วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้

Adaptive Microstrip Filters

ศุภกิต แก้วดวงตา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ภาคพายัพ เชียงใหม่

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับคุณสมบัติของความถี่ใช้งาน แบนด์วิดธ์ หรือความไวได้ โดยบทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่สามารถปรับคุณสมบัติได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องด้วยเทคนิคการออกแบบต่างๆ ร่วมกับอุปกรณ์ชนิดแอกทีฟเช่น พินไดโอด (PIN Diode) วาแรกเตอร์ไดโอด (Varactor Diode) ทรานซิสเตอร์ (Transistor) วงจรรวมความถี่ไมโครเวฟโมโนลิธิก (MMIC) สวิตช์แบบเอ็มอีเอ็มเอส (MEMS Switches) และวาแรกเตอร์แบบเอ็มอีเอ็มเอส (MEMS Varactor) เป็นต้น

คำสำคัญ : ไดโอด วงจรกรองความถี่ เอ็มอีเอ็มเอส วงจรรวมความถี่ไมโครเวฟโมโนลิธิก ไมโครสตริป

Abstract

This paper presents the study of the adaptive microstrip filters, which it can change its operating frequency, bandwidth or selectivity. Both of the discrete and continuous tunings are discussed in detail, and the active devices are employed as tuning elements such as PIN diode, varactor diode, transistor, monolithic microwave integrated circuit (MMIC), MEMS switches and MEMS varactor.

Key words : Diode, Filter, MEMS, MMIC, Microstrip

1. บทนำ

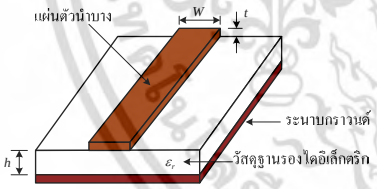
วงจรกรองความถี่เป็นวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการกำหนดช่วงความถี่ของเครื่องรับ-ส่งคลื่นวิทยุ ซึ่งถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญส่วนหนึ่งในระบบเครื่องรับ-ส่งคลื่นวิทยุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องรับ-ส่งคลื่นวิทยุในย่านความถี่ไมโครเวฟ (300 MHz-300 GHz) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สูงมากและมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่นั้นทำได้ยากยิ่งขึ้นเนื่องจากเกิดส่วนประกอบแบบกระจาย (Distributed Components) ขึ้นในวงจร จึงทำให้วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟเนื่องจากมีลักษณะวงจรที่ออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ส่วนประกอบแบบกลุ่มก้อน (Lumped Components) ใดๆ ทำให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อกับวงจรภาคอื่นๆ ภายในเครื่องรับ-ส่งคลื่นวิทยุ อีกทั้งยังมีขนาดเล็ก เกิดการสูญเสียน้อย สามารถทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี และมีต้นทุนในการสร้างที่ไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเกี่ยวกับระบบการสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วทำให้การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องรับ-ส่งคลื่นวิทยุมีความจำเป็นมากยิ่งขึ้น ซึ่งความสามารถในการส่งคลื่นในหลากหลายย่านความถี่หรือความสามารถในการเลือกช่วงความถี่ในการรับ-ส่งได้นั้นก็เป็นสิ่งหนึ่งที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมา จึงเป็นเหตุให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกรองความถี่ที่ใช้ภายในนั้นต้องมีความสามารถในการเลือกช่วงความถี่ได้เช่นกัน ฉะนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการศึกษาเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับคุณสมบัติได้

2. โครงสร้างของไมโครสตริป

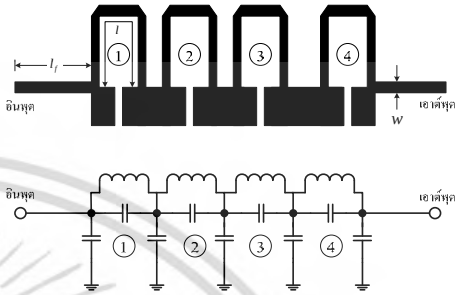
จากรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครสตริปซึ่งจะประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง W และมีความหนา t วางตัวอยู่ด้านบนของวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ε_r และมีความหนาเท่ากับ h และด้านล่างสุดจะเป็นระนาบกราวนด์ที่เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วไมโครสตริปถือได้ว่าเป็นสายนำสัญญาณส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งด้านบนเป็นอากาศและด้านล่างเป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก เนื่องจากโครงสร้างแบบนี้นั้นถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเหตุให้ไม่สามารถที่จะรองรับการเดินทางของคลื่นที่เป็นแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic Wave : TEM) ได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์คุณสมบัติการส่งผ่านของสายนำสัญญาณไมโครสตริปนั้นจะเรียกการเดินทางของคลื่นว่าเป็นแบบกึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Quasi-TEM) [1]



รูปที่ 1: โครงสร้างทั่วไปของไมโครสตริป [1]

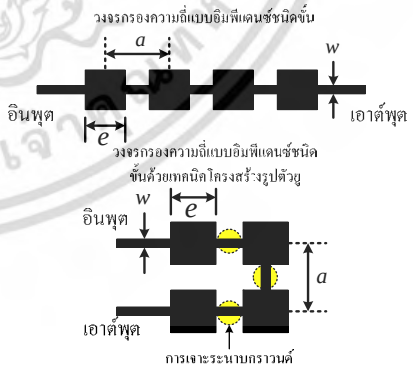
3. วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริป

โดยอาศัยหลักการของไมโครสตริปได้นำมาออกแบบวงจรกรองความถี่ชนิดต่างๆ เริ่มจากการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบไมโครสตริป ซึ่งได้มีการนำเสนอหลากหลายเทคนิคมาใช้ในการออกแบบตัวอย่างเช่น การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบไมโครสตริปอิมพีแดนซ์ชนิดขั้น (Stepped Impedance) นำเสนอโดย L.-H. Hsieh และคณะ ได้นำเรโซเนเตอร์ชนิดแฮร์พิน (Hairpin Resonator) มาใช้งานร่วมกับเทคนิคของอิมพีแดนซ์ชนิดขั้น [2] โดยมีโครงสร้างเป็นช่องเรโซเนเตอร์ที่เชื่อมต่อกันในลักษณะของอิมพีแดนซ์ชนิดขั้นดังแสดงในรูปที่ 2 และจากวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่าเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำแบบ L-C ที่ต่อคาสเคดกันตามจำนวนของเรโซเนเตอร์ ซึ่งการออกแบบด้วยเทคนิคการคาสเคดกันนี้จะทำให้วงจรกรองมีขอบตัดความถี่ที่ชันมากยิ่งขึ้นแต่จะทำให้มีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วย



รูปที่ 2: โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบไมโครสตริปอิมพีแดนซ์ชนิดขั้นด้วยเรโซเนเตอร์ชนิดแฮร์พินและวงจรสมมูล [2]

ในปี ค.ศ. 2005 S. Y. Huang ได้พัฒนาการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบอิมพีแดนซ์ชนิดขั้นด้วยเทคนิคโครงสร้างรูปตัวยู (U-Shaped) และเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap : EBG) โดยได้ดัดแปลงโครงสร้างจากอิมพีแดนซ์ชนิดขั้นในแนวตรงเป็นการโค้งงอรูปตัวยู และยังได้ใช้โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามาช่วย [3] ดังแสดงในรูปที่ 3 และใช้อีกเทคนิคหนึ่งดังแสดงใน [4]

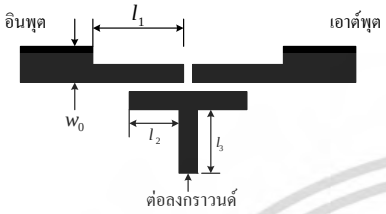


รูปที่ 3: โครงสร้างวงจรกรองความถี่แบบอิมพีแดนซ์ชนิดขั้นด้วยเทคนิคโครงสร้างรูปตัวยูและเทคนิคช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

ถัดมาในการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่หยุดนั้นได้มีการนำเสนอเทคนิคอื่นอีก

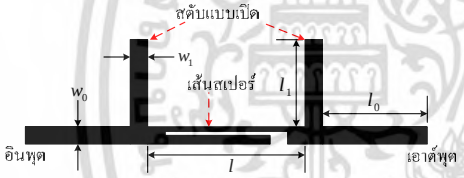
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านที่มีขนาดกะทัดรัดด้วยสตับปลายเปิด ที่มีความยาว $\lambda/4$ โดยโครงสร้างของวงจรกรองดังกล่าวจะมีลักษณะการเชื่อมต่อตรงปลาย (End Coupled) และมีสตับปลายเปิดมาช่วยในการเชื่อมต่ออีกส่วนหนึ่งที่บริเวณช่องว่างของสายนำสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4 [5]



รูปที่ 4: โครงสร้างวงจรกรองความถี่ผ่านด้วยสตับปลายเปิด [5]

จากนั้น W.-H. Tu และคณะได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่หยุดแบบไมโครสตริปด้วยสองเทคนิคร่วมกันนั้นคือ เทคนิคสตับแบบเปิด และเทคนิคเส้นสเปอร์ดังแสดงในรูปที่ 5 [6]



รูปที่ 5: โครงสร้างวงจรกรองแถบความถี่หยุดแบบไมโครสตริปด้วยเทคนิคสตับแบบเปิด และเทคนิคเส้นสเปอร์ [6]

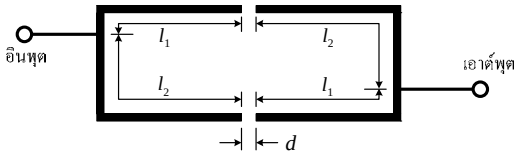
จากบทความต่างๆ ที่กล่าวผ่านไปนั้นเป็นเพียงตัวอย่างการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยไมโครสตริปชนิดต่างๆ เท่านั้น ซึ่งเป็นการออกแบบวงจรกรองที่ไม่สามารถปรับตัวได้ โดยมีข้อดีเมื่อเทียบกับวงจรกรองที่สามารถปรับตัวได้คือ 1. มีสเถียรภาพในการทำงานสูง 2. ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง และ 3. มีต้นทุนต่ำ

4. วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงตัวอย่างการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปชนิดต่างๆ ไปแล้วนั้น จะเห็นว่ามีหลากหลายเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบ แต่อย่างไรก็ตามในการสื่อสารสมัยใหม่นี้ระบบการรับส่งข้อมูลมักจะถูกส่งด้วยคลื่นความถี่สูงและแบนด์วิดธ์ที่กว้าง อีกทั้งยังรองรับจำนวนช่องทางการสื่อสารที่มากขึ้น จึงทำให้ภาคสุดท้ายของการรับส่งสัญญาณความถี่สูงนั้นมีความสำคัญมากขึ้นและเป็นผลให้ภาคแรกที่คัดกรองเลือกความถี่เข้ามาหรือออกไปจากเครื่องรับส่งนั้นมีความสำคัญไปด้วย และเพื่อรองรับเครื่องรับ-ส่งคลื่นวิทยุสมัยใหม่ที่จะสามารถรับส่งได้ในหลากหลายย่านความถี่นั้น ทำให้เกิดการคิดค้นวงจรกรองความถี่ที่สามารถปรับคุณสมบัติได้ ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับคุณสมบัติได้ โดยทั่วไปแล้ววงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับคุณสมบัติได้นั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous Tuning) และวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Tuning)

เริ่มจากการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วจะถูกออกแบบด้วยการใช้อุปกรณ์ประเภท วาแรกเตอร์ไดโอด (Varactor Diode) วาแรกเตอร์แบบเอ็มอีเอ็มเอส (MEMS Varactor) วัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริก (Ferroelectric Materials) และวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Materials) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกสอดแทรกเข้าไปยังโครงสร้างไมโครสตริปและทำการป้อนแรงดันเข้าไปยังอุปกรณ์เหล่านี้เพื่อปรับค่าความจุไฟฟ้าภายในของอุปกรณ์เหล่านี้ เป็นผลให้ลักษณะสมบัติของวงจรกรองนั้นเปลี่ยนไป โดยการออกแบบวงจรกรองลักษณะนี้ได้ถูกนำเสนอมาแล้วในบทความต่างๆ ดังนี้ ในปี ค.ศ. 2003 L.-H. Hsieh และ K. Chang ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านที่ปรับตัวได้ด้วยตัวแปรการส่งผ่านเป็นศูนย์ (Transmission Zeros) จำนวนสองตัว โดยเริ่มโครงสร้างเป็นแบบเรโซเนเตอร์ชนิดแฮร์พินจำนวนสองตัวมาวางเรียงกันเพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อซึ่งกันที่ช่องว่าง d ดังแสดงในรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



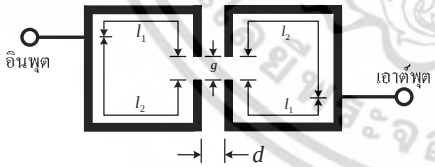
รูปที่ 6: วงจรกรองความถี่ผ่านโดยใช้เรโซเนเตอร์ชนิดแฮร์พินสองตัวที่มีการป้อนสัญญาณไม่เหมือนกันทั้งสองด้าน (Asysmmetric Tapping Feeding Lines) [7]

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของสายนำสัญญาณ (Transmission-Line Model) ในการหาค่าตัวแปรการส่งผ่านเป็นศูนย์เพื่อหาจุดการป้อนสัญญาณและความยาวของเรโซเนเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบวงจรกรองดังสมการที่ 1 และ 2

$$f_1 = \frac{nc}{4l_1}\sqrt{e_{eff}} \quad (1)$$

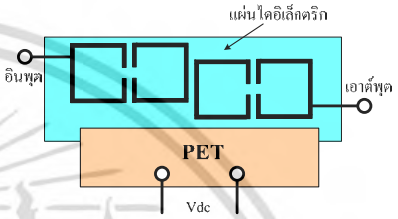
$$f_2 = \frac{nc}{4l_2}\sqrt{e_{eff}} \quad (2)$$

เมื่อ f_1 และ f_2 คือความถี่ตอบสนองของการส่งผ่านเป็นศูนย์ของความยาวของเรโซเนเตอร์ l_1 และ l_2 ตามลำดับ n คือเลขโมด e_{eff} คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล และ c คือความเร็วของแสงที่เดินทางผ่านอากาศ จากนั้นได้มีการพัฒนาด้วยการปรับแขนทั้งสองข้างให้อยู่ในลักษณะที่งอเพื่อให้ขนาดของวงจรกรองนั้นมีขนาดเล็กลง มีชื่อเรียกว่าวงจรกรองที่ใช้เรโซเนเตอร์บ่วงเปิดแบบวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 7



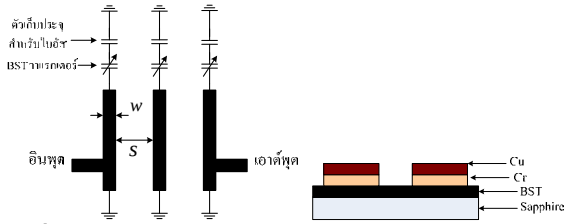
รูปที่ 7: วงจรกรองแถบความถี่ผ่านโดยใช้เรโซเนเตอร์บ่วงเปิดแบบวงแหวนสองตัวที่มีการป้อนสัญญาณไม่เหมือนกันทั้งสองด้าน (Asysmmetric Tapping Feeding Lines) [7]

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงพบว่าเกิดค่าการเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ทั้งสองที่แตกต่างจากเดิมแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบมากนักและยังคงสามารถใช้สมการที่ 1 และ 2 ในการออกแบบได้เช่นเดิม จากนั้นได้นำวงจรกรองความถี่ดังกล่าวมาต่อแบบคาสเคดกันเพื่อให้มีความคมของขอบความถี่ตัดที่มากขึ้นและมีค่าการลดทอนในช่วงแถบความถี่หยุดมากขึ้นด้วย และสุดท้ายได้ทำการใช้ทรานส์ดิวเซอร์พิโซอิเล็กตริก (Piezoelectric Transducer : PET) มาวางไว้ด้านหลังของวงจรกรองความถี่เพื่อทำให้เกิดการรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรกรองเป็นผลให้คุณลักษณะของวงจรกรองเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการปรับแต่งคุณลักษณะของ PET จะถูกควบคุมด้วยแรงดันที่ป้อนเข้าไปโดยจะอยู่ในช่วง ± 90 V และทำให้ระยะห่างของ PET เปลี่ยนแปลงในช่วง ± 1.325 mm [7] ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8: โครงสร้างของวงจรกรองที่ปรับแต่งคุณลักษณะของวงจรกรองด้วยการใช้ PET [7]

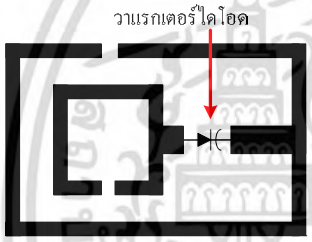
แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้สามารถที่จะปรับคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้คือการใช้แผ่นฟิล์มบางชนิด แบร์เรี่ยม-สตรอนเตรียม-ไทเทเนต (Barium-Strontium-Titanate : BST) มาทำหน้าที่คล้ายกับวาแรกเตอร์ที่ต่อระหว่างไมโครสตริปและระนาบกราวนด์ ซึ่งถูกนำเสนอโดย J. Nath และคณะ โดยได้ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านที่สามารถปรับตัวได้ด้วยการใช้ BST ซึ่งจะมีข้อดีคือมีการลดทอนต่ำและสามารถปรับคุณสมบัติของวงจรกรองได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไป BST จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วงประมาณ 300 ถึง 800 และใช้ค่าแรงดันไบอัสเท่ากับ 0 ถึง 200 V ซึ่งในการสร้างนั้นจะนำแผ่นฟิล์มบางดังกล่าววางตัวซ้อนกันเพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรองและทำการป้อนแรงดันไบอัสเข้าไปเพื่อปรับค่าคุณสมบัติของวงจรกรอง [8] ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9: โครงสร้างของการใช้แผ่นฟิล์มบางชนิดแบร์เรี่ยม-สตรอนเตรียม-ไทเทเนต [8]

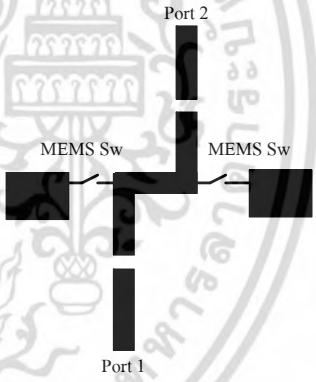
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเทคนิคสุดท้ายที่จะกล่าวถึงในที่นี้ก็คือการใช้วาแรกเตอร์ไดโอดที่เป็นส่วนประกอบแบบกลุ่มก้อนเข้ามาช่วยในการปรับค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองด้วยแรงดันไบอัส ซึ่งนำเสนอโดย I. Gil และคณะ ได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่หยุดแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนชนิดแยก (Split Ring Resonator : SRR) ที่ประกอบไปด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมสองชั้นแล้วใช้ตัววาแรกเตอร์ไดโอดเชื่อมต่อระหว่างวงแหวนทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 10 มีชื่อเรียกว่าวาแรกเตอร์โหลดของเรโซเนเตอร์วงแหวนแยก (Varactor-Load Split Ring Resonator : VLSRR) จากผลการออกแบบนั้นวงจรกรองดังกล่าวสามารถปรับตัวได้ในช่วงประมาณ 500 MHz โดยมีความถี่กลางที่ 2.85 GHz ด้วยค่าหยุดแถบที่ต่ำกว่า 20 dB [9]



รูปที่ 10: วงจรกรองวาแรกเตอร์โหลดของเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม [9]

ต่อไปเป็นการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้อย่างไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะมีข้อดีคือสามารถปรับค่าได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำมากกว่าการปรับอย่างต่อเนื่อง แต่ไม่สามารถปรับค่าอย่างละเอียดได้ ซึ่งค่าที่ปรับได้นั้นจะเป็นค่าที่ได้ถูกออกแบบมาแล้วโดยทั่วไปจะถูกออกแบบด้วยการใช้อุปกรณ์ประเภทพินไดโอด (PIN Diode) ทรานซิสเตอร์ (Transistor) วงจรวมความถี่ไมโครเวฟโมโนลิธิก (MMIC) และสวิตช์แบบเอ็มอีเอ็มเอส (MEMS Switches) เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่นในปี ค.ศ. 2003 C. Rauscher ได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านที่สามารถปรับค่าได้ 2 สถานะด้วยการใช้พินไดโอด ซึ่งวงจรกรองความถี่ดังกล่าวนั้นถูกออกแบบให้สามารถปรับแบนด์วิดธ์ได้ 2 สถานะคือ 500 MHz และ 1500 MHz โดยมีความถี่กลางที่ 10 GHz ซึ่งในบทความนี้ได้ใช้พินไดโอดในสถานะ ติด และ ดับ เพื่อที่จะเปลี่ยนโครงสร้างของวงจรกรองจึงเป็นผลทำให้มีแบนด์วิดธ์ที่เปลี่ยนแปลง [10] และบทความสุดท้ายที่จะกล่าวในที่นี้ก็คือการนำเสนอการนำสวิตช์แบบเอ็มอีเอ็มเอส มาใช้ในการปรับตัวของวงจรกรองความถี่ผ่านนำเสนอโดย A. Pothier และคณะ โดยได้นำสวิตช์แบบเอ็มอีเอ็มเอสสองตัวมาเชื่อมต่อระหว่างตัวพาราซิติกโหลดสองตัวเพื่อใช้ในการ ติด และ ดับ เพื่อปรับค่าของวงจรกรองความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสวิตช์แต่ละตัวจะมีอยู่ 2 สถานะนั้นคือ ติด และ ดับ แต่ในบทความนี้ใช้สวิตช์ทั้งหมด 2 ตัว จึงทำให้วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอนั้นสามารถที่จะปรับค่าได้ทั้งหมด 4 สถานะหรือ 4 ช่วงความถี่เรียกว่าวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ปรับค่าได้ 2 บิต (2-Bit Tunable Bandpass Filters) จากการศึกษาบทความต่างๆ สามารถสรุปความแตกต่างของวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปแต่ละชนิดได้ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 11: วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ปรับค่าได้โดยใช้สวิตช์แบบเอ็มอีเอ็มเอส [11]

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติการทำงานของวงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปแต่ละชนิด

ชนิดของวงจรกรอง / คุณสมบัติการทำงาน	วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริป	วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้อย่างต่อเนื่อง	วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้ไม่ต่อเนื่อง
ความสามารถในการปรับช่วงความถี่	ไม่ได้	ได้	ได้
ความต่อเนื่องในการปรับช่วงความถี่	-	มีความต่อเนื่อง	ไม่มีความต่อเนื่อง
ความแม่นยำในการปรับช่วงความถี่	-	ปานกลาง	สูง
ความละเอียดในการปรับช่วงความถี่	-	สูง	ปานกลาง
เสถียรภาพในการรักษาช่วงความถี่	สูง	ปานกลาง	สูง
การออกแบบ	ง่าย	ยาก	ยาก
ราคา	ถูก	แพง	แพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. บทสรุป

จากการศึกษาการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยแผ่นไมโครสตริปนั้นพบว่าได้นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในย่านความถี่สูงๆ เช่นย่านความถี่ไมโครเวฟ เป็นต้น เนื่องจากการพัฒนาของเทคโนโลยีจึงได้มีการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่สามารถปรับคุณสมบัติได้ โดยมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยในการออกแบบ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ 1. วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะถูกออกแบบด้วยการใช้อุปกรณ์ประเภท วาแรกเตอร์ไดโอด วาแรกเตอร์แบบเอ็มอีเอ็มเอส และวัสดุเฟอร์โรไฟฟ้าและแม่เหล็กต่างๆ เพื่อปรับแต่งค่าความจุไฟฟ้าของวงจร และ 2. วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปที่สามารถปรับตัวได้อย่างไม่ต่อเนื่อง โดยจะถูกออกแบบด้วยการใช้อุปกรณ์ประเภทพินไดโอด ทรานซิสเตอร์ วงจรรวมความถี่ไมโครเวฟ และสวิตช์แบบเอ็มอีเอ็มเอส เพื่อปรับโครงสร้างหลักของวงจรกรองความถี่

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J.-S. G. Hong, and M. J. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, John Wiley&Sons, 2001.

[2] L.-H. Hsieh, and K. Chang, "Compact Elliptic-Function Low-Pass Filters Using Microstrip Stepped-Impedance Hairpin Resonators," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.51, No.1, pp.193–199, Jan., 2003.

[3] S. Y. Huang, and Y. H. Lee, "Compact U-Shaped Dual Planar EBG Microstrip Low-Pass Filter," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.53, No.12, pp.3799 – 3805, Dec., 2005.

[4] D. Ahn, J.-S. Park, C.-S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A Design of the Low-Pass Filter Using the Novel Microstrip Defected Ground Structure," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.49, No.1, pp.86–93, Jan., 2001.

[5] A. Boutejdar, G. Nadim, and A. S. Omar, "Compact Bandpass Filter Structure Using an Open Stub Quarter-Wavelength Microstrip Line Corrections," European Microwave Conference 2005, Vol.2, Oct., 2005.

[6] W.-H. Tu, and K. Chang, "Compact Microstrip Bandstop Filter Using Open Stub and Spurline," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.15, No.4, pp.268-270, Apr., 2005.

[7] L.-H. Hsieh, and K. Chang, "Tunable Microstrip Bandpass Filters With Two Transmission Zeros," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.51, No.2, pp.520–525, Feb., 2003.

[8] J. Nath, D. Ghosh, J.-P. Maria, A. I. Kingon, W. Fathelbab, P. D. Franzon, and M. B. Steer, "An Electronically Tunable Microstrip Bandpass Filter Using Thin-Film Barium-Strontium-Titanate (BST) Varactors," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.53, No.9, pp.2707–2712, Sept., 2005.

[9] I. Gil, J. Garcia-Garcia, J. Bonache, F. Martin, M.Sorolla, and R. Marques, "Varactor-Loaded Split Ring Resonators for Tunable Notch Filters at Microwave Frequency," Electronics Letters, Vol.40, No.21, pp.1347-1348, Oct., 2004.

[10] C. Rauscher, "Reconfigurable Bandpass Filter With a Three-to-One Switchable Passband Width," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.51, No.2, pp.573-577, Feb., 2003.

[11] A. Pothier, J.-C. Orlianges, G. Zheng, C. Champeaux, A. Catherinot, D. Cros, P. Blondy, and J. Papapolymerou, "Low-Loss 2-Bit Tunable Bandpass Filters Using MEMS DC Contact Switches," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 53, No. 1, pp.354–360, Jan., 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้