

# เทคโนโลยีในการออกแบบวงจรความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริป

## Technologies in Design of Microstrip Bandstop Filters

นิวัตร์ อังควิษฐพันธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

Niwat Angkawisitpan

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai,

Mahasarakham 44150

Tel: 0-4375-4316 E-mail: niwat.a@msu.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นบททบทวนถึงเทคโนโลยีในการออกแบบวงจรความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริป บทความนี้ได้อธิบายคุณลักษณะพื้นฐานของวงจรความถี่แถบหยุดผ่าน เทคนิคในการออกแบบวงจรความถี่ 7 เทคนิคในบทความนี้ ประกอบด้วย โครงสร้างวงแหวนปิด โครงสร้างสลับปลายเปิด โครงสร้างที่อาศัยการคับปลิงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โครงสร้างช่องว่างแถบโพโตนิคส์ โครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ โครงสร้างเดี่ยว และโครงสร้างอภิวัดดู นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงข้อดี และข้อเสียของการออกแบบวงจรด้วยเทคนิคต่างๆ

**คำหลัก** วงจรความถี่แถบหยุดผ่าน วงแหวนปิด สลับปลายเปิด วงจรความถี่แบบการคับปลิง โครงสร้างช่องว่างแถบโพโตนิคส์ โครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ โครงสร้างเดี่ยว โครงสร้างอภิวัดดู

### Abstract

A review on the technologies in design of microstrip bandstop filters is outlined in this article. Basic properties of microstrip bandstop filters are explained. Seven different techniques for bandstop filter design are listed, i.e. closed-ring bandstop filters, open stub bandstop filters, coupling bandstop filters, photonic band gap structure filters, defected ground structure filters, spurline bandstop filters, and metamaterial structure filters. The advantages and

disadvantages of designs are also reported.

**Keywords:** Microstrip bandstop filters, closed-ring, open stub, coupling bandstop filters, photonic band gap structure, defected ground structure, spurline, metamaterial.

### 1. บทนำ

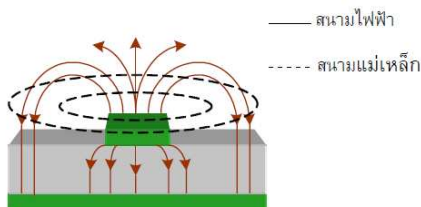
ในปัจจุบัน เทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารโทรคมนาคมจัดได้ว่ามีบทบาทที่สำคัญมากโดยเฉพาะการสื่อสารในย่านไมโครเวฟซึ่งเป็นย่านที่มีการใช้งานในระบบสื่อสารต่างๆ ทั้งในระบบวิทยุสื่อสาร ระบบโทรศัพท์มือถือ ระบบอินเทอร์เน็ตไร้สาย เป็นต้น นักวิจัยทั้งหลายได้พัฒนางจรและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้รองรับกับระบบสื่อสารโทรคมนาคมนั้นๆ [1-2] ระบบสื่อสารไร้สายมีหลายระบบด้วยกัน เช่น ระบบ DCS (1720-1880 MHz) ระบบ PCS (1850-1990 MHz) ระบบ IMT-2000 (1920-2170 MHz) ระบบ WLAN IEEE 802.11 มีสองความถี่คือ 2.4 GHz (2400-2484 MHz) และความถี่ 5.2 GHz (5150-5350 MHz) และ WiMAX IEEE 802.16a (2GHz-11GHz) เป็นต้น [3-12]

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบพื้นฐานของระบบสื่อสารในย่านไมโครเวฟ วงจรความถี่เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ได้ถูกออกแบบและนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันอุปกรณ์สื่อสารได้ถูกพัฒนาด้วยเทคโนโลยีหลากหลายแบบเพื่อให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง จึงมีการนิยมออกแบบโครงสร้างวงจรความถี่กับสายนำสัญญาณไมโครสตริป (microstrip transmission lines)

[13]

สายนำสัญญาณไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณแบบโครงสร้างระนาบ (planar structure) ที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board) และใช้เชื่อมโยงส่วนต่าง ๆ ของวงจร เนื่องจากโครงสร้างมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา การสูญเสียต่ำ และง่ายต่อการออกแบบเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ (microwave integrated circuits) จึงได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย [13] รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปพร้อมด้วยทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปประกอบด้วย ส่วนที่เป็นสตริป (strip) มีลักษณะเป็นแผ่นบางมีความกว้างระดับหนึ่ง ทำจากทองแดงเคลือบอยู่บนผิวด้านบนของแผ่นวงจรพิมพ์ ทำหน้าที่เป็นสายนำสัญญาณ วัสดุฐานรอง (substrate) ทำจากสารไดอิเล็กตริก (dielectric materials) และส่วนที่เป็นระนาบกราวด์ (ground plane) มีลักษณะเป็นแผ่นบางทำจากทองแดงเคลือบอยู่ที่ผิวด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์ ทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์

พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งเข้าไปที่สายนำสัญญาณไมโครสตริปโดยคลื่นที่ผ่านวัสดุฐานรองที่อยู่ระหว่างแผ่นสตริปและระนาบกราวด์ ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กภายในสายนำสัญญาณไมโครสตริปแสดงในรูปที่ 1 การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลักษณะนี้ มีความใกล้เคียงกับโหมด TEM (Transverse Electromagnetic Mode) ซึ่งถูกเรียกว่า Quasi-TEM เวกเตอร์สนามไฟฟ้า และเวกเตอร์สนามแม่เหล็กจะขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงภาคตัดขวางโครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป ทิศทางของสนามไฟฟ้า และทิศทางของสนามแม่เหล็ก [14]

วงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริป (microstrip bandstop filters) เป็นวงจรหนึ่งที่มีบทบาทและสำคัญยิ่งในระบบสื่อสารซึ่งทำหน้าที่กำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการ เพื่อไม่ให้ออกไปช่องทางออกได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านมีอยู่มากมาย การนำมาใช้ถึงทั้งหมดจะไม่สามารถทำให้ศึกษาถึงในรายละเอียดที่ลึกซึ้งได้ บทความวิชาการนี้จึงขอกว่าเฉพาะการออกแบบวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริปบางโครงสร้างเท่านั้น

บทความนี้มีเป้าหมายที่จะทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการออกแบบวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริป ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นจากอดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อให้เห็นวิวัฒนาการของวงจร ตลอดจนข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคนิคในการออกแบบวงจรรองความถี่

## 2. คุณสมบัติพื้นฐานของวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริป

เพื่อให้เข้าใจหลักการการวิเคราะห์วงจรรองความถี่แถบหยุดผ่าน ผู้อ่านควรเข้าใจในคุณสมบัติพื้นฐานสำคัญบางอย่างของวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่าน คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของวงจร เช่น พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย (scattering parameters) ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) และความถี่ศูนย์กลาง (center frequency)

### 2.1 พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย

การวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสารแบบสองช่องทาง (two-port network) เป็นการคำนวณหาพารามิเตอร์แบบอิมพีแดนซ์ (z parameters) แอดมิตแตนซ์ (y parameters) และ ABCD matrix ในเทอมของความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ช่องทางที่ 1 และช่องทางที่ 2 พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจายที่มีความสำคัญต่อวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่าน เช่น S11 และ S21 [1,2,13]

S11 เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficients) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่บอกปริมาณของกำลังงานที่สะท้อนกลับจากวงจรรองความถี่ ณ ความถี่นั้น ๆ ว่ามีการสะท้อนกลับมากมายน้อยเพียงใด [2]

S21 เรียกว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปยังข้างหน้า (forward transmission coefficients) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่บอกปริมาณของกำลังงานที่สามารถส่งผ่านวงจรรองความถี่ ณ ความถี่นั้น ๆ ว่ามีการส่งผ่านออกไปได้มากเพียงใด [2]

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองความถี่ส่วนใหญ่ จะแสดงผลของ S11 และ S21 ในรูปแบบของค่าสัมบูรณ์หรือในรูปแบบหน่วยเดซิเบล (decibel, dB) เพื่อบอกคุณภาพของการกรองของวงจรกรองความถี่นั้น ๆ

**2.2 ความถี่คัทออฟ**

ในกรณีของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่าน ความถี่คัทออฟเป็นความถี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าเท่ากับ -3 dB [13] หรืออีกความหมายหนึ่ง คือ เป็นความถี่ที่ช่องทางออก (output, port 2) สามารถรับกำลังได้เพียงครึ่งหนึ่งของกำลังที่ส่งเข้าไปทางช่องทางเข้า (input, port 1) [2]

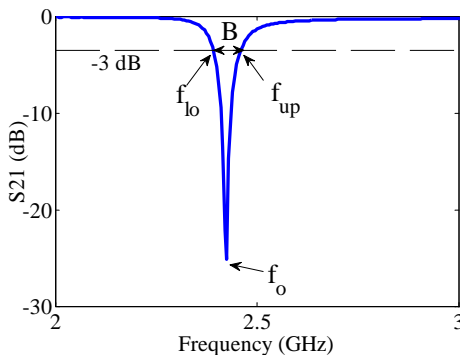
**2.3 ความกว้างแถบความถี่**

ความกว้างแถบความถี่ของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่าน คือ ความกว้างของช่วงความถี่ที่วงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านสามารถกำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการเพื่อไม่ให้ออกไปช่องทางออกได้ โดยทั่วไปสามารถหาได้จากผลต่างของความถี่คัทออฟสูงและความถี่คัทออฟต่ำ

**2.4 ความถี่ศูนย์กลาง**

ความถี่ศูนย์กลางเป็นความถี่ที่ถูกลดทอนกำลังได้มากที่สุด ซึ่งอยู่ระหว่างความถี่คัทออฟต่ำ และความถี่คัทออฟสูง

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านได้ถูกอธิบายแล้ว อย่างไรก็ตาม เพื่อให้มองเห็นภาพให้ชัดเจน จึงได้แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านของวงจรหนึ่ง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปยังข้างหน้าของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านวงจรหนึ่ง

รูปที่ 2 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปยังข้างหน้าของวงจรกรองความถี่แถบหยุด

ผ่านกับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อ  $f_0$  คือความถี่คัทออฟต่ำ  $f_{up}$  คือความถี่คัทออฟสูง  $f_0$  คือความถี่ศูนย์กลาง และ  $B$  คือความกว้างแถบความถี่ ( $f_{up}-f_0$ ) ซึ่งจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปยังข้างหน้าในช่วงความถี่แถบความถี่มีค่าต่ำกว่า -3 dB มาก ความถี่ที่อยู่ในช่วงนี้ไม่สามารถผ่านวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านออกไปได้

**3.การออกแบบวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบไมโครสตริป**

การออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบไมโครสตริปมีด้วยกันหลายเทคนิคต่าง ๆ กันไป ผู้เขียนจึงขอแนะนำบางวงจรดังต่อไปนี้

**3.1 การออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยวงแหวนปิด**

วงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านชนิดวงแหวนปิด (closed-ring bandstop filters) ดังรูปที่ 3 [15] ถูกออกแบบโดยให้เส้นรอบวงของวงแหวนปิด ( $l_R$ ) มีค่าเท่ากับจำนวนเต็มบวกเท่าของความยาวคลื่นในสายนำสัญญาณ (guided wavelength,  $\lambda_g$ ) ตามสมการที่ (1)-(5) [13,15]

$$l_R = n\lambda_g \tag{1}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{2}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \tag{3}$$

โดยที่  $W$  คือความกว้างของแผ่นสตริป (เมตร)  $h$  คือความสูงของวัสดุฐานรอง (เมตร)  $n$  คือจำนวนเต็มบวก  $f$  คือความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz)  $c$  คือความเร็วแสงขนาด  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที  $\lambda_0$  คือความยาวคลื่นของความถี่นั้นในปริภูมิว่าง (เมตร)  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง และ

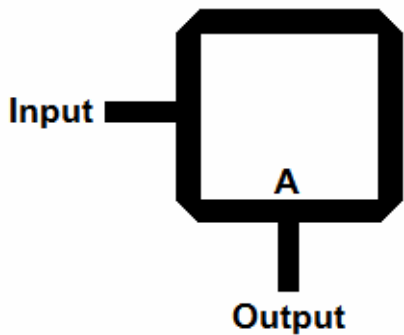
เมื่อ  $W / h \leq 1$ ;

$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left\{ \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} + 0.04 \left( 1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right\} \tag{4}$$

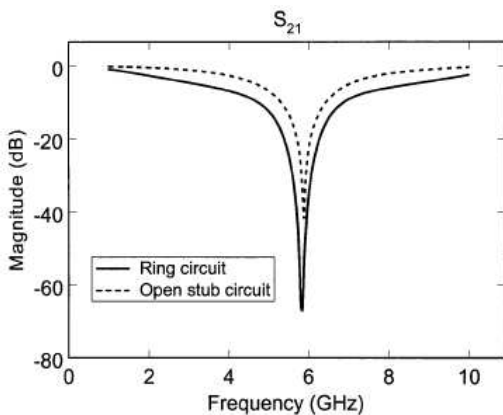
เมื่อ  $W / h \geq 1$ ;

$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r + 1) + (\epsilon_r - 1) \left\{ \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} \right\}}{2} \quad (5)$$

ทางออกของวงจรชนิดนี้ถูกต่อออกจากวงแหวนปิด ในระยะทางที่ห่างจากทางเข้าเท่ากับ  $\lambda_g / 4$  ที่ตำแหน่ง A ระยะห่างนี้ทำให้เกิดการลัดวงจรที่ความถี่นี้ [16] จึงไม่มีพลังงานไหลออกที่ทางออกนี้ ดังนั้นวงจรแบบวงแหวนปิดจึงแสดงพฤติกรรมหยุดผ่านในช่วงแถบความถี่นี้ รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรแบบวงแหวนปิดด้วยเส้นทึบ รูปนี้ได้แสดงให้เห็นแถบหยุดผ่านที่ความถี่ 6 GHz ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าประมาณ -70 dB



รูปที่ 3 วงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบวงแหวนปิด [15]



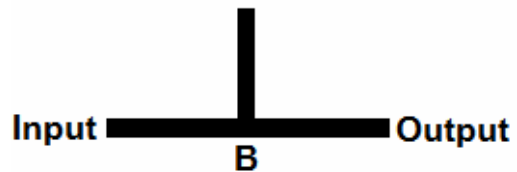
รูปที่ 4 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบวงแหวนปิด (เส้นทึบ) และแบบสตัปปลายเปิด (เส้นประ) ด้วยคอมพิวเตอร์ [15]

### 3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยสตัปปลายเปิด

วงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านชนิดสตัปปลายเปิด (open stub bandstop filters) ดังรูปที่ 5 ถูกออกแบบโดย

ให้ความยาวของสตัปปลายเปิดมีค่าเท่ากับ  $\lambda_g / 4$  [15]

ที่ความถี่ที่ต้องการให้หยุดผ่านจะมีค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง B ต่ำที่สุด ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุดที่ตำแหน่งเดียวกัน [15] ดังนั้นค่าของแรงดันที่ตำแหน่งนี้มีค่าใกล้เคียงศูนย์เป็นอย่างมาก วงจรนี้จึงแสดงพฤติกรรมหยุดผ่านในช่วงแถบความถี่นี้ด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรแบบสตัปปลายเปิดแสดงด้วยเส้นประดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นแถบหยุดผ่านที่ความถี่ 6 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของความถี่นี้มีค่าประมาณ -40 dB



รูปที่ 5 วงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบสตัปปลายเปิด [15]

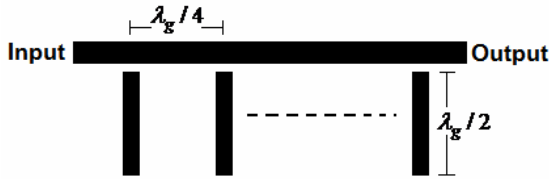
เนื่องจากวงจรชนิดนี้มีความกว้างแถบความถี่แคบกว่าของวงจรแบบวงแหวนปิด และในบางกรณี ต้องการให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้น และให้ขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าในช่วงแถบหยุดผ่านมีขนาดที่ลดลงอีก จำเป็นต้องต่อวงจรแบบสตัปปลายเปิดเรียงกันหลาย ๆ ชั้นอันดับ โดยมีระยะห่างแต่ละชั้นเท่ากับ  $\lambda_g / 4$  อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องขนาดวงจรที่ใหญ่ขึ้น และค่าความสูญเสียจากการใส่แทรก (insertion loss) ที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

### 3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยการคัปปลิงสนามไฟฟ้าและการคัปปลิงสนามแม่เหล็ก

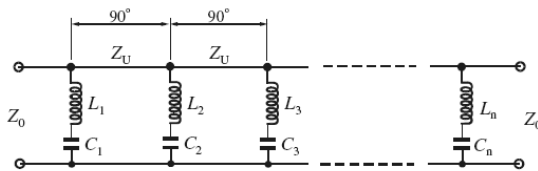
ในการออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบคัปปลิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามชนิดของสนามที่ใช้ในการคัปปลิง คือการคัปปลิงด้วยสนามไฟฟ้า (electric couplings) และการคัปปลิงด้วยสนามแม่เหล็ก (magnetic couplings) [13] โครงสร้างและวงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยการคัปปลิงสนามไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ ขณะที่โครงสร้างและวงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยการคัปปลิงสนามแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่แบบคัปปลิง

สนามไฟฟ้าอาศัยการคัปปลิงของสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชี้ระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ สนามไฟฟ้านี้ทำการคัปปลิงผ่านช่องแคบเข้าไปที่ปลายด้านที่ใกล้ที่สุดของสแต็บ เมื่อสแต็บปลายเปิดมีระยะห่างกัน  $\lambda_g/4$  หลายๆ อันตบ มีผลทำให้เกิดแถบหยุดผ่านที่กว้างขึ้นที่ความถี่นั้น

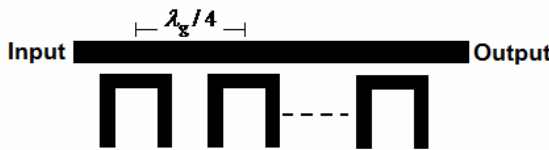


รูปที่ 6 โครงสร้างวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบคัปปลิงสนามไฟฟ้า [13]

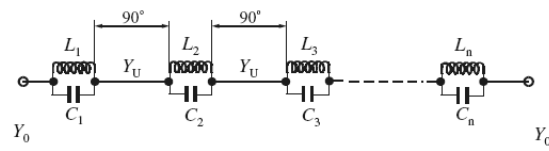


รูปที่ 7 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบคัปปลิงสนามไฟฟ้า [13]

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่แบบคัปปลิงสนามแม่เหล็กอาศัยสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางล้อมรอบสายนำสัญญาณ ซึ่งได้คัปปลิงเวกเตอร์สนามแม่เหล็กเข้าที่สแต็บรูปตัวอักษรซี (C) เมื่อสแต็บรูปตัวอักษรซีมีระยะห่างกัน  $\lambda_g/4$  หลายๆ อันตบ มีผลทำให้เกิดแถบหยุดผ่านที่กว้างขึ้นที่ความถี่นั้น



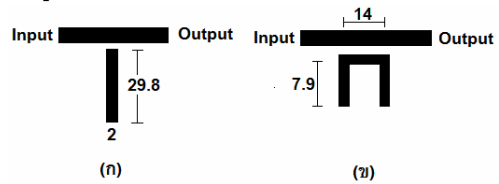
รูปที่ 8 โครงสร้างวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบคัปปลิงสนามแม่เหล็ก [13]



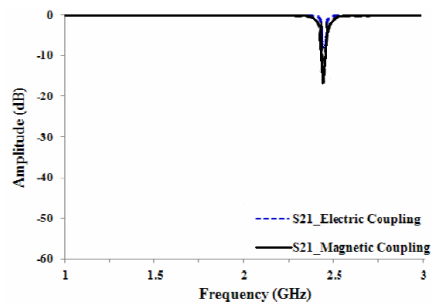
รูปที่ 9 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบคัปปลิงสนามแม่เหล็ก [13]

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนขึ้น ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์

การส่งผ่านไปข้างหน้าของโครงสร้างวงจรกรองความถี่แบบคัปปลิงสนามไฟฟ้าและแบบคัปปลิงสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 10 [17] ด้วยโปรแกรมสำหรับการจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 11 เมื่อแผ่นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เท่ากับ 6.15 มีความหนา 1.27 มิลลิเมตร ความถี่หยุดผ่านเท่ากับ 2.45 GHz ความยาวคลื่นในสายนำสัญญาณเท่ากับ 57.8 มิลลิเมตร ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3)-(5) ความกว้างของสายนำสัญญาณเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับสแต็บมีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร หน่วยความยาวในรูปที่ 10 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ 10 การจำลองโครงสร้างของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่าน (ก) แบบคัปปลิงสนามไฟฟ้า (ข) แบบคัปปลิงสนามแม่เหล็ก [17]



รูปที่ 11 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยการคัปปลิงสนามไฟฟ้าและการคัปปลิงสนามแม่เหล็ก [17]

ผลการจำลองในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นแถบหยุดผ่านที่ความถี่ประมาณ 2.5 GHz แม้โครงสร้างของวงจรทั้งสองแบบจะไม่เหมือนกัน แต่ก็ให้ผลตอบสนองทางความถี่ที่ใกล้เคียงกัน

### 3.4 การออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์

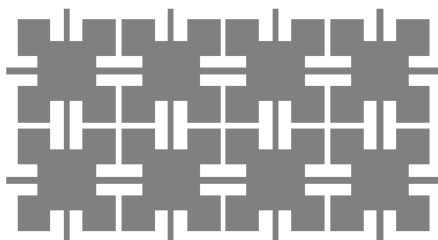
ปัจจุบันได้มีการนำเอาโครงสร้างทางฟิสิกส์สถานะของแข็ง (solid state physics) มาประยุกต์ใช้กับศาสตร์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic crystal structures) สำหรับคลื่นความถี่วิทยุ ไมโครเวฟ และความถี่แสง [18] โดยปกติโครงสร้างชนิดนี้ถูกจัดเรียงเป็นลักษณะ

โครงสร้างคาบในวัสดุ เช่น โลหะ หรือวัสดุฐานรอง เพื่อให้มีผลเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุนั้น โครงสร้างชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ไม่ยอมให้แถบความถี่บางแถบสามารถแพร่ผ่านออกไปได้ แม้ว่าจะมีการนำมาใช้งานกับช่วงความถี่วิทยุ และไมโครเวฟ แต่ก็ยังเรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า โครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ (Photonic Band Gap, PBG) เนื่องจากจุดเริ่มต้นของโครงสร้างนี้กำเนิดในช่วงความถี่แสง [19]

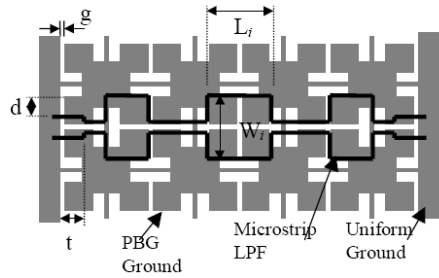
E. Yablonovitch [19] และ S. John [20] ได้นำเสนอโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์มาประยุกต์ใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1987 นับแต่นั้นมา โครงสร้างลักษณะนี้ก็ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อนำมาใช้กับอุปกรณ์ทางด้านการสื่อสารเป็นอย่างมาก เช่น สายอากาศ และ วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ [21-34]

โครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์สามารถนำมารวมกับวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ เช่น ช่วยลดขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าในช่วงแถบหยุดผ่าน รูปที่ 12 แสดงโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ที่ระนาบกราวด์ [26] โครงสร้างนี้นำไปรวมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filters) ดังรูปที่ 13 ส่วนที่เป็นลายเส้นหนาและทึบ แสดงส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่อยู่เหนือระนาบกราวด์

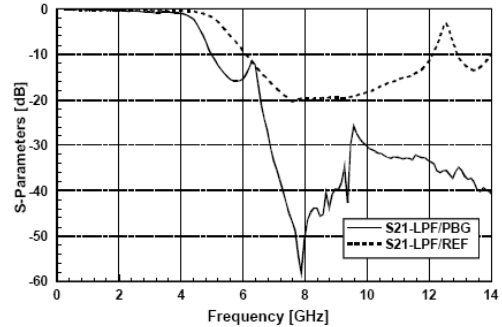
ผลการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรนี้แสดงดังรูปที่ 14 เส้นทึบแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ช่วยลดขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ณ ความถี่ 8 GHz ได้มากถึง 40 dB เมื่อเทียบกับเส้นประของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ไม่มีโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์



รูปที่ 12 โครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ที่ระนาบกราวด์ [26]



รูปที่ 13 โครงสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ที่ระนาบกราวด์ [26]



รูปที่ 14 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเมื่อมีโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ที่ระนาบกราวด์ (เส้นทึบ) และไม่มีโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ที่ระนาบกราวด์ (เส้นประ) [26]

### 3.5 การออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ

ข้อดีของการนำเอาโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์มาใช้ร่วมกับวงจรกรองความถี่ คือ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ในช่วงแถบหยุดผ่าน อย่างไรก็ตามการออกแบบด้วยโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์มีความยุ่งยากในการออกแบบ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลายตัวที่จำเป็นต้องพิจารณา เช่น จำนวนของแลตติซ (number of lattice) รูปร่างของแลตติซ (lattice shapes) ระยะห่างระหว่างแลตติซ (lattice spacing) และสัดส่วนปริมาตรสัมพัทธ์ (relative volume fraction) นอกจากนี้ยังมีปัญหาการแพร่กระจายของพลังงานรั่วออกทางระนาบกราวด์ที่เกิดจากการเซาะร่องแบบลักษณะคาบของโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์อีกด้วย [35]

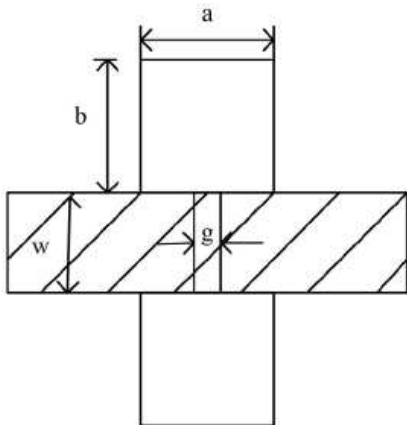
ในปี ค.ศ. 1999 J.-I. Park และคณะ [34] ได้นำเสนอโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ (Defected Ground Structure, DGS) เพื่อแก้ปัญหาพลังงานรั่วไหลของโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาพลังงานรั่วไหลที่ระนาบกราวด์ได้ในระดับหนึ่ง

โครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ คือ โครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์ของสายนำ

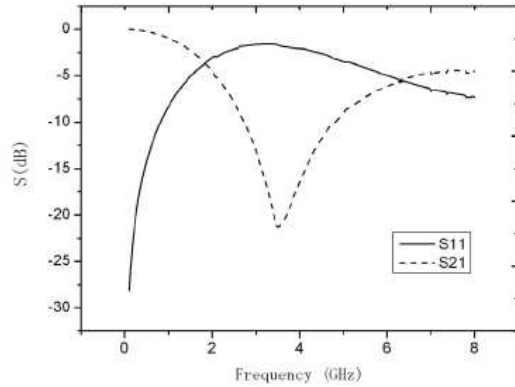


สัญญาณแบบระนาบ (planar transmission lines) เช่น สายนำสัญญาณไมโครสตริป และสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม (coplanar transmission lines) โครงสร้างของการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์อาจเป็นการเจาะร่องแบบลักษณะคาบหรือไม่ก็ได้ การเจาะร่องที่ระนาบกราวด์ทำให้เกิดการรบกวนการกระจายของกระแสในสายนำสัญญาณ ทำให้คุณลักษณะของสายนำสัญญาณเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ายังผล (effective inductance) และค่าความเก็บประจุไฟฟ้ายังผล (effective capacitance) ของสายนำสัญญาณเพิ่มขึ้น [34]

ตัวอย่างที่ง่ายของโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ คือโครงสร้างที่มีการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์เป็นรูปสี่เหลี่ยม จำนวน 2 รูป และมีการเจาะร่องเพื่อเชื่อมต่อระหว่างรูปสี่เหลี่ยมทั้งสองรูปซึ่งมีลักษณะคล้ายดัมเบลล์ (dumbbell) [35] ตัวอย่างของโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิแสดงดังรูปที่ 15 เมื่อส่วนที่แข็งแรงคือ สายนำสัญญาณ และส่วนที่ไม่ได้แรงแสดงบริเวณที่มีการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์ รูปที่ 16 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้า (S21) ของวงจรในรูปที่ 14 [35]

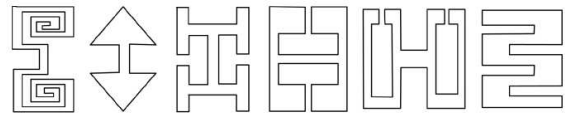


รูปที่ 15 โครงสร้างวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านเมื่อมีโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ [35]



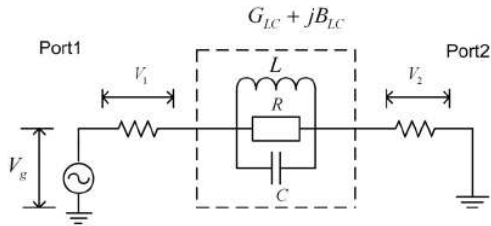
รูปที่ 16 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้า (S21) ของวงจรในรูปที่ 14 [35]

รูปที่ 15 และรูปที่ 16 แสดงให้เห็นข้อดีของโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ เช่น การเจาะร่องเพียงบางจุด ทำให้ลดการแพร่กระจายของพลังงานรั่วไหลที่ระนาบกราวด์ได้ในระดับหนึ่ง และโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ชนิดนี้ก็มีขนาดเล็กลงด้วย นอกจากการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์คล้ายรูปดัมเบลล์แล้ว โครงสร้างอื่น ๆ ก็สามารถแสดงคุณลักษณะหยุดผ่านได้เช่นกัน [35] รูปที่ 17 แสดงโครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่ให้คุณลักษณะหยุดผ่าน



รูปที่ 17 โครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิแบบต่าง ๆ [35]

การออกแบบ และการวิเคราะห์โครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิจำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมสำหรับการจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านที่มีโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมิติทางกายภาพ (physical dimensions) หรือขนาดของโครงสร้างกับวงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ได้ อย่างไรก็ตามวงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่นี้สามารถหาได้จากพารามิเตอร์แบบกระจายเช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้า รูปที่ 18 แสดงวงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่าน พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลหาได้จากสมการที่ (6)-(8) [36]



รูปที่ 18 วงจรสมมูลของวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านที่ออกแบบด้วยโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ [36]

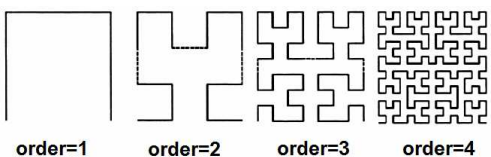
$$C = \frac{\omega_c}{2Z_0(\omega_0^2 - \omega_c^2)} \quad (6)$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (7)$$

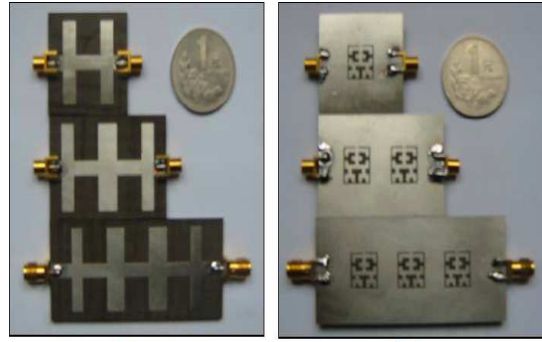
$$R(\omega) = \frac{2Z_0}{\sqrt{|S_{11}(\omega)|^2 - \left(2Z_0\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right)^2} - 1} \quad (8)$$

เมื่อ  $C$  คือค่าเก็บประจุไฟฟ้าของวงจรสมมูล (ฟารัด, F)  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรสมมูล (เฮนรี, H)  $R$  คือความต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่เชิงมุมใด ๆ (โอห์ม,  $\Omega$ )  $\omega_0$  คือความถี่เชิงมุมศูนย์กลาง (เรเดียนต่อวินาที)  $\omega_c$  คือ ความถี่เชิงมุมคutoffต่ำ (เรเดียนต่อวินาที)  $Z_0$  คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (เท่ากับ 50 โอห์ม)  $S_{11}$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่เชิงมุมใด ๆ  $\omega$  คือความถี่เชิงมุมใด ๆ (เท่ากับ  $2\pi f$  เรเดียนต่อวินาที)  $f$  คือ ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz) [36]

โครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรองความถี่ไมโครเวฟแบบต่างๆ ได้ เช่น การนำระนาบกราวด์ที่มีตำหนิรูปเรขาคณิตเส้นโค้งฮิลเบิร์ต (hilbert curve) อันดับต่างๆ ดังรูปที่ 19 มาช่วยในการลดขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าในช่วงแถบหยุดผ่านของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านดังรูปที่ 20 จากรูปที่ 20(ก) แสดงภาพถ่ายด้านบนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่นำเส้นโค้งฮิลเบิร์ตมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในขณะที่รูปที่ 20(ข) แสดงภาพถ่ายด้านล่างของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านชนิดนี้ซึ่งแสดงให้เห็นการเจาะร่องตามเส้นโค้งฮิลเบิร์ตอันดับต่างๆ



รูปที่ 19 รูปเรขาคณิตของเส้นโค้งฮิลเบิร์ตอันดับต่าง ๆ [37]



(ก)

(ข)

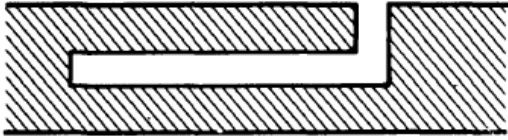
รูปที่ 20 การประยุกต์ใช้โครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิแบบเส้นโค้งฮิลเบิร์ตร่วมกับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (ก) แสดงภาพถ่ายด้านบนของวงจร (ข) แสดงภาพถ่ายด้านล่างของวงจร [37]

โครงสร้างของวงจรรองความถี่ที่มีการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์ทั้งแบบโครงสร้างช่องว่างแถบโพลติโตนิกส์ และโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิสามารถนำมาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพวงจรรองความถี่แบบต่างๆ แต่ยังมีปัญหาในเรื่องของการแพร่กระจายของพลังงานรั่วไหลที่ระนาบกราวด์ การออกแบบและวิเคราะห์จำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมสำหรับการจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อความสะดวก และรวดเร็ว นอกจากนั้นวงจรรองความถี่ที่ออกแบบด้วยเทคนิคการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์จำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นการไม่ได้แนว (misalignment) ของโครงสร้างที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของวงจรเมื่อทำการสร้างวงจรด้วย

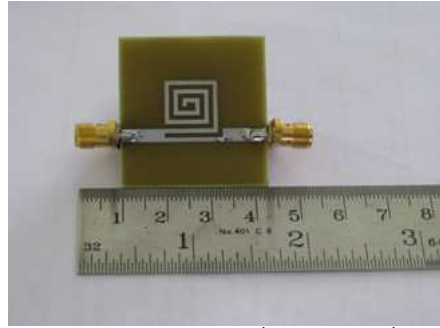
### 3.6 การออกแบบวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยโครงสร้างเดียว

โครงสร้างเดียว (spurlines) สำหรับวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านถูกนำเสนอโดย R.N. Bates ในปี ค.ศ. 1977 ดังรูปที่ 21 [38] วงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านชนิดนี้มีขนาดที่เล็กมากเมื่อเทียบกับวงจรรองความถี่ทั่วไป ด้วยคุณสมบัติที่มีการแพร่กระจายพลังงานออกมานอกวงจรต่ำ [38] และโครงสร้างชนิดนี้สามารถถูกพัฒนาด้วยเทคนิคควกเวียน (meander technique) และถูกนำมารวมกับวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านเพื่อเป้าหมายของการเพิ่มความกว้างแถบความถี่หยุดผ่านแต่ยังคงรักษาขนาดของวงจรให้เท่าเดิมได้เป็นอย่างดี [39] ดังแสดงในรูปที่ 22 ดังนั้นวงจรชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง

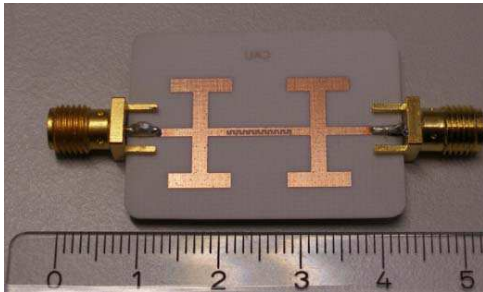




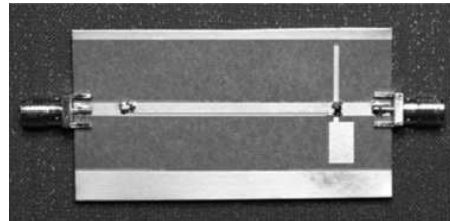
รูปที่ 21 โครงสร้างไมโครสตริปของวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบโครงสร้างเดี่ยว ส่วนที่แรเงาแสดงส่วนที่เป็นสายนำสัญญาณไมโครสตริป [38]



รูปที่ 23 รูปถ่ายของวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านที่ใช้โครงสร้างเดี่ยวร่วมกับวงจรเกลียว [40]



รูปที่ 22 รูปถ่ายของวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านแบบสลับรวมกับโครงสร้างเดี่ยวแบบวงเวียน [39]



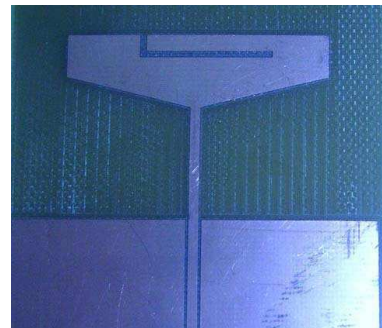
รูปที่ 24 รูปถ่ายของวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านที่สามารถปรับความถี่ศูนย์กลางและความกว้างแถบความถี่ด้วยการใช้โครงสร้างเดี่ยวร่วมกับการปรับแรงดันไบแอสที่วาร์กเตอร์ [41]

ด้วยโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ไม่มีปัญหาเรื่องการไม่ได้แนวของโครงสร้างเมื่อทำการสร้างวงจร และสมการที่ใช้ในการออกแบบวงจรมีความสัมพันธ์กับมิติทางกายภาพ ทำให้การออกแบบมีความง่ายเป็นอย่างมาก สมการที่ใช้ในการออกแบบคือสมการที่ (2)-(5) และ สมการที่ (9)

$$L = \frac{\lambda_g}{4} \quad (9)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความยาวของการเซาะร่องที่สายนำสัญญาณของไมโครสตริป(เมตร)

มีตัวอย่างงานวิจัยมากมายที่ได้นำโครงสร้างเดี่ยวไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรต่างๆ เช่น วงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านที่ใช้โครงสร้างเดี่ยวแบบวงเวียนร่วมกับสลับ ดังรูปที่ 22 [39] วงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านร่วมกับวงจรเกลียว (spiral circuit) สำหรับการใช้งานช่วงความถี่ต่ำดังรูปที่ 23 [40] วงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านที่สามารถปรับความถี่ศูนย์กลางและความกว้างแถบความถี่ด้วยการใช้โครงสร้างเดี่ยวร่วมกับการปรับแรงดันไบแอสที่วาร์กเตอร์ (varactor bias voltage) ดังรูปที่ 24 [41] และระบบสายอากาศชั่วคราวที่สามารถทำงานได้สองความถี่ด้วยโครงสร้างเดี่ยว ดังรูปที่ 25 [42]

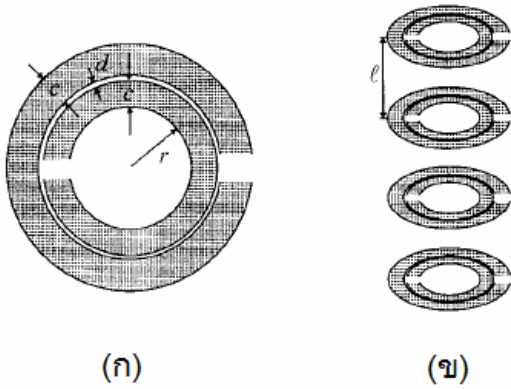


รูปที่ 25 รูปถ่ายของสายอากาศชั่วคราวที่ใช้โครงสร้างเดี่ยวเพื่อทำให้เกิดสายอากาศชั่วคราวที่สามารถทำงานได้สองความถี่ [42]

### 3.7 การออกแบบวงจรรองความถี่แถบหยุดผ่านด้วยอภิวัด

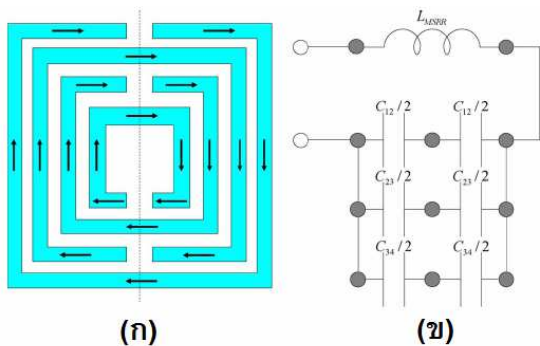
อภิวัด (Metamaterials) คือวัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าถูกสังเคราะห์ขึ้นหรือออกแบบขึ้นอย่างเหมาะสม เพื่อให้สนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กกระทำปฏิกิริยาร่วมกับอะตอมเทียม (artificial atoms) และเกิดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการได้ [43] คุณสมบัติของอภิวัดที่เราไม่สามารถหาได้จากวัสดุธรรมชาติทั่วไปคือ ค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ (negative refractive index) และค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ (negative magnetic permeability) รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับอภิวัด

วัสดุสามารถศึกษาได้ใน [43-45] รูปที่ 26 แสดงโครงสร้างตัวอย่างของอวัยวะที่มีค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบที่ได้จากโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators, SRR)



รูปที่ 26 (ก) ตัวอย่างโครงสร้างของอวัยวะหนึ่งหน่วยที่ทำจากโลหะมีตระกูล เช่นทองแดง (ข) โครงสร้างลักษณะคาบของอวัยวะแบบข้อ (ก) ซึ่งให้ค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ [46]

นอกเหนือจากโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลมดังแสดงในรูปที่ 26 แล้วโครงสร้างวงแหวนที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมก็สามารถให้ค่าขบขี้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบได้เช่นกัน [47] รูปที่ 27 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมแยก



รูปที่ 27 (ก) โครงสร้างของอวัยวะแบบวงแหวนสี่เหลี่ยมแยก (ข) วงจรสมมูลของอวัยวะแบบวงแหวนสี่เหลี่ยมแยก [47]

H.-J. Lee และ G.-W. Yook ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่ที่แถบหยุดผ่านซึ่งถูกออกแบบด้วยโครงสร้างอวัยวะในปี ค.ศ. 2007 [48] ลักษณะของโครงสร้าง และลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 28 รูปที่ 29 และรูปที่ 30

ด้วยลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายนำสัญญาณไมโครสตริปในโหมด Quasi-TEM ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กล้อมรอบแผ่นสตริป ดังรูปที่ 28 และโครงสร้างอวัยวะแบบวงแหวนสี่เหลี่ยมแยกที่ต้องการให้เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กชี้ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบวงแหวนสี่เหลี่ยมแยกเพื่อทำให้เกิดการคัปปลิงแบบสนามแม่เหล็ก [47-48] ดังนั้นการวางวงแหวนสี่เหลี่ยมแยกจึงถูกจัดวางในลักษณะที่ขนานกับแผ่นสตริป ดังรูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างมิติทางกายภาพ ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า และความถี่ศูนย์กลางแสดงในสมการที่ (10)-(16)

$$C_{total} = \frac{N-1}{2} [2a - (2N-1)(C+d)] C_0 \tag{10}$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)} \tag{11}$$

$$k = \frac{0.5d}{C+0.5d} \tag{12}$$

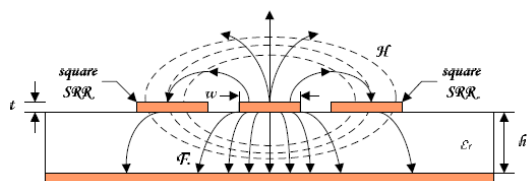
$$L_{total} = 4\mu_0 [a - (N-1)(d+C)] \left[ \ln\left(\frac{0.98}{\rho}\right) + 1.84\rho \right] \tag{13}$$

$$\rho = \frac{l-l_N}{l+l_N} \tag{14}$$

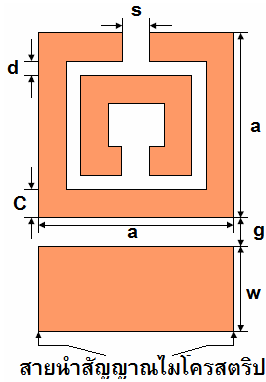
$$l_N = 4[a - 2C(N-1) - 2d(N-1)] \tag{15}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{total}C_{total}}} \tag{16}$$

เมื่อ  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัดต่อเมตร  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  เฮนรีต่อเมตร  $a$  คือความยาวด้านนอกสุดของวงแหวนสี่เหลี่ยมแยก (เมตร)  $N$  คือจำนวนของวงแหวนสี่เหลี่ยมแยกในหนึ่งหน่วย  $C$  คือความหนาของเส้นวงแหวนสี่เหลี่ยมแยก (เมตร)  $d$  คือช่องว่างระหว่างวงแหวนสี่เหลี่ยมแยก (เมตร)  $K(\cdot)$  คือฟังก์ชันการอินทิกรัลเชิงวงรีแบบสมบูรณ์ชนิดแรก (Complete elliptic integral of the first kind)

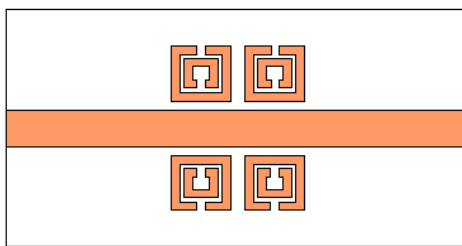


รูปที่ 28 ภาคตัดขวางของวงจรกรองความถี่ที่แถบหยุดผ่านกับโครงสร้างอวัยวะ เพื่อแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก [48]



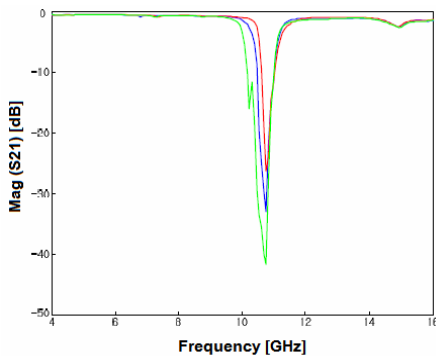
สายนำสัญญาณไมโครสตริป

รูปที่ 29 ภาพด้านบนของวงจรถองความถี่แถบหยุดผ่านโดยแสดงรายละเอียดมิติทางกายภาพของอภิวัดสุ [48]



รูปที่ 30 ภาพด้านบนของวงจรถองความถี่แถบหยุดผ่านที่ออกแบบด้วยอภิวัดสุ [48]

ผลการทดลองของ H.-J. Lee และ G.-W. Yook ได้แสดงช่วงแถบหยุดผ่านที่ความถี่ประมาณ 11 GHz สำหรับจำนวนของโครงสร้างอภิวัดสุ 2 4 และ 6 โครงสร้าง รูปที่ 31 แสดงขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรถองความถี่แถบหยุดผ่านที่ออกแบบด้วยอภิวัดสุ เมื่อมีการเพิ่มจำนวนของโครงสร้างอภิวัดสุจาก 2 เป็น 4 และ 6 โครงสร้าง



รูปที่ 31 ขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้าของวงจรถองความถี่แถบหยุดผ่านที่ออกแบบด้วยอภิวัดสุ [48]

#### 4. บทวิเคราะห์

จากการปริทัศน์วรรณกรรมเทคโนโลยีในการออกแบบวงจรถองความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริปพบว่าเทคโนโลยีในการออกแบบวงจรถองความถี่นี้มีหลากหลาย

เทคนิค เช่น การออกแบบด้วยวงแหวนปิด การออกแบบด้วยสลับปลายเปิด การออกแบบด้วยการคัปปลิงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การออกแบบด้วยโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ การออกแบบด้วยโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ การออกแบบด้วยโครงสร้างเดี่ยว และการออกแบบด้วยอภิวัดสุ นอกจากนั้นยังมีการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรถองความถี่ด้วยการประยุกต์ใช้โครงสร้างเหล่านี้ร่วมกับวงจรถองความถี่ดั้งเดิมอีกด้วย บางเทคโนโลยีมีความสัมพันธ์ระหว่างมิติทางกายภาพของวงจรถองความถี่หรือความถี่ศูนย์กลางของวงจรถองความถี่ เช่น โครงสร้างวงแหวนปิด โครงสร้างสลับปลายเปิด โครงสร้างที่มีการคัปปลิงด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โครงสร้างเดี่ยว และโครงสร้างอภิวัดสุ ทำให้ง่ายต่อการออกแบบวงจรถองความถี่ บางเทคโนโลยีต้องอาศัยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าช่วยในการออกแบบเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว เพราะอย่างยิ่งไม่มีสมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รองรับ เช่น โครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ และโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิ นอกจากนั้นการสร้างวงจรถองความถี่ด้วยเทคนิคโครงสร้างช่องว่างแถบโฟโตนิกส์ และโครงสร้างที่ระนาบกราวด์มีตำหนิยังต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่องพลังงานรั่วไหลที่ระนาบกราวด์ และคำนึงถึงเรื่องของการทำให้ได้แนวของโครงสร้างที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของวงจรถองความถี่ยังคงมีความสำคัญเนื่องจากว่า ในปัจจุบันโครงสร้างวงจรถองความถี่ขนาดเล็กจะช่วยลดต้นทุนค่าวัสดุและค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรถองความถี่ และยังเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์สื่อสารขนาดเล็กที่ให้ความสำคัญของเรื่องความกะทัดรัด ดังนั้นการคัดเลือกเทคโนโลยีเพื่อนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องประสิทธิภาพ ขนาดของวงจรถองความถี่ และความยากง่ายในการสร้างวงจรถองความถี่ เป็นต้น

เทคโนโลยีในการออกแบบวงจรถองความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริปสามารถถูกจำแนก เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรถองความถี่แต่ละชนิด ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้น ทำให้ผู้อ่านสามารถพิจารณาเลือกวงจรถองความถี่ที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้ตามต้องการ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบวงจรของความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริปด้วยเทคนิคต่างๆ

| เทคนิคของการออกแบบ                 | สมการที่ใช้ในการออกแบบ              | การรั่วของพลังงานทางด้านระนาบกราวด์ | ขนาดของวงจร | ความซับซ้อนในการสร้างวงจร |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------|---------------------------|
| วงแหวนปิด                          | สมการที่ (1)-(5)                    | ไม่มี                               | กลาง        | ไม่ซับซ้อน                |
| สตัปปลายเปิด                       | $\lambda_g / 4$                     | ไม่มี                               | กลาง        | ไม่ซับซ้อน                |
| การคับปลิงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก | $\lambda_g / 2$ และ $\lambda_g / 4$ | ไม่มี                               | กลาง        | ไม่ซับซ้อน                |
| ช่องว่างแถบโฟโตนิกส์               | ไม่มี                               | มีมาก                               | กลาง        | ซับซ้อน                   |
| ระนาบกราวด์มีตำหนิ                 | ไม่มี                               | มี                                  | กลาง        | ซับซ้อน                   |
| โครงสร้างเดี่ยว                    | สมการที่ (9)                        | ไม่มี                               | เล็ก        | ไม่ซับซ้อน                |
| อภิวัสตุ                           | สมการที่ (10)-(16)                  | ไม่มี                               | ใหญ่        | ไม่ซับซ้อน                |

## 5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการทบทวนเทคโนโลยีในการออกแบบวงจรความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริป ซึ่งได้กล่าวถึงเทคโนโลยีแบบต่างๆ ในการออกแบบ ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีต่างๆ นอกจากนั้นบทความนี้ยังได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ร่วมกับวงจรความถี่แบบดั้งเดิมเพื่อประสิทธิภาพของวงจรอีกด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

[1] Matthaei, G.L., Young, L. and Jones, E.M.T. 1964. Microstrip filter impedance-matching

network and coupling structure, McGraw Hill.

- [2] Pozar, D.M. 1990. Microwave Engineering, New York: Addison-Wesley.
- [3] Kahrizi, M., Sarkar, T. K. and Maricevic, Z. A. 1993. Analysis of a wide radiating slot in the ground plane of a microstrip line. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 41(1): 29-37.
- [4] Sze, J.-Y. and Wong, K.-L. 2000. Bandwidth enhancement of a microstrip-line-fed printed wide-slot antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 49(7): 1020-1024.
- [5] Jan, J.-Y. and Su, J.-W. 2005. Bandwidth enhancement of a printed wide-slot antenna with a rotated slot. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 53(6): 2111-2114.
- [6] Jan, J.-Y. and Kao, J.-C. 2007. Novel printed wide-band rhombus-like slot antenna with an offset microstrip-fed line. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 6: 249-251.
- [7] Li, P., Liang, J. and Chen, X. 2006. Study of printed elliptical/circular slot antennas for ultrawideband applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 54(6): 1670-1675.
- [8] Kharakhili, F. G., Fardis, M., Dadashzadeh, G., Ahmadi, A.K.A. and Hojjat, N. 2007. Circular slot with a novel circular microstrip open ended microstrip feed for UWB applications. Progress In Electromagnetics Research. 68:161-167.
- [9] Yoshimura, Y. 1972. A microstrip slot antenna. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 20: 760-762.
- [10] Sadat, S., Fardis, M., Geran, F.G. and Dadashzadeh, G. 2007. A compact microstrip square-ring slot antenna for UWB applications. Progress In Electromagnetics Research. 67: 173-179.
- [11] Jiao, J.-J., Zhao, G., Zhang, F.-S., Yuan, H.-W. and Jiao, Y.-C. 2007. A broadband CPW-FED T-shape slot antenna. Progress In Electromagnetics

- Research. 76: 237-242.
- [12] Ooi, P.C. and Selvan, K.T. 2010. A Dual-band circular slot antenna with an offset microstrip-fed line for PCS, UMTS, IMT-2000, ISM, BLUETOOTH, RFID and WLAN Applications. Progress In Electromagnetics Research Letters. 16: 1-10.
- [13] Hong, J.S. and Lancaster, M.J. 2001. Microstrip Filter for RF/microwave Applications, New York: John Wiley & Son Inc.
- [14] พงศธร ชมทอง. 2549. การกรองผ่านแถบแบบสองความถี่โดยใช้เรโซเนเตอร์แฮร์ฟีนที่มีอิมพีแดนซ์แบบขึ้นสำหรับระบบสื่อสารไร้สาย. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [15] Hsieh, L.-H. and Chang, K. 2003. Compact, low insertation-loss sharp-rejection, and wide-band microstrip bandpass filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 51(4): 1241-1246.
- [16] Paul, D.K. Gardner, P. and Tan, K.P. 1994. Suppression of even modes in microstrip ring resonators. Electronics Letters. 30(21): 1772-1774.
- [17] ศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์. 2553. การศึกษาและออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้เรโซเนเตอร์แบบคัปเปิ้ลสำหรับระบบสื่อสารย่านไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [18] Scherer, A., Doll, T., Yablonovitch, E., Everitt, E.O. and Higgins, J.A. 1999. Introduction to electromagnetic crystal structures, design, synthesis, and applications. Journal of Lightwave Technology. 17: 1928-1929.
- [19] Yablonovitch, E. 1987. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Physical Review Letters. 58(20): 2059-2062.
- [20] John, S. 1987. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. Physical Review Letters. 58(23): 2486-2489.
- [21] Sievenpiper, D., Zhang, L., Broas, R.F.J., Alexopoulos, N.G. and Yablonovitch, E. 1999. High-impedance electromagnetic surface with a forbidden frequency band. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 47(11): 2059-2074.
- [22] Radisic, V., Qian, Y., Coccioli, R. and Itoh, T. 1998. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines. IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 8(2): 69-71.
- [23] Ellis, T.J. and Rebeiz, G.M. 1996. MM-wave tapered slot antennas on micromachined photonic bandgap dielectrics. 1996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, San Francisco, California, USA, June 17-21, 1996. 2: 1157-1160.
- [24] Radisic, V., Qian, Y. and Itoh, T. 1998. Broad-band power amplifier using dielectric photonic bandgap structure. IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 8(1): 13-14.
- [25] Kesler, M.P., Maloney, J.G. and Shirley, B.L. 1996. Antenna design with the use of photonic bandgap materials as all dielectric planar reflectors. Microwave and Optical Technology Letters. 11(4): 169-174.
- [26] Yang, F.-R., Qian, Y. and Itoh, T. 1999. A novel uniplanar compact PBG structure for filter and mixer applications. 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Anaheim, California, USA, June 13-19, 1999. 3: 919-922.
- [27] Qian, Y. and Itoh, T. 1999. Planar periodic structures for microwave and millimeter wave circuit applications. 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Anaheim, California, USA, June 13-19, 1999. 4: 1533-1536.
- [28] Ma, K.-P., Kim, J., Yang, F.-R., Qian, Y. and



- Itoh, T. 1999. Leakage suppression in stripline circuits using a 2-D photonic bandgap lattice. 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Anaheim, California, USA, June 13-19, 1999. 1: 73-76.
- [29] Yun, T.-Y. and Chang, K. 1999. One-dimensional photonic bandgap resonators and varactor tuned resonators. 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Anaheim, California, USA, June 13-19, 1999. 4: 1629-1632.
- [30] Yun T.-Y. and Chang, K. 2000. An electrically tunable photonic bandgap resonator controlled by piezoelectric transducer. 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, Massachusetts, USA, June 11-16, 2000. 3: 1445-1447.
- [31] Chappell, W.J., Little, M.P. and Katehi, L.P.B. 2000. High Q two dimensional defect resonators-measured and simulated. 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, Massachusetts, USA, June 11-16, 2000. 3: 1437-1440.
- [32] Yang, F.-R., Coccioli, R., Qian, Y. and Itoh, T. 2000. Analysis and application of coupled microstrips on periodically patterned ground plane. 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, Massachusetts, USA, June 11-16, 2000. 3: 1529-1532.
- [33] Yun, J.-S., Kim, G.-Y., Park, J.-S., Ahn, D., Kang, K.-Y. and Lim, J.-B. 2000. A design of the novel coupled line bandpass filter using defected ground structure. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, Massachusetts, USA, June 11-16, 2000. 1: 327-330.
- [34] Park, J.-I., Kim, C.-S., Kim, J., Park, J.-S., Qian, Y., Ahn, D. and Itoh, T. 1999. Modeling of a photonic bandgap and its application for the low pass filter design. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Singapore, November 30 -December 3, 1999. 2: 331-334.
- [35] Weng, L.H., Guo, Y.C., Shi, X.W. and Chen, X.Q. 2008. An overview on defected ground structure. Progress In Electromagnetics Research B. 7: 173-189.
- [36] Chang, I. and Lee, B. 2002. Design of defected ground structures for harmonic control of active microstrip antenna. Proceedings of 2002 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Antonio, Texas, USA. June 16-21, 2: 852-855.
- [37] Chen, J., Weng, Z.-B., Jiao, Y.-C. and Zhang, F.-S. 2007. Lowpass filter design of Hilbert curve ring defected ground structure. Progress In Electromagnetic Research. 70: 269-280.
- [38] Bates, R.N. 1977. Design of microstrip spur-line band-stop filters. IEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics. 1(6): 209-214.
- [39] Liu, H., Knoechel, R.H. and Schuenemann, K.F. 2007. Miniaturized bandstop filter using meander spurline and capacitively loaded stubs. ETRI Journal. 29(5): 614-618.
- [40] Krishna, H. 2011. Compact spiral folded spurline for low-frequency applications. Electronics Letters. 47(15): 861-862.
- [41] Chongcheawchamnan, M., Shafique, M.F. and Robertson, I.D. 2011. Miniaturisation and electronic tuning techniques for microstrip spurline filters. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 5(1):1-9.
- [42] Valenzuela-Valdes, J., Garcia-Fernandez, M.A., Martinez-Gonzalez, A.M. and Sanchez-Hernandez, D. 2006. Tunable dual-band printed tab monopole antennas for wireless communications. 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Benalmadena, Spain. May16-19, 2006: 317-319.
- [43] นวัตกรรม วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2554. อภิวัตน์ วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ. 3(2): 52-60.



- [44] นันทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรา. 2552. วัสดุเหนือธรรมชาติ. วารสารวิจัย มข. 14(2): 133-149.
- [45] ศราวุธ ชัยมูล และ ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน. 2554. อภิวัดสำหรับรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 21(2): 472-482.
- [46] Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J. 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 47(11): 2075-2084.
- [47] Bilotti, F., Toscano, A. and Vegni, L. 2007. Design of spiral and multiple split-ring resonators for the realization of miniaturized metamaterial samples. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 55(8): 2258-2267.
- [48] Lee, H.-J. and Yook, J.-G. 2007. Magnetic coupling effect of the square split-ring resonators array using microstrip line. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, Thailand. December 11-14, 2007:2651-2654.