

บทที่ 2

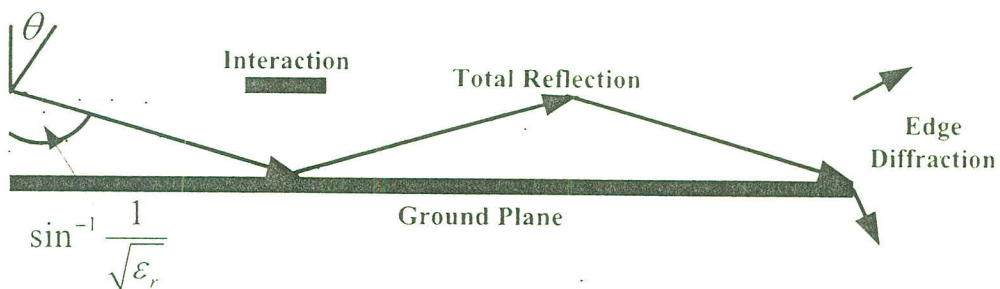
หลักการและทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเกิดคลื่นพื้นผิว นิยามของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า อภิวัดวัสดุ อภิวัดแบบช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก การนำสายนำสัญญาณมาใช้ร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศไมโครสตริปลานความถี่คู่ หลักการและทฤษฎีโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ตลอดจนงานวิจัยที่มีมาก่อนของการออกแบบโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า และการนำโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้งานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริป

1 การเกิดคลื่นพื้นผิว

สายอากาศไมโครสตริปเป็นที่นิยมสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย แต่ข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริปคือเมื่อสายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีคลื่นบางส่วนที่แพร่กระจายไปตามพื้นผิวของวัสดุฐานรอง คลื่นชนิดนี้เรียกว่าคลื่นพื้นผิว ผลกระทบของคลื่นพื้นผิวจะส่งผลให้เกิดลำคลื่นย่อย และมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในแต่ละความถี่ไปกันคนละทิศทาง คลื่นพื้นผิวจะเริ่มเกิดเมื่อคลื่นทำมุมตกกระทบกับวัสดุฐานรองระหว่าง $\frac{\pi}{2}$ ถึง $\sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$ ดังแสดงในรูปที่

2

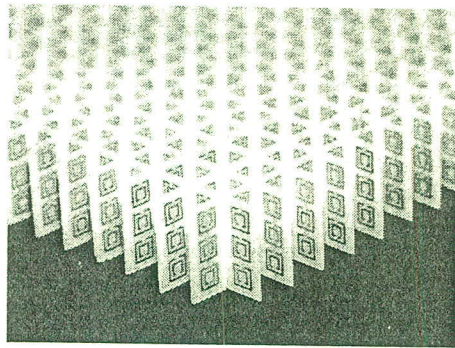


รูปที่ 2 การแพร่กระจายคลื่นพื้นผิวของสายอากาศไมโครสตริป

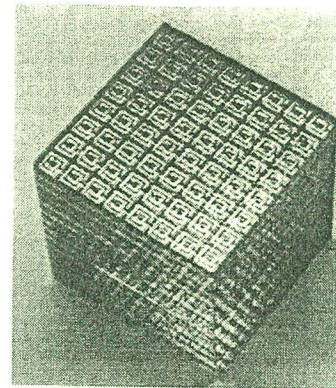
การแพร่กระจายของคลื่นพื้นผิวเป็นปัญหาที่สำคัญในสายอากาศไมโครสตริป คลื่นพื้นผิวทำให้เกิดการลดทอนประสิทธิภาพ อัตราขยาย ความกว้างแบนด์วิดธ์จำกัด ระดับโพโลไรซ์ไขว้เพิ่มขึ้น และส่งผลให้การใช้งานในย่านความถี่ของสายอากาศมีข้อจำกัด มีเทคโนโลยีมากมายที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาของคลื่นพื้นผิว งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโครงสร้างแบบระบายคาบในการกำจัดคลื่นพื้นผิวของสายอากาศไมโครสตริป

2 นิยามโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

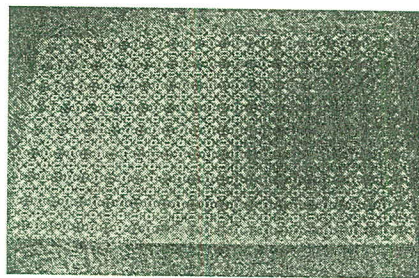
2.1 อภิวัตต



Left-handed metamaterial



Metamaterial cube



EBG metamaterial

รูปที่ 3 อภิวัตตในหลายรูปแบบ

อภิวัตต (Metamaterials) คือ วัสดุเสมือนที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยคุณสมบัติเหล่านี้อาจไม่มีอยู่ในวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยทั่วไปอภิวัตตนี้จะถูกกำหนดคุณสมบัติจากโครงสร้างที่ออกแบบ ไม่ได้มีคุณสมบัติตามส่วนประกอบของเนื้อวัสดุ รูปที่ 3 แสดงรูปร่างของอภิวัตตในรูปแบบต่างๆ ซึ่งอภิวัตตได้มีการศึกษาจากวัสดุหลากหลายรูปแบบ เช่น

- วัสดุแบบ DNG (Double Negative Materials) วัสดุที่ประกอบด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าความขบขี้ทางไฟฟ้าที่เป็นลบ
- วัสดุแบบ LH (Left-Handed Materials) วัสดุที่ภายในมีทิศทางสนามไฟฟ้า ทิศทางสนามแม่เหล็กและทิศทางการแพร่กระจายที่มีผลตอบสนองสัมพันธ์ในทิศทางซ้ายมือ
- วัสดุที่มีดัชนีหักเหเป็นลบ (Negative Refractive Index; NRI materials)
- วัสดุแบบ Magneto (Magneto Materials) สำหรับควบคุมค่าความขบขี้ทางไฟฟ้าที่สูง

- พื้นผิวอ่อนและแข็ง (Soft and Hard surfaces) เพื่อทำการหยุดหรือรองรับการแพร่กระจายคลื่น
- พื้นผิวที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Surfaces) ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ของพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับคลื่น TE และ TM
- วัสดุแบบ AMC (Artificial Magnetic Conductors Materials) เพื่อต้องการให้ได้คุณสมบัติตามแบบตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์

วัสดุที่ได้มีการศึกษามีค่าคุณลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่น่าสนใจ เช่น วัสดุแบบ DNG จะมีการแสดงผลที่เหมือนกับคุณสมบัติของวัสดุแบบ LH และวัสดุที่มีดัชนีหักเหเป็นลบ วัสดุที่เป็นโลหะแบบลูกฟูกซึ่งสามารถทำเป็นพื้นผิวแบบอ่อนและพื้นผิวแบบแข็งโดยที่พื้นผิวแบบอ่อนใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางตามแนวยาวและพื้นผิวแบบแข็งใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางตามแนวขวาง เป็นต้น นอกจากนี้ โครงสร้างแบบระบายคาบที่มีสายนำสัญญาณอาจจะแสดงในหนึ่งย่านความถี่ตามคุณสมบัติของวัสดุแบบ LH และในย่านความถี่อื่น ตามคุณสมบัติของแถบช่องว่าง จากคุณสมบัติของวัสดุที่กล่าวมาในเบื้องต้น สามารถนำมาประยุกต์ในงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสายอากาศได้หลากหลายรูปแบบ

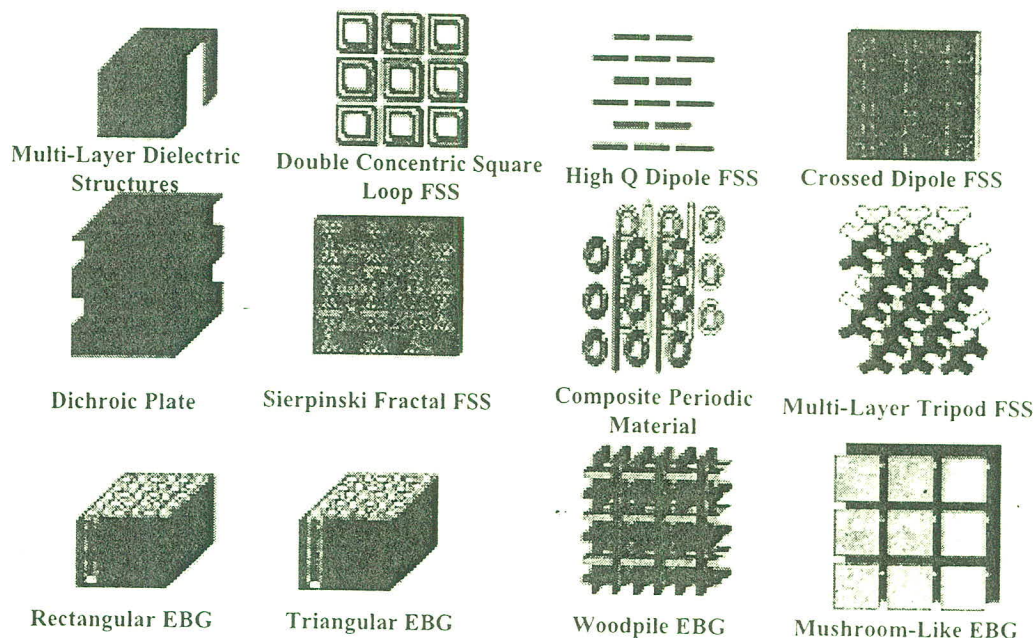
2.2 อภิวัตวัสดุแบบช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

อภิวัตวัสดุแบบช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (EBG Metamaterials) เป็นอภิวัตวัสดุที่มีการสร้างแบบระบายคาบ โครงสร้างที่เป็นฉนวน มีการสูญเสียต่ำ และมีคุณภาพสูง ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลต่อคุณสมบัติของโฟตอนซึ่งมีลักษณะเหมือนกับวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์

อภิวัตวัสดุแบบช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีการกีดขวางการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ที่ออกแบบโดยจุดเด่นของอภิวัตชนิดนี้คือสามารถควบคุมการแพร่กระจายของคลื่นตามเนื้อวัสดุ และสามารถควบคุมทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถออกแบบให้มีแถบช่องว่างแม่เหล็กไฟฟ้าในความถี่ที่ต้องการได้

อภิวัตวัสดุแบบช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิธีการที่นำเอาความแตกต่างทางคุณสมบัติของไดอิเล็กทริกมาใช้เป็นประโยชน์เพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะให้ดีขึ้น โดยโครงสร้างที่มีความหลากหลายของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจัดเป็นคุณสมบัติพิเศษของอภิวัตชนิดนี้

2.3 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า



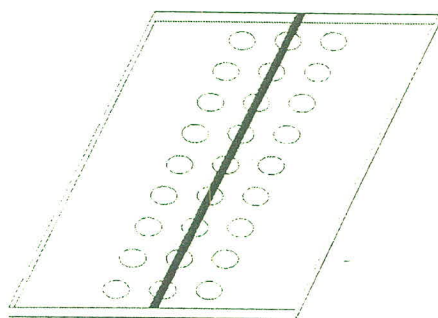
รูปที่ 4 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ

โครงสร้างแบบรายคาบเป็นโครงสร้างที่มีค่าคุณลักษณะที่น่าสนใจมากมาย เมื่อโครงสร้างลักษณะนี้ทำปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อสิ่งที่น่าสนใจในหลากหลายรูปแบบ ซึ่งจะแสดงในรูปของค่าคุณลักษณะเช่น ย่านความถี่แถบผ่าน (Pass-Band) ย่านความถี่แถบหยุด (Stop-Band) และแถบช่องว่าง (Band-Gap) จากคุณลักษณะนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่างเช่น การออกแบบตัวกรองความถี่ ผลึกแสง (Photonic Crystals) และแถบช่องว่างแสง (Photonic Band Gap; PBG) เป็นต้น ได้มีการนิยามคำศัพท์สำหรับเรียกชื่อโครงสร้างแบบรายคาบที่มีค่าคุณลักษณะเช่นนี้ คือ โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (EBG Structure)

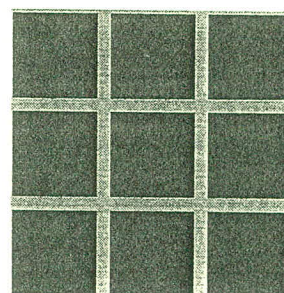
โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นโครงสร้างที่มีการเรียงตัวแบบรายคาบของวัสดุไดอิเล็กตริกและตัวนำที่เป็นโลหะ โดยทั่วไปโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจัดแบ่งได้ 3 กลุ่ม โดยอาศัยการแบ่งตามรูปทรง รูปร่างของแต่ละโครงสร้าง ดังนี้ 1) โครงสร้างปริมาตรสามมิติ 2) พื้นผิวระนาบสองมิติ และ 3) สายนำสัญญาณหนึ่งมิติ

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างของรูปทรงโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในกลุ่มต่างๆ รูปที่ 5 (ก) แสดงสายนำสัญญาณหนึ่งมิติโดยยกตัวอย่างรูปทรงแบบสายนำสัญญาณกับรูปที่เรียงตัวแบบรายคาบ (EBG Transmission Line) รูปที่ 5 (ข) แสดงพื้นผิวระนาบสองมิติโดยยกตัวอย่างรูปทรง

โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแถวคูณหลัก (Mushroom-Like EBG) รูปที่ 5 (ก) แสดงโครงสร้างปริมาตรสามมิติโดยยกตัวอย่างโครงสร้างแบบโครงถัก (Woodpile EBG) แต่ละรูปร่างก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน



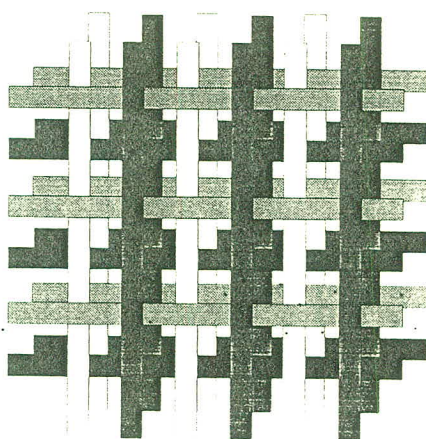
(ก)



ด้านบน

ด้านข้าง

(ข)



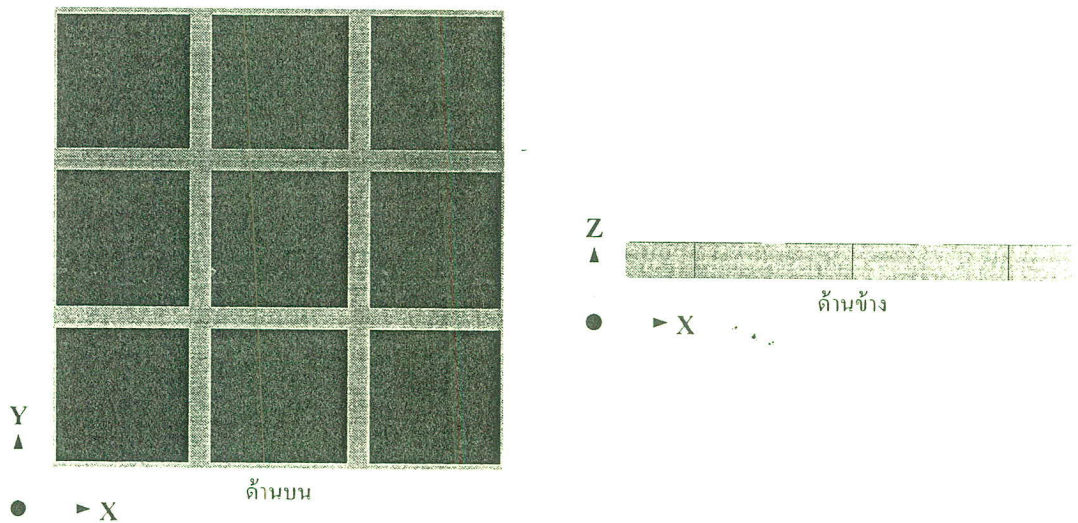
(ค)

รูปที่ 5 รูปทรงโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) สายนำสัญญาณหนึ่งมิติ (ข) พื้นผิวระนาบสองมิติ (ค) โครงสร้างปริมาตรสามมิติ

โดยงานวิจัยนี้จะเน้นที่โครงสร้างแบบพื้นผิวระนาบสองมิติ เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับสายอากาศไมโครสตริป โดยโครงสร้างแบบพื้นผิวระนาบสองมิติที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก

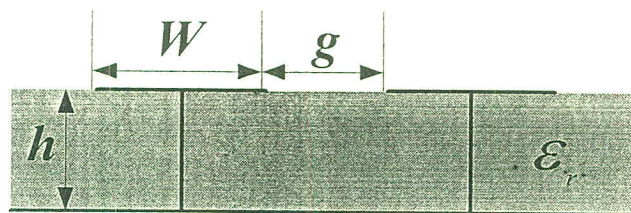
2.4 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก

โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก (Mushroom-Like EBG) เป็นโครงสร้างที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยด้านหนึ่งจะถูกสร้างเป็นเซลล์ของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ละเซลล์ของโครงสร้างนี้จะถูกเชื่อมกับทองแดงอีกด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก

จากรูปที่ 6 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยส่วนหลักสี่ส่วนคือ ระบายกราวด์ชนิดโลหะ วัสดุฐานรองชนิดไดอิเล็กตริก แผ่นโลหะระบายคาบที่อยู่บนวัสดุฐานรอง และช่องว่างที่เชื่อมระหว่างแผ่นโลหะระบายคาบกับระบายกราวด์



รูปที่ 7 พารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

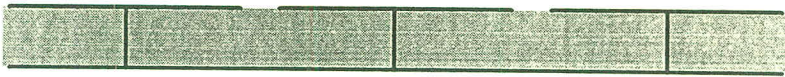
รูปที่ 7 แสดงพารามิเตอร์ที่เกิดจากโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์
W	ความกว้างของแผ่นเซลล์รายคาบ
g	ระยะห่างระหว่างแผ่นเซลล์รายคาบ
h	ความสูงของวัสดุฐานรอง
ϵ_r	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

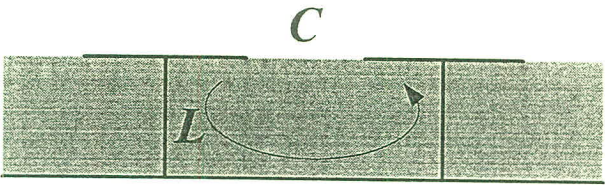
จากตารางที่ 1 เป็นการกำหนดพารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า โดย กำหนดให้ W คือความกว้างของแผ่นเซลล์รายคาบ g คือระยะห่างระหว่างแผ่นเซลล์รายคาบ h คือความสูงของวัสดุฐานรอง และ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

2.5 พารามิเตอร์วงจรของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก



รูปที่ 8 ด้านข้างของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก

รูปที่ 8 แสดงด้านข้างของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก ตัวโครงสร้างจะทำปฏิกิริยาต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสจะเกิดการเหนี่ยวนำในแผ่นโลหะด้านบน แรงดันเกิดจากช่องว่างระหว่างพื้นผิวที่ขนานกันทำให้เกิดการรวมตัวของประจุที่ด้านปลายของแผ่นโลหะด้านบนซึ่งจะเปรียบได้กับค่าความเก็บประจุ ประจุที่อยู่บนแผ่นโลหะด้านบนจะไหลผ่านแท่งโลหะไปยังแผ่นโลหะด้านล่างเป็นกระแสในสนามแม่เหล็ก เปรียบได้กับค่าความเหนี่ยวนำ แบบจำลองค่าความเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำจะแสดงในรูปที่ 9

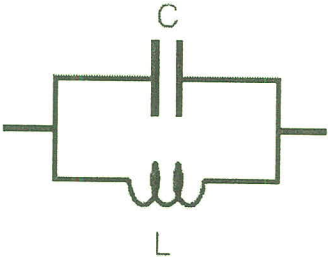


รูปที่ 9 แบบจำลองค่าความเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำ

พฤติกรรมของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคู่หลักสามารถเขียนเป็นวงจร LC เรโซแนนซ์แบบขนานได้ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยจากรูปที่ 9 ค่า C เกิดจากช่องว่างระหว่างแผ่นเซลล์รัยคาบ ค่า L เกิดจากกระแสที่ไหลตามแผ่นเซลล์รัยคาบ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร LC เรโซแนนซ์แบบขนานสามารถแสดงดังสมการที่ 2.1 และความถี่เรโซแนนซ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

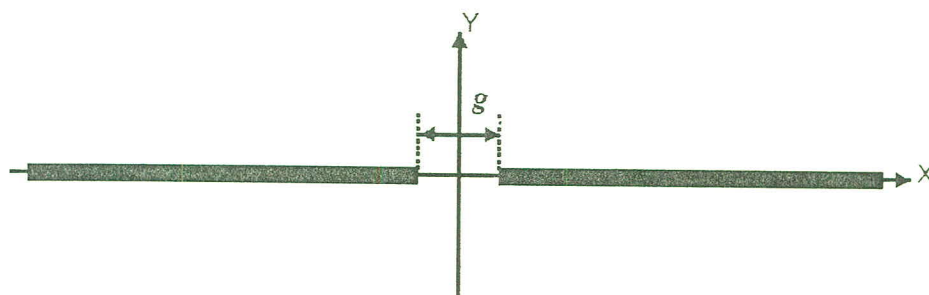
$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \tag{2.1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2.2}$$



รูปที่ 10 วงจร LC เรโซแนนซ์ แบบขนาน

จากรูปที่ 10 ค่าของตัวเก็บประจุจะเกิดจากค่าความเก็บประจุระหว่างแผ่นโลหะรัยคาบที่วางอยู่ใกล้กัน ซึ่งค่าความเก็บประจุจะได้อมาจากการส่งคงรูป (Conformal Mapping) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับหาการกระจายสนามไฟฟ้าสถิตยในระนาบสองมิติ มีที่มาเริ่มจากแผ่นโลหะขนาดกึ่งไม่จำกัด (Semi-Infinite Plate) สองแผ่นที่วางห่างกันเป็นระยะ g ดังแสดงในรูปที่ 11

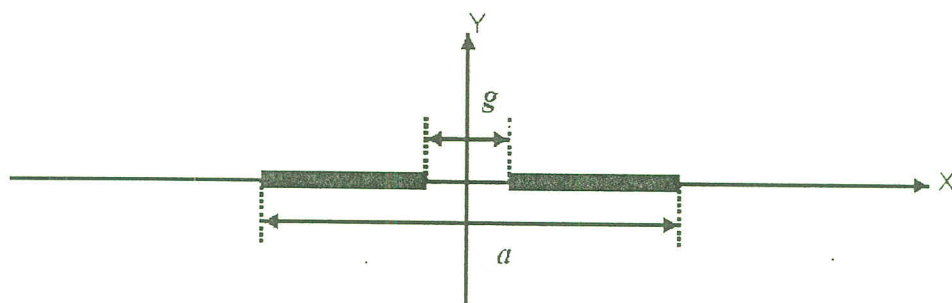


รูปที่ 11 แผ่นโลหะขนาดกึ่งไม่จำกัดสองแผ่นที่วางห่างกันเป็นระยะ g

จากทฤษฎีของการส่งคงรูป ฟังก์ชันของฟลักซ์ไฟฟ้าในพิกัดเรขาคณิตสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.3

$$\psi = \text{Im} \left[\frac{\epsilon V}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x + jy}{g/2} \right) \right] \quad (2.3)$$

โดยปกติค่าความเก็บประจุจะมีขนาดที่ไม่จำกัด และสนามที่บริเวณระยะห่างจากช่องว่างของแผ่นโลหะมีการลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmically) โดยด้านปลายของแผ่นโลหะจะอยู่ที่จุด $\frac{a}{2}$ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ตัวเก็บประจุในพิกัดเรขาคณิต

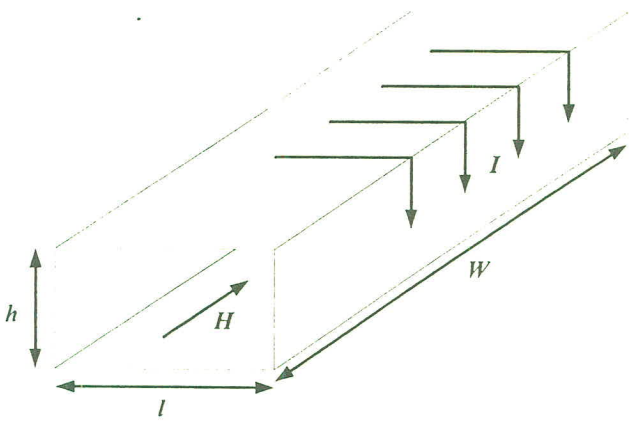
ถ้า $a \gg g$ จะสามารถประมาณค่าความเก็บประจุอยู่ในรูปของ ψ ได้ ที่จุดปลายของแผ่นโลหะ ฟลักซ์บนแผ่นโลหะจะหาได้จากสมการที่ 2.4

$$\psi \approx \text{Im} \left[\frac{2\epsilon V}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{a}{g} \right) \right] = \frac{2\epsilon V}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{a}{g} \right) \quad (2.4)$$

โดยกำหนดให้ความกว้างของแผ่นโลหะคือ W มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของโครงสร้างคือ ϵ , ฟลักซ์บนแผ่นโลหะคือค่าความเก็บประจุและแรงดันที่อยู่ทั่วแผ่นโลหะ โดยค่าความเก็บประจุที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$C = \frac{W \epsilon_0 (1 + \epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{W + g}{g} \right) \tag{2.5}$$

จากรูปที่ 9 ค่าของตัวเหนี่ยวนำเกิดจากลูปของกระแสที่ไหลผ่านแท่งโลหะและแผ่นโลหะ จากหลักการกระแสในโซลีนอยด์ที่แสดงในรูปที่ 13 สนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากกฎของแอมแปร์ (Ampere’s Law) ตัวเหนี่ยวนำสมมูลได้จากการคำนวณจากพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กและกระแสที่ไหลอยู่ภายนอก



รูปที่ 13 กระแสในโซลีนอยด์สำหรับการหาค่าความเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 13 แสดงกระแสในโซลีนอยด์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $h \times l$ มีความยาวเท่ากับ W จะมีกระแสไหลอยู่ภายนอกคือ I และมีสนามแม่เหล็กที่ผ่านโซลีนอยด์คือ H ซึ่งกระแสที่ไหลอยู่รอบ โซลีนอยด์จะมีลักษณะที่เหมือนกับกระแสที่ไหลผ่านแท่งโลหะไปยังแผ่นโลหะของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวศูนย์กลาง สนามแม่เหล็กที่ผ่านโซลีนอยด์สามารถหาได้จากกระแสที่ไหลผ่านอยู่ภายนอกดังแสดงในสมการที่ 2:6

$$H = \frac{I}{W} \tag{2.6}$$

โดยพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$I^2 L = \int_{vol} (\mu H \cdot H) dv \tag{2.7}$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำในโซลีนอยด์ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$L = \mu h \frac{l}{W} \tag{2.8}$$

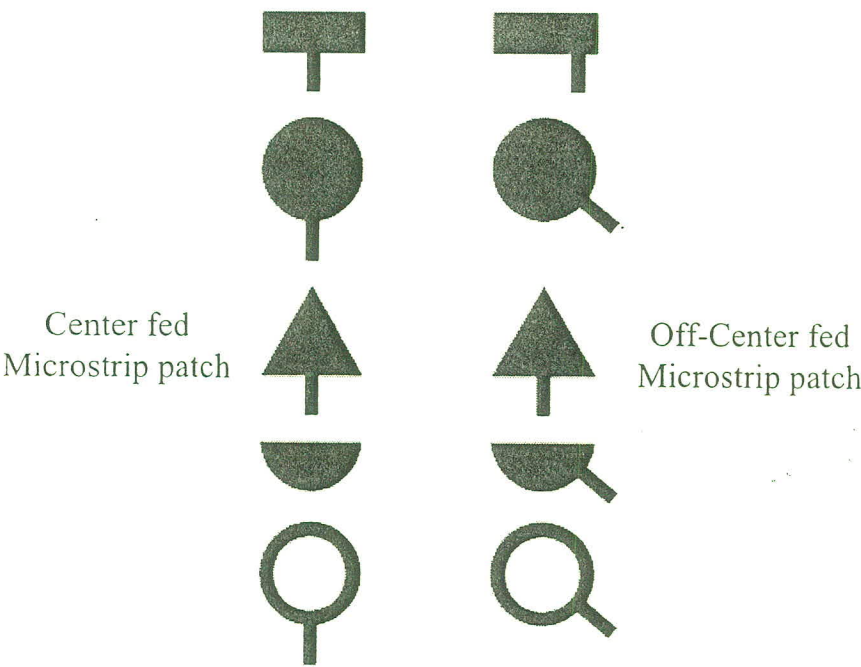
สำหรับค่าความเหนี่ยวนำแบบแผ่น (Sheet Inductance) ตัวประกอบ $\frac{l}{W}$ จะมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับความหนาของโครงสร้างและค่าความขบขี้มทางไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$L = \mu h \tag{2.9}$$

เมื่อนำสมการที่ (2.5) และ (2.9) ไปแทนลงในสมการที่ (2.1) และ (2.2) อิมพีแดนซ์พื้นผิวและความถี่เรโซแนนซ์สามารถที่จะคำนวณออกมาได้ แบบจำลองวงจร LC ง่ายต่อการอธิบายหลักการของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลัก

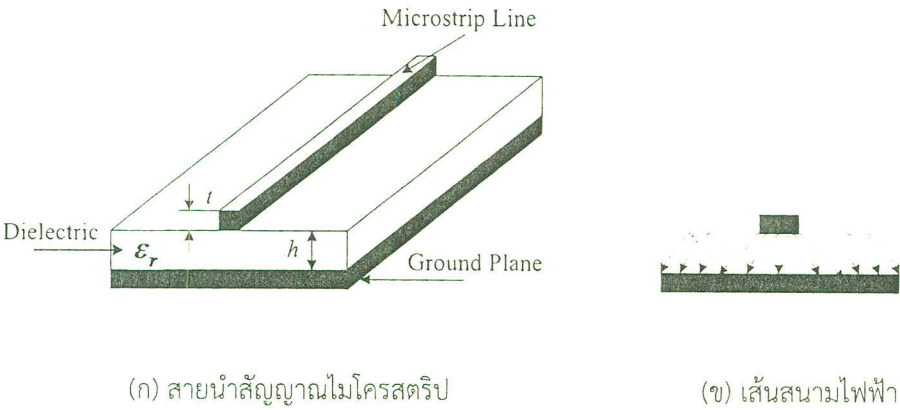
3 แผ่นไมโครสตริป

โครงสร้างของแผ่นไมโครสตริป (Microstrip Patch) นั้นมีอยู่หลายแบบซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริป และลักษณะการป้อนของสัญญาณ ไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch) และระนาบกราวด์แบบช่องเปิดมีหลายลักษณะ เช่น แผ่นวงกลม (Circular) แผ่นวงรี (Ellipse) แผ่นสี่เหลี่ยม (Rectangle) แผ่นห้าเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral Triangle) และแผ่นวงแหวน (Ring) เป็นต้น ส่วนการป้อนสัญญาณของไมโครสตริปแบ่งได้เป็นสองแบบ คือการป้อนสัญญาณแบบตรงกลาง (Center Feed) และการป้อนสัญญาณแบบเยื้องจากตรงกลาง (Off-Center-Feed) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ลักษณะการป้อนของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

ส่วนโครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่า แผ่นระนาบกราวด์ (Ground Plane) และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณ ลายวงจรหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นวงจรพิมพ์ โดยมีวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) อยู่ตรงกลาง ตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงซึ่งความหนาของทองแดง (t) ประมาณ 17.78 ไมโครเมตร ถึง 35.56 ไมโครเมตร ส่วนความหนาของวัสดุฐานรอง (h) มีหลายขนาดแต่ที่นิยมนำมาออกแบบคือ 0.8 มิลลิเมตร 1.6 มิลลิเมตร เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุฐานรองแสดงด้วยสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือ ϵ_r และค่าของ Loss Tangent หรือ $\tan \delta$ ดังแสดงในรูปที่ 15

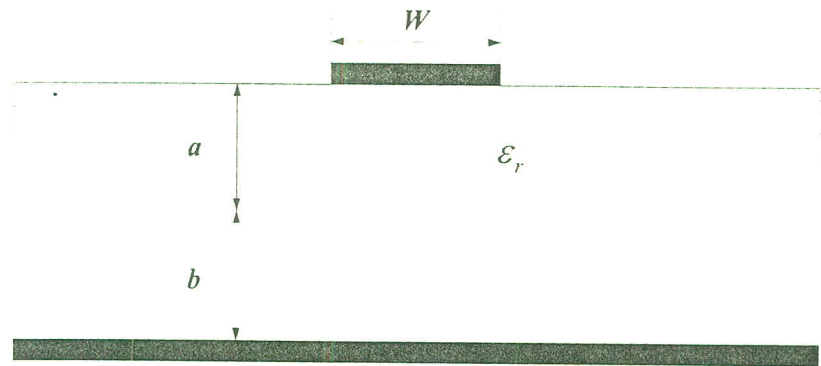


(ก) สายนำสัญญาณไมโครสตริป (ข) เส้นสนามไฟฟ้า

รูปที่ 15 โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป และเส้นสนามไฟฟ้า

4 สายนำสัญญาณไมโครสตริปแบบลอยเหนือระนาบกราวด์

การจำลองและทดสอบค่าคุณลักษณะของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธี โดยงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคของสายนำสัญญาณไมโครสตริปแบบลอยเหนือระนาบกราวด์ (Suspended Microstrip) มาใช้ร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำการจำลองและทดสอบค่า S พารามิเตอร์ โดยสายนำสัญญาณไมโครสตริปจะถูกวางประกบอยู่ด้านบนของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบพื้นฐานของกระบวนการทางไมโครสตริปแบบระนาบร่วมกับกระบวนการทางโมโนโพล



รูปที่ 16 สายนำสัญญาณไมโครสตริปแบบลอยเหนือระนาบกราวด์

รูปที่ 16 แสดงไมโครสตริปแบบลอยเหนือระนาบกราวด์ เป็นหลักการพื้นฐานของสายนำสัญญาณที่ใช้ในย่านไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟ ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่นำมาใช้งานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{f(u)}{u} + \sqrt{1 + \frac{4}{u^2}} \right) \tag{2.10}$$

เมื่อ

$$f(u) = 6 + (2\pi - 6) e^{-\left(\frac{30.666}{u}\right)^{0.7528}} \tag{2.11}$$

$$u = \frac{W}{a + b} \tag{2.12}$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพ ϵ_{eff} สามารถหาได้จากสมการ

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{\left(1 + \frac{a}{b} \left(h_1 - h_{11} \ln \frac{W}{b} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) \right)^2} \tag{2.13}$$

เมื่อ

$$h_1 = \left(0.8621 - 0.1251 \ln \frac{a}{b} \right)^4 \tag{2.14}$$

$$h_{11} = \left(0.4986 - 0.1397 \ln \frac{a}{b} \right)^4 \tag{2.15}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณสามารถหาได้จากสมการ

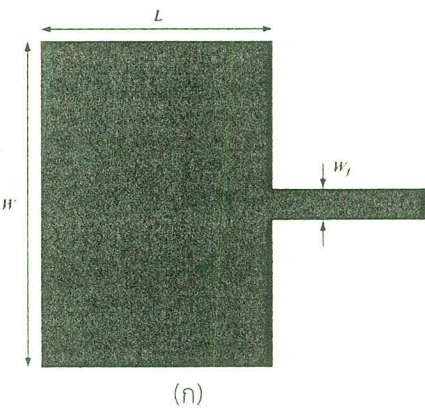
$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{2.16}$$

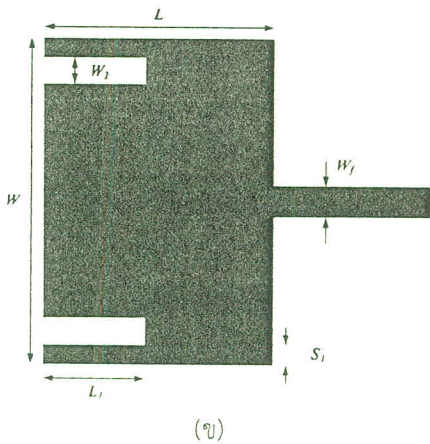
เมื่อ W คือความกว้างของสายนำสัญญาณ a คือความสูงของวัสดุฐานรอง b คือระยะห่างระหว่างวัสดุฐานรองกับระนาบกราวด์ ค่าที่ได้จากสมการเบื้องต้นจะมีค่าผิดพลาดที่ $\pm 1\%$ เมื่อ $1 < \frac{W}{b} \leq 8, 0.2 \leq \frac{a}{b} \leq 1$, และ $\epsilon_r \leq 6$ ถ้าค่า $\epsilon_r \approx 10$ สมการนี้จะมีค่าผิดพลาด $\pm 2\%$

5 สายอากาศไมโครสตรีย่านความถี่คู่

สายอากาศย่านความถี่คู่คือสายอากาศที่สามารถทำงานได้สองความถี่ในสายอากาศตัวเดียว สายอากาศย่านความถี่คู่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบสื่อสารไร้สาย ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ เป็นต้น ซึ่งเป็นระบบที่ต้องการการรับส่งแบบสองความถี่หรือมากกว่า ข้อดีของสายอากาศย่านความถี่คู่เมื่อเทียบกับสายอากาศความถี่กว้าง คือสามารถกำหนดเฉพาะความถี่ที่ต้องการนำไปใช้งานได้โดยตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการนำไปใช้งาน ทำให้ประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้สายอากาศความถี่กว้าง

เทคนิคการออกแบบสายอากาศไมโครสตรีย่านความถี่คู่เบื้องต้น คือการกำหนดให้มีการทำงานในโหมดตั้งฉากบนโครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่น เช่น โหมด TM_{10} และ TM_{01} เป็นต้น





รูปที่ 17 สายอากาศไมโครสตริป (ก) แพทช์แบบความถี่เดียว (ข) แพทช์แบบสองความถี่

รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างเบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริปแบบความถี่เดียว และแบบสองความถี่ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศในรูปที่ 17 แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป

สัญลักษณ์	แพทช์แบบความถี่เดียว	แพทช์แบบสองความถี่
L	ความยาวของแพทช์	ความยาวของแพทช์
W	ความกว้างของแพทช์	ความกว้างของแพทช์
W_f	ความกว้างเส้นไมโครสตริป	ความกว้างเส้นไมโครสตริป
W_I	-	ความกว้างของร่อง
L_I	-	ความยาวของร่อง
S_I	-	ความกว้างของขอบที่ไม่มีการแพร่กระจายคลื่น

โครงสร้างสายอากาศในรูปที่ 17 (ข) ประกอบด้วยแพทช์สี่เหลี่ยมที่มีร่องสองร่องอยู่บนแผ่นเดียวกัน ผลกระทบของร่องที่อยู่บนไมโครสเตรียมสามารถทำให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของโหมด TM สองโหมด ทำให้มีความถี่เรโซแนนซ์เกิดขึ้นสองความถี่

6 หลักการและทฤษฎีของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

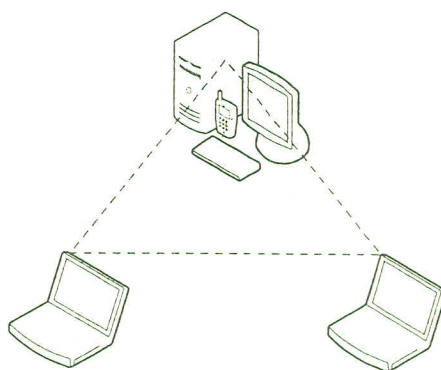
โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ WLAN คือระบบที่เชื่อมโยงคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกันเป็นเครือข่ายภายในพื้นที่แบบไร้สาย โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในการเชื่อมต่อหรือสื่อสารกัน การเชื่อมต่อแบบไร้สายมีทั้งแบบเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยกัน และเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณ การส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายแบบไร้สายนั้นมียู่ 2

เทคโนโลยี คือ เทคโนโลยีแบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) และ เทคโนโลยีแบบใช้สัญญาณอินฟราเรด (Infrared)

WLAN ได้กำหนดลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย WLAN ไว้ 2 ลักษณะคือ แบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer และ ระบบพื้นฐาน (Infrastructure)

6.1 แบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer

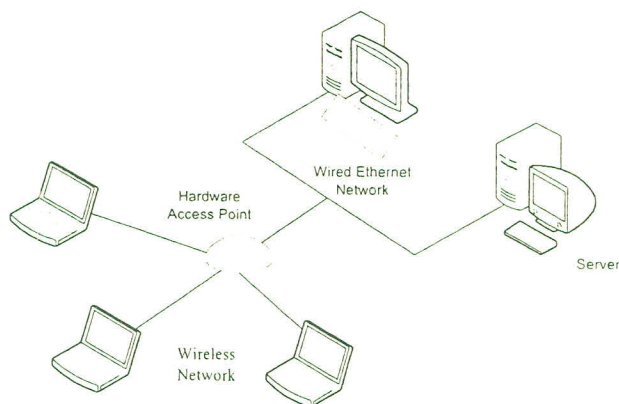
มาตรฐาน WLAN ในแบบ Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer เป็นเครือข่ายที่ไม่มีสถานีแม่ข่ายและไม่มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่นในบริเวณ WLAN ในแบบ Ad-Hoc จะถูกเรียกว่า Independent Basic Service Set (IBSS) ซึ่งสถานีผู้ใช้หนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลกับสถานีผู้ใช้อื่นๆในเขต IBSS เดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสถานีแม่ข่ายแต่สถานีผู้ใช้จะไม่สามารถรับส่งข้อมูลกับเครือข่ายอื่นๆได้



รูปที่ 18 การเชื่อมต่อแบบ Ad-Hoc

6.2 แบบระบบพื้นฐาน (Infrastructure)

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ใน WLAN จะเชื่อมต่อกันในลักษณะของแบบระบบพื้นฐานซึ่งเป็นลักษณะที่อนุญาตให้อุปกรณ์ภายใน WLAN สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่นได้ ในโหมดระบบพื้นฐานเครือข่าย WLAN จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 ประเภทได้แก่ สถานีลูกข่าย (Client Station) ซึ่งก็คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ แล็ปท็อป หรือ พีดีเอ ต่างๆ) ที่มี อุปกรณ์แปลงสำหรับใช้งาน เพื่อใช้รับส่งข้อมูลผ่าน WLAN และสถานีแม่ข่ายซึ่งทำหน้าที่ต่อเชื่อมสถานีผู้ใช้เข้ากับเครือข่ายอื่นซึ่งโดยปกติจะเป็นเครือข่ายแบบใช้สาย (Ethernet LAN)



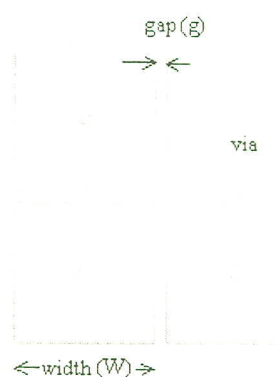
รูปที่ 19 การเชื่อมต่อแบบระบบพื้นฐาน

7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่มีมาก่อนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $|S_{21}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB สองย่านความถี่ และงานวิจัยที่นำเอาโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ

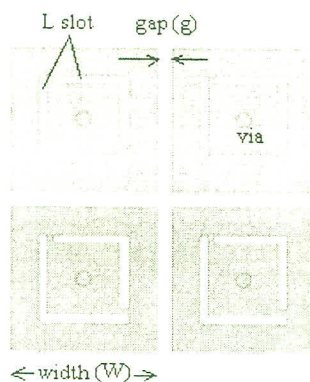
7.1 A Dual Band Gap Slotted Patch Electromagnetic Band Gap for Dual Band Microstrip Antenna

งานวิจัยนี้ถูกนำเสนอโดย O. Ayop, M. K. A. Rahim และ T. Masri โดยได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูลหลักแบบพื้นฐาน (Mushroom EBG; MEBG) แสดงในรูปที่ 20 ซึ่งได้ค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $|S_{21}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB เพียงหนึ่งย่านความถี่



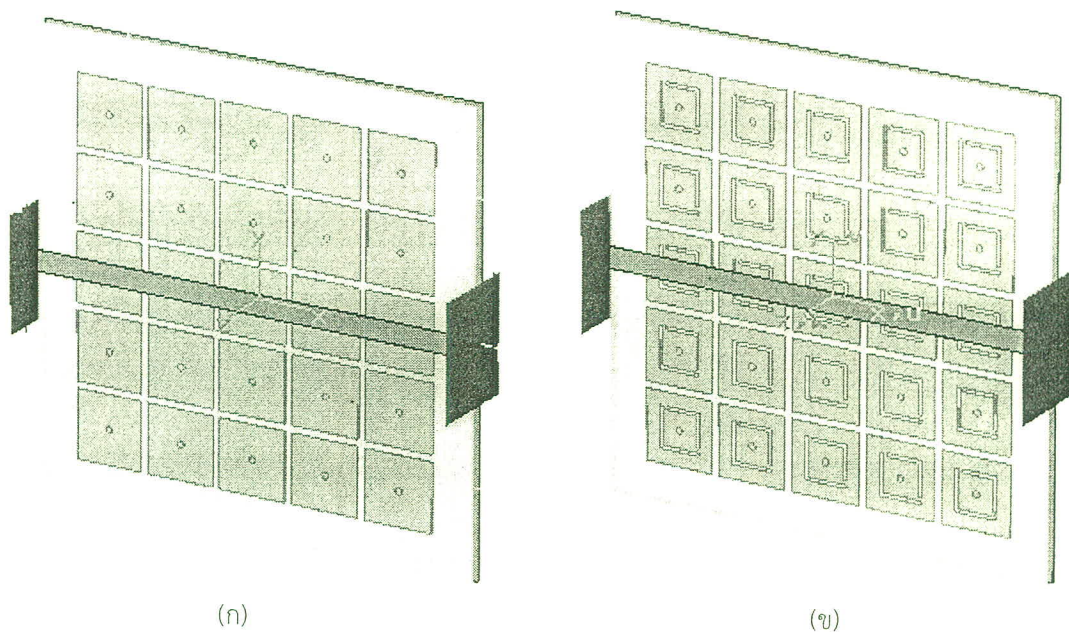
รูปที่ 20 แผ่นเซลล์ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูลหลักแบบพื้นฐาน (MEBG)

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงจากรูปแบบพื้นฐานโดยทำการเพิ่มร่อง (Slot) รูปตัว L สอง ร่องลงบนแผ่นเซลล์ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Slotted Patch EBG; SPEBG) ขนาดของร่องกว้าง 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 แผ่นเซลล์ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลักเมื่อทำการเพิ่มร่อง (SPEBG)

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ MEBG และ SPEBG ขนาด 5 แถว×5 หลัก โดยใช้ สายนำสัญญาณไมโครสตริปขนาด 50 โอห์ม เพื่อทำการหาค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังแสดงใน รูปที่ 22



รูปที่ 22 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) MEBG (ข) SPEBG

รูปที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างจากวัสดุชนิดเดียวกันทำการจำลองผลโดยศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆต่อค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

7.1.1 ผลกระทบของขนาดความกว้างแผ่นเซลล์

ทำการศึกษาถึงผลกระทบของขนาดความกว้างแผ่นเซลล์โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองโครงสร้าง โดยทำการปรับขนาดความกว้างของแผ่นเซลล์ตั้งแต่ 7 มิลลิเมตรถึง 12 มิลลิเมตร โดยผลการจำลองค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 3 ผลกระทบของขนาดความกว้างแผ่นเซลล์ต่อค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

ความกว้างแผ่น (mm)	ย่านความถี่แรก (GHz)		ย่านความถี่สอง (GHz)	
	MEBG	SPEBG	MEBG	SPEBG
7	2.78-3.85	2.57-3.20	-	6.23-8.88
8	2.42-3.56	2.32-2.89	-	6.08-7.77
9	2.26-3.09	2.12-2.63	-	5.82-7.51
10	2.08-2.77	1.96-2.44	-	5.61-9.05
11	1.91-2.53	1.75-2.22	-	6.72-8.38
12	1.80-2.34	1.66-2.00	-	6.54-7.90

จากตารางที่ 3 จะพบว่า SPEBG สามารถให้ค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $|S_{21}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB สองย่านความถี่ ผลกระทบต่อขนาดของแผ่นเซลล์จะส่งผลให้ความถี่นั้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยภาพรวมเมื่อขนาดของแผ่นเซลล์มีขนาดกว้างขึ้นจะทำให้ความถี่ลดลง

7.1.2 ผลกระทบต่อขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นเซลล์

ทำการปรับขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นเซลล์ ตั้งแต่ขนาด 1 มิลลิเมตรถึง 5 มิลลิเมตร โดยผลการจำลองค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 4 ผลกระทบของขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นเซลล์ต่อค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

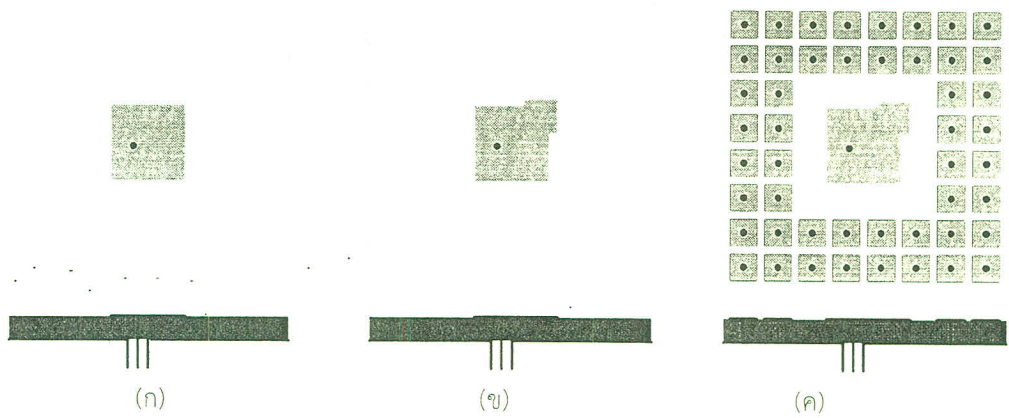
ระยะห่างระหว่างแผ่น เซลล์ (mm)	ย่านความถี่แรก (GHz)		ย่านความถี่สอง (GHz)	
	MEBG	SPEBG	MEBG	SPEBG
1	2.08-2.77	1.96-2.44	-	5.61-9.05
2	2.16-3.22	1.97-2.96	-	6.80-8.00
3	2.14-2.36	2.07-2.99	-	6.80-7.94
4	2.12-3.22	2.06-2.95	-	6.74-7.84
5	2.08-3.18	2.04-2.95	-	6.67-7.78

จากตารางที่ 4 จะพบว่าผลกระทบของขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นเซลล์ไม่ได้ส่งผลต่อความถี่มากนัก แต่จะส่งผลต่อขนาดแบนด์วิดธ์ของแถบช่องว่างความถี่ เมื่อขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นเซลล์เพิ่มขึ้น แบนด์วิดธ์ของแถบช่องว่างความถี่ก็จะเพิ่มขึ้นตาม

จากการศึกษาพารามิเตอร์ของงานวิจัยนี้จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มร่องลงบนแผ่นเซลล์ของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพื้นฐาน (SPEBG) จะส่งผลให้มีค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $|S_{21}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB สองย่านความถี่ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่คู่

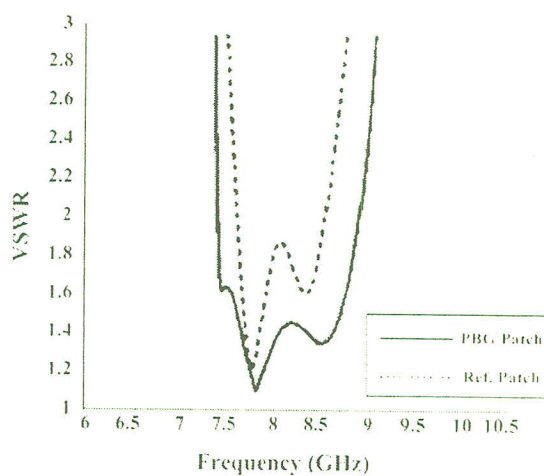
7.2 Wide-Band Microstrip Patch Antenna with Planar PBG Structure

งานวิจัยนี้ถูกนำเสนอโดย M. Kahniao และ M. A. Stuchly เป็นการนำโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสายอากาศไมโครสตริปสามชนิด ชนิดแรกเป็นสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมแบบปกติ ชนิดที่สองเป็นสายอากาศไมโครสตริปที่มีการปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยม และชนิดที่สามเป็นสายอากาศไมโครสตริปที่มีการปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยมใช้งานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 23

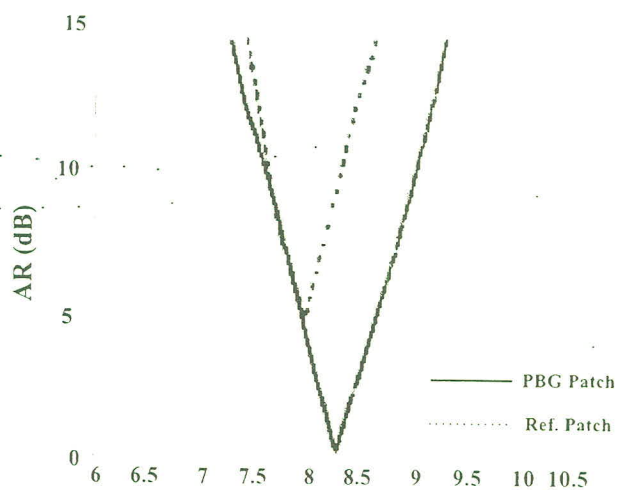


รูปที่ 23 สายอากาศไมโครสตริป (ก) แพทช์สี่เหลี่ยมแบบปกติ (ข) ปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยม (ค) ปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยมใช้งานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

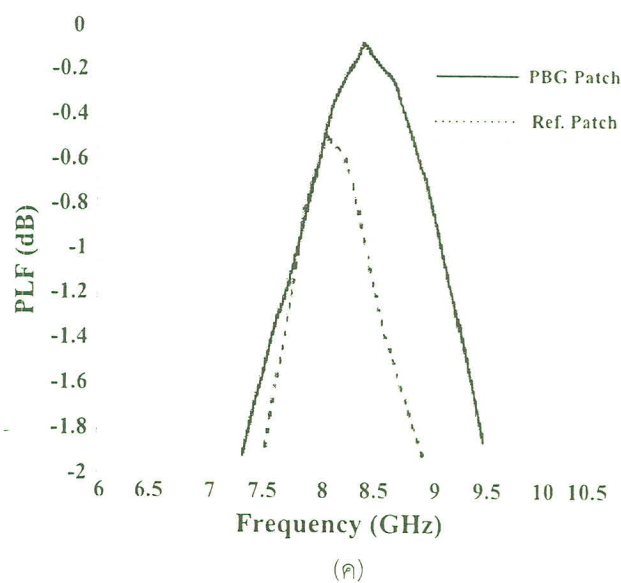
จากรูปที่ 23 สายอากาศไมโครสตริปถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ขนาด 26.25×26.25 ตารางมิลลิเมตร สูง 1.575 มิลลิเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.7 ขนาดแพทช์สี่เหลี่ยม 7.5×7.5 ตารางมิลลิเมตร โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีแถบช่องว่างอยู่ระหว่าง 7.2 GHz ถึง 9.2 GHz แผ่นเซลล์มีขนาด 3.25×3.25 ตารางมิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างแผ่นเซลล์ 0.25 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)



รูปที่ 24 ผลการทดสอบ (ก) อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (ข) อัตราส่วนแกน (ค) การสูญเสีย เนื่องมาจากการโพลาไรซ์

จากรูปที่ 24 แสดงผลการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน อัตราส่วนแกน และการสูญเสียเนื่องมาจากการโพลาไรซ์ ของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมแบบปกติและสายอากาศไมโครสตริปที่มีการปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยมใช้งานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่า ช่วงความถี่ระหว่าง 7.2 GHz ถึง 9.2 GHz สายอากาศไมโครสตริปที่มีการปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยมใช้งานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ามีอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันที่ต่ำกว่าสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมแบบปกติ สายอากาศไมโครสตริปที่มีการปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยมใช้งานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลม และมีความสูญเสียเนื่องมาจากการโพลาไรซ์ที่ดีกว่าสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมแบบปกติ

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศ

สายอากาศไมโคร- สตริป	แบนด์วิดท์			อัตราส่วนระหว่างคลื่น ด้านหน้าต่อด้านหลัง (dB)
	VSWR < 2	AR < 6	PLF < 1	
แพทช์สี่เหลี่ยมแบบ ปกติ	4% (7.7-8 GHz)	-	-	14
ปรับปรุงแพทช์ สี่เหลี่ยม	13% (7.6-8.6 GHz)	1.5% (7.98-8.11 GHz)	7.7% (7.7-8.32 GHz)	14
ปรับปรุงแพทช์ สี่เหลี่ยมใช้งานร่วมกับ โครงสร้างช่องว่างแถบ แม่เหล็กไฟฟ้า	20.5% (7.4-9.1 GHz)	9.6% (7.9-8.7 GHz)	14.5% (7.7-8.9 GHz)	18

จากตารางที่ 5 จะพบว่าสายอากาศไมโครสตริปที่มีการปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยมใช้งานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ามีแบนด์วิดท์และอัตราส่วนระหว่างคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to back ratio) ที่มากกว่าสายอากาศไมโครสตริปที่มีการปรับปรุงแพทช์สี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมแบบปกติ

8 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงอิวิสต์แบบช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีจุดเด่นที่น่าสนใจต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือสามารถกีดขวางการแพร่กระจายคลื่นที่แพร่ไปตามพื้นผิวของวัสดุฐานรองโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบแถวคูณหลักเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริป งานวิจัยที่มีมาก่อนนำเสนอการดัดแปลงเซลล์ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสองย่านความถี่และการนำโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้งานร่วมกับสายอากาศ