

สายอากาศแบบแผ่นบ่วงรูปตัวอีขนาดกะทัดรัดสำหรับระบบ LoRaWAN

Compact E-Shaped Loop Patch Antenna for LoRaWAN Systems

สุรีย์พร เมียงพันธ์¹, ศุภกิต แก้วดวงตา¹ และ รัศมิทัต แผนสมบุญ^{2,*}

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ช้างเผือก เมือง เชียงใหม่ 50300

²ศูนย์เทคโนโลยีเพื่อความมั่นคงของประเทศและการประยุกต์เชิงพาณิชย์,

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) คลองหนึ่ง คลองหลวง ปทุมธานี 12120

Sureeporn Mengphan¹, Supakit Kawdungta¹ and Rassamitut Pansomboon^{2,*}

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna, Chang Phueak, Mueang, Chiang Mai, 50300, Thailand

²National Security and Dual-Use Technology Center, National Science and Technology Development Agency,

Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani, 12120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: Rassamitut.pan@nstda.or.th

Received: Aug 03, 2023; Revised: Sep 18, 2023; Accepted: Oct 24, 2023

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอสายอากาศแบบแผ่นลูปรูปตัวอีบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัดสำหรับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่งแบบ LoRaWAN โดยสายอากาศแบบแผ่นที่นำเสนอถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นลูปคล้ายตัวอักษรรูปตัวอีหันหน้าเข้าหากัน เพื่อเป็นการลดขนาดของสายอากาศและได้ผสานเทคนิคการทำช่องเปิดขนาดเล็กบนเส้นทองแดงและการทำสตัปจูนให้กับสายอากาศเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะในการแมตช์อิมพีแดนซ์ซึ่งอีกทั้งสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ให้กับสายอากาศ ซึ่งขนาดของสายอากาศที่นำเสนอคือ $60.00 \times 60.00 \times 1.60 \text{ mm}^3$ ในบทความวิจัยได้เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศพบว่าผลสอดคล้องกัน จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศมีค่า $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ครอบคลุมย่านความถี่ 917.00–933.50 MHz โดยมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 16.5 MHz ครอบคลุมย่านความถี่ระบบโครงข่าย LoRaWAN ของประเทศไทย นอกจากนี้สายอากาศที่นำเสนอมีอัตราขยายมากกว่า 1 dB ตลอดย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบตัวและโพลาไรซ์เชิงเส้น ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานร่วมกับระบบ LoRaWAN ในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: สายอากาศขนาดกะทัดรัด, สายอากาศแบบแผ่นลูป, ระบบ LoRaWAN, อินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง

Abstract

This research paper presents a compact E-shape loop patch antenna for internet of things (IoT) system based on LoRaWAN. The proposed patch antenna is designed in an E-shaped loop facing each other that it was to reduce the total size of the antenna. Both at once, this paper combined the technique of cutting slots on copper conductors and tuning stubs on the antenna structure which enhances the performance of the matching and expanding bandwidth. The size of the proposed antenna was $60.00 \times 60.00 \times 1.60 \text{ mm}^3$. The comparison of simulated and measured results is good agreement.

The measured results were found that the $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ could cover the 917.00–933.50 MHz and a bandwidth of 16.5 MHz, that it was cover the LoRaWAN frequencies of Thailand. The proposed antenna has a gain of more than 1 dBi covering 920–925 MHz. The proposed antenna has an almost-omnidirectional radiation pattern and linear polarization. The suggested antenna was therefore appropriate for LoRaWAN systems.

Keywords: Compact Antenna, Patch Antenna, LoRaWAN Systems, Internet of Things (IoT)

1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างแพร่หลายหนึ่งในระบบโครงข่ายการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่งที่ได้รับการนิยมนอย่างมาก คือ การเชื่อมต่อโครงข่ายบริเวณกว้าง (Wide Area Networks: WAN) ในรูปแบบการใช้กำลังงานต่ำหรือที่เรียกว่า Low Power Wide Area Network (LPWAN) ซึ่งภายในประเทศไทยมีการให้บริการอยู่ 2 ประเภทคือ โครงข่าย LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) และ NB-IoT (Narrowband-IoT) เนื่องจากโครงข่าย LoRaWAN สามารถติดต่อสื่อสารไร้สายได้ในระยะไกล และมีการใช้พลังงานต่ำซึ่งมีระยะในการติดต่อสื่อสารประมาณ 1–15 km จากสถานีฐานจึงได้รับความนิยมมากกว่าแต่ระบบ LoRaWAN จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลไม่สูง [1–3] สำหรับประเทศไทยเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบโครงข่าย LoRaWAN ได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการพัฒนาทางการเกษตร (Smart Farm) โดยมาตรฐานความถี่การใช้งานสำหรับโครงข่าย LoRaWAN ในประเทศไทย กำหนดให้มีการใช้งานได้ในย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz และมีกำลังส่งไม่เกิน 4 W [4]

สำหรับเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงข่าย LoRaWAN นั้น สายอากาศเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการติดต่อสื่อสารซึ่งหากสายอากาศมีสมรรถนะการทำงานต่ำจะส่งผลกระทบต่อระยะทางในการติดต่อสื่อสารและเกิดการสูญหายของข้อมูลที่ทำกาส่งผ่านและความท้าทายที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศสำหรับโครงข่าย LoRaWAN คือ ความต้องการให้อุปกรณ์การสื่อสารในโครงข่ายมีขนาด

เล็กจึงจำเป็นที่จะต้องใช้อย่างอากาศที่มีขนาดเล็กตามไปด้วย จากข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของสายอากาศนี้จะมีผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของสายอากาศด้วยเนื่องจากสายอากาศที่มีขนาดเล็กมากๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ความถี่ใช้งานจะมีสมรรถนะลดลง ดังนั้นสายอากาศจึงได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนา โดยมุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนาสายอากาศให้มีขนาดกะทัดรัดหรือการพัฒนาให้สายอากาศมีขนาดเล็กเพื่อให้สามารถติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ภายในแผงวงจรเดียวกันได้ โดยที่คุณสมบัติของสายอากาศยังคงมีสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารระยะไกล ครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานและใช้พลังงานต่ำ ซึ่งในปี 2017 L.H. Trinh และคณะ ได้นำเสนอสายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบ LoRaWAN [5] โดยสายอากาศที่นำเสนอถูกออกแบบเป็นอักษร UIT และ UCA ซึ่งเป็นโลโก้ของมหาวิทยาลัย บณ วัสดุฐานรองชนิด FR4 สายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 868 MHz โดยจุดเด่นของสายอากาศที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้ คือ การออกแบบสายอากาศขนาดเล็กให้มีการทำงานในย่านความถี่ LoRaWAN ด้วยโลโก้อักษรและสายอากาศดังกล่าวสามารถออกแบบอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์เดียวกันกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ จากนั้นในปี 2018 Q. Zhang และคณะ [6] ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด สายอากาศถูกออกแบบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผงวงจรพิมพ์เดียวกัน ส่งผลให้มีพื้นที่สำหรับสายอากาศจำกัด ซึ่งในบทความวิจัยได้นำเสนอเทคนิคการลดขนาดของสายอากาศด้วยการเจาะช่องบนแผ่นระนาบ ซึ่งช่วยขยายช่วงกว้างความถี่ให้กับสายอากาศและทำให้สายอากาศมีการทำงานครอบคลุมความถี่ 402.40–441.60 MHz ในปี 2023 A.A. Ibrahim และคณะ [7] นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบยืดหยุ่นที่สามารถปรับความถี่ได้และมีการป้อนสัญญาณแบบ CPW

โดยสายอากาศที่นำเสนอใช้เทคนิคการออกแบบด้วยการเจาะช่องเปิดขนาดเล็กพร้อมกับ PIN diodes เพื่อใช้ในการปรับความถี่ สายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 2.40 GHz 3.50 GHz และ 4.00 GHz ตามลำดับ ในปีเดียวกัน M. S. Yahya และคณะ [8] ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัดหลายความถี่สำหรับการประยุกต์กับเทคโนโลยีการสื่อสารแบบอินเตอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่งระบบ LoRaWAN โดยสายอากาศที่นำเสนอถูกออกแบบด้วยลายเส้นทองแดงหักงอบนแผ่นระนาบร่วมกับการใช้ PIN diodes โดยสายอากาศที่นำเสนอมีการทำงานที่ความถี่ 915 MHz 868 MHz และ 433 MHz ตามลำดับ ซึ่งเป็นความถี่ระบบ LoRaWAN ที่มีการใช้งานในอเมริกาเหนือยุโรป และจีน จากการศึกษาบทความวิจัยที่มีมาก่อนจะสังเกตเห็นว่าเทคนิคการทำช่องเปิดขนาดเล็กเป็นหนึ่งในเทคนิคที่น่าสนใจในการนำมาใช้ร่วมกับการออกแบบโครงสร้างสายอากาศ เพื่อช่วยในการแมตช์ $|S_{11}|$ ในย่านความถี่ที่ต้องการ และการขยายช่วงกว้างความถี่ให้กับสายอากาศได้นอกจากนี้พบว่าสายอากาศที่มีมาก่อนถูกออกแบบลักษณะแผ่นระนาบ เพื่อให้สายอากาศมีขนาดเล็ก บาง และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน และในเอกสารอ้างอิงที่ [9],[10] ก็ได้แนะนำการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบ LoRaWAN ไว้เช่นกัน โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 920–295 MHz

ดังนั้นในบทความวิจัยนี้แนะนำการออกแบบสายอากาศสายอากาศคู่รูปตัว E บนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัดสำหรับระบบ LoRaWAN ประเทศไทย โดยเลือกใช้เทคนิคการออกแบบด้วยสายอากาศคู่หักงอ ซึ่งสามารถช่วยลดขนาดของสายอากาศแต่ยังคงความสามารถในการให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางได้ [8–11] โดยนำเสนอการออกแบบสายอากาศคู่ที่มีลักษณะเป็นรูปตัววีสองตัวหันหน้าเข้าหากัน ผสานร่วมกับเทคนิคการทำช่องเปิดขนาดเล็ก เพื่อช่วยในการแมตช์ความถี่และขยายช่วงกว้างความถี่ให้กับสายอากาศ ในขณะที่เดียวกันได้เพิ่มเทคนิคการทำสตัปจูนให้กับสายอากาศซึ่งช่วยให้สายอากาศสามารถปรับจูนไปยังความถี่ต่าง ๆ ได้ โดยที่ไม่ต้องทำการแก้ไขโครงสร้างของสายอากาศและยังส่งผลต่อ

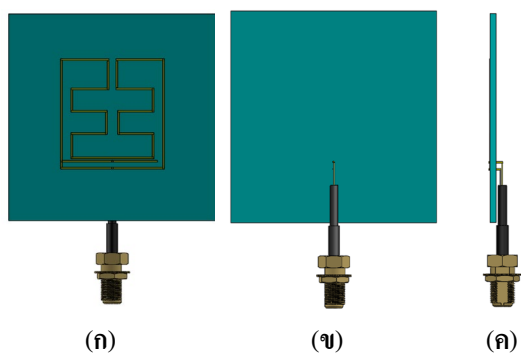
การแมตช์ $|S_{11}|$ ในย่านความถี่ที่สนใจให้มีสมรรถนะดีขึ้น ซึ่งได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างสายอากาศคู่รูปตัวอีบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัดในหัวข้อที่ 2 จากนั้นในหัวข้อที่ 3 นำเสนอผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง ในหัวข้อที่ 4 นำเสนอการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยทำการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญกับสายอากาศ ด้วยการพิจารณาจากการแมตช์ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ และสุดท้ายในหัวข้อที่ 5 นำเสนอบทสรุปของบทความวิจัยนี้

2. การออกแบบ

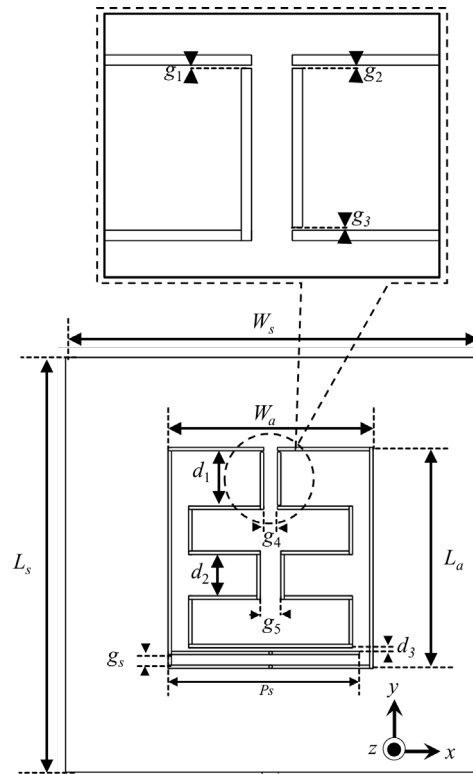
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศสำหรับโครงข่าย LoRaWAN ซึ่งเป็นโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ใช้พลังงานต่ำ มีพื้นที่ครอบคลุมเป็นวงกว้าง ดังนั้นสายอากาศที่นำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับโครงข่าย LoRaWAN จึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้มีคุณสมบัติของสายอากาศที่สอดคล้องกับโครงข่าย LoRaWAN ในประเทศนั้นๆ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งาน สำหรับในบทความวิจัยนี้ได้กำหนดคุณสมบัติเบื้องต้นในการออกแบบสายอากาศไว้ดังนี้ สายอากาศมีการทำงานครอบคลุมย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz (ย่านความถี่ LoRaWAN ประเทศไทย [4]) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวหรือใกล้เคียงแบบรอบตัว อัตราขยายประมาณ 1–2 dBi มีลักษณะการโพลาไรซ์เชิงเส้น และสายอากาศควรมีขนาดเล็กหรือกะทัดรัดเพื่อเหมาะต่อการนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่นในโครงข่าย LoRaWAN

สายอากาศที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้ คือ สายอากาศคู่รูปตัวอีบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด ที่ถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ความหนา 1.60 mm ซึ่งมีแนวคิดในการออกแบบด้วยการผสมผสานเทคนิคการออกแบบสายอากาศหลายเทคนิคเข้าด้วยกัน เพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับคุณสมบัติการใช้งาน ซึ่งในบทความวิจัยนี้แนะนำการออกแบบสายอากาศด้วยโครงสร้างสายอากาศคู่หักงอ เพื่อช่วยในการลดขนาด

ของโครงสร้างสายอากาศ โดยสายอากาศรูปที่นำเสนอมีลักษณะคล้ายตัวอักษรรูปตัวอีสองตัวหันหน้าเข้าหากัน อย่างไรก็ตามการออกแบบเฉพาะเทคนิคการทำโครงสร้างรูปเพียงเทคนิคเดียว ยังไม่สามารถทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติที่ต้องการได้ ดังนั้นได้เพิ่มเทคนิคการทำช่องเปิดขนาดเล็กบนเส้นทองแดงตัวนำของสายอากาศ และการทำสตัปจูนให้กับโครงสร้างสายอากาศรูป ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้สามารถช่วยให้สายอากาศรูปตัว E มีคุณสมบัติการแมตซ์ซึ่ง $|S_{11}|$ ของสายอากาศ มีค่า $\leq -10\text{dB}$ ครอบคลุมย่านความถี่ LoRaWAN ประเทศไทย (920.00–925.00 MHz) และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในแนวคิดการออกแบบสายอากาศ ในบทความวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสายอากาศและจำลองผลคุณสมบัติของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2019 [12] โดยในรูปที่ 1 แสดงรูปจำลองโครงสร้างสายอากาศรวมถึงตำแหน่งจุดบ่อนสัญญาณและลักษณะการบ่อนสัญญาณของสายอากาศ รูปที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศและแสดงขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 1 ตามลำดับ และสุดท้ายในรูปที่ 3 แสดงรูปถ่ายต้นแบบสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบและยืนยันความถูกต้องในคุณสมบัติของสายอากาศ จากนั้นในหัวข้อที่ 3 เป็นการนำเสนอผลการจำลองสายอากาศที่ทำการออกแบบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ ประกอบด้วย $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายของสายอากาศ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านหลัง (ค) มุมมองด้านข้าง

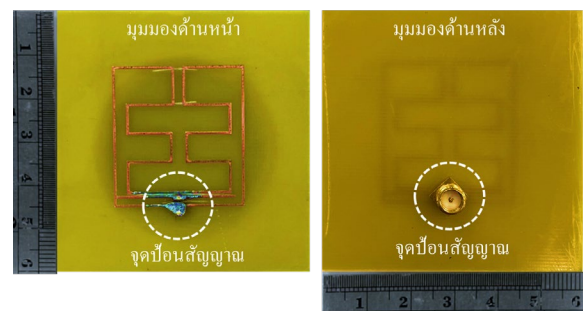


รูปที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และขนาดของสายอากาศที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
W_s	60.00	g_1	0.65
L_s	60.00	g_2	0.65
W_a	30.00	g_3	0.65
L_a	32.00	g_4	2.00
d_1	8.50	g_5	3.00
d_2	6.00	g_s	1.50
d_3	0.50	P_s	-15x

หมายเหตุ : P_s คือ ตำแหน่งของสตัปจูนในแนวแกน $\pm x$ บนโครงสร้างสายอากาศ



รูปที่ 3 รูปถ่ายต้นแบบสายอากาศที่นำเสนอ

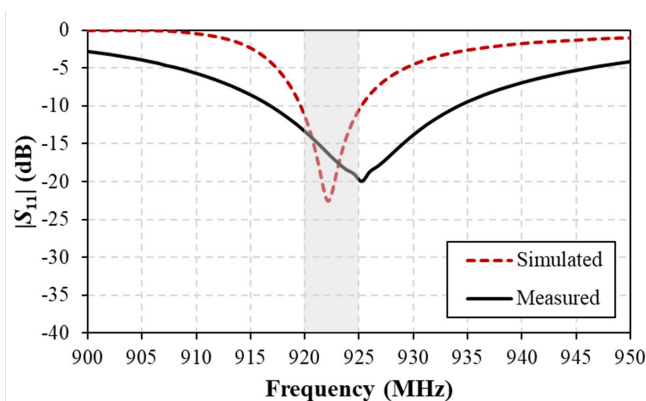
3. ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบของสายอากาศที่นำเสนอ

สำหรับหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศรูปตัวอินบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด ซึ่งผลการจำลองนั้นเป็นแนวทางในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบขึ้นในเบื้องต้น เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ว่าสายอากาศดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับโครงข่าย LoRaWAN จากนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องได้ทำการสร้างและทดสอบสายอากาศคุณสมบัติ ซึ่งได้มีการนำเสนอผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติดังนี้

3.1 ผลการจำลองและทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

จากรูปที่ 4 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ทำการออกแบบ พบว่าสายอากาศมี $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ครอบคลุมความถี่ 919.65–925.20 MHz โดยมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ

5.55 MHz โดยมีค่า $|S_{11}|$ ณ ความถี่กลาง (922.50 MHz) เท่ากับ -21.49 dB และ $|S_{11}|$ มีการแมตซ์ดีที่สุดที่ความถี่ 922.15 MHz จากผลการจำลองจึงกล่าวได้ว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz อย่างไรก็ดีตามเพื่อยืนยันความถูกต้อง ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองร่วมกับผลการทดสอบต้นแบบสายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ต้นแบบสายอากาศมี $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ครอบคลุมความถี่ 917.00–933.50 MHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 16.50 MHz และที่ความถี่ 922.50 MHz พบว่าผลการทดสอบ $|S_{11}|$ เท่ากับ -16.91 dB โดย $|S_{11}|$ มีการแมตซ์ดีที่สุดที่ความถี่ 925.25 MHz (-19.91 dB) ดังนั้นจากผลการจำลองและการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่า สายอากาศที่ถูกนำเสนอมีการแมตซ์ $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานของระบบ LoRaWAN ประเทศไทย (920.00–925.00 MHz)

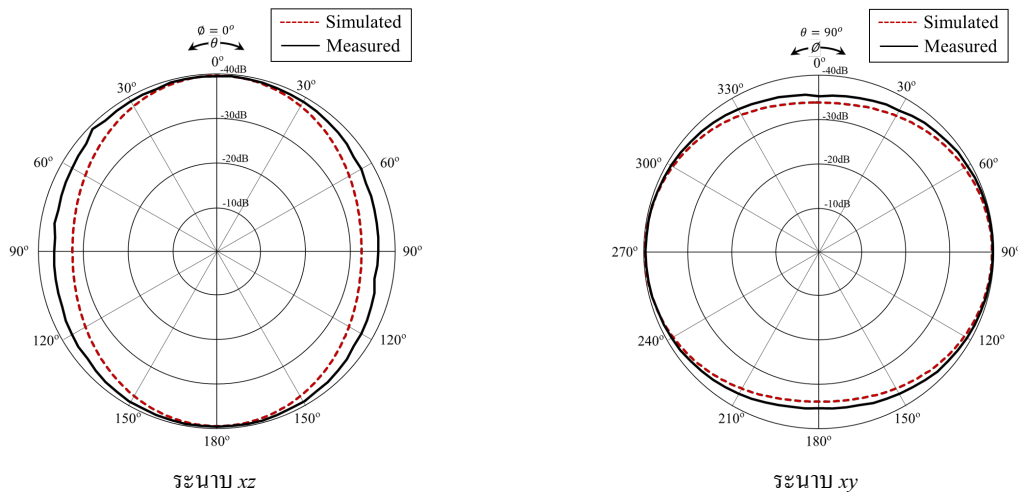


รูปที่ 4 ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่นำเสนอ

3.2 ผลการจำลองและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

สำหรับผลการจำลองและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ ได้ทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ xy ของสายอากาศ จากผลการเปรียบเทียบพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใกล้เคียงแบบรอบตัว ซึ่งผลการจำลองและผลการทดสอบมีผลที่สอดคล้องกันแสดงดังรูปที่ 5 จึงสามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอมีคุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสอดคล้องกับคุณสมบัติในการออกแบบ

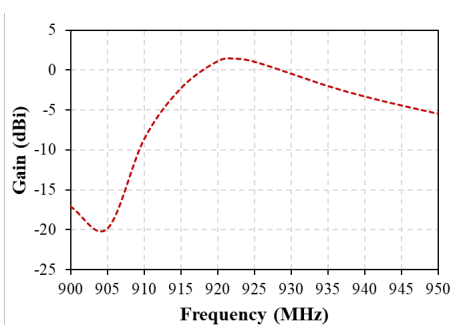
สายอากาศที่กำหนดไว้ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาที่ความถี่กลาง 922.50 MHz โดยในส่วนของการจำลองพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 141 องศา ที่ความถี่ 922.50 MHz ในขณะที่ระนาบ xy สายอากาศที่นำเสนอมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เท่ากับ 122 องศา ที่ความถี่ 922.50 MHz สำหรับผลการทดสอบพบว่า ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 125 องศา ที่ความถี่ 922.50 MHz และในระนาบ xy พบว่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ความถี่ 922.50 MHz เท่ากับ 115 องศา



รูปที่ 5 ผลการจำลองและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอที่ความถี่ 922.5 MHz

3.3 ผลการจำลองและทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีอัตราขยายที่ความถี่ 922.50 MHz เท่ากับ 1.43 dBi และจากผลการจำลองพบว่าสายอากาศมีอัตราขยายมากกว่า 1 dBi ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ LoRaWAN ซึ่งผลการจำลองมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติการออกแบบสายอากาศในเบื้องต้น และเพื่อยืนยันความถูกต้องจากผลการทดสอบพบว่า ที่ความถี่ 920 MHz 922 MHz 922.50 MHz 923 MHz และ 925 MHz พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.9 dBi 1 dBi 1.1 dBi 1.12 dBi และ 1.05 dBi ตามลำดับ โดยได้แสดงผลการจำลองอัตราขยายต่อความถี่ไว้ในรูปที่ 6

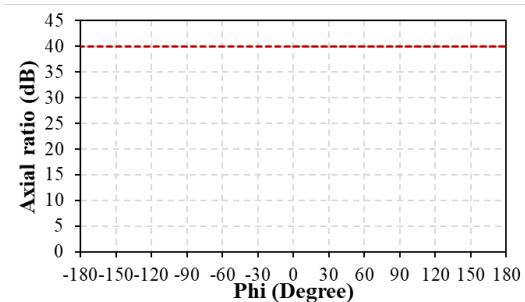


รูปที่ 6 ผลการจำลองอัตราขยายต่อความถี่ของสายอากาศที่นำเสนอ

3.4 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนสายอากาศ

สำหรับโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศนั้น สามารถวิเคราะห์ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศได้จากอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยผลการจำลองอัตราส่วน

แกนของสายอากาศพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีอัตราส่วนแกนในทุกมุมรอบตัวของสายอากาศเท่ากันตลอดทุกมุม ซึ่งจากผลการจำลองดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอมีลักษณะการโพลาไรซ์เชิงเส้น ในบทความวิจัยนี้จึงขอนำเสนอเฉพาะผลการจำลองอัตราส่วนแกน ณ ความถี่กลาง 922.50 MHz เพื่อลดการซ้อนทับกันของกราฟที่มีค่าเท่ากันตลอดย่านความถี่ (920.00-925.00 MHz) โดยแสดงผลการจำลองอัตราส่วนแกนในรูปที่ 7 เส้นประสีแดง



รูปที่ 7 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่นำเสนอ

จากผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศที่นำเสนอสามารถสรุปคุณสมบัติเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2 จากข้อมูลสรุป สามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอมีคุณสมบัติที่สอดคล้องกันและมีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบ LoRaWAN ประเทศไทย นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีมาก่อนดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบคุณสมบัติสายอากาศ

คุณสมบัติ	การจำลอง		การทดสอบ	
$ S_{11} \leq -10\text{dB}$ (MHz)	919.65-925.20		917.00- 933.50	
ช่วงกว้างความถี่ (MHz)	5.55		16.50	
$ S_{11} $ ความถี่ 922.50 MHz (dB)	-21.49		-16.91	
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz (Degree)	922.50 MHz	141	922.50 MHz	125
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy (Degree)	922.50 MHz	122	922.50 MHz	115
อัตราขยาย (dBi)	922.50 MHz	1.43	922.50 MHz	1.1
โพลาริเซชัน	เชิงเส้น		เชิงเส้น	

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติสายอากาศที่นำเสนอกับสายอากาศที่มีมาก่อน

Ref.	Year	Freq.(MHz)	Gain (dBi)	Size (mm ³)	Substrate
[5]	2017	868.00	0.70 (UIT) 0.81(UCA)	$34 \times 80 \times 0.8$	FR4
[6]	2018	402.40–441.60	-6	$\sim 127 \times 21 \times 1.4$	FR4
[7]	2023	2.40GHz 3.50GHz 4.50GHz	6.50 7.52 7.91	$30 \times 30 \times 0.13$	Rogers3003
[8]	2023	433.00 868.00 915.00	1.98 2.01 2.10	$80 \times 50 \times 1.6$	FR4
[9]	2020	920–925	-11.86	$13.11 \times 22.95 \times 1.6$	FR4
[10]	2020	880–980	8.53	$530 \times 530 \times 290$	Epoxy
This work		917.00–933.50	1.12 at $f_{920.00}$ 1.43 at $f_{922.50}$ 1.06 at $f_{925.00}$	$60 \times 60 \times 1.6$	FR4

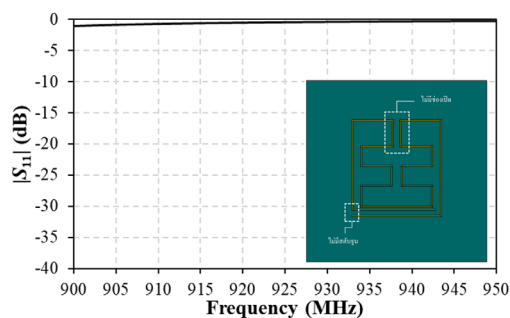
4. การศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์

เพื่อให้เข้าใจถึงที่มาเกี่ยวกับขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้นำเสนอในตารางที่ 1 ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศ โดยมุ่งเน้นการนำเสนอการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์จากการจำลองและพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณสมบัติ $|S_{11}|$ อย่างมีนัยสำคัญ

4.1 การศึกษาผลกระทบของสายอากาศรูปตัวอักษรรูปตัวโอในขณะที่ยังไม่มีการทำช่องเปิดและสตัปจูน

นำเสนอการศึกษาผลกระทบสายอากาศรูปตัวอักษรรูปตัวโอสองตัวหันหน้าเข้าหากัน ในขณะที่ยังไม่มีการออกแบบร่วมกับเทคนิคการทำช่องเปิดและสตัปจูนให้กับสายอากาศเพื่อเป็นการยืนยันผลว่าการออกแบบสายอากาศด้วยวิธีสายอากาศรูปหักงอเพียงเทคนิคเดียวยังไม่สามารถส่งผลให้สายอากาศมีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้ โดย

แสดงผลการศึกษาผลกระทบสายอากาศรูปตัวอีที่ ยังไม่มีการทำช่องเปิดและสัดบัน ในรูปที่ 8 จากผล การศึกษาในรูปที่ 8 สามารถยืนยันได้ว่า หากออกแบบด้วย สายอากาศรูปเพียงเทคนิคเดียว สายอากาศจะยังไม่สามารถ ทำการแมตชิง $|S_{11}|$ ครอบคลุมย่านความถี่ LoRaWAN ประเทศไทย รวมถึงตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษาดังแต่ 900.00–950.00 MHz จะสังเกตเห็นว่า $|S_{11}|$ ไม่มีช่วงความถี่ ใดที่มีค่า ≤ -10 dB

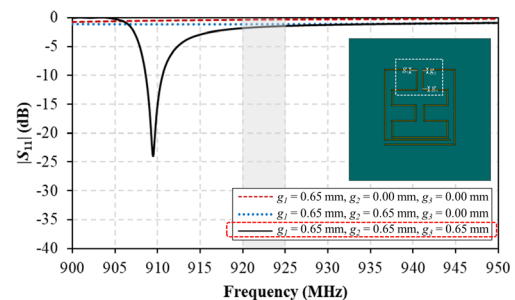


รูปที่ 8 ผลการศึกษาสายอากาศรูปตัวอีบนแผ่นระนาบ ขนาดกะทัดรัดในขณะที่ยัง ไม่มีการทำช่องเปิดและสัดบัน

4.2 การศึกษาผลกระทบของสายอากาศรูปตัวอักษร รูปตัวอีร่วมกับการทำช่องเปิดขนาดเล็ก

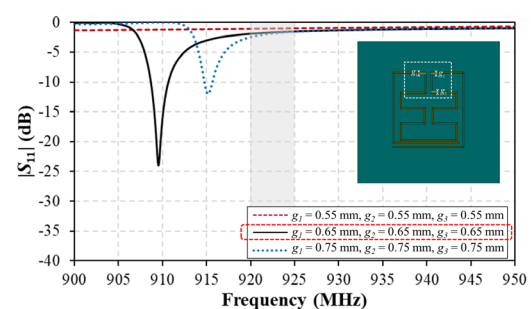
จากผลการศึกษาผลกระทบในหัวข้อที่ 4.1 ที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ ช่องเปิดขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3 ตามลำดับ โดยขั้นตอนในการศึกษาที่มาจากทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้ เริ่มจากการศึกษาจากโครงสร้างสายอากาศ รูปตัวอีบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด ที่มีการทำช่อง เปิดขนาดเล็กในพารามิเตอร์ g_1 เท่านั้น จากนั้นค่อยๆเพิ่ม การทำช่องเปิดในพารามิเตอร์ g_2 และ g_3 ตามลำดับ โดย ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก $|S_{11}|$ ของสายอากาศ และ แสดงผลการศึกษาผลกระทบดังกล่าวในรูปที่ 9 ซึ่งใน การศึกษาผลกระทบนี้ได้กำหนดขนาดของช่องเปิดใน แต่ละพารามิเตอร์ เท่ากับ $0.65 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ จากผล การศึกษาผลกระทบในรูปที่ 9 พบว่าหากมีการทำช่องเปิด ขนาดเล็กเฉพาะตำแหน่งพารามิเตอร์ g_1 หรือ ตำแหน่ง พารามิเตอร์ g_2 จะสังเกตเห็นว่าสายอากาศจะยังไม่ สามารถแมตชิง $|S_{11}| \leq -10$ dB ในย่านความถี่ที่ต้องการได้

แต่เมื่อเพิ่มช่องเปิดขนาดเล็กในทั้ง 3 ตำแหน่ง (พารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3) พบว่าสายอากาศเริ่มมีการแมตชิง $|S_{11}| \leq -10$ dB ครอบคลุมความถี่ 908.65–910.59 MHz ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ดี ที่จะทำให้การปรับปรุงสายอากาศให้สามารถทำงานในย่าน ความถี่ LoRaWAN ได้ต่อไป และแสดงให้เห็นว่าการทำ ช่องเปิดขนาดเล็กนั้นส่งผลกระทบท่อการแมตชิง $|S_{11}|$ ของ สายอากาศ



รูปที่ 9 ศึกษาผลกระทบการทำช่องเปิดขนาดเล็กของ พารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3

จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับขนาดช่องเปิด ของพารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3 ว่าขนาดของช่องเปิด ขนาดเล็กนี้ ส่งผลกระทบอย่างไรกับการแมตชิง $|S_{11}|$ ของ สายอากาศ และเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาผลกระทบ พารามิเตอร์สายอากาศต่อไป โดยแสดงผลการศึกษา ผลกระทบของขนาดช่องเปิดขนาดเล็กในรูปที่ 10



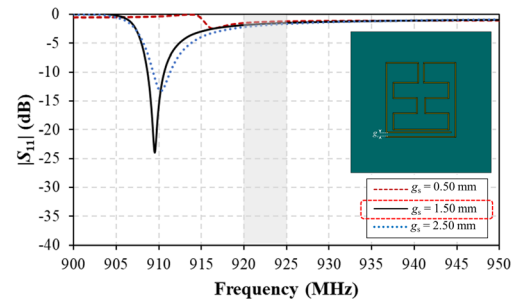
รูปที่ 10 ศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ขนาดของช่องเปิด ขนาดเล็กของพารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3

จากรูปที่ 10 พบว่า เมื่อพารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3 มีขนาด ของช่องเปิด เท่ากับ 0.55 mm สายอากาศนั้นยังไม่สามารถแม ตชิง $|S_{11}| \leq -10$ dB ในช่วงความถี่ศึกษา (900–950 MHz) ได้ และมีผลที่คล้ายคลึงกับผลการศึกษาสายอากาศรูปตัวอีบน

แผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด ในหัวข้อที่ 4.1 ในทางตรงกันข้ามเมื่อพารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3 ขนาดของช่องเปิดเท่ากับ 0.65 mm และ 0.75 mm จะสังเกตเห็นว่าสายอากาศรูปตัวอ็อบบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด มีแนวโน้มในการแมตชิง $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ในช่วงความถี่ที่ทำการศึกษาได้ แต่ยังไม่ได้อยู่ในแถบความถี่ LoRaWAN โดยสายอากาศรูปมีช่องเปิดเท่ากับ 0.65 mm การแมตชิง $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ มีแนวโน้มในการแมตชิงในช่วงแถบความถี่ต่ำของกราฟ ในขณะที่เมื่อสายอากาศมีช่องเปิด 0.75 mm สายอากาศมีแนวโน้มในการแมตชิงช่วงแถบความถี่สูงของกราฟ อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาในความสามารถในการแมตชิง $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ได้มีสมรรถนะดีกว่าและมีช่วงกว้างความถี่ที่กว้างกว่า พบว่าเมื่อช่องเปิดมีขนาด 0.65 mm สายอากาศรูปสามารถตอบสนองต่อการแมตชิง $|S_{11}|$ ได้สมรรถนะที่ดีกว่า รวมถึงมีช่วงกว้างความถี่ที่กว้างกว่าขนาดของช่องเปิดที่ 0.75 mm จากข้อมูลผลการศึกษาดังกล่าว ในบทความวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ขนาดช่องเปิดของพารามิเตอร์ g_1 , g_2 , และ g_3 เท่ากับ 0.65 mm ให้กับสายอากาศรูปตัวอ็อบบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในหัวข้อที่ 4.3 ได้ทำการศึกษาผลกระทบเพิ่มเติม เมื่อมีการออกแบบร่วมกับการทำสลับจนอีกครั้ง

จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างเส้นทองแดง (g_s) สำหรับจุดป้อนสัญญาณของโครงสร้างสายอากาศรูปตัวอ็อบบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด ร่วมกับการทำช่องเปิดขนาดเล็ก แสดงผลการศึกษาในรูปที่ 11 โดยได้ทำการปรับพารามิเตอร์ g_s ให้มีค่า 0.50 mm 1.50 mm และ 2.50 mm ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อพารามิเตอร์ g_s มีค่า 0.50 mm สายอากาศรูปยังไม่สามารถทำการแมตชิง $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ในช่วงความถี่ที่ทำการศึกษาในกราฟ ในขณะที่พารามิเตอร์ g_s เท่ากับ 1.50 mm และ 2.50 mm สายอากาศสามารถสร้างแนวโน้มในการแมตชิง $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ในช่วงความถี่ที่ทำการศึกษาในกราฟได้ อย่างไรก็ตาม จะสังเกตเห็นว่าถึงแม้มีการแมตชิง $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ได้ทั้ง 1.50 mm และ 2.50 mm แต่เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแมตชิง $|S_{11}|$ และช่วงกว้างความถี่พบว่า เมื่อพารามิเตอร์ g_s เท่ากับ 1.50 mm สายอากาศมีการแมตชิง $|S_{11}|$ ได้มีสมรรถนะกว่าและมีช่วงกว้างความถี่ที่กว้างกว่า

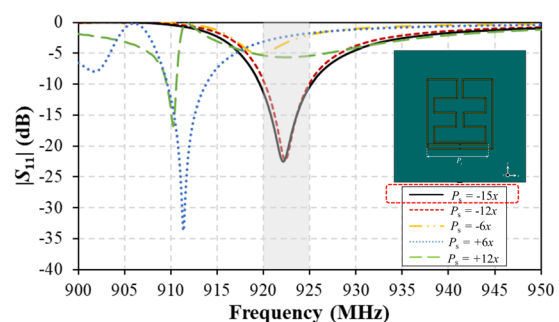
พารามิเตอร์ g_s เท่ากับ 2.50 mm ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ขนาดพารามิเตอร์ g_s เท่ากับ 1.50 mm เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบร่วมกับพารามิเตอร์อื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 11 การศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างเส้นทองแดง (g_s) สำหรับจุดป้อนสัญญาณ

4.3 การศึกษาผลกระทบสายอากาศรูปตัวอ็อบบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด ร่วมกับการทำช่องเปิดขนาดเล็กและสลับจน

ในหัวข้อนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของสายอากาศรูปตัวอ็อบบนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัด ร่วมกับการทำช่องเปิดขนาดเล็กและสลับจนให้กับโครงสร้างสายอากาศ ซึ่งการผสานเทคนิคการออกแบบทั้ง 3 เทคนิคนี้สามารถช่วยให้สายอากาศที่นำเสนอ มีคุณสมบัติ $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ครอบคลุมย่านที่มีการใช้งาน (920.00–925.00 MHz) โดยเริ่มจากการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของสลับจน (P_s) บนโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ โดยแสดงผลการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับตำแหน่งของสลับจน (P_s) ในรูปที่ 12



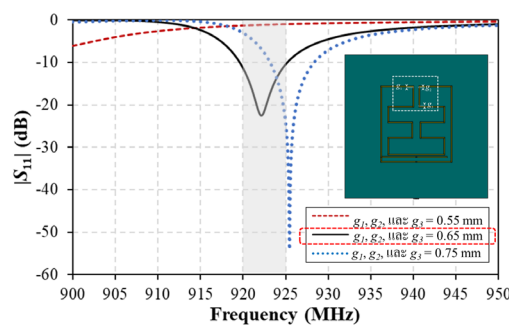
รูปที่ 12 การศึกษาผลกระทบตำแหน่งของสลับจน (P_s)

จากรูปที่ 12 ได้ทำการศึกษาผลกระทบตำแหน่งของสลับจน (P_s) โดยการปรับตำแหน่งของสลับจนไปในตำแหน่ง

ทิศทาง $-x$ และ $+x$ ของสายอากาศ โดยได้เริ่มจากตำแหน่ง $-15x$ ซึ่งเป็นตำแหน่งริมซ้ายสุดของรูป แล้วทำการปรับตำแหน่งของสัดับจนมาทางริมขวาของรูป ($+12x$) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อสัดับจนถูกปรับไปในทิศทาง $-x$ จะส่งผลให้สายอากาศตอบสนองในแถบความถี่สูงและมีแนวโน้มเข้าคู่ความถี่ที่ต้องการออกแบบ และถ้าปรับสัดับจนไปทิศทาง $+x$ ส่งผลให้สายอากาศตอบสนองในแถบความถี่ต่ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อสัดับจนอยู่ในตำแหน่ง (P_s) $-15x$ และ $-12x$ สายอากาศมีแนวโน้มในการตอบสนองต่อย่านความถี่ที่ต้องการได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาการแมตซ์ชิงของ $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ LoRaWAN พบว่า ตำแหน่งของสัดับจนที่ทำให้สายอากาศมีการแมตซ์ชิงในย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz ได้ดีที่สุด เมื่อตำแหน่งพารามิเตอร์ P_s อยู่ในตำแหน่ง $-15x$ จากข้อมูลการศึกษาผลกระทบดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่า หาก

ต้องการปรับแถบความถี่ในการตอบสนองของสายอากาศรูปรูปตัว E บนแผ่นระนาบขนาดกะทัดรัดที่มีการทำช่องเปิดและสัดับจน สามารถทำการปรับตำแหน่งพารามิเตอร์ P_s ของสายอากาศได้ โดยที่ไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

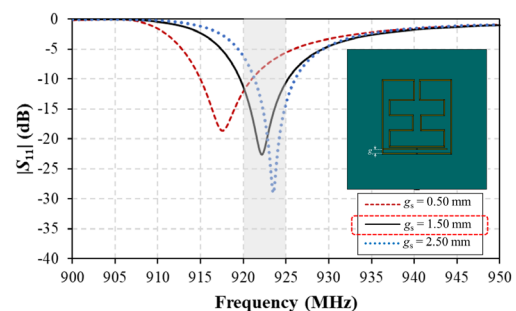
จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของช่องเปิดขนาดเล็กของพารามิเตอร์ g_1, g_2 , และ g_3 อีกครั้งเพื่อยืนยันความถูกต้องเมื่อมีการออกแบบร่วมกับสัดับจน โดยแสดงผลการศึกษาพารามิเตอร์ g_1, g_2 , และ g_3 ในรูปที่ 13 จากรูปสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อพารามิเตอร์ g_1, g_2 , และ g_3 มีค่าเท่ากับ 0.65 mm สายอากาศที่นำเสนอยังคงสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันขึ้นได้ว่าการออกแบบสายอากาศด้วยเทคนิคการทำช่องเปิดและสัดับจนที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้ สามารถช่วยให้สายอากาศมีคุณสมบัติการทำงานครอบคลุมย่านความถี่ LoRaWAN ประเทศไทย



รูปที่ 13 การศึกษาผลกระทบของช่องเปิดขนาดเล็กร่วมกับสัดับจน

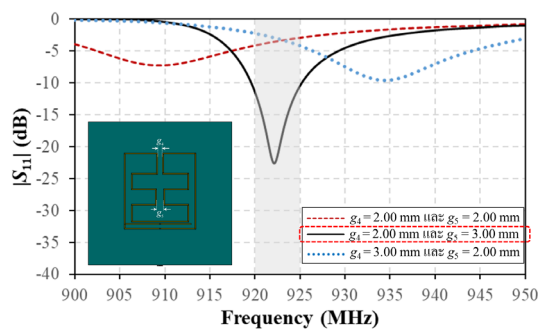
ต่อมาในบทความวิจัยได้มีการนำเสนอการศึกษาผลกระทบระหว่างระยะห่างเส้นทองแดง (g_s) สำหรับจุดป้อนสัญญาณ เมื่อสายอากาศมีการทำช่องเปิดขนาดเล็กร่วมกับสัดับจน โดยแสดงผลในรูปที่ 14 จากผลการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างเส้นทองแดง (g_s) นั้นมีผลกระทบต่อการแมตซ์ชิงของ $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อพารามิเตอร์ g_s เท่ากับ 0.50 mm พบว่าสายอากาศมีการตอบสนองในช่วงแถบความถี่ต่ำของกราฟ (914.95–921.00 MHz) และเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ g_s ให้มีค่า 1.50 mm พบว่าสายอากาศสามารถตอบสนองครอบคลุมในช่วงความถี่ LoRaWAN ซึ่งเป็นแถบความถี่ที่สนใจ และถ้าปรับพารามิเตอร์ g_s เท่ากับ 2.50 mm พบว่าสายอากาศสามารถตอบสนองในช่วงแถบความถี่สูงของกราฟ (921.34–926.00 MHz) อย่างไรก็ตามในบทความวิจัยนี้ต้องการสายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่

LoRaWAN ประเทศไทย ดังนั้นระยะห่างระหว่างเส้นทองแดงที่ 1.50 mm จึงเป็นขนาดที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานในย่านความถี่ LoRaWAN



รูปที่ 14 การศึกษาผลกระทบระยะห่างระหว่างเส้นทองแดง (g_s) ของสายอากาศรูปตัว E ร่วมกับการทำช่องเปิดขนาดเล็กร่วมกับสัดับจน

สุดท้ายเป็นการนำเสนอการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ g_4 และ g_5 ของสายอากาศที่นำเสนอ ซึ่งหากสังเกตในข้อมูลขนาดของพารามิเตอร์ทั้งสอง พารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าขนาดที่เหมาะสมต่างกัน ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์พบว่าถ้าพารามิเตอร์ g_4 และ g_5 มีขนาดที่เท่ากันที่ 2 mm สายอากาศไม่สามารถทำการแมตช์ $|S_{11}| \leq -10\text{ dB}$ ได้ แต่ลักษณะของกราฟจะมีลักษณะโค้งแอ่นตัวลงแต่มีค่าไม่ต่ำกว่า -10 dB ในแถบย่านความถี่ต่ำของกราฟ ซึ่งกราฟลักษณะโค้งแอ่นตัวลงแต่มีค่าไม่ต่ำกว่า -10 dB นี้เกิดขึ้นเช่นกันเมื่อพารามิเตอร์ g_4 มีขนาด 3.00 mm และพารามิเตอร์ g_5 มีขนาด 2.00 mm แต่เกิดขึ้นในแถบย่านความถี่สูงของกราฟแทน ในทางตรงกันข้ามพบว่าเมื่อสายอากาศมีพารามิเตอร์ g_4 ขนาด 2.00 mm และพารามิเตอร์ g_5 ขนาด 3.00 mm สายอากาศสามารถทำการแมตช์ $|S_{11}| \leq -10\text{ dB}$ ในย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าขนาดพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบ LoRaWAN ประเทศไทย โดยแสดงรูปผลการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ g_4 และ g_5 ในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ g_4 และ g_5 ของสายอากาศที่นำเสนอ

ดังนั้นจากการศึกษาผลกระทบของสายอากาศที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้ สามารถยืนยันได้ว่าการออกแบบสายอากาศด้วยเทคนิคการออกแบบสายอากาศรูปตัวอินบนแผ่นระบายขนาดกะทัดรัดร่วมกับเทคนิคการทำช่องเปิดและสตัดจ์นั้นสามารถทำให้สายอากาศมีการตอบสนองการทำงานในย่านความถี่ LoRaWAN ประเทศไทย และยืนยันได้ว่าขนาดของพารามิเตอร์ที่นำเสนอใน

บทความวิจัยนี้มีค่าที่เหมาะสมต่อสายอากาศรูปตัวอินบนแผ่นระบายขนาดกะทัดรัดสำหรับระบบ LoRaWAN

5. สรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอสายอากาศรูปตัวอินบนแผ่นระบายขนาดกะทัดรัดสำหรับระบบ LoRaWAN โดยสายอากาศที่นำเสนอถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปคล้ายตัวอักษรรูปตัวอินหันหน้าเข้าหากันเพื่อเป็นการลดขนาดของสายอากาศ และได้ผสานเทคนิคการทำช่องเปิดขนาดเล็กบนเส้นทองแดงตัวนำและการทำสตัดจ์ให้กับสายอากาศเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะในการแมตช์ $|S_{11}|$ และขยายช่วงกว้างความถี่ให้กับสายอากาศ โดยสายอากาศที่นำเสนอถูกสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอมีผลการจำลองและผลการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่สอดคล้องกัน โดยสายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ LoRaWAN ประเทศไทย มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบตัว มีอัตราขยายมากกว่า 1 dBi ตลอดย่านความถี่ 920.00–925.00 MHz และมีโพลาไรซ์เชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติที่ต้องการออกแบบ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบ LoRaWAN ประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. Sun, H. Li, Z. Ma, C. Wang, J. Campillo, Q. Zhang and F. Wallin, “A Comprehensive Review of Smart Energy Meters in Intelligent Energy Networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 464–479, 2016, doi: 10.1109/JIOT.2015.2512325.
- [2] W. San-Um, P. Lekbunyasir, M. Kodyoo, W. Wongsuwan, J. Makfak and J. Kerdssri, “A Long-Range Low-Power Wireless Sensor Network Based on U-LoRa Technology for Tactical Troops Tracking Systems,” in *2017 Third Asian Conference on Defence Technology (ACDT)*, Phuket, Thailand, Jan. 18–20, 2017, pp. 32–35, doi: 10.1109/ACDT.2017.7886152.

- [3] Q. Zhou, K. Zheng, L. Hou, J. Xing and R. Xu, "Design and Implementation of Open LoRa for IoT," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100649–100657, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930243.
- [4] Office of The National Broadcasting and Telecommunications Commission, 134th Royal Gazette, 289D Special Section. (Nov. 24, 2017). *Act on Organization to Assign Radio Frequency and to Regulate the Broadcasting and Telecommunications Services B.E. 2553 (2010)*. [Online]. Available: <https://www.nbt.go.th>.
- [5] L. H. Trinh, T. Q. K. Nguyen, D. D. Phan, V. Q. Tran, V. X Bui, N. V. Truong and F. Ferrero, "Miniature Antenna for IoT Devices Using LoRa Technology," in *2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Quy Nhon, Vietnam, Oct. 18–20, 2017, pp. 170–173, doi: 10.1109/ATC.2017.8167611.
- [6] Q. Zhang and Y. Gao, "Embedded Antenna Design On LoRa Radio for IoT Applications," in *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, London, UK, Apr. 9–13, 2018, pp. 1–3, doi: 10.1049/cp.2018.0920.
- [7] A. A. Ibrahim, H. A. Mohamed, M. A. Abdelghany and E. Tammam, "Flexible and frequency reconfigurable CPW-fed monopole antenna with frequency selective surface for IoT applications," *scientific reports*, vol. 13, 2023, Art. no. 8409, doi: 10.1038/s41598-023-34917-y.
- [8] M. S. Yahya, S. Soeung, F. E. Chinda, S. K. A. Rahim, U. Musa, N. B. M. Nor and C. Sovuthy, "A Compact Reconfigurable Multi-Frequency Patch Antenna for LoRa IoT Applications," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 116, pp. 77–89, 2023, doi: 10.2528/PIERM23021804.
- [9] W. Wanpare, A. Paisal and S. Chalermwisutkul, "A Compact 923 MHz Monopole Antenna for LoRaWAN IoT Applications," in *2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Chiangmai, Thailand, Oct. 14–16, 2020, pp. 53–56, doi: 10.1109/ICPEI49860.2020.9431578.
- [10] Mainsuri, E. Palantei, I. S. Areni, Wardi, M. Baharuddin, Dewiani, Sunarno, E. Setijadi and A. Hidayat, "A 923 MHz Steerable Antenna for Low Power Wide Area Network (LPWAN)," in *2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Commnetsat)*, Batam, Indonesia, Dec. 17–18, 2020, pp. 246–250, doi: 10.1109/Commnetsat50391.2020.9328990.
- [11] C.A. Balanis, "Microstrip Antennas," in *Antenna Theory Analysis and Design*, 3rd ed, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, ch. 14, sec. 14.2, pp. 816–843.
- [12] *Electromagnetic Simulation Solvers*, Dassault Systèmes, 2019. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/solvers/>