สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์แถบกว้างพร้อมร่องสี่เหลี่ยมสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล

A Broadband Printed Dipole Antenna with Rectangular Slots for DTV Signal Reception

สมภพ พิมพล[1,*] และ รังสรรค์ วงศ์สรรค์[2]

[1,*]สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

[2]สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Sompop Pimpol[1,*] and Rangsan Wongsan[2]

[1] Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus.

[2]School of Telecommunication, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

***Corresponding Author E-mail:** sompop.pi@rmuti.ac.th

Received: February 2, 2021 **Revised:** March 23, 2021 **Accepted:** March 25, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทคนิคการเซาะร่องแผ่นตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมบนแขนทั้งสองข้างของไดโพลเพื่อควบคุมแถบความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้ความกว้างแถบเพิ่มมากขึ้นสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินในย่านความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz สายอากาศที่นำเสนอสามารถสร้างได้ง่าย และมีขนาดกะทัดรัด เท่ากับ 37x240 มม. โดยสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 ความหนา (h) เท่ากับ 1.6 มม. ผลการวัดทดสอบสามารถตอบสนองความถี่ที่ 465.43 MHz ถึง 874.58 MHz หรือ 61.06% ที่ค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB มีอัตราขยายที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz เท่ากับ 2.375 dB 2.585 dB และ 2.525 dB ตามลำดับ สายอากาศต้นแบบสามารถนำไปใช้สำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ เทคนิคการเซาะร่อง โทรทัศน์ระบบดิจิทัล

Abstract

This article presents a development of a printed dipole antenna with rectangular slots technique on both arms of the dipole, to controllable the resonant frequency bands. To enhance the bandwidth of the antenna for digital television (DTV) terrestrial signal reception of the frequency band at 470 MHz to 862 MHz. The proposed antenna can be easily constructed, and its compact size is 37x240 mm, it's designed

on the printed circuit board (PCB) FR-4 substrate with dielectric constant (ε_r)=4.3 and 1.6 mm of the thickness (h). Measured bandwidth about 61.06% at frequency band is 465.43 MHz to 874.58 MHz at $|S_{11}| \le -10\,\text{dB}$, the antenna gains are around 2.375 dB 2.585 dB and 2.525 dB at the frequency of 470 MHz, 666 MHz and 862 MHz, respectively. The prototype antennas can be well used for receiving digital terrestrial television signals.

Keywords: Printed dipole antenna, slot technique, digital television (DTV)

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ในโลกปัจจุบันได้แบ่งระบบการสื่อสารออกเป็น 2 รูปแบบหลัก คือ ระบบการสื่อสารที่ใช้สายส่ง (Transmission Line) เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ ซึ่งเรียกว่า ระบบการสื่อสารผ่านสายเคเบิล (Cable Communication System) และอีกรูปแบบหนึ่งจะเป็นการสื่อสารที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กำลังผ่านสายอากาศการส่งออกไปในอากาศเพื่อเชื่อมต่อกับอีกด้านหนึ่งโดยใช้สายอากาศเป็นภาครับ ซึ่งเรียกว่า ระบบการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication System) ซึ่งในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้รับการพัฒนาหลากหลายรูปแบบเป็นอย่างมากและต่อเนื่อง หนึ่งในนั้นได้แก่ การให้บริการการส่งสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดิน ในระบบ DVB-T2 บนย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) [1], [2] ดังนั้น สายอากาศจึงเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ที่ได้มาตรฐาน มีคุณภาพ ความชัดเจนสูงทั้งภาพและเสียง โดยสามารถใช้งานได้ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ (ความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz หรือประมาณ 58.86%) ซึ่งหน้าที่หลักของสายอากาศคือ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนกำลังงานของคลื่นที่เดินทางในสายส่งต่าง ๆ ให้เดินทางไปในอวกาศว่างในกรณีที่เป็นสายอากาศส่ง หรือในทางกลับกันเมื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ ก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานของคลื่นที่เดินทางในอวกาศว่างให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปกำลังงานของคลื่นที่เดินทางในสายส่ง โดยการทำงานทั้งสองหน้าที่จะต้องทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสายอากาศที่นิยมใช้ในการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินในปัจจุบัน ได้แก่ สายอากาศยากิ-อูดะ [3] จะเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง มีอัตราขยายและสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง แต่มีความกว้างแถบเท่ากับ 18.6% และโดยส่วนมากจะมีการติดตั้งรับสัญญาณโทรทัศน์ไว้ภายนอกอาคาร [15] จากการพิจารณาคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศนั้นควรจะมีน้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด พกพาได้สะดวก สามารถติดตั้งใช้งานได้หลากหลายรูปแบบทั้งภายในและภายนอกอาคาร และสามารถตอบสนองการใช้งานได้ตลอดช่วงความถี่ และมีแบบรูปการแผ่กำลังตลอดช่วงความถี่ใช้งานที่ใกล้เคียงกัน หนึ่งในนั้นที่คณะผู้วิจัยสนใจในการออกแบบได้แก่ สายอากาศแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board Antenna) หรือเรียกอีกอย่างว่า สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

คณะผู้วิจัยได้นำแนวคิดของสายอากาศไดโพลที่ออกแบบบนเส้นลวดทั่วไปสำหรับใช้ในการออกแบบสายอากาศไดโพลที่สร้างบนแผ่นระนาบ [4] เพื่อนำไปสู่การออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดิน เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ สามารถออกแบบให้เกิดการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์หลายแถบความถี่ได้ง่าย มีแบบรูปการแผ่กำลังที่สม่ำเสมอไม่บิดเบี้ยวตลอดช่วงความถี่ปฏิบัติการ และมีอัตราขยาย (Gain) ที่คงที่ตลอดทั้งย่านความถี่ มีนักวิจัยได้วิจัยและนำเสนอสายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินเป็นจำนวนมากแต่มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการยังไม่ดีพอ สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีการป้อนแบบขั้น

(Step-shaped Feed Gap) [5], [6] มีการตอบสนองความถี่ในย่านความถี่กว้างที่ประมาณ 50% โดยพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) เท่ากับ 2.5:1 ต่อมาได้มีการนำเสนอสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีการเซาะร่องที่บริเวณแขนข้างเดียวใกล้กับจุดป้อนสัญญาณ [7] ซึ่งสามารถตอบสนองย่านความถี่กว้างประมาณ 73% (ที่ VSWR 3:1) ต่อจากนั้นมีการออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ในรูปแบบตัวซีที่ไม่สมมาตรสองข้าง (Dual C Shape Asymmetric) [8] พบว่าสามารถตอบสนองความถี่กว้างได้ ประมาณ 59.94% (ที่ VSWR 2.5:1) ต่อมาได้มีงานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคการสร้างลูปแบบไม่สมมาตรร่วมกับการป้อนแบบขั้น [9] พบว่าสามารถตอบสนองความถี่กว้างได้ ประมาณ 65.23% (ที่ VSWR 2.5:1) ได้มีนักวิจัยทำการปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ โดยปรับค่าแมตช์อิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม ซึ่งได้มีการนำเสนอสายอากาศที่สามารถตอบสนองย่านความถี่กว้างและมีแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบตัวในระนาบเดี่ยว [10] โดยได้นำเสนอสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทคนิคการบากร่อง (Notching) เพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ พบว่าสามารถตอบสนองย่านความถี่กว้างประมาณ 62.77% (ที่ VSWR 2:1) แต่จะมีรูปแบบการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ที่ซับซ้อน โดยใช้การบากร่องเล็ก ๆ เป็นจำนวน 8 ร่อง เพื่อให้เกิดการตอบสนองทางความถี่ให้ครอบคลุมช่วงแถบความถี่ต่ำ นอกจากนี้ ได้มีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการเซาะร่องเพื่อให้เกิดช่วงความถี่เรโซแนนซ์ ดังนี้ ในงานวิจัย [11] เป็นการนำรูปแบบการเซาะร่องบนแผ่นโลหะที่มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดร่องที่ไม่เท่ากัน มีร่องขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดการตอบสนองทางความถี่ 3 ช่วงความถี่ นอกจากนี้การเซาะร่องให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ยังส่งผลให้ความกว้างแถบเพิ่มมากขึ้น งานวิจัย [12] ได้มีการนำเสนอการเซาะร่องเป็นรูปตัวยู (U-shaped Slot) และมีการเพิ่มการเซาะร่องแบบหลาย ๆ ร่อง (Multiple Slots) บริเวณด้านในของร่องรูปตัวยู ส่งผลให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์หลายช่วงความถี่ พบว่าความกว้างแถบมีค่าเพิ่มมากขึ้น ยังมีงานวิจัยที่มีการเซาะร่องเป็นลักษณะรูปตัวเอช (H-shaped Slot) [13] ทำให้เกิดช่วงความถี่เรโซแนนซ์มากกว่าหนึ่งตำแหน่งก็ส่งผลให้เกิดความกว้างแถบเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

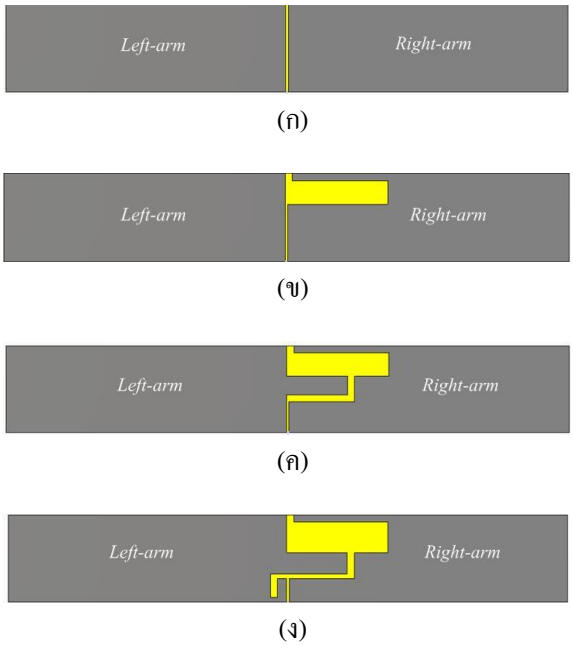
บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ร่วมกับเทคนิคการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่แขนทั้งสองข้างของไดโพล เพื่อควบคุมช่วงแถบความถี่ 2 ย่านความถี่ คือร่องสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ที่บริเวณแขนด้านขวาจะควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ช่วงความถี่ต่ำ และร่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่บริเวณแขนด้านซ้ายจะควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ช่วงความถี่สูง ซึ่งทำให้สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่ออกแบบนี้มีรูปแบบไม่ซับซ้อน มีขนาดกะทัดรัด และสร้างได้ง่าย โดยสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์มีการป้อนสัญญาณแบบกึ่งกลางร่วมกับการป้อนแบบขั้น ส่งผลให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการดีขึ้น

2. การออกแบบสายอากาศและผลการจำลอง

การออกแบบสายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินที่มีแถบความถี่กว้างนั้น โดยใช้พื้นฐานมาจากสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ จะเป็นการเทียบเคียงจากการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น [14] โดยพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์คือ ขนาดความยาว $\left(L = 0.53\lambda_c\right)$ และความกว้าง $\left(W = 0.08\lambda_c\right)$ ของสายอากาศ เมื่อ λ_c คือ ความยาวคลื่นความถี่กลางที่ 666 MHz (ความกว้างแถบระหว่าง 470 MHz ถึง 862 MHz)

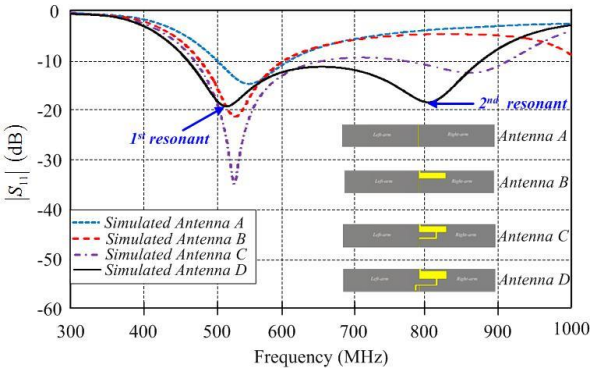
อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของสายอากาศ ไมโครสตริป คือ มีความกว้างแถบที่ค่อนข้างแคบและไม่สามารถรองรับความต้องการของงานวิจัยนี้ได้ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีการเซาะร่องบนแขนของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ตามที่ได้

ทำการศึกษามาในข้างต้น เพื่อให้เกิดกลไกของช่วงความถี่เรโซแนนซ์หลายช่วงแถบความถี่ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ซึ่งมีหลักแนวคิดและขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ก) ถึง (ง)



รูปที่ 1 โครงสร้างแนวคิดการออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์

จากรูปที่ 1 แสดงการปรับเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างเพื่อให้เห็นวิวัฒนาการของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ โดยพื้นฐานแนวคิดการออกแบบมาจากสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ แสดงดังรูปที่ 1 (ก) ต่อมาได้ทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบนแขนด้านขวาของไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ช่วงแถบความถี่ต่ำ แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ข) ขั้นตอนต่อมาได้ทำการศึกษารูปแบบการป้อนในลักษณะแบบขั้น [5], [6] ร่วมกับการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลาง (Center Fed) แสดงดังรูปที่ 1 (ค) และขั้นตอนสุดท้าย ได้ทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบนแขนด้านซ้ายของไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ช่วงแถบความถี่สูง แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ง) ซึ่งเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามโครงสร้างการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2

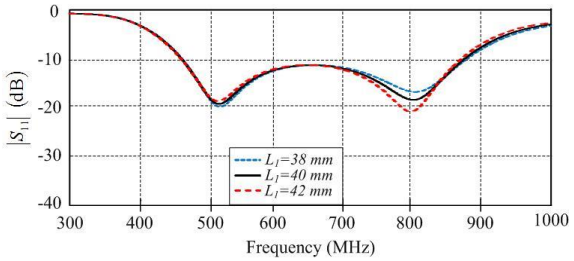


รูปที่ 2 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

การเปรียบเทียบผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ทั้ง 4 รูปแบบ จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า เริ่มต้นการออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ (Antenna A) จะมีการตอบสนองช่วงแถบความถี่เดียว ที่ช่วงความถี่ระหว่าง 510.96 MHz ถึง 595.92 MHz (ที่ค่า $|S_{11}|$ ไม่สูงกว่า -10 dB) ต่อมาได้ทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบนแขนด้านขวาของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ (Antenna B) พบว่า การตอบสนองที่แถบความถี่ต่ำมากยิ่งขึ้นที่ช่วงต้นแถบ อยู่ที่ประมาณ -19.606 dB มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 485.09 MHz ถึง 589.77 MHz จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มรูปแบบการป้อนแบบขั้นร่วมกับการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลาง (Antenna C) พบว่าค่า $|S_{11}|$ ที่ช่วงต้นแถบดีขึ้นและมีการตอบสนองในช่วงความถี่ปลายแถบอีกช่วงความถี่หนึ่ง ที่ช่วงความถี่ต้นแถบตั้งแต่ 477.38 MHz ถึง 633.21 MHz และปลายแถบตั้งแต่ 801.01 MHz ถึง 901.42 MHz ซึ่งช่วงความถี่ตรงกลาง ค่าของ $|S_{11}|$ ยังไม่ดีนัก และในขั้นตอนสุดท้าย โดยเพิ่มการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบนแขนด้านซ้ายของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ (Antenna D) พบว่าค่า $|S_{11}|$ ของความถี่ช่วงปลายแถบดีขึ้น โดยอยู่ที่ประมาณ -16.92 dB และความถี่ช่วงกลางก็มีค่า $|S_{11}|$ ลดลงต่ำกว่า -10 dB จะเห็นได้ว่า ที่ช่วงต้นแถบค่าของ $|S_{11}|$ ต่ำสุด เท่ากับ -17.68 dB ที่ความถี่ 518 MHz และที่ช่วงปลายแถบ ค่าของ $|S_{11}|$ ต่ำสุด เท่ากับ -16.92 dB ที่ความถี่ 801 MHz ซึ่งจากโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ

ไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำการออกแบบ จะทำการพิจารณาในขั้นตอนต่อไป

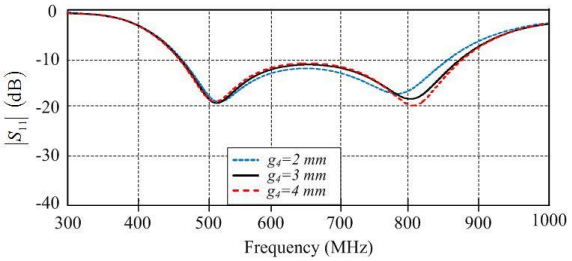
การออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ได้พิจารณาเลือกรูปแบบสายอากาศแบบ D เพื่อให้มีการตอบสนองตลอดช่วงแถบความถี่ โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ เริ่มต้นของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ดังต่อไปนี้ L=240 มม. W=37 มม. g_1=1 มม. ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งได้จากการศึกษาบทความวิจัยที่ผ่านมา [11], [12] ดังแสดงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อเปลี่ยน L_1

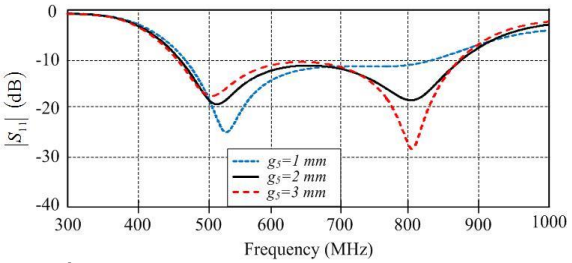
ขั้นตอนแรกโดยใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่บริเวณส่วนบนของแขนด้านขวาเพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ด้านแถบความถี่ต่ำของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_1 ที่ขนาด 38 มม. 40 มม. และ 42 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ L_1 เท่ากับ 40 มม. แสดงดังรูปที่ 3

ขั้นตอนต่อมาเพิ่มเทคนิคการป้อนแบบขั้นร่วมกับการป้อนที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_4 ที่ขนาด 2 มม. 3 มม. และ 4 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ g_4 เท่ากับ 3 มม. ดังรูปที่ 4



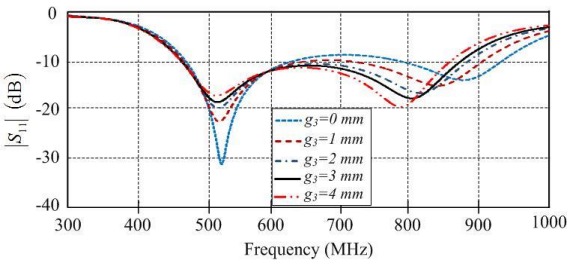
รูปที่ 4 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อเปลี่ยน g_4

ในขั้นตอนเทคนิคการป้อนแบบขั้นร่วมกับการป้อนที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_5 ร่วมด้วย ที่ขนาด 1 มม. 2 มม. และ 3 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ g_5 เท่ากับ 2 มม. ดังรูปที่ 5



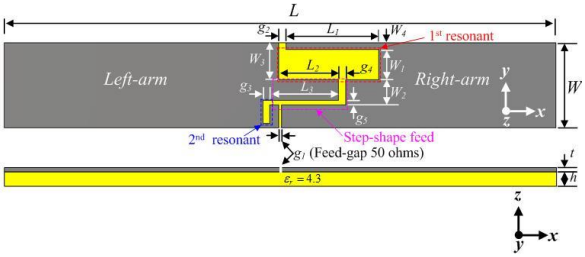
รูปที่ 5 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อเปลี่ยน g_5

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่แขนด้านซ้ายเพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ด้านแถบความถี่สูงของสายอากาศสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อช่วยปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_3 ที่ขนาด 0 มม. 1 มม. 2 มม. 3 มม. และ 4 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ g_3 เท่ากับ 3 มม. ดังรูปที่ 6



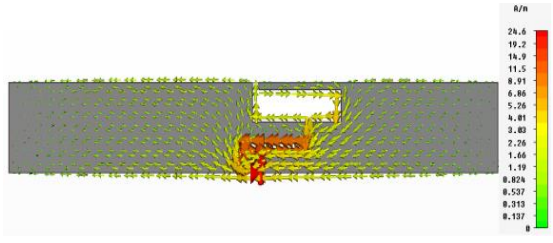
รูปที่ 6 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อเปลี่ยน g_3

จากขั้นตอนการออกแบบและปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมที่สุด ได้โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอ แสดงได้ดังรูปที่ 7

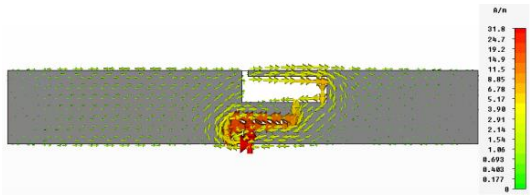


รูปที่ 7 โครงสร้างสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้พัฒนาขึ้น

สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้ทำการออกแบบนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบตามลำดับขั้นตอนที่ผ่านมา โดยทำการป้อนสัญญาณทางเข้าด้วยช่องว่างการป้อนที่จุดกึ่งกลาง (Center Feed-gap: g_1) มีค่าเท่ากับ 1 มม. ร่วมกับเทคนิคการป้อนแบบขั้น ซึ่งกำหนดให้มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า 50 Ω โดยมีวัสดุตัวนำวางอยู่บนแผ่นวัสดุฐานรองชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε_r=4.3) ค่าการสูญเสียบนผิว (Loss tangent: $\tan\delta$) เท่ากับ 0.02 ความสูงของวัสดุฐานรอง (h)=1.6 มม. และความหนาของวัสดุตัวนำ (t)=0.035 มม. โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์และปรับขนาดให้เหมาะสมที่สุด ตลอดช่วงแถบความถี่ปฏิบัติการระหว่าง 470 MHz ถึง 862 MHz นั้น สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ L=240 มม. L_1=40 มม. L_2=26 มม. L_3=36 มม. W=37 มม. W_1=13 มม. W_2=11 มม. W_3=13 มม. W_4=3 มม. g_1=1 มม. g_2=3 มม. g_3=3 มม. g_4=3 มม. และ g_5=2 มม.



(ก)



(ข)

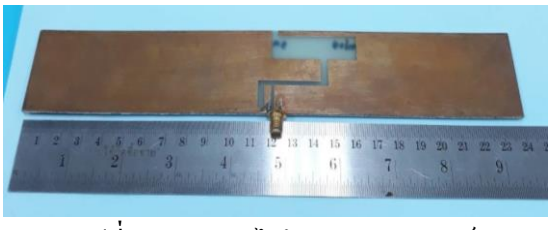
รูปที่ 8 การแจงรูปกระแสที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ก) 518 MHz และ (ข) 801 MHz

เมื่อนำโครงสร้างและขนาดของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์มาทำการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน เพื่อยืนยันผลเฉลยในส่วนของค่าความกว้างแถบที่จำเป็นต้องใช้งาน โดยให้มีค่าใกล้เคียง 50 Ω ซึ่งถือว่าสามารถเกิดการแมตช์ได้ตลอดความกว้างแถบโดยไม่เกิดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันสูงกว่า 2.0:1 เมื่อใช้งานเป็นสายอากาศด้านรับ การจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ได้กำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าใกล้เคียง 50 Ω มากที่สุด เพื่อให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไม่เกิน 1.5 เมื่อนำไปใช้งานจริงที่อิมพีแดนซ์ 75 Ω ก็จะอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 2.0:1 เมื่อต่อเข้ากับขั้วสัญญาณอินพุตของเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล จากผลการจำลองจะพบว่าสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ทางทฤษฎียังคงมีความกว้างแถบระหว่าง 467.99 MHz ถึง 867.64 MHz ซึ่งเป็นไปตามกำหนดที่ตั้งสมมติฐานไว้ และเมื่อพิจารณาผลการจำลองการแจงรูปกระแส (Current Distribution) ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ว่าเป็นไปตามหลักการของสายอากาศไดโพลหรือไม่ เนื่องจากการแจงรูปของกระแสจะส่งผลต่อแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ดังรูปที่ 8 (ก) และ (ข) เป็นการแจงรูปกระแสที่ความถี่เรโซแนนซ์ ที่ 1 (ความถี่ 518 MHz) มีการแจงรูปของกระแสที่บริเวณการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบนแขนด้านขวาของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์และความถี่เรโซแนนซ์ ที่ 2 (ความถี่ 801 MHz) การแจงรูปของกระแสที่บริเวณการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบนแขนซ้ายของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่า การแจงรูปของกระแสที่บริเวณจุดป้อนกำลังตรงกลางจะมีกระแสค่าสูงสุดและค่าของกระแสจะค่อย ๆ ลดลงตลอดความยาวของตัวสายอากาศ

ไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ทั้งสองแขนจนมีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสองข้างตามหลักการทำงานพื้นฐานเช่นเดียวกับสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบเพื่อให้เกิดความกว้างแถบตลอดช่วงความถี่ระหว่าง 470 MHz ถึง 862 MHz

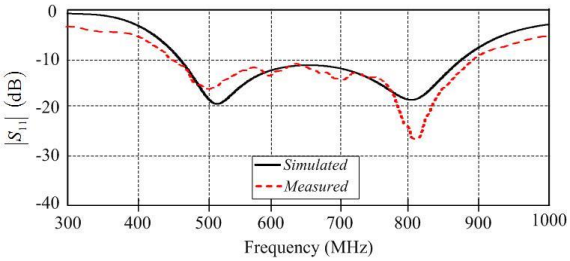
3. การสร้างและการทดสอบสายอากาศ

จากการออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ตามโครงสร้างในหัวข้อที่ผ่านมา แล้วนำมาสร้างสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ตามขนาดโครงสร้างดังรูปที่ 7 มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุตามที่ได้จำลองในโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยได้ทำการบัดกรีขั้วต่อชนิด SMA 50 Ω เข้ากับสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างขึ้น ซึ่งชิ้นงานของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว แสดงดังรูปที่ 9

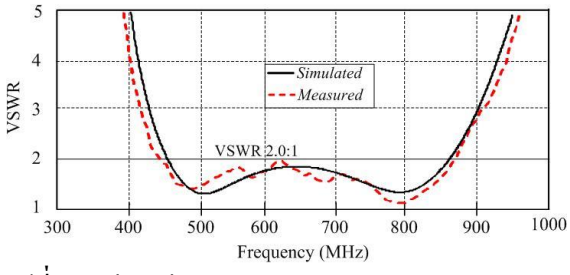


รูปที่ 9 สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์

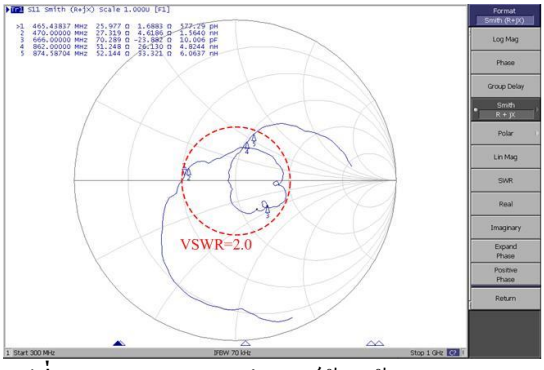
พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการพิจารณาการแมตช์ คือ ผลการวัดทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ในการใช้งานด้านวิศวกรรมสายอากาศค่าของ $|S_{11}|$ ที่ยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือ เท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันที่มีค่าประมาณ 2.0 หรือต่ำกว่า โดยการวัดใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent รุ่น E501C แล้วนำผลที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงได้ดังรูปที่ 10 พบว่า ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีช่วงแถบความถี่อยู่ที่ 465.43 MHz ถึง 874.58 MHz หรือ 61.06% ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมจะมีความกว้างแถบอยู่ที่ 467.99 MHz ถึง 867.64 MHz หรือ 59.84% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยมีการเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ตลอดความกว้างแถบที่ 465.43 MHz ถึง 874.58 MHz ผลที่ได้จากการวัดมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ไม่เกิน 2.0 แสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ



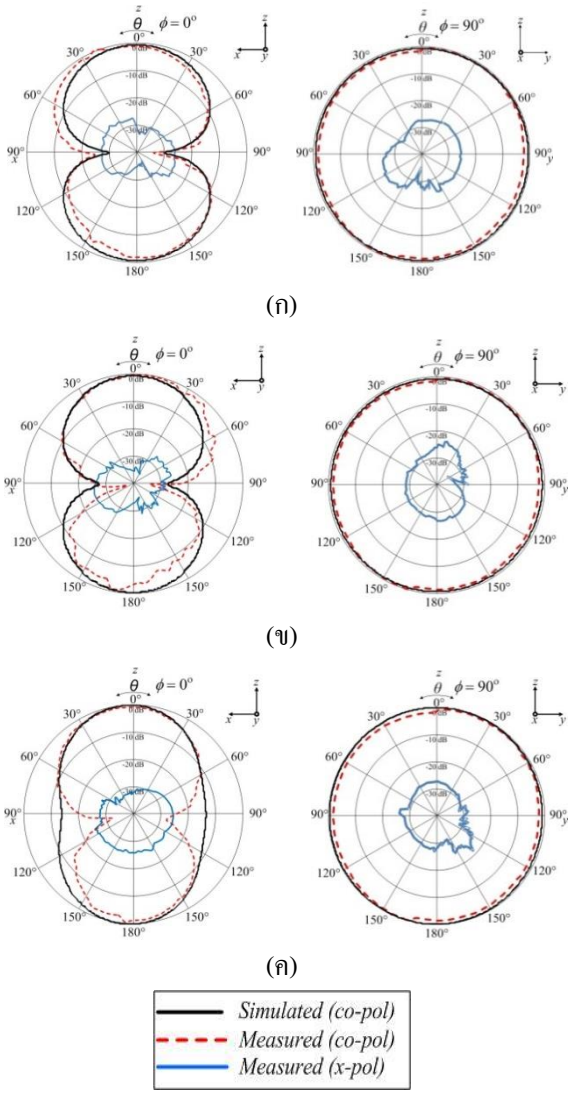
รูปที่ 11 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 12 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์

ในทำนองเดียวกันจากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ในช่วงแถบความถี่ปฏิบัติการที่ความถี่ 465.43 MHz ถึง 874.58 MHz นั้น มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เท่ากับ 27.31+*j*4.62 Ω 70.28-*j*23.88 Ω และ 51.24+*j*26.13 Ω ที่ความถี่ปฏิบัติการ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 12 จะ

เห็นได้ว่า สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอ เมื่อทำการวัดทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะมีข้อดีกว่าสายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินในรูปแบบเดิมที่ได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้ ได้แก่ มีความกว้างแถบที่ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ปฏิบัติการและการแมตช์อิมพีแดนซ์ตลอดช่วงความถี่ปฏิบัติการได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 13 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* ที่ความถี่ (ก) 470 MHz (ข) 666 MHz และ (ค) 862 MHz

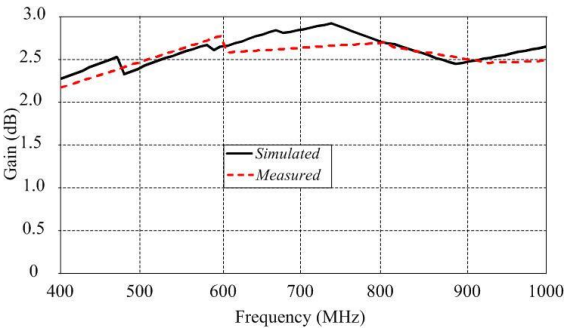
การวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์นั้น จะทำการวัดที่บริเวณสนามไกล (Far-Fields Region) ซึ่งได้คำนวณหาค่าระยะห่าง (R) ของสนามไกลขั้นต่ำจากสมการ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดย (D) คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ และ λ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ใช้งาน จากการคำนวณบริเวณสนามไกลได้ระยะ $R > 0.33$ ม. ซึ่งในการวัดทดสอบนี้ ได้กำหนดให้มีระยะห่าง เท่ากับ 0.8 ม. โดยใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-wave Dipole Antenna) ในแต่ละความถี่ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและหมุนสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ (สายอากาศภาครับ) โดยมีการหมุนรอบแกนหมุนในแต่ละระนาบเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่ง ตั้งแต่มุม 0° ถึง 360° ผลจากการวัดแบบรูปการแผ่กำลังแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane; *xz*-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane; *yz*-plane) โดยได้ทำการพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของสายอากาศใน 3 ช่วงแถบความถี่ (ที่ความถี่ ต่ำ กลาง และสูง) ได้แก่ ที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ เพื่อพิจารณาผลกระทบจากความถี่ที่แตกต่างกันว่าส่งผลต่อแบบรูปการแผ่กำลังหรือไม่ พบว่าสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างขึ้นนี้ มีแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าแบบมีทิศทางในทิศทางด้านหน้าและด้านหลัง โดยมีขนาดความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half-power Beam Width: HPBW) เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลอง/ผลการวัดทดสอบ มีค่าดังนี้ 80.9°/80.5° 69.2°/71.5° และ 55.1°/54.8° ที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบตัว ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ทำการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่เป็นการโพลาไรซ์ไขว้ (Cross Polarization) เพื่อพิจารณาว่าสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำการออกแบบจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในขณะที่ทำงานในแบบของการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงในแนวใดแนวหนึ่งเท่านั้น พบว่า มีความแตกต่างระหว่างความแรงของกำลังโพลาไรซ์ไขว้กับโพลาไรซ์ร่วมอย่าง

มาก โดยในแต่ละระนาบของการวัดจะมีค่าที่แตกต่างกันประมาณ -25 dB และ –24 dB ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 13

การวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ มีขั้นตอนการวัดโดยการสร้างสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นในแต่ละความถี่ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ จากนั้นนำมาคำนวณด้วยสมการการส่งผ่านของฟริส (Friis Transmission Equation) [14] ดังสมการ

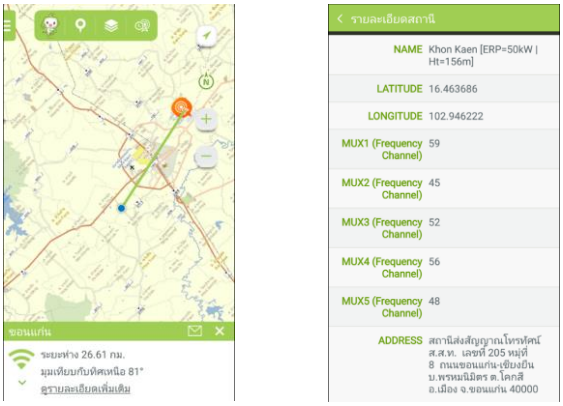
$$(P_r/P_t)=(\lambda/4\pi R)^2 G_{0t}G_{0r}$$

โดยที่ (P_r/P_t) คือ อัตราส่วนของค่ากำลังที่รับได้โดยสายอากาศภาครับต่อค่ากำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและภาคส่ง G_{0t} และ G_{0r} คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและภาครับ ตามลำดับ และ λ คือ ความยาวคลื่นของแต่ละชุดความถี่ที่ใช้ในการวัดทดสอบ เมื่อทำการวัดทดสอบตามลำดับขั้นตอนในทุกความถี่ใช้งาน แล้วสามารถนำค่าอัตราขยายที่ได้จากการวัดมาคำนวณและพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 อัตราขยายของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์

จากรูปที่ 14 เปรียบเทียบผลการวัดค่าอัตราขยายกับผลการจำลองของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างขึ้น พบว่าผลการจำลองมีอัตราขยายอยู่ระหว่าง 2.3 dB ถึง 2.865 dB และผลการวัดมีอัตราขยายอยู่ระหว่าง 2.375 dB ถึง 2.725 dB ตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการ 470 MHz ถึง 862 MHz โดยผลการวัดที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz มีค่าอัตราขยาย เท่ากับ 2.375 dB 2.585 dB และ 2.525 dB ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราขยายของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์มีค่าใกล้เคียงกันตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการ โดยมีค่าอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 2.725 dB ที่ช่วงความถี่ 584 MHz

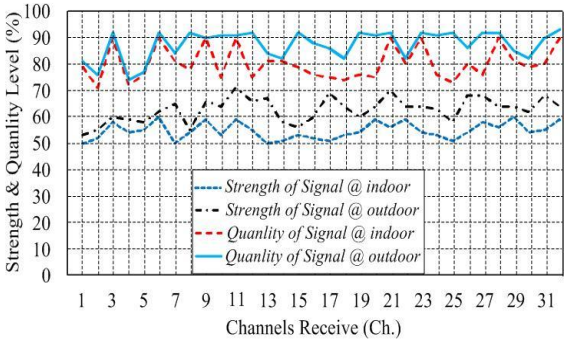


(ก) (ข)

รูปที่ 15 (ก) แผนที่แสดงระยะทางอากาศระหว่างสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์และพื้นที่วัดทดสอบและ (ข) รายละเอียดช่องความถี่สำหรับมัลติเพล็กซ์ของสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์

การทดสอบใช้งานจริงเพื่อประเมินสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างขึ้นให้เห็นเป็นที่ประจักษ์ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้สุ่มพื้นที่ในการวัดทดสอบสัญญาณโทรทัศน์ที่ถูกส่งออกจากสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ด้วยค่ากำลังส่งประสิทธิผล (Effective Radiated Power: ERP) ขนาด 50 กิโลวัตต์ ในรัศมีที่ทำการรับสัญญาณโทรทัศน์ประมาณ 27 กม. ซึ่งรูปแบบการรับสัญญาณโทรทัศน์ส่วนมากที่ผ่านมาจะมีการติดตั้งสายอากาศแบบมีทิศทางไว้บนหลังคาภายนอกอาคารหรือใช้สายอากาศภายในอาคารแบบแอกทีฟ (Active Indoor Antenna) [15] ในการทดสอบการรับสัญญาณโทรทัศน์ของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ โดยวางระดับความสูงของสายอากาศจากพื้นดินไว้ที่ความสูงประมาณ 3.5 ม. เพื่อให้สอดคล้องกับการติดตั้งใช้งานจริง ทดสอบการรับสัญญาณโทรทัศน์เปรียบเทียบในลักษณะการติดตั้งสายอากาศไว้ที่บริเวณภายในและภายนอกอาคาร โดยแผนที่แสดงระยะทางอากาศระหว่างสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์และพื้นที่วัด

ทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 15 (ก) ส่วนรายละเอียดข้อมูลของสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ของผู้บริหารโครงข่ายโทรทัศน์ระบบดิจิทัลหรือมัลติเพล็กซ์ (Multiplex: MUX) ซึ่งแสดงจำนวนและช่องความถี่ของมัลติเพล็กซ์ที่ให้บริการ โดยมีจำนวนทั้งหมด 5 มัลติเพล็กซ์ ใช้ช่องความถี่สำหรับมัลติเพล็กซ์ ได้แก่ ช่องความถี่ที่ 59 45 52 56 และ 48 สำหรับมัลติเพล็กซ์ที่ 1 2 3 4 และ 5 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 15 (ข)



รูปที่ 16 ระดับความแรงและคุณภาพของการรับสัญญาณโทรทัศน์โดยทดสอบการรับของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์

จากผลการวัดทดสอบการรับสัญญาณโทรทัศน์ ซึ่งมีการส่งสัญญาณโทรทัศน์จำนวนทั้งหมด 5 มัลติเพล็กซ์ โดยการใช้สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ต่อเข้ากับขั้วสัญญาณอินพุตของเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล ซึ่งติดตั้งไว้ที่ความสูงประมาณ 3.5 ม. ระยะทางอากาศจากสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ประมาณ 27 กม. เมื่อติดตั้งสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ไว้ภายในอาคาร พบว่าสามารถรับสัญญาณโทรทัศน์ได้ทั้งหมดจำนวน 32 ช่องรายการ มีระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ มีค่าประมาณ 50-60% และคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งปรากฏอยู่บนจอภาพเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ มีค่าประมาณ 71-90% ขั้นตอนต่อมาได้เปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ไว้ภายนอกอาคาร จะได้ว่า สามารถรับสัญญาณได้ทั้งหมดจำนวน 32 ช่องรายการ ระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ มีค่าประมาณ 53-71% และคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งปรากฏอยู่บนจอภาพเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ มีค่าประมาณ 74-93% แสดงดังรูปที่ 16 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า จากการออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วทำการวัดทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศในห้องปฏิบัติการ โดยการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการวัดทดสอบ จะมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ส่วนผลการทดสอบนำไปต่อใช้สำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์จริงของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์นั้น พบว่าสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุมตลอดย่านความถี่ได้เป็นอย่างดี

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถบความถี่กว้างสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดิน โดยการออกแบบใช้พื้นฐานจากสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ร่วมกับเทคนิคการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่แขนทั้งสองข้างของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความง่ายสำหรับการออกแบบและการสร้าง โดยให้มีสภาวะการเกิดความถี่เรโซแนนซ์เพื่อควบคุมช่วงแถบความถี่ตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการ โดยมีการป้อนแบบช่องตรงกึ่งกลางร่วมกับการป้อนแบบขั้น ซึ่งส่งผลให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ตลอดทั้งย่านความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz ได้ดียิ่งขึ้น การออกแบบสายอากาศได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศให้มีโครงสร้างที่มีขนาดกะทัดรัดเป็นอย่างมาก โดยมีขนาดเท่ากับ 37x240 มม. ซึ่งเหมาะสำหรับการพกพา สามารถใช้งานได้ดีทั้งการติดตั้งสายอากาศภายในและภายนอกอาคาร ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยและโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตามสัญญาเลขที่ ENG08/64

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Office of The National Broadcasting and Telecommunication Commission. [Online] https://www.nbtc.go.th/getattachment/Services/academe/%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5/Spectrum-and-Standard-for-Digital-TV/Spectrum-and-Standard-for-Digital.

[2] Office of The National Broadcasting and Telecommunication Commission. [Online] http://www.nbtc.go.th/getattachment/News/Information/38862/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%99%E0%B8%9A.pdf.aspx.

[3] Y. Ya-li, F. Guang, M. Hirano, G. Shu-xi and Dong-chao, "Design of a wide-band Yagi-Uda Antenna Using Differential Evolution Algorithm," International Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE2010), pp. 1-4, 2010.

[4] C. M. Butler, "The Equivalent Radius of a Narrow Conducting Strip," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-30, No. 4, pp.755-758, 1982.

[5] Y. W. Chi and K. L. Wong, "Wideband Printed Dipole Antenna for DTV Signal Reception," IEEE Region 10 Conference (TENCON2007), pp. 1-4, 2007.

[6] Y. W. Chi, K. -L. Wong and S.-W. Su, "Broadband Printed Dipole Antenna With a Step-Shaped Feed Gap for DTV Signal Reception," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 11, pp. 3353-3356, 2007.

[7] S. Y. Lin, Y. C. Chu, Y. Z. Lin and S. K. Yen, "Concavo-Convex Dipole for DTV/GSM Applications," Asia Pacific Microwave Conference (APMC2009), pp. 1763-1766, 2009.

[8] M. Bhujbal, D. C. Karia and A. Desai, "Planar Dipole Antenna Design for DTV Broadcasting Applications," International Conference on Advances in Communication and Computing Technologies, pp. 1-4, 2014.

[9] D. C. Karia, M. Bhujbal and A. Desai, "Wideband Printed Dipole Antenna with Embedded Loops and Coupling Patches for Digital TV Signal Reception," International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI2014), pp. 2512-2516, 2014.

[10] S. Pimpol and R. Wongsan, "Bandwidth Improvement of Band-Notched Printed Dipole Antenna for DTV Signal Reception," 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT2013), pp. 138-142, 2013.

[11] K. L. Wong and C. Y. Huang, "Triple-Wideband Open-Slot Antenna for the LTE Metal-Framed Tablet device," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 63, No. 12, pp. 5966-5971, 2015.

[12] H. T. Hu, F. C. Chen and Q. X. Chu, "A Wideband U-Shaped Slot Antenna and Its Application in MIMO Terminals," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 15, pp. 508-511, 2016.

[13] C. Wang, Y. Chen and S. Yang, "Bandwidth Enhancement of a Dual-Polarized Slot Antenna Using Characteristic Modes," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 17, No. 6, pp. 988-992, 2018

[14] C. A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design," John Wiley & Sons. New York.

[15] Office of The National Broadcasting and Telecommunication Commission. [Online] https://broadcast.nbtc.go.th/data/academic/file/590700000003.pdf