให้ประจุเคลื่อนที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity medium) ซึ่งอาจทำได้โดยการทำให้เส้นลวดโค้ง งอ หรือตัดปลาย หรืออาจมีการต่อโหลดใด ๆ ที่ปลายเส้นลวด

สำหรับเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกรณีเส้นลวดเส้นเดียว สามารถสรุปได้ดังนี้

- หน้า | 10

2. ถ้าประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ดังนั้น

(ก) ไม่มีการแผ่พลังงาน ถ้าเส้นลวดตรงมีความยาวไม่สิ้นสุด

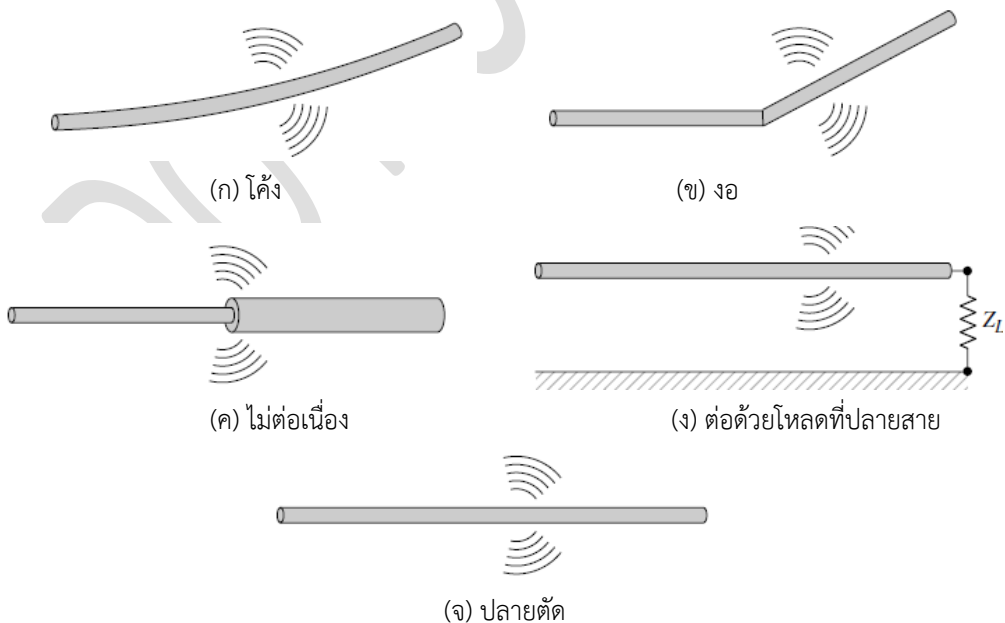
(ข) สามารถแผ่พลังงานได้ ถ้าเส้นลวดถูกทำให้โค้ง งอ ไม่มีความต่อเนื่อง ถูกต่อด้วยโหลด หรือถูกตัด ดังแสดงในรูปที่ 1.10

3. ถ้าประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือกระแสมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเกิดการแผ่พลังงานขึ้น ถึงแม้จะเป็นเส้นลวดตรงก็ตาม

1.3.2 เส้นลวดสองเส้น

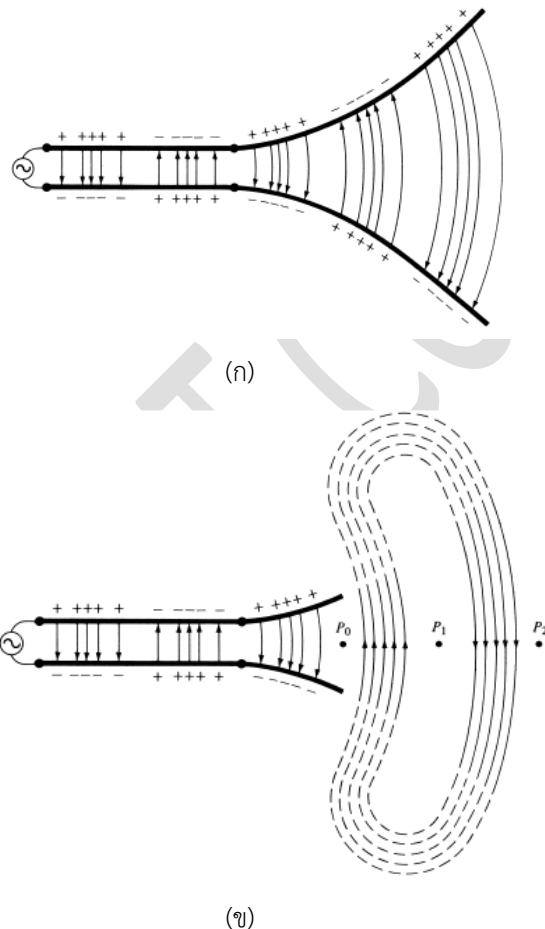
พิจารณาแหล่งกำเนิดแรงดันเชื่อมต่อกับสายส่งสัญญาณซึ่งถูกต่อเข้ากับสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 1.11(ก) เมื่อป้อนแรงดันตกคร่อมสายส่งสองเส้น จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ โดยเส้นของสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระมีการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของประจุนี้จะทำให้เกิดกระแสไหลส่งผลทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้น

จากพื้นฐานของทฤษฎีแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นที่ทราบกันว่า เส้นสนามไฟฟ้าจะเดินทางจากประจุบวกไปยังประจุลบ ในขณะที่เส้นสนามแม่เหล็กจะอยู่ในรูปของเส้นทางปิดที่เกิดจากกระแสที่ไหลในตัวนำ ถ้าสมมติให้แหล่งกำเนิดแรงดันเป็นสัญญาณไซน์ซวยด์ ดังนั้นสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำสองเส้นก็จะมีลักษณะเป็นไซน์ซวยด์ที่มีคาบเวลาเท่ากับแหล่งกำเนิดเช่นกัน



รูปที่ 1.10 โครงสร้างของเส้นลวดที่ทำให้เกิดการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาระหว่างเส้นลวดตัวนำสองเส้น แสดงดังรูปที่ 1.11(ก) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เดินทางเข้าไปในสายอากาศก็จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดประจุและกระแส ซึ่งถ้าเราแยกเส้นลวดในส่วนของสายอากาศให้ห่างออกไปดังแสดงในรูปที่ 1.11(ข) จะทำให้เส้นสนามไฟฟ้าตรงปลายเปิดของเส้นลวดทั้งสองด้านเชื่อมต่อกัน (เส้นประ) และหลุดออกจากปลายเปิดของเส้นลวดกลายเป็นคลื่นในอวกาศว่าง (Free-space wave) ที่แผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศ



รูปที่ 1.11 การแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศเส้นลวดสองเส้น

1.4 ทบทวนทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.1 สนามฮาร์โมนิกเชิงเวลา (Time-Harmonic Field)

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นจากการกระจายของประจุที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงอาจพิจารณาแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปของไซน์ซอว์ด โดยกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปของไซน์ซอว์ดแสดงได้คือ

Time-Harmonic Field $\leftarrow i(t) = I_0 \cos(\omega t + \phi)$ (1.5)

↪ มีกรเปลี่ยนแปลงตามเวลา.
↪ Phase เริ่มต้น

เมื่อ I_0 คือ แอมพลิจูด มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

ω คือ ความถี่เชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

ϕ คือ เฟส มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad)

โดยความถี่เชิงมุม (ω) สัมพันธ์กับความถี่ (f) คือ $\omega = 2\pi f$ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงกระแสในรูปของฟังก์ชันไซน์ (Sine) ได้คือ

$$i(t) = I_0 \sin(\omega t + \phi') \quad (1.6)$$

เมื่อ $\phi' = \phi + \pi/2$ โดยในหนังสือนี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine) เป็นตัวอ้างอิงเพื่อกำหนดเฟสให้กับไซน์ซอว์ด

เนื่องจาก $\cos(\omega t + \phi) = \text{Re } e^{j(\omega t + \phi)}$ เมื่อ Re แสดงถึงส่วนจริงของปริมาณที่อยู่ในวงเล็บ ดังนั้นกระแสสามารถเขียนแสดงได้เป็น

$$e^{j(\omega t + \phi)} = \cos(\omega t + \phi) + j \sin(\omega t + \phi)$$

Re Im

$$\text{Re} \{ e^{j(\omega t + \phi)} \}$$

$$i(t) = I_0 \text{Re } e^{j(\omega t + \phi)} \quad (1.7)$$

$$= \text{Re } I_0 e^{j\phi} e^{j\omega t} \quad (1.8)$$

↪ Amplitude ↪ Phase. } Phase.

↪ ความจริง: Real Part.

โดย $I_0 e^{j\phi}$ เป็นปริมาณที่เรียกว่า **เฟสเซอร์ (Phasor)** ซึ่งประกอบด้วยแอมพลิจูดและเฟสของ $i(t)$ และไม่ขึ้นอยู่กับเวลา, t และสามารถเขียนแสดงในรูปของสถานะชั่วครู่ (Instantaneous) ได้คือ

$$i(t) = \text{Re } I_0 e^{j\omega t} \quad (1.9)$$

โดยที่ $I = I_0 e^{j\phi}$

↪ Instantaneous
เป็นเลขที่ต่อเนื่องตลอดเวลา
↪ Transient
ไม่ต่อเนื่องเวลา

ตัวอย่างที่ 1.1 จงแสดง $i(t) = \cos(\omega t) + 2\sin(\omega t)$ ในรูปแบบเฟสเซอร์

วิธีทำ อันดับแรก ต้องแสดง $\sin(\omega t)$ ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ โดยการใช้ความสัมพันธ์ $\cos(\omega t - \pi/2) = \sin \omega t$ ดังนั้น

$$i(t) = \cos(\omega t) + 2\cos(\omega t - \pi/2)$$

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ $\cos(\omega t + \phi) = \operatorname{Re} e^{j(\omega t + \phi)}$ จะได้

$$i(t) = \operatorname{Re} e^{j\omega t} + \operatorname{Re} 2e^{j(\omega t - \pi/2)}$$

สำหรับปริมาณเชิงซ้อน 2 ตัว Z_1 และ Z_2 ซึ่ง $\operatorname{Re} Z_1 + Z_2 = \operatorname{Re} Z_1 + \operatorname{Re} Z_2$ ดังนั้นสามารถแสดงกระแสได้คือ

$$i(t) = \operatorname{Re} 1 + 2e^{-j\pi/2} e^{j\omega t}$$

$$= \operatorname{Re} 1 - j2 e^{j\omega t}$$

$$= \operatorname{Re} 2.24e^{-j1.1071} e^{j\omega t}$$

ดังนั้นคำตอบของกระแสในรูปแบบเฟสเซอร์คือ

$$I = 2.24e^{-j1.1071} \text{ A}$$

$$i(t) = \cos(\omega t) + 2\sin(\omega t)$$

$$= \cos(\omega t) + 2\cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$= \operatorname{Re} \{ e^{j\omega t} + 2e^{j(\omega t - 90^\circ)} \}$$

$$= \operatorname{Re} \{ 1 + 2e^{-j90^\circ} \} e^{j\omega t}$$

$$= \operatorname{Re} \{ 1 + j2 \} e^{j\omega t}$$

$$=$$

$$\operatorname{Re} \{ e^{j\omega t} + 2e^{j\omega t - \pi/2} \}$$

$$\operatorname{Re} \{ 1 + 2e^{-\pi/2} \} e^{j\omega t}$$

$$je^{-\pi/2} = \cos(-\pi/2) + j\sin(-\pi/2)$$

$$= 0 - j1$$

$$\operatorname{Re} \{ 1 - j2 \} e^{j\omega t}$$

into ing → phase.

ตัวอย่างที่ 1.2 จงแสดงเฟสเซอร์กระแส $i(t) = I_1 e^{j\phi_1} + I_2 e^{j\phi_2}$ ในรูปฟังก์ชันเวลา

วิธีทำ กระแสชั่วคราวสามารถแสดงได้คือ

$$i(t) = \operatorname{Re} I e^{j\omega t}$$

แทนค่าของ I ได้เป็น

$$i(t) = \operatorname{Re} I_1 e^{j\phi_1} e^{j\omega t} + I_2 e^{j\phi_2} e^{j\omega t}$$

$$= I_1 \cos(\omega t + \phi_1) + I_2 \cos(\omega t + \phi_2)$$

ดังนั้นสำหรับกรณีของสายอากาศ ถ้าต้องการให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายพลังงานออกไปในอวกาศว่างจำเป็นต้องใช้สายอากาศต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเวกเตอร์สนามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในอวกาศว่างจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ซออยด์และสามารถแสดงได้ในรูปของเฟสเซอร์ ยกตัวอย่างเช่น **เวกเตอร์สนามไฟฟ้า $\vec{e}(x, y, z, t)$** เป็นสนามในรูปไซน์ซออยด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเป็นฟังก์ชันของพื้นที่ว่าง (x, y, z) ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสนามในสภาวะชั่วครู่ (Instantaneous field) ได้คือ

$$\vec{e}(x, y, z, t) = \text{Re } \mathbf{E}(x, y, z)e^{j\omega t} \quad (1.20)$$

เมื่อ $\mathbf{E}(x, y, z)$ คือเฟสเซอร์ที่ประกอบด้วยทิศทาง ขนาด และเฟสของสนามไฟฟ้าซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ในหนังสือเล่มนี้จะใช้ตัวพิมพ์หนา (เช่น \mathbf{E}) แทนบริเวณที่เป็นเวกเตอร์หรือเฟสเซอร์ และใช้ตัวบางเอียง (เช่น t) แทนปริมาณที่เป็นสเกลาร์ และตัวอักษรที่มีสัญลักษณ์บาร์ (เช่น \vec{e}) แทนปริมาณเวกเตอร์ในสภาวะชั่วครู่

1.4.2 สมการของแมกซ์เวลล์

สมการแมกซ์เวลล์สำหรับสนามและแหล่งกำเนิดที่เป็นไซน์ซออยด์เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถแสดงได้คือ

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1.21)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1.22)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.23)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.24)$$

โดยที่ \mathbf{E} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity)
หน่วยเป็น โวลต์ต่อเมตร (V/m)

\mathbf{H} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)
หน่วยเป็น แอมป์ต่อเมตร (A/m)

\mathbf{D} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux density)
หน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m²)

\mathbf{B} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)
หน่วยเป็น เวเบอร์ต่อเมตร (Wb/m) หรือเทสลา (T)

J คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Electric current density)

หน่วยเป็น แอมป์ต่อตารางเมตร (A/m^2)

ρ คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (Electric charge density)

หน่วยเป็น แอมป์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m^3)

สมการเคิร์ลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) และกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ตามลำดับ สำหรับสมการไดเวอร์เจนแสดงกฎของเกาส์ (Gauss's law) อย่างไรก็ตามเนื่องจากประจุแม่เหล็กไม่มีอยู่จริงในธรรมชาติจึงทำให้สมการไดเวอร์เจน **B** มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับความหนาแน่นกระแส **J** ประกอบไปด้วยสององค์ประกอบคือ กระแสจากแหล่งกำเนิดจริงและกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าที่ถูกป้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sigma \mathbf{E}$ เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของตัวกลาง (มีหน่วยเป็น ซีเมนต์ต่อเมตร, S/m) ในกรณีสายอากาศโดยทั่วไปแล้วสนามจะมีการแผ่พลังงานออกไปในอวกาศว่างทำให้ $\sigma = 0$ ดังนั้น **J** จึงแสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากแหล่งกำเนิดจริง

ในตัวกลางไอโซทรอปิก (Isotropic) และตัวกลางเนื้อเดียว (Homogeneous) ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า **D** และความเข้มสนามไฟฟ้า **E** มีความสัมพันธ์คือ

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.25)$$

เมื่อ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ คือ สภาพยอมไฟฟ้า (Electric permittivity) ของตัวกลาง มีหน่วยเป็นฟารัดต่อเมตร (F/m) ϵ_0 คือ สภาพยอมไฟฟ้าของอวกาศว่าง ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m) และอัตราส่วน $\epsilon / \epsilon_0 = \epsilon_r$ คือสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย) ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก **B** และความเข้มสนามแม่เหล็ก **H** มีความสัมพันธ์คือ

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.26)$$

เมื่อ $\mu = \mu_0 \mu_r$ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก (Magnetic permeability) ของตัวกลาง มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H/m) μ_0 คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของอวกาศว่าง ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) และอัตราส่วน $\mu / \mu_0 = \mu_r$ คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย) สำหรับตัวกลางไอโซทรอปิก ϵ และ μ เป็นสเกลาร์ และสำหรับตัวกลางเนื้อเดียว ϵ และ μ จะไม่ขึ้นกับตำแหน่ง

ในการวิเคราะห์ปัญหาของสายอากาศ การหาสนามไฟฟ้า **E** และสนามแม่เหล็ก **H** ในพื้นที่ว่างรอบ ๆ สายอากาศนั้นจะพิจารณาสายอากาศที่ทำงานในโหมดส่ง โดยสายอากาศจะถูกป้อนสัญญาณเข้าที่ขั้วอินพุตของสายอากาศ (ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณในกรณีของโหมดรับ) กำหนด

โครงสร้างของสายอากาศและการกระตุ้นสัญญาณที่ขั้วอินพุท จากนั้นทำการหากระแสที่กระจายอยู่บนโครงสร้างของสายอากาศที่สอดคล้องกับสมการของแมกซ์เวลล์โดยการพิจารณาพฤติกรรมของสนามบริเวณขอบเขตของวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศ ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์สายอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ (ก) การหากระแสที่กระจายอยู่บนโครงสร้างของสายอากาศเมื่อสายอากาศได้ถูกกระตุ้น (ข) การหาสนามเนื่องจากการกระจายจากกระแสบริเวณพื้นที่ว่างรอบ ๆ ตัวสายอากาศ โดยในส่วนแรกนั้นโดยทั่วไปจะสามารถหาได้จากสมการอินทิกรัล สำหรับการแก้ปัญหาในการหา **E** และ **H** เนื่องจากการกระจายของกระแสนั้น จะใช้วิธีที่เรียกว่าศักย์เวกเตอร์ (Vector potential) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดอีกครั้ง

คำถามท้ายบทที่ 1

- 1.1 จงอธิบายความหมายและหน้าที่ของสายอากาศ
- 1.2 จงอธิบายสาเหตุว่าทำไมสายอากาศบางประเภทจึงเหมาะที่จะนำมาใช้งานย่านความถี่ต่ำและสายอากาศบางประเภทจึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานกับย่านความถี่สูง
- 1.3 ให้ยกตัวอย่างชนิดของสายอากาศที่นักศึกษาเคยพบเห็นในชีวิตประจำวันมา 3 ชนิด พร้อมรูปประกอบ
- 1.4 ทำไมจึงเรียกว่า สายอากาศ แทนการเรียก เสาอากาศ มีที่มาอย่างไร จงอธิบาย