

สายอากาศกะทัดรัดที่ครอบคลุมสามย่านความถี่สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย A Compact Tri-Band Antenna for Wireless Communications

สุธาสินี ละมูลตรี^{1*} สุภาดา ศรีสุโคตร¹ ไกรสุรย์ สุขเพ็ญพะเนา¹ และเจษฎา กุละวงศ์¹
Suthasinee Lamultree^{1*} Supada Srisukhot¹ Kraisoon Sukphengphanao¹ and
Chaetsada Kulawong¹

Received: October 15, 2019; Revised: February 1, 2020; Accepted: March 3, 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลีที่เชื่อมต่อด้วยช่องเปิดวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีปริมาตรตัวแอลแบบกลับด้านและมีความถี่ปฏิบัติการสามย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย โครงสร้างสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด และน้ำหนักเบา ประกอบด้วยโมโนโพลีสี่เหลี่ยมที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นพิมพ์บนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ขนาด 50 x 50 มม. มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 สูง 1.6 มม. สายอากาศนี้ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วม 50 โอห์ม มีวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบตัวแพร่กระจายคลื่นเพื่อบังคับลำคลื่นของสายอากาศให้แพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง นอกจากนี้ยังมีปริมาตรตัวแอลกลับด้านร่วมด้วย เพื่อช่วยปรับจูนการแมตช์อิมพีแดนซ์ ในการออกแบบได้ใช้โปรแกรมจำลองผลทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศ พบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน โดยมี $S_{11} < -10$ dB ครอบคลุมย่านความถี่ 1.50 - 2.22 2.77 - 3.81 และ 4.45 - 6.37 GHz มีค่าอัตราขยายสูงสุดของแต่ละย่านเท่ากับ 1.52 3.44 และ 2.72 dBi ตามลำดับ

คำสำคัญ : สายอากาศกะทัดรัด; สายอากาศที่ครอบคลุมสามย่านความถี่; การสื่อสารไร้สาย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

* Corresponding Author E - mail Address: suthasinee.la@rmuti.ac.th

Abstract

This paper proposes a tri-band rectangular monopole antenna surrounded by rectangular ring with symmetrical perturbation inverted L-shape strips for wireless communications. The antenna structure is simple, compact and lightweight. It is printed on FR4 substrate of dimensions of 50×50 mm. with the relative permittivity of 4.3, high of 1.6 mm and fed by coplanar waveguide with 50-ohm impedance. This presented antenna consists of a monopole rectangular radiating patch, a pair of inverted L-shape strip for improving the impedance matching, and a rectangular ring to control its radiation to be bidirectional pattern. In the processes, an electromagnetic microwave simulation tool is employed to investigate optimum parameters. It is found that both simulated and measured results are in good agreement. This antenna provides $S_{11} < -10$ dB covered 1.50 - 2.22, 2.77 - 3.81, and 4.45 - 6.37 GHz with maximum gains of 1.52, 3.44, and 2.72 dBi, respectively.

Keywords: Compact Antenna; Tri-band Antenna; Wireless Communications

บทนำ

การสื่อสารโทรคมนาคมและการสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวัน และการทำงานของมนุษย์อย่างมาก การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้บริการและรองรับความต้องการได้หลากหลาย ระบบเป็นที่ต้องการเป็นอย่างยิ่ง การพัฒนาสายอากาศซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สายนี้ เป็นอีกส่วนที่ได้รับความสนใจในการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [1] - [6] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบสายอากาศให้สามารถปฏิบัติการได้หลายย่านความถี่ ซึ่งจะช่วยลดจำนวนอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารที่ใช้งานในย่านความถี่หลาย ๆ ย่าน เช่น สำหรับ Wifi ที่ใช้ทั้ง 2.4 GHz และ 5 GHz [2] หรือ GSM/3G/4G ที่ใช้ย่าน 800 900 1800 2100 MHz [7] - [9] เป็นต้น ซึ่งหากจะหาคำครอบคลุมทั้งการใช้งานโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล และโครงข่ายโทรคมนาคมก็จะออกแบบให้ครอบคลุมการทำงานในย่านความถี่นั้น ๆ อีกระบบการสื่อสารไร้สายที่มีความน่าสนใจและกำลังจะมีการนำมาใช้งานในอนาคตอันใกล้คือ ระบบ 5G ที่มีประกาศย่านความถี่ใช้งานสามย่าน คือ ย่านความถี่ต่ำในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 GHz ย่านความถี่กลางในช่วงความถี่ 1 - 6 GHz และย่านความถี่สูงในช่วงความถี่มากกว่า 24 GHz [10] - [11] โดยสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับปฏิบัติการได้จะพิจารณาที่โครงสร้างของสายอากาศที่แข็งแรง น้ำหนักเบา มีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่ำกว่า -10 dB (ในงานวิจัยนี้จะพิจารณา S_{11} แทน) และค่าอัตราขยาย (Gain) ที่เหมาะสมตลอดย่าน

การออกแบบสายอากาศเพื่อปฏิบัติการหลายย่านความถี่นี้ ได้มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัด คำนึงค่ากับการลงทุน โดยได้ออกแบบสายอากาศให้สามารถปฏิบัติการได้หลายย่านความถี่ย่อย สำหรับรองรับเทคโนโลยีในอนาคตระบบ 5G ที่ย่านความถี่ต่ำ 1800 MHz และย่านความถี่ช่วงกลางระหว่าง 3300 - 3800 MHz และ 4400 - 5000 MHz [10] - [11] นอกจากนี้ยังสามารถ

ปฏิบัติการได้สำหรับระบบจีเอสเอ็ม (GSM) สำหรับมาตรฐาน GSM 1800 ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 1710 - 1785 MHz และ 1805 - 1880 MHz [7] ระบบการเชื่อมต่อโครงข่ายร่วมกันทั่วโลกด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Wi-MAX) สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามมาตรฐาน IEEE 802.16e ครอบคลุมย่านความถี่ 3300 - 3800 MHz [8] - [9] และระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ครอบคลุมย่านความถี่ 5.150 - 5.350 5.470 - 5.725 และ 5.725 - 5.850 GHz [2] ในการออกแบบสายอากาศที่สามารถปฏิบัติการได้หลายระบบนี้ได้มีการนำเสนอหลากหลายเทคนิคและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [8] - [9], [12] - [17] เช่น สายอากาศโมโนโพลที่พิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์รูปต่าง ๆ เช่น แบบคดเคี้ยวรูปตัวที โครงสร้างหลายมิติ รูปทรงบานพร้อมปลอกแขนรูปตัววี (Flared Shape with V-Sleeve) และรูปตัววาย เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์หลายความถี่และครอบคลุมการปฏิบัติการหลายย่าน แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างสายอากาศที่กล่าวมานี้บางโครงสร้างยังมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ ต่อมาได้มีการนำเสนอเทคนิคอื่น ๆ เพื่อลดขนาดโครงสร้างของสายอากาศด้วย เช่น เทคนิคการเจาะร่อง การเพิ่มจำนวนช่องเปิด (Slots) การป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปทรงต่าง ๆ เช่น รูปตัวแอล การเพิ่มช่องเปิดรูปตัวยู (U-Slot) การออกแบบช่องเปิดแบบคดเคี้ยว การเพิ่มช่องเปิดรูปทรงต่าง ๆ เพื่อให้เกิดโหมดการทำงานที่ต่างกัน และการออกแบบสายอากาศจากวัสดุยิ่งยวด (Metamaterial) เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มส่วนต่าง ๆ เข้ามานี้ทำให้โครงสร้างสายอากาศซับซ้อนยิ่งขึ้น

บทความนี้นำเสนอสายอากาศแพตช์สี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบกราวด์ร่วม และมีวงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบ และเพื่อให้สามารถปฏิบัติการได้สามย่านความถี่ ได้เพิ่มปรสิตรูปตัวแอลกลับด้านที่ด้านข้างของวงแหวนสี่เหลี่ยม โครงสร้างของสายอากาศนี้มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และไม่ซับซ้อน ในการออกแบบได้เริ่มจากการออกแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ความถี่ปฏิบัติการย่านกลาง โดยออกแบบวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้เกิดคลื่นเป็นใหญ่ (Dominant Mode) TE_{10} ที่ความถี่ย่านล่าง และทำการปรับแต่งขนาดของสายอากาศเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมก่อน จากนั้นได้เพิ่มปรสิตรูปตัวแอลกลับด้านที่ด้านข้างวงแหวนสี่เหลี่ยมเพื่อปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์ด้านบน สำหรับรายละเอียดในการออกแบบ และการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศได้แสดงในหัวข้อต่อไป

การออกแบบและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศ

1. โครงสร้างของสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศที่ครอบคลุมสามย่านความถี่สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายนี้ ได้เลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ความถี่กลาง 3.5 GHz ทั้งนี้เพราะโครงสร้างไม่ซับซ้อน แข็งแรง และน้ำหนักเบา โดยแพตช์สี่เหลี่ยมมีความกว้าง w , ความยาว l , ที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วมพิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR-4 ที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ϵ_r เท่ากับ 4.3 วางบนวัสดุรองรับ (Substrate) ที่มีความสูง h เท่ากับ 1.6 มม. และมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Tangent) δ เท่ากับ 0.02 แพตช์สี่เหลี่ยมนี้ล้อมรอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยมีความหนาแน่นด้านข้าง d_1 และความหนาหน้ากราวด์ด้านบน d_2 ช่องเปิดสี่เหลี่ยมกว้าง a และความยาว b ซึ่งภายในช่องเปิดมีปรสิตรูปตัวแอลแบบกลับด้านที่บริเวณหน้ากราวด์ด้านข้าง โดยฐานปรสิตรูปตัวแอลมีความกว้าง l_1 มีความหนา l_2 และความยาว l_3 ติดด้านข้างวงแหวนสี่เหลี่ยม

ที่ตำแหน่งความสูง p สายอากาศนี้ป้อนสัญญาณโดยใช้สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม โดยมีความกว้าง w_f ความยาว l_f โดยช่องว่างระหว่างขอบล่างของแพตช์สี่เหลี่ยมกับระนาบกราวด์เท่ากับ s ส่วนความสูงของระนาบกราวด์เท่ากับ l_c และช่องว่างระหว่างระนาบกราวด์ทั้งสองด้านกับสายนำสัญญาณมีค่า g ดังแสดงในรูปที่ 1

ในการวิจัยเริ่มต้นได้กำหนดขนาดของวัสดุฐานรองมีขนาดความกว้าง w_g เท่ากับ 50 มม. และขนาดความยาว l_g เท่ากับ 50 มม. และได้ออกแบบตัวแพร่กระจายคลื่นรูปสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ขึ้นที่ความถี่ปฏิบัติการ 3.5 GHz โดยคำนวณจากสมการที่ (1) - (3) ที่ได้ทำการชดเชยผลที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effect) ด้วย [17] - [18] พบว่าค่าเริ่มต้นสำหรับความกว้าง w_r เท่ากับ 26 มม. และความยาว l_r เท่ากับ 22 มม.

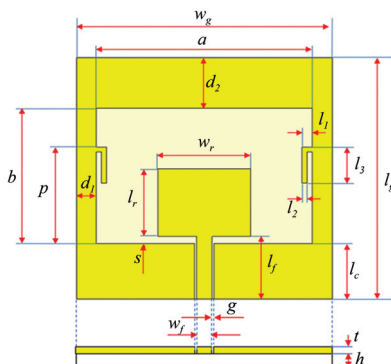
$$w_r = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$l_r = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 0.824h \left[\frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w_r}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w_r}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (2)$$

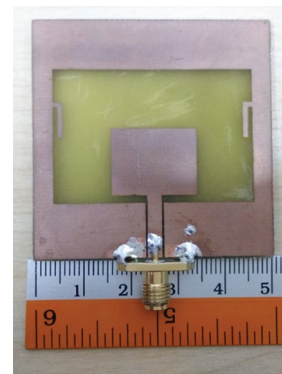
$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w_r}}} \right] \quad (3)$$

โดย

ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant)



(ก) รูปจำลอง



(ข) สายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ

นอกจากนี้ได้เพิ่มวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าล้อมรอบแพตช์สี่เหลี่ยม เพื่อบังคับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยใช้ทฤษฎีท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ TE_{10} [19] โดยกำหนดให้ความกว้าง $a = 1.5b$ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ a เท่ากับ 42 มม. สำหรับความหนาของวงแหวนในเบื้องต้นได้กำหนดความหนา d_1 และ d_2 เท่ากับ 4 และ 10.5 มม. ตามลำดับ ในการป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบกราวด์ร่วม เพื่อให้แมตซ์อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ดังนั้นสามารถคำนวณความกว้าง w_f และความยาว l_f ของสายป้อนสัญญาณได้จากสมการที่ (4) - (5) [18] โดยกำหนดให้ Z_0 เท่ากับ 50 โอห์ม และความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ 3.5 GHz ดังนั้น w_f เท่ากับ 3 มม. และ l_f เท่ากับ 13 มม. ตามลำดับ ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณ g เท่ากับ 0.4 มม. สำหรับค่าความยาวระนาบกราวด์ l_c เท่ากับ 11.5 มม. ระยะห่างระหว่างขอบล่างแพตช์สี่เหลี่ยมและระนาบกราวด์ s เท่ากับ 1.5 มม. ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะใช้เป็นค่าคงที่ตลอดบทความ

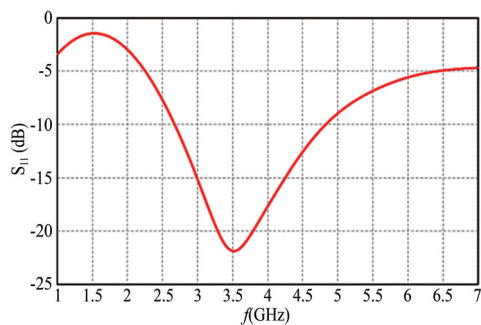
$$w_f = \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln \left(2 \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln \left(\frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (4)$$

$$l_f = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (5)$$

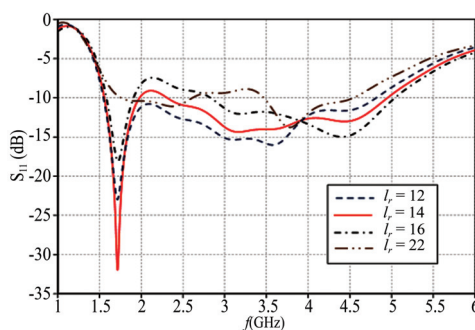
$$\text{โดย} \quad B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

2. การศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยได้เริ่มต้นการออกแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่ความถี่ 3.5 GHz ด้วยสมการที่ (1) - (3) พบว่าสายอากาศนี้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 3.5 GHz มีย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์แคบครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.67 - 4.82 GHz ดังรูปที่ 2 จากนั้นทำการปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์และบังคับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการเพิ่มวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง a เท่ากับ 42 มม. และความยาว b เท่ากับ 28 มม. ที่ล้อมรอบแพตช์สี่เหลี่ยมและทำหน้าที่ระนาบกราวด์ร่วมด้วย โดยได้ศึกษาผลกระทบของความยาวแพตช์สี่เหลี่ยมร่วมด้วย พบว่าการเพิ่มวงแหวนสี่เหลี่ยมช่วยเพิ่มความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้น กล่าวคือเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 1.8 และ 3.5 GHz ดังรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาผลกระทบของความยาวแพตช์สี่เหลี่ยม พบว่าแพตช์สี่เหลี่ยมที่มีความยาวสั้นลงทำให้ช่วงกว้างความถี่ย่าน 3.5 GHz กว้างมากขึ้น สำหรับบทความนี้ได้เลือกค่าที่ดีที่สุดของความยาวแพตช์เท่ากับ 14 มม. เนื่องจากการแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีที่สุดและครอบคลุมสองย่านความถี่ จากนั้นจะพิจารณาความกว้างแพตช์สี่เหลี่ยมที่เหมาะสมต่อไป

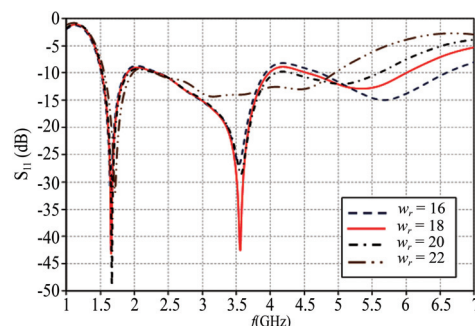


รูปที่ 2 S_{11} ของสายอากาศแพตช์สี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม



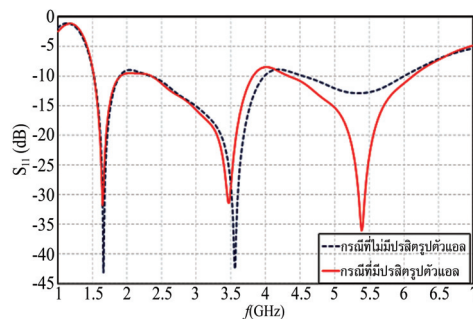
รูปที่ 3 ผลกระทบของยาวแพตช์ l_r ที่มีผลต่อ S_{11}

รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของความกว้างแพตช์สี่เหลี่ยม w_r ที่มีผลต่อ S_{11} สำหรับกรณีที่ยังไม่รวมผลกระทบจากปฏิกิริยาตัวแอล พบว่าค่าความกว้างแพตช์สี่เหลี่ยม w_r ยิ่งสั้นจะยิ่งส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ย้ายบนเลื่อนขึ้นไปถี่ความถี่สูง แต่ที่ย่านความถี่ย่านล่างและย่านความถี่กลางเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่เดิม แต่การแมตช์อิมพีแดนซ์ดีขึ้น เมื่อพิจารณา S_{11} ที่ต่ำกว่า -10 dB สำหรับ $w_r = 16$ มม. และ $w_r = 18$ มม. พบว่าทั้งสองกรณีนี้มีช่วงปฏิบัติการสามย่านความถี่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการออกแบบกล่าวคือ ย่านความถี่ด้านล่างตั้งแต่ 1.72 - 1.87 GHz ที่ย่านความถี่กลาง 3.3 - 3.8 GHz และที่ย่านความถี่สูง 5.2 - 5.8 GHz โดยพบว่า $w_r = 18$ มม. มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่กลางดีกว่ากรณี $w_r = 16$ มม. ดังนั้นจึงเลือก $w_r = 18$ มม.

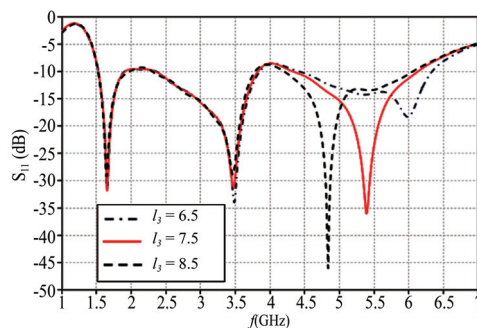


รูปที่ 4 ผลกระทบของความกว้างแพตช์สี่เหลี่ยม w_r ที่มีผลต่อ S_{11}

เพื่อปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่สูงให้สามารถปฏิบัติการได้สามย่านความถี่ที่ชัดเจนขึ้น ได้เพิ่มปรสิตรูปตัวแอลแบบกลับด้านร่วมด้วย โดยกำหนดให้ความหนา l_2 เท่ากับ 1 มม. และออกแบบความยาวของปรสิตรูปตัวแอล l_3 ยาวเท่ากับ $\lambda_g/4$ (ที่ความถี่ 5.5 GHz) [8] พบว่าเมื่อเพิ่มปรสิตรูปตัวแอลกลับด้านนี้ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 5.5 GHz ได้ดียิ่งขึ้นและมีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ที่ย่านความถี่แรกตั้งแต่ 1.52 - 1.90 GHz ย่านความถี่ที่สองตั้งแต่ 2.35 - 3.82 GHz และย่านความถี่ที่สามตั้งแต่ 4.34 - 6.12 GHz ดังรูปที่ 5 เมื่อปรับความยาว l_3 เท่ากับ 8.5 7.5 และ 6.5 มม. พบว่ายิ่ง l_3 ยาวมากขึ้นมีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงเท่านั้นเลื่อนขึ้นไปที่ย่านความถี่สูง กล่าวคือ เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 4.8 5.4 และ 6 GHz ตามลำดับ ส่วนที่ความถี่ย่านล่างและย่านกลางไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในบทความนี้ได้เลือก $l_3 = 7.5$ มม. เนื่องจากเกิดความถี่เรโซแนนซ์ใกล้กับความถี่กลาง 5.5 GHz มากที่สุดดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ได้พิจารณาผลกระทบของตำแหน่งความสูงของฐานปรสิตรูปตัวแอล p และความกว้างของฐานปรสิตรูปตัวแอล l_1 ร่วมด้วย

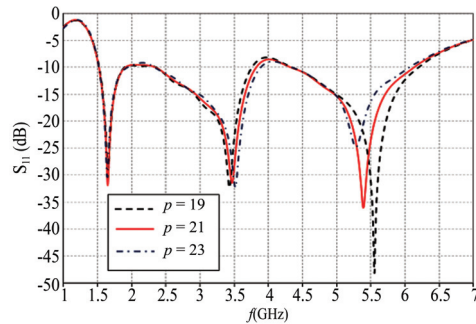


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบสายอากาศที่นำเสนอกรณีที่ไม่มีการปรับปรสิตรูปตัวแอลกลับด้าน



รูปที่ 6 ผลกระทบของความยาวปรสิตรูปตัวแอล l_3 ที่มีผลต่อ S_{11}

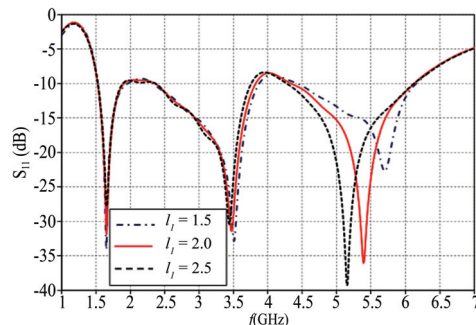
รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของตำแหน่งของปรสิตรูปตัวแอลแบบกลับด้าน p ต่อ S_{11} พบว่าปรสิตรูปตัวแอลกลับด้านนี้มีผลกระทบที่ย่านความถี่สูง 5.5 GHz โดยการเลื่อนตำแหน่ง p ให้สูงขึ้นทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงเลื่อนลงไปที่ความถี่ต่ำเล็กน้อย แต่ช่วงกว้างความถี่เท่าเดิม ในการออกแบบนี้ได้เลือกตำแหน่ง p เท่ากับ 21 มม. เนื่องจากที่ย่านความถี่สูงเกิดความถี่เรโซแนนซ์ใกล้กับความถี่กลาง 5.5 GHz และมีช่วงปฏิบัติการครอบคลุมย่านความถี่กลางที่ต้องการ



รูปที่ 7 ผลกระทบของตำแหน่งความสูงปริศตรูปตัวแอล p ที่มีผลต่อ S_{11}

สำหรับผลกระทบของความกว้างฐานของปริศตรูปตัวแอล l_1 ต่อ S_{11} ได้แสดงในรูปที่ 8 พบว่ายิ่งความกว้างฐานยาวขึ้น ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูง 5.5 GHz จะเลื่อนไปยังความถี่ต่ำ สำหรับความกว้าง l_1 เท่ากับ 1.5 2 และ 2.5 มม. พบว่าเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงที่ 5.7 5.1 และ 5.4 GHz ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือก l_1 เท่ากับ 2 มม. เนื่องจากเกิดความถี่เรโซแนนซ์ใกล้กับความถี่กลาง 5.5 GHz มากที่สุดนอกจากนี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของฐานปริศติไม่ได้มีผลกระทบต่อย่านความถี่ต่ำที่ 1.7 และ 3.5 GHz

จากผลการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้สรุปการออกแบบสายอากาศ ดังตารางที่ 1 พบว่าสายอากาศที่ออกแบบนี้มีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ปฏิบัติการสามย่านความถี่ กล่าวคือ ย่านล่างความถี่ 1.52 - 1.90 GHz ความถี่ย่านกลางความถี่ 2.34 - 3.82 GHz และความถี่ย่านบนความถี่ 4.33 - 6.12 GHz ซึ่งมีคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ครอบคลุมย่านความถี่ปฏิบัติการสำหรับระบบ 5G ย่านความถี่ต่ำ 1800 MHz และย่านความถี่กลาง 3300 - 3800 และ 4400 - 5000 MHz นอกจากนี้ยังสามารถปฏิบัติการร่วมกับระบบ GSM-1800 WI-MAX และ WLAN โดยมีค่าอัตราการขยายสูงสุดที่ย่านล่างเท่ากับ 2.86 dBi ที่ย่านความถี่กลางเท่ากับ 3.66 dBi และที่ย่านบนเท่ากับ 5.6 dBi ดังรูปที่ 9 ข้อสังเกต จากรูปที่ 9 พบว่าค่าอัตราการขยายสูงสุดเกิดขึ้นที่ความถี่ปฏิบัติการของ WLAN 5.5 GHz (5.150 - 5.85 GHz) มีค่า 3.16 dBi

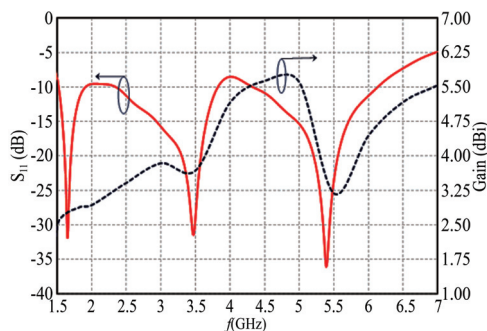


รูปที่ 8 ผลกระทบของความกว้างของฐานปริศตรูปตัวแอล l_1 ที่มีผลต่อ S_{11}

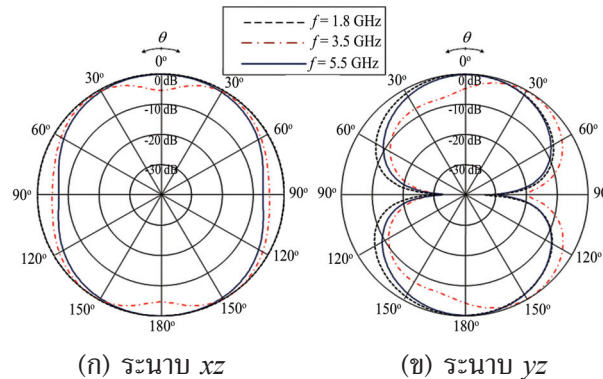
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
w_g	50	p	21
l_g	50	g	0.4
w_r	18	s	1.5
l_r	14	t	0.035
w_f	3	d_1	4
l_f	13	d_2	10.5
l_c	11.5	l_1	2
a	42	l_2	1
b	28	l_3	7.5

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทางที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth: HPBW) ในระนาบ xz มีค่าเท่ากับ 179 องศา และ 84 องศา สำหรับระนาบ yz ที่ความถี่ 3.5 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 112 และ 68 องศา สำหรับระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ที่ความถี่ 5.5 GHz พบว่าค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 56 และ 53 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ผลการจำลอง S_{11} และอัตราขยายของสายอากาศ

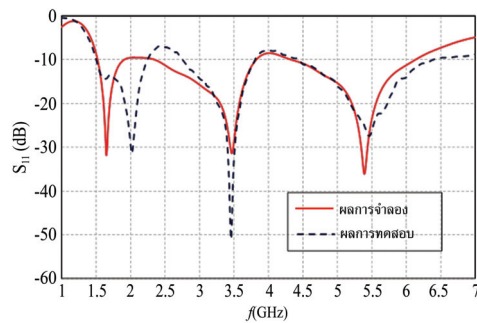


รูปที่ 10 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

การทดสอบสายอากาศ

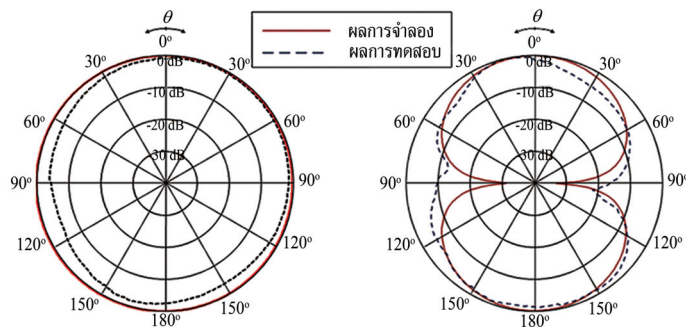
เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการออกแบบและการวิเคราะห์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างและการทดสอบสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผล ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C สำหรับคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบ ได้แก่ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ (ดังรูปที่ 1(ข)) ได้สร้างตามขนาดที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 โดยส่วนที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นสร้างจากตัวนำทองแดงหนา 0.03 มม. เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 18 มม. ความยาว 14 มม. พิมพ์บนวัสดุรองรับที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 สูง 1.6 มม. โดยมีระนาบกราวด์แบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมพิมพ์บนวงจรพิมพ์ด้านบน (ด้านบน) มีความกว้างเท่ากับ 23.1 มม. และความยาวเท่ากับ 11.5 มม. มีช่องว่างระหว่างเส้นป้อนสัญญาณและระนาบกราวด์เท่ากับ 0.4 มม. เส้นป้อนสัญญาณกว้าง 3 มม. และยาว 13.5 มม. นอกจากนี้ที่ระนาบกราวด์ใต้พิมพ์วงแหวนสี่เหลี่ยมมีความกว้างและความยาวด้านในเท่ากับ 42 และ 28 มม. ตามลำดับ เพื่อทำหน้าที่บังคับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ช่องเปิดสี่เหลี่ยมด้านในโหลดด้วยปรสิตรูปตัวแอลกลับด้านที่มีความยาวเท่ากับ 7.5 มม. หนา 1 มม. มีฐานกว้าง 2 มม. ที่ตำแหน่งความสูง 21 มม. ดังตารางที่ 1 สำหรับการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศได้ทำการเชื่อมต่อด้วยตัวเชื่อมต่อแบบ SMA ที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม

สำหรับการเข้ากันได้ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกับสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์มนั้น พิจารณาจากค่า S_{11} โดยเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ $|S_{11}| < -10$ dB จากรูปที่ 11 พบว่าผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศที่ออกแบบนี้มีความสอดคล้องกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ครอบคลุมย่านความถี่ปฏิบัติการสำหรับระบบ 5G ที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่กลาง นอกจากนี้ยังครอบคลุมระบบ GSM - 1800 Wi-MAX และ WLAN กล่าวคือ จากการจำลองเกิดความถี่เรโซแนนซ์เกิดขึ้นที่ความถี่ย่านล่าง 1.65 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 1.52 - 1.90 GHz) ความถี่ย่านกลาง 3.43 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 2.34 - 3.82 GHz) และความถี่ย่านบน 5.39 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 4.33 - 6.12 GHz) ส่วนผลที่ได้จากการทดสอบเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ย่านล่าง 2.02 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 1.50 - 2.22 GHz) ความถี่ย่านกลาง 3.46 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 2.77 - 3.81 GHz) และความถี่ย่านบน 5.44 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 4.45 - 6.37 GHz) ดังรูปที่ 11



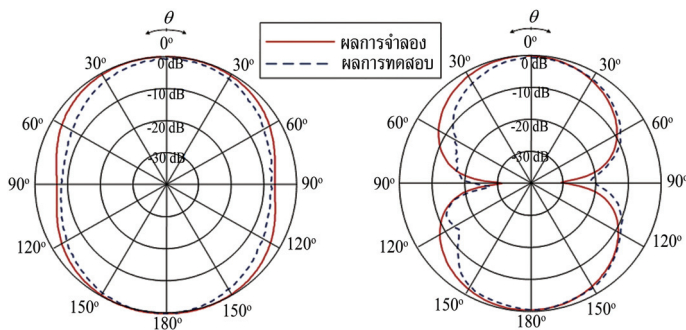
รูปที่ 11 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดสอบ S_{11}

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบให้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทางสอดคล้องกัน มีค่าความแรงของสนามไฟฟ้าแรงที่สุดที่มุม 0 และ 180 องศา ที่ความถี่ 1.8 GHz และความถี่ 3.5 GHz สำหรับความถี่ 5.5 GHz พบว่าสายอากาศนี้ให้แบบรูปแบบสองทิศทางที่มีมุมยกเท่ากับ 28 องศา โดยผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกันดังรูปที่ 12 สำหรับผลที่ได้จากการจำลองที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 180 องศา และในระนาบ yz เท่ากับ 84 องศา ส่วนผลจากการทดสอบมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 179 และ 44 องศา ตามลำดับจากการจำลองผลที่ความถี่ 3.5 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 112 องศา และในระนาบ yz เท่ากับ 68 องศา ส่วนผลจากการทดสอบมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 80 และ 58 องศา และจากการจำลองผลที่ความถี่ย่านบน 5.5 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 56 องศา และระนาบ yz เท่ากับ 53 องศา ตามลำดับ ผลจากการทดสอบมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากันคือ 53 องศา ดังรูปที่ 12 - 14 และเมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าอัตราการขยายโดยใช้สมการฟรีส (Friis Transmission Equation) [18] โดยใช้สายอากาศสององค์ประกอบที่เหมือนกัน (สายอากาศที่นำเสนอเป็นสายอากาศภาครับและภาคส่ง) โดยไม่นำค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณในภาครับและภาคส่งมาคำนวณร่วมด้วย เพราะในขั้นตอนการทดสอบนี้ได้ทำการปรับเทียบ (Calibration) ที่ปลายสายก่อนการทดสอบแล้ว ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งเท่ากับ 33 เซนติเมตร ดังนั้นค่าการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free Space Loss) ที่ความถี่ 1.8 3.5 และ 5.5 GHz เท่ากับ -27.91 -33.69 และ -37.62 dB ตามลำดับ ค่าอัตราส่วนกำลังงานสายอากาศรับต่อกำลังงานสายอากาศส่งเท่ากับ -24.87 -26.82 และ -32.17 dB ตามลำดับ ดังนั้นค่าอัตราการขยายของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 1.8 3.5 และ 5.5 GHz มีค่าอัตราการขยายที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 1.52 3.43 และ 2.72 dBi ตามลำดับ


 (ก) ระนาบ xz

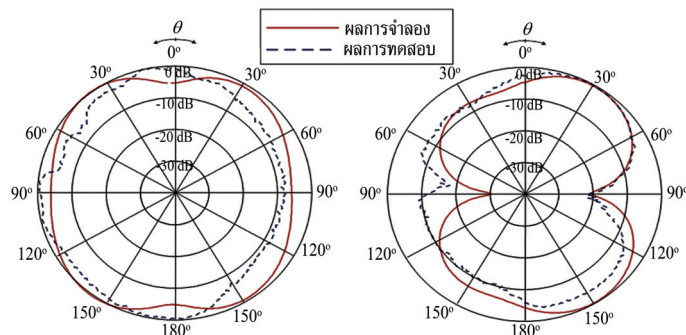
 (ข) ระนาบ yz

รูปที่ 12 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 1.8 GHz


 (ก) ระนาบ xz

 (ข) ระนาบ yz

รูปที่ 13 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz


 (ก) ระนาบ xz

 (ข) ระนาบ yz

รูปที่ 14 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.5 GHz

หมายเหตุ ผลการจำลองและผลการทดสอบมีความแตกต่างกันเนื่องจากการจำลองไม่ได้พิจารณาผลของตัวเชื่อมต่อร่วมด้วย แต่ในการทดสอบจำเป็นต้องเชื่อมต่อสายอากาศและระบบสายส่งด้วยตัวเชื่อมต่อแบบ SMA

สรุปและวิจารณ์

บทความนี้แนะนำเสนอสายอากาศโมโนโพลสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบด้วยช่องเปิดวงแหวนสี่เหลี่ยมที่สามารถปฏิบัติการสามย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยโครงสร้างสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัดและน้ำหนักเบา ประกอบด้วยโมโนโพลสี่เหลี่ยมที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นที่ออกแบบที่ย่านความถี่กลางพิมพ์บนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วม 50 โอห์ม โดยมีวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบตัวแพร่กระจายคลื่นเพื่อบังคับลำคลื่นของสายอากาศให้แพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและช่วยปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์ล่าง นอกจากนี้ได้เพิ่มปรสิตรูปตัวแอลแบบกลับด้านร่วมด้วย เพื่อช่วยปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่สูง พบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยสายอากาศต้นแบบมี $S_{11} < -10$ dB ครอบคลุมสามย่านความถี่ตั้งแต่ 1.50 - 2.22 2.77 - 3.81 และ 4.45 - 6.37 GHz สำหรับระบบ 5G ที่ย่านความถี่ต่ำ 1800 MHz และย่านความถี่กลางที่ต่ำกว่า 6 GHz นอกจากนี้ยังสามารถปฏิบัติการได้สำหรับระบบ GSM-1800 และ GSM-1900 Wi-MAX ย่าน 3.5 GHz และ WLAN ย่าน 5.5 GHz ด้วย โดยมีอัตราขยายสูงสุดในแต่ละย่านเท่ากับ 1.52 3.44 และ 2.72 dBi ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

References

- [1] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., and Ittipiboon, A. (2001). **Microstrip Antenna Design Handbook**. London: Artech House Inc.
- [2] Chen, Z. N., Qing, X., See, T. S. P., and Toh, W. K. (2012). Antennas for WiFi Connectivity. **Proceedings of the IEEE**. Vol. 100, Issue 7, pp. 2322-2329. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2183830
- [3] Jothi Chitra, R. and Nagarajan, V. (2013). Double L-Slot Microstrip Patch Antenna Array for WiMAX and WLAN Applications. **Computers & Electrical Engineering**. Vol. 39, Issue 3, pp. 1026-1041. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2012.11.024
- [4] Hoang, T. V. and Park, H. C. (2014). Very Simple 2.45/3.5/5.8 GHz Triple-Band Circularly Polarized Printed Monopole Antenna with Bandwidth Enhancement. **Electronics Letters**. Vol. 50, Issue 24, pp. 1792-1793. DOI: 10.1049/el.2014.2935
- [5] Chakraborty, U., Kundu, A., Chowdhury, S. K., and Bhattacharjee, A. K. (2014). Compact Dual-Band Microstrip Antenna for IEEE 802.11a WLAN Application. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 13, pp. 407-410
- [6] Wu, T. L., Pan, Y. M., Hu, P. F., and Zheng, S. Y. (2017). Design of a Low Profile and Compact Omnidirectional Filtering Patch Antenna. **IEEE Access**. Vol. 5, pp. 1083-1089. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2651143

- [7] Ban, Y. L., Li, C., Sim, C. Y. D., Wu, G., and Wong, K. L. (2016). 4G/5G Multiple Antennas for Future Multi-Mode Smartphone Applications. **IEEE Access**. Vol. 4, pp. 2981-2988. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2582786
- [8] Hu, W., Yin, Y. Z., Fei, P., and Yang, X. (2011). Compact Triband Square-Slot Antenna with Symmetrical L-Strips for WLAN/WiMAX Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 10, pp. 462-465. DOI:10.1109/LAWP.2011.2154372
- [9] Osklang, P., Phongcharoenpanich, C., and Akkaraekthalin, P. (2019). Triband Compact Printed Antenna for 2.4/3.5/5 GHz WLAN/WiMAX Applications. **International Journal of Antennas and Propagation**. Vol. 2019, p. 13. DOI: 10.1155/2019/8094908
- [10] Ta, X. S., Choo, H., and Park, I. (2017). Broadband Printed-Dipole Antenna and Its Arrays for 5G Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 16, pp. 2183-2186. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2703850
- [11] Li, Y., Zhao, Z., Tang, Z., and Yin, Y. (2020). Differentially Fed, Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. Vol. 68, Issue 4, pp. 3231-3236. DOI: 10.1109/TAP.2019.2957720
- [12] Changand, T. N. and Jiang, J. H. (2009). Meandered T-Shaped Monopole Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. Vol. 57, Issue 12, pp. 3976-3978. DOI: 10.1109/TAP.2009.2026713
- [13] Nguyen, V., Park, B., Park, S., and Yoon, G. (20014). A Planar Dipole for Multiband Antenna Systems with Self-Balanced Impedance. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 13, pp. 1632-1635. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2347952
- [14] Huang, H., Liu, Y., Zhang, S., and Gong, S. (2015). Multiband Metamaterial-Loaded Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 14, pp. 662-665. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2376969
- [15] He, M., Ye, X., Zhou, P., Zhao, G., Zhang, C., and Sun, H. (2015). A Small-Size Dual-Feed Broadband Circularly Polarized U-Slot Patch Antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 14, pp. 898-901. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2384496
- [16] Yang, Y., Chu, Q., and Mao, C. (2016). Multiband MIMO Antenna for GSM, DCS, and LTE Indoor Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 15, pp. 1573-1576. DOI: 10.1109/LAWP.2016.2517188
- [17] Lamultree, S. and Jansri, C. (2019). A Compact Unidirectional Pattern Antenna for Wireless Communications. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 12, No. 2, pp. 14-28
- [18] Balanis, C. A. (2007). **Antenna Theory, Analysis and Design**. New York: John Wiley & Sons
- [19] Lamultree, S. and Phongcharoenpanich, C. (2008). Bidirectional Ultra-Wideband Antenna Using Rectangular Ring Fed by Stepped Monopole. **Progress in Electromagnetics Research PIER**. Vol. 85, pp. 227-242. DOI: 10.2528/PIER08080103