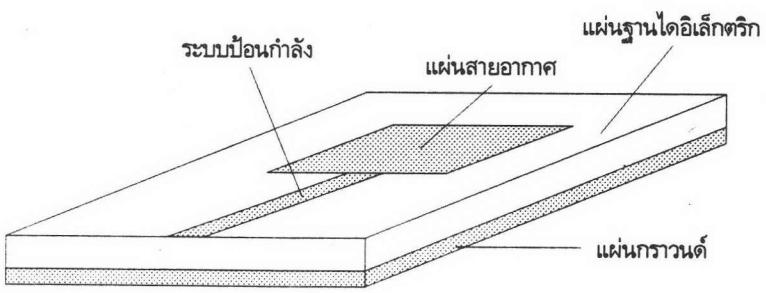
บทที่ 2

สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปได้รับการพัฒนาพร้อมกับความต้องการสายอากาศที่มีหน้าตัดข้างบาง น้ำหนักเบา และการพัฒนาของวงจรไมโครสตริปซึ่งเป็นวงจรประมวลในย่านความถี่ไมโครเวฟ รวมทั้งการเกิดขึ้นและความเจริญก้าวหน้าของระบบสื่อสารต่างๆ ทั้งทางทหารและพลเรือน เช่น ใช้ในการสื่อสารและนำทางในระบบสายอากาศของอากาศยาน เป็นเซ็นเซอร์ในจรวดนำวิถี เป็นสายอากาศบนยานพาหนะ เป็นต้น สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในงานแต่ละประเภทมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศ และวิธีการที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

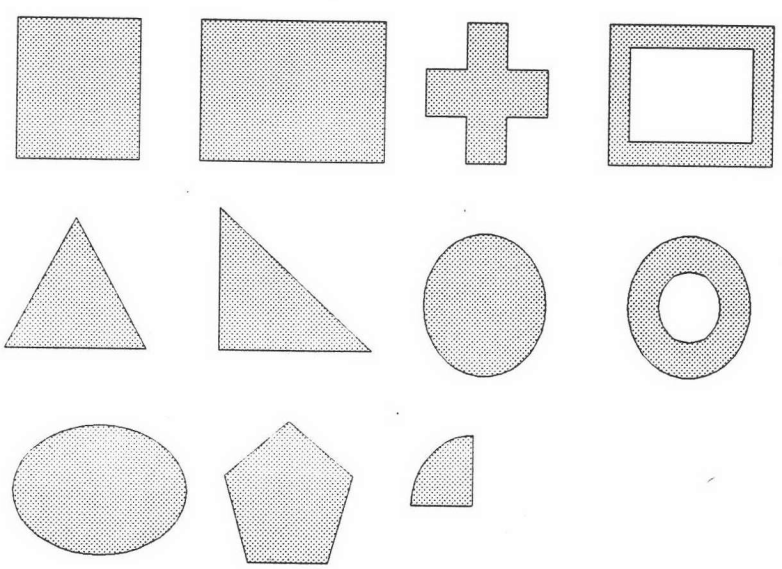
โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในปัจจุบันนี้มักจะอยู่ในรูปของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปในแนวระนาบ (Planar Antenna) ที่มีแผ่นสายอากาศและระบบป้อนกำลังแบบต่างๆ นอกจากนี้สายอากาศไมโครสตริปยังมีการใช้งานในรูปของสายอากาศแบบอนุโลม (Conformal Microstrip Antenna) ด้วย อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปทุกแบบต่างประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 4 ประการ คือ แผ่นสายอากาศ แผ่นกราวนด์ แผ่นฐานไดอิเล็กตริก และระบบป้อนกำลัง องค์ประกอบทั้งสี่นี้เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้



รูป 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป

1. <u>แผ่นสายอากาศ</u> แผ่นสายอากาศทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นสายอากาศคือโลหะที่มีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อมและการเกิดออกซิเดชันได้ดี และสามารถยึดติดกับผิวของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกได้ดี โดยทั่วไปใช้ทองแดง ทองคำ อะลูมิเนียมทำแผ่นสายอากาศแต่ในบางกรณีแผ่นสายอากาศที่ใช้อาจมีมากกว่าหนึ่งชั้นเพื่อให้โลหะชั้นล่างซึ่งมีความนำไฟฟ้าต่ำเช่นอะลูมิเนียมทำหน้าที่ในการยึดติดกับผิวของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกจำพวกเซรามิก โลหะชั้นกลางเป็นทองแดงทำหน้าที่ในการนำไฟฟ้าและมีทองคำเป็นโลหะชั้นบนทำหน้าที่ปกป้องสายอากาศจากสภาพแวดล้อมและการเกิดออกซิเดชันที่แผ่นสายอากาศ วัสดุที่ใช้ทำแผ่นสายอากาศนี้ส่งผลต่อความสามารถในการนำกระแส ประสิทธิภาพของสายอากาศและความยากง่ายในการผลิต นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของแผ่นสายอากาศเป็นปัจจัยที่กำหนดความถี่ใช้งานและส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงาน อิมพีแดนซ์ขาเข้า และแบนด์วิดท์ของสายอากาศด้วยกล่าวคือในแต่ละรูปร่างของแผ่นสายอากาศจะมีขนาดแตกต่างกันไปที่แต่ละความถี่ใช้งาน เช่น แผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีความยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในแผ่นฐานไดอิเล็กตริก เป็นต้น สำหรับรูปร่างของสายอากาศนั้นสามารถทำเป็นรูปใดๆ ก็ได้แต่โดยทั่วไปนิยมใช้รูปร่างเรขาคณิตพื้นฐานได้แก่ สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม สามเหลี่ยมมุมฉาก สามเหลี่ยมด้านเท่า ส่วนของวงกลม วงแหวน วงรี ฯลฯ เมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติของแผ่นสายอากาศรูปร่างเรขาคณิตต่างๆ ที่ใช้งานที่โหมดเด่นและมีความถี่เดียวกันโดยใช้แบบจำลองแบบโพรง (Richards, 1988) พบว่า ลักษณะสมบัติของแผ่นสายอากาศเหล่านี้มีความแตกต่างกันน้อยมากในส่วนแบบรูปการแผ่พลังงาน แต่แบนด์วิดท์จะมีค่าแตกต่างกันโดยมีค่าอยู่ภายในช่วง 1-2% ของความถี่เรโซแนนซ์



รูป 2.2 ตัวอย่างแผ่นสายอากาศรูปร่างต่างๆ

Palanisamy และ Garg (1986) ได้เปรียบเทียบผลระหว่างแผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปกากบาทและรูปวงแหวนสี่เหลี่ยม ซึ่งให้คลื่นโพลาไรซ์แบบวงกลมที่ความถี่ 3 กิกะเฮิร์ต พบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานและความกว้างลำคลื่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่แบนด์วิดท์ของวงแหวนสี่เหลี่ยมมีค่าสูงที่สุด (5.2%) ขณะที่แผ่นสายอากาศรูปกากบาทและสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 2.5% และ 0.63% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแม้แผ่นสายอากาศรูปกากบาทและวงแหวนสี่เหลี่ยมจะให้แบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้นแต่ก็ทำให้เกิดคลื่นโหมดอื่นๆ ไปรบกวนแบบรูปการแผ่พลังงานมากขึ้นด้วย

Chowdhury และคณะ (1990) ได้ศึกษาความแตกต่างของลักษณะสมบัติของแผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปวงกลมที่ให้คลื่นโพลาไรซ์แบบวงกลม พบว่า ลักษณะสมบัติของแผ่นสายอากาศทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันน้อยมาก

จากการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อพูข้างของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปโดย Pozar และ Kaufman (1990) พบว่า ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งแปรผันโดยตรงต่อขนาดที่ผ่อนผันได้ของแผ่นสายอากาศ (Tolerance) แต่ละตัว จะทำให้พูข้างมีขนาดสูงขึ้นตามความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ที่ลดลง

ดังนั้นในการพิจารณารูปร่างและขนาดของแผ่นสายอากาศจึงขึ้นอยู่กับความถี่ใช้งาน ความยากง่ายในการผลิตและขนาดที่ผ่อนผันได้ของแผ่นสายอากาศ ในปัจจุบันแผ่นสายอากาศที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นสายอากาศรูปวงกลมและสี่เหลี่ยมเนื่องจากการผลิตและปรับแต่งสามารถทำได้ง่าย ลักษณะสมบัติของสายอากาศไม่แตกต่างจากแผ่นสายอากาศรูปอื่นมากนัก

2. <u>แผ่นกราวน์</u> โดยทั่วไปแผ่นกราวน์ทำจากโลหะเช่นเดียวกับแผ่นสายอากาศแต่มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นสายอากาศมาก ในบางกรณีขนาดแผ่นกราวน์ขนาดใหญ่มากกระทำได้ยากเช่น ในการใช้สายอากาศไมโครสตริปเป็นส่วนป้อนของระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่น ขนาดที่จำกัดของแผ่นกราวน์นี้จะส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงานเนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นกราวน์ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศด้วยเนื่องจากในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศส่วนใหญ่มีสมมติฐานว่าแผ่นกราวน์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นสายอากาศมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์

Huang (1983) ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดที่จำกัดของแผ่นกราวน์ด้วยการใช้วิธีจีทีดี (Geometrical Theory of Diffraction) พบว่า ขนาดของแผ่นกราวน์ที่จำกัดทั้งกรณีที่ใหญ่กว่าแผ่นสายอากาศมาก ($7\lambda \times 7\lambda$) และขนาดเล็ก ($2\lambda \times 2.7\lambda$)นั้น คลื่นเลี้ยวเบนบริเวณขอบของแผ่นกราวน์มีผลกระทบต่อพูคลื่นหลักน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นกราวน์มีขนาดเป็นอนันต์ ขนาดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของแผ่นกราวน์ที่มีขนาดจำกัดทำให้เกิดพูหลังและโพลาไรเซชันไขว้มีค่าต่ำกว่า -25 dB ดังนั้นการรวมผลของแผ่นกราวน์จะมีความจำเป็นก็ต่อเมื่อผู้ออกแบบสนใจโพลาไรเซชันไขว้และพูหลังของแบบรูปการแผ่พลังงานเท่านั้น

Jacobsen และ Lier (1983) ได้ทำการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระหว่างแผ่นกราวนด์ขนาดอนันต์และขนาดจำกัดโดยใช้วิธีจีทีดีพบว่า ผลของคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของแผ่นกราวนด์มีค่าน้อยมาก ถ้าระยะทางจากขอบแผ่นกราวนด์ถึงขอบของแผ่นสายอากาศ d มีค่าสอดคล้องกับสมการที่ 2.1 โดยที่ λ_0 เป็นความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

$$d \rangle 0.5 \cdot \lambda_0 \qquad \text{..... (2.1)}$$

จากผลงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่า ผลกระทบจากขนาดที่จำกัดของแผ่นกราวนด์สามารถละเลยได้ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงพูหลังและขนาดแผ่นกราวนด์สอดคล้องกับสมการ 2.1 เมื่อแผ่นสายอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยมเนื่องจากขนาดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากคลื่นเลี้ยวเบนบริเวณขอบแผ่นกราวนด์ที่จำกัดมีค่าต่ำมาก

3. <u>แผ่นฐานไดอิเล็กตริก</u> เป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายอากาศไมโครสตริป จากการศึกษาผลของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์และความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป โดย Garg และ Bhattacharyya (1986) สามารถสรุปได้ว่า

1. การแผ่พลังงานของสายอากาศลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่

2. การแผ่พลังงานของสายอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราส่วนของความหนาต่อความยาวคลื่นในอวกาศว่างมีค่าประมาณ 0.05 การแผ่พลังงานจะลดลง

3. คลื่นผิวจะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์และ/หรือความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกมีค่ามากขึ้น และสามารถละเลยผลของคลื่นผิวได้เมื่อสัดส่วนของความหนาต่อความยาวคลื่นในไดอิเล็กตริกมีค่าน้อยกว่า 0.02

4. ประสิทธิภาพของสายอากาศมีค่าลดลงเมื่อความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น

5. พลังงานที่สะสมในแผ่นฐานไดอิเล็กตริกมีค่าเกือบคงที่ (ประมาณ 0.02%) ซึ่งสามารถละเลยได้ แต่เมื่ออัตราส่วนของความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกต่อความยาวคลื่นในอวกาศว่างมีค่ามากกว่า 0.03 พลังงานที่สะสมในไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก

6. แบนด์วิดท์ของสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกมีค่ามากขึ้น

ดังนั้นในการเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นแผ่นฐานไดอิเล็กตริกนอกจากจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลที่ให้ความแข็งแรง ทนต่อปฏิกิริยาเคมีและสภาวะแวดล้อมเช่น ความชื้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีการขยายตัวน้อย มีความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ผิวเรียบและแบนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับ

โลหะและสามารถผลิตเป็นแผ่นฐานไดอิเล็กตริกขนาดใหญ่สำหรับสายอากาศแถวลำดับได้แล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเลือกวัสดุโดยมีพารามิเตอร์ที่จะต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

1. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ε_r) วัสดุที่ใช้ควรเป็นสารเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ในเนื้อสาร นอกจากนี้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ยังส่งผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ เช่น แบนด์วิดท์ โพลาไรเซชันไขว้ ประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตาราง 2.1 และเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศกล่าวคือ ขนาดของแผ่นสายอากาศจะมีค่าแปรผกผันกับรากที่สองของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ จากตารางจะเห็นได้ว่า ความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกเป็นปัจจัยที่กำหนดลักษณะสมบัติของสายอากาศเช่นเดียวกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ โดยที่วัสดุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำจะให้สายอากาศที่มีสมรรถนะสูง

2. การกระจายตามความถี่ในไดอิเล็กตริกต่ำเพื่อลดพลังงานสูญเสียจากการกระจายตามความถี่

3. แทนเจนต์การสูญเสีย ($tan\delta$) ควรมีค่าต่ำกว่า 0.001 เพื่อลดพลังงานสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกและทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

4. ความสามารถในการดูดซับน้ำและความชื้นต่ำ เพราะน้ำและความชื้นจะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกสูงขึ้นและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์มีค่าเปลี่ยนไป

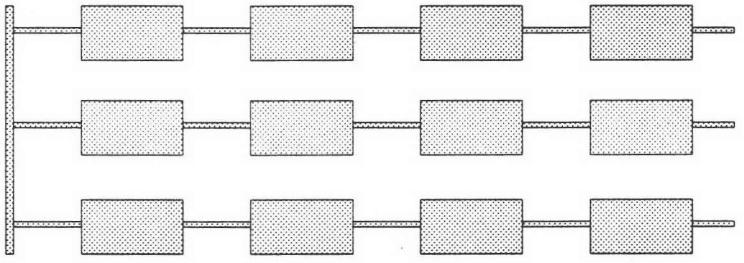
ตาราง 2.1 ผลกระทบของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์และความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยม

ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป รูปสี่เหลี่ยม	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์	ความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริก
ประสิทธิภาพในการแผ่พลังงานสูง	ต่ำ	บาง
การสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำ	ต่ำ	บาง
แบนด์วิดท์กว้าง	ต่ำ	หนา
การแผ่พลังงานปลอมเทียมจากคลื่นผิวต่ำ	ต่ำ	บาง
โพลาไรเซชันไขว้ต่ำ	ต่ำ	ไม่มีผล
น้ำหนักเบา	ต่ำ	บาง
แข็งแรง	สูง	หนา
ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขนาดที่ผ่อนผันได้ต่ำ	ต่ำ	หนา

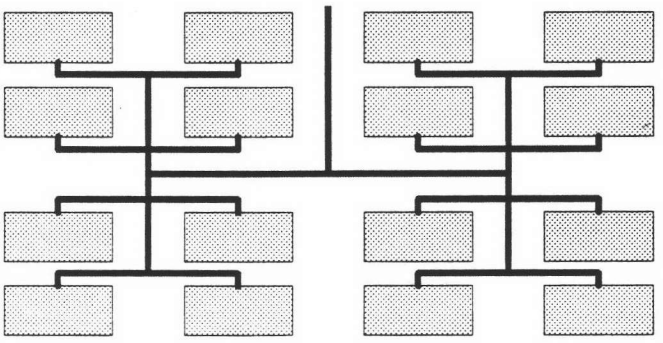
ที่มา: Hall and James, 1989

วัสดุที่นิยมใช้ในการทำแผ่นฐานไดอิเล็กตริกตริกแบ่งเป็น 4 ประเภท (Gardiol, 1988) คือสารกึ่งตัวนำ สารอนินทรีย์จำพวกเซรามิก สารสังเคราะห์จำพวกพลาสติก และเฟอร์ไรต์ ในการเลือกใช้วัสดุเพื่อใช้เป็นแผ่นฐานไดอิเล็กตริกที่ใช้ในงานประเภทต่างๆ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ ซึ่งได้มีการสรุปคุณสมบัติที่สำคัญไว้ในตาราง 2.2 วัสดุที่นิยมใช้เป็นแผ่นฐานไดอิเล็กตริกสำหรับสายอากาศไมโครสตริปคือ เทฟลอนไฟเบอร์กลาส เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็ตริกสัมพัทธ์ต่ำทำให้มีพลังงานสูญเสียต่ำ มีการผ่านกระบวนการเสริมกำลัง (Reinforcement) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของสายอากาศ และสามารถทำเป็นสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ได้ดี

4. <u>ระบบป้อนกำลัง</u> ระบบป้อนกำลังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความยากง่ายในการสร้างและลักษณะสมบัติของสายอากาศโดยเฉพาะในสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริป เนื่องจากการจัดวางตัวของระบบป้อนกำลัง พลังงานที่สูญเสียในระบบป้อนกำลัง การแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลังและปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมระหว่างระบบป้อนกำลังกับแผ่นสายอากาศ ต่างส่งผลต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศไม่ว่าจะเป็นแบบรูปการแผ่พลังงาน โพลาไรเซชัน แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพของสายอากาศ ระบบป้อนกำลังในสายอากาศแถวลำดับสามารถจำแนกตามการจัดวางตัวของสายอากาศกับการป้อนกำลังได้ 2 แบบ (Pozar, 1995) คือ แบบโคเปอร์เรตฟีดเน็ตเวิร์ค (Corperate-Fed Network) และแบบโครงข่ายอนุกรม (Series-Fed Network) ซึ่งลักษณะสมบัติของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้ระบบป้อนกำลังแต่ละแบบนี้ต่างถูกจำกัดด้วยสมรรถนะของสายอากาศ ไมโครสตริปแต่ละตัวในระบบสายอากาศแถวลำดับ



รูป 2.3 ระบบป้อนกำลังแบบโครงข่ายอนุกรม



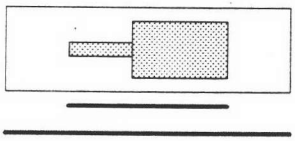
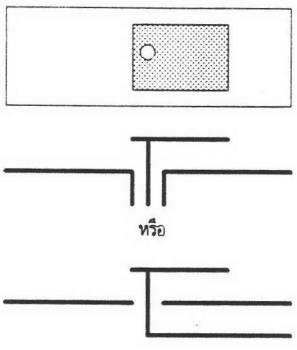
รูป 2.4 ระบบป้อนกำลังแบบโคเปอร์เรตฟีดเน็ตเวิร์ค

ตาราง 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นฐานไดอิเล็กตริก

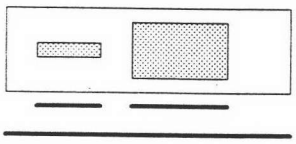
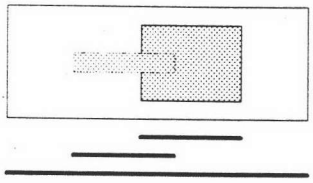
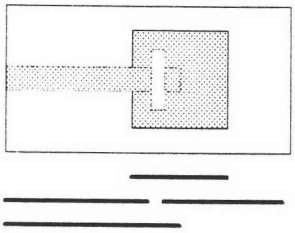
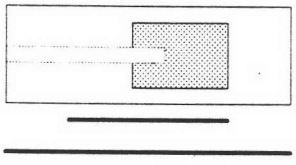
วัสดุ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์	แทนเจนต์การสูญเสียที่ความถี่ 1.6 กิกะเฮิร์ต	คุณสมบัติเด่น
1.สารอนินทรีย์จำพวกเซรามิก			-วัสดุจำพวกเซรามิกมีความสามารถในยึดติดกับโลหะต่ำ มีความแข็งแต่เปราะ
1.1 อลูมินา Al_2O_3 99.5 %	9.8	0.0006	-มีพลังงานสูญเสียต่ำและการกระจายความถี่ต่ำ
1.2 อลูมินา Al_2O_3 96%	9.4	0.0063	
1.3 แซฟไฟล์	9.4-11.6	0.0006	-เป็นผลึกของอลูมินามักใช้ในงานที่มีความถี่สูง
1.4 เบริลเลีย BeO 98%	6.3	0.0375	-สามารถทนความร้อนสูง มักใช้งานที่ต้องการกำลังสูง แต่ผงเบริลเลียเป็นพิษ
1.5 รูไทล์ TiO_2	85	0.025	-ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. สารกึ่งตัวนำ			-มักใช้ในวงจรประมวลแบบโมโนลิทิก แต่มีพลังงานสูญเสียมาก ถ้าทำให้บริสุทธิ์สามารถลดพลังงานสูญเสียได้ แต่จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง
2.1 แกลเลียมอัลเซไนด์	12.9	0.0125	
2.2 ซิลิคอน	11.9	0.0938	
3. สารสังเคราะห์			
3.1 เทฟลอน	2.1	0.0019	-พลังงานสูญเสียต่ำ สามารถทำเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับได้ดี เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน แต่มีข้อบกพร่องในเรื่องคุณสมบัติทางกล
3.2 ดูรอยด์	2.1-11	0.0025-0.0094	-เป็นเทฟลอนที่ผ่านกระบวนการรีเอนฟอสเพื่อแก้ไขคุณสมบัติทางกล
4. เฟอร์ไรต์	9-16	0.00625	-พลังงานสูญเสียต่ำ แบนด์วิดท์กว้าง ส่วนใหญ่มักใช้ในการทำไอโซเลเตอร์และเซอร์คิวเลเตอร์

ระบบป้อนกำลังของสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งตามวิธีการส่งผ่านพลังงานให้แก่สายอากาศได้ 3 วิธีคือการใช้สายนำสัญญาณไมโครสตริป การใช้โพรบโคแอกเชียลและการใช้ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม และแต่ละวิธีมีลักษณะการจ่ายกำลังและข้อดีข้อด้อยดังตาราง 2.3 ซึ่งได้จากการรวบรวมจากงานวิจัยของ Pozar และ Voda (1987) Jackson และ Manghnani (1990) Lo, Chuang และ Akson (1990)

ตาราง 2.3 ระบบป้อนกำลังของสายอากาศไมโครสตริป

ระบบป้อนกำลัง	ข้อดี	ข้อด้อย
1. การใช้สายนำสัญญาณไมโครสตริป	-ทำเป็นวงจรประมวลชนิดโมโนลิทิกได้	-มีการแผ่พลังงานปลอมเทียมสูง
1.1 ป้อนกำลังด้านที่แผ่พลังงาน 	-โพลาไรเซชันไขว้ต่ำ -สามารถผลิตได้ง่ายด้วยเทคนิคการทำแผ่นวงจรพิมพ์	-ต้องมีการแมตช์อิมพีแดนซ์
1.2 ป้อนกำลังด้านที่ไม่แผ่พลังงาน	-การแมตช์อิมพีแดนซ์ทำได้ง่ายเนื่องจากอิมพีแดนซ์ขาเข้ามีค่าอยู่ในช่วงกว้างบนด้านที่ไม่แผ่พลังงาน	-กระตุ้นโพลาไรเซชันไขว้ให้มีค่าสูงขึ้น
2. การใช้โพรบโคแอกเชียล 	-การแมตช์อิมพีแดนซ์ทำได้ง่ายโดยการเลื่อนตำแหน่งโพรบโคแอกเชียล -การแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลังมีค่าต่ำ	-การจัดวางระบบป้อนกำลังแบบโคเปอร์เรตฟีดเน็ตเวิร์คทำได้ยาก -ต้นทุนการผลิตสูงและยุ่งยาก

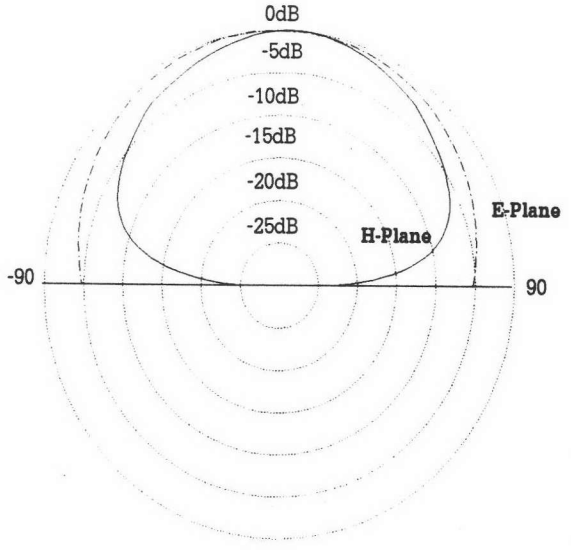
ตาราง 2.3 (ต่อ)

ระบบป้อนกำลัง	ข้อดี	ข้อด้อย
3.การใช้ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม 3.1 แบบโมโนลิทิก 	-การแผ่พลังงานปลอมเทียมต่ำ -ไม่จำเป็นต้องมีการแมตช์อิมพีแดนซ์	-การควบคุมกระแสกระตุ้นทำได้ยาก -มีปัญหาเรื่องโทเลแรนซ์ (Tolerance)และการแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลัง
3.2 แบบมัลติเลเยอร์ 	-มีหลายระดับชั้นความเสรีทำให้ความยืดหยุ่นในการออกแบบสูง -แบนด์วิดท์สูง	-ทำเป็นวงจรประมวลชนิดโมโนลิทิกได้ยาก -ต้องใช้แผ่นฐานไดอิเล็กตริกหลายชั้น -การปรับค่าที่เหมาะสมทำได้ยาก -การระบายความร้อนทำได้ยาก
3.3 แบบอะเพอร์เจอร์เชื่อมต่อ 	-การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่เรโซแนนซ์และแบนด์วิดท์และผลกระทบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นระหว่างแผ่นสายอากาศกับแผ่นกราวนด์มีค่าน้อยมาก -ไม่มีการแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลัง	-ต้องใช้แผ่นฐานไดอิเล็กตริกหลายชั้น -การผลิตยุ่งยากและมีราคาแพง
3.4 แบบร่องเชื่อมต่อ 	-สามารถผลิตได้ง่ายด้วยเทคนิคการทำแผ่นวงจรพิมพ์ -สามารถทำเป็นวงจรประมวลชนิดโมโนลิทิกได้ -สามารถระบายความร้อนได้ดี	-การขยายเป็นสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ทำได้ยาก -มีการแผ่พลังงานแอบแฝง (Stray Radiation) จากร่อง (Slot)

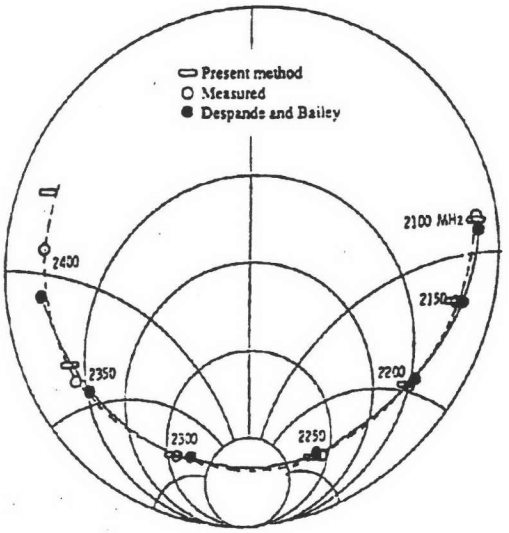
จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพูข้างของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปโดย Pozar และ Kaufman (1990) พบว่า ระบบป้อนกำลังเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อระดับพูข้างของระบบ เมื่อเทียบกับผลจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมระหว่างแผ่นสายอากาศ ผลจากคลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบ และผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากขนาดที่ผ่อนผันได้ของแผ่นสายอากาศและความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ พูข้างที่เกิดขึ้นจากระบบป้อนกำลังเป็นผลจากการแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลัง นอกจากนี้พลังงานสูญเสียในระบบป้อนกำลังจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนทางขนาดและเฟสของกระแสกระตุ้นและก่อให้เกิดผลกระทบต่อการควบคุมโพลาไรเซชันด้วย จากการงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่า ระบบป้อนกำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริป ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของระบบป้อนกำลังจึงยังคงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการกำหนดโครงข่ายระบบป้อนกำลังเพื่อให้ได้ระบบสายอากาศแถวลำดับที่มีสมรรถนะสูง

ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

จากหัวข้อที่ผ่านมา ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งสี่ของสายอากาศ ซึ่งสามารถสรุปลักษณะสมบัติโดยรวมของสายอากาศไมโครสตริปเป็นข้อดีข้อเสียได้ดังตาราง 2.4 โดยที่แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบบรอดไซด์ดังรูป 2.5 และเส้นทางเดินของอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศกับความถี่ในแผนภูมิของสมิทธจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งของวงกลมดังรูป 2.6



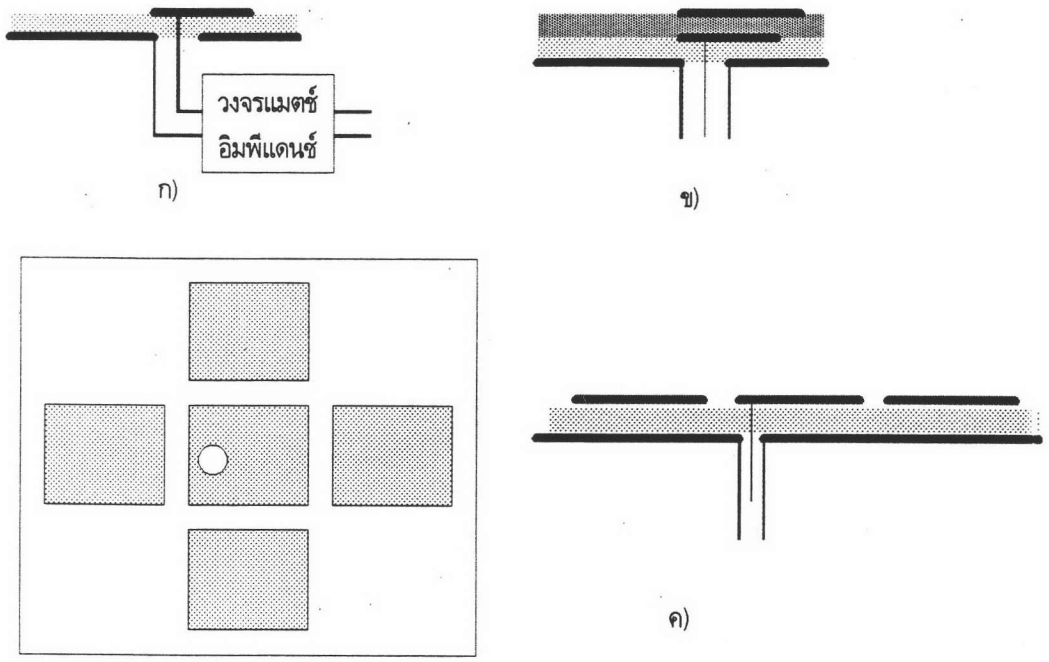
รูป 2.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริป



รูป 2.6 เส้นทางเดินบนแผนภูมิของสมิทธของอิมพีแดนซ์ขาเข้ากับความถี่ของสายอากาศไมโครสตริป (Mittra, Park and Akson, 1995)

ตาราง 2.4 ข้อดี-ข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป

ข้อดี	ข้อเสีย
1.หน้าตัดข้างบางและน้ำหนักเบา	1.ประสิทธิภาพต่ำ
2.อิมพีแดนซ์ขาเข้าสามารถปรับค่าได้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการป้อนกำลัง	2.แบนด์วิดท์แคบ
3.ต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถผลิตได้ง่ายด้วยเทคนิคการทำแผ่นวงจรพิมพ์	3.มีการแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลัง คลื่นผิว และความไม่ต่อเนื่องของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบสายอากาศ
4.สามารถทำเป็นสายอากาศแบบอนุโลมได้	4.มีปัญหาเนื่องจากขนาดที่ผ่อนผันได้ (Tolerance)
5.สามารถทำเป็นวงจรประมวลชนิดโมโนลิทิกได้	5.มีปัญหาในการควบคุมโพลาไรเซชัน
6.มีความแข็งแรงเมื่อวางแนบกับผิวระนาบ	6.ต้องการแผ่นฐานไดอิเล็กตริกที่มีคุณภาพสูงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
7.สามารถทำเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับได้	7.ระบบป้อนกำลังสำหรับสายอากาศแถวลำดับประสิทธิภาพสูงมีความซับซ้อนมาก



รูป 2.7 เทคนิคการเพิ่มแบนด์วิดท์โดย
ก) การใช้วงจรแมตช์อิมพีแดนซ์
ข) การใช้เรโซเนเตอร์หลายตัวและแผ่นฐานไดอิเล็กตริกหลายชั้น
ค) การใช้เรโซเนเตอร์หลายตัวและแผ่นฐานไดอิเล็กตริกชั้นเดียว

จากตาราง 2.4 จะเห็นว่าปัญหาหนึ่งของสายอากาศคือค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-3% ของความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น Capelle, Nauwelaers และ An (1994) ได้สรุปวิธีการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่ได้มีงานวิจัยในปัจจุบันไว้ดังนี้

1. การเพิ่มความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริก วิธีนี้ไม่นิยมใช้เนื่องจากทำให้สายอากาศมีน้ำหนักมากขึ้น พลังงานสูญเสียสูงขึ้น และประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง

2. การใช้เรโซเนเตอร์หลายตัว วิธีนี้เป็นการสร้างแผ่นสายอากาศที่มีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกันเพื่อขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศ แบนด์วิดท์ที่ได้มีค่าสูงถึง 10-20% ของความถี่เรโซแนนซ์ วิธีการใช้เรโซเนเตอร์หลายตัวนี้สามารถแบ่งย่อยเป็นสองวิธีดังนี้ วิธีแรกเป็นการสร้างแผ่นสายอากาศแต่ละตัวบนแต่ละชั้นของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกโดยป้อนกำลังเฉพาะแผ่นสายอากาศชั้นล่างที่สุด (Hall, Wood and Garrett, 1979; Croq and Pozar, 1991; Kossiavas, Papiernik, 1992 อ้างถึงโดย Pozar) ทำให้สายอากาศที่ได้มีขนาดเล็กเหมาะกับการใช้งานเป็นส่วนป้อนในระบบสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่น แต่จำนวนชั้นของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนไป (Cheng, Wong and

Row, 1994) การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศยุ่งยากและเปลืองเวลามากขึ้น และการสร้างเป็นวงจรประมวลชนิดโมโนลิทิกทำได้ยาก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาข้างต้นนี้จึงได้มีการเสนอวิธีที่สอง (Wood, 1980 อ้างถึงโดย Pozar) คือการสร้างแผ่นสายอากาศบนแผ่นฐานไดอิเล็กตริกเดียวกันโดยจ่ายกระแสกระตุ้นที่แผ่นสายอากาศหลักเพียงตัวเดียวแต่ก็จะทำให้สายอากาศแถวลำดับมีขนาดใหญ่ขึ้น

3. การใช้วงจรแมตช์อิมพีแดนซ์ วิธีนี้เหมาะสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่เป็นตัวแผ่พลังงานเดี่ยว เนื่องจากในระบบสายอากาศแถวลำดับต้องการพื้นที่ว่างสำหรับวงจรแมตช์อิมพีแดนซ์ด้วย อย่างไรก็ดี วิธีนี้สามารถเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ได้ถึง 10-30% ของความถี่เรโซแนนซ์ และสามารถทำเป็นวงจรประมวลชนิดโมโนลิทิกได้

<u>สายอากาศไมโครสตริปที่ให้คลื่นโพลาไรเซชันแบบวงกลม</u>

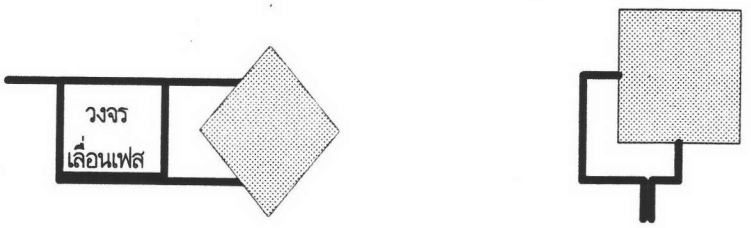
ปัจจัยสำคัญที่กำหนดโพลาไรเซชันของสายอากาศไมโครสตริปคือแผ่นสายอากาศและระบบการป้อนกำลังที่จะทำให้สายอากาศกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสองโหมดที่ตั้งฉากกันและมีขนาดเท่ากันเฟสต่างกัน 90 องศา วิธีการในการกำเนิดคลื่นโพลาไรซ์แบบวงกลมสามารถจำแนกได้ตามวิธีจ่ายกระแสกระตุ้นสายอากาศได้ 3 วิธี (Hall, 1995) คือ

1. <u>การจ่ายกระแสกระตุ้นให้แก่สายอากาศสองจุด</u> วิธีนี้ต้องใช้แผ่นสายอากาศที่สามารถกำเนิดคลื่นสองโหมดที่ตั้งฉากกันเช่น แผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แผ่นสายอากาศรูปวงกลม เป็นต้น นอกจากนี้กระแสที่กระตุ้นสายอากาศแต่ละจุดจะมีขนาดเท่ากันและเฟสต่างกัน 90 องศา โดยทั่วไปตำแหน่งการจ่ายกระแสกระตุ้นนั้นจะทำที่ตำแหน่งบนแผ่นสายอากาศที่ให้อิมพีแดนซ์ขาเข้าเท่ากันเพื่อให้คลื่นแต่ละโหมดที่ตั้งฉากกันมีขนาดเท่ากันและมีโหมดอันดับสูงอื่นๆ ที่ไม่ต้องการน้อยที่สุด แผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากสำหรับวิธีการใช้การกระตุ้นสองจุดคือแผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้างของแผ่นสายอากาศเท่ากับ b ตามความสัมพันธ์โดยประมาณของความกว้างแผ่นสายอากาศกับความถี่ใช้งานและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกดังต่อไปนี้

$$b \approx \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad \text{..... (2.2)}$$

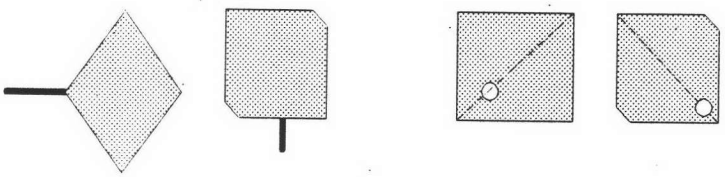
โดยที่ c คือความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง สำหรับวิธีการที่จะทำให้กระแสกระตุ้นมีเฟสต่างกัน 90 องศานั้นจำเป็นต้องใช้วงจรเลื่อนเฟสทำหน้าที่ในการเลื่อนเฟสของกระแสกระตุ้น หรือใช้การปรับความยาวระบบป้อนกำลังโดยการทำให้ความยาวของระบบป้อนกำลังแต่ละทางมีความยาวต่างกันเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในไดอิเล็กตริก วิธีการจ่ายกระแสกระตุ้นวิธีนี้ให้แบนด์วิดท์ของอัตราส่วนตามแนว

แกนกว้างกว่าวิธีอื่น แต่อาจมีความผิดเพี้ยนของโพลาไรซ์เนื่องจากการผิดเพี้ยนทางขนาดและเฟสของกระแสกระตุ้น



ก) ข)

รูป 2.8 การจ่ายกระแสกระตุ้นสองจุดโดยใช้ ก) วงจรเลื่อนเฟส ข) การปรับความยาวระบบป้อนกำลัง



รูป 2.9 การจ่ายกระแสกระตุ้นหนึ่งจุด

2. <u>การจ่ายกระแสกระตุ้นให้แก่สายอากาศที่จุดเดียว</u> แผ่นสายอากาศสำหรับวิธีนี้มักใช้แผ่นสายอากาศที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมใกล้เคียงจัตุรัสหรือรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดปลายสองมุม เพื่อให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่างกันเล็กน้อยสองความถี่ โดยที่ความถี่ใช้งานจะมีค่าอยู่ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์ของแต่ละด้านและความถี่เรโซแนนซ์ของแต่ละด้านนี้สามารถคำนวณได้จากความยาวด้านนั้นๆ ของแผ่นสายอากาศนั่นเอง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสองโหมดที่ได้จะมีขนาดของส่วนจริงและส่วนจินตภาพใกล้เคียงกัน แต่ส่วนจินตภาพมีเครื่องหมายต่างกันจึงสามารถประมาณได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองโหมดนั้นมีขนาดเท่ากันและเฟสต่างกัน 90 องศา สำหรับแผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมใกล้เคียงจัตุรัสที่ใช้นั้นขนาดของแผ่นสายอากาศด้านกว้าง b มีค่าตามสมการ 2.2 และด้านยาว a ซึ่งยาวกว่าด้านกว้างเล็กน้อย มีค่าขึ้นกับแบนด์วิดท์ที่ต้องการตามสมการ 2.3 (Carver and Mink, 1981)

$$a = b(1+\frac{1}{Q}) \qquad \text{..... (2.3)}$$

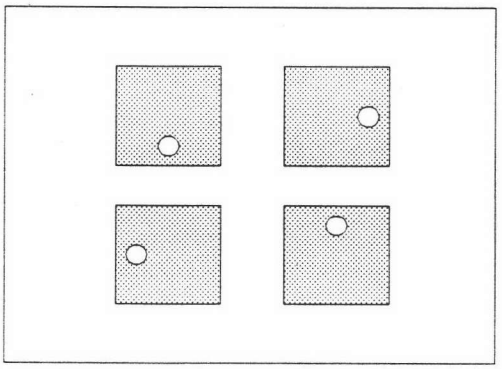
เมื่อ Q คือค่าตัวประกอบกำลังที่มีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์และความถี่ของสายอากาศดังนี้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

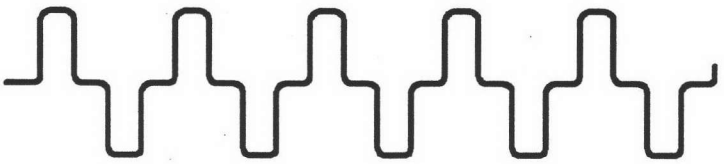
$$Q = \frac{f}{BW} \qquad \text{..... (2.4)}$$

การกำเนิดคลื่นโพลาไรซ์วงกลมด้วยวิธีนี้ใช้พื้นที่สำหรับระบบป้อนกำลังน้อย ทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กกว่าวิธีแรก แต่สายอากาศจะมีโทเลแรนซ์ต่ำ ไวต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ การควบคุมเฟสของกระแสกระตุ้นทำได้ยาก และแบนด์วิดท์ของอัตราส่วนตามแนวแกนแคบกว่าการกระตุ้นสองจุด

3. วิธีการใช้สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้นต่างกัน วิธีการนี้เป็นการนำสายอากาศไมโครสตริปที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้นต่างกันรวมถึงการใช้สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีความไม่ต่อเนื่องทำหน้าที่ในการแผ่พลังงาน ซึ่งจะให้คลื่นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นต่างๆ กันมาจัดเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับเพื่อให้คลื่นลัพธ์ที่ได้มีโพลาไรเซชันแบบวงกลมเนื่องจากการรวมกันของคลื่นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นที่มีขนาดเท่ากันและเฟสตั้งฉากกัน วิธีการนี้ให้แบนด์วิดท์ของอัตราส่วนตามแนวแกนที่กว้างขึ้น แต่การควบคุมโพลาไรเซชันของสายอากาศแต่ละตัวและการออปติไมซ์สายอากาศแถวลำดับทำได้ยาก



รูป 2.10 วิธีการใช้สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้นต่างกัน



รูป 2.11 วิธีการใช้สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีความไม่ต่อเนื่องเพื่อให้คลื่นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นต่างกัน

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าระบบป้อนกำลังและแผ่นฐานไดอิเล็กตริกเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป อย่างไรก็ดีปัจจุบันงานวิจัยในส่วนของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกมุ่งไปในการหาวัสดุที่มีคุณภาพสูงราคาต่ำ ในขณะที่ยังคงมีการศึกษาผลกระทบของระบบป้อน

กำลังแบบต่างๆ เพื่อประโยชน์ในการจัดวางเป็นระบบสายอากาศแถวลำดับที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถควบคุมลักษณะสมบัติของสายอากาศได้ตามต้องการ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานในย่านความถี่แอ็ลที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลม และผลกระทบเนื่องจากการวางตัวของระบบป้อนกำลังแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศ โดยทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการวางตัวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปสองแบบคือ แบบจ่ายกระแสกระตุ้นให้แก่แผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสองจุดที่มีการปรับความยาวสายนำสัญญาณไมโครสตริปทำหน้าที่ในการเลื่อนเฟสของสายอากาศในรูป 2.8 ข) และแบบจ่ายกระแสกระตุ้นหนึ่งจุดให้แก่แผ่นสายอากาศรูปใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัสในรูป 2.9

<u>วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป</u>

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศ เนื่องจากการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสามารถประหยัดเวลาในการออกแบบและช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและผลิตสายอากาศได้เป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ วิธีการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพนั้นนอกจากจะต้องให้คำตอบที่มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดแล้วยังจะต้องมีการใช้เวลาและหน่วยความจำในการประมวลผลอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ในปัจจุบันได้มีการใช้วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปหลายวิธีเพื่อนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งวิธีการต่างๆ ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศสามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มคือ

1. <u>วิธีการเชิงวิเคราะห์</u> วิธีนี้เป็นการนำแบบจำลองทางกายภาพแบบต่างๆ เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถให้ภาพเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสายอากาศได้ชัดเจนกว่าวิธีเชิงเลข ใช้เวลาและหน่วยความจำในการประมวลผลต่ำ สำหรับแบบจำลองที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

1.1 <u>แบบจำลองสายส่ง</u> เช่นในงานของ Dearnley and Barel (1989) และ Akahavan and Mirshekar-Syahakai (1994) แบบจำลองแบบนี้แทนส่วนที่เกิดการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นวงจรของสายส่ง แต่การวิเคราะห์จำกัดเฉพาะแผ่นสายอากาศพื้นฐานบางแบบได้แก่ แผ่นสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม เท่านั้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดคือ มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูง และความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.02 เท่าของความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

1.2 <u>แบบจำลองแบบโพรง</u> ได้แก่งานของ Richards, Lo และ Harrison (1981) Damiano, Papiernik และ Abboud (1988) Thouroude, Himdi และ Daniel (1990) Perez และ Encinar (1993)

ตาราง 2.5ตารางเปรียบเทียบค่าความต้านทานด้านเข้าและความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากการวัดและการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์และวิธีเชิงเลขของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีระบบป้อนกำลังแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปและจ่ายกระแสที่กึ่งกลางของด้านที่แผ่พลังงาน

โครงสร้างของสายอากาศ							
- ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์	10.2	10.2	10.2	2.22	2.22	2.22	2.22
- ความกว้างแผ่นสายอากาศ (มม.)	30	15	30	40	20	40	20
- ความยาวแผ่นสายอากาศ (มม.)	20	9.5	19	25	12.5	25	12
- ความหนาแผ่นฐานไดอิเล็กตริก (มม.)	1.27	1.27	2.54	0.79	0.79	1.52	1.52
- ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (มม.)	1.19	1.19	2.38	2.42	2.42	4.66	4.66
ผลการวัด							
- ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิร์ต)	2.26	4.43	2.18	3.92	7.56	3.82	7.72
- ความต้านทานเนื่องจากการแผ่พลังงาน (โอห์ม)	335	339	363	136	152	119	63
ผลจากแบบจำลองแบบโพรง							
- ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิร์ต)	2.31	4.59	2.29	3.95	7.64	3.83	7.50
- เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)	+2.6	+3.6	+5.0	+0.7	+1.0	+0.2	-2.8
- ความต้านทานเนื่องจากการแผ่พลังงาน (โอห์ม)	306	358	364	139	154	153	150
- เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)	-8.86	+5.6	+0.2	+2.0	+1.3	+28.0	117.0
ผลจากการใช้วิธีของโมเมนต์							
- ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิร์ต)	2.25	4.50	2.33	3.92	7.60	3.80	7.75
- เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)	-0.4	+1.6	+6.9	0	+0.5	-0.5	+0.38
- ความต้านทานเนื่องจากการแผ่พลังงาน (โอห์ม)	350	350	420	130	160	143	145
- เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)	+4.4	+3.2	+15.0	+4.4	+5.3	+20.0	110.0

ที่มา: Daniel, Dubost and Terret, 1993

Hall และ Morrow (1994) เป็นต้น รวมทั้งแบบจำลองวงจรหลายพอร์ตโดย Gupta และ Benalla (1988) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองแบบโพรง แบบจำลองนี้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยแบบจำลองแบบโพรงและทฤษฎีสมมูล แผ่นสายอากาศรูปพื้นฐานต่างๆ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้และอาจใช้วิธีการเซกเมนต์เตชันและดีเซกเมนต์เตชันร่วมด้วยสำหรับแผ่นสายอากาศรูปร่างอื่นๆ นอกเหนือจากรูปร่างพื้นฐานได้ นอกจากนั้นการใช้แบบจำลองแบบโพรงนี้ยังสามารถรวมผลของการแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลังและความไม่ต่อเนื่องของชิ้นส่วนอื่นๆ ในระบบสายอากาศได้ แต่ความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกที่ใช้จะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.02 เท่าของความยาวคลื่นในอวกาศว่างเพื่อความแม่นยำของผลตอบ ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบโพรงนี้จะกล่าวถึงในบทต่อไป

2. <u>วิธีการเชิงเลข</u> เป็นการแก้ปัญหาค่าขอบเขตทางทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการเชิงเลขแบบต่างๆ วิธีการเชิงเลขนี้สามารถใช้กับแผ่นสายอากาศรูปใดๆ ได้ และสามารถให้ผลตอบที่ความแม่นยำสูงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการแบ่งจำนวนชิ้นส่วนย่อยในการคำนวณและการแทนฟังก์ชันของแต่ละชิ้นส่วนย่อยนั้น ถ้าแบ่งชิ้นส่วนย่อยให้มีขนาดใหญ่มาก จำนวนชิ้นส่วนย่อยน้อย ผลตอบที่ได้จะมีความผิดพลาดสูง และเมื่อแบ่งชิ้นส่วนย่อยให้มีขนาดเล็กลง จำนวนชิ้นส่วนย่อยมากขึ้น คำตอบที่ได้ก็จะมีความแม่นยำสูงขึ้น ผลตอบที่ได้จากวิธีการเชิงเลขนี้อาจมีผลตอบปลอมเทียมเกิดขึ้น ทำให้ผลตอบที่ได้มีความผิดพลาดหากไม่มีการกำจัดผลตอบปลอมเทียมนั้น นอกจากนี้เวลาและหน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผลสูงกว่าวิธีเชิงวิเคราะห์มาก สำหรับวิธีการเชิงเลขที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่ วิธีของโมเมนต์ (Pozar, 1982; Gardiol and Mosig, 1983; Mittra, Park and Arksun, 1995) วิธีไฟไนต์เอลีเมนต์ (Wu and Litva, 1990; Tian and Lighthart, 1995) วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา(Kashiwa, Onishi and Fukai, 1983) เป็นต้น

วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ วิธีการใช้แบบจำลองแบบโพรง ถึงแม้วิธีวิเคราะห์นี้จะมีข้อจำกัดในเรื่องความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริก แต่หากพิจารณาความถี่ที่ศึกษาคือความถี่ย่านแอ็ลประมาณ 1.6 กิกะเฮิร์ต ความยาวคลื่นในอวกาศว่างจะมีค่าเท่ากับ 18.75เซนติเมตร ฉะนั้นความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบโพรงมีความแม่นยำสูงซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.02 เท่าของความยาวคลื่นในอวกาศว่างนั้น จะมีค่าเท่ากับ 0.375 เซนติเมตร และหากพิจารณาแผ่นฐานไดอิเล็กตริที่นิยมใช้ทั่วไปคือเทฟลอนไฟเบอร์กลาสนั้น ความหนาที่นิยมใช้และมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ (Hall and James, 1989) มีค่าเท่ากับ 1/8 นิ้ว (0.318เซนติเมตร) 1/16 นิ้ว (0.159เซนติเมตร) และ1/32 นิ้ว (0.079เซนติเมตร) ตามลำดับ ซึ่งความหนาเหล่านี้ยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้แบบจำลองแบบโพรงให้ผลตอบที่มีความถูกต้อง นอกจากนี้จากตาราง 2.5 จะเห็นว่าคำตอบที่ได้จากแบบจำลองแบบโพรงและวิธีการเชิงเลขมีความแม่นยำใกล้เคียงกันเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์มีค่าต่ำและความหนาของแผ่นฐานไดอิเล็กตริกต่ำเมื่อเทียบกับความถี่ใช้งาน ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองแบบโพรงมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป และศึกษาผลกระทบจากสายนำสัญญาณไมโครสตริปในวิทยานิพนธ์นี้ได้เป็นอย่างดี