

เทคนิคการปรับปรุงไดเรกทิวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบ

Directivity Enhancement of Microstrip Parallel Coupled Lines Techniques

สมชาติ โสณะแสง¹ และ นิวัตร อังควิษฐพันธ์¹

¹หน่วยปฏิบัติการวิจัยแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงคำนวณและระบบเชิงแสง สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม 44150

E-mail: somchat.s@npu.ac.th

Abstract

This article presents a review of technologies to enhance or compensate for directivity of the microstrip parallel coupled lines. By describing the basic features of the microstrip parallel coupled lines. There are 2 main techniques, which are the distributed compensation and the lumped compensation. In addition, this paper also presents the advantages and disadvantages of each compensation coupled line technique.

Keywords: directivity, parallel coupled lines, and microstrip

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมปริทัศน์ของเทคนิคในการปรับปรุงหรือชดเชยไดเรกทิวิตีสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบ โดยอธิบายคุณลักษณะพื้นฐานสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบ เทคนิคการปรับปรุงสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานมี 2 เทคนิคหลัก ซึ่งประกอบด้วย การชดเชยด้วยอุปกรณ์แบบกระจาย การชดเชยด้วยอุปกรณ์แบบก้อน นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงข้อเด่นและข้อจำกัดของการปรับปรุงสายส่งแต่ละเทคนิคไว้

คำสำคัญ: ไดเรกทิวิตี, สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน, ไมโครสตริบ

1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารแบบไร้สาย มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบสื่อสารไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารโทรคมนาคม ดาวเทียม การปล่อยจรวดหรือแม้แต่การวัดคลื่นความถี่วิทยุดาราศาสตร์ มีความจำเป็นต้องทำงานในย่านคลื่นความถี่ไมโครเวฟ หรือมิลลิเมตรเวฟ (millimeter wave) ซึ่งมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เป็นผลให้เกิดการค้นคว้าวิจัย พัฒนาวงจรอุปกรณ์ที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟ ไม่ว่าจะเป็นวงจรอุปกรณ์แอกทีฟ หรืออุปกรณ์พาสซีฟในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย [1-2] ซึ่งอุปกรณ์พาสซีฟเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ได้รับความนิยมแพร่หลายในการออกแบบวงจร เช่น วงจรกรองความถี่ วงจรรีโซเนเตอร์ วงจรรวม/แบ่งกำลัง (power divider/combiner) เป็นต้น ซึ่งไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเลี้ยงวงจร ซึ่งเป็นข้อดีของอุปกรณ์แบบพาสซีฟ และพบว่าปัจจุบันอุปกรณ์พาสซีฟที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น มีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น โคแอกเซียล

ไดอิเล็กตริก (coaxial dielectric) ท่อนำคลื่น (waveguide) และสายสตริบไลน์ (strip line) ซึ่งมีข้อดีแตกต่างกัน เช่น โคแอกเซียลจะมีคุณสมบัติการสูญเสียที่ต่ำ แต่เมื่อใช้ในความถี่ที่มากกว่า 10 กิกะเฮิรตซ์ จะมีปัญหาในการสร้างวงจรไมโครเวฟ [3-4] เป็นต้น แต่การนำสายนำสัญญาณไมโครสตริบหรือสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบ (Microstrip parallel coupled lines) เป็นส่วนประกอบในวงจรความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่กว้างรวมทั้งง่ายในการเชื่อมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกไดโอดหรือทรานซิสเตอร์แบบต่าง ๆ [3-5] มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ ดังนั้นจะเห็นว่าการนำเทคนิคของสายส่งไมโครสตริบไปสร้างเป็นวงจรไฮบริดหรือวงจรรวมไมโครเวฟแบบโมโนลิทิก (monolithic microwave integrated circuits, MMICs) ที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ ในช่วงความถี่ทำงานตั้งแต่ไม่กี่กิกะเฮิรตซ์ไปจนถึงความถี่หลายสิบกิกะเฮิรตซ์ [5] [6] อย่างกว้างขวางเป็นอย่างมากและยังมีการพัฒนาวิจัยอย่างต่อเนื่อง [7] โดยทั่วไปความถี่สูงสุดในการทำงานของสายส่งไมโครสตริบเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุฐานรอง (substrate) ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างสายส่งไมโครสตริบซึ่งประกอบไปด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์การกระจายตามความถี่ การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ (หรือความเร็วเฟสของคลื่นโหมดคู่และคี่) ตามความถี่ ความราบเรียบของผิวสัมผัสการสูญเสียแบบแทนเจนต์ (tangent loss) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและสภาพความนำไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ [8] [9] เป็นต้น สำหรับวัสดุฐานรองแบบพลาสติกจะสามารถทำงานได้จนถึงความถี่ประมาณ 20 กิกะเฮิรตซ์ มีความง่ายในการใช้งานและการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมแต่จะมีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตามความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพันธ์และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุฐานรองประเภทอื่น ส่วนวัสดุฐานรองที่ทำจากอลูมินาซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเซรามิก จะมีความแข็งแรง ทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดประมาณ 20 กิกะเฮิรตซ์ มีการสูญเสียและการกระจายตามความถี่รวมทั้งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ แต่ราคาจะสูงกว่าวัสดุฐานรองจำพวกพลาสติก ในขณะที่วัสดุฐานรองแบบควอตซ์เซ็นแซพไฟร์และแกลเลียมอาร์เซไนด์สามารถรองรับความถี่ในการทำงานได้ตั้งแต่หลายสิบกิกะเฮิรตซ์ไปถึงกว่า 300 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้กับการออกแบบวงจรในย่านมิลลิเมตรเวฟ [5] แต่เมื่อสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบหรือสายส่งไมโครสตริบตั้งแต่สองเส้นที่วางขนานกันขึ้นไปจะเกิดผลกระทบที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากโครงสร้างของชั้นวัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่ด้านบน (ชั้นของอากาศ) และชั้นวัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่ด้านล่าง (ชั้นของวัสดุไดอิเล็กตริกหรือวัสดุฐานรอง) ของสายตัวนำที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous medium) เป็นผลให้ความเร็วเฟสของคลื่นโหมดคู่และคี่ไม่เท่ากัน [9] ส่งผลให้ไดเรกทิวิตี (directivity) ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบลดลงอย่างรวดเร็วในความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งมีการวิจัยได้เสนอเทคนิคการปรับปรุงเพื่อเพิ่มค่าไดเรกทิวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบ

สำหรับในงานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการแก้ปัญหาความเร็วเฟสของคลื่นโหมดคู่และคี่ไม่เท่ากันโดยพิจารณาว่าการเพิ่มค่าไดเรกทิวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบสามารถที่จะทำให้ความเร็วเฟสของคลื่นทั้งสองโหมดมีค่าเข้าใกล้กันได้หรือเท่ากัน [9] มีการพัฒนาวิจัย เช่น การเปลี่ยนลักษณะรูปร่างของช่องว่างระหว่างตัวนำของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริบให้เป็นแบบวิกกีไลน์ (wiggly lines) [10] การเปลี่ยนลักษณะวัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่รอบแผ่นตัวนำด้วยการวางวัสดุไดอิเล็กตริก อีกชั้นหนึ่งประกบบนแผ่นตัวนำแบบ MIC (microwave integrated

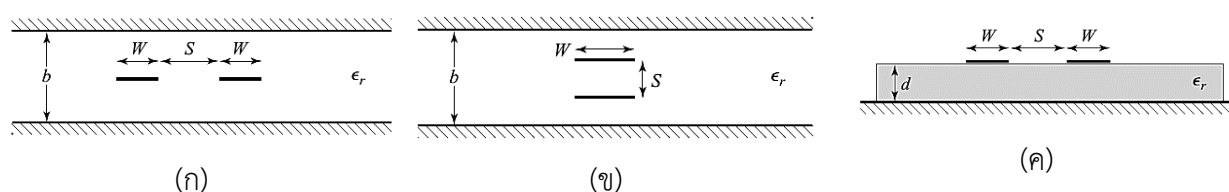
circuit) [11-15] การต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าคร่อมที่ปลายทั้งสองด้านหรือตรงกึ่งกลางของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป [16-20] การต่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ปลายสายและตรงกึ่งกลางสายส่งแบบเป็นโหนดขนาน [21-25] หรือ การต่อแบบผสมผสานตัวเก็บประจุไฟฟ้ากับตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า [26] และการปรับปรุงโครงสร้างภายในของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป [27] ซึ่งเทคนิคที่ได้กล่าวมานี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของค่าไดเรกทิวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ซึ่งบทความนี้จะนำเสนอเทคนิคดังที่กล่าวมา ข้อเด่นข้อจำกัดของแต่ละเทคนิคพร้อมการประยุกต์ใช้งานในงานการสื่อสารไมโครเวฟในหัวข้อต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

2.1.1 โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

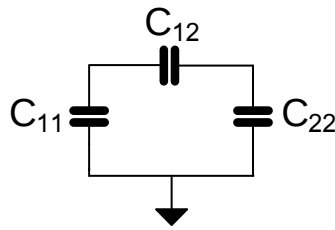
สำหรับสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปมีโครงสร้างทางกายภาพ ประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสายส่งสัญญาณสองเส้นขนานกัน ซึ่งด้านล่างของแผ่นตัวนำเป็นวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ในขณะที่ด้านบนเป็นอากาศที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_0) และได้วัสดุฐานรองจะมีแผ่นโลหะทำหน้าที่เป็น กระจกาวด์ (ส่วนมากจะเป็นตัวนำไฟฟ้า) สายส่งไมโครสตริปแบบเชื่อมต่อคู่ขนานมีโครงสร้างแบบต่าง ๆ [5] สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานแบบสตริป (planar coupled strip lines) สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานแบบสตริปแบบชั้น (stacked, or broadside coupled strip lines) และสายส่งต่อคู่ขนานแบบไมโครสตริป (parallel coupled microstrip lines) [5] ดังแสดงภาพที่ 1 (ก-ค)



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางกายภาพของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน (ก) สตริปไลน์ (ข) สตริปไลน์แบบชั้น และ (ค) ไมโครสตริป [5]

2.1.2 ค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

เมื่อนำสายส่งหรือเส้นตัวนำไฟฟ้าใด ๆ มาวางขนานกันมีระยะห่างหรือช่องว่างที่แคบมาก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 (ค) เมื่อมีการป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าและความถี่จะทำให้เกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการส่งผ่านกำลังงานจากเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่ง เป็นผลให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่บนสายตัวนำ จึงนิยมเรียกสายส่งหลายเส้นที่วางใกล้กันและขนานกันนั้นว่าสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน รูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปนั้นจะมีลักษณะแบบตั้งฉากแบบสมบูรณ์หรือแบบกึ่งสถิติจะประกอบด้วยคลื่นความถี่ทั้งสองโหมด



ภาพที่ 2 วงจรสมมูลของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแทนด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้า [5]



ภาพที่ 3 การกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) โหมดคู่และ (ข) โหมดคี่ [3]

คือโหมดคู่และโหมดคี่ (even-odd mode) ทำให้เกิดนิยามของค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคลื่นในโหมดคู่และคี่ (Z_{0e} , Z_{0o}) เนื่องจากรูปแบบการกระจายเส้นแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละโหมดมีลักษณะที่แตกต่างกัน [5] [8] สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปมีตัวกลางส่วนด้านบนและส่วนด้านล่างของแผ่นตัวนำต่างชนิดกันทำให้รูปแบบการกระจายเส้นแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นแต่ละโหมดไม่เท่ากัน เป็นผลให้ความเร็วเฟสคลื่นในแต่ละโหมดคู่และคี่ไม่เท่ากัน และมุมทางไฟฟ้าของคลื่นแต่ละโหมดจึงไม่เท่ากัน ($\theta_e \neq \theta_o$) ตามไปด้วย [3] แต่คุณสมบัติของตัวแปรทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับคลื่นแต่ละโหมดบนสายส่งไมโครสตริปเชื่อมต่อคู่ขนาน สามารถแทนด้วยแบบจำลองตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิผล (effective capacitances) [3,5] ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยเป็นวงจรสมมูลของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามตัว แทนความสัมพันธ์คือ C_{11} คือตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำที่หนึ่งเมื่อเทียบกับกราวด์ C_{22} คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำที่สองเมื่อเทียบกับกราวด์ และ C_{12} คือตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างสองสายตัวนำ เมื่อพิจารณาว่าสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าในโหมดคู่และโหมดคี่ตามลำดับ จะพบว่า ในกรณีของโหมดคู่ ศักย์ไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำทั้งสองเส้นจะมีขนาดและเครื่องหมายตรงกันทำให้กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวนำทั้งสองมีขนาดเท่ากันและไหลในทิศทางเดียวกัน ส่วนในโหมดคี่ศักย์ไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่นจะมีขนาดเท่ากันแต่เครื่องหมายตรงข้ามกัน ทำให้กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวนำทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน พฤติกรรมของสายส่งทั้งสองเส้นที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้าทั้งสองโหมดอาจจะแทนได้ด้วยแบบจำลองของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งในภาพที่ 3 (ก) เมื่อพิจารณาค่า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าแบบโหมดคู่ โดยสมมติว่าแผ่นตัวนำทั้งสองมีลักษณะคล้ายกันรวมทั้งระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำถึงกราวด์เท่ากันจะได้ว่า C_{11} เท่ากับ C_{22} เพราะในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าจะขนานกับเส้นสมมาตร (symmetry lines) ที่คั่นกึ่งกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง โดยที่ขั้วของตัวเก็บประจุไฟฟ้าคือแผ่นตัวนำใด ๆ และระยะนากราวด์ ส่วนของขนาดเส้นแรงแม่เหล็กในแนวขนานกับเส้นสมมาตร (tangential H field) มีค่าเท่ากับศูนย์หรือเสมือนว่ามีกำแพง

สนามแม่เหล็ก (magnetic wall) วางในแนวเส้นสมมาตร ยังส่งผลให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง หรือเกิดภาวะเปิดวงจรระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น ดังนั้นจึงมองเห็นเฉพาะตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{11} และ C_{22} ดังนั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับคลื่นโหมดคู่ (C_e) ได้ตามสมการ (1) [3]

$$C_e = C_{11} = C_{22} \quad (1)$$

ถ้าแผ่นตัวนำทั้งสองของสายส่งเชื่อมต่อกันมีขนาดเท่ากันจะทำให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคลื่นโหมดคู่คำนวณได้จากสมการ (2) [3,5]

$$Z_{0e} = \sqrt{\frac{L}{C_e}} = \frac{\sqrt{LC_e}}{C_e} = \frac{1}{vC_e} \quad (2)$$

จากภาพที่ 3 (ข) พิจารณาเมื่อกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าแบบโหมดคี่บนแผ่นตัวนำที่ถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าบวกจะสามารถเคลื่อนสู่แผ่นตัวนำที่ถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าลบได้ ดังนั้นจึงเกิดการส่งผ่านเส้นแรงไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่นซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ ก่อให้เกิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{12} เมื่อพิจารณาแนวเส้นสมมาตร พบว่าจะมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับแนวเส้นสมมาตร แต่ในแนวสัมผัส (tangential electric field) สนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีกำแพงสนามไฟฟ้า (electric wall) คั่นกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่น ด้วยเหตุนี้จึงเสมือนเกิดจุดที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ (null) ที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองแบ่งตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{12} ออกเป็นสองส่วนในโหมดคี่นี้ เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิผลสำหรับโหมดคี่ (C_o) ของแผ่นตัวนำสัญญาณเพียงแผ่นเดียวเทียบกับกราวด์ สามารถคำนวณได้ตามสมการ (3) [5]

$$C_o = C_{11} + 2C_{12} = C_{22} + 2C_{12} \quad (3)$$

และจะได้สมการของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคลื่นในโหมดคี่ ดังต่อไปนี้

$$Z_{0o} = \sqrt{\frac{L}{C_o}} = \frac{\sqrt{LC_o}}{C_o} = \frac{1}{vC_o} \quad (4)$$

สำหรับการออกแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปด้วยการเริ่มต้นจากตัวแปรที่เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) และสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อแรงดัน (voltage coupling coefficient: k) เขียนความสัมพันธ์กับค่าตัวแปร Z_{0e} และ Z_{0o} ได้ดังนี้

$$k = \left| \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \right| \quad (5)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (coupling factor)

$$C(\text{dB}) = 20 \log_{10} k \quad (6)$$

ดังนั้น สมการรูปร่างง่ายของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะโหมดคู่และโหมดคี่จะอยู่ในรูปสมการ (7) และ (8)

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1-C}{1+C}} \quad (7)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1+C}{1-C}} \quad (8)$$

และเมื่อพิจารณาที่อินพุตอิมพีแดนซ์ของพอร์ตใด ๆ จะแมตช์(Matching) กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) ซึ่งถูกกำหนดด้วย Z_{0e} และ Z_{0o} [3]

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}} \quad (9)$$

สำหรับคลื่นในโหมดคู่จะน้อยกว่าในโหมดคี่ยังผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลสำหรับคลื่นในโหมดคู่มากกว่าคลื่นในโหมดคี่ ($\epsilon_{effe} > \epsilon_{effo}$) [3] และในที่สุดจะทำให้ความเร็วเฟสคลื่นในโหมดคู่ ต่ำกว่าโหมดคี่ ดังสมการ (10) และ (11)

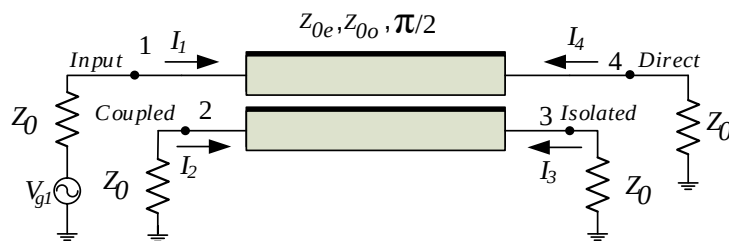
$$v_{pe} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{effe}}} \quad (10)$$

$$v_{po} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{effo}}} \quad (11)$$

ซึ่งจะพบว่าความเร็วเฟสของคลื่นในโหมดคู่และคี่ไม่เท่ากัน ซึ่งบทความนี้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงไดเรกทิวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปซึ่งจะนำเสนอเทคนิคการเพิ่มค่าไดเรกทิวิตีด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้งานในงานออกแบบวงจรไมโครเวฟสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพ ตลอดจนนำเสนอให้เห็นข้อดีข้อเด่นแต่ละเทคนิคซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2 ไดเรกทิวิตีสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าด้วยทฤษฎีวงจรข่ายไฟฟ้า ดังแสดงภาพที่ 4



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลแบบสี่พอร์ตของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

โดยหาสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อของการส่งผ่านกำลังงานหรือกำลังงานระหว่างพอร์ต 1 ไปยัง พอร์ต 2 [3] [5] ดังสมการ (12)

$$\text{Coupling Factor} = C(\text{dB}) = S_{21} = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (12)$$

ค่าไอโซเลชันหรืออัตราการแยกโดดคืออัตราการแยกโดดของการส่งผ่านกำลังงานหรือกำลังงานระหว่างพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 ซึ่งในทางอุดมคติต้องการอัตราการแยกโดดเข้าใกล้ศูนย์ จะส่งผลให้ไม่มีการรบกวนสัญญาณไฟฟ้าระหว่างพอร์ต 1 กับ 3 สมการอัตราการแยกโดดได้ดังสมการ (13) [5,29]

$$\text{Isolation} = I(\text{dB}) = S_{31} = 20 \log \frac{V_3}{V_1} \quad (13)$$

และไดเรกทิวิตีซึ่งมีสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (S_{21}) และอัตราการแยกโดด (S_{31}) สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (14) [5]

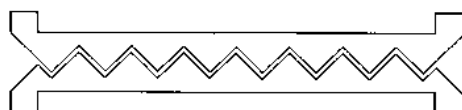
$$\text{Directivity} = D(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_3}{V_2} \quad (14)$$

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคปรับปรุงค่าไดเรกทิวิตี

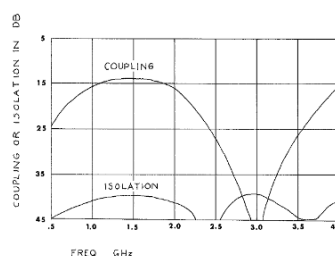
สำหรับเทคนิคการปรับปรุงหรือชดเชยสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแบ่งออกได้ 2 กลุ่มหลัก ๆ โดยแบ่งตามเทคนิค ได้แก่ การชดเชยอุปกรณ์แบบกระจาย (distributed compensation) และการชดเชยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (lumped compensation) ซึ่งบทความจะกล่าวถึงเทคนิคข้อดีข้อเด่น การประยุกต์ใช้งานของแต่ละเทคนิคในการเพิ่มไดเรกทิวิตี ดังนี้

3.1 การปรับปรุงด้วยวิธีชดเชยอุปกรณ์แบบกระจาย

สำหรับการพัฒนาการเพิ่มไดเรกทิวิตีได้มีการศึกษาในปี ค.ศ.1970 Alan Podell [10] ได้นำเสนอเพิ่มไดเรกทิวิตีด้วยเทคนิคสายส่งไมโครสตริปแบบเส้นคดเคี้ยว ดังภาพที่ 5 (ก) เพื่อทำให้ความเร็วคลื่นเฟสโหมดคู่และคี่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันโดยมีสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่ออยู่ในช่วง 7.8 – 27 เดซิเบล ซึ่งทดสอบที่ความถี่ทำงาน 1.5 กิกะเฮิร์ตซ์ สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ 12 เดซิเบล ผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มอัตราแยกโดดมากกว่า 35 เดซิเบล ดังภาพที่ 4 (ข) ซึ่งงานวิจัยของ Alan Podell พัฒนาสำหรับการใช้ในวงจรแบ่งกำลังงาน 3 เดซิเบล (3 dB coupler) ช่วงย่านความถี่ 54-290 เมกกะเฮิร์ตซ์



(ก)

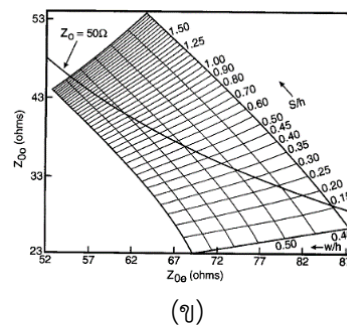
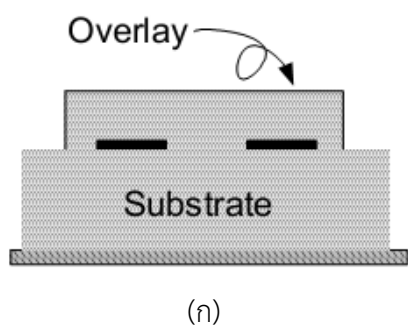


(ข)

ภาพที่ 5 (ก) โครงสร้างไมโครสตริปแบบเส้นคดเคี้ยว (ข) ผลการจำลองและวัดสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อและอัตราการแยกโดด [10]

ซึ่งผลการศึกษาพบว่า สามารถเพิ่มอัตราการแยกโคตได้ มากกว่า 27 เดซิเบล ข้อเด่นของงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มอัตรา การแยกโคตและไดเรกทิวิตีและเหมาะต่อการสร้างด้วยเทคนิค PCB แต่สำหรับการสร้างสายส่งเส้นคดเคี้ยวยังมี ข้อด้อยต้องอาศัยการหาค่าที่เหมาะสมไม่มีการนำเสนอสมการสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ใช้เวลามาก สำหรับหาค่าที่เหมาะสมให้ขนาดของส่งส่งเส้นคดเคี้ยวให้เหมาะสมในช่วงความถี่ทำงาน

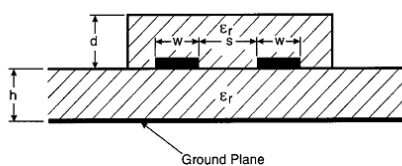
ปี ค.ศ. 1974 Sheleg และ Spielman [11] ได้นำเสนอเทคนิคการใช้เทคนิคสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน ไมโครสตริปที่มีการวางอยู่วัสดุไดอิเล็กตริกอีกชนิดหนึ่งเพื่อซ้อนทับกัน (dielectric overlays coupler) โดยพัฒนา ต่อจากงานวิจัย Alan [10] ดังภาพที่ 6 (ก) ภาพตัดขวางของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ซึ่งออกแบบที่ สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อที่ 6 และ 10 เดซิเบล เทคนิคดังกล่าวอาศัยการสร้างแบบทับซ้อนกัน MIC เทคนิคที่นำเสนอ นั้นสามารถเพิ่มให้ไดเรกทิวิตีเพิ่มมากขึ้น ถึงกระนั้นก็มีข้อจำกัดด้านความซับซ้อนในการสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน ไมโครสตริป แบบ MIC ในการออกแบบต้องใช้กรรมวิธีการสร้างที่ซับซ้อน เนื่องจากส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่มีการวาง อยู่วัสดุไดอิเล็กตริกซ้อนทับกัน



ภาพที่ 6 (ก) วัสดุฐานรองที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และ (ข) การเลือกค่า Z_{0e} และ Z_{0o} [12]

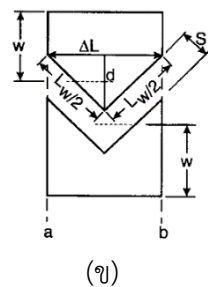
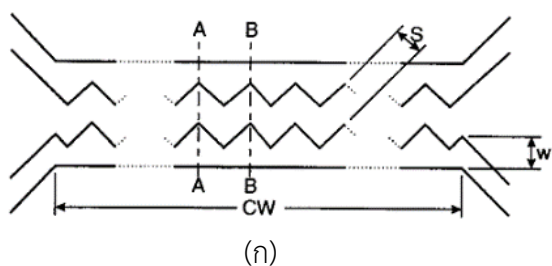
ปี ค.ศ. 1978 Paolino [12] นำเสนอเทคนิคการสร้าง MIC overlay ภาพ 6 (ก) เป็นการวางทับซ้อนกัน พร้อมนำเสนอการเลือกค่า Z_{0e} และ Z_{0o} ที่เหมาะสม ดังภาพที่ 6 (ข) แต่เทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มไดเรกทิวิตีด้วยการลดอัตราแยกโคต แต่เทคนิคนี้มีข้อจำกัด คือ ความยุ่งยากในการเลือกค่าที่เหมาะสม (optimization) ไม่มีการ นำเสนอสมการเริ่มต้นในการเลือก การสร้างมีความซับซ้อน การออกแบบและสร้างต้องอาศัยการจำลอง สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic simulation) สิ้นเปลืองเวลาและมีขั้นตอนในการสร้าง MIC ที่ซับซ้อน

ต่อมาในปี ค.ศ. 1983 Su และคณะ [13] ได้นำเสนอเทคนิคการจำลองสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป แบบ MIC overlay ที่มีการวางอยู่วัสดุไดอิเล็กตริกซ้อนทับกัน ซึ่งพัฒนาต่อจากงานวิจัย [10-12] ดังภาพที่ 7 โดยการ ออกแบบและจำลองกับวัสดุฐานรองที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่ำ ที่ทำงานในย่านความถี่ 2 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ ในย่านความถี่ เอส (S band) ผลที่ได้พบว่าสามารถเพิ่มไดเรกทิวิตี แต่การออกแบบจำลองบน EM ใช้เวลาและทรัพยากรจำนวนมากในการจำลอง เนื่องจากจำเป็นต้องจำลองทำงานแบบเต็มรูปแบบวิเคราะห์สนามแม่เหล็ก (full-wave electromagnetic analysis)



ภาพที่ 7 การชดเชย ด้วยเทคนิค MIC overlay [13]

ในปี ค.ศ. 1989 Uysal และคณะ [14] ได้พัฒนาการเพิ่มไดเรกทีวิตีด้วยเทคนิคสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแบบสายส่งเส้นคดเคี้ยวบนสายส่งที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous media) ด้วยการออกแบบวงจรแบบ MIC overlay เทคนิคนี้ใช้การวิเคราะห์ด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ร่วม (Mutual capacitance) ที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ซึ่งอาศัยขนาดและความยาวสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปสำหรับการประมาณค่าคาปาซิแตนซ์ร่วม ดังแสดงในภาพที่ 8 (ก)-(ข) ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มไดเรกทีวิตีได้พร้อมยังได้นำเสนอสมการสำหรับการสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแบบสายส่งเส้นคดเคี้ยวในโหมดคู่เท่านั้น แต่งานวิจัยนี้ก็มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการสร้างสายส่งที่มีความซับซ้อนในระหว่าง ΔL และ $L_{W/2}$ [14] ซึ่งต้องใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง



ภาพที่ 8 การชดเชยสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแบบสายส่งเส้นคดเคี้ยว [14]

ปี ค.ศ. 1990 Klein และคณะ [15] นำเสนอเทคนิคสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปด้วยการวางอยู่วัสดุไดอิเล็กตริกซ้อนทับกันพัฒนาต่อจากงานวิจัย [12-14] สำหรับการเพิ่มไดเรกทีวิตีด้วยการหาค่าที่เหมาะสมของความหนาของฐานรองที่เหมาะสม วิเคราะห์ในโหมดคู่และโหมดคี่ตามลำดับ เพื่อให้ความเร็วเฟสคลื่นทั้งโหมดคู่และคี่เท่ากัน ผลจากการศึกษาพบว่าสามารถลดอัตราแยกโดดได้มากกว่า -60 เดซิเบล น้อยกว่าสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปที่ไม่มีการชดเชยหรือสายส่งแบบธรรมดา แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือไม่มีสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการออกแบบสร้างวงจรของสายส่ง จะอาศัยการจำลองการทำงานที่คำนึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหลัก ด้วยระเบียบวิธีที่ใช้เทคนิคของการประมาณค่าที่เหมาะสมเท่านั้น ซึ่งยังมีความยุ่งยากในการสร้างวงจร ต้องใช้เวลาปรับค่าที่เหมาะสม

สรุปการใช้เทคนิคการชดเชยด้วยวิธีการชดเชยอุปกรณ์แบบกระจายนั้นจะพบว่ามีความสำคัญสำหรับการเพิ่มไดเรกทีวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป แต่ก็มีข้อจำกัดในการสร้างวงจร การวิเคราะห์ห้มีความซับซ้อน และต้องอาศัยการประมาณค่าที่เหมาะสมซึ่งมีความผิดพลาดได้ และได้มีการนำเสนอเทคนิคงานวิจัยที่ผ่านมาสำหรับการชดเชยด้วยวิธีการชดเชยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน

3.2 การชดเชยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (lumped compensation)

3.2.1 การชดเชยอุปกรณ์ด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เริ่มต้นในปี ค.ศ. 1977 Schaller [16] การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ต่อขนานพอร์ระหว่างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป กึ่งกลางและปลายสายส่ง ดังแสดงภาพที่ 9 (ก-ข) โดยหาตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับค่าที่เหมาะสมซึ่งยังไม่มีคำแนะนำสมการรองรับการการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งมีข้อจำกัดใช้ระยะเวลาในการค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้า



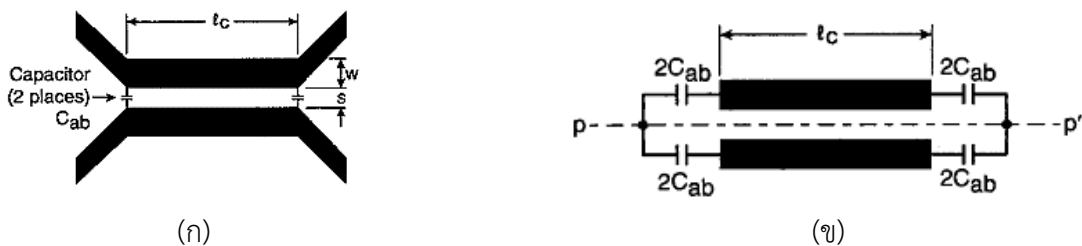
ภาพที่ 9 การชดเชยของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้า [16]

ค.ศ. 1978 Kajfez [17] ได้นำเสนอการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าระหว่างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ระหว่างปลายสายทั้งสองด้านดังภาพที่ 10 (ก) และการวิเคราะห์หาตัวเก็บประจุไฟฟ้าเหมาะสมดังแสดงในภาพที่ 10 (ข) ซึ่งวิธีนี้สามารถเพิ่มไดเรกทิวิตี พร้อมปรับความเร็วเฟสคลื่นโหมดคู่และคี่ได้อย่างดี พร้อมทั้งเสนอสมการตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการชดเชยสมการ 14 ตามลำดับ แต่งานวิจัยนี้แนะนำเสนอตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{ab} แต่มีข้อจำกัดซึ่งไม่มีการนำเสนอเทคนิคการปรับลดขนาดความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

$$C_{ab} = \frac{1}{4\pi f_o Z_{o0} \tan \theta_o} \quad (14)$$

เมื่อค่าความยาวเชิงมุมเชิงมุมไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป (θ_o) [17]

$$\theta_o = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_{reo}}{\epsilon_{ree}}} \quad \text{เรเดียน} \quad (15)$$



ภาพที่ 10 การชดเชยสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้า [17]

ในปี ค.ศ. 1982 March [18] ได้พัฒนางานวิจัยต่อจาก Kajfez [17] พร้อมกับการนำเสนอสมการสำหรับการปรับค่าความยาวเชิงมุมไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป (l_c) จากการเพิ่มตัวเก็บประจุไฟฟ้า

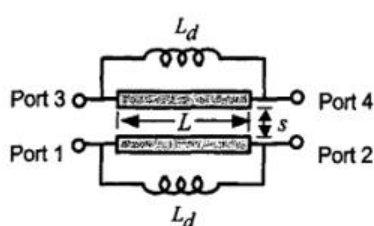
ระหว่างสายส่งทั้งสองด้านของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป เพื่อเพิ่มค่าไดเรกทิวิตีในช่วงความถี่ทำงานและทำให้อัตราการแยกโดมีค่าสูงขึ้นด้วย

จากนั้นได้มีการพัฒนาต่อยอดในช่วงปี ค.ศ.1989-1990 Dydyk [19-20] ได้นำเสนอการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าคร่อมทั้งสองด้านของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป พร้อมนำเสนอสมการตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C_D) แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้นำเสนอการลดความยาวเชิงมุมไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปและเทคนิคนี้ยังส่งผลให้เกิดผลกระทบของตัวแปรแอบแฝง (parasitic parameter) ที่ต้องระมัดระวังในการออกแบบสร้างชิ้นงาน

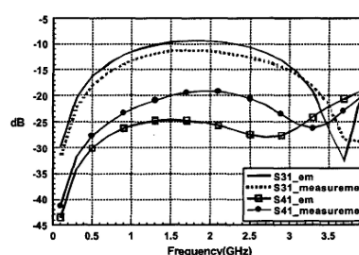
ดังนั้นตามที่ได้กล่าวมาเทคนิคของการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้นก็มีข้อจำกัดบางประการที่ต้องระมัดระวังในการออกแบบ เช่น ตัวแปรแอบแฝงจากการออกแบบลายวงจร ตัวแปรแอบแฝงจากอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน ที่นำมาต่อร่วมกับสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป นอกจากนี้เมื่อนำเทคนิคนี้ไปใช้กับสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปที่มีค่าสัมประสิทธิ์เชื่อมต่อสูง (tight coupler) ซึ่งมีค่ามากกว่า -8 เดซิเบล จะเกิดความลำบากในการแทรกตัวเก็บประจุไฟฟ้าเหล่านี้ลงไประหว่างช่องว่าง (s) ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป นอกเหนือจากเทคนิคการชดเชยไดเรกทิวิตีด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าแล้วนี้ ก็มีการนำเสนอเทคนิคที่ให้ผลในการเพิ่มไดเรกทิวิตีด้วยเทคนิคการต่อตัวเหนี่ยวนำ

3.2.2 การชดเชยอุปกรณ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 2002 นักวิจัย Chen และคณะ [21] ได้นำเสนอการชดเชย ด้วยการต่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบป้อนกลับ (feedback inductive) ระหว่างพอร์ต 1 ไปยัง 2 และพอร์ต 3 ไปยัง 4 ซึ่งแสดงภาพที่ 11 (ก) โดยแทนตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยสายส่งไมโครสตริปด้วยวิธีการสังเคราะห์ค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าผลจำลองและวัดจริงเทคนิคนี้สามารถลดอัตราการแยกโดได้น้อยกว่า 18 เดซิเบล สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่ออยู่ในระดับเดียวกันที่ความถี่ทำงานที่ 1.8 กิกะเฮิรตซ์ ดังภาพที่ 11 (ข) แต่วิธีการดังกล่าวจะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าสูงและไม่มีการนำเสนอการปรับลดความยาวเชิงมุมไฟฟ้า



(ก)

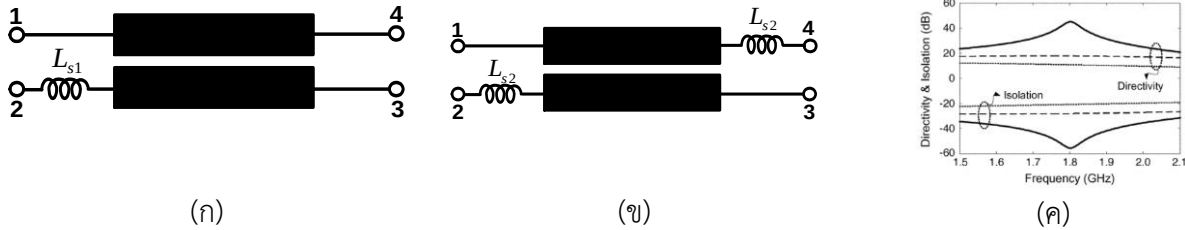


(ข)

ภาพที่ 11 (ก) การชดเชยด้วยการต่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบขนานป้อนกลับ (ข) ผลจำลองและวัด [21]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Ravee และคณะ [22] ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการชดเชยด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ต่อแบบเดี่ยว (singly-compensation inductor) และแบบคู่ (doubly-compensation inductor) ดังแสดงในภาพที่ 12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยเทคนิคการเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบเดี่ยวที่พอร์ตเชื่อมต่อ (coupled

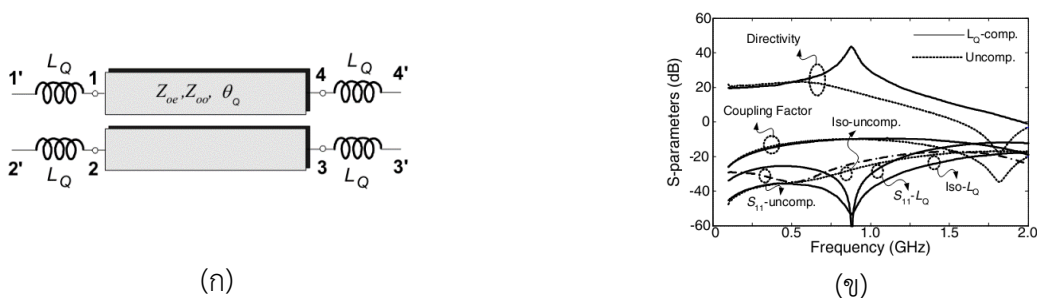
port : port 2) และเทคนิคการเชื่อมต่อสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปด้วยการเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำแบบคู่เข้ากับพอร์ตเชื่อมต่อและพอร์ตเอาต์พุต พร้อมกับนำเสนอ สมการตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และสมการสำหรับการลดความยาวเชิงมุมไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป



ภาพที่ 12 (ก) การชดเชยด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ต่อแบบเดี่ยว (ข) ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบคู่ และ (ค) ผลการวัดไดเรกทิวิตี้อัตราการแยกโดด [22]

ผลจากการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มไดเรกทิวิตี้อัตราการแยกโดดที่สูงกว่าที่ความถี่ทำงาน 0.9 กิกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในภาพที่ 12 (ค) ซึ่งเปรียบเทียบกับงานวิจัย [18-20] ซึ่งให้ไดเรกทิวิตี้อัตราการแยกโดดที่สูงกว่า แต่งานวิจัยนี้นำเสนอในสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปที่มีสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อที่สูง (tight coupling) และเทคนิคนี้มีความคลาดเคลื่อนของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า เนื่องจากการต่อเชื่อมลงกราวด์ผ่านซึ่งทำให้เกิดเป็นตัวแปรแอบแฝงเกิดขึ้น [22]

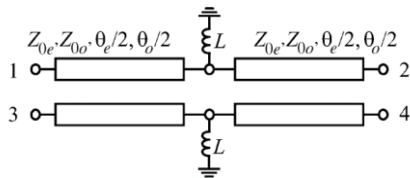
ในช่วงเวลาเดียวกัน Ravee และคณะ [23] ได้นำเสนอเทคนิคการชดเชยด้วยการต่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบสี่ตัวเดี่ยว (quadruply-compensated parallel-coupled lines) ดังภาพที่ 13 (ก) ต่อตรงปลายสายของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปพร้อมนำเสนอสมการค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และสมการสำหรับการลดขนาดความยาวเชิงมุม ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าสี่ตัวเดียวนั้นทำให้ไดเรกทิวิตี้อัตราการแยกโดดเพิ่มขึ้นที่ความถี่ทำงาน 43 เดซิเบล และอัตราการแยกโดด น้อยกว่า -40 เดซิเบล ที่ความถี่ทำงาน 0.9 กิกะเฮิรตซ์ ดังภาพที่ 13 (ข) แต่เนื่องจากการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ในด้านขาเข้าที่พอร์ตทั้ง 4 พอร์ต ทำให้เกิดค่าตัวแปรแอบแฝงเกิดขึ้นและมีการต่อลงกราวด์ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเทคนิคการชดเชยด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นที่สนใจ



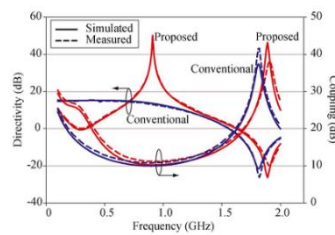
ภาพที่ 13 (ก) การชดเชยด้วยการต่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบสี่ตัวเดี่ยว (ข) S-parameter [23]

ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 2009 Lee และคณะ [24] ได้นำเสนอการชดเชยด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบโหลดขนาน (shunt inductors) กึ่งกลางของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ซึ่งมีการต่อลงกราวด์ดังแสดงในภาพที่ 14 (ก) โดยมีการต่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าพร้อมเชื่อมต่อกับกราวด์เพื่อแสดงเป็นโหลดขนานกับสายส่ง โดยนำเสนอสมการ

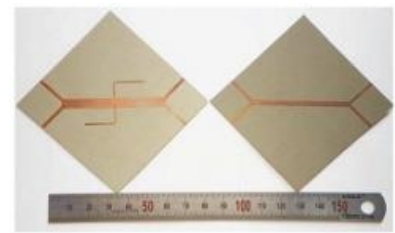
ค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าดังสมการ 22 ผลการวิจัยพบว่า ที่ความถี่ทำงานนั้นไดเรกทิวิตีเท่ากับ 48 เดซิเบล ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ 10 เดซิเบล ที่ความถี่ทำงาน 0.9 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งผลที่วัดได้นั้นค่าอยู่ในช่วง 10 เดซิเบล ดังแสดงในภาพที่ 13 (ข) แต่การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ด้วยเทคนิคนี้อาศัยการสังเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากสายส่ง ไมโครสตริปส่งผลให้วงจรมีขนาดใหญ่รวมทั้งมีการต่อกราวด์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดตัวแปรแอบแฝงเกิดขึ้น และเทคนิคดังกล่าวนี้ไม่มีการนำเสนอการลดขนาดของความยาวเชิงมุมไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแต่อย่างใด



(ก)



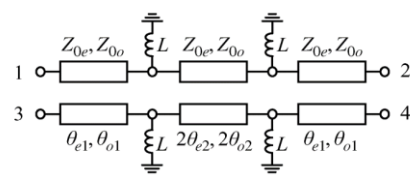
(ข)



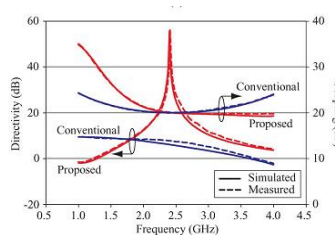
(ค)

ภาพที่ 14 (ก) การชดเชยด้วยการต่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบโหนดขนาน (ข) ผลวัดไดเรกทิวิตี และสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ และ (ค) ชิ้นงานจริง [24]

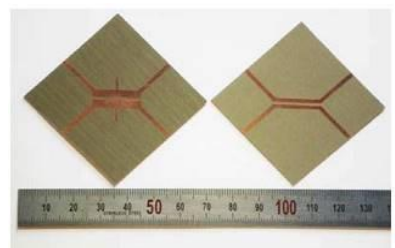
และหลังจากนั้นปี ค.ศ. 2010 นักวิจัย Lee และคณะ [25] ได้พัฒนาการชดเชยด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ตรงกลางแบบขนานจำนวนสี่ตัวซึ่งมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 15 (ก) เทคนิคนี้เกิดจากการพัฒนาต่อของนักวิจัย Lee [24] ผลการวิจัยพบว่าไดเรกทิวิตีด้วยเทคนิคดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 15 (ข) ซึ่งที่ความถี่ทำงานนั้นวัดไดเรกทิวิตีเท่ากับ 56 เดซิเบลที่ความถี่ทำงาน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ที่สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อเท่ากับ -20 เดซิเบล ผลวัดสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่นำเสนอให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ดีกว่าสายส่งแบบธรรมดา แต่เทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดการนำเสนอสมการลดความยาวเชิงมุมไฟฟ้าของสายส่ง



(ก)



(ข)

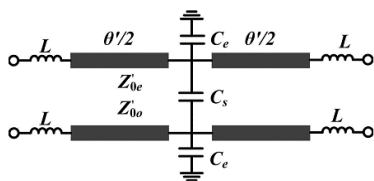


(ค)

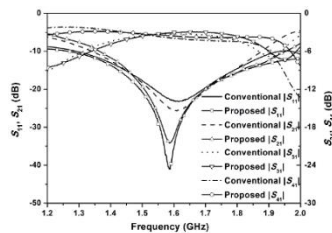
ภาพที่ 15 (ก) การชดเชยด้วยการต่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบโหนดขนานสี่ตัว (ข) ผลวัดไดเรกทิวิตี และ (ค) ชิ้นงานจริง [25]

ปี ค.ศ. 2014 นักวิจัย Liu และคณะ [26] ได้พัฒนาการใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบอนุกรมโดยอ้างอิงงานของ Ravee และคณะ [22] โดยเพิ่มการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มเติมตรงกลางของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ทำการพัฒนาต่อใช้ในงานวงจรแบ่งกำลังงาน -3 เดซิเบล ซึ่งการต่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะต่อด้านปลายพอร์ตดังแสดง

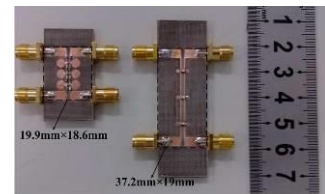
ในภาพที่ 16 (ก) พร้อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าแทรกตรงกึ่งกลางสายส่ง พร้อมทั้งได้นำเสนอสมการค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและตัวเก็บประจุไฟฟ้า แต่ไม่มีการนำเสนอสมการการลดความยาวเชิงมุมไฟฟ้าของสายส่ง ถึงแม้ว่าเทคนิคนี้สามารถลดอัตราแยกโคตได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ความเร็วเฟสคลื่นโหมดคู่และคี่มีความเร็วเท่ากัน ผลการวัดพบว่า ที่ความถี่ทำงาน 1.6 กิกะเฮิรตซ์ผลตอบแทนเชิงความถี่ของอัตราแยกโคตได้น้อยกว่า -40 เดซิเบล ที่สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (insertion loss) เท่ากับ -3 เดซิเบล ดังภาพที่ 16 (ข) แต่โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปของเทคนิคนี้ทำให้วงจร มีขนาดใหญ่ และยากต่อการสร้างวงจรที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากช่องว่างระหว่างสายส่งที่แคบ ภาพที่ 16 (ค) ภาพขึ้นงานจริง



(ก)



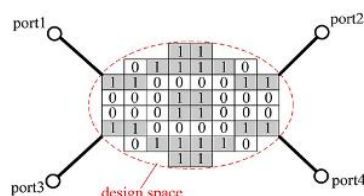
(ข)



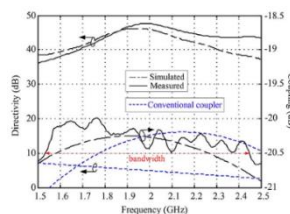
(ค)

ภาพที่ 16 (ก) การชดเชยด้วยการต่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าผสมผสาน (ข) ผลการวัดผลตอบแทนเชิงความถี่ S-Parameter และ (ค) ขึ้นงานจริง [26]

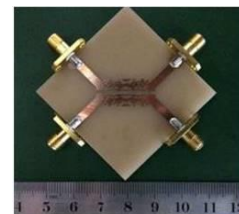
ในปี ค.ศ. 2015 Lu Wing และคณะ [27] ได้พัฒนาเทคนิคการปรับค่าที่เหมาะสมในการหาวิธีชดเชยโครงสร้างตรงสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปซึ่งค้นหาตำแหน่งของการให้เกิดลายวงจรของสายส่งดังแสดงในภาพที่ 17 (ก) ได้นำเสนอการออกแบบโดยการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการสร้างที่ให้อัตราแยกโคตเข้าใกล้ศูนย์ เทคนิคนี้สามารถเพิ่มไดเรกทิวิตี และทำให้เฟสโหมดคู่และคี่มีความเร็วเท่ากันซึ่งผลการวัดพบว่าผลตอบแทนเชิงความถี่ที่ความถี่ทำงาน 2 กิกะเฮิรตซ์ นั้นไดเรกทิวิตีเท่ากับ 48 เดซิเบล ที่สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ -20 เดซิเบล และมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากขึ้น ดังภาพที่ 17 (ข) แต่โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ของเทคนิคดังกล่าวนี้มีความซับซ้อนในการสร้างและยากต่อการสร้างวงจรที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้าง Fragment-Type Structure ขึ้นงานจริงดังภาพที่ 17 (ค)



(ก)



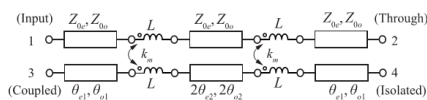
(ข)



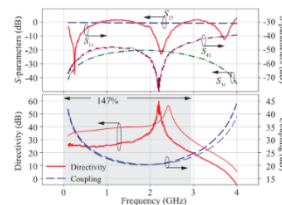
(ค)

ภาพที่ 17 (ก) การชดเชยด้วย Fragment-Type Structure (ข) ผลวัดไดเรกทิวิตี สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ และ (ค) ขึ้นงานจริง [27]

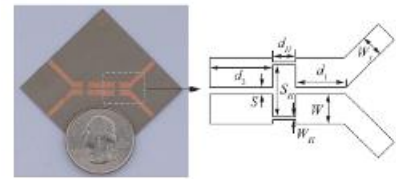
ปี ค.ศ. 2017 Jungie Ha และคณะ [28] ได้มีการนำเสนอการชดเชยด้วยการต่อโหลดตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจำนวน 4 ตัว ดังภาพที่ 18 (ก) ซึ่งใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วม (Mutual Inductance) ซึ่งทำการต่อแทรกโดยแบ่งสายส่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งมีวัตถุประสงค์การลดอัตราแยกโคตเข้าใกล้ศูนย์ และเพิ่มไดเรกทิวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ผลการศึกษาพบว่า ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ความถี่ทำงาน 2 กิกะเฮิรตซ์ นั้นไดเรกทิวิตีเท่ากับ 60 เดซิเบล ที่สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ -20 เดซิเบล และมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากขึ้น ดังภาพที่ 18 (ข) แต่โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปของเทคนิคดังกล่าวนี้ไม่มีการนำเสนอสมการ การสร้างและต้องปรับจูน ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่ง โดยยากต่อการสร้างวงจรที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ชิ้นงานจริงดังภาพที่ 18 (ค) ตามลำดับ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในอัตราแยกโคตได้ในสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป



(ก)



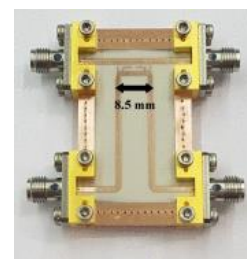
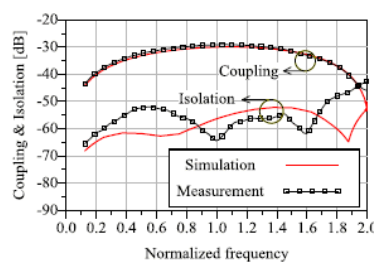
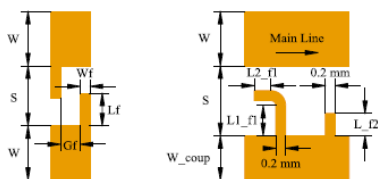
(ข)



(ค)

ภาพที่ 18 (ก) การชดเชยด้วยการต่อโหลดเหนี่ยวนำ (ข) ผลวัดไดเรกทิวิตี สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ และ (ค) ชิ้นงานจริง [28]

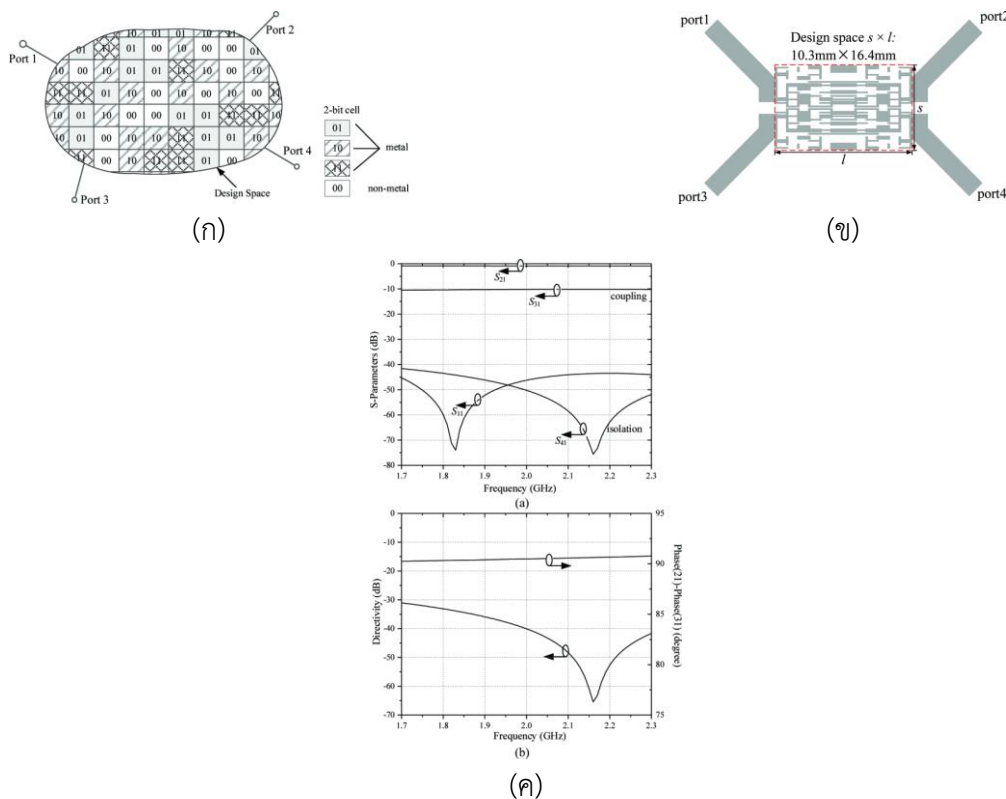
ปี 2017 C. T. Nghe และคณะ [29] นำเสนอการเพิ่มชดเชยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อนด้วยการชดเชยตัวเก็บประจุไฟฟ้า สำหรับวงจรพิมพ์ขนาดเล็ก โครงการสร้างด้วยรูปร่างเรขาคณิตให้มีโครงสร้างที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถใช้สำหรับการส่งผ่านกำลังงานเชื่อมต่อ -30 เดซิเบล การส่งผ่านกำลังสูญเสีย 0.07 เดซิเบล เพิ่มไดเรกทิวิตี มากกว่า 20 เดซิเบล ตลอดจนเพิ่มแบนด์วิดท์เท่ากับ 152.5 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 18 ตามลำดับ



ภาพที่ 18 (ก) การชดเชยด้วยการต่อโหลดเหนี่ยวนำ (ข) ผลวัดไดเรกทิวิตี สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ และ (ค) ชิ้นงานจริง [29]

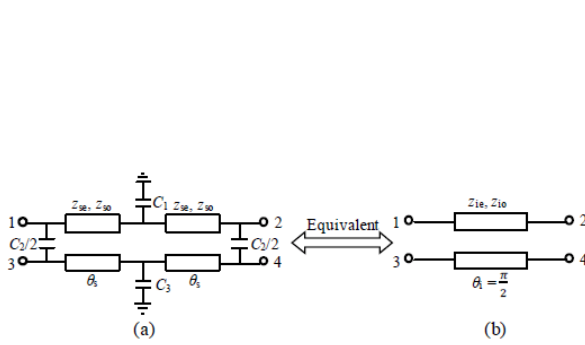
ปี 2019 M. Hammad Akhtar และคณะ [30] ได้นำเสนอการพัฒนาการปรับปรุงไดเรกทิวิตีของสายส่งแบบไดเรกชันนอลคัปเปิลแบบมีคู่ที่ บนวัสดุฐานรอง Rogers 6035HTC พบว่าที่ค่าไดเรกทิวิตีมากกว่า 20 เดซิเบล และแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น 35% ที่สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ -30 เดซิเบล

ปี 2020 W. Zhang และ G. Wang [31] ได้นำเสนอโครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแบบใหม่ตามแบบ 2 บิต พัฒนาจากงาน [27] โดยใช้รูปแบบ 1 บิตแบบเดิมโดยการเพิ่มช่องว่างและเส้นบางๆ ภายในเซลล์ซึ่งต้องอาศัยการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคดังกล่าว และการพัฒนาด้วยเทคนิคดังกล่าวนำเสนอไดเรกชันแนลคัปเปอร์ที่ความถี่ทำงาน 2 GHz สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ -10 เดซิเบล และ -20 เดซิเบล ผลการทดสอบพบว่าไดเรกชันแนลคัปเปอร์ที่มีทิศทางประสิทธิภาพสูงสุด 65 เดซิเบล และ 49 เดซิเบล ตามลำดับ เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบ 1 บิตแบบดั้งเดิม ดีกว่า ดังภาพที่ 19

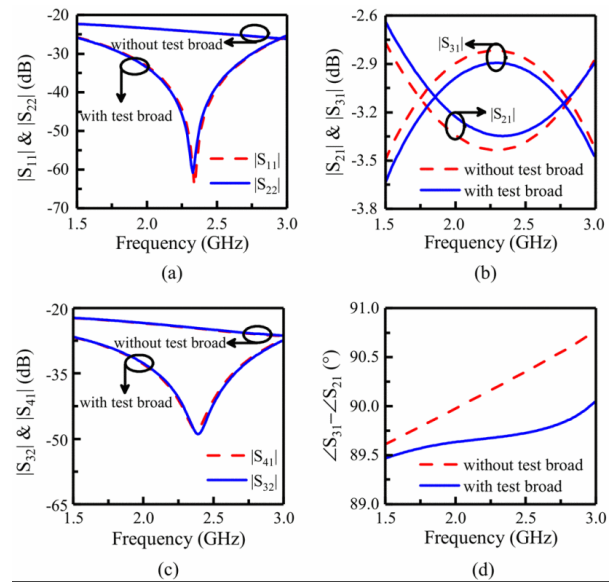


ภาพที่ 19 (ก) การชดเชยด้วยการต่อโหลดเหนี่ยวนำ (ข) ชิ้นงานจริง และ (ค) ผลวัดไดเรกชันแนล [31]

ในปี 2020 B. -G. Liu และคณะ [32] ได้นำเสนอการชดเชยแบบพื้นผิวหลายชั้นโดยการเชื่อมต่อแบบ Broadside เพื่อให้เกิดสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อขนาด -3 เดซิเบล แนะนำตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแบ่งที่ตรงกลาง ซึ่งสามารถชดเชยความเร็วเฟสโหมดคี่ ผลการทดสอบวงจรต้นแบบที่มีการมีเพสสัมพันธ์ 3.1 ± 0.5 เดซิเบล ใน 1.5-3 GHz ได้รับการออกแบบที่ 2.25 GHz การสูญเสียผลตอบแทนและการแยกจะดีกว่า 25 เดซิเบล และ 27 เดซิเบล ตามลำดับ ความแตกต่างของเฟสเท่ากับ $89.75^\circ \pm 0.25^\circ$ ดังภาพที่ 20 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 (ก) การชดเชยตัวเหนี่ยวนำ และ (ข) ผลวัด s-parameters [32]

4. อภิปรายผล

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยในเรื่องของการเพิ่มค่าไดเรกทิวิตีและการลดอัตราแยกโอดของสายส่งแบบไมโครสตริปที่กล่าวมา 2 เทคนิคหลัก ๆ คือ การชดเชยอุปกรณ์แบบกระจาย และการชดเชยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน ข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป จะเห็นได้ว่าทุกโครงสร้างทุกวิธีมุ่งเน้นไปทางการลดอัตราการแยกโอดของสัญญาณที่ส่งผ่านจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 ซึ่งสามารถลดอัตราแยกโอด ได้ทั้ง 2 เทคนิค แต่เทคนิคการชดเชยอุปกรณ์แบบกระจาย มีข้อจำกัดในการออกแบบต้องใช้วิธีการปรับจูนค่าที่เหมาะสม [10-15,26] มีความยุ่งยากในการสร้าง [26] เนื่องจากมีความซับซ้อนทางโครงสร้างและข้อจำกัดของการชดเชยด้วยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อนกรณีชดเชยด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีปัญหาเรื่องการต่อขานระหว่างสายส่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อสูง ๆ จะมีความยากในการเชื่อมต่อเกิดพารามิเตอร์แผงภายใน [16-19] การเชื่อมต่อด้วยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายส่งได้เป็นอย่างดี [20-25,27] แต่ก็พบว่าเกิดการเชื่อมต่อด้วยกราวด์ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าเหนี่ยวนำ [21-22] ขนาดของวงจรมีขนาดใหญ่ [23-24] การเชื่อมต่อแบบอนุกรม [27] แก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ แต่ก็ไม่มีการนำเสนอการปรับความยาวไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ซึ่งเป็นข้อจำกัดของงานวิจัยดังกล่าว ซึ่งเทคนิคการชดเชยได้มีนำเสนอในการวัดทดสอบพัฒนาในการออกแบบลดความถี่ปลอมเทียมตามลำดับ แต่มีงานวิจัยที่แนะนำการชดเชยสายส่งสลับแบบเปิดในการชดเชยวงจรสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป [33] ตลอดจนได้มีพัฒนาสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปสำหรับการออกแบบในการวัดระดับความสูงของน้ำ [34] หรือการวัดคุณสมบัติของวัสดุต่างด้วยการสร้างตัวตรวจวัดย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงค่าไดเรกทิวิตีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปซึ่งได้กล่าวถึงเทคนิคของแต่ละโครงสร้างว่ามีประสิทธิภาพในการลดอัตราแยกโดด และเพิ่มค่าไดเรกทิวิตี ซึ่งเหมาะให้ทราบถึงข้อจำกัดและข้อเด่นของการชดเชยอุปกรณ์แบบกระจาย และการชดเชยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการออกแบบวงจรไมโครสตริปต่อไป

อ้างอิง

- [1] D. K. Misra. (2001). *Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits: Analysis and Design*, New York: John Wiley & Sons, 1-3.
- [2] C. Kai. (2000). *RF and microwave wireless systems*, New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 1-10.
- [3] J. S. H. a. M. J. Lancaster. (2001). *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, New York, NY: John Wiley & Sons, 77-90.
- [4] J. F. White. (2003). *High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Design and Computer Simulation*, Wiley-IEEE Press.
- [5] D. M. Pozar. (2011). *Microwave Engineering*, (4th Ed.), NJ: Wiley.
- [6] T. C. a. J. Long. (2006). *Shielded passive device for silicon-based monolithic microwave and millimeter-wave integrated circuits*, IEEE J. Solid-State Circuits, 41(5), 1183-1200.
- [7] S. Diebold. (March, 2016). *A Novel 1x4 Coupler for Compact and High-Gain Power Amplifier MMICs Around 250 GHz*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63(3), 999-1006.
- [8] R.K. Mongjar. (2007). *RF and Microwave Coupled-Line Circuits*, (2nd Ed.), Norwood, MA: Artech House.
- [9] R. A. (1988). *High performance parallel coupled microstrip filter*, in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.
- [10] P. Alan. (1988). *A high directivity microstrip coupled lines techniques*, in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.
- [11] B. Sheleg and B. E. Spielman. (December, 1974). *Broad-Band Directional Couplers Using Microstrip with Dielectric Overlays*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 22(12), 1216 - 1220.
- [12] D. D. Paolino. (1978). *MIC Overlay Coupler Design Using Spectral Domain Techniques*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 26(9), 646 - 649.
- [13] L. Su, T. Itoh and J. Rivera. (1983). *Design of an Overlay Directional Coupler by a Full-Wave Analysis*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 31(12), 1017 - 1022.
- [14] S. Uysal and H. Aghvami. (1989). *Synthesis, design, and construction of ultra-wide-band nonuniform quadrature directional couplers in inhomogeneous media*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 37(6), 969 - 976.
- [15] J. L. Klein and K. Chang. (1990). *Optimum dielectric overlay thickness for equal even- and odd-mode phase velocities in coupled microstrip circuits*, Electronics Letters, 26(5), 274 - 276.

- [16] G. Schaller. (1977). *Optimization of microstrip directional couplers with lumped capacitors*, AEU, 31, 301-307.
- [17] D. Kajfez. (March, 1978). *Raise Coupler Directivity with Lumped Compensation*, Microwaves, 27, 64-70.
- [18] S. L. March. (1982). *Phase Velocity Compensation in Parallel-Coupled Microstrip*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 410-412, <http://doi.org/10.1109/MWSYM.1982.1130739>.
- [19] M. Dydyk. (1990). *Accurate design of microstrip directional couplers with capacitive compensation*, IEEE International Digest on Microwave Symposium, 1, 581-584, <http://doi.org/10.1109/MWSYM.1990.99647>.
- [20] M. Dydyk. (June, 1999). *Microstrip directional couplers with ideal performance via single-element compensation*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47(6), 956-964, <http://doi.org/10.1109/22.769332>.
- [21] Jia-Liang Chen, Sheng-Fuh Chang and Chain-Tin Wu. (2002). *A high-directivity microstrip directional coupler with feedback compensation*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.02CH37278), 1, 101-104. <http://doi.org/10.1109/MWSYM.2002.1011569>.
- [22] R. Phromlounsri, M. Chongcheawchamnan and I. D. Robertson. (2006). *Inductively Compensated Parallel Coupled Microstrip Lines and Their Applications*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54(9), 3571 - 3582.
- [23] R. Phromlounsri, V. Chamnanphrai and M. Chongcheawchamnan. (2006). *Design high-directivity parallel-coupled lines using quadrupled inductive-compensated technique*, in 2006 Asia-Pacific Microwave Conference.
- [24] S. Lee and Y. Lee. (2009). *An Inductor-Loaded Microstrip Directional Coupler for Directivity Enhancement*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 19(6), 362-364.
- [25] S. Lee and Y. Lee. (2010). *A Design Method for Microstrip Directional Couplers Loaded With Shunt Inductors for Directivity Enhancement*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 58(4), 994-1002.
- [26] H. Liu, S. J. Fang, Z. Wang and Y. Zhou. (2014). *Miniaturization of trans-directional coupled line couplers using series inductors*, Progress In Electromagnetics Research C, 46, 171-177.
- [27] L. Wang, G. Wang and J. Siden. (2015). *Design of High-Directivity Wideband Microstrip Directional Coupler With Fragment-Type Structure*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63(12), 3962-3970.
- [28] J. Ha, W. Shin and Y. Lee. (2017). *An Inductive-Loading Method for Directivity Enhancement of Microstrip Coupled-Line Couplers*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 27(4), 356-358.
- [29] C. T. Nghe, F. Rautschke and G. Boeck. (2017). *Performance optimization of capacitively compensated directional couplers*, 47, European Microwave Conference (EuMC), 408-411. <http://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8230876>.
- [30] M. Hammad Akhtar, M. Ayaz Zakir, Hammad M. Cheema. (2019). *Weakly coupled directional coupler with simultaneous wide bandwidth and high directivity*, Microwave and Optical Technology Letters, 2019.
- [31] W. Zhang and G. Wang. (2020). *Design of High-Directivity Directional Couplers With 2-bit Fragment-type Structure* 2020. IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), 1-3, <http://doi.org/10.1109/NEMO49486.2020.9343552>
- [32] B. G. Liu, Y. P. Lyu, Y. J. Zhou, L. Zhu and C. H. Cheng. (2020). *Miniaturized 3-dB Quadrature Coupler*

with Hybrid Elements using Multilayer Substrates, IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2020, pp. 1-3, <http://doi.org/10.1109/IWS49314.2020.9360142>

[33] Somkuan Srisawat and Niwat Angkawisittpan. (2019). *A Design of Microstrip Branch-Line Coupler with Bandstop Filter Based on SITLs Compensated Parallel Coupled Lines*. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 19(4), 139-148.

[34] Sonasang, S. and R. Phromlounsri. (2018). *Improvement of microstrip band pass filter harmonic spurious suppression performance using band stop filter feed lines*. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 8(Special Issue), 239-246.

[35] Nuanon, A, Angkawisittpan, N, Photong, C, Siritaratiwat. (2015). *A. Detection of Water Adulteration in Honey Using Coaxial Capacitor Sensor*. *SWN Engineering Journal (2015)*, 10(2), 9- 18.