

# การลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริปความถี่ย่านไมโครเวฟ

## Crosstalk Reduction in Microwave Microstrip Transmission Line

จักรพนธ์ อบมา\*<sup>1</sup> นีวัตร อังควิษฐพันธ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยาเขตขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

<sup>2</sup>หน่วยปฏิบัติการวิจัยแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงคำนวณและระบบเชิงแสง คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

Jagrathon Obma\*<sup>1</sup> Niwat Angkawisitpan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering ,Rajamangala University of Technology

Khonkaen Campus ,Moung, Khonkaen 40000

<sup>2</sup>Research Unit for Computational Electromagnetics and Optical Systems (CEMOS)

Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Maha sarakham 44150

Tel : 0-4333-6370-1 Ext. 3330 \*E-mail: Jagrathon.ob@rmuti.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการแก้ปัญหาในระบบสายส่งแบบไมโครสตริป ที่เกิดการรบกวนในสายส่งขึ้นตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไปที่เรียกว่า สัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) อธิบายถึงความรู้เบื้องต้นของโครงสร้างสายส่งไมโครสตริปแบบเดี่ยวและแบบคู่ขนาน งานวิจัยและเทคนิคในการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริป 8 เทคนิค ว่ามีความแตกต่างของแต่ละโครงสร้างแต่ละวิธีอย่างไรตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ข้อดี-ข้อเสียของแต่ละวิธี การนำมาประยุกต์ใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์วงจรมิโครเวฟ ที่ต้องใช้การทำงานของสายส่งไมโครสตริปเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

**คำหลัก** สายส่งแบบไมโครสตริป สัญญาณแทรกข้าม, สัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะไกล สัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะใกล้ ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้าม

### Abstract

This paper proposes solutions to solve the interference in microstrip transmission lines that is called crosstalk. When more than two lines are used in signal transmission, the crosstalk probably occurs between these transmission lines and interferes to each other. The structure of single and parallel

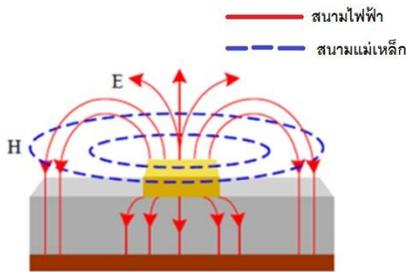
microstrip transmission lines are derived, and eight techniques are applied to reduce the crosstalk. The results are summarized by comparing the advantages and disadvantages of each technique and each structure for application in electronic circuits and microwave circuits. In addition, it can be further used for the development of microwave microstrip transmission line to enhance the efficiency and to reduce the crosstalk.

**Keywords:** microstrip line , crosstalk, Far-End crosstalk (FEXT), Near-End crosstalk (NEXT) , crosstalk coefficient

### 1. บทนำ

สายส่งแบบไมโครสตริป [1-3] เป็นสายส่งสัญญาณที่มีโครงสร้างระนาบ (planar structure) ที่นำมาสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board:PCB) [3] โดยนำมาใช้เชื่อมโยงส่วนต่างๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในวงจรมิโครเวฟความถี่สูง คุณลักษณะของสายส่งแบบไมโครสตริปเมื่อทำการจ่ายพลังงานเข้าไปทางสายส่ง พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านชั้นสเตรท บริเวณที่อยู่ระหว่างสายส่งไมโครสตริปกับระนาบกราวด์ เป็นเส้นทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปไม่ได้โดยเฉพาะ

ภายในวัสดุฐานรองดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นรูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งไมโครสตริปไม่ใช่รูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าตัดตามขวางแท้ (TEM Mode) แต่จะเป็นรูปแบบการแพร่กระจายคล้ายรูปแบบ TEM (Quasi-TEM Mode)



รูปที่ 1 แบบรูปการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

การพัฒนา รูปแบบของวงจรไมโครเวฟที่ใช้การออกแบบสายส่งแบบไมโครสตริปนั้นมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น ปัญหาหนึ่งที่พบคือในการออกแบบสายส่งแบบไมโครสตริปตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไปคือ สัญญาณแทรกข้าม (crosstalk) [4] รูปที่ 2 เป็นการวางสายส่งขนานกัน โดยมีระยะห่างระหว่างทั้งสองน้อยกว่าความยาวคลื่น ทำให้สัดส่วนของกำลังงานจากเส้นหนึ่งส่งผ่าน เกิดการรั่วไหลของกำลังงานมีผลกระทบต่อสายส่งไมโครสตริปอีกเส้นหนึ่ง เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้เกิดอุปสรรคในการออกแบบระบบสื่อสารที่ต้องใช้สายส่งแบบไมโครสตริปส่งผ่านพลังงานแบบไม่เต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 2 ลักษณะสัญญาณแทรกข้าม [4]

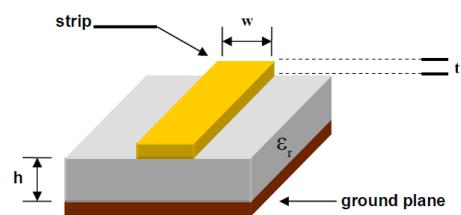
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการแก้ไขปัญหาเรื่องสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริปมีหลากหลาย อาจกล่าวไม่ได้ทั้งหมด จึงขอก้าวในเรื่องที่นักวิจัยมีความสนใจและนำมาเสนอเป็นบางโครงสร้าง โดยเป้าหมายเป็นการทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริป การพัฒนาโครงสร้างจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิคในการแก้ไขปัญหาที่แตกต่างกันไป

## 2. คุณสมบัติพื้นฐานเพื่อพิจารณาการแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริป

หลักการสำคัญในการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริป พื้นฐานสำคัญที่ผู้อ่านบทความควรเข้าใจคือ พื้นฐานโครงสร้างสายส่งแบบไมโครสตริป พารามิเตอร์แบบกระจาย (scattering parameter)

### 2.1 พื้นฐานโครงสร้างสายส่งแบบไมโครสตริป

โครงสร้างสายส่งแบบไมโครสตริปเป็นพื้นฐานของการออกแบบขนาดความกว้างของสายส่ง 1 เส้นบนวัสดุฐานรองตามความถี่ในย่านไมโครเวฟ ที่ต้องการใช้งานให้มีการจ่ายพลังงานได้สมบูรณ์แบบ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เหมาะสม การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในสายส่ง (characteristic impedance) รูปที่ 3 แสดงถึงโครงสร้างการออกแบบสายส่ง มีความกว้างของสายส่ง ( $w$ ) ความหนาของทองแดงทั้งส่วนบนกับส่วนล่าง ( $t$ ) และความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในสายส่งให้ได้ค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ปัจจัยของวัสดุฐานรองแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการออกแบบสายส่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (effective dielectric constant,  $\epsilon_{eff}$ ) ดังสมการที่ 2 นำมาแทนค่าในสมการที่ 1 เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในสายส่ง [5]



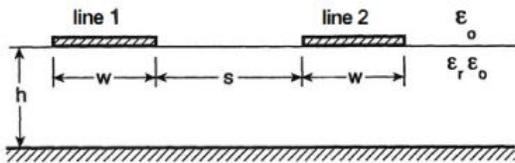
รูปที่ 3 มุมมองสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป [5]

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1.444 \right) \right]} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\left(\frac{1}{2}\right)} \quad \text{เมื่อ } \frac{w}{h} \geq 1 \quad (2)$$

แต่เนื่องจากสายส่งแบบไมโครสตริป 2 เส้นขึ้นไป ดังรูปที่ 4 มีองค์ประกอบของค่า S คือระยะห่างระหว่างสายส่งแบบไมโครสตริปที่น้อยกว่าความยาวคลื่น ทำให้มี

ผลต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสายส่งและสัญญาณส่งผ่านที่เกิดขึ้นในสายส่งทั้งสองเส้นนี้ สมการที่ 3 คือการพิจารณาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในสายส่ง สมการที่ 4 คือการวิเคราะห์ค่าคงที่ได้ิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลค่า  $k$  ในสมการที่ 5, 6 และ 7 คือสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (coupling coefficient) โดยที่  $K(k)$  และ  $K(k')$  ในทุกสมการเป็นส่วนประกอบของฟังก์ชันอีลิปติก (elliptic function) [6-7]



$$Z_0 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{K(k)}{K(k')} \quad (3)$$

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k')K(k_1)}{K(k)K(k'_1)} \quad (4)$$

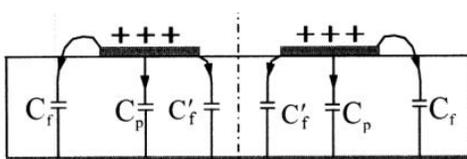
$$k = \frac{s}{2w + s} \quad (5)$$

$$k' = \sqrt{1.0 - k^2} \quad (6)$$

$$k'_1 = \sqrt{1.0 - k_1^2} \quad (7)$$

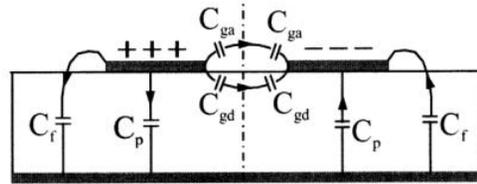
พิจารณาการส่งสัญญาณผ่าน ในสายส่งไมโครสตริปแบบสมมาตร 2 รูปแบบ [6-7] คือโหมดคู่ (even mode) เป็นการส่งสัญญาณไปในทิศทางเดียวกันชั่วเดียวกัน ทำให้สนามไฟฟ้าวิ่งลงสู่ตัวรองฐานลงกราวด์อย่างสม่ำเสมอเกิดเป็นกำแพงสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 5 (ก) ส่วนโหมดคี่ (odd mode) เป็นการส่งสัญญาณในทิศตรงกันข้ามคนละชั่ว ทำให้สนามไฟฟ้าบางส่วนวิ่งเข้าหากันในบริเวณสายส่งอยู่ใกล้กันเกิดเป็นกำแพงสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 (ข)

Magnetic wall



รูปที่ 5 (ก) สัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริปแบบโหมดคู่ [9]

Electric wall



รูปที่ 5 (ข) สัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริปแบบโหมดคี่ [9]

จากคุณสมบัติของสัญญาณแทรกข้ามรูปแบบโหมดคู่และโหมดคี่ สามารถนำมาวิเคราะห์สมการเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในสายส่งไมโครสตริป 2 เส้นแบบสมมาตร ดังสมการที่ 8, 9 และสัมประสิทธิ์การคัปปลิง ดังสมการที่ 10, 11, 12, 13

$$Z_{0(even)} = \frac{30\pi}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \frac{K(k'_{0(even)})}{K(k_{(even)})} \quad (8)$$

$$Z_{0(odd)} = \frac{30\pi}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \frac{K(k'_{0(odd)})}{K(k_{(odd)})} \quad (9)$$

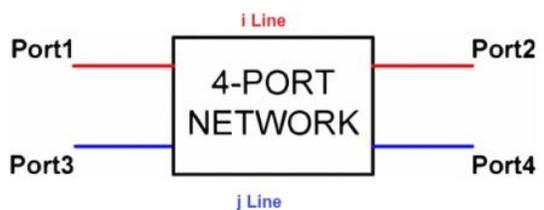
$$k_{(even)} = \tanh \left[ \frac{\pi w}{4 h} \right] \tanh \left[ \frac{\pi w + s}{4 h} \right] \quad (10)$$

$$k_{(even)}^2 = 1 - k_{even}^2 \quad (11)$$

$$k_{(odd)} = \tanh \left[ \frac{\pi w}{4 h} \right] \coth \left[ \frac{\pi w + s}{4 h} \right] \quad (12)$$

$$k_{(odd)}^2 = 1 - k_{odd}^2 \quad (13)$$

2.2 พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ช่วยงานสื่อสารแบบสี่ช่องทาง [9]

การวิเคราะห์ในเรื่องพารามิเตอร์แบบกระจายโดย รูปที่ 6 แสดงถึงการวิเคราะห์ข่ายงานสี่สารแบบสี่ช่องทาง (4-port network) เป็นการคำนวณหาพารามิเตอร์แบบอิมพีแดนซ์ ในเทอมของความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ช่องทางที่ 1 และช่องทางที่ 2 ที่มีสัญญาณแทรกข้ามมายังช่องทางที่ 3 และช่องทางที่ 4 [9]

พารามิเตอร์แบบกระจายที่มีความสัมพันธ์ต่อการพิจารณาลักษณะสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริป เช่น  $S_{11}$   $S_{21}$   $S_{31}$  และ  $S_{41}$  [1]

$S_{11}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficients) ของช่องทางที่ 1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาถึงปริมาณของกำลังงานที่สะท้อนกลับจากช่องทางที่ 2 ของแต่ละความถี่ที่สะท้อนกลับมาช่องทางที่ 1

$S_{21}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (forward transmission coefficients) ของช่องทางที่ 2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาถึงปริมาณของกำลังงานที่ส่งผ่านจากช่องทางที่ 1 ไปยังช่องทางที่ 2

$S_{31}$  คือสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะใกล้ (NEXT) จากช่องทางที่ 1 แทรกข้ามถึงช่องทางที่ 3 ของแต่ละความถี่

$S_{41}$  เรียกว่า สัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะไกล (FEXT) จากช่องทางที่ 1 ที่แทรกข้ามถึงช่องทางที่ 4 ของแต่ละความถี่

โดยสมการเพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เกิดขึ้นในสายส่งแบบไมโครสตริป นำมาวิเคราะห์ทั้ง 4 ช่องดังสมการที่ 14

$$S_{ij} = 20 \log \left( \frac{V_i}{V_j} \right) \quad (14)$$

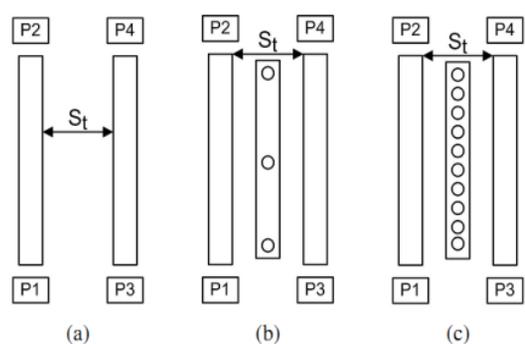
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริปมีการแสดงผล  $S_{11}$   $S_{21}$   $S_{31}$  และ  $S_{41}$  มีหน่วยเป็น เดซิเบล (dB) เพื่อบอกคุณภาพของสัญญาณในช่องทางที่ 1 และ 2 และสัญญาณแทรกข้ามที่เกิดขึ้นในช่องทางที่ 3 และ 4

### 3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริปความถี่ย่านไมโครเวฟ

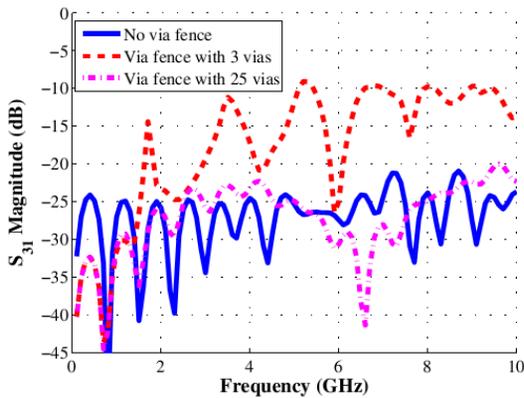
นักวิจัยบางกลุ่มมีความสนใจในเรื่องการแก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริป ส่วนมากจะนำไปใช้แก้ปัญหาในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลายวงจรใกล้เคียง วงจรกรองความถี่ วงจรเครื่องส่งเครื่องรับ หรือแม้กระทั่งสายอากาศ ในบทความนี้นำเสนอการลดสัญญาณแทรกข้ามในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 3.1 การใช้แนวกันแบบเจาะรูเพื่อแก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกข้ามในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ปี 2006 Asanee Suntuives และคณะ [11] เป็นคณะวิจัยที่มีความสนใจเรื่องของสัญญาณแทรกข้ามในแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้แนวกันระหว่างสายส่งแบบเจาะรู (via fences) ทำการออกแบบสายส่ง 2 เส้นให้มีค่าคุณลักษณะในสายส่งเท่ากับ 50 โอห์ม ขนาดความกว้างของแต่ละสายส่ง 3 มิลลิเมตร วัสดุรองฐาน FR4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 โดยออกแบบเพื่อทดลอง 3 รูปแบบ คือแบบที่ 1 ให้ระยะห่างระหว่างสายส่งตั้งแต่ 0.5 – 4 มิลลิเมตร ระยะที่ดีที่สุดคือ 0.5 มิลลิเมตร โดยไม่มีแนวกันระหว่างสายส่งแบบเจาะรู ดังรูปที่ 7(a) แบบที่ 2 มีแนวกันระหว่างสายส่งแบบเจาะรู 3 รู ดังรูปที่ 7(b) และแบบที่ 3 มีแนวกันระหว่างสายส่งแบบเจาะรู 25 รู ดังรูปที่ 7(c) และมีรัศมีของรู 0.762 มิลลิเมตร



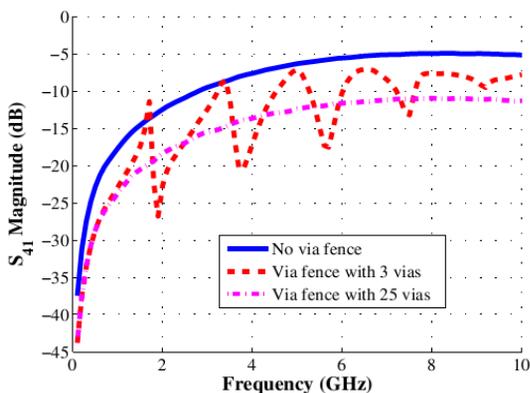
รูปที่ 7 (a) สายส่งที่มีแต่ระยะห่างไม่มีแนวกัน [11]  
 (b) สายส่งที่มีแนวกันระหว่างสายส่งแบบเจาะรู 3 รู [11]  
 (c) สายส่งที่มีแนวกันระหว่างสายส่งแบบเจาะรู 25 รู [11]



รูปที่ 8 ผลจากการบ่อนพลังงานจากช่องที่ 1 ที่มีผลต่อช่องที่ 3 ทั้ง 3 รูปแบบ [11]

ทำการจำลองทั้ง 3 แบบโดยมีการจ่ายพลังงานในช่องที่ 1 เพื่อสังเกตคุณลักษณะค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 3 และ 4 ตั้งแต่ความถี่ 0 – 10 GHz เห็นได้ว่าผลการทดลอง เมื่อนำแนวกั้นระหว่างสายส่ง 3 รู กับ 25 รู ช่องที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้าม  $S_{31}$  ดังรูปที่ 8 ลดลงในบางความถี่ไม่สม่ำเสมอทั้ง 3 รู และ 25 รู

ต่อมาในช่องที่ 4 เมื่อนำแนวกั้นระหว่างสายส่ง 3 รู มาใช้งานผลของค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้าม  $S_{41}$  ลดลงในบางความถี่ และถ้าเป็นแนวกั้นระหว่างสายส่ง 25 รู ผลของค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้าม  $S_{41}$  ลดลงตลอดย่านความถี่สม่ำเสมอเฉลี่ย -5 dB ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลจากการบ่อนพลังงานจากช่องที่ 1 ที่มีผลต่อช่องที่ 4 ทั้ง 3 รูปแบบ [11]

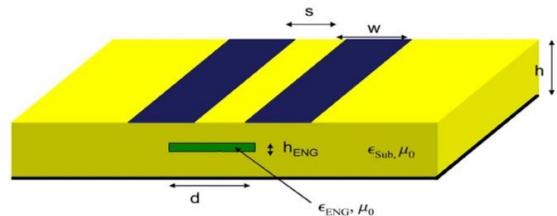
จากข้อสังเกตในงานวิจัยนี้สิ่งที่มีผลต่อการลดสัญญาณแทรกข้ามมากที่สุดคือแนวกั้นระหว่างสายส่ง และการเจาะรูมากยิ่งขึ้นเพิ่มประสิทธิภาพในการลดสัญญาณ

แทรกข้ามในสายส่ง แต่ยังมีข้อจำกัดของระยะห่างที่ต้องให้พื้นที่แนวกั้น ทำให้การพัฒนาให้สายส่งทั้งสองเส้นให้อยู่ชิดกันมีความลำบากมากยิ่งขึ้น

### 3.2 แบบจำลองประสิทธิภาพของสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายส่งไมโครสตริป 2 เส้นโดยใช้ฉนวนผสมผสาน

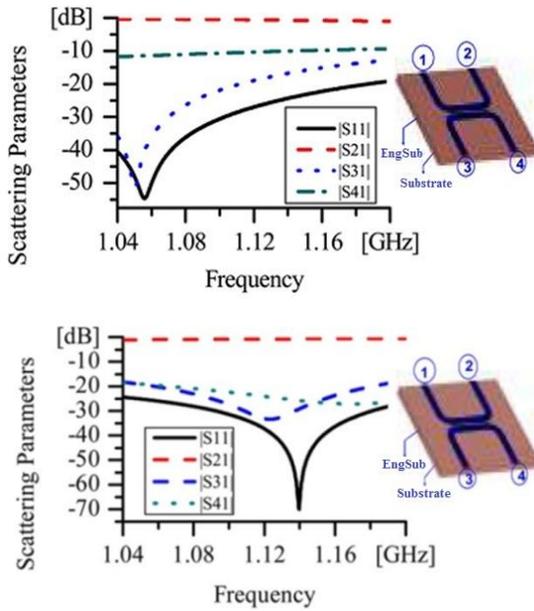
ปี 2008 Filiberto Bilotti และคณะ [12] เป็นกลุ่มวิจัยที่มีความสนใจในด้านระบบสื่อสาร วงจรกรองความถี่ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และวัสดุศาสตร์ โดยการนำฉนวน (metamaterial) [13-15] เข้ามาผสมผสานในการใช้งานเพื่อนำมาแก้ไขปัญหาสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริป

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบจำลอง สายส่งไมโครสตริป โดยกำหนดวัสดุฐานรองที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_{sub}$ ) เท่ากับ 8.9 ความกว้างของสายส่งไมโครสตริปทั้ง 2 เส้น ( $w$ ) เท่ากับ 9.8 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างสายส่ง ( $s$ ) เท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร และทำการจำลองอภิวัดที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_{ENG}$ ) ให้แทรกอยู่ตรงกลางวัสดุรองฐานมีขนาดความสูง ( $h_{ENG}$ ) เท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความกว้าง ( $d$ ) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกติดลบ ดังรูปที่ 10



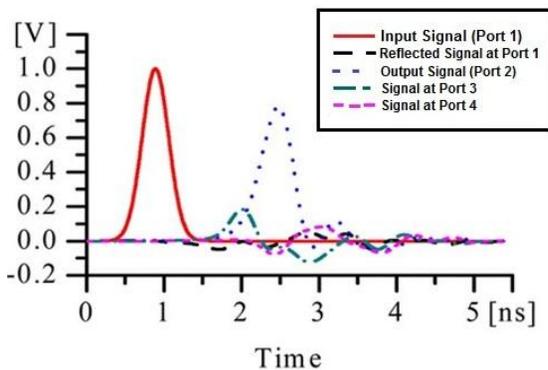
รูปที่ 10 รูปการออกแบบจำลองสายส่งไมโครสตริปที่ใช้ฉนวนผสมผสาน [12]

โดยผลการจำลองมีการจ่ายพลังงานในช่องที่ 1 เพื่อสังเกตคุณลักษณะค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 3 และ 4 ในย่านความถี่ 1.04 – 1.16 GHz เปรียบเทียบผลการทดลองที่ยังไม่ใช้งานอภิวัดดังรูปที่ 11 และใช้งานอภิวัดดังรูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 3 และช่องที่ 4 ลดลงมากกว่า -10 dB แต่เป็นการทำงานที่ดีที่สุดแต่อยู่ในช่วงความถี่แคบมากๆ โดยได้สังเกตพฤติกรรมของ Gaussian pulse ทางด้านเข้า  $S_{11}$  ที่มีมากที่สุดในช่วงเวลาดังกล่าวตามรูปที่ 13



รูปที่ 12 ผลการจำลองสายส่งไมโครสตริปที่ใช้  
อภิวัดมาผสมผสาน [12]

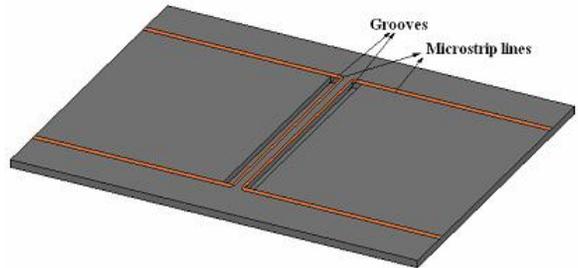
อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้การที่จะนำอภิวัดเข้ามาใช้  
งานยังเป็นแนวคิดที่ดี แต่ยังมีอุปสรรคในด้านการนำมา  
สร้างจริงแล้วนำมาทดลอง เพราะอภิวัดมีค่าคงตัวได้อิ  
เล็กตริกที่ค่าติดลบไม่มีในธรรมชาติ ทำให้ต้องมีการ  
สังเคราะห์วัสดุขึ้น ซึ่งการแก้ไขปัญหาค่าคงตัว  
ในสายส่งแบบไมโครสตริปโดยใช้อภิวัดยังคงต้องพัฒนา  
ให้มีประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 13 พฤติกรรมของ Gaussian pulse ที่เกิดขึ้นในเวลา  
ดังกล่าวในช่วงความถี่ (0-2 GHz) [12]

### 3.3 การพัฒนาคุณลักษณะของสายส่งแบบขนาห โดยวิธีเซาะร่องวัสดุรองฐาน

ปี 2008 M.Moradian และคณะ [16] หนึ่งใน  
คณะวิจัยที่มีความสนใจทางด้านสายส่งไมโครสตริปโดย  
การแก้ไขปัญหาค่าคงตัวค่าคงตัวค่าคงตัวค่าคงตัวค่าคงตัว  
เซาะร่องวัสดุรองฐานดังรูปที่ 14 การออกแบบสายส่งให้มี  
ค่าคุณลักษณะในสายส่งเท่ากับ 50 โอห์มโดยพิจารณา  
จากสายไมโครสตริปแบบสมมาตรโหมดคู่ ( $Z_{0e}$ ) และ  
โหมดคี่ ( $Z_{0o}$ ) นำค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง ( $k$ ) มีคิ  
ดรวมดังสมการที่ 15 และ 16 โดยขนาดความกว้างสายส่ง  
1 มม. ความยาวสายส่ง 41.2 มม. ระยะห่างระหว่างสายส่ง  
1 มม. ทำการเซาะร่องด้านข้าง 2 ด้านมีความกว้างด้าน  
ละ 2 มม.



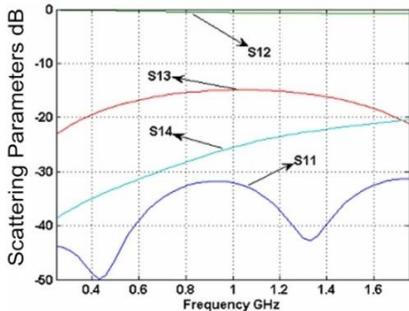
รูปที่ 14 แบบจำลองสายส่งไมโครสตริป  
ที่ทำการเซาะร่องวัสดุรองฐานรอง [16]

$$\begin{cases} Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \\ Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \end{cases} \quad (15)$$

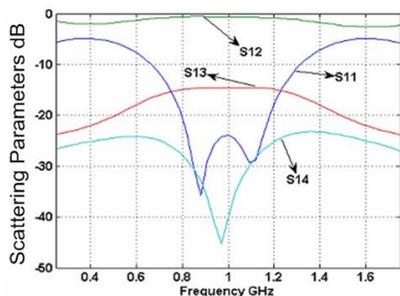
$$k = 10^{\frac{C}{20}} \quad (16)$$

โดยผลการจำลองมีการจ่ายพลังงานในช่องที่ 1 เพื่อ  
สังเกตคุณลักษณะค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามใน  
ช่องที่ 3 และ 4 ย่านความถี่ 0.40 – 1.60 GHz เพื่อ  
เปรียบเทียบผลการทดลองที่ยังไม่มีการเซาะร่องวัสดุ  
รองฐานดังรูปที่ 15 และมีการเซาะร่องวัสดุรองฐานดังรูป  
ที่ 16  $S_{13}$  มีค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามลดลง 5  
dB ตั้งแต่ความถี่ 0.2-0.5 GHz และ 1.4-1.7 GHz ต่อมา  
 $S_{14}$  มีค่าลดลง 13-15 dB ในช่วงความถี่ 0.98 - 1 GHz

จากการเปลี่ยนแปลงต้องที่ทำการเซาะร่องวัสดุฐานรองค่า  $S_{13}$  และ  $S_{14}$  มีการย้อนกลับไปที่ค่า  $S_{11}$  ลดลงถึง 15 dB ช่องแถบความถี่ที่กว้างขึ้น แต่  $S_{12}$  มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากหลังจากเซาะร่องบนวัสดุรองฐาน ซึ่งผลดังกล่าวเมื่อนำมาทำเป็นของจริง จะมีอุปสรรคในการเซาะร่องเพราะสายส่งมีขนาดเล็กถ้าเซาะร่องผิดพลาด มีผลต่อสัญญาณแทรกข้ามในสายส่ง



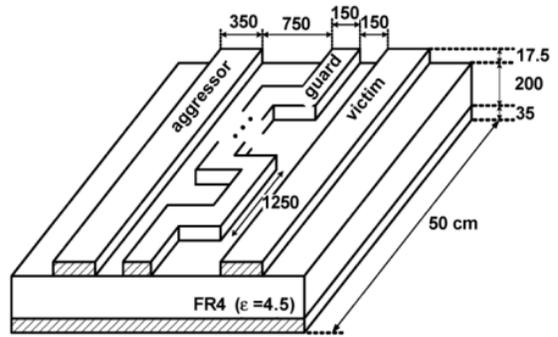
รูปที่ 15 ผลการจำลองสายส่งไมโครสตริปที่ไม่ได้เซาะร่องวัสดุรองฐาน [16]



รูปที่ 16 ผลการจำลองสายส่งไมโครสตริปที่ทำการเซาะร่องวัสดุรองฐาน [16]

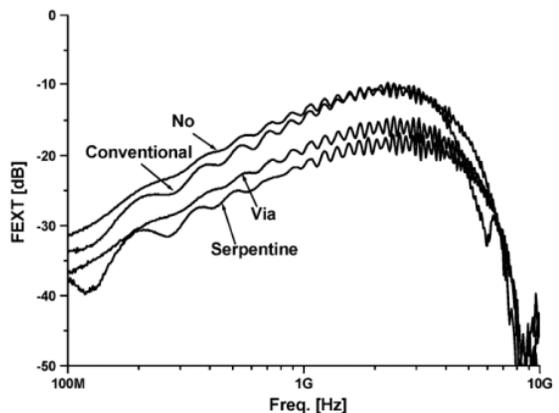
### 3.4 แนวกันแบบคดเคี้ยวสำหรับการลดสัญญาณแรงดันแทรกข้ามสนามระยะไกลและการลดสัญญาณแทรกข้าม จังหวะกระเพื่อมของสายส่งไมโครสตริปแบบคู่

ปี 2008 Kyoungho Lee [17] ได้มีความสนใจงานวิจัยเรื่องแนวกันเพื่อลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่ง โดยทำการวิจัย 4 รูปแบบคือ แบบไม่มีแนวกัน[20] แบบมีแนวกันสายส่ง แนวกันแบบเจาะรู [11] และแนวกันแบบคดเคี้ยวดังรูปที่ 17 โดยมีแนวคิดเปรียบเสมือนการเพิ่มค่าการเก็บประจุของแนวกันในแต่ละรูปแบบ การเปรียบเทียบทั้ง 4 รูปแบบมีการจ่ายพลังงานที่ช่องที่ 1 เพื่อสังเกตผลที่สัญญาณแทรกข้ามสนามระยะไกล  $S_{41}$  ที่ย่านความถี่ 100MHz – 10GHz



รูปที่ 17 สายส่งไมโครสตริปแบบขนานที่มีแนวกันแบบคดเคี้ยว มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร [17]

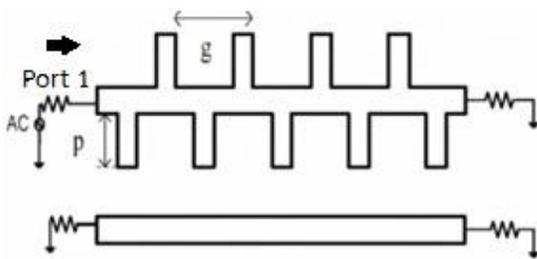
ผลที่ได้จากการทดลองเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามมาเปรียบเทียบทั้งแบบไม่มีแนวกันแบบมีแนวกัน แนวกันแบบเจาะรู และแนวกันแบบคดเคี้ยว ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้าม จะลดลงตามลำดับ โดยรูปแบบของแนวกันแบบคดเคี้ยว ลดลงตลอดทั้งย่านความถี่ประมาณ -10 dB ดังรูปที่ 18 งานวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นภาพการพัฒนาทั้ง 4 รูปแบบของประสิทธิภาพการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งที่ดีขึ้นตามลำดับ แต่สิ่งที่ควรพัฒนาต่อไปคือ เมื่อต้องการให้สายส่งอยู่ใกล้กันมากยิ่งขึ้นความจำเป็นของแนวกันรูปแบบต่างๆ จะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้เพราะทำให้สูญเสียพื้นที่ระหว่างกลางส่วนหนึ่งไป



รูปที่ 18 ผลการจำลองสายส่งไมโครสตริปแบบคู่ขนานทั้ง 4 แบบ [17]

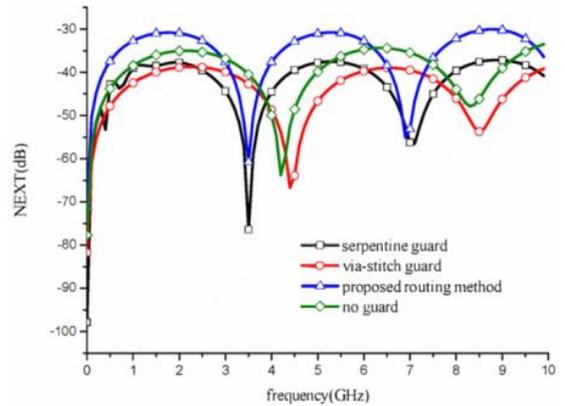
### 3.5 การวิจัยในเรื่องการลดสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายส่งไมโครสตริปบนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง

ปี 2010 Huan-Huan Li และคณะ [18] ได้ทำการวิจัยประสิทธิภาพของการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริปบนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง โดยออกแบบแล้วนำมาเปรียบเทียบด้วยกัน 4 รูปแบบคือแบบไม่มีแนวกัน แบบแนวกันคดเคี้ยว [17] แบบแนวกันเจาะรู และแบบวิธีสายส่งแบบปลายเปิด ดังรูปที่ 19 แล้วนำจำลองโดยจ่ายพลังงานเข้าช่องที่ 1 เพื่อพิจารณาสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะไกลและ สัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะใกล้ทั้ง 4 รูปแบบ โดยมีระยะความยาวของปลายเปิด (p) และระยะห่างระหว่างปลายเปิด (g)

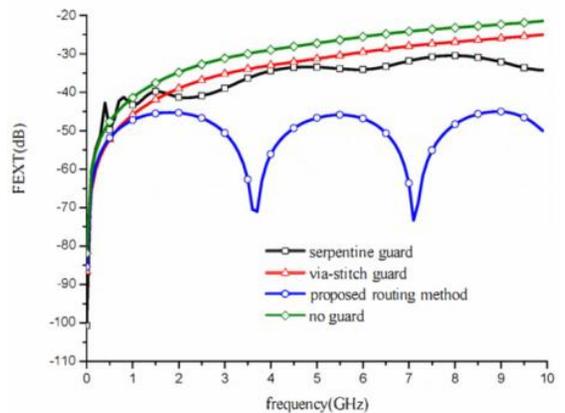


รูปที่ 19 สายส่งไมโครสตริปแบบวิธีสายส่งแบบปลายเปิด [18]

โดยผลการทดลองทั้ง 4 แบบ ทำการจำลองโครงสร้างความถี่สูง (HFSS) ผลที่ได้ในสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะไกล ตั้งแต่ไม่มีแนวกัน แนวกันเจาะรู แนวกันคดเคี้ยวและ แบบวิธีสายส่งแบบปลายเปิด เรียงตามลำดับ มีความเปลี่ยนแปลงที่ดีมากกว่าร้อยละ 40 แต่ในทางตรงกันข้าม ผลที่ได้ในสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะใกล้ กลับลดลงร้อยละ 5 เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 4 กรณีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป โดย 3 วิธีแรกมีผลดีต่อสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะใกล้ ดังรูปที่ 20 แต่ในสัญญาณแทรกข้ามสนามระยะไกลผลการทดลองมีทิศทางที่ดีขึ้นตามลำดับ แต่เนื่องด้วยโครงสร้างแบบวิธีสายส่งแบบปลายเปิดทำให้สูญเสียพื้นที่ของวัสดุฐานมากขึ้นแล้วด้านสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะใกล้ไม่ดีขึ้น ดังรูปที่ 21 ทำให้โครงสร้างนี้ไม่เกิดความสมดุลในการนำไปใช้งาน



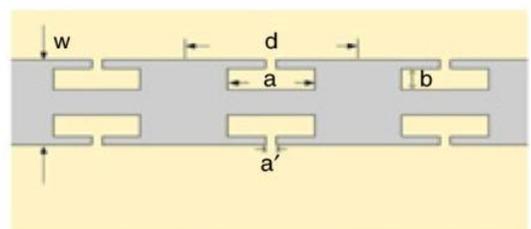
รูปที่ 20 ผลการทดลองสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะใกล้ทั้ง 4 รูปแบบ [18]



รูปที่ 21 ผลการทดลองสัญญาณแทรกข้ามของสนามระยะไกลทั้ง 4 รูปแบบ [18]

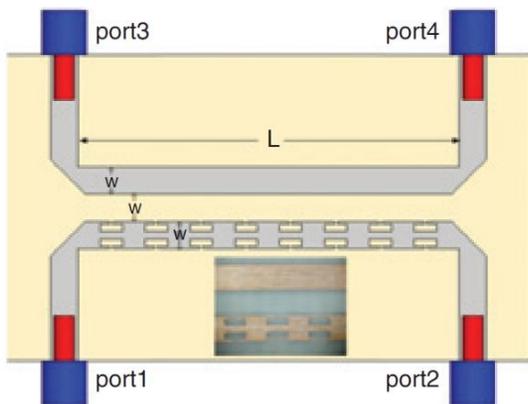
### 3.6 การลดสัญญาณแทรกข้ามระหว่างโลหะสายส่งด้วยโครงสร้างการย่นระยะห่างความยาวคลื่น

ปี 2010 J.J. WU และคณะ [19] ทำการวิจัยในเรื่องสายส่งไมโครสตริปความถี่สูง วิธีที่คณะนี้นำเสนอคือโครงสร้างการย่นระยะห่างความยาวคลื่นที่โลหะสายส่งเป็นรูปตัวที ดังรูปที่ 22 โดยระยะความกว้างคือ a ระยะความสูงคือ b มีระยะห่างของแต่ละโครงสร้างตัวทีคือ d และส่วนความกว้างของสายส่งคือ w

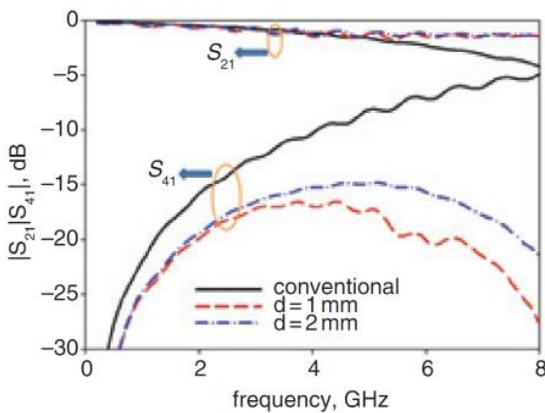


รูปที่ 22 โครงสร้างการย่นระยะห่างความยาวคลื่นเป็นรูปตัวที [19]

เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างระหว่างโลหะเป็นรูปตัวที่เรียบร้อยแล้ว นำมาประยุกต์ใช้งานกับสายส่งไมโครสตริปด้านสายส่ง ช่องที่ 1 และ ช่องที่ 2 ดังรูปที่ 23 โดยมีการทดลองระยะห่างของโครงสร้าง 2 ระยะคือ  $d = 1$  มม. และ  $d = 2$  มม. จ่ายพลังงานผ่านช่องที่ 1 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามของช่องที่ 2 และช่องที่ 4 ย่านความถี่ระหว่าง 0 – 8 GHz



รูปที่ 23 สายส่งที่นำโครงสร้างการย่นระยะห่างความยาวคลื่นเป็นรูปตัวที่บนโลหะสายส่งมาใช้งาน [19]



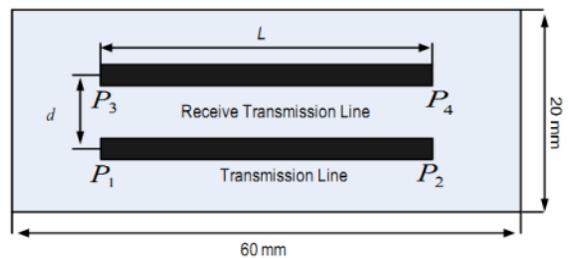
รูปที่ 24 ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 2 และช่องที่ 4 [19]

โดยผลการทดลองดังรูปที่ 24 เมื่อสังเกตค่า  $S_{21}$  ที่ให้ค่า  $d = 1$  มม. และ  $d = 2$  มม. ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเข้าใกล้ 0 dB แสดงถึงพลังงานที่ส่งผ่านมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ต่อมาสังเกตค่า  $S_{41}$  ที่ให้ค่า  $d = 1$  มม. และ  $d = 2$  มม. ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามลดลงถึงร้อยละ 50

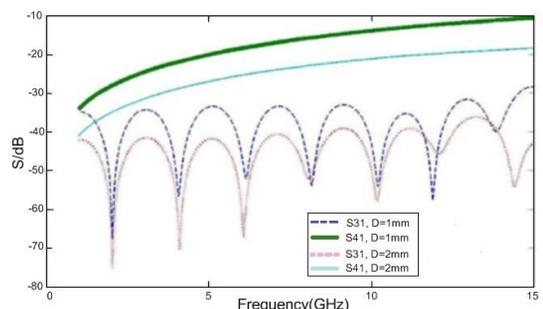
ประสิทธิภาพในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่องที่ 2 คือ  $S_{21}$  และสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 4 คือ  $S_{41}$  ไม่ได้กล่าวถึงสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 3 คือ  $S_{31}$  จึงไม่ทราบถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงทั้งระบบ และการทำโครงสร้างต้องทำการเซาะบนโลหะที่มีความแคบทำให้มีอุปสรรคในการสร้างของจริง แต่เป็นงานวิจัยที่มีความน่าสนใจและสามารถต่อยอดกับโครงสร้างอื่นได้เพราะสามารถนำสายส่งชนิดเข้ามาได้โดยไม่ต้องมีแนวกันให้เสียพื้นที่วัสดุรองรับ

### 3.7 คุณลักษณะของสัญญาณแทรกข้ามระหว่างระยะห่างสายส่งไมโครสตริปแบบคู่ขนานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ปี 2011 Xin Wang และคณะ [20] ได้เสนองานวิจัยเรื่องคุณลักษณะของสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบคู่ขนานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สังเกตว่าระยะห่างของสายส่งมีผลต่อสัญญาณแทรกข้าม ดังรูปที่ 25 โดยทำการทดลองจากระยะห่างระหว่างสายส่งแบบคู่ขนาน 2 ระยะคือ  $d = 1$  มม. และ  $d = 2$  มม. มีความยาวของสายส่ง  $L = 30$  มม. ทำการจ่ายพลังงานในช่องที่ 1 เพื่อสังเกตผลของค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามใน  $S_{31}$  และ  $S_{41}$  ย่านความถี่ 0 – 15 GHz



รูปที่ 25 ขนาดสายส่งไมโครสตริปแบบคู่ขนาน [20]



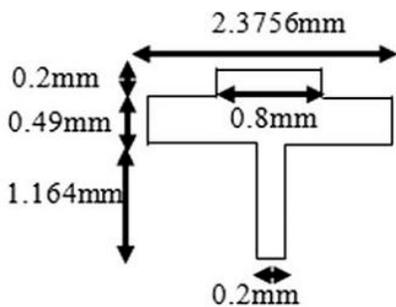
รูปที่ 26 ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 3 และ 4 [20]

สิ่งที่เกิดขึ้นในผลการทดลองคือระยะห่างระหว่างสายส่งมีผลต่อสัญญาณแทรกข้าม เมื่อมีระยะห่างมากขึ้น ประสิทธิภาพการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริปแบบขนานมีมากขึ้น สังเกตจากรูปที่ 26 เห็นความชัดเจนโดยการขยายระยะระหว่างสายส่งไมโครสตริปแบบคู่ขนาน ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้าม  $S_{31}$  และ  $S_{41}$  ลดลงมากกว่า -30 dB ทั้ง 2 ระยะ

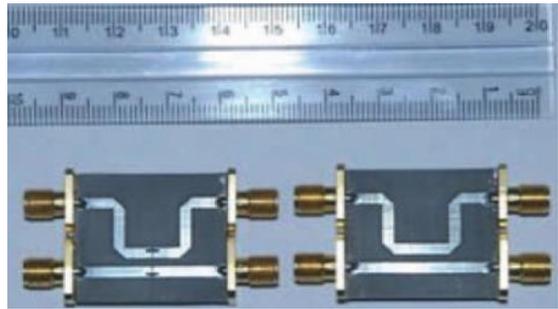
งานวิจัยนี้เป็นงานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายรูปแบบ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างสายส่งไมโครสตริป ทำให้สูญเสียพื้นที่วัสดุทองฐานมากยิ่งขึ้น จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาให้สายส่งอยู่ใกล้กัน เพราะวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ครอบคลุมวง และวงจรระบบสื่อสารสมัยใหม่ต้องการที่ให้อุปกรณ์เล็กลง งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางที่ดีในการพัฒนาต่อไป

**3.8 วิธีแบบใหม่สำหรับการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริปแบบคู่ขนาน**

ปี 2011 Morteza Kazerooni และคณะ [21] เป็นคณะวิจัยล่าสุดที่ได้ทำการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดสัญญาณแทรกข้ามโดยสร้างรูปแบบตัวที่ [19] แล้วพัฒนาเป็นรูปไม้กางเขนโดยมีขนาดเล็กกระทัดรัด ดังรูปที่ 27 สามารถนำโครงสร้างนี้มาเจาะรอกับสายส่งได้ เมื่อนำโครงสร้างนี้มาประยุกต์ใช้งาน ออกแบบสายส่งให้มีค่าคุณลักษณะในสายส่ง 50 โอห์ม ขนาดสายส่ง 2 มม. มีระยะห่างระหว่างสายส่ง 1.67 มม.ทำการจ่ายพลังงานช่องที่ 1 เพื่อสังเกตค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามช่องที่ 3 และ 4 ในย่านความถี่ 0 – 10 GHz ทำการทดลอง 2 รูปแบบดังรูปที่ 28 คือ แบบไม่มีโครงสร้างไม้กางเขนกับแบบมีโครงสร้างไม้กางเขน เพื่อทำการเปรียบเทียบ

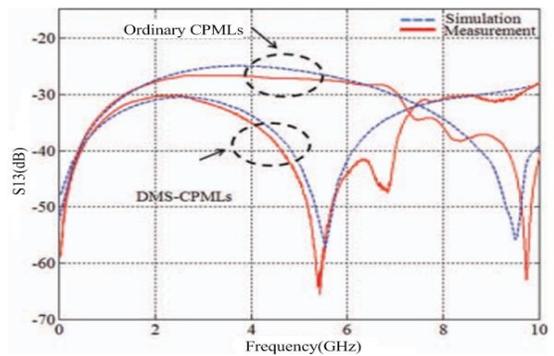


รูปที่ 27 โครงสร้างรูปแบบไม้กางเขน (DMS) [21]



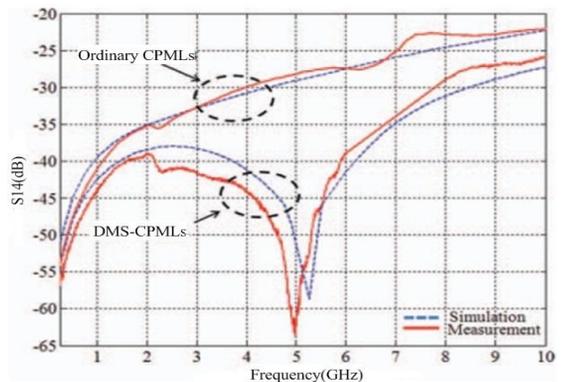
รูปที่ 28 สายส่งไมโครสตริปแบบคู่ขนานที่สร้างขึ้นแบบไม่มีโครงสร้างไม้กางเขน และมีโครงสร้างไม้กางเขน [21]

ผลการทดลองในช่องที่ 3 ดังรูปที่ 29 ค่า  $S_{31}$  จากการเปรียบเทียบ 2 รูปแบบ ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามเมื่อนำโครงสร้างไม้กางเขนมาใช้งานลดลงถึง -65 dB ที่ความถี่ 5.5 GHz



รูปที่ 29 ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 3 [21]

ต่อมาในช่องที่ 4 ดังรูปที่ 30 ค่า  $S_{41}$  จากการเปรียบเทียบ 2 รูปแบบ ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามเมื่อนำโครงสร้างไม้กางเขนมาใช้งานลดลงถึง -64 dB ที่ความถี่ 5 GHz



รูปที่ 30 ค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 4 [21]

สำหรับงานวิจัยนี้มีข้อสังเกตว่า ข้อได้เปรียบโครงสร้าง มีขนาดเล็ก ไม่ได้ทำโครงสร้างหลายอัน [19] เหมือนงานวิจัยอื่น สามารถพัฒนาให้สายส่งแคบลงได้ตามวงจรถที่ต้องการออกแบบ ไม่เสียพื้นที่ของวัสดุฐานรอง แต่มีผลถึงค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณแทรกข้ามที่ลดลงมาก แต่ได้เฉพาะแค่บางความถี่ไม่ตลอดย่าน แต่โดยรวมงานวิจัยนี้มีความน่าสนใจงานหนึ่งที่สามารถพัฒนาประสิทธิภาพให้โครงสร้างเล็กลงและลดสัญญาณแทรกข้ามตลอดย่านที่ต้องการ

#### 4. บทวิเคราะห์

จากการปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยในเรื่องของการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริปที่กล่าวมา 8 เทคนิค ได้แก่ แบบแนวกันเจาะรู อภิวัตต การเซาะร่องวัสดุฐานรอง แนวกันคดเคี้ยว สายส่งแบบปลายเปิด แบบรูปตัวที เซาะบนสายส่ง แบบระยะห่างของสายส่ง และแบบไม่กางเซนเซาะบนสายส่ง แต่ละโครงสร้างมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป จะเห็นได้ว่าทุกโครงสร้างทุกวิธีมุ่งเน้นไปทางการลดสัญญาณแทรกข้ามในช่องที่ 3 และช่องที่ 4 ทุกเทคนิคจำลองโครงสร้างให้เปรียบเสมือนค่าการเก็บประจุ เมื่อมีค่าการเก็บประจุมากเปรียบเสมือนการเพิ่มระยะห่างให้กับสายส่งไมโครสตริปทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งไมโครสตริป

โดยภาพรวมแล้วสรุปได้ 4 ประเด็นคือ ขนาดของโครงสร้าง ช่องที่สามารถลดสัญญาณแทรกข้ามได้ ประสิทธิภาพช่วงแถบความถี่ที่ลดสัญญาณแทรกข้าม การพัฒนาระยะห่างระหว่างสายส่งแบบขนาน นำมาเปรียบเทียบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงถึงคุณสมบัติของแต่ละเทคนิคในการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริป

เทคนิคที่ใช้งาน	ขนาดของโครงสร้าง	ช่องที่ลดสัญญาณแทรกข้ามได้	ประสิทธิภาพช่วงแถบความถี่ที่ลดสัญญาณแทรกข้าม	การพัฒนา ระยะห่างระหว่างสายส่งแบบขนาน
แนวกันเจาะรู	ใหญ่	S31-S41	กว้าง	ห่างกัน
อภิวัตต	เล็ก	S31-S41	แคบ	ชิดกัน
เซาะร่องวัสดุฐานรอง	ใหญ่	S31-S41	แคบ	ชิดกัน
แนวกันคดเคี้ยว	ใหญ่	S41	กว้าง	ห่างกัน
สายส่งแบบปลายเปิด	ใหญ่	S31-S41	กว้าง	ห่างกัน
ตัวที	เล็ก	S41	กว้าง	ชิดกัน
ระยะห่างสายส่ง	เล็ก	S31-S41	กว้าง	ห่างกัน
ไม่กางเซน	เล็ก	S31-S41	กว้าง	ชิดกัน

#### 5.บทสรุป

บทความนี้นำเสนอในเรื่องการลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริปย่านความถี่ไมโครเวฟเป็นการศึกษา 8 เทคนิคของแต่ละโครงสร้างว่ามีประสิทธิภาพในการลดสัญญาณแทรกข้ามมากน้อยเพียงใด โดยภาพรวมแล้วแต่ละเทคนิคจะมีความพิเศษ เช่น โครงสร้างแบบไม่กางเซน ที่สามารถทำให้ช่วงประสิทธิภาพการลดสัญญาณแทรกข้ามมีช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น แต่ทำให้สายส่งชิดกันมากขึ้นถึง 1.67 มม. ถือว่าเป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพอันหนึ่งจาก 8 เทคนิคที่กล่าวมา

ถึงอย่างไรก็ตามแต่ละวิธียังมีข้อจำกัดตามคุณลักษณะของแต่ละโครงสร้าง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ วัสดุฐานรอง ทั้งแบบความถี่ต่ำและความถี่สูง พื้นที่วัสดุฐานรอง ความชิดของสายส่งไมโครสตริป โดยเฉพาะวงจรถอเล็กทรอนิกส์ วงจรไมโครเวฟสมัยใหม่มีขนาดเล็ก ใช้ความถี่สูงขึ้น การออกแบบสายส่งไมโครสตริปจำเป็นต้องมีความชิดกันมากขึ้น เพื่อลดพื้นที่วัสดุฐาน เพิ่มสายส่งและลายวงจร นำมาประยุกต์ใช้งาน และพัฒนาโครงสร้าง วิธีการลดสัญญาณแทรกข้ามแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับการสนับสนุนการทำบทความวิชาการ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ เป็นที่ปรึกษาในการให้ความรู้เพื่อการทบทวนบทความวิจัยเพื่อถกเถียงมาเป็นบทความวิชาการ ขอขอบคุณ อาจารย์เอกพล ชันสาลี ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับการแนะนำในการเขียนบทความวิชาการในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์. เทคโนโลยีในการออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านไมโคร-สตริป. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2554; 4(2):35-49.
- [2] อลงกรณ์ หลงกุล , นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์, ณัฐวุฒิ สุวรรณหา. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณ แถบความถี่หยุดผ่านไมโครสตริปโดยใช้โครงสร้างแบบเต็อย พับ ครึ่ง และการประยุกต์ใช้งาน . วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2555; 5(1):48-55.
- [3] ชรรมรัตน์ มาแจ้ง. วงจรกรองผ่านแถบแบบลดขนาดโดยใช้ไมโครสตริปไหลตเป็นช่วงด้วยเรโซเนเตอร์แฮร์พินแบบอิมพีแดนซ์ชั้น .วิทยานิพนธ์บัณฑิตศึกษา วศม. วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ : 6. 2549.
- [4] Hentges, R., D.Pro, J., E.Roen, M., VanHecke, G., Kimball, G. Exploring low loss suspension interconnects for high data rates . IEEE Transactions on Magnetics. 2008; 44(1): 169 -174 .
- [5] จักรพันธ์ ออบมา , นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์, ณัฐวุฒิ สุวรรณหา. การออกแบบสายอากาศขั้วเดี่ยวสองแถบความถี่ขนาดกะทัดรัดแบบใหม่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย . วารสารวิจัย มข. 2555; 17(1):153-161.
- [6] Surahmat,I. , Sugihartono., Munir, A. Crosstalk analysis of parallel microstrip line using using 4-Port scattering model . International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, Indonesia, July 17-19 2011.
- [7] ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน. การออกแบบวงจรไมโครเวฟ. บริษัทสมิเตอร์ก็อปปี (ประเทศไทย) จำกัด. 2537:161-167.
- [8] Hill, D. , Cavcey, K., Johnk, R. Crosstalk between microstrip transmission lines. Electromagnetic fields division electronics and electrical engineering laboratory national institute of standards and technology boulder, Colorado. NISTIR 5015. 1993.
- [9] Hong,J., Lancaster, M. J. Microstrip filter for RF / microwave applications . A Wiley -Interscience Publication. 2001; 84-89.
- [10] Prachumrasee, K., Keawrawang, A., Prasertchoreonsuk, V., Siritaratiwat, A., Kuesubthawon, A. Crosstalk on high speed hard disk drive interconnect with percent variation of windowing. Electrical Engineering Electronics, Computer. Telecom- munications and Information Technology (ECTI-CON) 9th International Conference, Phetchaburee, Thailand. 2012.
- [11] Suntives, A., Khajooeizadeh, A., Abhari, R. Using via fences for crosstalk reduction In PCB Circuit. Electromagnetic Compatibility, IEEE International Symposium on. 2006; 1:34–37.
- [12] Bilotti, F., Lauro, S., Toscono, A., Vegni, L . Efficient modeling of the crosstalk between two coupled microstrip lines over nonconventional material using an hybrid technique. IEEE Transactions technique . IEEE Transactions on Magnetics. 2008; 44(6):1482-1485.
- [13] นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์. อกวิสต์ดู. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2553; 3(2):52-60.
- [14] นันทกานต์ วงศ์เกษม, คณิต มาตรา.วัสดุเหนื่อธรรมชาติ. วารสารวิจัย มข. 2552; 14(2):133-149.

- [15] ศราวุธ ชัยมูล, ประยุทธ์ อัครเอกพัฒน์.  
อภิวัดดู สำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ.  
วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2554;  
21(2):472-482.
- [16] Moradian, M., Amirhosseini, M. Improvement  
the characteristics of the microstrip parallel  
coupled line coupler by means of grooved  
substrate. Progress In Electromagnetics  
Reasearch Electromagnetics Reasearch M.  
2008; 3:205 -215 .
- [17] Lee, K., Lee, H., Jung, H., Sim, J., Park, H.  
A serpentine guard trace to reduce the  
far-end crosstalk voltage and the cross talk  
induced timing jitter of parallel microstrip lines.  
IEEE Transactions on Advanced Packaging.  
2008; 31(4):809-817 .
- [18] Li, H., Gou, C., Zhang, Y. Research of  
crosstalk reduction between microstrip  
lines based on high-speed PCBs. Antennas  
Propagation and EM Theory (ISAPE), 9th  
International Symposium on. 2010; 994-997.
- [19] Wu, j., Kow, Y., Lin, H. Yang, T., Tsai, D.,  
Chang, H., Li, C., Hsieh, I., Shen, L.,  
Zhang, X. Crosstalk reduction between  
metal - strips with subwavelength periodically  
corrugated structure. Electronics Letter. 2010;  
46(18):1273-1274.
- [20] Wang, X., Huang, H., Lin, Q. Characteristics  
for crosstalk between dual microstrip  
transmission lines in PCB. PIERS Proceedings,  
Suzhou, China. 2011; 1190-1194.
- [21] Kazeroonio, M., Salari, M., Cheldavi, A. A Novel  
method for crosstalk reduction in coupled pair  
in coupled pair microstrip lines. International  
Journal of RF and Microwave Computer-Aided  
Engineering. 2011; 22(2):167-174.