

สายอากาศไมโครสตริปไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาไรซ์แทรกร่องเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพค่าแยกโดดเดี่ยว

Polarization diversity microstrip antenna with increasing high isolation using insert slot

คมกฤษ บุญยั้ง¹ สมพล โกศลวิตร² อภินันท์ กาญจนวาปสติดัย² และ ชีรวินิจ ฐิตะเพ็ญแสง³

¹บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

²ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทรศัพท์: 02-988-3666 ต่อ 2217

Email: komkris@hotmail.com, apichan@mut.ac.th

³สำนักวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

333 ม. 1 ต. ท่าสูด อ.เมือง จ. เชียงราย 57110 โทรศัพท์: 05-3916-7412 ต่อ 2342

E-mail: teeravisit@mfu.ac.th

Manuscript received April 1, 2011

Revised April 20, 2011

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาไรซ์ที่มีร่องแทรกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพค่าแยกโดดเดี่ยว บทความนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศ นอกจากนั้นยังได้มีการศึกษา ระบบสายอากาศที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้เองโดยการใช้สายอากาศที่นำเสนอมาเป็นตัวกระจายคลื่น และวงจรต่างๆ ที่นำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศ ประกอบด้วย วงจรแบ่งกำลังงานแอกทีฟ วงจรดีเทคเตอร์ วงจรควบคุมสถานะสวิตช์และวงจรอาร์เอฟสวิตช์ ตามลำดับ ผลการทดสอบระบบสายอากาศรับที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้เอง พบว่ามีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการปรับเปลี่ยนโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: สายอากาศไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ไดเวอร์

ซิตีเชิงโพลาไรซ์, ค่าแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ต, สายอากาศที่สามารถปรับโพลาไรซ์คลื่นได้เอง

ABSTRACT

A polarization diversity microstrip antenna with 45 dB isolation using insert rectangular slot is presented in this paper. The design procedure and the electrical characteristics of the proposed antenna are discussed. Furthermore, the adaptive polarized antenna system by using the proposed antenna as the radiating element is investigated and rf circuits for adaptive polarized antenna consists active power divider, control status switch, rf switch respectively. The measured results found to be the same as simulation results.

Keywords: Square patch microstrip antenna, Polarization diversity, Isolation, An adaptive polarized antenna

1. บทนำ

ปัญหาเรื่องการจางหายหลายวิธีนั้น เป็นปัญหาหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบสื่อสารไร้สาย เป็นอันมาก การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยใช้เทคนิควิธี ไดเวอร์ซิตี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสามแบบด้วยกัน คือ ไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซ ไดเวอร์ซิตีเชิงตำแหน่งและไดเวอร์ซิตีเชิงความถี่ [1]-[2] ไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซเป็นเทคนิคที่น่าสนใจเนื่องจากไม่ต้องการพื้นที่ติดตั้งสายอากาศสองชุดแยกห่างกันดังเช่นกรณีของไดเวอร์ซิตีเชิงตำแหน่ง แต่ก็มีข้อด้อยที่โครงสร้างของสายอากาศสำหรับไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซยังมีขนาดที่ใหญ่กว่าเนื่องจากต้องอาศัยสายอากาศที่มีโพลาริซแบบเชิงเส้นสองตัวมาวางตัวไขว้กันในลักษณะรูปกากบาท ซึ่งอาจไม่เหมาะสมหากจะนำเอาเทคนิคดังกล่าวไปใช้กับเครื่องรับส่งวิทยุแบบเคลื่อนที่ ดังนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างสายอากาศใหม่ๆ สำหรับไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซ ที่ให้โครงสร้างของสายอากาศเล็กกะทัดรัดเหมาะสมกับการนำไปใช้งานกับเครื่องรับส่งวิทยุแบบเคลื่อนที่จึงเป็นที่ต้องการ ที่ผ่านมานั้น ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องดังกล่าว เช่น Hiromi Matsuno และคณะ[3] ได้ออกแบบสายอากาศไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซ โดยแบ่งโครงสร้างออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกได้ใช้สายอากาศไมโครสตริปห้วงสี่เหลี่ยม เพื่อทำให้เป็นโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้งโดยมีลักษณะการกระตุ้นสัญญาณแบบเชื่อมต่อระหว่างสายนำสัญญาณ (Coupling) สำหรับในส่วนที่สองใช้สายอากาศวงแหวนจำนวนสองวง ครอบด้านบนและด้านล่างมีการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบไฟฟ้าทำให้สายอากาศนี้เกิดโพลาริซแนวนอน B. Elnour และคณะ[4] นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปห้วงวงกลมมีลักษณะการกระตุ้นสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริปจำนวนสี่เส้นวางห่างกันด้วยระยะหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่นและมีความยาวของสายนำสัญญาณเท่ากับรัศมีของวงกลม สายอากาศนี้จะเกิดโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้ง นอกจากนี้ได้นำสายอากาศดังกล่าวมาวางตั้งฉากกันในลักษณะเป็นรูปกากบาท โดยใช้จุดศูนย์กลางเดียวกันเพื่อทำให้เกิดไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซ ส่วน Adel Elsherbini และคณะ[5] เลือกใช้สายอากาศรูปทรงหุกระต่ายที่มีโพลาริซเชิงเส้นสองตัววางไขว้กันในลักษณะรูปกากบาททำให้เกิดโพลาริซแนวตั้งและโพลาริซแนวนอน นอกจากนี้ยังได้ใช้แผ่นโลหะช่วยสะท้อนคลื่นเพื่อให้อัตราขยายที่สูงขึ้นและมีแบบ

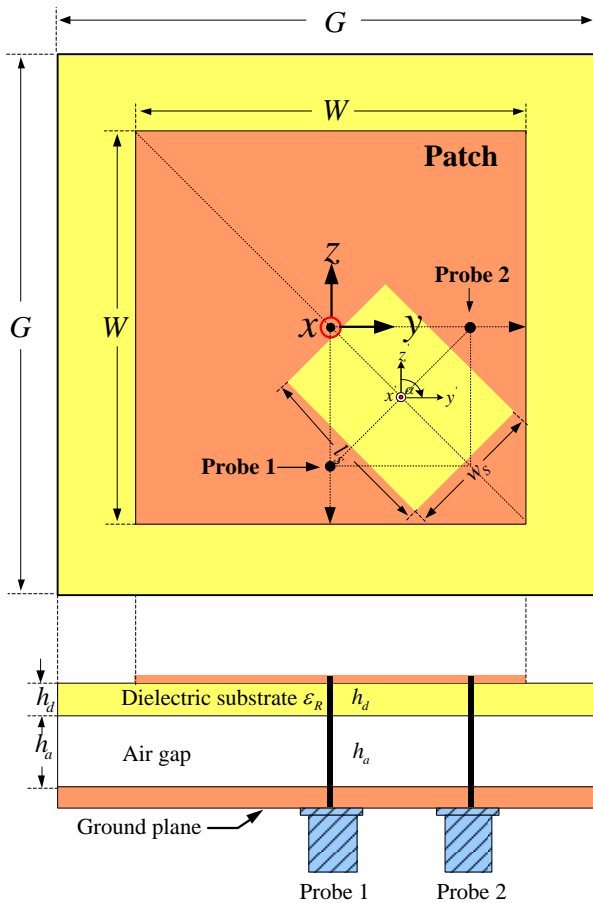
รูปการแพร่กระจายคลื่นแบบเจาะจงทิศทาง และสำหรับ K.M. Luk และคณะ[6] ได้เลือกใช้สายอากาศขั้วแม่เหล็ก-ไฟฟ้า (magneto-electric dipole) จำนวนสี่ตัววางอยู่บนระนาบกราวนด์ สายอากาศขั้วคู่ดังกล่าวถูกออกแบบให้มีลักษณะรูปวงแหวนกลม มีขนาดรัศมีเท่ากับ 0.32λ และระยะห่างระหว่างสายอากาศขั้วคู่เท่ากับ 0.12λ ลักษณะการกระตุ้นสัญญาณได้เลือกใช้วงจรแบ่งกำลังวิลกินสัน จำนวนสองตัวต่อเข้ากับสายอากาศ ทำให้เกิดโพลาริซแนวนอน และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกรวย สำหรับโพลาริซแนวตั้งได้เลือกใช้สายอากาศขั้วเดี่ยว ถูกวางบนตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงแหวนกลม ลักษณะการกระตุ้นสัญญาณด้วยโพรบไฟฟ้าและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกรวย เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศที่กล่าวมาข้างต้น มีข้อด้อยที่โครงสร้างของสายอากาศนั้นซับซ้อนและยุ่งยากต่อการสร้าง

ในบทความวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เสนอสายอากาศไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซที่มีโครงสร้างง่ายและเล็กกะทัดรัด โดยสายอากาศที่นำเสนอมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริป มีการกระตุ้นสัญญาณ โดยใช้โพรบไฟฟ้าคู่ และมีการแทรกร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าลงบนตัวแพทช์เพื่อเพิ่มค่าการแยกโคเดอ์ระหว่างพอร์ตให้สูงขึ้น เนื้อหาในบทความวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ในหัวข้อแรกนี้เป็นการกล่าวถึงที่มาของการทำวิจัยของสายอากาศที่นำเสนอนี้ หัวข้อที่สองกล่าวถึงโครงสร้างของสายอากาศและวิธีการในการออกแบบ หัวข้อที่สามกล่าวถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศ และในหัวข้อสุดท้ายเป็นการกล่าวถึงระบบสายอากาศที่สามารถปรับโพลาริซคลื่นได้เองโดยใช้สายอากาศที่นำเสนอมาเป็นตัวกระจายคลื่นของระบบสายอากาศดังกล่าว

2. โครงสร้างสายอากาศและการออกแบบ

ลักษณะโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงได้ตามรูปที่ 1 โดยโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีช่องว่างอากาศแทรกอยู่ระหว่างวัสดุฐานรองกับระนาบกราวนด์และมีการกระตุ้นสัญญาณแก่สายอากาศโดยผ่านทางโพรบไฟฟ้าคู่วางในลักษณะตั้งฉากกัน ตัวแพทช์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวแต่ละด้านของแพทช์เป็น W วางอยู่บนวัสดุฐานรองหนา h_d และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น ϵ_r โดยบนตัว

แพทช์ได้มีการแทรกร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างและความยาวของร่องเป็น w_s และ l_s ตามลำดับ ในแนวเส้นทแยงมุม สำหรับระนาบกราวด์ของสายอากาศมีความยาวแต่ละด้านเท่ากับ G และมีความหนาของช่องว่างอากาศที่แทรกระหว่างวัสดุฐานรองกับระนาบกราวด์เป็น h_a

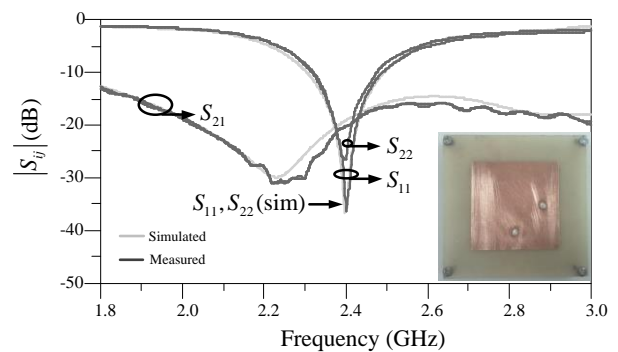


รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทรก

2.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

การออกแบบสายอากาศที่นำเสนอ จะแบ่งเป็นสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะเริ่มด้วยการออกแบบสายอากาศไมโคร สตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ปราศจากร่องแทรกขึ้นมาเสียก่อน จากนั้น ในขั้นตอนที่สองจะเป็นการหาขนาดร่องรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกลงบนตัวแพทช์

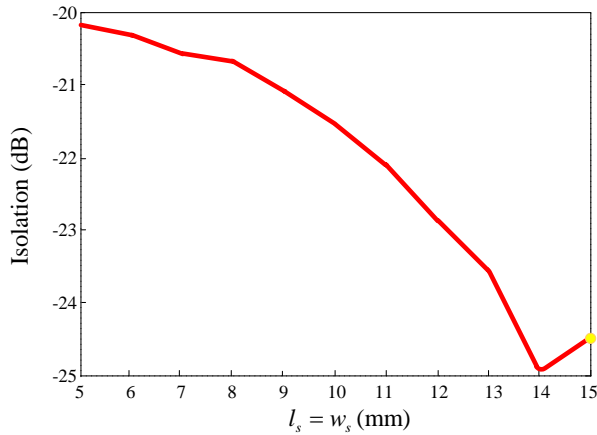
สายอากาศไมโครสตริปที่ปราศจากร่องแทรก ตัวแพทช์ได้ถูกสร้างลงบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มี h_d เท่ากับ 0.8 มม. และ ϵ_R เท่ากับ 2.65 เมื่ออาศัยวิธีการออกแบบที่นำเสนอไว้ในงานวิจัย [7] โดยการกำหนดความถี่กลางในการออกแบบสายอากาศไว้ที่ 2.4 GHz และเลือกใช้สายอากาศทำงานในโหมด TM_{01} จากตัว โพรบ 1 และ TM_{10} จากตัวโพรบ 2 ได้ความยาวแต่ละด้านของแพทช์ W และของระนาบกราวด์ G เป็น 48.4 มม.(0.5λ) และ 80 มม. (0.826λ) ตามลำดับ โดย h_d เท่ากับ 6 มม.(0.062λ) และมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของแพทช์ถึงจุดตำแหน่งของโพรบทั้งสองเป็น 15 มม. เพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบ สายอากาศต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นและถูกนำไปทดสอบค่าพารามิเตอร์เอสพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรมADS (Advance design system) ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 พารามิเตอร์เอสของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ปราศจากร่อง

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า ผลของการเปรียบเทียบนั้นมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ที่ความถี่ออกแบบ 2.4 GHz มีค่าสูญเสียการสะท้อนกลับจากพอร์ต 1 และพอร์ต 2 เกิดขึ้นเป็น 38.3 dB และ 26.8 dB ตามลำดับ โดยมีค่าแยกโคเดเดี่ยระหว่างพอร์ตทั้งสองเป็น 20.3 dB ในการออกแบบสายอากาศสำหรับไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซชัน โดยทั่วไปมีความต้องการค่าแยกโคเดเดี่ยระหว่างพอร์ตที่มากกว่า 30 dB เพื่อป้องกันการเกิดเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างพอร์ตกัน การเพิ่มค่าแยกโคเดเดี่ยระหว่างพอร์ตสำหรับสายอากาศในที่นี้ ได้อาศัยการแทรกร่องลงไปบนตัวแพทช์สายอากาศโดยมีจุดศูนย์กลางของร่องแทรกอยู่บนตัวแพทช์ที่

ตำแหน่ง $(y, -z)$ เป็น $(7.5 \text{ มม.}, -7.5 \text{ มม.})$ สำหรับในการออกแบบร่องได้ทำการออกแบบให้ร่องดังกล่าวมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส $l_s = w_s$ โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 3

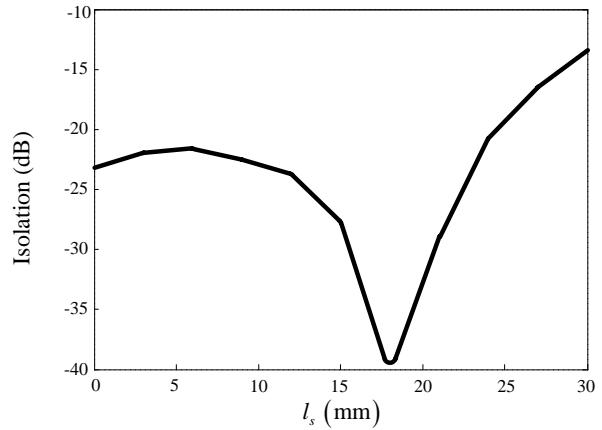


รูปที่ 3 ค่าแยกโคเดเดี่ยวจากการปรับพารามิเตอร์ความกว้างของร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส

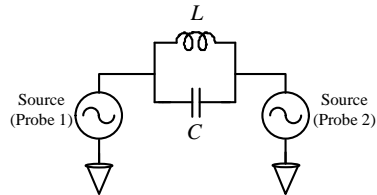
ขนาดร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 5 มม. ถึง 15 มม. จากผลจำลองพบว่าเมื่อร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสนี้มีขนาดเท่ากับ 14 มม. จะให้ค่าโคเดเดี่ยวระหว่างพอร์ตเกิดขึ้นดีที่สุดเป็น 24.92 dB โดยมีการเพิ่มขึ้น 4.62 dB เมื่อเทียบกับในกรณีปราศจากร่องแทรก นอกจากนี้ขนาดของร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกจำกัดด้วยขนาดเนื่องจาก เมื่อร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดเท่ากับหรือมากกว่า 15 มม. ร่องดังกล่าวนี้จะแทรกเข้าไปยังตำแหน่งกระตุ้นสัญญาณทั้งสองพอร์ต นอกจากนี้ได้หมุนร่องโดยเปลี่ยนแปลงมุม α พบว่ามุมเท่ากับ 315 องศา ดังรูปที่ 1 มีค่าแยกโคเดเดี่ยวระหว่างพอร์ตเพิ่มขึ้น 1.7 dB และความยาวของร่อง l_s จะพิจารณาได้จากรูปที่ 4 อันเป็นค่าการแยกโคเดเดี่ยวระหว่างพอร์ตที่ความถี่ 2.4 GHz

เมื่อความยาวร่องมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 มม. ถึง 30 มม. ดังรูปที่ 4 จากผลจำลองพบว่าเมื่อความยาวร่องเป็น 18 มม. จะให้ค่าโคเดเดี่ยวระหว่างพอร์ตเกิดขึ้นดีที่สุดเป็น 39.4 dB ดังนั้นขนาดมิติทั้งหมดของสายอากาศที่ออกได้ออกแบบได้สรุปตามตารางที่ 1 ร่องรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเปรียบเสมือนวงจรกรองผ่านความถี่แบบช่องบากขนานกัน (Parallel band stop filter) [8] วงจรกรองดังกล่าวประกอบด้วย ค่าเหนี่ยวนำขนานกับค่าเก็บประจุและอนุกรมกับแหล่งจ่ายดังรูปที่ 5 ร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High-

impedance) กระแสไฟฟ้า (สัญญาณความถี่วิทยุ) ที่ไหลบนตัวแพทช์สายอากาศไม่สามารถไหลผ่านไปได้นั้นเมื่อสายอากาศทำงานในโหมด TM_{01} กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนตัวแพทช์จึงไม่สามารถไหลเข้าไปรบกวนโพรบไฟฟ้า 2 ได้ และเมื่อสายอากาศทำงานในโหมด TM_{10} กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนตัวแพทช์ไม่สามารถไหลเข้าไปรบกวนโพรบไฟฟ้า 1 ได้ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4 ค่าแยกโคเดเดี่ยวจากการปรับพารามิเตอร์ความยาวของร่อง



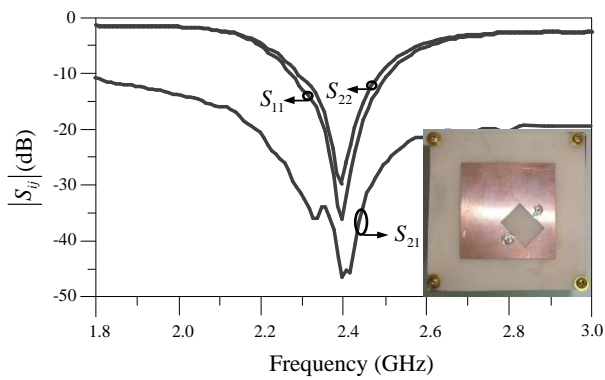
รูปที่ 5 วงจรสมมูลของร่องรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตารางที่ 1 ขนาดมิติของสายอากาศ ที่ความถี่ 2.4 GHz

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดมิติ (มม.)
ตัวแพทช์สายอากาศ (W)	47.8 (0.492 λ)
แผ่นระนาบกราวด์ (G)	80 (0.826 λ)
ความสูงของช่องว่างอากาศ (h_a)	6 (0.062 λ)
ความสูงของแผ่นไดอิเล็กตริก (h_d)	0.8 (0.0082 λ)
ความกว้างของช่องว่าง (w_s)	14 (0.144 λ)
ความยาวของช่องว่าง (l_s)	18 (0.186 λ)

3. การออกแบบสายอากาศไมโครสตริบ

สายอากาศไมโครสตริบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทรกต้นแบบ มีมิติสายอากาศตามตารางที่ 1 ได้ถูกสร้างขึ้นดังแสดงตามในรูปที่ 6 ได้ถูกทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยแบ่งผลการทดสอบออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบค่าพารามิเตอร์เอส ส่วนที่สองเป็นค่าอัตราขยายสายอากาศ และส่วนสุดท้ายเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

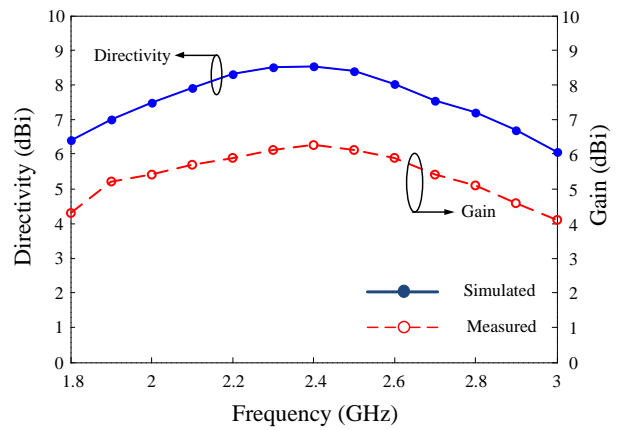


รูปที่ 6 พารามิเตอร์เอสของสายอากาศไมโครสตริบแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสและร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกลงบนตัวแพทช์

ผลการทดสอบพารามิเตอร์เอสของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 2.4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยมีค่าสูญเสียการสะท้อนกลับของโพรับ 1 และโพรับ 2 มีค่าเท่ากับ 35.3 dB และ 29.8 dB ตามลำดับและมีค่าแยกโคเดเคียวระหว่างพอร์ตเป็น 47.2 dB ซึ่งดีกว่าที่ออกแบบไว้อยู่ 8 dB หากกำหนดแบนด์วิดท์ทำงานของสายอากาศจากค่าแยกโคเดเคียวที่ 30 dB พบว่าสายอากาศที่ออกแบบนี้ให้ค่าแบนด์วิดท์เป็น 300 MHz จาก 2.3-2.5 GHz โดยมีค่าการสูญเสียสะท้อนกลับนั้น มากกว่า 10 dB ทั้งสองพอร์ตตลอดช่วงแบนด์วิดท์

สำหรับการทดสอบหาค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบได้อาศัยวิธีการคำนวณหาจากสูตรการส่งผ่านของฟรีส ซึ่งได้ใช้สายอากาศโพลมาตรฐานที่รู้ค่าอัตราขยายเป็นตัวเปรียบเทียบผลการทดสอบได้แสดงไว้ตามรูปที่ 7 ที่ความถี่ 2.4 GHz ผลการทดสอบค่าอัตราขยายสายอากาศมีค่าเท่ากับ 6.2 dBi โดยมีค่า

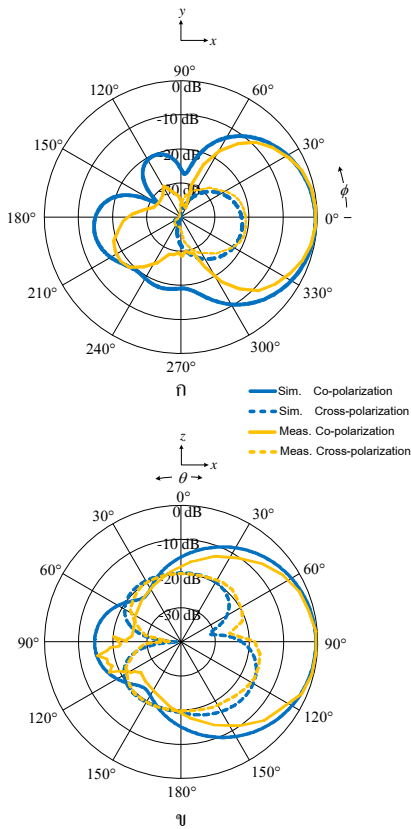
ประสิทธิภาพ(Efficiency: η) สายอากาศเท่ากับ 0.88 สำหรับการจำลองผลได้อาศัยโลหะไฟฟ้าตัวนำสมบูรณ์ (Perfect electric conductor: PEC) ในการจำลอง มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 1 ดังนั้นการจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ความถี่ 2.4 GHz พบว่ามีค่าเท่ากับ 8.52 dBi



รูปที่ 7 ผลทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

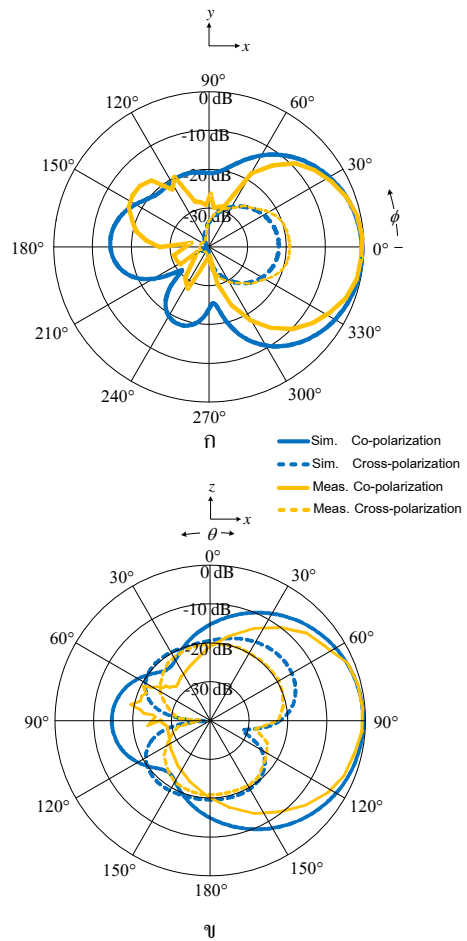
ในส่วนสุดท้ายของการทดสอบคือการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยได้ทำการทดสอบเฉพาะที่ความถี่ออกแบบทั้งสองโหมด (TM_{10} และ TM_{01}) ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9

รูปที่ 8 (ก) แสดงผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อมีการกระตุ้นสัญญาณจากโพรับที่ 1 (TM_{01}) ในระนาบสนามไฟฟ้ามีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 57.2 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั่มเท่ากับ 22.5 dB และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั่มไขว้เท่ากับ 21.4dB และในรูปที่ 8 (ข) ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 60.3 องศา อัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั่มเท่ากับ 23.6 dB และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั่มไขว้เท่ากับ 20.3 dB



รูปที่ 8 ผลจำลองและผลทดสอบสายอากาศ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก เมื่อกระตุ้นสัญญาณแนวตั้ง

ในรูปที่ 9 (ก) ซึ่งแสดงผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อมีการกระตุ้นสัญญาณจากโพรมิทที่ 2 (TM_{10}) ในระบายสนามไฟฟ้ามีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 57 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั่วมเท่ากับ 29 dB และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั้วไขว้เท่ากับ 19.4 dB และจากรูปที่ 9 (ข) ในระบายสนามแม่เหล็กมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 60 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั่วมเท่ากับ 25 dB และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของโพลาริซั้วไขว้เท่ากับ 18.4 dB

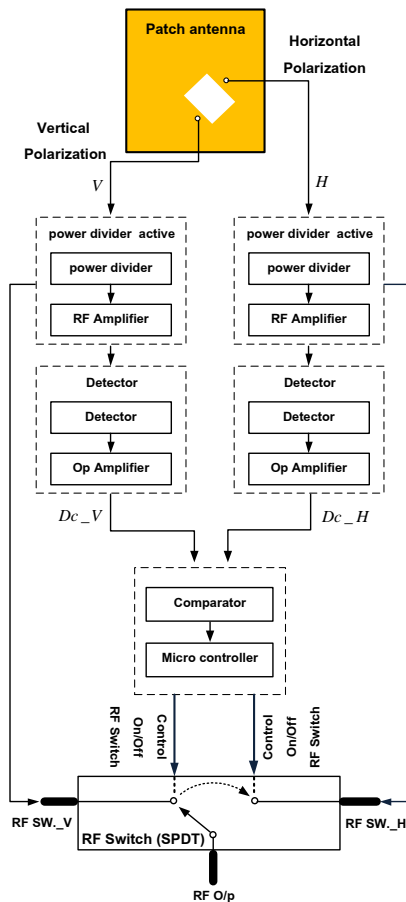


รูปที่ 9 ผลจำลองและผลทดสอบสายอากาศ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก เมื่อกระตุ้นสัญญาณแนวนอน

4. ระบบสายอากาศที่ปรับโพลาริซัคลื่นได้เอง

ในระบบการสื่อสารยุคใหม่นั้น เป็นระบบสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง ซึ่งจำเป็นต้องใช้สายอากาศอัจฉริยะที่สามารถปรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเองได้ เพื่อให้เกิดการรับหรือส่งสัญญาณเหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณแบบเวลาจริงระบบสายอากาศอัจฉริยะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือในแบบที่สามารถปรับรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นและแบบที่สามารถปรับโพลาริซัคลื่น สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำเอาสายอากาศที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ มาสร้างเป็นระบบสายอากาศที่สามารถปรับโพลาริซัคลื่นได้เอง โดยจะมุ่งเน้นไปเฉพาะกรณีทำงานเป็นสายอากาศรับคลื่น โดยมีโครงสร้างของระบบแสดงตาม

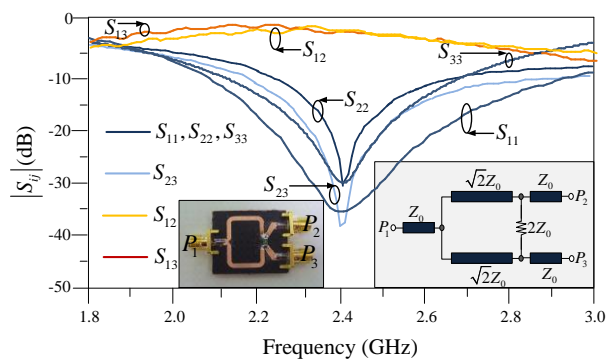
รูปที่ 10 ระบบสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศที่นำเสนอ วงจรแบ่งกำลังงาน วงจรตีเทคเตอร์ วงจรควบคุมสถานะสวิตช์ และ วงจรอาร์เอฟสวิตช์ ระบบสายอากาศนี้จะทำงานด้วยการปรับสถานะของสวิตช์เพื่อเลือกรับสัญญาณจากโพลาริซที่ให้กำลังคลื่นสูงกว่า โดยกำลังงานคลื่นที่ได้รับจากแต่ละโพลาริซของสายอากาศนั้น จะถูกแบ่งโดยวงจรแบ่งกำลังงานไปให้แก่วงจรตีเทคเตอร์เพื่อแปลงค่ากำลังงานคลื่นที่รับได้ไปเป็นค่าระดับสัญญาณไฟตรงจากนั้นสัญญาณไฟตรงดังกล่าวจะถูกเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแรงของสัญญาณเพื่อหาค่าความแรงของสัญญาณเพื่อสร้างเป็นสัญญาณควบคุมสถานะสวิตช์โดยวงจรควบคุมสถานะสวิตช์ต่อไป สำหรับในการออกแบบระบบนี้ ได้เลือกกำหนดความถี่ใช้งานอยู่ที่ 2.4 GHz ซึ่งมีมิติของสายอากาศตามตารางที่ 1 สำหรับส่วนประกอบอื่นๆของระบบนั้น จะอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1 – 4.4 และผลการทดสอบการทำงานของระบบจะกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5



รูปที่ 10 โครงสร้างสายอากาศปรับโพลาริซที่ตัวเอง

4.1 วงจรแบ่งกำลังงานแบบแอกทิฟ

วงจรแบ่งกำลังงานแบบแอกทิฟ ประกอบด้วย วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลกินสันและวงจรขยายสัญญาณอาร์เอฟ วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลกินสัน[9] ประกอบไปด้วยพอร์ตขาเข้า P_1 และพอร์ตขาออกจำนวน 2 พอร์ต คือ P_2 และ P_3 โดยมีสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็น $\sqrt{2}Z_0$ และมีความยาวสายเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น(Quarter wave transformer : $\lambda / 4$) ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงค่าอิมพีแดนซ์ และมีตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $2Z_0$ เท่ากับ 100 โอห์ม เชื่อมต่อระหว่างพอร์ต P_2 และ P_3 เพื่อช่วยเรื่องการแยกโคแอดเดียนซ์ระหว่างพอร์ต วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลกินสันที่ได้ออกแบบและผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรได้แสดงไว้ตามรูปที่ 1

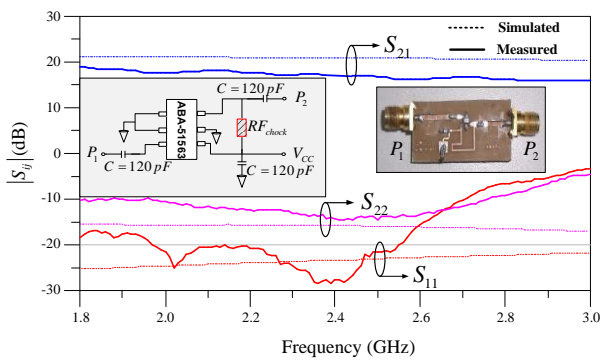


รูปที่ 11 ผลทดสอบวงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสัน

ผลของการทดสอบพบว่า ค่าสูญเสียการสะท้อนกลับพอร์ตที่ 1 (S_{11}) ค่าสูญเสียการสะท้อนกลับพอร์ตที่ 2 (S_{22}) ค่าสูญเสียการสะท้อนกลับพอร์ตที่ 3 (S_{33}) และค่าสูญเสียการใส่แทรกของพอร์ตที่ 3 กับพอร์ตที่ 2 (S_{23}) มีค่าเท่ากับ 35.02 dB, 30.8 dB, 29.7 dB และ 37.2 dB ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสูญเสียการใส่แทรกพอร์ตที่ 2 กับพอร์ตที่ 1 (S_{12}) และพอร์ตที่ 3 กับพอร์ตที่ 1 (S_{13}) มีค่าเท่ากับ 3.52 dB และ 3.54 dB ตามลำดับ

สำหรับในส่วนของวงจรขยายสัญญาณอาร์เอฟรูปที่ 12 ในที่นี้ได้เลือกใช้อาร์เอฟไอซี(RFIC) เบอร์ ABA-51563 ของบริษัท Avago technology ทางด้านขาเข้า P_1 ทางด้านขาออก P_2 ของวงจรต่อเชื่อมด้วยตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 120 พิโกฟารัด ทางด้าน

แหล่งจ่ายไฟตรงถูกต่อด้วยตัวเก็บประจุทางผ่านมีค่าเท่ากับ 120 พิโกฟารัด สำหรับอาร์เอฟโช้ค(RF choke) ได้ใช้สายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ 70 โอห์ม โดยมีความยาวสายเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น ถูกต่อระหว่างตัวเก็บประจุต่อเชื่อมกับตัวเก็บประจุทางผ่าน วงจรขยายสัญญาณอาร์เอฟได้กำหนดการไบอัสไฟตรงเท่ากับ 5 โวลต์ และกระแส 18 มิลลิแอมป์ ผลทดสอบอัตราขยายกำลังงาน(S_{21}) ค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับทางด้านขาเข้า(S_{11})และค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับทางด้านขาออก(S_{22}) มีค่าเท่ากับ 17.01 dB, 28.27 dB และ 15.24 dB ตามลำดับ

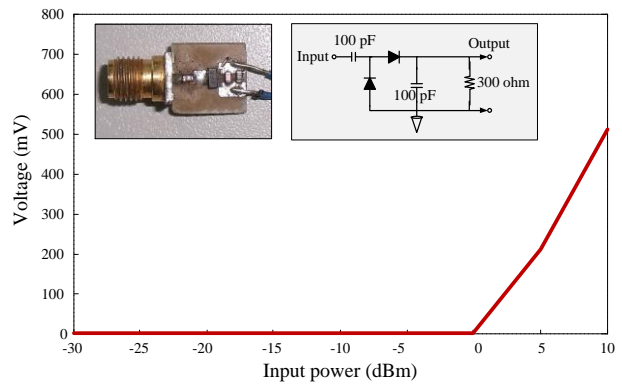


รูปที่ 12 ผลจำลองและผลทดสอบตัวอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบอร์ ABA-51563

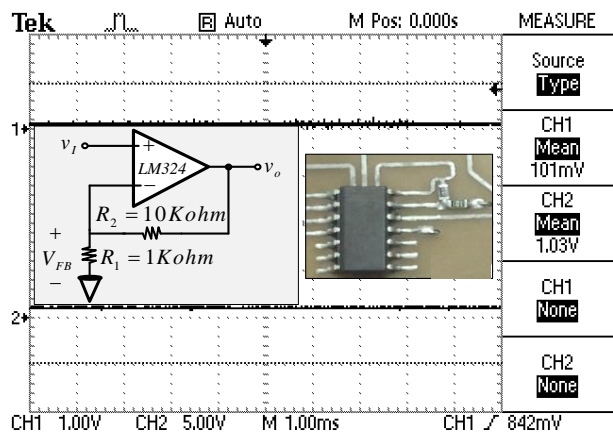
4.2 วงจรดีเทคเตอร์

ในส่วนของวงจรดีเทคเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอาร์เอฟมาเป็นสัญญาณไฟตรง ได้เลือกใช้ไดโอดช็อคกี้[10]-[11] เบอร์ SMS7630-006 ของบริษัท Skyworks ซึ่งไดโอดช็อคกี้เบอร์ดังกล่าวเป็นชนิดแบบทวีแรงดัน โดยทางด้านขาเข้าถูกเชื่อมต่อด้วยตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 100 พิโกฟารัด ในส่วนของโหลดวงจรดีเทคเตอร์ถูกต่อด้วยตัวต้านทานเท่ากับ 300 โอห์ม ผลทดสอบการทำงานของวงจรดีเทคเตอร์ที่ออกแบบ แสดงผลไว้ตามรูปที่ 13 ผลการทดสอบเมื่อป้อนกำลัง 0 dBm ไปจนถึง 10 dBm แรงดันไฟตรงทางด้านเอาต์พุตจะเป็นไปตามกฎกำลังสอง(Square law)

แต่เนื่องจากแรงดันไฟตรงที่ได้นั้นมีระดับต่ำ ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องอาศัยวงจรขยายสัญญาณแบบออปแอมป์เข้าช่วยขยายสัญญาณ โดยใช้ไอซีเบอร์ LM324 ของบริษัท National Semiconductor และได้ออกแบบให้มีอัตราขยายแรงดัน 10 เท่า โดยกำหนดการไบอัสไฟตรงเท่ากับ 5 โวลต์ ซึ่งใช้ค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์มและ 1 กิโลโอห์ม ดังรูปที่ 14 ผลทดสอบเมื่อป้อนอินพุตไฟตรง 101 มิลลิโวลต์ สามารถขยายแรงดันไฟตรงได้ 1.03 โวลต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 13 ผลทดสอบของวงจรดีเทคเตอร์



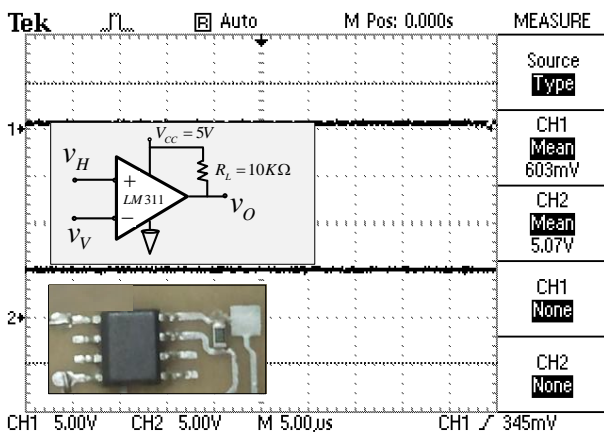
รูปที่ 14 ผลทดสอบของวงจรขยายสัญญาณออปแอมป์

4.3 วงจรควบคุมสถานะสวิตช์

สำหรับในส่วนของวงจรควบคุมสถานะสวิตช์ประกอบไปด้วย วงจรเปรียบเทียบแรงดันและไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรเปรียบเทียบแรงดันทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณไฟตรงที่ได้จากดิ

เทคเตอร์โพลาริซเซชันเชิงเส้นแนวตั้งสอง โดยได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ LM 311 ของบริษัท Motorola มาใช้งาน โดยกำหนดไบอัสไฟตรง 5 โวลต์ และต่อตัวต้านทานเท่ากับ 10 กิโลโอห์ม คร่อมระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงเข้ากับทางด้านขาออกดังรูปที่ 15

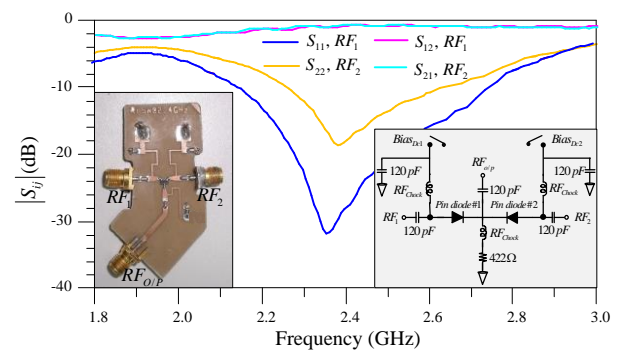
ผลทดสอบ พบว่าเมื่อแรงดันไฟตรงที่มาจากกริดเทคโพลาริซเซชันเส้นแนวนอน v_H มากกว่าแรงดันไฟตรงที่มาจากกริดเทคโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้ง v_V แรงดันขาออกที่ได้จากการเปรียบเทียบ v_O เท่ากับ 0.6 โวลต์ และในทางกลับกัน เมื่อแรงดันไฟตรงที่มาจากกริดเทคโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้ง v_V มากกว่าแรงดันไฟตรงที่มาจากกริดเทคโพลาริซเซชันเส้นแนวนอน v_H แรงดันขาออกที่ได้จากการเปรียบเทียบ v_O เท่ากับ 5.07 โวลต์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์(Micro controller) รุ่น ET-BASE51V3.0 บริษัท EET บอร์ดนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลเอ็มซีเอส 51 (MCS51) การออกแบบชุดคำสั่งไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อต้องการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ตรวจสอบแรงดันจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยมีอยู่ 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขแรก แรงดันไฟตรงของโพลาริซเซชันเส้นแนวนอน v_H มากกว่าแรงดันไฟตรงของโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้ง v_V ทางด้านขาออกมีแรงดันไฟตรง v_O เท่ากับ 0 โวลต์ และเงื่อนไขที่สอง แรงดันไฟตรงของโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้ง v_V มากกว่าแรงดันไฟตรงของโพลาริซเซชันเส้นแนวนอน v_H ทางด้านขาออกมีแรงดันไฟตรง v_O เท่ากับ 5 โวลต์ ต่อจากนั้นจะทำหน้าที่การควบคุมการเปิด และปิดสวิตซ์



รูปที่ 15 ผลทดสอบของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

4.4 วงจรสวิตซ์อาร์เอฟ

วงจรสวิตซ์อาร์เอฟได้เลือกใช้ไดโอดแบบพิน[12] เบอร์ BAP64-05 ของบริษัท Philip semiconductor ออกแบบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟมีโครงสร้างเป็นแบบสองทิศทางเปลี่ยนสลับการต่อเพื่อไปยังตำแหน่งที่เลือกไว้(Single pole double throw switch: SPDT) สำหรับการออกแบบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ แหล่งจ่ายไฟตรง 5 โวลต์ ถูกต่อด้วยตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 120 พิโกฟารัด อีกด้านของตัวเก็บประจุถูกต่อลงระนาบกราวด์ สำหรับอาร์เอฟใช้คมีลักษณะเป็นสายนำสัญญาณมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 70 โอห์ม มีความยาวสายเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น โดยด้านหนึ่งถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรงและอีกด้านถูกต่อที่ขั้วแอนอด(Anode) ของตัวไดโอดแบบพิน ระหว่างทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจรสวิตซ์อาร์เอฟถูกต่อด้วยตัวเก็บประจุ 120 พิโกฟารัด กับขั้วคาโทด(cathode) ของตัวไดโอดแบบพิน นอกจากนี้ที่ขั้วคาโทดจะถูกต่อด้วยอาร์เอฟใช้คและมีตัวต้านทานจำกัดกระแสมีค่าเท่ากับ 422 โอห์ม โดยกำหนดให้กระแสเท่ากับ 9.7 มิลลิแอมป์



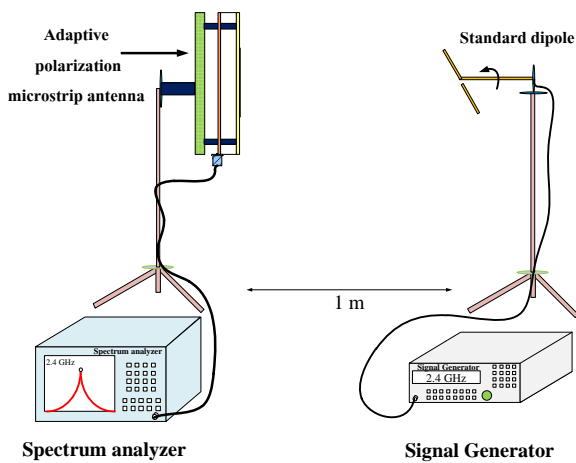
รูปที่ 16 ผลทดสอบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ

ผลทดสอบวงจรสวิตซ์อาร์เอฟ พบว่ามีค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับทางด้านขาเข้า ($S_{11} : RF_1$) ค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับทางด้านขาออก ($S_{22} : RF_2$) ค่าสูญเสียจากการแทรกสอดที่พอร์ต ($S_{12} : RF_1$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรกที่พอร์ต ($S_{21} : RF_2$) มีค่าเท่ากับ 28.1 dB, 18.05 dB, 1.5 dB และ 1.62 dB ตามลำดับ

4.5 การทดสอบระบบสายอากาศปรับโพลาไรซ์ได้เอง

สำหรับการทดสอบระบบสายอากาศปรับโพลาไรซ์ได้เอง สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบได้นั้นระบบสายอากาศรับและสายอากาศส่งติดเข้ากับขาหยั่ง ซึ่งได้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนทางด้านสายอากาศส่งได้ใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานในการส่งคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้น เนื่องจากสายอากาศประเภทนี้จะส่งกำลังงานออกมาอย่างคงที่ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนโพลาไรซ์เชิงเส้นในแต่ละแกนและได้ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ 2.4 GHz และส่วนทางด้านรับระบบสายอากาศรับที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้เองได้คงที่ไว้และต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

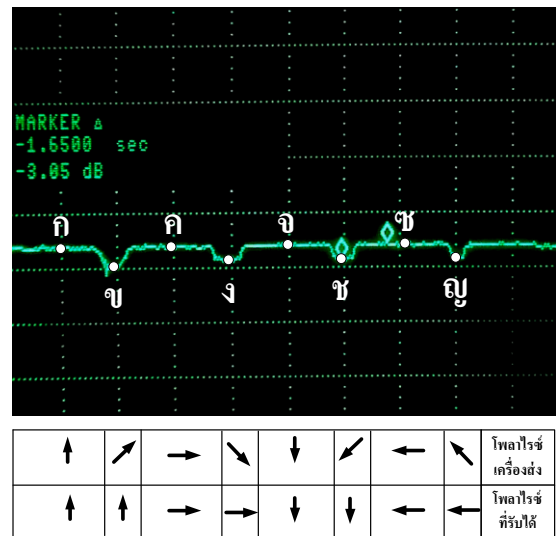
สำหรับในส่วนของการทดสอบระบบสายอากาศที่สามารถปรับเปลี่ยนโพลาไรซ์ได้เอง ทำการหมุนที่ตัวสายอากาศไดโพลหนึ่งรอบตามเข็มนาฬิกา ซึ่งมีค่าคาบเวลาเท่ากับ 45 วินาที และสังเกตผลการปรับเปลี่ยนโพลาไรซ์ได้เองจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมและได้การเก็บผลทดสอบดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ติดตั้งอุปกรณ์ เครื่องมือวัดเพื่อทดสอบระบบสายอากาศปรับโพลาไรซ์คลื่นได้เอง

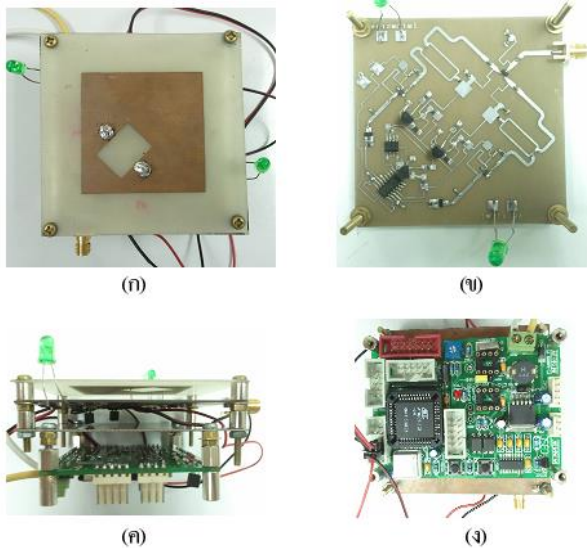
จากรูปที่ 18 ผลจากการทดสอบระบบสายอากาศปรับโพลาไรซ์ได้เองพบว่า ที่ตำแหน่ง ก และ จ สายอากาศไดโพลส่งโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง ระบบสายอากาศรับทำการปรับโพลาไรซ์ให้สามารถรับกำลังคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งเช่นกัน ทำให้

สามารถรับกำลังคลื่นเท่ากับ 0 dBm สำหรับตำแหน่งจุด ข, ง, ช และ ฉ สายอากาศไดโพลส่งโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเฉียง ระบบสายอากาศรับไม่สามารถปรับโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบเฉียงได้ เนื่องจากวงจรควบคุมสวิตซ์ถูกออกแบบให้ปรับตัวเองเฉพาะโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนเท่านั้น ดังนั้นระบบสายอากาศรับดังกล่าวจึงรับกำลังคลื่นได้เพียงครึ่งหนึ่งของกำลังคลื่นที่ส่งมาเท่ากับ 3 dB และที่ตำแหน่ง ค และ ซ สายอากาศไดโพลส่งโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน ระบบสายอากาศรับทำการปรับโพลาไรซ์ให้สามารถรับกำลังคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนเช่นกัน ทำให้สามารถรับกำลังคลื่นสูงเท่ากับ 0 dBm เช่นเดียวกันกับกรณีที่อยู่ตำแหน่ง ก และ จ สำหรับรูปที่ 19 คือโครงสร้างระบบสายอากาศที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้เองตัวต้นแบบ



รูปที่ 18 ผลการทดสอบระบบสายอากาศปรับโพลาไรซ์ได้เอง

รูปที่ 19 (ก) โครงสร้างด้านหน้าของระบบสายอากาศปรับโพลาไรซ์ รูปที่ 19 (ข) วงจรรวมที่ใช้ในระบบสายอากาศปรับโพลาไรซ์ รูปที่ 19 (ค) ส่วนด้านข้างของระบบสายอากาศ รูปที่ 19 (ง) ส่วนด้านหลังของระบบสายอากาศ



รูปที่ 19 โครงสร้างสายอากาศที่สามารถปรับโพลาไรซ์คลื่นได้เอง

5. สรุปผล

ผลการทดสอบระบบสายอากาศรับที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้เอง พบว่ามีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการปรับเปลี่ยนโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ โครงสร้างระบบสายอากาศรับมีขนาดที่เหมาะสมกับมือ เคลื่อนย้ายได้สะดวกและราคาถูก สำหรับปัญหาที่เกิดจากระบบสายอากาศที่ปรับโพลาไรซ์ได้เอง พบว่าเมื่อเพิ่มระยะทางรับให้ไกลขึ้นระบบสายอากาศนี้มีความไวต่อการปรับโพลาไรซ์ได้ไม่ดีหรือไม่สามารถปรับเปลี่ยนโพลาไรซ์ได้เอง สำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต สืบเนื่องจากปัญหาเรื่องระยะทางที่มีผลต่อความไวในการปรับเปลี่ยนโพลาไรซ์ ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องออกแบบวงจรขยายสัญญาณอาร์เอฟให้มีอัตราขยายสูงกว่าเดิมและเพิ่มความไวในส่วนวงจรดีเทคเตอร์ระบบสายอากาศดังกล่าวก็จะสามารถปรับเปลี่ยนโพลาไรซ์ในระยะทางที่ไกลมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Fujimoto and J.R. James, Mobile Antenna System Handbook, Ch.2, Artech house, Norwood, Ma, 1994
 [2] P. Keowsawat, C. Phagcharoenpanich, S. Kosulvit and M. Krairiksh, "Achievable diversity performance and range improvement from polarization diversity bi-directional antenna

using two-probe excited circular ring", TENCON., Vol. 3, Nov. 2004. pp. 208-211.
 [3] H. Matsuno, H. Arai, M. Nakano, Y. Amano and H. Ishikawa, "An omni directional slim polarization diversity antenna for cellular base station", Antenna Technology iWAT International Workshop on., 2010. pp. 1-4.
 [4] B. Elnour and D. Erricolo, "A novel colocated cross-polarized two-loop PCB antenna in the ISM 2.4-GHz band", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters., Vol. 9, 2010, pp. 1237-1240.
 [5] A. Elsherbini and K. Sarabandi, "Dual polarized coupled sectorial loop antennas for UWB applications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter., 2010. Vol. 99 pp. 1-4.
 [6] K. M. Luk, B.Q. Wu, "Design of wideband polarization diversity antenna with conical radiation pattern", ICEAA International Conference Electromagnetics in Advance Applications., 2010, pp. 829-832
 [7] J. Qiu, Y. Huang and A. Wang, "An improved model for the resonant frequency of tunable rectangular microstrip antenna", International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings", 2003 pp. 524-527.
 [8] R. Ludwig, and P. Bretchoko, RF Circuit Design, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.
 [9] E.H. Fook and R.A. Zankarevicius, Microwave Engineering using Microstrip Circuit, Prentice hall 1990.
 [10] F. Gardiol, Microstrip Circuit, New York, 1994.
 [11] S.A. Mass, Microwave Mixer, Artech house, Norwood, 1993.
 [12] Microsemi-Watetown, The pin diode circuit designers handbook, Microsemi Cop., California, 1992.



คมกฤษ บุญยั้ง จบการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปี พ.ศ.2550 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



สมผล โกศลวิตร จบการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต สาขา สื่อสาร จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจในงานวิจัยทางด้าน ไมโครเวฟและสายอากาศ



อภิมาน กาญจนวาปสทธิศย์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต สาขาโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลียในปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจในงานวิจัยทางด้าน

การออกแบบโปรโตคอลสื่อสาร และระบบสมองกลฝังตัว



ธีรวิทย์ ไล่หะเพ็ญแสง จบการศึกษาระดับปริญญา
ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัย
เซอร์เรย์ สหราชอาณาจักรอังกฤษ ปัจจุบันทำงานใน
ตำแหน่งอาจารย์ประจำสำนักวิชาเทคโนโลยี
สารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง มีความสนใจ
งานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ และ
เทคโนโลยีสายอากาศ