

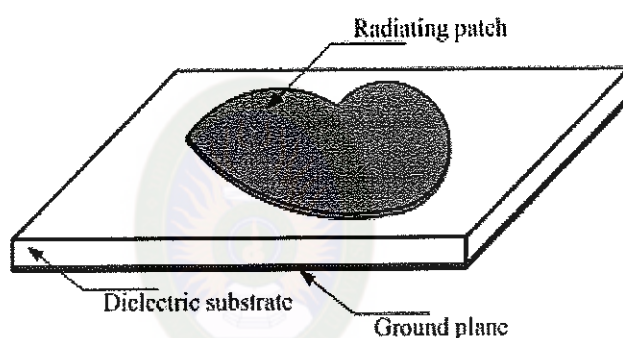
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายอากาศแบบไมโครสตริป

สายอากาศแบบไมโครสตริป [12] ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญคือ แผ่นตัวนำชั้นวัสดุฐานรอง และระนาบกราวด์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป

2.1.1 แผ่นตัวนำ (Radiating patch)

แผ่นตัวนำมีลักษณะเป็นแผ่น โลหะแบบบาง ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน และมีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อมและการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ดี สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปทำจากทองแดง ทองคำ หรืออลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่าง ต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นตัวนำนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศและความยากง่ายในการผลิต นอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำยังเป็นปัจจัยที่กำหนดความถี่ใช้งาน และส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงาน อินพุตอิมพีแดนซ์ ปัจจุบันแผ่นตัวนำที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปวงกลมและสี่เหลี่ยม เนื่องจากการผลิตและปรับแต่งสามารถทำได้ง่ายและคุณสมบัติไม่ต่างไปจากแผ่นตัวนำรูปอื่นมากนัก

2.1.2 ชั้นวัสดุฐานรอง (Dielectric substrate)

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลของสายอากาศไมโครสตริป การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น จนกระทั่งความหนาต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 การแผ่พลังงานจะมีปริมาณลดลง พลังงานที่สะสมในชั้นวัสดุฐานรองมีค่าเกือบคงที่ (ประมาณ 0.02 %) ซึ่งสามารถละเลยได้

การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากจะต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะและสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองขนาดใหญ่สำหรับแผงสายอากาศได้ นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุโดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

วัสดุที่ใช้ควรเป็นสารเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสาร ไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ในเนื้อสาร ขนาดของแผ่นตัวนำจะมีค่าแปรผกผันกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยที่กำหนดลักษณะของสายอากาศเช่นเดียวกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ซึ่งควรจะมีค่าต่ำ เนื่องจากวัสดุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้สายอากาศมีสมรรถนะสูง

2.1.2.2 ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan \delta$)

ค่านี้แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสเสียดสเฟลซเมนต์ โดยเมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นคาปาซิเตอร์ ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยค่านี้ควรจะมีค่าต่ำกว่า 0.001 เพื่อลดพลังงานสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

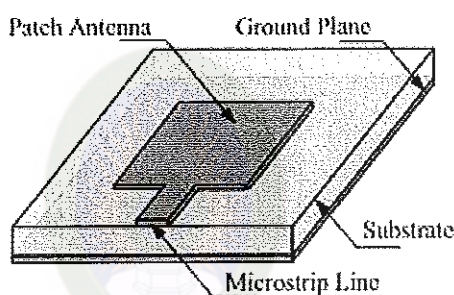
2.1.2.3 ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่านี้ยิ่งสูงยิ่งดี

เปิด (Microstrip Slot Antennas) สายอากาศไมโครสตริปแบบไดโพล (Microstrip Dipole Antennas) และสายอากาศไมโครสตริปแบบคลื่นเดินทาง (Microstrip Traveling-Wave Antennas)

2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Microstrip Patch Antennas)

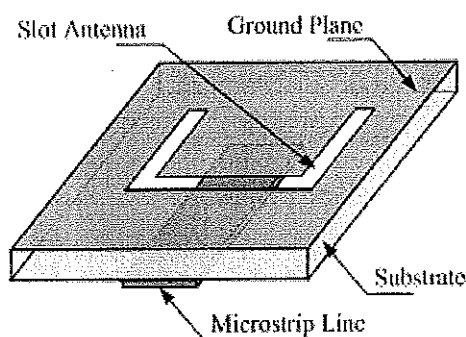
สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น ประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำ ซึ่งจะอยู่ด้านบนหนึ่งของวัสดุฐานรอง และในด้านตรงข้ามก็จะเป็นระนาบกราวด์ โดยรูปแบบพื้นฐานของแผ่นตัวนำที่ใช้งานกันทั่วไปแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และในส่วนของ การแพร่กระจายคลื่นของแผ่นตัวนำในแต่ละแบบก็จะมีลักษณะที่คล้าย ๆ กัน แม้ว่าจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และแบบวงกลม จะเป็นรูปร่างที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง



รูปที่ 2.2 สายอากาศแบบแผ่น (Patch antenna)
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

2.2.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Microstrip Slot Antennas)

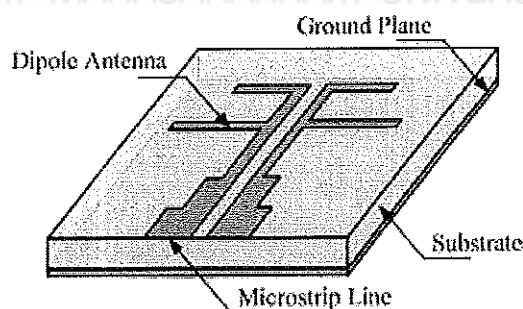
สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดจะมีการเจาะช่องเปิดในระนาบกราวด์ ซึ่งรูปร่างช่องเปิดนี้สามารถทำได้เกือบทุกรูปร่าง ตามทฤษฎีแล้วรูปร่างของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นส่วนใหญ่ สามารถนำมาใช้ได้จริงกับสายอากาศแบบช่องเปิด แต่อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษารูปร่างของช่องเปิดเพียงไม่กี่แบบเท่านั้น ซึ่งประกอบไปด้วย ช่องเปิดสี่เหลี่ยม ช่องเปิดวงแหวน ช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (rectangular ring slot) และแบบเรียว (tapered slot) และสิ่งที่เหมือนกับสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นก็คือ สายอากาศแบบช่องเปิดสามารถจะป้อนสัญญาณได้ทั้งแบบป้อนด้วยสายส่งไมโครสตริป และแบบท่อนำคลื่นระนาบ (Coplanar waveguide) ก็ได้ สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด โดยทั่วไป จะมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง (bidirectional) นั่นคือสามารถที่จะแพร่กระจายสัญญาณออกไปทั้งสองด้านของช่องเปิด แต่การแพร่กระจายแบบทิศทางเดียวก็สามารถทำได้ โดยการใส่แผ่นสะท้อน (reflector plate) วางไว้อีกด้านหนึ่งของช่องเปิด



รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบช่องเปิด (Slot antenna)

2.2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบไดโพล (Microstrip Dipole Antennas)

ไมโครสตริปหรือแผ่นพิมพ์แบบไดโพล เมื่อเทียบกับสายอากาศแบบแผ่นสี่เหลี่ยมแล้ว จะมีความแตกต่างกันในด้านรูปทรง กล่าวคือ ความแตกต่างกันระหว่างอัตราส่วนความยาวกับความกว้าง ซึ่งความกว้างของไดโพลโดยปกติจะน้อยกว่า 0.05 เท่าของความยาวคลื่นในอากาศ แต่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลและแบบแผ่นจะคล้ายคลึงกัน เนื่องจากการแพร่กระจายของกระแสในแนวยาวจะมีความคล้ายกันนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเรื่องของความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น แบนด์วิธ (Bandwidth) และ cross-polarize มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งความน่าสนใจอยู่ที่คุณสมบัติเด่นหลายอย่างเช่น ขนาดเล็ก มี polarize แบบเชิงเส้น



รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบไดโพล (Dipole antenna)

2.2.4 สายอากาศไมโครสตริปแบบคลื่นเดินทาง (Microstrip Traveling-Wave

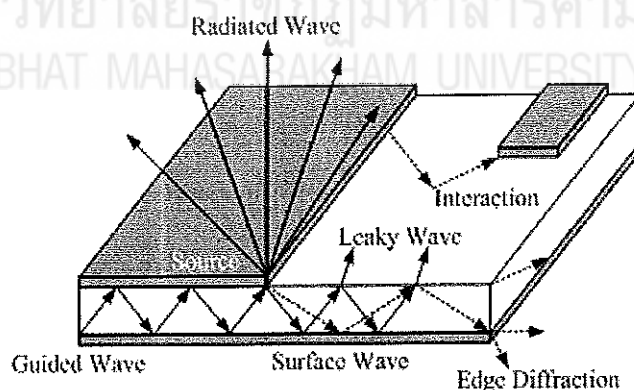
Antennas)

สายอากาศไมโครสตริปแบบคลื่นเดินทาง บางทีก็ประกอบไปด้วยตัวนำที่มีรูปร่างเหมือนกับไข่ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นรายคาบคือ มีรูปร่างที่ซ้ำ ๆ กัน หรือเป็นสายไมโครสตริปที่มีความกว้างมากพอที่จะรองรับคลื่นแบบทรานสเวอร์สอิเล็กทริกเวฟ (TE) ได้ โดยปลายสุดอีกด้านของสายอากาศแบบนี้จะต่อปลายด้วยโหลดที่เหมือนกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดคลื่นนิ่งในสายอากาศ

2.3 คลื่นที่แพร่กระจายในไมโครสตริป

2.3.1 คลื่นถูกนำทาง (Guided Wave)

สำหรับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นถูกนำทางนั้น จะมีลักษณะมุมของการแพร่กระจายทำมุมอยู่ระหว่างช่วง 6 ถึง 9 นาฬิกา (ทิศตามเข็มนาฬิกา) โดยลักษณะการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะแพร่กระจายอยู่เฉพาะในวัสดุฐานรอง และคลื่นจะสะท้อนไปมาระหว่างตัวนำสองตัว คลื่นถูกนำทางนี้จะนำไปใช้อย่างมากกับสายส่งสัญญาณ สำหรับคลื่นแบบนี้มีส่วนในการสะสมพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการในสายอากาศแบบแผ่น เมื่อเลือกใช้วัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) สูงจะทำให้คลื่นแบบนี้มีอิทธิพลสูง



รูปที่ 2.5 ลักษณะของคลื่นที่แพร่กระจายในไมโครสตริป

2.3.2 คลื่นแผ่พลังงาน (Radiated Wave)

คลื่นแบบนี้จะมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นมุมที่อยู่ระหว่างช่วง 9 ถึง 3 นาฬิกาโดยจะมีทิศทางการแผ่ขึ้นไปบนอากาศที่ไม่มีการปิดกั้นของขอบเขตใด ๆ ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะ

ใช้มากในงานเกี่ยวกับสายอากาศ คลื่นแบบนี้จะมีอิทธิพลสูงเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนา (เปรียบเทียบกับความยาวคลื่น) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำ

2.3.3 คลื่นรั่ว (Leaky Wave)

ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจะอยู่ในช่วง 3 ถึง 6 นาฬิกา โดยคลื่นรั่วนั้นจะแพร่กระจายมาจากคลื่นที่สะท้อนมาจากระนาบกราวด์ และไปยังจุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศกับไดอิเล็กตริก เมื่อคลื่นที่สะท้อนมาถึงตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดคลื่นที่ถูกส่งไปในอากาศนั่นคือ คลื่นรั่วออกจากคลื่นที่สะท้อนกลับลงไปในวัสดุฐานรอง (Surface Wave) ลักษณะของคลื่นรั่วที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปช่วยในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะอยู่ในเงื่อนไขของความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในแต่ละสายอากาศ เช่น ทำให้มีสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่สูง [13]

2.3.4 คลื่นผิว (Surface Wave)

มุมในการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าของคลื่นรั่ว จึงทำให้เกิดคลื่นที่สะท้อนกลับมายังวัสดุฐานรองจึงเรียกคลื่นแบบนี้ว่าคลื่นผิว เมื่อคลื่นผิวถูกส่งมาที่ขอบของ โครงสร้างดังรูป จะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกมาจากโครงสร้าง คลื่นที่แพร่กระจายออกมานี้ทำให้เกิดผลเสียต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ คือ ทำให้พลังงานในการส่งหรือรับน้อยลง ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะมีความสำคัญ เมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาและสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าสูง

2.3.5 ความต้องการคลื่นในสายส่งสัญญาณและสายอากาศ

ในการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งสัญญาณนั้น คลื่นถูกนำทางจะถูกกระตุ้นมากที่สุด ขณะที่จะต้องหลีกเลี่ยงคลื่นแผ่พลังงาน คลื่นรั่ว และคลื่นผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นสายอากาศจะต้องให้เกิดคลื่นแผ่พลังงานมากที่สุด และจะต้องป้องกันการเกิดคลื่นนำทางในแผ่นตัวนำ และคลื่นผิว

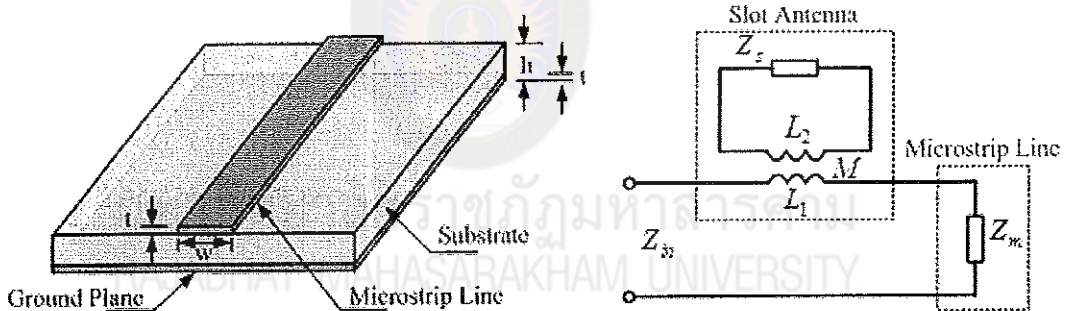
2.4 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

2.4.1 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้นได้รับความนิยมนำมาใช้งานกับความถี่ในย่านไมโครเวฟ เพราะมีข้อดีคือ ง่ายต่อการเชื่อมต่ออีกทั้งยังมีขนาดเล็ก รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบตัวนำแคบ ๆ วางอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ (ground plane) ซึ่งมีลักษณะเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุ

ฐานรอง (Substrate) บริเวณที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำแคบ ๆ กับผิวโลหะระนาบกราวด์ด้านล่าง ความหนาของวัสดุฐานรองนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าประมาณ 2 มิลลิเมตร หรือต่ำกว่าลงมา สายส่งแบบไมโครสตริปไม่มีการชิลด์สัญญาณที่ดีเนื่องจากไม่มีระนาบกราวด์ปิดด้านบนเหมือนสายป้อนแบบสตริปไลน์ ทำให้มี Radiation loss ค่อนข้างสูง เนื่องจากไม่มีระนาบกราวด์ด้านบนกั้นเอาไว้ และการที่แถบตัวของไมโครสตริปมีด้านบนสัมผัสกับอากาศ และด้านล่างสัมผัสไดอิเล็กตริก สนามไฟฟ้า E จึงแยกไปในอากาศส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือผ่านไปในสารไดอิเล็กตริก

แถบตัวนำกว้าง w หนา t ถูกวางอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยที่ความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสมบัติที่ต้องการ สำหรับความหนาของตัวสตริปนั้นจะมีค่าประมาณ 5 ไมโครเมตร หรือ 10 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแผ่นฟิล์มบางหรือแผ่นฟิล์มหนาในการสร้างสตริปนั้น สำหรับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r ของวัสดุฐานรองที่ใช้ งานมีการใช้งานอยู่มากมายหลายชนิด เช่น อลูมินา แซฟไฟร์ แก้ว ควอตซ์ ซึ่งมีค่า ϵ_r ตั้งแต่ 2 ถึง 12 ส่วนบนสารตัวนำจะเป็นอากาศที่มี $\epsilon_r = 1$



(a) โครงสร้างทางกายภาพ

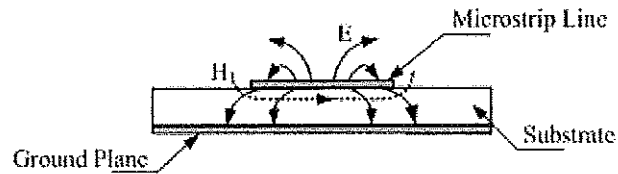
(b) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

2.4.2 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

การส่งผ่านคลื่นในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM มาก แต่จะไม่ใช่โหมด TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) รูปที่ 2.7 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป การที่มีสนามในแนวแกนอยู่บ้างนั้นเป็นเพราะโครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริก และอากาศอยู่ในระนาบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้น โหมดที่ส่งผ่านอยู่นั้นก็จะเป็นไฮบริดโหมด

การที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็น โหมด TEM นี้ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ โดยวิธีการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (effective dielectric constant: ϵ_{eff}) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสาร ไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกัน

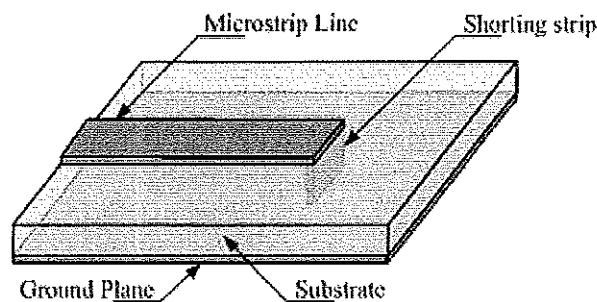


รูปที่ 2.7 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

2.4.3 การปิดและเปิดวงจรปลายสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

การปิดวงจรและการเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริปนั้นมีความจำเป็นเช่นเดียวกันกับสายนำสัญญาณทั่วไป เช่น ใช้ในการทำสวิตช์สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ก่อนอื่นจะกล่าวถึงการปิดวงจร และการเปิดวงจรตามลำดับ

การปิดวงจรปลายสายของไมโครสตริปนั้น ในย่านความถี่ใช้งานที่ต่ำกว่า 2 GHz นั้นส่วนใหญ่จะใช้วิธีเจาะรูที่ปลายสายและร้อยเส้นลวดพร้อมทั้งบัดกรีเข้ากับแถบสตริปด้านบนและแผ่นกราวด์ด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2.8

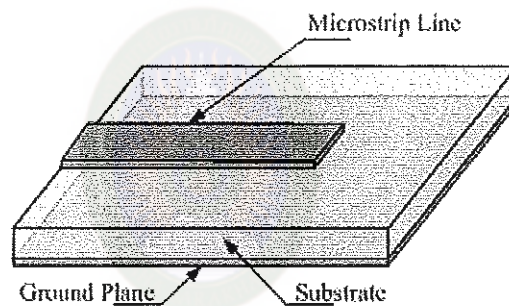


รูปที่ 2.8 การปิดวงจรปลายสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

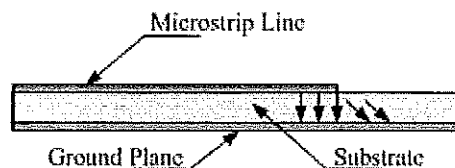
สำหรับการปิดวงจรสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนี้พบว่า จะใช้งานได้ดีถึงความถี่ประมาณ 2 GHz เท่านั้น เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่านี้ค่ารีแอกแตนซ์ของส่วนที่เป็นเส้นลวดปิดวงจรจะเริ่มมีปัญหา คือค่ารีแอกแตนซ์จะสูงจนไม่สามารถละลายได้ และที่เป็นปัญหามากก็คือค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ซึ่งทำให้ใช้งานได้ยาก

และสำหรับกรณีที่มี $Z_c = 50 \Omega$ นั้นรูที่ต่อจะจะมีขนาดเล็กมากจะไม่สามารถเจาะด้วยวิธีทางกลธรรมดา จะทำได้ก็ต่อเมื่อใช้แสงเลเซอร์เท่านั้น และปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริปคือ ตำแหน่งรูเจาะนั้นมีโอกาสคลาดเคลื่อนไปตามขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งแตกต่างกันอยู่บ้างเล็กน้อย นอกจากนั้นก็อาจจะคลาดเคลื่อนไปเนื่องจากกรรมวิธีในการเจาะไม่ละเอียดพอ การคลาดเคลื่อนของตำแหน่งดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ไม่ลดต่ำลงตามที่ต้องการ ดังนั้นการเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริปจึงทำได้ยากกว่าการเปิดวงจรปลายสายที่จะกล่าวต่อไป

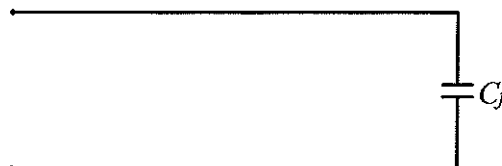
การเปิดวงจรปลายสายไมโครสตริปนั้นตามโครงสร้างก็จะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ตามโครงสร้างที่แสดงนี้โดยปกติจะมีปรากฏการณ์ต่าง ๆ ต่อไปนี้เกิดอยู่ ซึ่งทำให้การเปิดวงจรไม่สมบูรณ์แบบตามต้องการ



(ก) การเปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป



(ข) การเกิดฟริงกิง (Fringing)

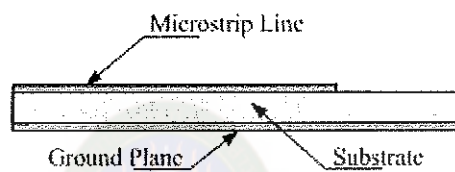


(ค) วงจรสมมูลผลกระทบของฟริงกิง

รูปที่ 2.9 การเปิดวงจรปลายสายส่งไมโครสตริป

- เส้นแรงไฟฟ้าที่ปลายสายของไมโครสตริปสามารถแผ่เลยปลายสายไปได้ ซึ่งเรียกว่า การเกิดฟริงกิง (Fringing) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) โดยผลกระทบของฟริงกิงนี้จะสามารถแทนที่ ด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ (C_f) ที่ต่อไว้ที่ปลายสายดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 (ค)

- พลังงานบางส่วนอาจจะสูญเสียออกไปในรูปแบบของการแผ่กระจายคลื่น
- มีการจับให้เกิดคลื่นผิว (Surface wave) ส่งผ่านออกไปจากปลายสายไมโครสตริป ซึ่ง นั่นก็หมายความว่ามีการสูญเสียกำลังที่ปลายสายเกิดขึ้น และเมื่อคิดเป็นวงจรสมมูลก็จะเหมือนกับ มีขั้วต่อคอนดักเตอร์ต่ออยู่ที่ปลายสายดังรูปที่ 2.10 แต่ผลกระทบดังกล่าวนี้มีผลน้อยจนสามารถ ละเลยได้ เมื่อเปรียบเทียบการเกิดฟริงกิง (Fringing) ที่ปลายสาย



(ก) การเกิดคลื่นผิว



(ค) วงจรสมมูลการเกิดคลื่นผิว

รูปที่ 2.10 การกระจายคลื่นและการเกิดคลื่นผิวออกจากปลายสายไมโครสตริปและวงจรสมมูล

2.4.4 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งแบบไมโครสตริปถูกใช้เป็นส่วนประกอบของ MIC เนื่องจากทำได้ด้วยราคาถูก อุปกรณ์ลิ้มพ์แบบพาสซีฟ ก็สามารถจะถูกสร้างอยู่บนวัสดุฐานรองเดียวกันได้ ขาอุปกรณ์แอคทีฟ และพวงกขิตต่าง ๆ ก็สามารถเชื่อมต่อกับแถบโลหะได้โดยตรง ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้าง w สูง h และโลหะมีความหนาน้อยมาก ($t/h \leq 0.005$)

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \leq 1$$

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) / (\epsilon_{eff})^{1/2} \quad (1)$$

เมื่อ

$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + 0.5(\epsilon_r - 1) \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{1/2} \quad (2)$$

กรณี $\frac{w}{h} \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi / (\epsilon_{eff})^{1/2}}{w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.44)} \quad (3)$$

กรณี $\frac{w}{h} \leq 2$

$$\frac{w}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (4)$$

กรณี $\frac{w}{h} \geq 2$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (5)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (6)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\epsilon_r^{1/2}} \quad (7)$$

เมื่อแถบ w มีความหนาด้วย ทำให้ค่า w ในสูตรจะแทนด้วย w_e

กรณี $\frac{w}{h} \geq \frac{\pi}{2}$

$$w_e = w + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{2h}{t} \right) \quad (8)$$

โครงสร้างของขอบเขตเปิดนี้จะเรียกว่าเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน (Absorbing Boundary Condition : ABC) โดยจะเห็นได้ว่าการจำลองโครงสร้างกริดเซลล์นั้น ไม่มีคอมพิวเตอร์ใดที่สามารถรองรับกับขนาดของกริดเซลล์ที่เป็นขอบเขตที่ใหญ่มากได้ ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนจึงได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อช่วยลดขนาดกริดเซลล์ให้ลดลง

การกระทำในเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนนั้นสิ่งสำคัญที่สุดในการวิเคราะห์ก็คือประสิทธิภาพและความเที่ยงตรงในการคำนวณ หลักในการวิเคราะห์ขอบเขตการดูดกลืนในระบบสามมิติสามารถทำการแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มแรกจะมีการใช้คุณสมบัติของคลื่นเดินทางเดียว (One-Way Wave Characteristics) โดยจะใช้แฟกเตอร์เชิงอนุพันธ์ของสมการคลื่นในการคำนวณ การคิดคำนวณแบบนี้จะใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมมากก็คือเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบเมอร์ (Mur's ABC) และในกลุ่มที่สองก็จะใช้หลักการพื้นฐานของการให้วัสดุดูดกลืน (Absorbing Materials) โดยที่เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบนี้ก็คือ เงื่อนไขการดูดกลืนของชั้นแมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer ABC : PML) ในการวิเคราะห์เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนที่คตินั้นจะมีหลักที่สำคัญคือ

1. จะต้องมีความเที่ยงตรงอย่างมากในการแก้ปัญหาในทางวิศวกรรม
2. ในโครงสร้างต่าง ๆ ไม่ว่าจะ เป็น โครงสร้างทั่ว ๆ ไป หรือ โครงสร้างที่ซับซ้อนสามารถที่จะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละโครงสร้างได้
3. ควรจะมีความเสถียรเชิงตัวเลขในการใช้งาน

จะเห็นได้ว่าหลักการทั้ง 3 ข้อที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบเมอร์นั้นเป็นชนิดหนึ่งที่น่ามาใช้ในการวิเคราะห์ในกริดเซลล์ของ FDTD ได้อย่างมีประสิทธิภาพในเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบเมอร์จะมีลักษณะของสมการอยู่สองแบบคือ แบบอันดับหนึ่ง (Mur's first order) และแบบอันดับสอง (Mur's second order) ซึ่งทั้งสองแบบนี้จะได้สมการพื้นฐานมาจากสมการคลื่นทางเดียว (One Way Wave Equation)

2.6 การวิเคราะห์สายอากาศด้วย FDTD

1. พารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-parameters)

การวิเคราะห์พารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-parameters) จะใช้วิธีการวิเคราะห์สองครั้งคือการวิเคราะห์ครั้งแรกจะสร้างแบบจำลองของโครงสร้างให้มีความยาวเป็นอนันต์และทำการวิเคราะห์หาสนามที่เข้าไปยังโครงสร้างนั้นโดยตรง ส่วนครั้งที่สองจะทำการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างจริงที่จะทำการวิเคราะห์แล้วทำการวิเคราะห์หาสนามจากโครงสร้างดังกล่าวซึ่งสนามที่

ได้มาจากการวิเคราะห์ครั้งนี้เป็นสนามรวมที่ประกอบไปด้วยสนามที่เข้าไปในโครงสร้างและสนามในส่วนที่สะท้อนออกมาในแต่ละพอร์ตที่อยู่ในโดเมนเวลาทำการแปลงผลโดยการแปลงฟูริเยร์ก็จะได้สนามอยู่ในโดเมนความถี่และนำค่าสนามที่อยู่ในรูปของโดเมนความถี่เหล่านั้นมาทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การกระจายต่อไป โดยที่สมการของพารามิเตอร์การกระจายเป็นดังนี้

$$S_{mn} = \frac{F[V_m(t)]}{F[V_n(t)]} \sqrt{\frac{Z_{on}}{Z_{om}}} \quad (14)$$

เมื่อ F คือการกระทำผลการแปลงฟูริเยร์ โดยที่ $m, n = 1, 2, \dots, N$ และ $V_m(t)$ กับ $V_n(t)$ เป็นแรงดันในโดเมนเวลาที่พอร์ต m และ n ส่วนค่าของ Z_{om} Z_{on} เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่ต่ออยู่ที่พอร์ต m และ n ตามลำดับ

2. อินพุตอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

พารามิเตอร์สองตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศก็คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) ซึ่งจะเห็นได้ว่า FDTD เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ และในการคำนวณอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะใช้สมการคือ

$$Z_{in} = Z_c \left[\frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \right] \quad (15)$$

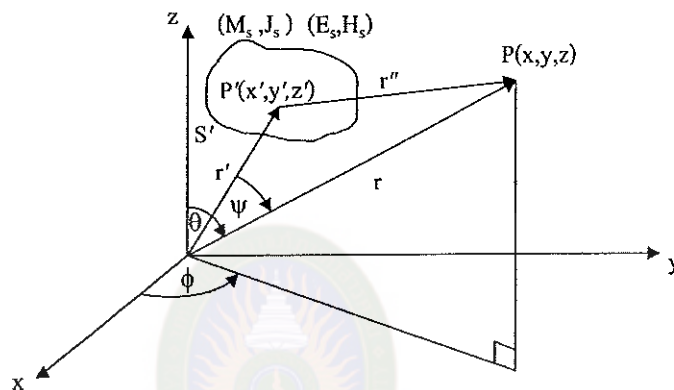
เมื่อ Z_c เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นแบบคอมเพล็กซ์ ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่เป็นค่าจริงและค่าจินตภาพ

ในการหาอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งนั้นสามารถหาได้จากสมการ

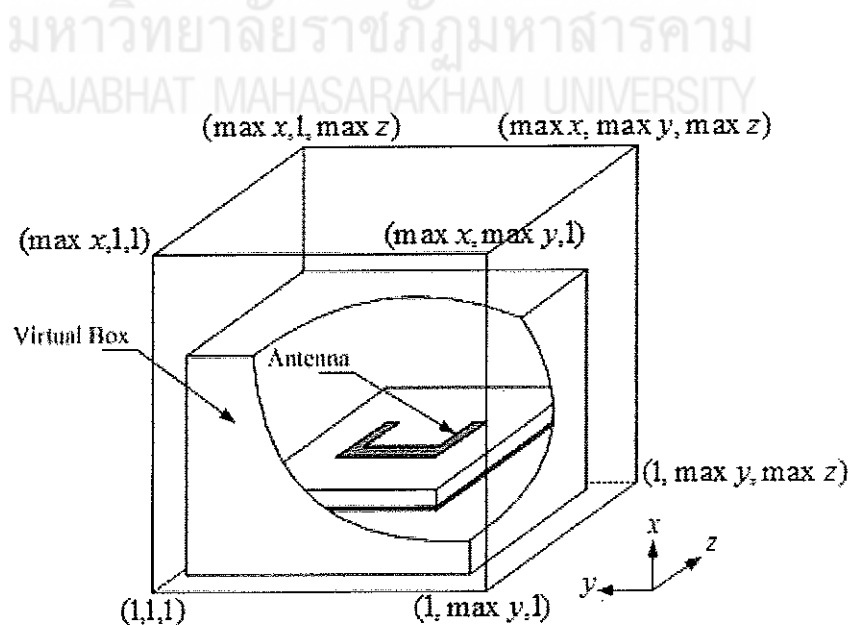
$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (16)$$

3. รูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศ

การให้ได้ว่าซึ่งผลลัพธ์ของแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล (Far-Field Radiation Pattern) ในการวิเคราะห์สายอากาศที่ใช้วิธี FDTD นั้นไม่สามารถหาสนามระยะไกลได้โดยตรง เพราะว่าโดยปกติแล้วกริดของ FDTD นั้นจะทำการคำนวณเฉพาะพื้นที่ของสนามระยะใกล้ (Near-Field) เท่านั้น โดยไม่สามารถที่จะทำการคำนวณขอบเขตสนามระยะไกลได้ ดังนั้นในวิธี FDTD จึงต้องนำผลการคำนวณของสนามระยะใกล้แปลงเป็นสนามระยะไกล (Near-Field to Far-Field)



รูปที่ 2.12 ระบบพิกัดสามมิติสำหรับการแปลงสนามระยะใกล้เป็นสนามระยะไกล



รูปที่ 2.13 กล่องเสมือนสำหรับการแปลงสนามระยะใกล้เป็นสนามระยะไกล