

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม

Design of a Square Microstrip Antenna Using Genetic Algorithms

รัฐนันท์ ลออบูตร* ศิริกานต์ พวงมณี สุกันยา แสงจันทร์ ชาญไชย ไทยเจียม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ถนนรังสิตนครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Rattanan Laorboot* Sirikarn Puangmanee Sukanya Sangjan Chanchai Thaijiam

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

63 M.7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Corresponding author email: nasakolthana.sombattheera@g.swu.ac.th

(Received: November 16, 2022; Revised: May 26, 2023; Accepted: June 2, 2023)

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับ CST แผ่นตัวนำรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสของสายอากาศถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้เกิดความสมมาตรทางโครงสร้าง สัมพันธ์กับเทคนิคการลัดวงจรของการบ่งคับ ลำคลื่น (แทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแผ่นตัวนำตามวิธีการออกแบบดั้งเดิม) โดยทั่วไป วิธีการออกแบบดั้งเดิมจะให้ค่ารูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอนี้สามารถหาผลเฉลยได้จริง ซึ่งได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับเข้าใกล้ค่าน้อยกว่า -10 เดซิเบล ณ ความถี่ใช้งาน

คำสำคัญ: สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส การหาค่าที่ดีที่สุด และวิธีเชิงพันธุกรรม

ABSTRACT

This research paper is to present how to design a square microstrip antenna using Genetic Algorithms at 2.45 GHz by MATLAB and CST programming. A square antenna patch is designed with a symmetrical structure, corresponding to the short-circuit technique of beamforming (rather than a rectangular patch using a conventional design). Generally, a conventional design will result in a rectangular rather than a square shape. Simulation results show that the methods presented in this paper can be used to really design the antenna with a return loss close to below -10 dB at the operating frequency.

Keyword: Square microstrip patch antenna, optimization, and genetic algorithm

1. บทนำ

สายอากาศเป็นสื่อสำคัญของการสื่อสารไร้สาย ซึ่งมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เพื่อรองรับความถี่ที่ต้องการมากขึ้นไม่ว่าจะเป็น การอำนวยความสะดวกสบายในการดำรงชีวิตและการประกอบอาชีพการทำงาน ซึ่งล้วนต้องใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อแบบไร้สาย สายอากาศเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศแบบไมโครสตริปมีความเหมาะสมในการออกแบบและใช้งาน เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นมีขนาดเล็กกะทัดรัด มีน้ำหนักเบา สามารถออกแบบได้ง่าย และราคาถูก ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปมีโครงสร้างที่สำคัญด้วยกันสามส่วนคือ แผ่นตัวนำสายอากาศ ฐานรองวัสดุ และแผ่นกราวด์ โดยส่วนของแผ่นตัวนำสายอากาศกับแผ่นกราวด์จะใช้วัสดุที่เป็นโลหะ เช่น ทองแดง ส่วนฐานรองวัสดุจะเป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นตัวนำสายอากาศและแผ่นกราวด์ สายอากาศแบบไมโครสตริปอาจมีรูปร่างหลากหลายแบบ เช่น รูปร่างวงแหวน สามเหลี่ยม วงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมจัตุรัส [1-2] ในบทความนี้ จะออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ๓ ความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยทำการศึกษารายละเอียดต่างๆ ของสายอากาศสำหรับการออกแบบสายอากาศ ไมโครสตริปที่สร้างขึ้นว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยใช้ วิธีเชิงพันธุกรรม ในงานวิศวกรรมด้านต่างๆ ได้เคยถูกนำวิธีเชิงพันธุกรรมนี้มาประยุกต์ใช้ [3-5] ตัวอย่างการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อแก้ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพกับระบบตรวจจับการบุกรุก และการนำวิธีเชิงพันธุกรรมไปใช้เพื่อค้นหากระบวนการการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทางธุรกิจ

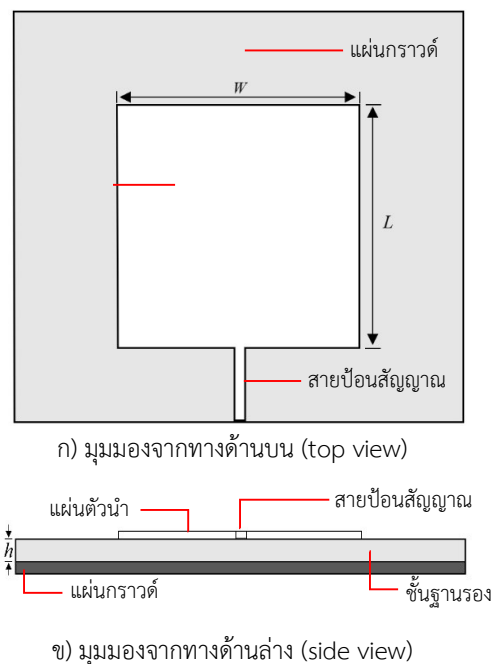
ในบทความนี้ การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อหาความกว้าง (W) และความยาว (L) ให้ได้ค่าเท่ากัน (ดูรูปที่ 1) โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม ๓ ความถี่ใช้งาน เพื่อให้ได้สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส เกิดความสมมาตรทางโครงสร้าง (แทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแผ่นตัวนำตามวิธีการ

ออกแบบดั้งเดิม) สัมพันธ์กับเทคนิคการลดวงจรของการบังคับลำคลื่น [6-7] เพื่อให้ได้สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามที่ต้องการและมีประสิทธิภาพมากกว่าการหาความกว้างและความยาวจากการคำนวณด้วยสมการทั่วไป [8]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna)

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วย แผ่นตัวนำสายอากาศหรือแพทช์ (patch) จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ชั้นซับสเตรทหรือชั้นฐานรอง (substrate) แผ่นกราวด์ (ground) และสายป้อนสัญญาณ (feedline) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

การหาความกว้างของแผ่นตัวนำได้จากสมการที่ (1)

$$w = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

เมื่อ w คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ (มิลลิเมตร)
 c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 (เมตรต่อวินาที)
 f_r คือ ความถี่ใช้งาน (เมกะเฮิรตซ์)
 ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าของสารตัวกลาง

การหาความยาวของแผ่นตัวนำได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2)$$

โดยที่

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3)(\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{reff} + 0.258)(\frac{w}{h} + 0.264)} \quad (4)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12 \frac{h}{w})^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

เมื่อ ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ประสิทธิภาพ
 L_{eff} คือ ความยาวประสิทธิภาพ (มิลลิเมตร)
 ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากปรากฏการณ์ฟริงกิง (fringing effect) (มิลลิเมตร)
 h คือ ความหนาของชั้นฐานรอง (มิลลิเมตร)

จากรูปที่ 1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่ต้องการ ค่าความกว้าง (w) และความยาว (L) จะต้องมีความเท่ากัน เพื่อให้ได้แผ่นตัวนำที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสในการออกแบบ แผ่นกราวด์ถูกออกแบบให้มีขนาดเป็นสองเท่าของแผ่นตัวนำ และสายป้อนสัญญาณถูกออกแบบเป็นสายส่งแบบไมโครสตริป

2.2 วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)

วิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาโดยเลียนแบบวิวัฒนาการทางธรรมชาติที่มีพื้นฐานจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติของ Charles Darwin [9-10] ในบทความนี้ ได้นำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้การกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) และฟังก์ชันความเหมาะสมตามวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นสมการในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานสำหรับหาค่าความกว้างแผ่นตัวนำดังสมการที่ (1) และความยาวของแผ่นตัวนำดังสมการที่ (2)

จากรูปที่ 2 จะเป็นขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์สายอากาศคือค่าของความกว้างและความยาวโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม และได้ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของวิธีเชิงพันธุกรรมไว้ จากนั้นวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการสร้างประชากรเริ่มต้น ซึ่งจะเป็นค่าของความกว้างและความยาวคู่แรกเพื่อนำไปคำนวณในฟังก์ชันความเหมาะสมของวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อทำการตรวจสอบว่าได้ความถี่ที่ต้องการหรือไม่ หากยังไม่ได้ความถี่ที่ต้องการแล้วจะดำเนินการต่อด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมคือ ทำการไขว้เปลี่ยนโครโมโซม การกลายพันธุ์ การคัดเลือก นำไปหาฟังก์ชันความเหมาะสม และตรวจสอบเงื่อนไขจนกว่าจะได้ประชากรที่ดีที่สุด ซึ่งในที่นี้ ประชากรที่ดีที่สุดคือ ค่าความกว้างและความยาวของสายอากาศ ไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ณ ความถี่ใช้งาน

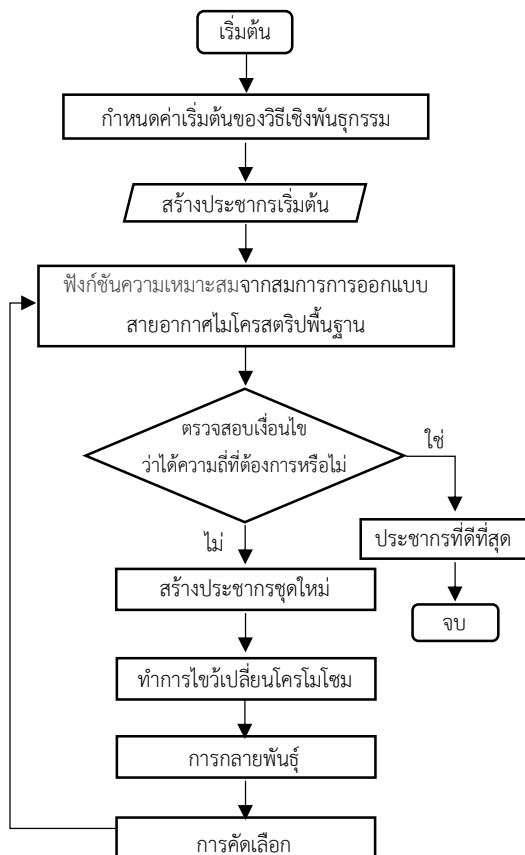
3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมผ่านโปรแกรม MATLAB

จากหัวข้อที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากเงื่อนไขดังกล่าวนี้พบว่าหากใช้สมการที่ (1) - (5) สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมมักจะ

ไม่ได้รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากค่าของความกว้างมีความสัมพันธ์กับความยาวของสายอากาศ ดังนั้นจึงมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยกันสองตัวคือ ความกว้าง (W) และความยาว (L) โดยจะให้พารามิเตอร์ทั้งสองเป็นเป้าหมายในการหาคำตอบของวิธีเชิงพันธุกรรม สำหรับผลลัพธ์ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ความกว้าง (W) และความยาว (L) มีขนาดเท่ากัน โดยได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบไว้ดังตารางที่ 1

หลังจากที่ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการออกแบบแล้ว ก็จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าที่ทำ การเขียนโปรแกรม MATLAB ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน (f_r) เพื่อนำไปทำการจำลองออกแบบของสายอากาศผ่านโปรแกรม CST ต่อไป

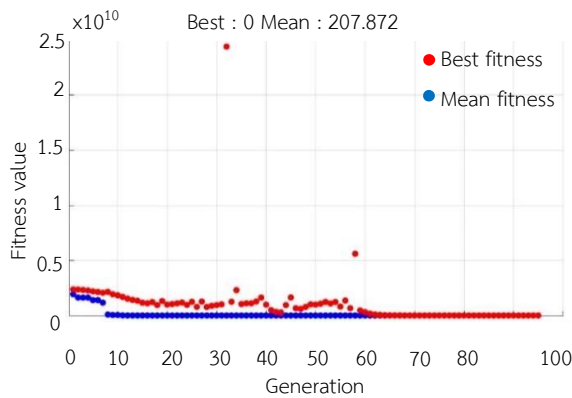


รูปที่ 2 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีเชิงพันธุกรรม ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบ

พารามิเตอร์ที่ใช้	ค่าพารามิเตอร์
ความยาวแผ่นกราวด์ (L_g)	$2L$
ความกว้างแผ่นกราวด์ (W_g)	$2W$
ความสูงของแผ่นฐานรอง (h)	0.75 mm
ความถี่ใช้งาน (f_r)	2.45 GHz
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าของสารตัวกลาง (ϵ_r)	4.3 - 4.7

3.2 การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม

ในการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้ จะออกแบบให้ค่าความกว้าง และความยาว มีขนาดที่เท่ากันโดยจะใช้สมการการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสสมการที่ (1) - (5) เพื่อเป็นฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) โดยค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันความเหมาะสมจะพิจารณาจากสมการการออกแบบพื้นฐานเทียบกับความถี่ใช้งาน หากค่ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์หมายถึงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือได้ค่าความกว้าง (W) ที่มีค่าเท่ากับ ความยาว (L) ณ ความถี่ใช้งาน และในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ของวิธีเชิงพันธุกรรมเริ่มต้นไว้ดังนี้ จำนวนการวนซ้ำสูงสุดที่ 100 ขนาดของประชากรอยู่ที่ 50 เพื่อพิจารณาแนวโน้มของผลเฉลย จากนั้นทำการเพิ่มจำนวนประชากรขึ้นครั้งละ 50 จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทางด้านระยะเวลาในการประมวลผล และความถูกต้องของผลเฉลยคือ จำนวนการวนซ้ำสูงสุดที่ 100 ขนาดของประชากรอยู่ที่ 350 (รูปที่ 3) ผลที่ได้จากการคำนวณซ้ำ จนได้จำนวนวนซ้ำสูงสุด 100 และขนาดของประชากร 350 (บันทึกว่า W และ L ถูกบีบบังคับตามวิธีเชิงพันธุกรรมในการออกแบบให้มีค่าที่เท่ากันในกรณีของการพิจารณาความสมมาตรทางโครงสร้างสายอากาศ สัมพันธ์กับเทคนิคการลดวงจรของการบังคับค่าคลื่น)



รูปที่ 3 กราฟแสดงการหาค่าของฟังก์ชันความเหมาะสม

3.3 การจำลองแบบผลลัพธ์ด้วยโปรแกรม CST

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม CST สำหรับการจำลองแบบการสร้างสายอากาศและวิเคราะห์ผลลัพธ์ค่าสูญเสียย้อนกลับ ณ ความถี่ใช้งาน โดยตารางที่ 2 จะเป็นตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลองของค่าความหนาของแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นแผ่นตัวนำของสายอากาศและกราวด์ มีค่าเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 2 ความหนาแผ่นฐานรอง (h) ความหนาแผ่นตัวนำ (t) และความกว้างสายป้อนสัญญาณ (w_f) ถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับการสร้างแบบจำลองของสายอากาศ ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 2 ถูกนำไปใช้การสร้างแบบจำลองของสายอากาศบนโปรแกรม CST เพื่อหาค่าความถี่ใช้งานและค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

4. ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานนี้ ได้สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ณ ความถี่ใช้งาน 2.449 กิกะเฮิรตซ์ (ใกล้เคียงกับความถี่ใช้งานที่ต้องการออกแบบ 2.45 กิกะเฮิรตซ์) โดยมีค่าขนาดสภาพเจาะจงทิศทางของพลูหลัก

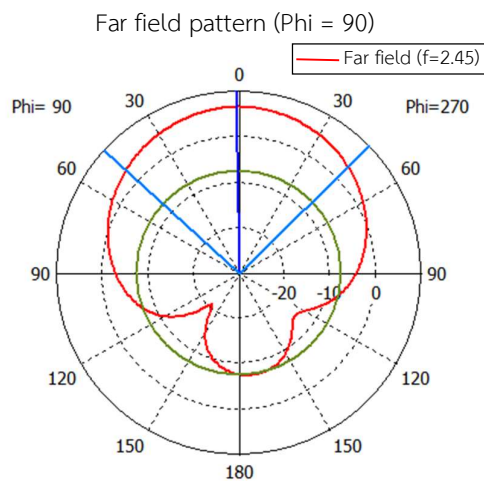
(main lobe magnitude) ทิศทางของพลูหลัก (main lobe direction) ความกว้างมุมของพลู (angular width) และระดับพลูด้านข้าง (side lobe level) โดยระดับพลูด้านหลัง (back lobe level) มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพลูด้านหน้า (front lobe level) ซึ่งจะช่วยลดการแทรกสอดของสัญญาณได้ และภาครับจะสามารถตรวจจับสัญญาณได้ว่าสัญญาณใดเป็นสัญญาณหลักที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 แบบรูปการแผ่กระจายของสนามระยะไกล (far field pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4 พลูหลักของสนามระยะไกลอยู่ในมุมอ้างอิง 90 องศา (Φ 90) บันทึกว่าทิศทางของพลูหลักของสายอากาศที่ออกแบบเทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก (isotropic antenna)

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

พารามิเตอร์ที่ใช้	ค่าพารามิเตอร์
ความกว้างแผ่นตัวนำ (W)	28.97131 mm
ความยาวแผ่นตัวนำ (L)	28.97131 mm
ความยาวแผ่นกราวด์ (L_g)	57.94262 mm
ความกว้างแผ่นกราวด์ (W_g)	57.94262 mm
ความหนาของแผ่นฐานรอง (h)	0.75 mm
ความหนาของแผ่นตัวนำ (t)	0.035 mm
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าของสารตัวกลาง (ϵ_r)	4.3 - 4.7 F/m
ความกว้างสายป้อนสัญญาณ (w_f)	1.25 mm

ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (return loss, S_{11}) ถูกแสดงในรูปที่ 5 มีค่าประมาณ -8.36 เดซิเบล ณ ความถี่ใช้งานที่ 2.449 กิกะเฮิรตซ์ (ร้อยละความผิดพลาดจริงเท่ากับ 0.04 เมื่อเทียบกับความถี่ใช้งานที่ต้องการออกแบบ ณ 2.45 กิกะเฮิรตซ์) ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้ ณ ความถี่ที่ออกแบบ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าที่สูงกว่า -10 เดซิเบล สาเหตุมาจากการที่ยังไม่ได้ทำการแมตช์ซึ่งตัวสายอากาศกับจุดป้อนสัญญาณและค่าของความถี่ที่ใช้งานยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่

เล็กน้อย อันเนื่องมาจากสมการการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปนั้นไม่มีค่าพารามิเตอร์ในส่วนของความหนาของแผ่นทองแดง แต่ในการสร้างแบบจำลองของสายอากาศ ความหนาของแผ่นทองแดงนี้ถูกกำหนดให้มีค่าเพื่อสอดคล้องกับความเป็นจริงทางกายภาพที่แผ่นทองแดงต้องมีค่าความหนา



Theta / Degree vs. dBi

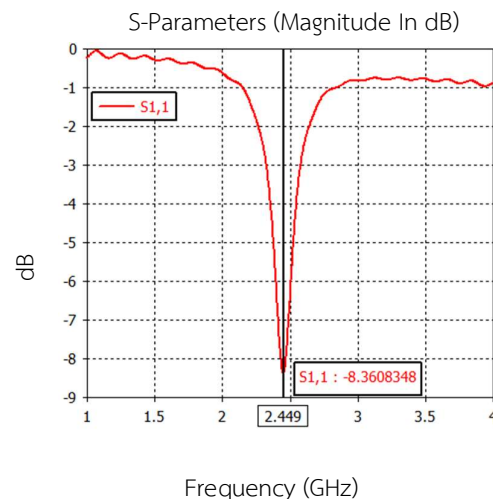
Frequency = 2.45 GHz
Main lobe magnitude = 6.49 dBi
Main lobe direction = 1.0 deg
Angular width (3 dB) = 93.1 deg
Side lobe level = -13.9 dB

รูปที่ 4 แบบรูปการแผ่กระจายของสนามระยะไกล (far field pattern)

5. สรุปผล

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้น โดยวิธีการดั้งเดิมในการออกแบบคือ การใช้สมการพื้นฐานจากหัวข้อที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป จะต้องใช้การแทนค่า

ความกว้าง (W) และความยาว (L) ลงในสมการที่ (1) - (5) เพื่อหาค่าความถี่ใช้งาน หากไม่ได้ค่าความถี่ที่ต้องการ จะต้องกำหนดค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) ชุดใหม่เพื่อคำนวณ มีการลองถูกลองผิดในการแทนค่าไปเรื่อย ๆ ในกรณีที่ต้องการได้ค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) เท่ากัน จะใช้ระยะเวลาในการทำการทดลองอย่างมากจนกว่าจะได้ผลเฉลยที่ต้องการ อีกทั้งไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะพบผลเฉลยที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งแตกต่างจากวิธีเชิงพันธุกรรมโดยวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นจะสามารถกำหนดข้อจำกัดได้ว่าต้องการให้หาค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) อยู่ในช่วงผลเฉลยที่มีเท่ากันเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดได้ นั่นคือมีค่าที่เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน วิธีเชิงพันธุกรรมจึงถูกนำมาใช้เพื่อทำการหาผลเฉลย ในการปรับปรุงค่าที่ดีที่สุดเพื่อส่งผลให้ได้ค่าความกว้างและความยาวของสายอากาศที่เท่ากันนั้น เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความสมมาตรทางโครงสร้าง (แทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแผ่นตัวนำตามวิธีการออกแบบดั้งเดิม) สัมพันธ์กับเทคนิคการลดวงจรของการบังคับลำคลื่น ซึ่งจะเป็นส่วนขยายของงานวิจัยในอนาคตสำหรับผู้สนใจต่อไป



รูปที่ 5 ค่าสูญเสียย้อนกลับ ณ ความถี่ 2.449 กิกะเฮิรตซ์

6. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้ทำการวิจัยในครั้งนี้นี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Liu, Z. Tang, Z. Wang, H. Li and Y. Yin, "Gain Enhancement of a Broadband Symmetrical Dual-Loop Antenna Using Shorting Pins," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 8, pp. 1369-1372, Aug. 2018.
- [2] Yin, Q. Wu, C. Yu, H. Wang and W. Hong, "Millimeter-Wave Broadband Planar Cavity-Backed Antenna with Approximately Symmetrical Radiation Patterns," in *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2018, pp. 1943-1944.
- [3] Z. Yan and Y. Zhou, "Application to Optimal Control of Brushless DC Motor with ADRC Based on Genetic Algorithm," in *2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications(AEECA)*, Dalian, China, 2020, pp. 1032-1035.
- [4] V. Jain and M. Agrawal, "Applying Genetic Algorithm in Intrusion Detection System of IoT Applications," in *2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*(48184), Tirunelveli, India, 2020.
- [5] F. Xu, J. Yang, L. Liu and G. Li, "A Method of Process Mining based on Genetic Algorithm," in *2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST)*, Guangzhou, China, 2021, pp. 698-703.
- [6] S.A. Aghdam, J. Bagby, and R.J. Pla, "Design and Development of Linear Array of Rectangular Aperture Coupled Microstrip Antennas with Application in Beamforming," in *17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, July 10-13, 2016.
- [7] C.Z. Han, G.L. Huang, T. Yuan, and C.Y.D. Sim, "A Dual-Band Millimeter-Wave Antenna for 5G Mobile Applications," in *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, July 7-12, 2019.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 1996.
- [9] L. Deng, P. Yang and W. Liu, "An Improved Genetic Algorithm," in *2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2019, pp. 47-51.
- [10] J. Zhao, T. Huang, F. Pang and Y. Liu, "Genetic Algorithm Based on Greedy Strategy in the 0-1 Knapsack Problem," in *2009 Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, 2009, pp. 105-107.