บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของสายอากาศ

2.1.1 คำจำกัดความและชนิดของสายอากาศ

สายอากาศ (Antenna) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบสื่อสารโทรคมนาคมที่มีอากาศเป็นสายนำสัญญาณ โดยคำจำกัดความของสายอากาศตาม Webster's Dictionary; IEEE Standard Definition Terms of Antennas นั้นคือ อุปกรณ์ที่เป็นตัวนำหรือส่วนประกอบของตัวนำสำหรับรับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในอากาศนั้นประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากกันเสมอและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เดินทาง บางครั้งเราจะเรียกว่า คลื่นโหมด TEM (Transverse Electric Magnetic) สายอากาศถูกแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ได้แก่

2.1.1.1 สายอากาศเส้นลวด (Wire Antenna) ทำมาจากเส้นลวดโลหะ (Conducting Wire) ได้แก่ สายอากาศไดโพลและสายอากาศโมโนโพล

2.1.1.2 สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna) หรือ สายอากาศฮอร์น (Horn Antenna) เป็นสายอากาศที่มีช่องเปิดเป็นรูปทรงต่างๆ ได้แก่ แบบกรวย แบบสี่เหลี่ยม ฯลฯ

2.1.1.3 สายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna) เป็นสายอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board หรือ PCB) 2 หน้า ด้านบนเป็นตัวนำสายอากาศรูปร่างต่างๆ ได้แก่ สี่เหลี่ยม วงกลม ฯลฯ และด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ (Ground Plane)

2.1.1.4 สายอากาศจานสะท้อน (Reflector Antenna) เป็นสายอากาศที่ออกแบบขึ้นมาเป็นรูปจานโค้งรูปทรงพาราโบลา มีทั้งแบบหงายและแบบคว่ำขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยจะมีการส่งคลื่นออกจากภาคส่งผ่านสายป้อนสัญญาณ (Feeder Lines) และสายอากาศฮอร์น เพื่อที่จะส่งคลื่นไปสะท้อนที่สายอากาศจานสะท้อน ก่อนที่จะส่งต่อไปยังภาครับสัญญาณที่อยู่ห่างออกไประยะไกล เนื่องจากต้องการสร้างคลื่นระนาบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้สายอากาศชนิดนี้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมและระบบเคเบิลทีวี ในที่นี้ สายอากาศฮอร์น (1^{st} Radiator) ทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นตัวแรกและสายอากาศจานสะท้อน ทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นตัวที่ 2 (2^{nd} Radiator)

2.1.1.5 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array Antenna) เป็นสายอากาศที่มีหลายๆ ตัวมาเรียงต่อกัน โดยมีมิติ (แนวนอนและแนวตั้ง) ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ขนาด อัตราขยาย (Gain) โพลาไรเซชัน (Polarization) บีมวิดท์ (Beamwidth) และคุณสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการจะใช้งานเฉพาะทาง ซึ่งในปัจจุบันนี้ นิยมออกแบบสายอากาศแบบอาร์เรย์เป็นแบบไมโครสตริปและถูกนำไปใช้บนเครื่องบิน เพื่อมิให้ยื่นออกมาจากตัวเครื่องบิน

2.1.1.6 สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Antenna) เป็นสายอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์เช่นเดียวกับสายอากาศแบบไมโครสตริป เพียงแต่ด้านล่างเป็นระนาบกราวด์เนื่องจากจะใช้กราวด์ร่วมกันกับวงจรไมโครเวฟหรือวงจรอื่นๆ ของอุปกรณ์ใช้งานตัวนั้น ส่วนด้านบนก็ยังคงเป็นตัวนำสายอากาศรูปร่างต่างๆ ได้แก่ สี่เหลี่ยม วงกลม ฯลฯ ที่ถูกออกแบบขึ้นมาตามการใช้งาน

2.1.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

2.1.2.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) เป็นรูปภาพที่แสดงทิศทางการแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศว่ากระจายไปได้ดีในทิศทางใดบ้าง โดยเราจะแบ่งสายอากาศออกตามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ 2 แบบหลักๆ คือ

2.1.2.1.1 สายอากาศแบบไม่มีทิศทาง (Non-Directional Antenna) เป็นสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นเท่าๆ กันทุกทิศทาง (รูปทรงกลม) โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิค (Isotropic Radiator) หรือ สายอากาศแบบจุด (Point Source) สายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศที่ใช้อ้างอิงทางทฤษฎีที่สมมติขึ้นมา ซึ่งไม่มีอยู่จริง

2.1.2.1.2 สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศที่มีการชี้ทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้แก่

2.1.2.1.3 สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Uni-directional Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโลบหลัก (Main Lobe) พุ่งตรงไปยังภาครับสัญญาณทิศทางเดียว เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการลำคลื่นแคบๆ เพื่อส่งไปให้ได้ในระยะทางที่ไกล เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ฯลฯ

2.1.2.1.3.1 สายอากาศแบบ 2 ทิศทาง (Bi-directional Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโลบหลัก (Main Lobe) พุ่งออก 2 ทิศทางที่ตรงข้ามกันออกไปยังภาครับสัญญาณที่อยู่ทั้ง 2 ด้าน เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการชี้ลำคลื่นตลอดความยาวของพื้นที่ที่ให้บริการ เช่น สายอากาศที่ใช้งานในระบบรถไฟฟ้าใต้ดินและทางเดินระหว่างตึก ฯลฯ

2.1.2.1.3.2 สายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional Antenna) เป็นสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นออกรอบตัวของสายอากาศ เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่ให้บริการเป็นแบบวงกลม เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่, WiFi, WiMAX ฯลฯ

2.1.2.2 อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ เป็นการเปรียบเทียบการรับส่งสัญญาณของสายอากาศตัวหนึ่งในทิศทางที่รับส่งได้ดีที่สุดเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน ในที่นี้ สายอากาศไม่ได้ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ถ้าเทียบกับสายอากาศแบบจุดที่มีการกระจายคลื่นเท่ากันทุกทิศทาง ผลที่ได้จะเป็นอัตราขยายแบบสัมบูรณ์ หน่วยเป็น dBi ถ้าเทียบกับสายอากาศไดโพลมาตรฐาน ($\lambda/2$ -Dipole) ก็จะเป็นอัตราขยายสัมพัทธ์ หน่วยเป็น dBd

เราสามารถหาค่าอัตราขยายได้จากการนำค่าไดเรคติวิตี้ (Directivity หรือ D_0) คูณกับค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency หรือ e_t) หรือ อาจจะหาค่าได้จากการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงในทางปฏิบัติก็ได้ ถ้าหากมีสายอากาศมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ในที่นี้ ค่าไดเรคติวิตี้นี้เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆ มากน้อยแค่ไหน โดยไดเรคติวิตี้มีหน่วยวัดเหมือนกับอัตราขยาย กล่าวคือ มีหน่วยเป็น dBi และ dBd เมื่อเทียบกับสายอากาศแบบจุดและสายอากาศไดโพลมาตรฐาน ตามลำดับ

โดย สำหรับสายอากาศแบบจุด ค่า $D_0 = 1 = 0$ dB คิดเป็น 0 dBi

สำหรับสายอากาศไดโพลมาตรฐาน ค่า $D_0 = 1.6 = 2.15$ dBi คิดเป็น 0 dBd

ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศไดโพลที่ซื้อมาใช้งานมีค่าไดเรคติวิตี้เท่ากับ 5 dBi หมายถึงว่า สายอากาศไดโพลต้นนี้มีความสามารถรับส่งสัญญาณในทิศทางที่ดีที่สุดได้ดีเท่ากับ 5 dBi หรือ 2.85 dBd (5 dBi – 2.15 = 2.85 dBd)

2.1.2.3 ช่วงกว้างของลำคลื่น (Half Power Beamwidth หรือ HPBW) หรือเรียกสั้นๆ ว่า บีมวิดท์ เป็นช่วงกว้างของลำคลื่นเต็มที่ ณ จุดที่ค่ากำลังส่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่ากำลังส่งสูงสุดของสายอากาศ โดยค่าบีมวิดท์นั้นเป็นการพิจารณาลำคลื่นหรือโลบ แกนนอนของกราฟเป็นค่ามุม

2.1.2.4 ค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ (Impedance Bandwidth) หรือเรียกสั้นๆ ว่า แบนด์วิดท์ เป็นค่าช่วงกว้างของแถบความถี่ที่ใช้งานได้จริงของสายอากาศ ซึ่งเราหาได้จาก การนำค่าความถี่มากลบด้วยค่าความถี่น้อย ณ ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB หรือค่าอื่นๆ ที่ต่ำกว่าขึ้นอยู่กับการพิจารณา โดยค่าแบนด์วิดท์นั้นเป็นการพิจารณาความถี่ แกนนอนของกราฟเป็นค่าความถี่ และสามารถค่าแบนด์วิดท์ได้จากสมการ

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_0}$$

โดย ค่า f_H เป็นค่าความถี่ที่ใช้งานได้มากที่สุดของสายอากาศ

ค่า f_L เป็นค่าความถี่ที่ใช้งานได้น้อยที่สุดของสายอากาศ และ

ค่า f_0 เป็นค่าความถี่ใช้งาน (Operating Frequency) ของสายอากาศ

2.1.2.5 ระดับลำคลื่นย่อย (Side Lobe Level) เป็นค่าผลต่างระหว่างระดับความสูงของลำคลื่นย่อย (dB) กับระดับความสูงของลำคลื่นหลัก (dB)

2.1.2.6 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to Back Ratio หรือ F/B Ratio) เป็นค่าผลต่างระหว่างระดับความสูงของลำคลื่นหลัก (dB) กับระดับความสูงของลำคลื่นหลัง (dB) ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้วัดค่าอัตราส่วนนี้กับจานดาวเทียมและสายอากาศยากิยูดา

2.1.2.7 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ *Zin* เป็นค่าที่ต้องคำนึงถึงเมื่อจะนำสายนำสัญญาณมาเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องส่งหรือเครื่องรับ ซึ่งโดยทั่วไป สายอากาศกับสายนำสัญญาณจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันหรือการแมตช์ชิ่งอิมพีแดนซ์ (Matching Impedance) เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นและกำลังของคลื่นที่ส่งออกไปจะมีค่ามากที่สุดที่ปลายสุดของโลบหลัก (เท่ากับค่าไดเรคติวิตี้) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) ถ้าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไม่เท่ากับสายนำสัญญาณ ก็ต้องมีการนำอุปกรณ์มาช่วยหรือมาแปลงค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะทำให้เกิดการแมตช์ชิ่งอิมพีแดนซ์มากที่สุด เท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB

2.1.2.8 การแมตช์ชิ่งสายอากาศ หมายถึง การทำแมตช์ชิ่งอิมพีแดนซ์ โดยอิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศ (Z_A) จะต้องมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ (Z_0) ซึ่งค่ามาตรฐานของ Z_0 ได้แก่ ค่า 50 Ω, ค่า 75 Ω และค่า 300 Ω

ในทางปฏิบัติ การแมตช์ชิ่งสายอากาศจะเกิดขึ้น 3 กรณี ดังนี้

1. ถ้าค่า $Z_A = Z_0$ ผลที่ได้รับคือ ไม่เกิดการสะท้อนคลื่น
2. ถ้าค่า $Z_A \neq Z_0$ ผลที่ได้รับคือ เกิดการสะท้อนคลื่น
3. ถ้าค่า $Z_A = 0$ หรือค่า $Z_A = \infty$ (แสดงถึง การเกิดการลัดวงจรและการเปิดวงจรตามลำดับ) ผลที่ได้รับคือ เกิดการสะท้อนคลื่นกลับหมด (Total Reflection)

ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงการแมตช์ชิ่งสายอากาศ ได้แก่

1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $(\Gamma) = \dfrac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}$
2. ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (RL) $= -20\log\left|\dfrac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}\right|$
3. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio หรือ VSWR) = $\dfrac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$ โดยทั่วไป ค่า VSWR ต้องมีค่าเป็นบวกและมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 ด้วย

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ *Zin* เป็นค่าที่ต้องคำนึงถึงเมื่อจะนำสายนำสัญญาณมาเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องส่งหรือเครื่องรับ ซึ่งโดยทั่วไป สายอากาศกับสายนำสัญญาณจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันหรือการแมตช์ชิ่งอิมพีแดนซ์ (Matching Impedance) เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) ถ้า

อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไม่เท่ากับสายนำสัญญาณ ก็ต้องมีการนำอุปกรณ์มาช่วยหรือมาแปลงค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะทำให้เกิดการแมตช์ซึ่งอิมพีแดนซ์มากที่สุด เท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับในทางปฏิบัติที่ต่ำกว่า -10 dB

2.1.2.9 โพลาไรเซชัน (Polarization) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดการเดินทางของคลื่น หากสายอากาศถูกวางในแนวนอน (Horizontal) ก็จะเกิดคลื่นโพลาไรเซชันในแนวนอน ในทางกลับกัน ถ้าหากสายอากาศวางในแนวดิ่ง (Vertical) ก็จะเกิดคลื่นโพลาไรเซชันแนวดิ่ง ส่วนโพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular) และวงรี (Elliptical) นั้น จะเกิดขึ้นได้จากโครงสร้างของสายอากาศเอง เช่น สายอากาศแบบเฮลิกซ์ (Helix) เป็นต้น

ความสำคัญของโพลาไรเซชัน คือ การรับคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบใด ก็ต้องรับด้วยสายอากาศที่มีโพลาไรเซชันแบบเดียวกัน จึงจะรับคลื่นได้ดีที่สุด เช่น ส่งคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแนวนอนออกมา ด้านรับก็จะต้องใช้สายอากาศที่มีโพลาไรเซชันแนวนอนรับ (Co-Polarization) จึงจะดีที่สุด หากใช้สายอากาศที่มีโพลาไรเซชันไม่ตรงกัน (Cross Polarization) ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณแย่ลงไปด้วยตัวประกอบที่เรียกว่า Polarization Factor (PLF) ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชันไม่ตรงกัน นิยามเป็นค่าฟังก์ชัน cos ของมุมระหว่างโพลาไรเซชันของคลื่นที่จะรับกับโพลาไรเซชันของสายอากาศรับ ซึ่งถ้าโพลาไรเซชันตรงกัน หรือ Co-Polarization มุมนี้จะเท่ากับ 0 และค่า PLF มีค่าเท่ากับ 1

2.2 สายอากาศไดโพลและสายอากาศโมโนโพล

2.2.1 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีสองขั้ว ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional มีโพลาไรเซชันตามแนวของเส้นลวดตัวนำ โดยสายอากาศไดโพลถูกแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามความยาวที่ใช้งาน ดังนี้

2.2.1.1 สายอากาศไดโพลที่มีความยาวสั้นมาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น $(l < \lambda/50)$ เรียกว่า Infinitesimal Dipole มีค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Resistance) ที่ต่ำมาก ประสิทธิภาพของสายอากาศต่ำ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และมีบีมวิดท์กว้าง

2.2.1.2 สายอากาศไดโพลที่มีความยาวสั้น เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น $(l < \lambda/10)$ เรียกว่า Small Dipole มีค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่ต่ำมาก ประสิทธิภาพของสายอากาศต่ำ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และมีบีมวิดท์ค่อนข้างกว้าง

2.2.1.3 สายอากาศไดโพลที่มีความยาวใกล้กับความยาวคลื่น $(l > \lambda/10)$ เรียกว่า Large Dipole มีค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่สูงขึ้นมาก มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็น

แบบ Omnidirectional และมีบีมวิดท์ที่แคบลง และยิ่งมีความยาวมากกว่าความยาวคลื่น ก็จะยิ่งทำให้มีบีมวิดท์กว้างขึ้นเท่านั้นและเกิด Side Lobe มาก

สายอากาศไดโพลที่มีความยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เป็นถูกใช้งานเป็นสายอากาศมาตรฐาน เรียกว่า สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-Wavelength Dipole หรือ $\lambda/2$ -Dipole) โดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ $\lambda/2$ -Dipole นี้มีค่าเท่ากับ 73 +j 42.5 Ω ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ ทำให้สามารถแมตซ์กันได้ และมีไดเรคติวิตี้เท่ากับ 2.15 dBi (หรือคิดเป็น 0 dBd) มีโพลาไรเซชันตามแนวการวางตัวของตัวนำ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ซึ่งสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับหัวต่อคอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มเติม ผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถออกแบบแผงสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูก (Low Cost) ขนาดเล็กกะทัดรัด (Compact) และมีรูปทรงสัณฐานต่ำ (Low Profile) อีกทั้งยังให้คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศเป็นไปตามที่ต้องการได้ง่าย

2.2.2 สายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีขั้วเดียวที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และมีโพลาไรเซชันตามแนวของเส้นลวดตัวนำเช่นกัน สายอากาศโมโนโพลนี้เป็นสายอากาศที่วางตั้งเหนือกราวด์เพลน (Ground Plane) หรือพื้นดินโดยใช้ทฤษฎีเงา (Image Theory) ราวกับว่า มีเงาของสายอากาศโมโนโพลอยู่อีกข้างหนึ่ง ทำให้ดูประหนึ่งว่าเป็นสายอากาศไดโพล โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำมาก ในทำนองเดียวกับสายอากาศไดโพล สายอากาศโมโนโพลก็เป็นสายอากาศอีกประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับหัวต่อคอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม มาก ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มเติมเช่นกัน

2.3 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์

สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Antenna) นี้เป็นการออกแบบสายอากาศที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ ขึ้นมาใช้งานสมัยใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากที่มีการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแล้ว เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์นี้มีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำ (Patch) ที่วางอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งเรียกว่า ซับสเตรต (Substrate) โดยมีการป้อนกำลังงานแก่สายอากาศโมโนโพลโดยผ่านสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปและอาศัยกราวด์เพลน ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นกราวด์เพลนกึ่งอนันต์ของสายอากาศไปในตัว (เคาเตอร์โพซ หรือ Counterpoise) จึงทำให้สายอากาศโมโนโพลมีโครงสร้างเป็นแบบ

แบนราบ (Flat) บาง เบา เล็กกะทัดรัด ราคาถูก และโดยทั่วไปจะมีรูปทรงสัณฐานต่ำ กล่าวคือ ออกแบบง่าย แต่ประสิทธิภาพในการใช้งานของสายอากาศนั้นต่ำลง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คุณสมบัติของสายอากาศโมโนโพลโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ มีดังนี้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของนั้นมีทั้งแบบ Omnidirectional และแบบ Uni-Directional ขึ้นอยู่กับชนิดของ Patch ค่าไดเรคติวิตี้ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของ Patch และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของ Patch รวมถึงระบบการป้อนสัญญาณ (Feeder System) และโพลาไรเซชันขึ้นอยู่กับระบบการป้อนสัญญาณ

เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลที่สร้างขึ้นมาใช้งานนี้ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังนั้นค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการสร้างสายอากาศจึงมีค่าไม่เท่ากับค่าความยาวคลื่นในอากาศ $(\lambda \neq \lambda_0)$ ซึ่งหาค่าจากสมการที่ 1 ดังนี้

$$\lambda_g \approx \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{1}$$

เมื่อ $\lambda_0 = c/f$ เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ, λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Guided Waveguide) และ ε_{eff} เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ที่ซึ่งเราไม่สามารถจะนำเอาของสมการที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณไมโครสตริปมาใช้ได้ เพราะแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างสายอากาศโมโนโพลนี้ไม่มีกราวด์เพลน แต่เราสามารถที่จะประมาณค่า ε_{eff} นี้ได้จากสมการที่ 2[1]

$$\varepsilon_{eff} = 1 + \frac{\varepsilon_R - 1}{2}\left\{1 - \left[\frac{w_s/h}{1 + w_s/h}\right]\right\} \tag{2}$$

เมื่อ w_s เป็นความกว้างของสตริป

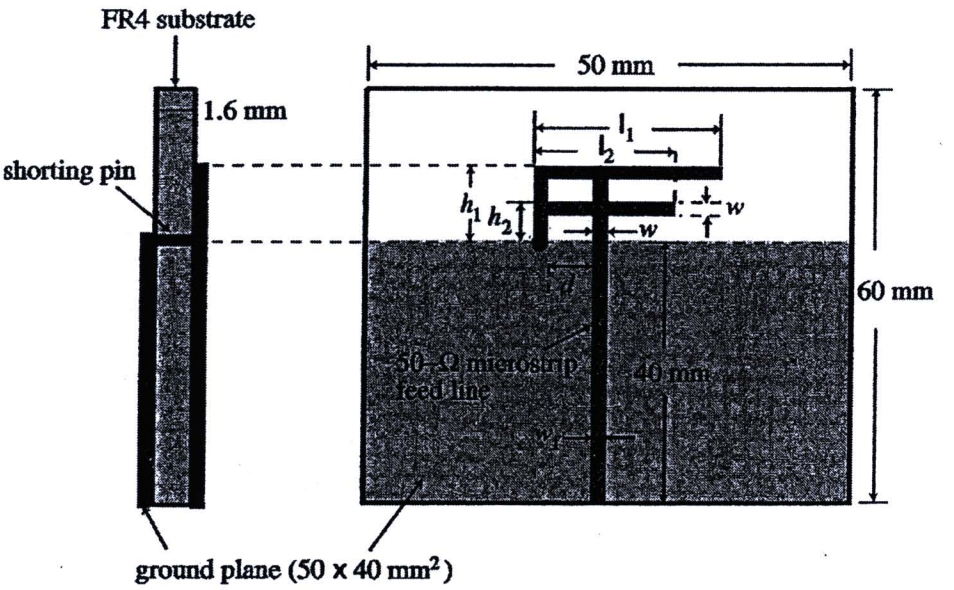
---

[1] C. Laohapensaeng, C. Free, and K.M. Lum. (2005, March). "Printed strip monopole antenna with the parasitic elements on the circular ground plane." **IWAT 2005**. pp. 371 – 374.

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y. L. Kuo *et al.* [1] ได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F แบบต่อกัน 2 ตัวบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ดังแสดงในภาพที่ 2.1 เพื่อรองรับการใช้งานในเครือข่าย WLAN ย่านความถี่ 2.4 และ 5.2 GHz และใช้การป้อนกำลังงานผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริปและหัวต่อ SMA 50 โอห์ม โดยความยาวของสตริปตัวนำหรือสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz มีความยาวเท่ากับ 31 mm และที่ใช้งานย่านความถี่สูง 5.2 GHz มีความยาวเท่ากับ 20 mm อีกทั้งมีการใช้พิน (Pin) เป็นตัวลัดวงจรให้แก่สตริปตัวนำที่เป็นสายอากาศ 2 ตัวนี้ลงกราวด์เพลน หลักการสำคัญที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลชนิดนี้ก็คือ ***"ความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านความถี่สูงที่วางตัวในแนวดิ่งเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านของความถี่ต่ำ"*** โดยมีการปรับระยะห่างระหว่างจุดที่ลัดวงจรกับสายนำสัญญาณไมโครสตริป 50 โอห์มเพื่อทำให้เกิดการแมทช์ซิ่งอิมพีแดนซ์ที่ดี ค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ที่ได้จากพิจารณาค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ -14 dB สำหรับย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 645 MHz และ 255 MHz ตามลำดับ ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าต่ำสุด -18 dB ที่ความถี่ 2.5 GHz และที่ย่านความถี่สูงมีค่าต่ำสุด -29 dB ที่ความถี่ 5.2 GHz

F-Shaped Monopole Antenna

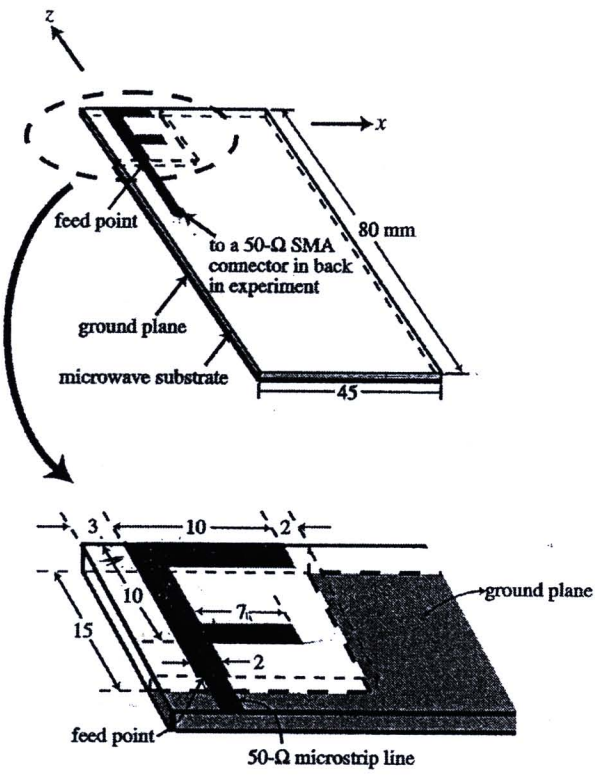


ภาพที่ 2.1 สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F แบบต่อกัน 2 ตัว [1]

---

[1] Y. L. Kuo, T. W. Chiou, and K. L. Wong. (2001, December). "A novel dual-band printed inverted-F antenna." **Microwave Opt. Technol. Letter. 31.** pp. 353 - 355.

S. H. Yeh *et al.*[1] ได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F (F-Shaped Monopole Antenna) บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 โดยมีกราวด์เพลนอยู่อีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ความกว้างของสตริปตัวนำรูปตัว F มีค่าเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ 2 mm สตริปตัวนำในแนวนอนด้านบนห่างจากสตริปตัวนำในแนวนอนด้านล่างประมาณ 6 - 8 mm ความยาวของสตริปตัวนำหรือสายอากาศโมโนโพล (ยาว $\lambda_g/4$) ด้านบนที่ใช้งานย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz มีความยาวเท่ากับ 23 mm และความยาวของสตริปตัวนำด้านล่างที่ใช้งานย่านความถี่สูง 5.25 GHz มีความยาวเท่ากับ 12 mm โดยค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่ต่ำและที่ย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 570 MHz และ 280 MHz ตามลำดับ ส่วนสาเหตุที่แบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ย่านความถี่สูงมีค่าน้อยกว่าย่านความถี่ต่ำ คือ ผลกระทบของกราวด์เพลนที่มีต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่สูงมีมากกว่าย่านความถี่ต่ำ หลักการที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลชนิดนี้ก็คือ ***"ความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านความถี่สูงที่วางตัวในแนวดิ่งเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านของความถี่ต่ำ"***



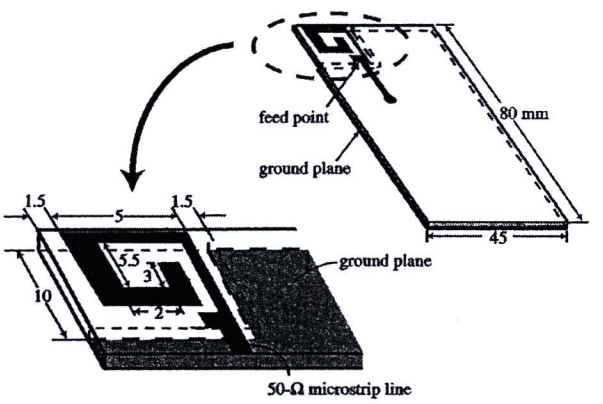
ภาพที่ 2.2 สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F[1]

---

[1] S. H. Yeh and K. L. Wong. (2002, July). "Integrated F-shaped monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation." **Microwave Opt. Technol. Letter. 34.** pp. 24 - 26.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

H. C. Tung *et al.* [1] ได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปก้นหอยแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Spiral Monopole Antenna) บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ขนาด 45×80 mm^2 ที่ใช้งานในย่านความถี่ 2.4 และ 5.2 GHz ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยใช้ โดยขนาดพื้นที่ของตัวสายอากาศโมโนโพลรูปก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 5×10 mm^2 และขนาดที่ล้อมรอบสายอากาศนี้มีค่าเท่ากับ 8×10 mm^2 โดยไม่มีกราวด์เพลนที่ด้านล่างของสายอากาศ ความยาวรวมของสตริปตัวนำที่ขดเป็นก้นหอยมีความยาวเท่ากับ 30 mm ซึ่งยาวเป็น $\lambda_g/4$ ของความยาวคลื่นใช้งานย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz ความกว้างของสตริปที่ใช้งานถูกแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกมีความหนาเท่ากับ 0.5 mm พิจารณาความยาวตั้งแต่จุดป้อนสัญญาณไปจนถึงท่อนที่ 2 ของสตริปตัวนำ ส่วนที่เหลือของสตริปตัวนำมีความกว้างเท่ากับ 1 mm โดยจุดป้อนสัญญาณจะถูกปรับให้สูงขึ้นหรือต่ำลงเพื่อให้ได้สามารถทำงานรองรับทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ใช้งานได้ นอกจากนี้ มีสตับ (Stub) เล็กๆ ยื่นออกมาที่จุดป้อนสัญญาณเพื่อที่จะทำการแมชชิ่งอิมพีแดนซ์กับคอนเน็กเตอร์ SMA ขนาด 50 โอห์ม สายอากาศชนิดนี้ให้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 156 MHz และ 540 MHz ที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง ตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 สายอากาศโมโนโพลรูปก้นหอยแบบสี่เหลี่ยม [1]

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีโครงสร้างใหม่และรองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และ ย่านความถี่สูงในช่วง 1.8 – 2.6 GHz

[1] H. C. Tung, W. S. Chen, and K. L. Wong. "Integrated rectangular spiral monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation." **IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp. Dig. 3.** pp. 446 - 449.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 29 ก.ย. 2554
เลขทะเบียน 242459

เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบสื่อสารไร้สาย GSM1800, GSM1900, WCDMA/UMTS (3G), WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz ฯลฯ ได้ โดย 2 ย่านความถี่ใช้งานดังกล่าวนี้เป็นย่านความถี่ที่ใช้งานจริงในปัจจุบันและในอนาคตของประเทศไทย ที่ซึ่งยังไม่มีนักวิจัยท่านใดๆ นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ และยังไม่ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อขายและใช้งานจริงในประเทศไทย จึงไม่มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรนี้กับวงจรอื่นๆ ที่ปรากฏในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ

หลักการสำคัญในเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอและเป็นโครงสร้างใหม่ได้นั้นจะอาศัยหลักการเดียวกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ กล่าวคือ “ความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านความถี่สูงที่วางตัวในแนวดิ่งเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านของความถี่ต่ำ” อีกทั้ง ยังมีการปรับความยาวของสตัป (Stub) เพิ่มเติม เพื่อทำการแมทช์ชิ่งอิมพีแดนซ์และลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกราวด์เพลน ทำให้สามารถรองรับการทำงานที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่นำเสนอได้