

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ

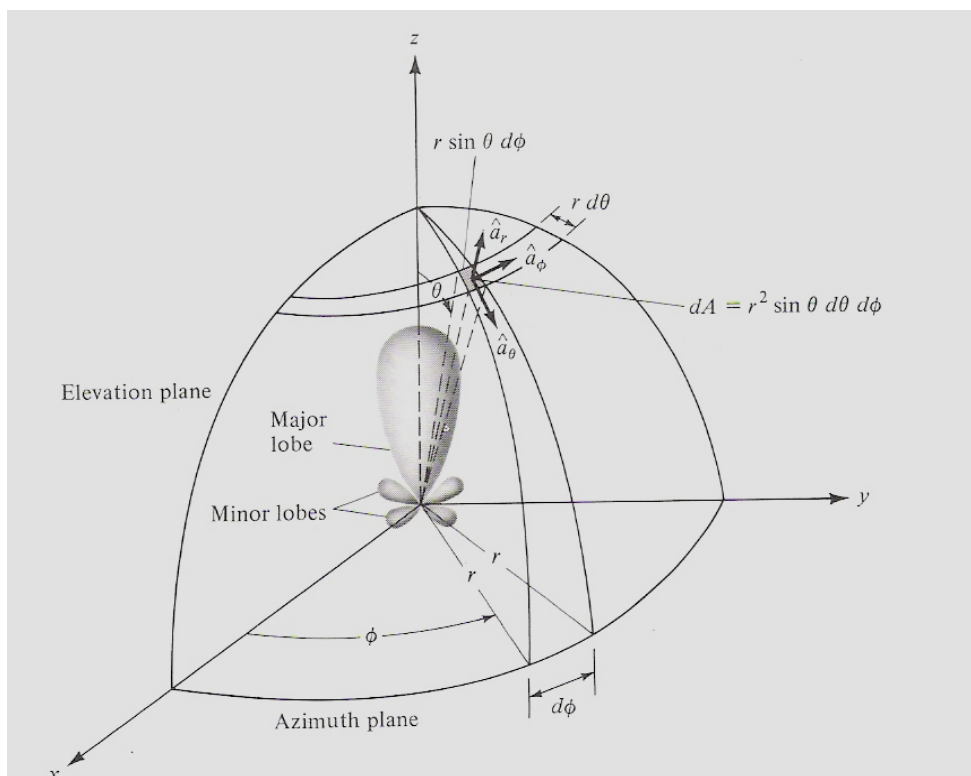
2.1 บทนำ

ในปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในย่านความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นบางประการ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และต้นทุนต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัยและพัฒนาารูปแบบของสายอากาศไมโครสตริปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหนึ่งในรูปแบบนั้นก็คือ สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดคือ สามารถทำให้มีแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลได้ทั้งแบบทิศทางเดียว (unidirectional) และแบบสองทิศทาง (bidirectional) อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชัน (polarization) น้อยกว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นนอกจากนั้นการส-โพลาไรเซชัน (cross polarization) ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น และเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศ ไมโครสตริปแบบช่องเปิดนั้นมีการแยกสายอากาศที่เป็นช่องเปิดกับตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งเป็นแบบไมโครสตริปไลน์อย่างอิสระต่อกัน ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและง่ายต่อการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์

2.2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.2.1 รูปแบบของการกระจายคลื่น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกรอบตัวสายอากาศจะมีลักษณะรูปร่างของการกระจายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรูปร่างต่างๆ กันเรียกว่า รูปแบบหรือแพทเทิร์น ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าการชี้ทิศทางหรือที่เรียกว่า ไดเรกทิวิตี (Directivity) นั่นคือ การกระจายพลังงานไปในทิศทางใดทิศทางเดียวและป้องกันการรบกวนจากสถานีอื่น ๆ การหารูปร่างของแพทเทิร์นหาได้โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ หรือการบวกเวกเตอร์ตำแหน่งต่าง ๆ รูปแบบของการกระจายคลื่นจะเป็นรูปทรงกลมซึ่งมีสายอากาศไดโพลอยู่ตรงจุดศูนย์กลางแพทเทิร์น การแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือรูปร่างที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดในอากาศ (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นนี้มักคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field) การอธิบายคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นจะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือ โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

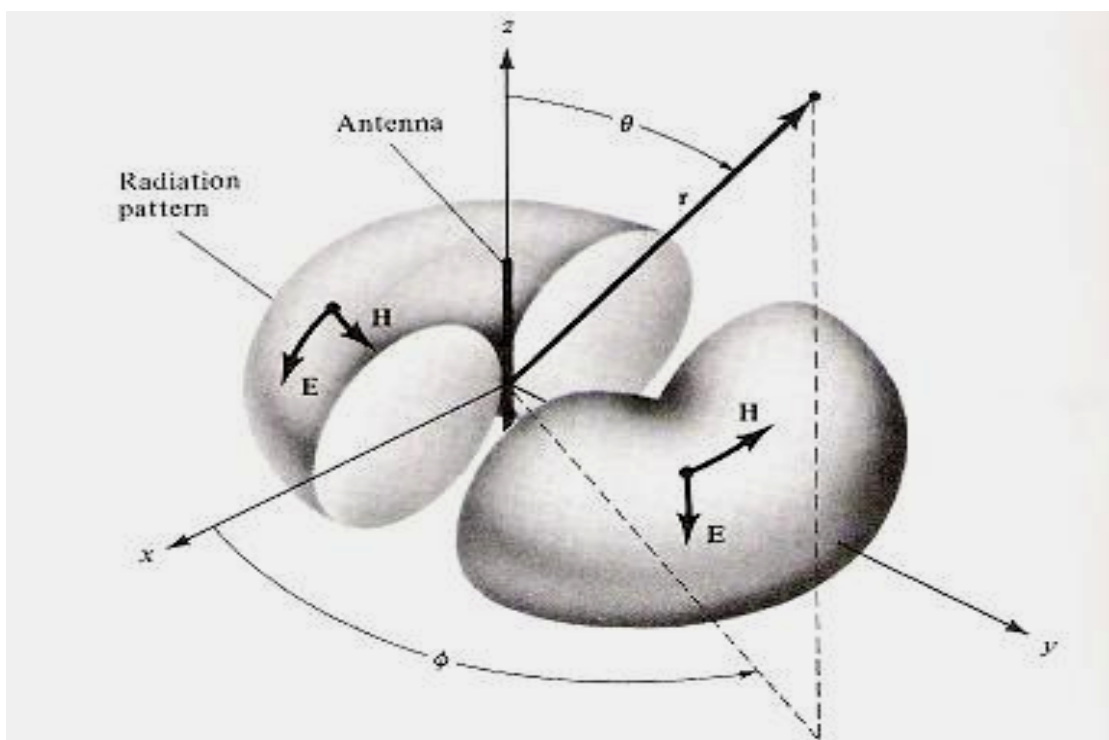


รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

รูปที่ 2.1 แสดงระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการ ใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า แพทเทอรัน กำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทอรันสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

2.2.1.1 รูปแบบไอโซโทรปิก ไดเรกชันแนล และออมนิไดเรกชันแนล

ตัวแพร่คลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศในทางทฤษฎีที่ถูก สมมติขึ้นโดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นในทุกทิศทางที่ระยะเท่ากันด้วยความเข้มสนาม ที่เท่ากัน ซึ่งเป็นสายอากาศที่ไม่สามารถสร้างได้จริงแต่จะใช้เพื่อเป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับสายอากาศ ที่สร้างจริงในเรื่องเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติในการแสดงทิศทางของสายอากาศ



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะแพทเทิร์นของสายอากาศแบบอิมนิไดเรกชันแนล

จากรูปที่ 2.2 เป็นการแสดงสายอากาศที่ไม่มีการชี้ทิศทางในระนาบแนวตั้ง แต่มีไดเรกทิวิตีในระนาบนอน เรียกรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ว่าอิมนิไดเรกชันแนล (Omnidirectional)

2.2.1.2 โลบของแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

โอบของการแพร่กระจายคลื่น เป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ที่เกิดเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ ดังรูปที่ 2.3 แสดงโพลาร์แพทเทิร์น (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโอบแบบต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1.2.1 เมเจอร์โอบ หรือ เมนโอบ (Major Lobe or Main Lobe)

เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.3 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโอบหลักมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแยก빔 (Split-Beam Antenna)

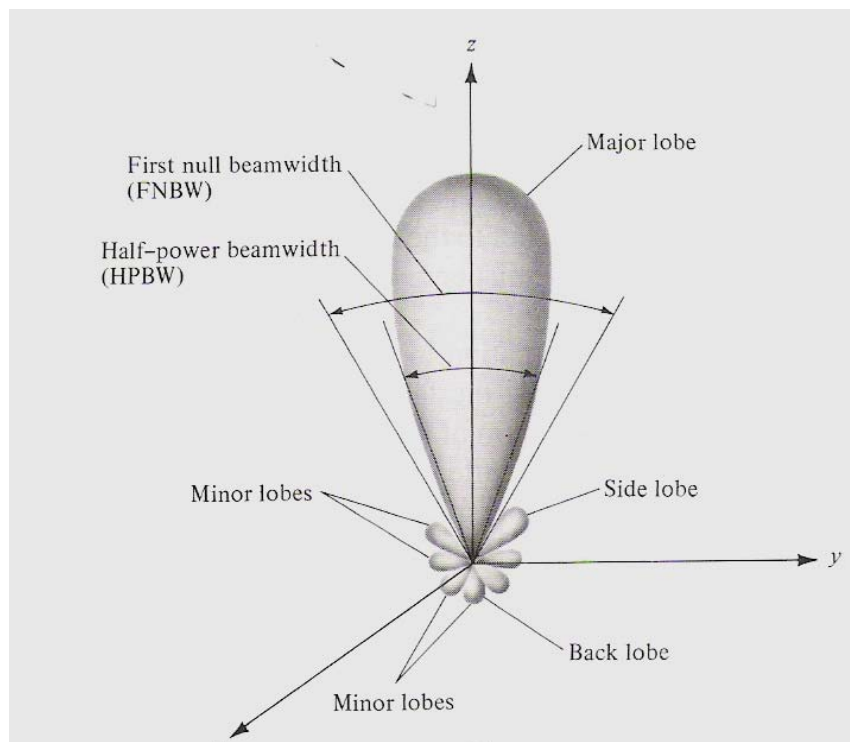
2.2.1.2.2 โอบย่อย (Minor Lobe) คือ โอบอื่น ๆ นอกเหนือไปจากโอบหลัก

2.2.1.2.3 โอบข้าง หรือ ไซด์โอบ (Side Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบ

หลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโอบหลัก

2.2.1.2.4 โลบหลัง (Back Lobe) เป็นโบล้อยที่อยู่ครึ่งวงกลมตรงกันข้าม

กับโบลหลัก



รูปที่ 2.3 แสดงโบลและบีมวิดท์แบบ 3 มิติของสายอากาศ

2.2.1.3 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วนคือ

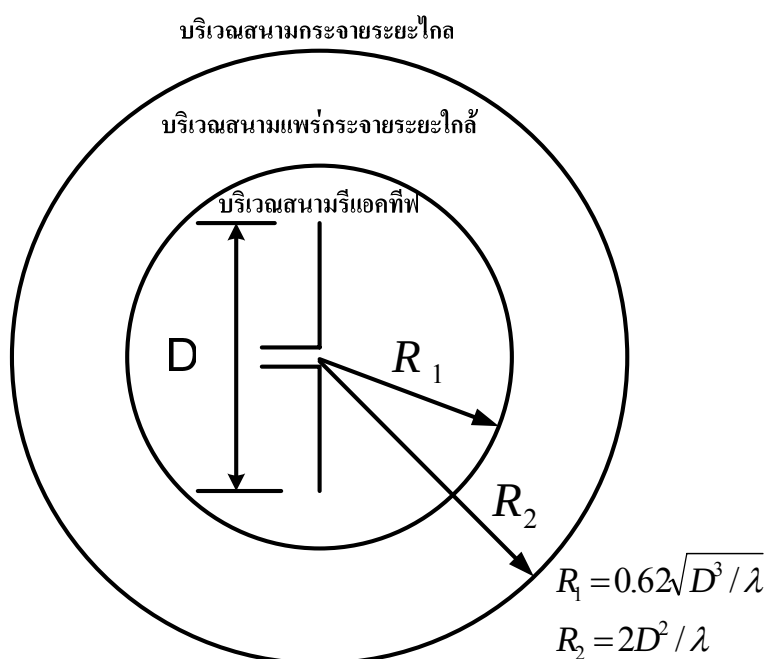
2.2.1.3.1 สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามที่มีชนิดเป็นรีแอกทีฟเสียเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทางของ $R < 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$ จากผิวของสายอากาศ

2.2.1.3.2 สนามที่แพร่กระจายระยะใกล้ (Radiating-Near Field) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แพร่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้น จะผันแปรตามระยะทาง ถ้าสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น สนามในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 \sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2D^2 / \lambda$ และขอบเขตเป็นอนันต์

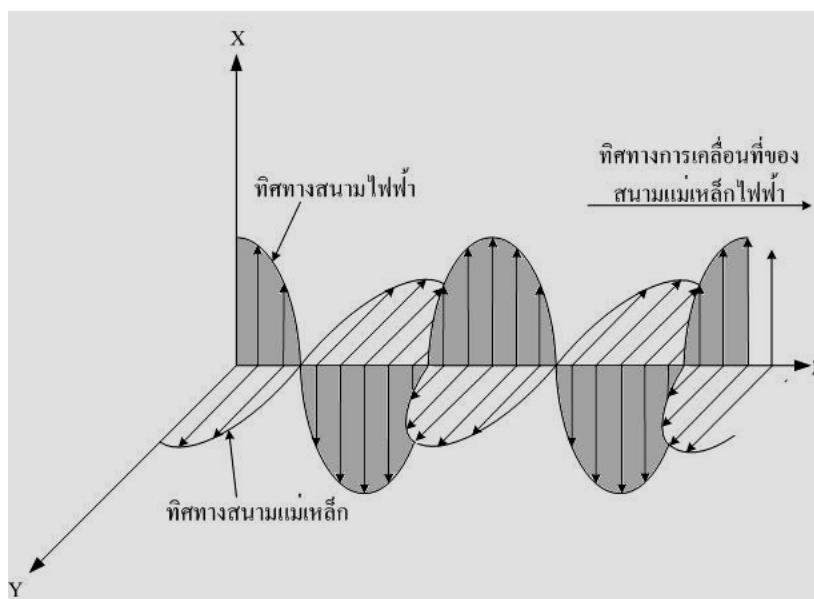
2.2.1.3.3 สนามระยะไกล (Far Field) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางจากสายอากาศ สนามในบริเวณนี้มีลักษณะเป็นเส้นตัดขวาง (Transverse Field) ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า $R = 2D^2 / \lambda$ และขอบนอกเป็นอนันต์

2.2.2 โพลาริเซชัน (Polarization)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจาย ออกจากสายอากาศประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สนามทั้งสองนี้จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน และสนามทั้งคู่ก็ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.5 ในที่นี้สนามไฟฟ้าจะอยู่ในระนาบ xz โดยที่คลื่นนี้มีโพลาไรเซชันในแนวราบ (สนามไฟฟ้าอยู่ในแนวดิ่ง เรียกว่า คลื่นนี้มีโพลาไรเซชันแนวดิ่ง) ทิศทางของสนามไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดทิศทางโพลาไรเซชัน ความสำคัญของโพลาไรเซชันอยู่ตรงที่คลื่นที่ส่งมา แบบโพลาไรเซชันในแนวดิ่งจะรับคลื่นด้วยสายอากาศที่วางตัวในแนวราบได้ดีกว่าสายอากาศที่วางตัวในแนวดิ่ง



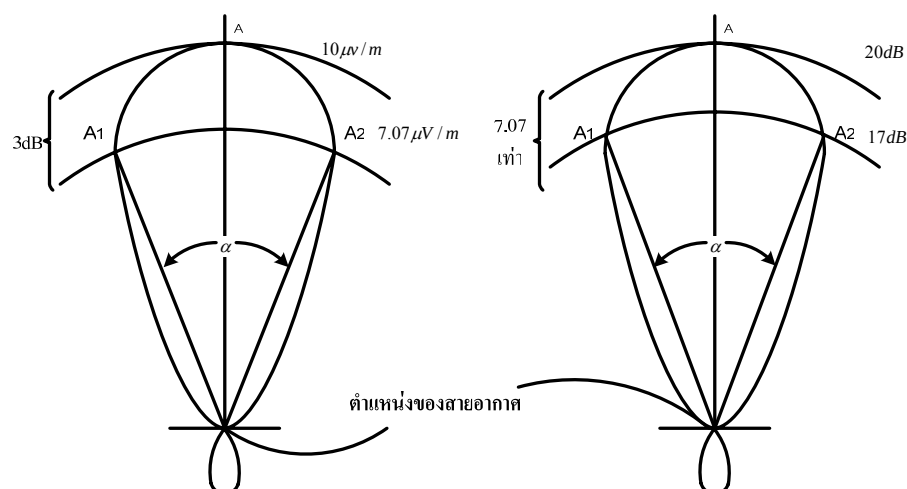
รูปที่ 2.4 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ



รูปที่ 2.5 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2.3 บีมวิทช์ (Beam width)

สายอากาศชนิดต่าง ๆ นั้นก็มีรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นต่างกัน วิธีหนึ่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบรูปแบบของการแพร่คลื่นก็คือ ดูจากลักษณะของรูปว่าทิศทางการแพร่คลื่นออกไปในลักษณะใดแทนที่จะเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่คลื่นทุก ๆ จุดความกว้างของคลื่น นั่นคือ บีมวิทช์ เป็นการวัดความกว้างของลำคลื่น โดยคิดจากมุมของลำคลื่นในทิศทางที่พุ่งแรงที่สุดคือ OA และอ่านค่าความกว้างระหว่างมุม OA_1 และ OA_2 มีความยาวลดลงเหลือ 0.707 เท่าของ OA หรือ OA_1 ส่วน OA_2 สั้นกว่า OA อยู่สามเดซิเบล นั่นคือลำคลื่นเท่ากับ ∞



รูปที่ 2.6 การวัดความกว้างของลำคลื่นในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

2.2.4 ไคเรคตีวิตี (Directivity)

ไคเรคตีวิตี คืออัตราส่วนของความเข้มของการกระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.1)$$

$$D_o = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.2)$$

เมื่อ D_g = ไคเรคตีวิตี

D_o = ไคเรคตีวิตี

U = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

U_o = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอส (W / หน่วยมุมตัน)

P_{rad} = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

โดยค่าไคเรคตีวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอสจะมีค่าเท่ากับหนึ่งเสมอ เนื่องจากว่ามันแพร่กระจายกำลังงานออกไปในทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่า ๆ กัน แต่สำหรับสายอากาศโดยทั่วไปแล้วย่อมมีไคเรคตีวิตีมากกว่าหนึ่งเสมอ

2.2.5 อัตราขยาย (Gain)

ในเรื่องของสายอากาศนั้นจะมีความหมายไม่เหมือนกับในเรื่องของวงจรขยาย ทั้งนี้เพราะสายอากาศเป็นอุปกรณ์พาสซีฟ (Passive Element) ไม่มีความสามารถในการขยายสัญญาณได้ อัตราการขยายในเรื่องของสายอากาศหมายถึง ความสามารถในการรับส่งคลื่นของสายอากาศนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน สายอากาศที่ใช้คือสายอากาศไดโพล ที่มีความยาวครึ่งคลื่น หรือมีแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด โดยรายละเอียดแล้วอัตราขยายในระบบสายอากาศจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ เช่นการสูญเสียในตัวสายอากาศ การไม่แมตช์กันระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ เป็นต้น

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไคเรคตีวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ขณะที่ไคเรคตีวิตีอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น อัตราขยายของสายอากาศ (Power Gain) และความสามารถในการชี้ทิศทาง (Directivity) ในทิศทางที่กำหนดให้

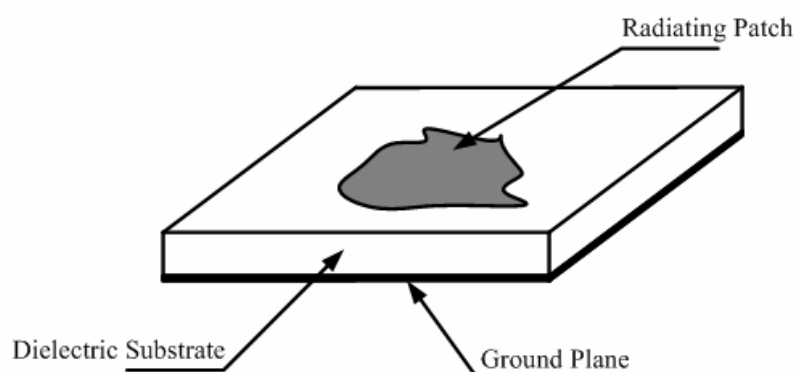
นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากหัวต่อของเครื่องส่ง ถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะจะคิดอัตราขยายสายอากาศในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.3)$$

โดยทั่วไปมักจะกล่าวถึงเกนสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตรหรือสายอากาศอื่น ๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว

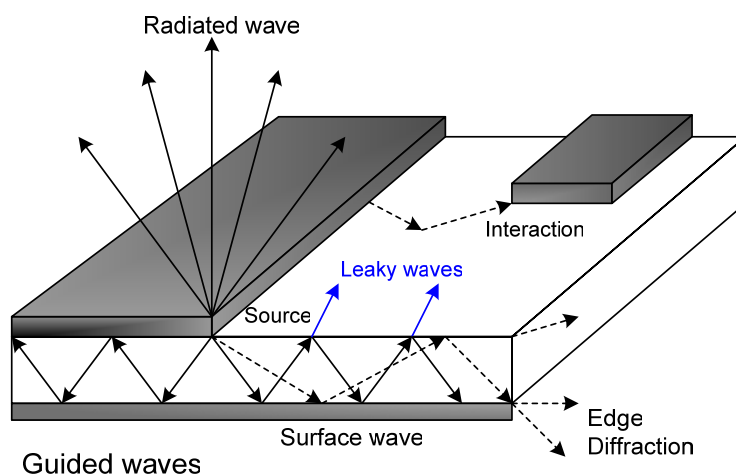
2.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป

ไมโครสตริปเป็นแผ่นวงจรที่ใช้กันอย่างมากในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยที่ลักษณะโครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำบาง ๆ ที่มีความสูญเสียพลังงานต่ำวางอยู่บนวัสดุที่เรียกว่าวัสดุฐานรอง และอีกด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ (ground plane) โดยโครงสร้างของไมโครสตริปนั้นสามารถจะนำไปเป็นวงจรที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ และสามารถนำไปเป็นสายอากาศสำหรับคลื่นความถี่ไมโครเวฟได้อีกด้วย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของไมโครสตริป

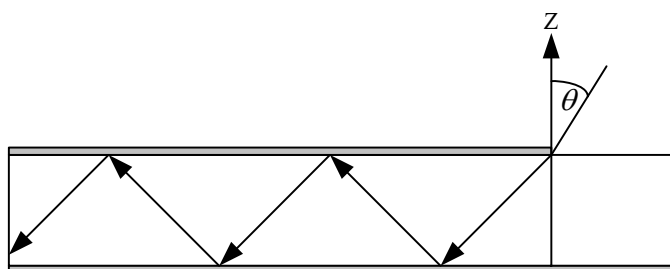
2.3.1 คลื่นที่แพร่กระจายในไมโครสตริป



รูปที่ 2.8 ลักษณะของคลื่นที่แพร่กระจายในไมโครสตริป

2.3.1.1 คลื่นนำทาง (guided wave)

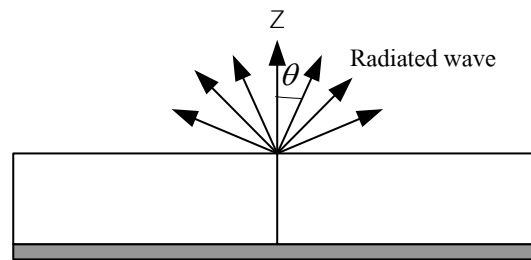
สำหรับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นนำทางนั้น จะมีลักษณะมุมของการแพร่กระจายทำมุมอยู่ระหว่างช่วง 6 ถึง 9 นาฬิกา (ทิศตามเข็มนาฬิกา) โดยลักษณะการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะแพร่กระจายอยู่เฉพาะในวัสดุฐานรอง และคลื่นจะสะท้อนไปมาระหว่างตัวนำสองตัว คลื่นนำทางนี้จะนำไปใช้อย่างมากกับสายส่งสัญญาณ สำหรับคลื่นแบบนี้มีส่วนในการสะสมพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการในสายอากาศแบบแผ่น เมื่อเลือกใช้วัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) สูง จะทำให้คลื่นแบบนี้มีอิทธิพลสูง



รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดคลื่นนำทาง

2.3.1.2 คลื่นแผ่พลังงาน (radiated wave)

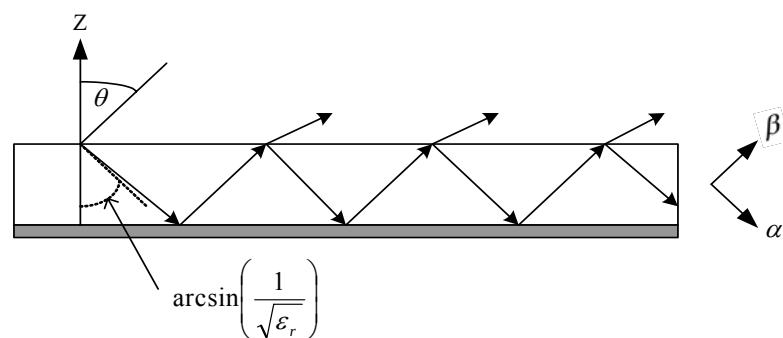
คลื่นแบบนี้จะมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นมุมที่อยู่ระหว่างช่วง 9 ถึง 3 นาฬิกา โดยจะมีทิศทางที่แพร่ขึ้นไปบนอากาศที่ไม่มีการปิดกั้นของขอบเขตใด ๆ ลักษณะของคลื่นแบบนี้ จะใช้มากในงานเกี่ยวกับสายอากาศ คลื่นแบบนี้จะมีอิทธิพลสูงเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนา (เปรียบเทียบกับความยาวคลื่น) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 2.9 ลักษณะคลื่นที่แพร่กระจายของคลื่นแผ่พลังงาน

2.3.1.3 คลื่นรั่ว (leaky wave)

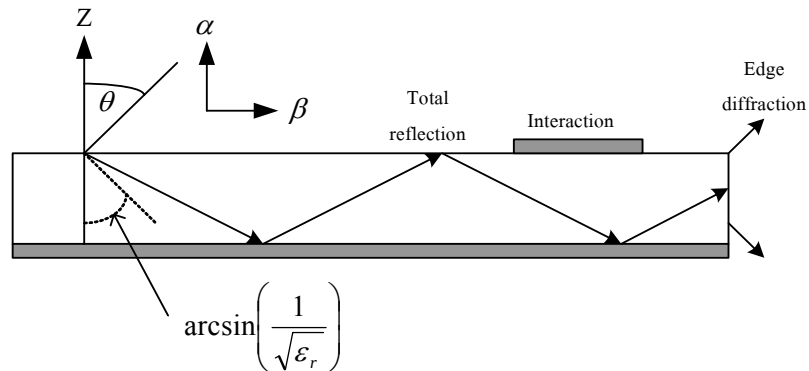
ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจะอยู่ในช่วง 3 ถึง 6 นาฬิกา โดยคลื่นรั่วนั้นจะแพร่กระจายมาจากคลื่นที่สะท้อนมาจากระนาบกราวด์ และไปยังจุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศกับ ฉนวน เมื่อคลื่นที่สะท้อนมาถึงตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดคลื่นที่ถูกส่งไปในอากาศ นั่นคือ คลื่นรั่ว ออกจากคลื่นที่สะท้อนกลับลงไปในตัววัสดุฐานรอง (surface wave) ลักษณะของคลื่นรั่วที่เกิดขึ้นนี้ จะถูกนำไปช่วยในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะอยู่ในเงื่อนไขของความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในแต่ละสายอากาศ เช่น ทำให้มีสภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) ที่สูง เวกเตอร์ α จะมีทิศทางพุ่งลงข้างล่างแสดงทิศทางที่มีการลดทอนสูง และ β จะมีทิศทางที่พุ่งขึ้นออกสู่อากาศ โดยมีการลดทอนที่น้อยกว่า ซึ่งเวกเตอร์ทั้งสองจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดคลื่นรั่ว

2.3.1.4 คลื่นผิว (surface wave)

มุมในการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าของคลื่นร่ว จึงทำให้เกิดคลื่นที่สะท้อนกลับมายังวัสดุฐานรอง ซึ่งเรียกคลื่นแบบนี้ว่าคลื่นผิว เมื่อคลื่นผิวถูกส่งมาที่ขอบของโครงสร้างดังรูป จะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกมาจากโครงสร้าง คลื่นที่แพร่กระจายออกมานี้ทำให้เกิดผลเสียต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ คือ ทำให้พลังงานในการส่งหรือรับน้อยลง ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะมีความสำคัญเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาและสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าสูง



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นผิว

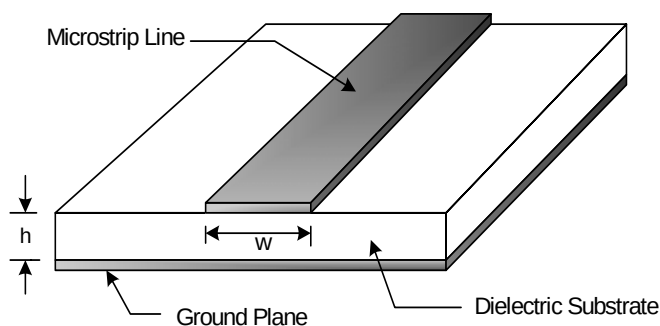
เวกเตอร์ α พุ่งขึ้นข้างบนแสดงทิศทางที่มีการลดทอนสูง และตามแนวแกนนอน β จะชี้มาในสารฉนวน ทิศทางทั้งสองจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน คลื่นผิวจะแผ่ขยายในรูปแบบทรงกระบอกรอบจุดกำเนิด เมื่อคลื่นผิวถูกส่งมาที่ขอบของโครงสร้างดังรูป จะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกมาจากโครงสร้าง คลื่นที่แพร่กระจายออกมานี้ทำให้เกิดผลเสียต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ คือ ทำให้พลังงานในการส่งหรือรับน้อยลง ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะมีความสำคัญเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาและสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าสูง คลื่นถูกนำทางจะถูกกระตุ้นมากที่สุด ขณะที่จะต้องหลีกเลี่ยงคลื่นแผ่พลังงาน คลื่นร่ว และคลื่นผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นสายอากาศจะต้องการให้เกิดคลื่นแผ่พลังงานมากที่สุด และจะต้องป้องกันการเกิดคลื่นนำทางในแผ่นตัวนำและคลื่นผิว

2.3.1.5 ความต้องการคลื่นในสายส่งสัญญาณและสายอากาศ

ในการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งสัญญาณนั้น คลื่นถูกนำทางจะถูกกระตุ้นมากที่สุด ขณะที่จะต้องหลีกเลี่ยงคลื่นแผ่พลังงาน คลื่นร่ว และคลื่นผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นสายอากาศจะต้องการให้เกิดคลื่นแผ่พลังงานมากที่สุด และจะต้องป้องกันการเกิดคลื่นนำทางในแผ่นตัวนำ และคลื่นผิว

2.4 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

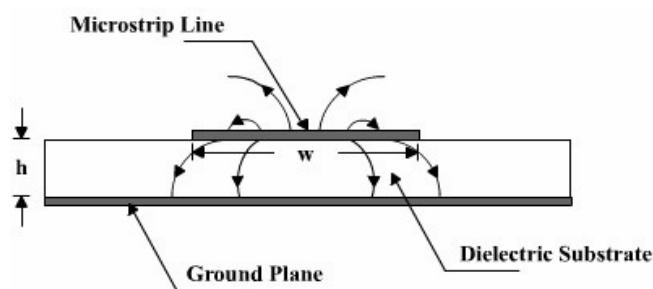
สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) ที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 กล่าวคือ จะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบ ๆ อยู่บนวัสดุฐานรอง ซึ่งเป็นสารฉนวน และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบ กับระนาบกราวด์ ความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างของสายไมโครสตริปนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ที่ต้องการ สำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารฉนวน โดยเทียบกับอากาศว่า ค่านี้จะส่งผลทำให้คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปมีการเปลี่ยนแปลง ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) ที่ความถี่ 10 GHz คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสดิสเพลซเมนต์ ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารฉนวนนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสมาก น้อยเพียงใด โดยที่ค่ายิ่งต่ำก็ยิ่งดี ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าสารฉนวนนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี สุดท้ายค่าความขรุขระของผิวและความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งความขรุขระของผิวนั้นจัดว่ามีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน เพราะจะมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นไปตามสายไมโครสตริป เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่า สำหรับความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นจะบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าสูงจะดีกว่าค่าต่ำ



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

2.4.1 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

ถึงแม้สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างง่าย ๆ แต่การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปโดยละเอียดในทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณชนิดอื่น อย่างไรก็ตามได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่า คลื่นที่ส่งผ่านไปตามสายไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM มาก แต่จะไม่ใช่โหมด TEM เสียทีเดียวจึงเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่า โหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.13 โดยแสดงถึงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่ง



รูปที่ 2.13 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สัญญาณแบบไมโครสตริปที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้ สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าสามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ ก็จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ได้ อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าของสายคู่ขนานหรือสายโคแอกเซียล เพราะสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปมีทั้งสารที่เป็นฉนวนและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากการมีสารฉนวน

ถึงแม้การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่ก็มีวิธีที่ทำให้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (effective dielectric constant: ϵ_{eff}) ของระบบ ซึ่งจะรวมผลของสารฉนวนและอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารฉนวนทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองของผู้เชี่ยวชาญพบว่า ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมา ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากกรณีของไฟฟ้าสถิตน้อยมาก จึงสามารถอนุโลมให้ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

ประสิทธิภาพของไฟฟ้าสถิตได้ สำหรับในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz ก็ต้องคำนึงถึงการปรับแต่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้งาน

ในการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้น จะใช้แนวคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้ คือ เมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปไมโครสตริปเป็นโหมด TEM คุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ (Z_c) ของสายส่งสัญญาณ จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (C) ได้ในรูปแบบต่อไปนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

ในขณะเดียวกันความเร็วเฟส V_p จะเขียนได้เป็น

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.5) นี้ทำให้เขียน Z_c ในรูปของ V_p กับ L หรือ C ได้ดังนี้

$$Z_c = V_p L \quad (2.6)$$

ในขั้นต่อไปจะพิจารณากรณีที่วัสดุฐานรองที่เป็นสารฉนวนถูกเอาออกไปเหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปอยู่ ในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านจะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนไป โดยที่ค่าอินดักแตนซ์ไม่ถูกกระทบ ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนี้มีค่าเป็น C_o จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C_o กับความเร็วเฟสในรูปแบบต่อไปนี้

$$C = \frac{1}{\sqrt{LC_o}} \quad (2.7)$$

ในขณะเดียวกันค่าคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ (Z_o) ก็จะเขียนได้ดังนี้

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C_o}} \quad (2.8)$$

เมื่อนำสมการ (2.7) หารด้วยสมการ (2.5) จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C}{C_o} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (2.9)$$

ตามนิยามทั่วไปค่าของ C/C_o คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสารฉนวนที่โอบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ ค่านี้จะเปรียบเหมือนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองเป็นสารฉนวนและด้านบนเป็นอากาศอยู่ นั่นคือ

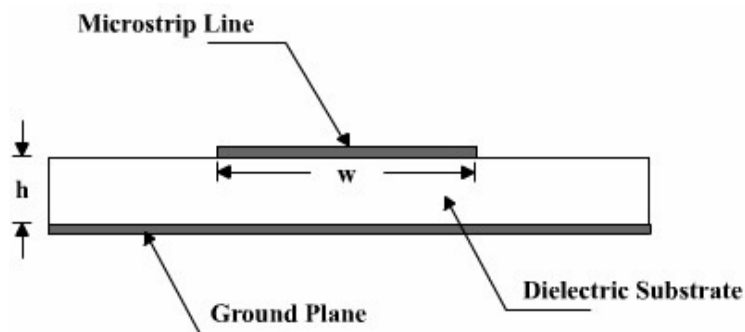
$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.3) ถึงสมการ (2.7) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c, Z_o และ ϵ_{eff} ได้ดังนี้

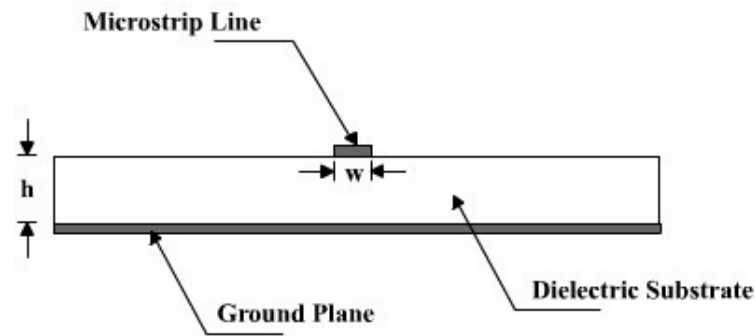
$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.11)$$

$$Z_o = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (2.12)$$

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{Z_o}{Z_c} \right)^2 \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.14 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$



รูปที่ 2.15 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \ll 1$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าสามารถรู้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลได้ก็จะทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นตามมาได้ อย่างไรก็ตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของสายไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่งพิจารณาได้ 2 กรณี ดังต่อไปนี้ กรณีแรกคือกรณีที่ $w/h \gg 1$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างบริเวณที่มีแถบสตริปกับระนาบกราวด์ สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรอง สำหรับกรณีที่สองคือกรณีที่ $w/h \ll 1$ แสดงดังรูปที่ 2.15 ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าจะผ่านวัสดุฐานรองครึ่งหนึ่งและผ่านอากาศครึ่งหนึ่งซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1)/2$ จากที่อธิบายมานี้จะเห็นได้ว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h ดังนั้นจึงได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่สามารถออกแบบได้ดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.14)$$

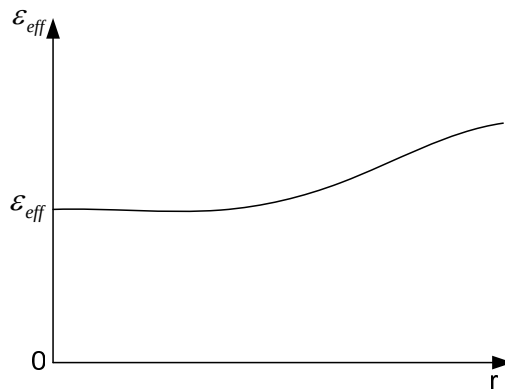
และเพื่อความสะดวกในการคำนวณและการออกแบบต่อไป ได้มีการเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลในรูปต่อไปนี้

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad ; \quad \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.15)$$

ค่า q ในสมการ (2.15) นี้ ถูกเรียกว่าฟิลลิงแฟกเตอร์ (filling factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารฉนวนจะมีผลต่อโครงสร้างไมโครสตริปมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการ (2.15) ค่า q ก็จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h

ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงขึ้นกว่า 2 GHz จะใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปความเร็วเฟสก็จะเปลี่ยนไปด้วย จึงทำให้ได้ผลดังสมการ

$$\epsilon_{eff}(f) = \left(\frac{c}{v_p(f)} \right)^2 \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการที่ (2.16) นี้ จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะอยู่เข้าหากรณีของไฟฟ้าสถิตและเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเข้าหาค่าอนันต์ จะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลอยู่เข้าสู่ ϵ_r ของวัสดุฐานรอง เพราะความเร็วเฟสจะเข้าสู่ความเร็วของแสงในสารฉนวนที่เป็นวัสดุฐานรอง ดังนั้นโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามความถี่จะเป็นไปตามรูปที่ 2.16 ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลนั้นจะสูงขึ้นตามความถี่

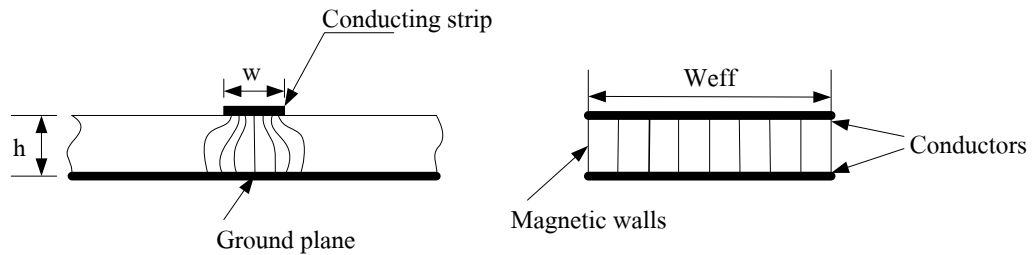
2.4.2 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป

เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบและมีสารฉนวนคั่นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้นการลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากทั้งสองสาเหตุนี้ เมื่อพิจารณาว่าไมโครสตริปส่งผ่านคลื่นในโหมด TEM จะสามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} \equiv \alpha_m + \alpha_d \quad (2.17)$$

โดยที่ α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะและฉนวนตามลำดับ การหาค่า α_m โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำให้ลำบากมากเพราะการ

กระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความสลับซับซ้อนมากเช่นเดียวกับการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h และความหนาของแถบสตริป t อีกด้วย ในทางปฏิบัติจึงมักใช้วิธีคิดที่ง่ายขึ้น โดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 เสร็จแล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าว แล้วจึงนำผลที่ได้นั้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น K จะได้ α_m ในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.17 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma_r}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \quad \text{Nep/m} \quad (2.18)$$

โดยที่ σ_r คือค่าคงตัวของ การนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative conductivity) ที่เทียบกับทองแดงซึ่งมี $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m ค่า K นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า w/h และความถี่ โดยที่ในกรณีที่ค่า w/h มีค่าใหญ่มากๆ ซึ่งหมายถึงคลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติ ค่า K ก็จะลู่เข้าหา 1 ในกรณีสลับกัน คือ $w/h \ll 1$ ค่า K ก็จะลู่เข้าหา 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่ากรณีที่ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็น 50 Ω โดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $K = 0.63$ สำหรับการหาค่า α_d ก็จะอาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2cC} (\omega C \tan \delta_{eff}) \quad (2.19)$$

$$= \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \quad \text{Nep/m} \quad (2.20)$$

โดยที่ค่า $\tan \delta_{eff}$ นั้นเปรียบเหมือนค่า $\tan \delta$ ประสิทธิภาพ ซึ่งจะสัมพันธ์กับ $\tan \delta$ ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \quad (2.21)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.18) นี้เป็นสิ่งที่สมเหตุสมผล เพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 ซึ่งหมายถึง

ตัวกลางเป็นอากาศ ค่า $\tan \alpha_{eff}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ ซึ่งหมายถึงตัวกลางจะเป็นสาร
ฉนวนทั้งหมด ค่า $\tan \alpha_{eff}$ จะเท่ากับ $\tan \delta$

เมื่อนำค่า α_m และ α_d ในสมการ (2.19) และสมการ (2.20) แทนกลับไปในสมการ
(2.17) ก็จะได้ค่า α ผลรวมออกมา และเนื่องจากนิยามเขียนค่า α ให้อยู่ในหน่วย dB/m เขียน
ความถี่ที่ใช้งานให้มีหน่วยเป็น GHz และเขียนความกว้างของแถบสตริปให้มีหน่วยเป็น mm ดังนั้น
 α จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1-(1/\epsilon_{eff})}{1-(1/\epsilon_r)} \tan \delta \quad \text{dB/m} \quad (2.22)$$

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า α_m แปรตาม $\sqrt{f}$ ในขณะที่ α_d แปรตาม f ซึ่งทำให้ดู
เหมือนว่า α_d จะมีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนาวัสดุฐานรองที่มี
คุณสมบัติดีขึ้น คือ มีค่า $\tan \delta$ ต่ำมาก ทำให้ในช่วงความถี่ที่ $f < 10$ GHz ค่า α_m จะใหญ่กว่าค่า α_d
และเป็นค่าการสูญเสียหลักของไมโครสตริป

2.4.3 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuities in microstrip)

2.4.3.1 แบบช่องต่อ (series gap)

คุณลักษณะของความไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้น
ถูกมองในลักษณะของค่าคาปาซิแตนซ์ โดยที่รูป 2.18 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่ง
สัญญาณไมโครสตริปแบบช่องต่อ ในการแปลงเป็นวงจรสมมูลที่บริเวณช่องต่อจะทำการแปลง
เป็นวงจรข่ายแบบ π ที่มีแต่ละองค์ประกอบของวงจรเป็นตัวเก็บประจุซึ่งสามารถหาค่าของแต่ละ
องค์ประกอบในวงจรสมมูลได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_1 = \frac{1}{2} C_e \quad (2.23)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_o - \frac{1}{4} C_e \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$C_o = w \left(\frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.8} \left(\frac{g}{w} \right)^{m_o} e^{K_o} \times 10^{-12} \quad (2.25)$$

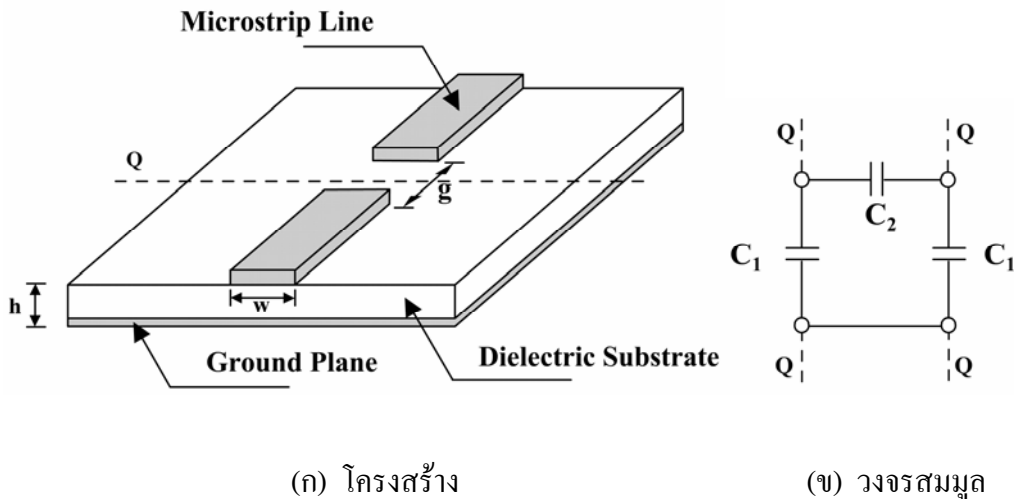
$$C_e = w \left(\frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.9} \left(\frac{g}{w} \right)^{m_e} e^{K_e} \times 10^{-12} \quad (2.26)$$

$$m_o = \frac{w}{h} \left(0.619 \log \frac{w}{h} - 0.3853 \right) \quad (2.27)$$

$$m_e = \begin{cases} 0.8675 & ; \text{for } \frac{g}{w} < 0.3 \\ \frac{1.565}{(w/h)^{0.16}} - 1 & ; \text{for } \frac{g}{w} > 0.3 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$K_0 = 4.26 - 1.453 \log \frac{w}{h} \quad (2.29)$$

$$K_e = 2.043 \left(\frac{w}{h} \right)^{0.12} \quad (2.30)$$



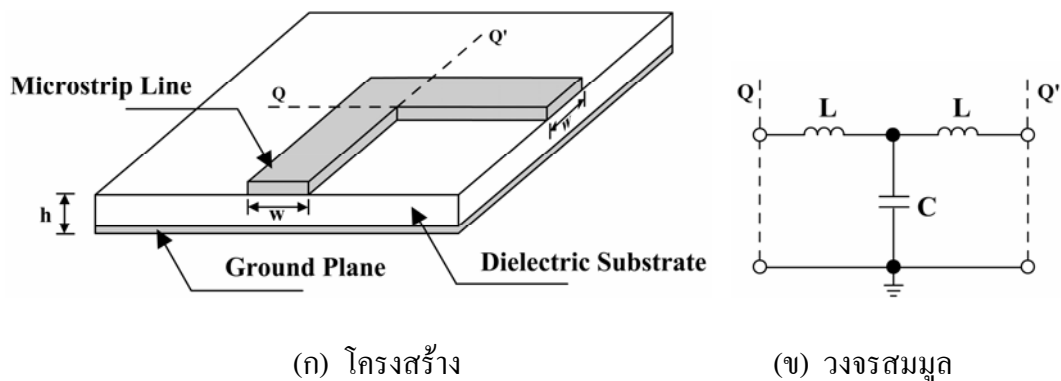
(ก) โครงสร้าง

(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.18 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อ

2.4.3.2 แบบมุมฉาก (right-angled)

การเปลี่ยนลักษณะของสายส่งไมโครสตริปจากเส้นตรงให้กลายเป็นมุมแบบมุมฉากนั้นทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องบนสายส่งไมโครสตริป โดยที่การเปลี่ยนรูปร่างในลักษณะนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณหรือการกรองสัญญาณ จากรูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก



รูปที่ 2.19 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก

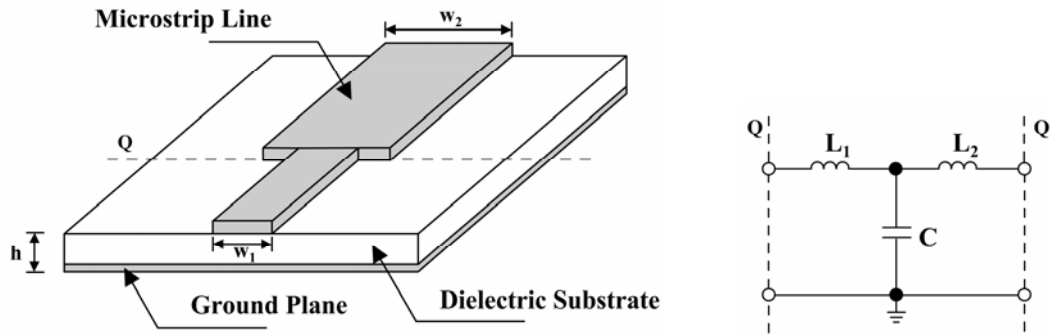
ในการแปลงวงจรสมมูลที่บริเวณมุมฉากนั้นจะทำการแปลงเป็นวงจรข่ายแบบ T โดยจะมีตัวเหนี่ยวนำสองตัวต่อกัน และมีตัวเก็บประจุต่อขนาน ซึ่งสามารถหาค่าของอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ของแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้

$$C = \begin{cases} w \left[\frac{(14\epsilon_r + 1)(w/h) - (1.83\epsilon_r - 2.25)}{\sqrt{w/h}} + \frac{0.02\epsilon_r}{w/h} \right] & ; \text{for } \frac{w}{h} < 1 \\ w[(9.5\epsilon_r + 1.25)(w/h) + 5.2\epsilon_r + 7] \times 10^{-12} & ; \text{for } \frac{w}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.31)$$

$$L = 100h \left(4\sqrt{\frac{w}{h}} - 4.21 \right) \times 10^{-9} \quad (2.32)$$

2.4.3.3 แบบขั้น (microstrip step)

การที่เปลี่ยนขนาดความกว้างของแผ่นไมโครสตริปจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งสัญญาณขึ้น ซึ่งการออกแบบให้แผ่นไมโครสตริปเกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ ส่วนใหญ่จะทำเมื่อต้องการทำแมตช์ตัวแปลงสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ และการส่งผ่านสัญญาณ จากรูปที่ 2.20 จะพบว่า การหาค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์สามารถพิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลในเทอมของอินดักแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.33)



(ก) โครงสร้าง

(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.20 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบขั้น

$$L_1 = \frac{L_{w1}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.33)$$

$$L_2 = \frac{L_{w2}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.34)$$

$$L = h \left[40.5 \left(\frac{w_1}{w_2} - 1 \right) - 75 \left(\frac{w_1}{w_2} \right) + 0.2 \left(\frac{w_1}{w_2} - 1 \right)^2 \right] \times 10^{-9} \quad (2.35)$$

เมื่อ L_{w1} และ L_{w2} เป็นตัวเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวของสายไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น w_1 และ w_2 ตามลำดับ

$$C = \sqrt{w_1 w_2} \left[(10.1 \log \epsilon_r + 2.33) \frac{w_1}{w_2} - 12.6 \log \epsilon_r - 3.17 \right] \quad (2.36)$$

2.4.3.4 แบบรูปตัว T (microstrip T-junction)

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T มีโครงสร้างและวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.21 จากโครงสร้างและวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่าแบบรูปตัว T นั้น จะมีลักษณะคล้ายรูปมุมฉาก การออกแบบให้สายส่งสายอากาศไมโครสตริปเกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในวงจรไมโครเวฟ เช่น เพื่อต้องการเพิ่มพอร์ทในการส่งสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ การทำแมตช์เพื่อเชื่อมต่อวงจรหรือนำไปใช้ออกแบบป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป จากวงจรสมมูลจะพบว่า การหาค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์นั้นสามารถที่จะพิจารณาในเทอมของอินดักแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์ โดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำที่อยู่พอร์ท Q' มีค่าเป็น L_1 ส่วนตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ทางด้านพอร์ท Q และพอร์ท Q' มีค่า

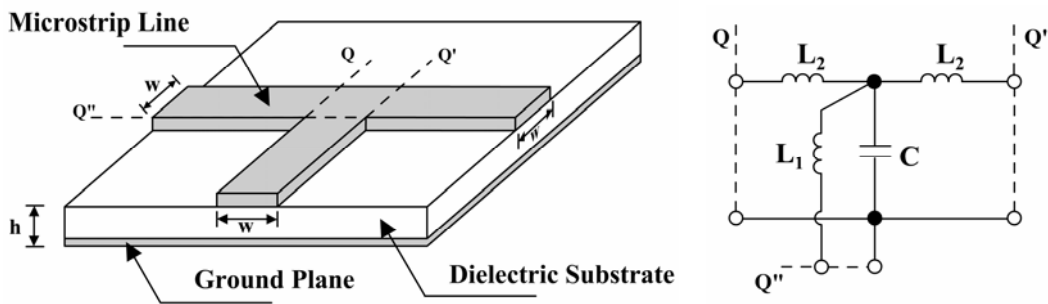
อินดักแตนซ์เป็น L_2 และมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ซึ่งค่าของแต่ละองค์ประกอบสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$L_1 = hL_w \left[\left(0.12 \frac{w}{h} - 0.47 \right) \frac{w}{h} + 0.195 \frac{w}{h} - 0.357 + 0.0283 \sin \left(\pi \frac{w}{h} - 0.75\pi \right) \right] \quad (2.37)$$

$$L_2 = -wL_w \left[\frac{w}{h} \left(-0.016 \frac{w}{h} + 0.064 \right) + \frac{0.016}{w/h} \right] \quad (2.38)$$

เมื่อ L_w เป็นค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น w

$$C = w \left[\frac{100}{\tanh(0.0072Z_o)} + 0.64Z_o - 261 \right] \times 10^{-12} \quad (2.39)$$



(ก) โครงสร้าง

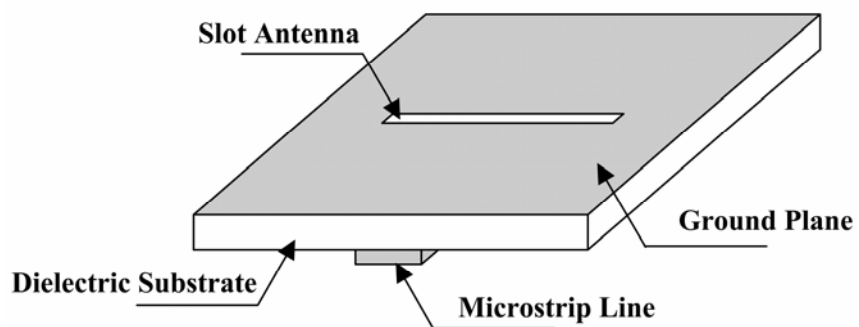
(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.21 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T

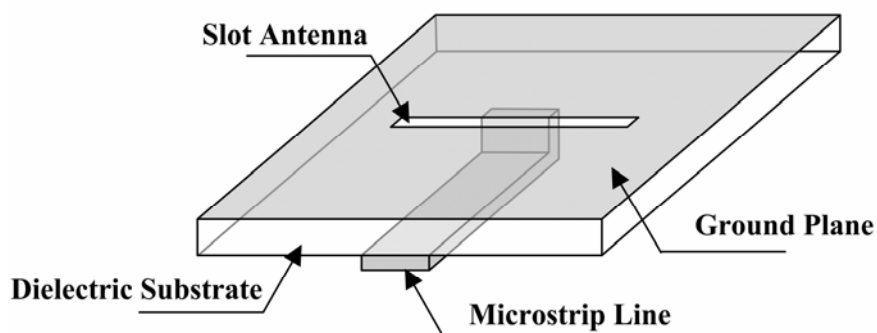
2.5 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด

2.5.1 โครงสร้างของสายอากาศ

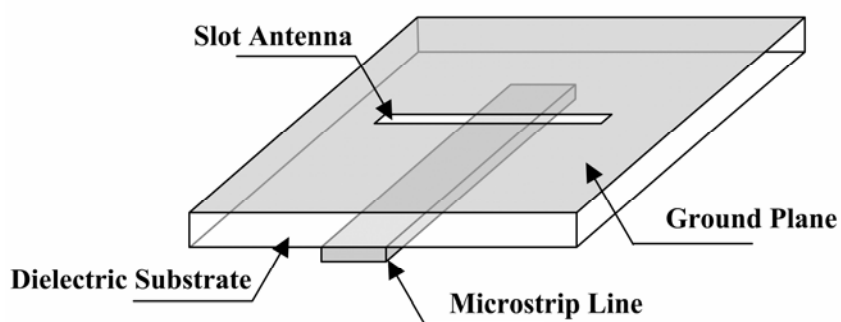
ลักษณะของโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดจะประกอบด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์และสายอากาศแบบช่องเปิดวางตั้งฉากกับไมโครสตริปไลน์อยู่บนระนาบกราวด์ โดยมีวัสดุฐานรองเป็นตัวกั้นกลางระหว่างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปกับสายอากาศแบบช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยลักษณะของการส่งผ่านสัญญาณของคลื่นนั้นจะมีอยู่ 2 แบบหลัก ๆ คือ แบบปิดวงจรซึ่งจะเป็นการต่อตัวนำจากสายส่งสัญญาณผ่านวัสดุฐานรองไปปิดวงจรที่ขอบของช่องเปิด (microstrip terminated in a short circuit) ดังรูปที่ 2.23 และอีกวิธีคือ แบบเปิดวงจร (microstrip terminated in an open circuit) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบปิดวงจร



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบเปิดวงจร

2.5.2 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบช่องเปิด

สายอากาศแบบช่องเปิดนั้นจะมีการกระจายคลื่นผ่านหลายตัวกลางซึ่งเกิดเนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นอยู่ที่บริเวณหนึ่ง ส่วนคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศจะกระจายไปในอีกบริเวณหนึ่งซึ่งมีตัวกลางที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 จากรูปแสดงการเดินทางของคลื่นจากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 โดยที่ตัวกลางที่ 1 ถูกปิดล้อมด้วยผิวปิด S' ถ้าตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 มีค่าคงที่ของตัวกลางไม่เหมือนกันหรือมีค่าอินทริกติกอิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ไม่เหมือนกัน คลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นเมื่อกระทบกับผิวขอบเขตจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ส่วนหนึ่ง และส่งผ่านคลื่นเข้าไปในตัวกลางที่ 2 อีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นถ้าให้ $\vec{E}^i$ และ $\vec{H}^i$ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่น โดยที่ $\vec{E}^r$ และ $\vec{H}^r$ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนที่ผิวขอบเขต ส่วน $\vec{E}^t$ และ $\vec{H}^t$ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ดังนั้นในตัวกลางที่ 1 คลื่นที่ปรากฏอยู่ก็คือผลบวกระหว่างคลื่นตกกระทบกับคลื่นสะท้อนรวมกันส่วนในตัวกลางที่ 2 นั้นก็จะมีเพียงคลื่นที่ส่งผ่าน โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{E}_t^i + \vec{E}_t^r = \vec{E}_t^t \quad (2.40)$$

$$\vec{H}_t^i + \vec{H}_t^r = \vec{H}_t^t \quad (2.41)$$

โดยที่ตัวห้อย t หมายถึง ส่วนประกอบของสนามในแนวขนานกับผิวขอบเขต

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตรงผิวขอบเขตนั้น จึงสามารถคิดได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสมมูลและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่กระจายอยู่บนขอบเขตในรูปสมการต่อไปนี้

$$\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}_t^i \quad (2.42)$$

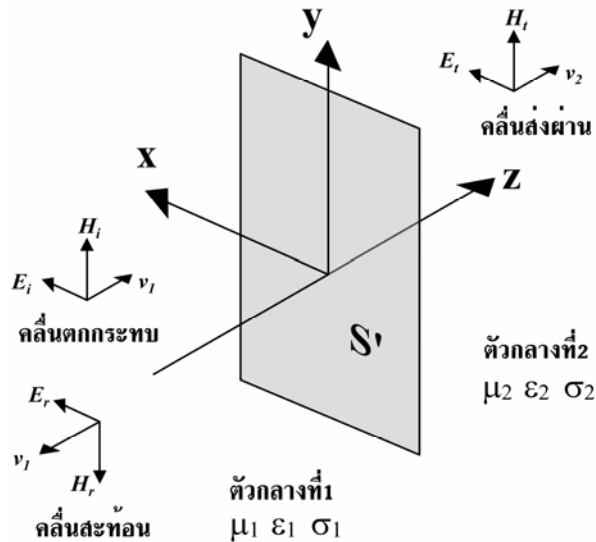
$$\vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E}_t^i \quad (2.43)$$

โดยที่

$\vec{J}$ คือ กระแสไฟฟ้าสมมูล

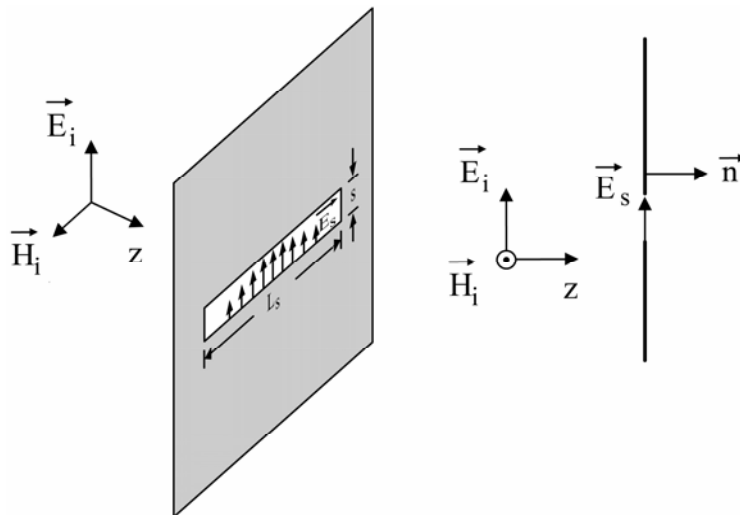
$\vec{M}$ คือ กระแสแม่เหล็กสมมูล

$\vec{n}$ คือ เวกเตอร์หน่วยที่ผิวขอบเขต



รูปที่ 2.25 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น

เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ากระทบแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบที่มีช่องเปิดแคบ ๆ ดังรูปที่ 2.26 โดยมีทิศของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแนวของช่องเปิด และถ้าให้ความกว้างของช่องเปิด (S) มีค่าน้อย ๆ นั้น หมายความว่าช่องเปิดแคบมาก ๆ กระแสไฟฟ้าสมมูล ($\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}^i$) จะมีขนาดจำกัดและเมื่อให้ S เข้าใกล้ศูนย์ กระแสไฟฟ้าสมมูลที่วางนี้อาจตัดทิ้งได้เพราะเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก แต่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูล ($\vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E}^i$) นั้น ไม่สามารถที่จะตัดทิ้งได้เพราะเมื่อ S เข้าใกล้ศูนย์ สนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดจะลู่เข้าหาอนันต์จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

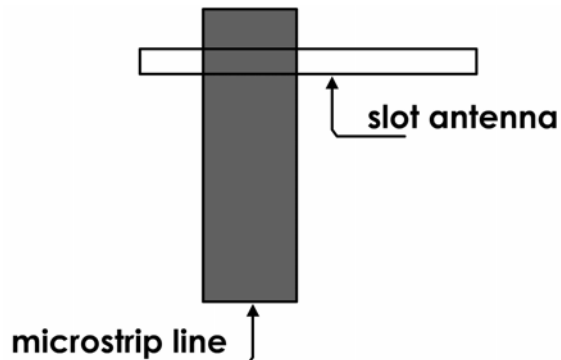


รูปที่ 2.26 การกระจายคลื่นจากช่องเปิด

2.5.3 การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิด

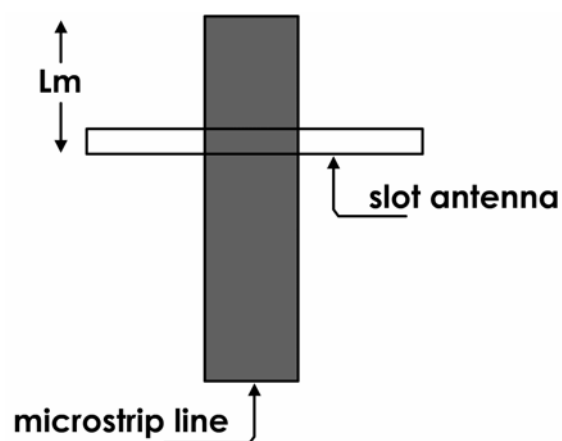
วิธีในการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดนั้น โดยพื้นฐานจะมีด้วยกัน 3 วิธี คือ

1) วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (offset microstrip feeding) เป็นวิธีเลื่อนหรือเปลี่ยนตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ โดยเลื่อนไปทางซ้ายหรือทางขวาเท่านั้นดังรูปที่ 2.27



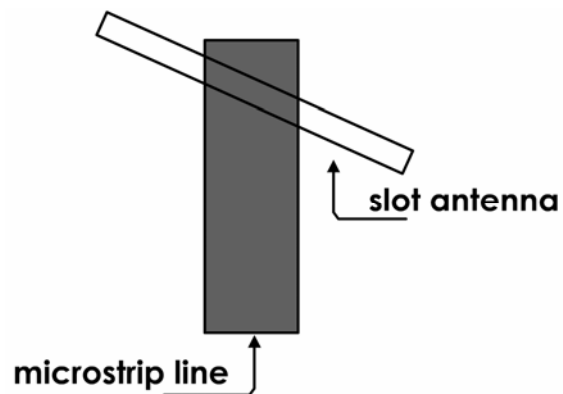
รูปที่ 2.27 วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ

2) วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น (stub-tuning) โดยวิธีนี้จะเป็นการเปลี่ยนขนาดความยาวของสายส่งสัญญาณ จากรูปที่ 2.28 กำหนดให้ L_m เป็นความยาวของท่อนสั้นวัดเทียบจากขอบของช่องเปิดจนถึงปลายสายส่งสัญญาณ การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์วิธีนี้จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ด้วย



รูปที่ 2.28 วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น

3) วิธีการหุ้มช่องเปิด (center-fed but inclined microstripline feed) วิธีการนี้คือการทำให้ช่องเปิดไม่ตั้งฉากกับสายส่งสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.29 ซึ่งการทำแมตช์อิมพีแดนซ์วิธีนี้จะมี ความยุ่งยากและไม่ค่อยได้รับความนิยม



รูปที่ 2.29 วิธีการหุ้มช่องเปิด

2.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยได้อธิบายถึง โครงสร้างพื้นฐาน ลักษณะการส่งผ่านคลื่นและความไม่ต่อเนื่องบนสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ที่มีทั้งแบบช่องต่อ แบบมุมฉาก แบบขั้นและแบบรูปตัว T นอกจากนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีของ สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ได้แก่คุณลักษณะทั่วไป โครงสร้างพื้นฐาน การแพร่กระจาย คลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด และอธิบายการทำแมตช์อิมพีแดนซ์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ เป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด