

สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นได้ด้วยการหาค่าที่เหมาะสม
แบบแมลงหวี่ปรับปรุงสำหรับระบุทิศทางมาถึงของสัญญาณวิทยุ
Adaptive Array Antenna with Modify Fruit Fly Optimization Algorithm
for Finding Arrival Direction of Radio Signal

อลงกรณ์ ลัง¹, ชวงค์ พงษ์เจริญพานิชย์ และ สุภกิต แก้วดวงตา^{1,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ช้างเผือก เมือง เชียงใหม่ 50300

² ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Alongkorn Lang¹, Chuwong Phongcharoenpanich², Supakit Kawdungta^{1,*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering,

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

² Department of Telecommunications Engineering, School of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

***Corresponding Author E-mail:** supakitting@rmutl.ac.th

Received: Feb 19, 2022; **Revised:** Jun 15, 2022; **Accepted:** Jun 27, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นได้เพื่อใช้สำหรับการระบุทิศทางมาถึงของสัญญาณวิทยุในช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz สำหรับแก้ไขปัญหาคาบการรบกวนของสัญญาณวิทยุในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยจะใช้สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงในการช่วยระบุทิศทางที่มีสัญญาณแรงที่สุด สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นที่ได้แนะนำประกอบด้วย สายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมวางเรียงกันเป็นแฉะลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ วงจรเลื่อนเฟสแบบดิจิทัล ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง และไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งกระบวนการพิจารณาทิศทางและการปรับค่าคลื่นหลักของสายอากาศจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จากผลการจำลองของสายอากาศแฉะลำดับเชิงระนาบพบว่าสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักที่มีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 30 องศา ได้ในระนาบมุมกวาดและระนาบมุมยก ด้วยการปรับความต่างเฟสของสัญญาณของแต่ละองค์ประกอบย่อย จากผลการสร้างและทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบสามารถปรับค่าคลื่นได้สอดคล้องกับผลการจำลองและเมื่อใช้งานร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในการระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศได้

คำสำคัญ: สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นได้, กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง, แฉะลำดับเชิงระนาบ, การระบุทิศทางมาถึงของสัญญาณ, สายอากาศแฉะลำดับแบบแพทช์

Abstract

This paper presents an adaptive array antenna for radio signal direction finder application in the frequency of 2.4–2.5 GHz for troubleshooting co-channel interference issue in wireless local area network by using adaptive array antenna together with the modified fruit fly optimization algorithm (MFOA) to help finding Arrival Direction of Radio Signal. The proposed antenna consists of 4 elements of a microstrip patch planar array antenna, digital phase shifter, directional coupler and microcontroller. The simulation results show that the radiation pattern has main lobe of beamwidth 30 degrees and the main beam can be adjusted in both azimuth and elevation plane by controlling the phase of the signal on each element. The measurement results of the prototype antenna show that the radiation pattern can be adapted according to the simulation result by using the modified fruit fly optimization algorithm. The antenna should efficiently estimate the direction of arrival of the radio signal.

Keywords: Adaptive Array Antenna, Modified Fruit Fly Optimization Algorithm, Planar Array, Arriva Directionl, Patch Antenna Array.

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาไปอย่างก้าวกระโดดจนได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญในสังคมปัจจุบันและมีแนวโน้มของความต้องการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 และ 5 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) และเทคโนโลยีบลูทูธ (Bluetooth) เป็นต้น

เทคโนโลยีเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ใช้คลื่นวิทยุในการส่งข้อมูลโดยมีช่องความถี่สำหรับใช้งานที่จำกัด ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายโดยเฉพาะตั้งแต่ความถี่ 2.4 ไปจนถึง 2.5 GHz ซึ่งเป็นช่องความถี่ที่มีการใช้งานกันอย่างหนาแน่นย่อมมีโอกาสเกิดการรบกวนที่ช่องสัญญาณเดียวกัน (Co-Channel Interference : CCI) และส่งผลให้จำนวนช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้จริงลดน้อยลง [1–5]

ในแก้ไขปัญหาของสัญญาณรบกวนนั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การลดกำลังงานส่ง การเปลี่ยนช่องความถี่ การลดความหนาแน่นการใช้งานในบริเวณเดียวกัน อย่างไรก็ตามหากมีการรบกวนกันจำนวนมากเกินขีดจำกัดจึงจำเป็นต้องทำการค้นหาแหล่งที่มาและยุติการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีปัญหา แต่การจะทราบอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีปัญหาอยู่นั้นต้องอาศัยเทคนิคการหาทิศทางมาถึงของสัญญาณ ซึ่งแต่เดิมต้องอาศัยสายอากาศ

แบบชี้ทิศทางและใช้กำลังคนในการออกตรวจสอบ [6] ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาสายอากาศแถวลำดับปรับค่าคลื่นได้ (Adaptive Array Antenna: AAA) สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบการหาทิศทางของคลื่นวิทยุที่มาถึงเพื่อใช้ในการค้นหาแหล่งที่มาของสัญญาณได้

การระบุทิศทางของคลื่นวิทยุนี้มีหลายวิธีและมีความแตกต่างกันในส่วนหลักการทำงานของสายอากาศเครื่องรับสัญญาณและระบบประมวลผล ในอดีตนักวิจัยได้ทดลองใช้สายอากาศแบบบ่วงต่อเข้ากับเครื่องรับสัญญาณแล้วสังเกตความแรงของสัญญาณที่รับได้ในขณะที่ทำการหมุนตัวสายอากาศ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของสายอากาศแบบบ่วงที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 2 ทิศทางจึงไม่สามารถระบุทิศทางของคลื่นวิทยุได้แน่ชัด [7] หลังจากนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบดังกล่าวโดยการเพิ่มองค์ประกอบของสายอากาศเป็นสายอากาศไดโพลหรือโมโนโพลจำนวน 4–5 องค์ประกอบ แล้วทำการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่รับได้จากแต่ละองค์ประกอบมีชื่อเรียกว่าสายอากาศ Adcock [8–10] แต่วิธีนี้ยังมีข้อเสียเนื่องจากต้องใช้เครื่องรับสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนของสายอากาศไปด้วย

นอกจากหลักการระบุทิศทางโดยการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณแล้วยังมีวิธีการระบุทิศทางโดยใช้การวัดผลต่างของความถี่ที่รับได้ในขณะที่สายอากาศมีการ

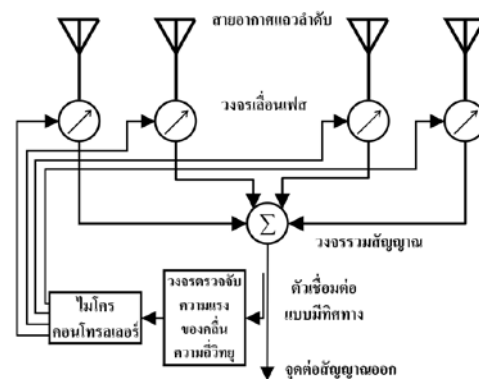
เคลื่อนที่โดยอาศัยของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) [11] ระบบระบุทิศทางที่ใช้หลักการนี้จะมีสายอากาศหลายองค์ประกอบจัดวางเป็นวงกลมรอบทิศทางและใช้สวิตช์ในการจำลองการเคลื่อนที่ของสายอากาศ จากนั้นทำการวัดผลต่างของความถี่ที่รับได้ในขณะทำการสวิตช์ แต่ข้อจำกัดของระบบนี้จะต้องอาศัยสวิตช์ความเร็วสูงและต้องใช้สายอากาศหลายองค์ประกอบ

ต่อมาเป็นการระบุทิศทางโดยใช้หลักการวัดเฟสของสัญญาณที่รับเข้ามาในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบหรือมีชื่อเรียกว่าอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) [12],[13] ระบบนี้มักใช้สายอากาศ 9 ถึง 10 องค์ประกอบจัดวางเป็นวงกลมรอบทิศทางเช่นเดียวกับหลักการของดอปเพลอร์แต่ให้ความแม่นยำสูงกว่าและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน แต่ข้อจำกัดของหลักการอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์คือต้องใช้สายอากาศหลายองค์ประกอบและต้องอาศัยระบบประมวลผลที่มีความซับซ้อนและมีราคาสูง

จากหลักการระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น การระบุทิศทางด้วยวิธีการวัดความแรงของสัญญาณเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด แต่ต้องอาศัยสายอากาศที่มีแบบรูปกระจายคลื่นเป็นแบบชีททิศทางและสามารถปรับลำคลื่นได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การออกแบบองค์ประกอบสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบมาวางแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) [14–20] และใช้หลักการปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าด้วยการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบจนกว่าจะรับความแรงสัญญาณได้สูงสุด การนำเอากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงจากงานวิจัย [21–23] มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเชื่อได้ว่าจะเป็นส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปรับลำคลื่นของสายอากาศ โดยกระบวนการนี้จะประยุกต์ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมวงจรเลื่อนเฟสในการปรับลำคลื่นของสายอากาศให้ชี้ไปยังทิศทางที่มีความแรงสัญญาณสูงสุดได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงนำทิศทางของลำคลื่นมาใช้เป็นแนวทางในการหาแหล่งที่มาของสัญญาณวิทยุ โดยมีขอบเขตการระบุทิศทางได้ไม่เกิน ± 30 องศา ในระนาบมุมกวาดและระนาบมุมยก

2. สายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

งานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรองค์ประกอบเดียว จากนั้นนำสายอากาศดังกล่าวมาวางเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ บนวัสดุฐานรองเดียวกัน ออกแบบวงจรสำหรับวางไอซีเลื่อนเฟสจำนวน 4 วงจร ออกแบบวงจรรวมสัญญาณแบบเข้า 4 ทาง ออก 1 ทางและออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางต่อไปยังวงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลสัญญาณด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงและปรับวงจรเลื่อนเฟสจนกว่าจะได้รับความแรงสูงสุด ซึ่งส่วนประกอบของงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของสายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

2.1 สายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจร

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสายอากาศมาจากโครงสร้างไมโครสตริปแผ่นที่มีการป้อนสัญญาณเข้าทางด้านหลังของส่วนแพร์กระจายคลื่นด้วยเทคนิคการป้อนสัญญาณแบบโพรบ (ProbeFeed) แล้วทำการลดขนาดของสายอากาศเพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงภาคสนามด้วยการเพิ่มจุดลัดวงจร (Shorting Pin Loading) เข้าไประหว่างส่วนแพร์กระจายคลื่นและระนาบกราวด์จำนวน 2 จุด การออกแบบเริ่มจากสายอากาศองค์ประกอบเดียวมีส่วนแพร์กระจายคลื่นแบบแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด $L = 28 \text{ mm}$ $W = 38 \text{ mm}$ ที่ความถี่ 2.45 GHz จากนั้นทดลองเพิ่มจุดลัดวงจรเข้าไปในสายอากาศโดย

สามารถประมาณค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนไปด้วยวิธีการของแบบจำลองควอดรี [24] ตามสมการที่ (1)

$$f_{10} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

โดย

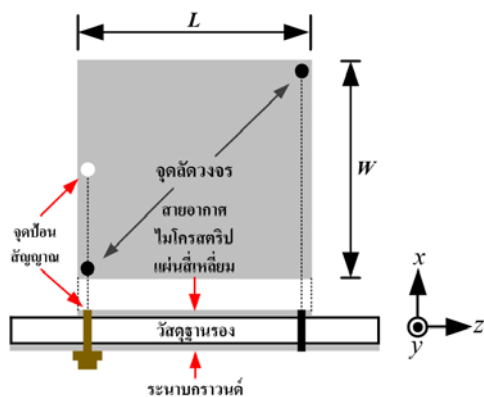
f_{10} = ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่โหมด TM_{10}

c = ความเร็วแสงในอากาศว่าง 3×10^8 m/s

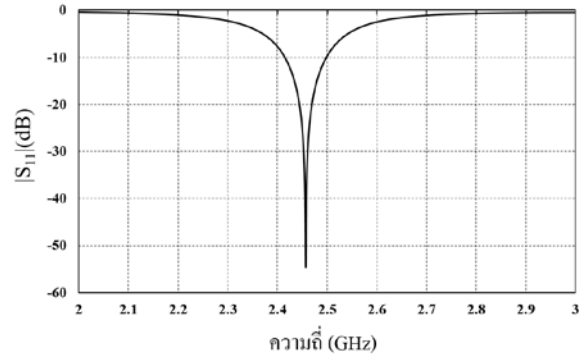
L = ขนาดของส่วนแผ่กระจายคลื่น

ϵ_r = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

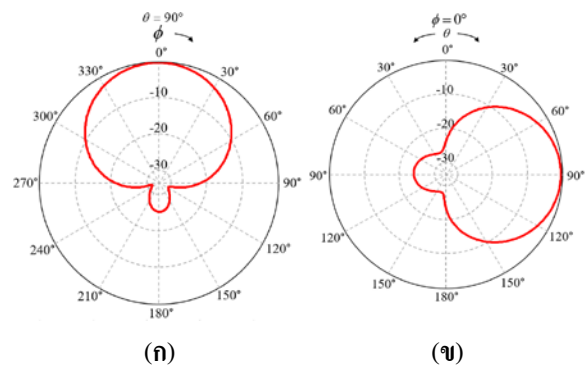
เมื่อทำการเพิ่มจุดลัดวงจรพบว่าผลของการเพิ่มจุดลัดวงจรเข้าไปยังโครงสร้างสายอากาศส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำลงจึงสามารถลดขนาดของสายอากาศลงจากเดิมมีโครงสร้างดังรูปที่ 2 และผลการออกแบบดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจุดลัดวงจรเข้าไปยังองค์ประกอบสายอากาศนั้นส่งผลต่อขนาด ช่วงกว้างความถี่ และอัตราขยายของสายอากาศ โดยสายอากาศมีความยาวลดลงจากเดิม 10.3 mm ความกว้างลดลงจากเดิม 0.3 mm คิดเป็น 28% มีช่วงกว้างความถี่เพิ่มขึ้น 20.6 MHz คิดเป็น 33% และมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 0.12 dB คิดเป็น 2% จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในรูปที่ 3 พบว่าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า -10 dB ตั้งแต่ความถี่ 2.4–2.5 GHz จากผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดียวดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นชี้ทิศทาง มีลำคลื่นหลักชี้ไปยังทิศทาง 0 องศา มีความกว้างลำคลื่น 30 องศา



รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรองค์ประกอบเดียว



รูปที่ 3 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (ก)

ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz

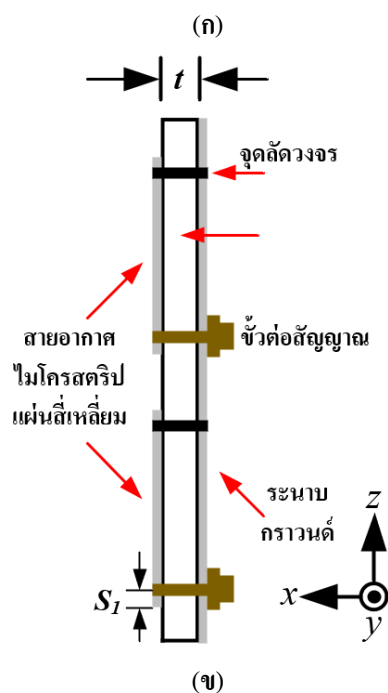
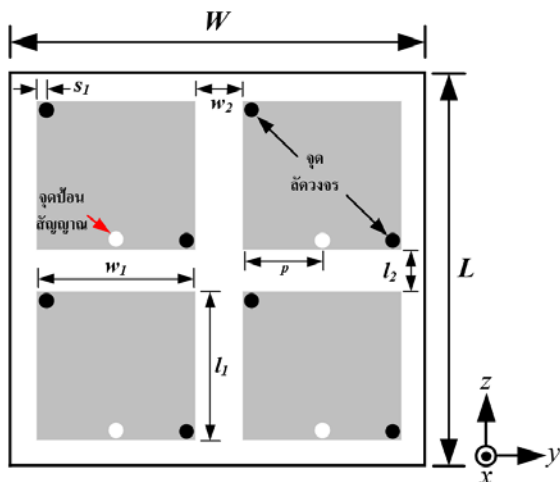
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรองค์ประกอบเดียว

พารามิเตอร์	เมื่อไม่มีจุดลัดวงจร	เมื่อเพิ่มจุดลัดวงจร
L	38 mm	27.7 mm
W	28 mm	27.7 mm
ช่วงกว้างความถี่	62 MHz	82.6 MHz
อัตราขยาย	5.95 dBi	6.07 dBi

เมื่อได้สายอากาศองค์ประกอบเดียวเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำเอาสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมทำการลัดวงจร 2 จุด จำนวน 4 องค์ประกอบมาจัดวางเป็นแถวลำดับเชิงระนาบด้วยระยะห่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ w_2 มีโครงสร้างดังรูปที่ 5 และมีรายละเอียดโครงสร้างของสายอากาศดังตารางที่ 2

ในขั้นตอนการออกแบบได้มีการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด (xy)

และระนาบมุมยก (xz) ทำการจำลองโดยใช้วิธีการเปลี่ยนเฟสขององค์ประกอบย่อย โดยเลื่อนเฟสไป 90 องศา ครึ่งละ 2 องค์ประกอบ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6-10 ตามลำดับ เมื่อทำการออกแบบเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบดังรูปที่ 11 ตามลำดับ



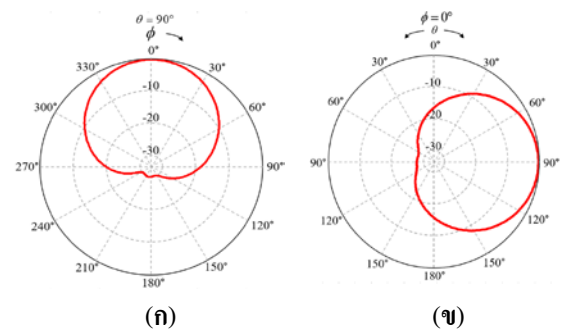
รูปที่ 5 โครงสร้างสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบ (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง

โดยรูปแบบขององค์ประกอบในรูปที่ 5 สายอากาศและการจัดวางองค์ประกอบจะมีความแตกต่างจากงานวิจัยอ้างอิงที่

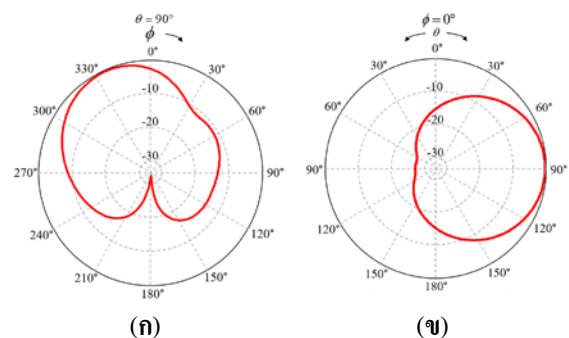
[21] เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบการจัดวางองค์ประกอบเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ สามารถปรับค่าคลื่นของสายไปยังทิศทางต่างๆ ได้รวมไปถึงสามารถนำไปประยุกต์ในการหาทิศทางของสัญญาณวิทยุ

ตารางที่ 2 รายละเอียดของโครงสร้างสายอากาศ

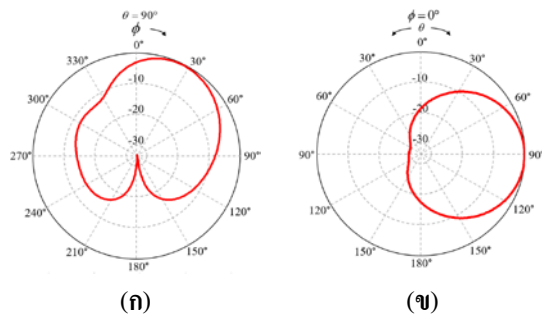
พารามิเตอร์	รายละเอียด	ขนาด (mm)
W	ความกว้างสายอากาศ	75
L	ความยาวสายอากาศ	75
t	ความหนาวัสดุฐานรอง	3.2
w_1	ความกว้างองค์ประกอบ	29.5
w_2	ช่องระหว่างองค์ประกอบ	7.5
l_1	ความยาวองค์ประกอบ	29.5
l_2	ช่องระหว่างองค์ประกอบ	7.5
p	จุดป้อนสัญญาณ	14.75
s_1	จุดต่อลัดวงจร	2



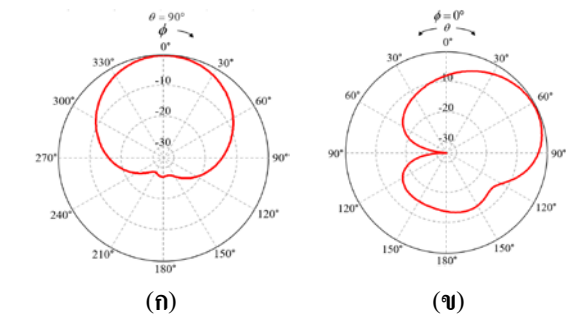
รูปที่ 6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยไม่มีการเลื่อนเฟส (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



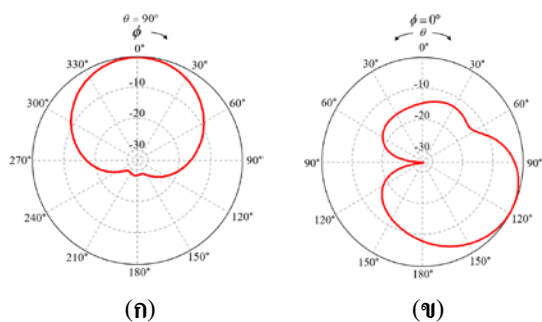
รูปที่ 7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 3 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



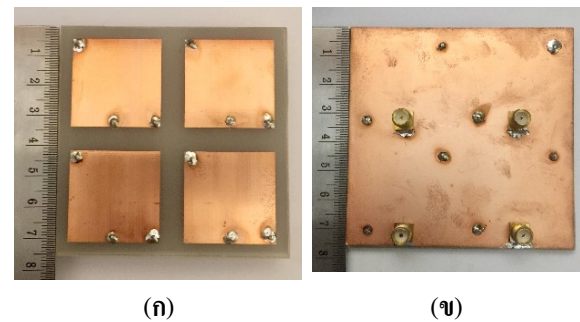
รูปที่ 8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 2 และ 4 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



รูปที่ 10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 3 และ 4 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



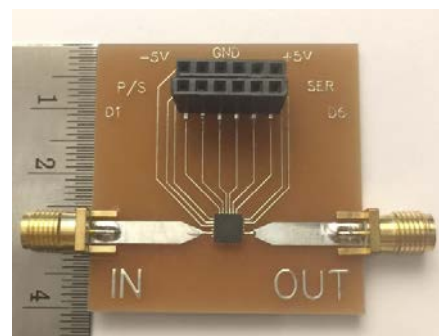
รูปที่ 9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



รูปที่ 11 ต้นแบบสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบ (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านหลัง

2.2 วงจรเลื่อนเฟส

ต่อมาเป็นการออกแบบวงจรเลื่อนเฟส ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับแต่งเฟสของสัญญาณที่รับมาจากสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบ แยกออกจากกัน 4 วงจร ควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีโครงสร้างเป็นสายส่งสัญญาณไมโครสตริป พร้อมกับจุดต่อไฟเลี้ยงและจุดต่อสัญญาณดิจิทัล วงจรเลื่อนเฟสนี้ใช้ไอซีเลื่อนเฟสยี่ห้อ MACOM Technology, Lowell, MA, USA รุ่น MAPS-010144 [25] มีตัวถังแบบ PQFN ขนาด 4 mm รองรับความถี่ตั้งแต่ 2.3–3.8 GHz ควบคุมการเลื่อนเฟสด้วยสัญญาณดิจิทัลขนาด 4 บิต สามารถเลื่อนเฟสได้ทั้งหมด 16 สภาวะ ตั้งแต่ 0–360 องศา ครึ่งละ 22.5 องศา มีค่าความผิดพลาดของเฟส ± 3.5 องศา มีค่าการสูญเสียภายในเฉลี่ย 2.5 dB ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันเท่ากับ 1.3 วงจรเลื่อนเฟสดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 12 และตารางผลการทดสอบการเลื่อนเฟสในแต่ละสถานะแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 12 วงจรเลื่อนเฟสดังกล่าว

ตารางที่ 3 ตารางผลการทดสอบวงจรเลื่อนเฟสดังกล่าว

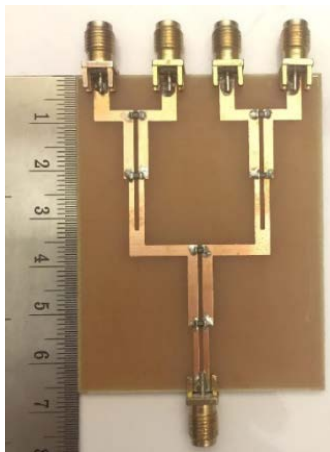
สถานะลอจิก						มุมเฟส
D6	D5	D4	D3	D2	D1	องศา
0	0	0	0	x	x	0
0	0	0	1	x	x	15.6
0	0	1	0	x	x	27.5
0	1	0	0	x	x	53.2

ตารางที่ 3 ตารางผลการทดสอบวงจรเลื่อนเฟสดังกล่าว (ต่อ)

สถานะลอจิก						มุมเฟส
1	0	0	0	x	x	205.5
1	1	1	1	x	x	344.5

2.3 วงจรรวมสัญญาณ

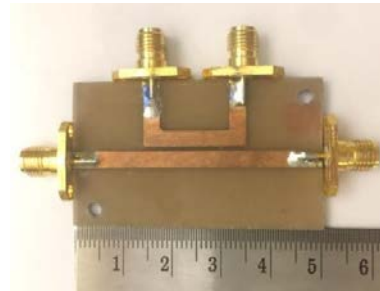
ถัดมาเป็นการออกแบบวงจรรวมสัญญาณ สำหรับใช้ในการรวมสัญญาณที่รับมาจากวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 วงจรเข้าด้วยกัน โดยจะใช้หลักการออกแบบวงจรรวมสัญญาณแบบ Wilkinson [26] แบบเข้า 4 ทาง ออก 1 ทางบนโครงสร้างแบบไมโครสตริปใช้วัสดุฐานรองแบบ FR 4 ($\epsilon_r = 4.3$) ความหนา 1.7 mm ดังรูปที่ 13 จากผลการทดสอบวงจรรวมสัญญาณต้นแบบมีค่าการสูญเสียการส่งผ่าน 7 dB ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับ -20 dB



รูปที่ 13 วงจรรวมสัญญาณต้นแบบ

2.4 ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง

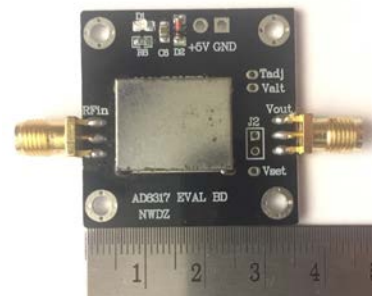
ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางมีหน้าที่ในการดึงสัญญาณส่วนหนึ่งจากเอาต์พุตของวงจรมาป้อนให้กับวงจรวัดความแรงของสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางเป็นอุปกรณ์ที่มี 4 พอร์ต ประกอบไปด้วยพอร์ตอินพุตสำหรับสัญญาณขาเข้าที่รับมาจากวงจรรวมสัญญาณ พอร์ตเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณออกไปใช้งาน พอร์ตเชื่อมต่อสำหรับดึงสัญญาณมาวิเคราะห์ และ พอร์ตแยกโคเดเคียวซึ่งไม่ได้ใช้งานและได้ต่อโหลด 50 โอห์มไว้ จากการทดสอบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางมีค่าการสูญเสียภายในเท่ากับ 2 dB และค่าอัตราส่วนการเชื่อมต่อเท่ากับ 15 dB โดยตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางต้นแบบแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางต้นแบบ

2.5 วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณวิทยุ

วงจรนี้ทำหน้าที่รับสัญญาณจากตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง นำมาผ่านภาคขยายสัญญาณและส่งไปยังไอซีตรวจวัดระดับความแรงสัญญาณยี่ห้อ Analog Device รุ่น AD8317 [27] รองรับความถี่ตั้งแต่ 1 MHz ถึง 10 GHz สามารถตรวจจับความแรงของสัญญาณได้ต่ำสุด -55 dBm และให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.2 V วงจรวัดความแรงของสัญญาณต้นแบบแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณวิทยุ

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

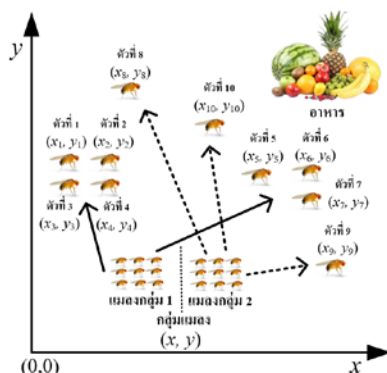
ไมโครคอนโทรลเลอร์ในงานวิจัยนี้ใช้ Arduino รุ่น Uno R3 [28] ดังรูปที่ 16 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR มีขา ที่รองรับสัญญาณดิจิทัลได้สูงสุด 19 ขา โดยจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณดิจิทัลไปควบคุมวงจรเลื่อนเฟส และตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรวัดความแรงของสัญญาณ ให้ได้แรงดันที่สูงที่สุด และใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงห้วยปรับปรุงมาใช้ในการประมวลผล และควบคุมวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 16 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

2.7 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง[21–23] เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่เลียนแบบพฤติกรรม การหาอาหารของแมลงหิว ถ้าตัวใดตัวหนึ่งเจออาหารแมลง หิวตัวอื่นๆ ก็จะตามไปหาอาหารในทิศทางนั้นๆ ในทาง คณิตศาสตร์ถ้าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเจอคำตอบที่ เหมาะสม พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ก็จะใช้วิธีเดียวกันในการหา คำตอบ โดยมีการแบ่งกลุ่มของแมลงหิวออกเป็น 2 กลุ่ม แยกกันทำหน้าที่ 2 ส่วน คือ Local Search และ Global Search ดังรูปที่ 17 ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ค่าการเปลี่ยนแปลง สถานะลอจิกที่ควบคุมวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 ตัวซึ่งเป็นตัวแปร ของฟังก์ชันแมลงหิวที่กำลังบินเข้าหาแหล่งอาหาร โดยมี ฟังก์ชันเป้าหมายคือ แรงดันสูงสุดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ รับเข้ามาจากรวมวงจรตรวจสอบความแรงของสัญญาณวิทยุ ตัวแปร การปรับเฟสทั้งหมด 4 ตัว ตัวละ 16 สถานะ จึงสามารถเลื่อน เฟสได้รวมกัน 64 สถานะ โดยการเลื่อนเฟสนั้นจะส่งผล โดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางลำคลื่นของสายอากาศ การใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมนี้จึงมีส่วนสำคัญในการ ปรับตัวแปรดังกล่าวจนกว่าลำคลื่นจะชี้ไปยังทิศทางของ สัญญาณที่มีความแรงสูงสุด

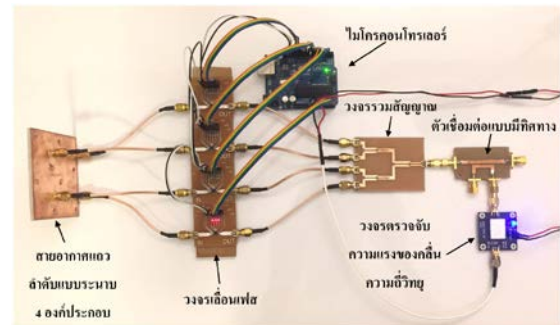


รูปที่ 17 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

2.8 สายอากาศต้นแบบแถวลำดับปรับค่าคลื่นได้ด้วย

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

หลังจากได้ทำการออกแบบวงจรทุกส่วนเป็นที่ เรียบร้อยแล้วจึงได้นำเอาส่วนประกอบข้างต้นมาต่อ รวมกันตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้สำหรับการทดสอบ และเก็บผล ภาพรวมของงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 สายอากาศต้นแบบแถวลำดับปรับค่าคลื่นได้ด้วย กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

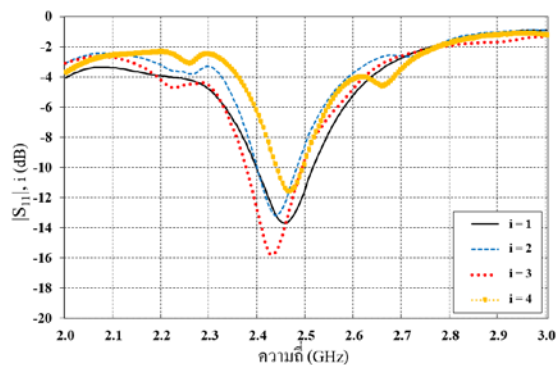
3. ผลการทดสอบ

ในขั้นตอนนี้เป็น การนำเอาส่วนต่างๆ ที่ได้ทำการ ออกแบบข้างต้นนำมาประกอบเข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ ออกแบบไว้โดยทำการทดสอบที่ความถี่กลาง 2.45 GHz ใช้ เครื่องกำเนิดสัญญาณตั้งไว้ ณ จุดทดสอบ สัญญาณที่รับเข้า มาผ่านทางสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบเข้ามายังวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 วงจร จากนั้น สัญญาณจะผ่านไปยังวงจรรวมสัญญาณ ในจุดนี้สัญญาณที่ รับเข้ามาจากสายอากาศ 4 องค์ประกอบจะถูกรวมเป็น สัญญาณเดียวผ่านไปยังตัวเชื่อมต่อบีมทิศทางและดึง สัญญาณส่วนหนึ่งเข้าไปยังวงจรวัดความแรงของสัญญาณ ที่เข้ามาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า โดย ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลขนาด 4 บิต ไปยังวงจร เลื่อนเฟสทั้ง 4 ตัว เพื่อเลื่อนเฟสของสัญญาณจนกว่าจะได้ ความแรงสูงสุด

ในการทดสอบปรับค่าคลื่นครั้งแรกเป็นการโปรแกรม ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการเลื่อนเฟสสายอากาศ 2 องค์ประกอบ ครั้งละ 90 องศา โดยจะทำการเลื่อนเฟสค้าง ไว้แล้ววัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดย

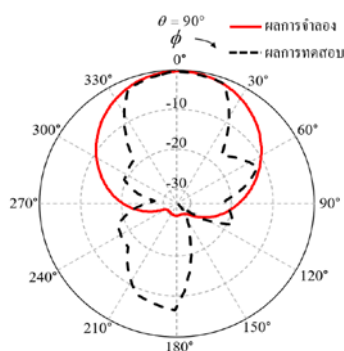
ใช้สายอากาศด้านรับหมุนวนรอบทิศทางของสายอากาศ แถวลำดับจนครบ 360 องศา จากนั้นจึงทดสอบการปรับลำคลื่นสถานะถัดไป

จากผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของแต่ละองค์ประกอบ (i) ในรูปที่ 19 แสดงให้เห็นว่าการนำสายอากาศมาจัดวาง องค์ประกอบแถวลำดับเชิงระนาบ 4 องค์ประกอบ ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศองค์ประกอบเดียวจากรูปที่ 3

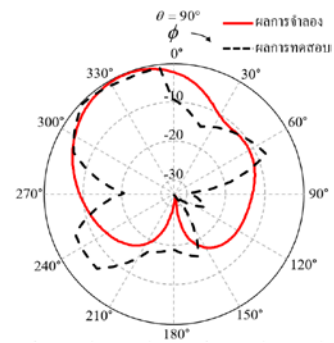


รูปที่ 19 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบ

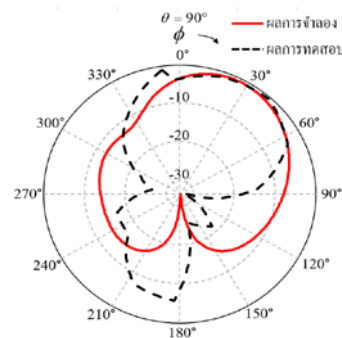
ต่อมาเป็นผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละสถานะที่มีการเลื่อนเฟสขององค์ประกอบสายอากาศในระนาบมุมกวาด (xy) ทดสอบทั้งหมด 3 สภาวะ เริ่มจากสภาวะที่ไม่มีการเลื่อนเฟสได้ผลดังรูปที่ 20 จากนั้นทดสอบเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 3 ไป 90 องศา ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 21 และเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 2 และ 4 ไป 90 องศา ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 22 ตามลำดับ



รูปที่ 20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยไม่มีการเลื่อนเฟส

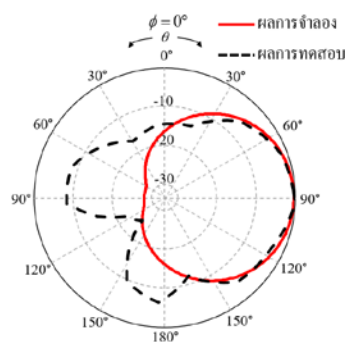


รูปที่ 21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ที่ความถี่ 2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 3 ไป 90 องศา

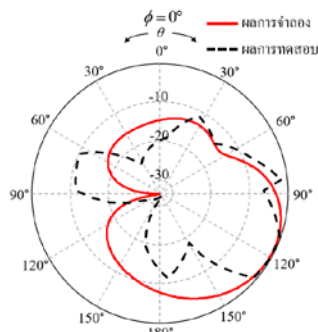


รูปที่ 22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ที่ความถี่ 2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 2 และ 4 ไป 90 องศา

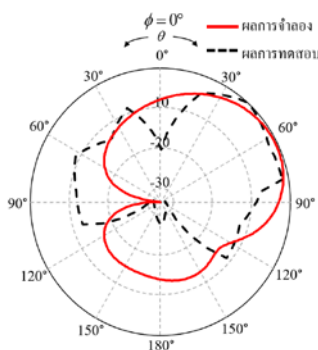
ต่อมาเป็นผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก (xz) เช่นเดียวกับการทดสอบในระนาบมุมกวาดโดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 สภาวะ เริ่มจากสภาวะที่ไม่มีการเลื่อนเฟสได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 23 จากนั้นทดสอบเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 2 ไป 90 องศา ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 24 และเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 3 และ 4 ไป 90 องศา ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 25 ตามลำดับ



รูปที่ 23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยไม่มีการเลื่อนเฟส



รูปที่ 24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่ความถี่ 2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 2 ไป 90 องศา



รูปที่ 25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่ความถี่ 2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 3 และ 4 ไป 90 องศา

จากผลการทดสอบการปรับค่าคลื่นของสายอากาศทั้ง 5 สถานะ พบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยมีค่าคลื่นหลักชี้ไปในทิศทางเดียวกัน ประกอบกับการใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงช่วยในการปรับเฟสของสายอากาศแถวลำดับทั้ง 4 องค์ประกอบให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชี้ไปยังทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณสูงสุดเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม เป็นผลให้การระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวดเร็วกว่าการระบุทิศทางด้วยบุคคล โดยการทดลองเป็นการนำแหล่งกำเนิดคลื่นวางในตำแหน่ง ± 45 องศา จากหน้าสายอากาศในระนาบ xy และ xz ตามลำดับ จากนั้นใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงทำการปรับค่าคลื่นจนกว่าจะได้ทิศทางที่มีความแรงสัญญาณสูงสุด โดยมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่ ± 10 องศา

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบในการระบุตำแหน่ง โดยใช้สายอากาศไมโครสตีปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรเพื่อลดขนาดลง 25% จากผลการออกแบบสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz มีความกว้างลำคลื่นหลัก 30 องศา มีอัตราขยาย 6.07 dBi จากผลการออกแบบได้นำสายอากาศดังกล่าวจัดวางเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ จากผลการทดสอบสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz มีความกว้างลำคลื่นหลัก 30 องศา มีอัตราขยายเฉลี่ย 8.19 dBi สามารถปรับค่าคลื่นได้สูงสุด ± 30 องศา ทั้งในระนาบมุมกวาด (xy) และระนาบมุมยก (xz) เมื่อนำมาใช้งานร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง ส่งผลให้สายอากาศนี้สามารถปรับค่าคลื่นไปยังทิศทางที่มีความแรงสัญญาณสูงสุดได้โดยมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่ ± 10 องศา จึงสามารถนำไปใช้ในการระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุได้ โดยในงานวิจัยนี้ยังคงค้างการนำสายอากาศไปทดสอบใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. K. Tiwary, N. Maskey, S. Khakurel and G. Sachdeva, "Effects of Co-channel Interference in WLAN and Cognitive Radio Based Approach to Minimize It," in *2010 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, Kottayam, India, 2010, pp. 158–160, doi: 10.1109/ARTCom.2010.57.
- [2] M. Yang, D. Kaffes, D. Mavrakis and S. Stavrou, "The Impact of Environment Variation on Co-channel Interference in WLAN," *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation*, 2003 (ICAP 2003), Exeter, UK, 2003, pp. 71–75, doi: 10.1049/cp:20030018.
- [3] J. Zhang, G. Han and Y. Qian, "Queuing Theory Based Co-Channel Interference Analysis Approach

- for High-Density Wireless Local Area Networks,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016, Art. no. 1348, doi: 10.3390/s16091348.
- [4] H. Furukawa, Y. Kamio and H. Sasaoka, “Cochannel Interference Reduction and Path-diversity Reception Technique Using CMA Adaptive Array Antenna in Digital Land Mobile Communications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 2, pp.605–616, 2001, doi: 10.1109/25.923072.
- [5] B. R. Petersen and D. D. Falconer, “Suppression of Adjacent-channel, Co-channel, and Intersymbol Interference by Equalizers and Linear Combiners,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 12, pp. 3109–3118, 1994, doi: 10.1109/26.339831.
- [6] P. Denisowski and P. Busch, “Interference hunting tools,” in *An Introduction to Interference Hunting*, Columbia, MD, USA: Rohde & Schwarz white paper, 2014, ch. 2, sec. 2, pp. 8–10.
- [7] J. Duplouty, “Wideband Reconfigurable Vector Antenna for 3-D Direction Finding Application,” Ph.D. Thesis, Dept. Electromagnetism and High Frequency Systems, Univ. de Toulouse, Toulouse, France, 2019.
- [8] C. A. W. Vale, “Variations on Loop and Adcock Array Topologies for Improved Radio Direction Finding Performance,” in *2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Cape Town, South Africa, 2012, pp. 997–1000, doi: 10.1109/APWC.2012.6324979.
- [9] M. A. Tinati and S. Bayati, “Designing of an Adaptive Adcock Array and Reducing the Effects of Other Transmitters, Unwanted Reflections and Noise,” in *2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Bangkok, Thailand, 2006, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICCIS.2006.252350.
- [10] R. Mueller and R. Lorch, “Application of Modern DOA Algorithms to an Adcock Array Antenna,” in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, Netherlands, 2014, pp. 2215–2218, doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902250.
- [11] D. N. Aloï and M. S. Sharawi, “Modeling and Validation of a 915MHz Single Channel Pseudo Doppler Direction Finding System for Vehicle Applications,” in *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, Anchorage, AK, USA, 2009, pp. 1–5, doi: 10.1109/VETECF.2009.5378802.
- [12] A. Xiaobo, F. Zhenghe, W. weidong and T. Li, “A Single Channel Correlative Interferometer Direction Finder Using VXI Receiver,” in *2002 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2002. Proceedings. ICMMT 2002.*, Beijing, China, 2002, pp. 1158–1161, doi: 10.1109/ICMMT.2002.1187913.
- [13] H. Sengül, A. E. Gürel and A. Orduyılmaz, “Passive Direction Finding Using Correlative Interferometer,” in *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Istanbul, Turkey, 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477965.
- [14] G. -P. Gao, B. Hu and J. -S. Zhang, “Design of a Miniaturization Printed Circular-Slot UWB Antenna by the Half-Cutting Method,” in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 567–570, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2259790.
- [15] J. Huang and V. Jamnejad, “A microstrip array feed for land mobile satellite reflector antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 153–158, 1989, doi: 10.1109/8.18701.
- [16] M. Krairiksh, P. Ngamjanyaporn and C. Kessuwan, “A Flat Four-Beam Compact Phased Array Antenna,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 184–186, 2002, doi: 10.1109/7260.1000197.

- [17] A. Buffi, A. A. Serra, P. Nepa, H.-T. Chou and G. Manara, "A Focused Planar Microstrip Array for 2.4 GHz RFID Readers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 5, pp. 1536–1544, 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2044331.
- [18] S. Loya and H. Khan, "An Efficient Microstrip Planar Array For Evaluating Channel Capacity Of Massive MIMO Systems," in *2021 2nd International Conference on Range Technology (ICORT)*, Balasore, India, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICORT52730.2021.9581885.
- [19] Q. X. Lai, Y. M. Pan, S. Y. Zheng and W. J. Yang, "Mutual Coupling Reduction in MIMO Microstrip Patch Array Using TM₁₀ and TM₀₂ Modes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 11, pp. 7562–7571, 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3090520.
- [20] R. Kawdungta, S. Kawdungta, D. Torrungrueng and C. Phongcharoenpanich, "Switched Beam Multi-Element Circular Array Antenna Schemes for 2D Single-Anchor Indoor Positioning Applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 58882–58892, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072951.
- [21] S. Kawdungta and C. Phongcharoen-panich, "MFOA - integrated Modified Inverted F-based Adaptive Array Antenna for 2.4 GHz Band Applications," *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, vol. 26, no. 9, pp. 784–795, 2016, doi: 10.1002/mmce.21030.
- [22] S. Kawdungta, D. Torrungrueng, A. Lang and C. Phongcharoenpanich, "Design of Antenna Arrays by Using Modified Fruit Fly Optimization Algorithm," in *2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang mai, Thailand, 2021, pp. 69–72, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454774.
- [23] M. Mhudsongon, C. Phongcharoenpanich, and S. Kawdungta, "Modified Fruit Fly Optimization Algorithm for Analysis of Large Antenna Array," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, 2015, Art. no. 124675, doi: 10.1155/2015/124675.
- [24] K. Wong, "Compact Microstrip Antennas," in *Compact and Broadband Microstrip Antennas*, Cullompton, United Kingdom: John Wiley & Sons., 2002, ch. 2, sec. 2, pp. 23–26.
- [25] Macom Technologies, "Digital Phase Shifter 4-Bit, 2.3 - 3.8 GHz," MAPS-010144 Data Sheet, November. 2010.
- [26] E. J. Wilkinson, "An N-Way Hybrid Power Divider," *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 8, no. 1, pp. 116–118, 1960, doi: 10.1109/TMTT.1960.1124668.
- [27] Analog Devices, "Log Detector Controller," AD8317 Data Sheet, 2019.
- [28] Arduino, "Arduino UNO R3," Product Reference Manual, Dec. 2021.