



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่เหมาะสม  
สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายยุคใหม่

โดย ผศ.ดร. ศุภกิต แก้วดวงตา (หัวหน้าโครงการวิจัย)  
รศ.ดร. ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ (นักวิจัยที่ปรึกษา)

เดือนมิถุนายน ปี 2559 ที่เสร็จโครงการ

สัญญาเลขที่ TRG 5780080

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่เหมาะสม  
สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายยุคใหม่

ผู้วิจัย ผศ.ดร. ศุภกิต แก้วดวงตา (หัวหน้าโครงการวิจัย)  
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

นักวิจัยที่ปรึกษา รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
สังกัด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณลาดกระบัง

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย  
สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

---

รหัสโครงการ : TRG5780080

ชื่อโครงการ : สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่เหมาะสมสำหรับระบบการสื่อสาร  
ไร้สายยุคใหม่

ชื่อนักวิจัย : ผศ.ดร. ศุภกิต แก้วดวงตา

สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ชื่อนักวิจัยที่ปรึกษา : รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

สังกัด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณลาดกระบัง

E-mail Address : supakitting@rmutl.ac.th หรือ supakitting@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ : เดือนมิถุนายน ปี 2557 ถึง เดือนมิถุนายน ปี 2559

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงสำหรับสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz ซึ่งระบบสายอากาศปรับตัวได้ประกอบด้วย องค์กรประกอบแถวลำดับ 4 องค์กรประกอบวงจรกรองความถี่ผ่าน 4 องค์กรประกอบ วงจรเลื่อนเฟส 4 องค์กรประกอบ วงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ และไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการออกแบบระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้นี้มีการพัฒนาสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็ม (PIN) เชื่อมสองจุดขึ้น เพื่อใช้เป็นองค์กรประกอบแถวลำดับ จากผลการจำลองและทดสอบระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่ 4 องค์กรประกอบด้วยการจัดวาง 2 รูปแบบคือ แบบเชิงเส้น และแบบระนาบ พบว่า กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงสามารถควบคุมและปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ให้ไปยังทิศทางที่มีสัญญาณแรงที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก : สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ การปรับลำดับคลื่น การสื่อสารแบบไร้สาย  
กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิว ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย

## Abstract

---

**Project Code : TRG5780080**

**Project Title : Optimum Adaptive Array Antenna for Modern Wireless Communication System**

**Investigator : Asst. Prof. Dr. Supakit Kawdungta**

**Rajamangala University of Technology Lanna (RMUTL)**

**Mentor : Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL)**

**E-mail Address : supakitting@rmutl.ac.th or supakitting@gmail.com**

**Project Period : June, 2014 to June, 2016**

This research project has proposed a modified fruit fly optimization algorithm (MFOA)-integrated adaptive array antenna (AAA) for the 2.4-2.5GHz WLAN system. The principal components of the array antenna system encompass four array elements, four band pass filters (BPF), four digital phase shifters, a four-way power combiner/splitter, a directional coupler, a radio frequency (RF) detector and a microcontroller unit (MCU). In the realization of the adaptive antenna system, the double circular patch with two shorted pins was first innovated and subsequently deployed as the element of the four-element array antenna. In the study, simulations and experiments were carried out with the four-element AAAs of two configurations, i.e. the linear and planar array configurations. The simulation and experimental results revealed that the MFOA algorithmic scheme could determine the direction of the maximum arrival signal in an efficient and accurate manner and also was capable of manipulating the radiation pattern in the desired direction.

**Keywords : Adaptive array antenna, Beamforming, Fruit fly optimization, Wireless communication, WLAN system**

## บทสรุปการเรียนรู้ (Executive Summary)

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยมาอันเนื่องมาจากความสะดวกสบายในการพกพา รวดเร็ว และการใช้งานในทุกที่ ทุกเวลา จึงเป็นสาเหตุให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวอย่างต่อเนื่องและยาวนาน อีกทั้งยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้านยกตัวอย่างเช่น ด้านการศึกษา ด้านการแพทย์ ด้านการอุตสาหกรรม ด้านการขนส่งมวลชน ด้านการขนส่งสินค้า ด้านการธนาคาร และแม้กระทั่งภายในบ้านเรือนที่อยู่อาศัย เป็นต้น จนทำให้มีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นเป็นจำนวนมากและเมื่อมีผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายมากขึ้นก็มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เวลาช่วงความถี่และช่องทางการสื่อสารมากขึ้นในขณะที่ช่วงความถี่และช่องทางการสื่อสารนั้นมีจำกัด นอกเหนือไปจากนี้ยังมีปัญหาอื่นที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารแบบไร้สายกล่าวคือ การสะท้อนของคลื่นวิทยุ (Reflection) การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) และการกระจัดกระจายของคลื่น (Scattering) เนื่องจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ใกล้กับอุปกรณ์ลูกข่าย และ/หรือ สถานีฐานของระบบการสื่อสารแบบไร้สายทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นที่มาจากหลายทิศทาง (Multipath Arrival Signal Phenomenon)

โครงการวิจัยจึงได้นำเสนอการออกแบบสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่มีกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหีบี่ปรับปรุงมาใช้ในการหาค่าเฟสที่เหมาะสมสำหรับแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับเพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน โดยระบบจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับ วงจรกรองความถี่ผ่าน วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณ วงจรรวม/แยกสัญญาณชนิดวิลคินสัน วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ และไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้โดยการทำให้มีการปรับปรุงช่องทางการสื่อสาร ลดการเกิดการจายหายจากเส้นทางคลื่นหลายวิถี (Multipath Fading) และลดการเกิดการรบกวนสัญญาณจากการใช้คลื่นความถี่ช่องเดียวกัน (Co-channel Interference : CCI) ซึ่งสายอากาศดังกล่าวจะทำการปรับลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการรับสัญญาณ จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ต้นแบบสามารถปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบ WLAN ในช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2557 ระหว่างสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รหัสโครงการ TRG5780080 และคณะผู้วิจัยได้จัดทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ตรงตามวัตถุประสงค์ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ นักวิจัยที่ปรึกษาจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำโครงการ ตลอดจนเอื้อเฟื้อสถานที่ในการปฏิบัติในการทำโครงการนี้มาโดยตลอด

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

หน้า

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| บทคัดย่อ .....                                   | ก  |
| Abstract .....                                   | ข  |
| บทสรุปการเรียนรู้ .....                          | ค  |
| กิตติกรรมประกาศ .....                            | ง  |
| สารบัญ .....                                     | จ  |
| สารบัญตาราง .....                                | ช  |
| สารบัญรูป .....                                  | ซ  |
| <br>                                             |    |
| บทที่ 1 บทนำ .....                               | 1  |
| 1.1 ปัญหาการวิจัยและความสำคัญ .....              | 1  |
| 1.2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่มีมาก่อน ..... | 2  |
| 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย .....       | 3  |
| 1.4 เนื้อหาของรายงานการวิจัย .....               | 3  |
| <br>                                             |    |
| บทที่ 2 สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ .....         | 4  |
| 2.1 บทนำ .....                                   | 4  |
| 2.2 สายอากาศแถวลำดับ .....                       | 4  |
| 2.3 องค์ประกอบแถวลำดับและลักษณะการจัดวาง .....   | 8  |
| 2.4 ระบบย่อยของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ .....  | 15 |
| 2.5 ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ .....         | 18 |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                          | หน้า |
|----------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 3 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง..... | 20   |
| 3.1 บทนำ.....                                            | 20   |
| 3.2 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม.....                        | 20   |
| 3.3 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่.....             | 21   |
| 3.4 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง.....     | 23   |
| 3.5 ผลการคำนวณเชิงเลข.....                               | 25   |
| บทที่ 4 การสร้างและผลการทดสอบ.....                       | 30   |
| 4.1 บทนำ.....                                            | 30   |
| 4.2 สายอากาศแบบแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด.....      | 30   |
| 4.3 ระบบย่อยของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้.....           | 32   |
| 4.4 ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้.....                  | 36   |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....                           | 42   |
| 5.1 สรุปเนื้อหาของโครงการ.....                           | 42   |
| 5.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา.....      | 42   |
| ภาคผนวก.....                                             | 44   |
| เอกสารอ้างอิง.....                                       | 57   |
| Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.....           | 59   |

## สารบัญตาราง

|                                                                                    | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด .. | 14   |
| ตารางที่ 3.1 ผลการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่            |      |
| กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง และกระบวนการหา                         |      |
| ค่าที่เหมาะสมแบบการสืบทอดพันธุกรรมกับฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น .....              | 26   |
| ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด .. | 31   |

## สารบัญรูป

|                                                                                                                                                                                                                                                      | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 รูปทรงของสายอากาศแถวลำดับ 2 องค์ประกอบ ที่วางตามแนวแกน Z .....                                                                                                                                                                            | 6    |
| รูปที่ 2.2 องค์ประกอบเดี่ยว ตัวประกอบแถวลำดับ และผลรวมของแบบรูป<br>การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับสององค์ประกอบของ<br>สายอากาศไดโพลจิวที่วางตัวในแนวแกนนอนเมื่อมีการป้อนสัญญาณ<br>ที่มีเฟสเท่ากัน ( $\beta = 0^\circ, d = \lambda / 4$ ) ..... | 7    |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นวงกลม.....                                                                                                                                                                                                        | 9    |
| รูปที่ 2.4 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นวงกลมเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ $p$ และ $d$ .....                                                                                                                                                         | 10   |
| รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด .....                                                                                                                                                                                 | 10   |
| รูปที่ 2.6 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมเมื่อทำการปรับค่า<br>พารามิเตอร์ $p$ และ $d$ เมื่อ $c = 1\text{mm}$ .....                                                                                                              | 11   |
| รูปที่ 2.7 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมเมื่อทำการปรับค่า<br>พารามิเตอร์ $p$ และ $d$ เมื่อ $c = 3\text{mm}$ .....                                                                                                              | 11   |
| รูปที่ 2.8 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดเมื่อทำการปรับค่า<br>พารามิเตอร์ $p$ และ $d$ เมื่อ $c = 1\text{mm}$ .....                                                                                                        | 12   |
| รูปที่ 2.9 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดเมื่อทำการปรับค่า<br>พารามิเตอร์ $p$ และ $d$ เมื่อ $c = 3\text{mm}$ .....                                                                                                        | 13   |
| รูปที่ 2.10 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด.....                                                                                                                                                                 | 14   |
| รูปที่ 2.11 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับ<br>พินเชื่อมสองจุดที่ความถี่ 2.45GHz .....                                                                                                                                  | 15   |
| รูปที่ 2.12 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน .....                                                                                                                                                                                                             | 16   |
| รูปที่ 2.13 วงจรใช้งานสำหรับเลื่อนเฟสแบบดิจิทัล 4 บิต.....                                                                                                                                                                                           | 16   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                                                                                                                     | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.14 วงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 ชนิดวิลคินสัน.....                                                                                                         | 17   |
| รูปที่ 2.15 วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง.....                                                                                                                           | 17   |
| รูปที่ 2.16 วงจรใช้งานสำหรับตรวจจับความแรงของสัญญาณ .....                                                                                                           | 18   |
| รูปที่ 2.17 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่น่าสนใจ.....                                                                                                   | 19   |
| รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีจุดที่เหมาะสมทั้ง แบบเฉพาะพื้นที่และจุดที่เหมาะสมของทั้งหมด .....                                                              | 20   |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ .....                                                                                               | 21   |
| รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่.....                                                                                            | 23   |
| รูปที่ 3.4 ลักษณะการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง .....                                                                                       | 24   |
| รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง .....                                                                                   | 25   |
| รูปที่ 3.6 อัตราการลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมของทั้งสามกระบวนการกับฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....                                                                      | 26   |
| รูปที่ 3.7 อัตราการลู่เข้าของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่มีระยะห่างคงที่จำนวน 4 องค์ประกอบ.....                     | 29   |
| รูปที่ 3.8 อัตราการลู่เข้าของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบที่มีระยะห่างคงที่จำนวน 2x2 องค์ประกอบที่มีระยะห่างคงที่..... | 29   |
| รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด .....                                                                                                | 30   |
| รูปที่ 4.2 ต้นแบบของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด .....                                                                                                   | 31   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบและผลการจำลองของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็ม<br>เชื่อมสองจุด.....                                                                                                                                                    | 32 |
| รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบและผลการจำลองของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับ<br>สายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดที่ความถี่ 2.45GHz .....                                                                                                   | 32 |
| รูปที่ 4.5 รูปถ่ายวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและผลการทดสอบ .....                                                                                                                                                                              | 33 |
| รูปที่ 4.6 รูปถ่ายวงจรเลื่อนเฟสแบบดิจิทัล 4 บิต และผลการทดสอบ.....                                                                                                                                                                       | 33 |
| รูปที่ 4.7 รูปถ่ายของวงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 ชนิดวิลคินสันและ<br>ผลการทดสอบ .....                                                                                                                                                   | 34 |
| รูปที่ 4.8 รูปถ่ายของวงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง.....                                                                                                                                                                                       | 35 |
| รูปที่ 4.9 รูปถ่ายของวงจรใช้งานสำหรับส่วนตรวจจับความแรงของสัญญาณและ<br>ผลการทดสอบ .....                                                                                                                                                  | 35 |
| รูปที่ 4.10 รูปถ่ายของระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ต้นแบบ .....                                                                                                                                                                      | 37 |
| รูปที่ 4.11 พารามิเตอร์การกระจายของสายอากาศแถวลำดับที่จัดวางแบบ<br>เชิงเส้นที่มีระยะห่างเท่ากันจำนวน 4 องค์ประกอบ.....                                                                                                                   | 37 |
| รูปที่ 4.12 พารามิเตอร์การกระจายของสายอากาศแถวลำดับที่จัดวางแบบ<br>ระนาบที่มีระยะห่างเท่ากันจำนวน 2x2 องค์ประกอบ .....                                                                                                                   | 38 |
| รูปที่ 4.13 รูปแบบการทดสอบระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้.....                                                                                                                                                                         | 40 |
| รูปที่ 4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ของระบบของสายอากาศ<br>แถวลำดับปรับตัวได้ที่จัดวางแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่มีระยะห่างเท่ากัน<br>จำนวน 4 องค์ประกอบและแบบระนาบจำนวน 2x2 องค์ประกอบ เมื่อมี<br>แหล่งกำเนิดคลื่นที่ตำแหน่ง ..... | 41 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ปัญหาการวิจัยและความสำคัญ

เนื่องจากความสะดวกในการใช้งานทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายมีความนิยมมากขึ้นเรื่อยมา จึงเป็นสาเหตุให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวมาอย่างต่อเนื่องและยาวนาน อีกทั้งยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้านยกตัวอย่างเช่น ด้านการศึกษา ด้านการแพทย์ ด้านการอุตสาหกรรม ด้านการขนส่งมวลชน ด้านการขนส่งสินค้า ด้านการธนาคาร และแม้กระทั่งภายในบ้านเรือนที่อยู่อาศัย เป็นต้น โดยในปัจจุบันมีการใช้งานการสื่อสารแบบไร้สายหลากหลายเทคโนโลยีด้วยกันยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุค 3G/4G เทคโนโลยีบลูทูธ (Bluetooth) เทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) เทคโนโลยีไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WIMAX) และเทคโนโลยีการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) ทำให้มีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นเป็นจำนวนมากและเมื่อมีผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายมากขึ้นก็มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ช่วงความถี่และช่องทางการสื่อสารมากขึ้นในขณะที่ช่วงความถี่และช่องทางการสื่อสารนั้นมีจำกัด นอกเหนือไปจากนี้ยังมีปัญหาอื่นที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารแบบไร้สายกล่าวคือ การสะท้อนของคลื่นวิทยุ (Reflection) การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) และการกระจัดกระจายของคลื่น (Scattering) เนื่องมาจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ใกล้กับอุปกรณ์ลูกข่าย และ/หรือ สถานีฐานของระบบการสื่อสารแบบไร้สายทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นที่มาจากหลายทิศทาง (Multipath Arrival Signal Phenomenon) [1]-[2]

เพื่อบรรเทาปัญหาดังกล่าวได้มีการนำเสนอสายอากาศที่สามารถปรับลำคลื่นได้โดยปกติที่มีใช้งานกันอยู่จะมีอยู่สองประเภทใหญ่ๆ คือ สายอากาศปรับลำคลื่น (Switched Beam Antenna) และสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ (Adaptive Array Antenna : AAA) โดยในโครงการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การใช้งานสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้เพื่อบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้โดยการทำให้มีการปรับปรุงช่องทางการสื่อสาร ลดการเกิดการกระจายหายจากเส้นทางคลื่นหลายวิถี (Multipath Fading) และลดการเกิดการรบกวนสัญญาณจากการใช้คลื่นความถี่ช่องเดียวกัน (Co-channel Interference : CCI) ซึ่งสายอากาศดังกล่าวจะทำการปรับลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการรับสัญญาณและปรับจุดนัล (Null) ของลำคลื่นไปยังทิศทางที่มีคลื่นรบกวนเข้ามา การกระทำลักษณะนี้จะเรียกว่าเป็นการปรับแต่งคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เช่น การปรับแต่งรูปร่าง และการลดลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Level : SLL)

## 1.2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่มีมาก่อน

จากการศึกษาวรรณกรรมและงานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่าได้มีการนำเสนอการปรับปรุงและบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้สายอากาศที่สามารถปรับลำคลื่นได้ประเภทต่างๆ และได้มีการนำเอาเทคนิคการประมวลผลเข้ามาช่วยด้วยอีกทางหนึ่ง โดยจะกล่าวเป็นลำดับดังต่อไปนี้

H. Furukawa และคณะ ได้นำเสนอการประยุกต์เทคนิคการรับสัญญาณด้วยกระบวนการคิดแบบมอดูลัสคงที่ (Constant Modulus Algorithm : CMA) เพื่อใช้ในสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถที่จะลดการเกิดการรบกวนสัญญาณจากการใช้คลื่นความถี่ช่องเดียวกันได้โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลของโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดิน และเป็นผลทำให้มีการใช้งานสเปกตรัมความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]

ในเอกสารอ้างอิงที่ 4 ได้มีการสร้างสายอากาศแบบสมาร์ต (Smart Antenna) บนหลักการพื้นฐานของเทคนิคการก่อรูปลำคลื่น (Beamforming) ด้วยความหลากหลายในเชิงพื้นที่ ซึ่งใช้ระบบอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Interference System) และแบบข่ายงานระบบประสาท (Neural Network : NN) เพื่อลดการสูญเสียสัญญาณที่เกี่ยวข้องด้วยการก่อรูปลำคลื่นที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีการนำเอากระบวนการคิดแบบสืบทอดพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) เข้ามาช่วยหาค่าที่เหมาะสมของฟัซซี่ลอจิกและแบบข่ายงานระบบประสาทจากการทำงานของระบบรวมทั้งหมดพบว่าสามารถใช้ปรับลดระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างให้น้อยลงเมื่อเทียบกับการไม่ใช้กระบวนการใดๆ [4]

นอกจากนี้ H.-T. Liu และคณะ ได้นำเสนอสายอากาศแบบสมาร์ตสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย ซึ่งมีคุณสมบัติ ขนาดเล็กและกะทัดรัด ราคาประหยัดและมีอัตราการใช้กำลังงานน้อย สายอากาศที่นำเสนอถูกเรียกว่าสายอากาศขับเคลื่อนด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับตัวแปรกระจายคลื่นแบบแถวลำดับพาราซิติก (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator : ESPAR) หรือมีการเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสายอากาศโมโนโพลแบบห่อ ESPAR (Folded Monopole ESPAR Antenna) ซึ่งในการทำงานนั้นสามารถที่จะก่อลำคลื่นได้ด้วยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับวาร์กเตอร์ (Varactor) และมีผลกระทบทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีการเปลี่ยนแปลง โดยสายอากาศนี้มีอัตราการขยายเท่ากับ 4 dBi และมีอัตราส่วนคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 20 dB [5]

ในเอกสารอ้างอิงที่ 6 ได้มีการรวมเทคนิคการประเมินมุมจากทิศทางของสัญญาณ (Angle-of-Arrival : AoA) กับกระบวนการก่อรูปคลื่น โดยได้ประยุกต์ใช้กับสายอากาศแถวลำดับสององค์ประกอบ เทคนิคนี้มีข้อดีคือง่ายต่อการสร้างสำหรับสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ขนาดใหญ่ โดยเฉพาะในช่วงความถี่ในหน่วยมิลลิเมตร (millimeter (mm)-wave) [6]

ในช่วงความถี่ในหน่วยมิลลิเมตรในเอกสารอ้างอิงที่ 7 ได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการคิดแบบสืบทอดพันธุกรรมมาใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและใช้ปรับลดอัตราการกำลังงานด้านนอก [7] ในเอกสารอ้างอิงที่ 8 สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ได้มีการพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของ

ระบบการสื่อสารแบบไร้สายในระบบโทรศัพท์มือถือแบบดิจิทัล ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพนั้นเป็นไปได้ในแง่ของความจุเครือข่ายเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้สามารถทำให้ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบไร้สายดีขึ้นได้ แต่ในโครงการวิจัยนี้จะนำเสนอเทคนิคกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง (Modified Fruit Fly Optimization Algorithm : MFOA) เข้ามาช่วยในการประมวลผลในสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ กระบวนการนี้ได้ถูกปรับปรุงมาจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ (Fruit Fly Optimization Algorithm : FOA) ซึ่งกระบวนการนี้ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานกับปัญหาทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ[9]-[19]

### 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการออกแบบและสร้างสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่เหมาะสมด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงทำงานในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการประมวลผลการปรับค่าคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่เหมาะสมไปยังทิศทางที่มีสัญญาณแรงที่สุด โดยสายอากาศแถวลำดับมีองค์ประกอบจำนวนสี่องค์ประกอบสามารถจัดวางแบบเชิงเส้นและแบบระนาบ องค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับนั้นจะใช้เป็นสายอากาศแบบแผ่นคู่วงกลมกับพื้นเชื่อมสองจุด

### 1.4 เนื้อหาของรายงานการวิจัย

เนื้อหาของรายงานการวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยบทที่ 1 จะเป็นการกล่าวนำถึงปัญหาการวิจัยและความสำคัญ การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่มีมาก่อน รวมไปถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย บทที่ 2 จะกล่าวถึงการออกแบบระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ การทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง จะถูกกล่าวถึงในบทที่ 3 การสร้างและผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ต้นแบบจะกล่าวถึงในบทที่ 4 และสรุปผลการวิจัยจะกล่าวถึงในบทที่ 5

## บทที่ 2

### สายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของสายอากาศแถวลำดับและวิธีการควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การออกแบบสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดและการจัดวางองค์ประกอบเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและแบบระนาบ อีกทั้งยังกล่าวถึงการออกแบบระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ โดยจะอธิบายแยกออกเป็นระบบย่อยในส่วนต่างๆ

#### 2.2 สายอากาศแถวลำดับ

จากคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวเดียวซึ่งปกติแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวเดียวจะมีลักษณะค่อนข้างกว้าง มีอัตราการขยายและสภาพเงาเงาทิศทางต่ำ แต่ในการใช้งานบางอย่างมีความจำเป็นต้องใช้สายอากาศที่สามารถเงาเงาทิศทางได้ดีหรือมีอัตราการขยายสูงเพื่อที่จะได้ระยะทางการติดต่อสื่อสารที่ไกลมากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยเพิ่มขนาดของสายอากาศเท่านั้น

แม้ว่าการเพิ่มขนาดของสายอากาศจะทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้นแต่ยังมีวิธีการอื่นที่จะเพิ่มขนาดของสายอากาศ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศตัวเดียว ซึ่งทำได้โดยจัดองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง ซึ่งสายอากาศนี้เรียกว่า แถวลำดับ (Array) หรือ สายอากาศแถวลำดับ (Array Antenna) โดยปกติแล้วจะเลือกแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับให้มีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งอาจจะไม่จำเป็นเสียทีเดียวเพียงแต่จะช่วยทำให้สามารถออกแบบและสร้างได้ง่าย

สนามรวมของสายอากาศแถวลำดับสามารถที่จะหาได้โดยผลรวมทางเวกเตอร์ของสนามที่แพร่กระจายออกจากองค์ประกอบตัวเดียว ในกรณีที่เกิดการเชื่อมต่อ (Coupling) ระหว่างองค์ประกอบทั้ง ซึ่งโดยทั่วไปมีอยู่ 5 วิธีที่จะควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะทำได้โดยการควบคุมสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้ [20]

1. การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับ  
(ให้เป็นเส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม และอื่นๆ)
2. การจัดวางระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ
3. การปรับขนาดของกระแสที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบ
4. การปรับเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบ
5. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ

จากที่ได้กล่าวมานั้นวิธีที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้งานมากที่สุดคือการวางองค์ประกอบไว้บนเส้นตรงและเพื่อให้ง่ายต่อการนำเสนอและการตีความหมายทางเทคนิค สายอากาศแถวลำดับ

สององค์ประกอบจะถูกนำเสนอเป็นแบบแรกและตามด้วยการวิเคราะห์สายอากาศแบบแถวลำดับ  $N$  องค์ประกอบ

สมมุติว่ามีไดโพลจิ๋ว 2 ตัว วางตัวตามแนวนอนและเรียงตามแนวแกน  $Z$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) และสมมุติว่าไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบทั้งสอง ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศทั้งสองจะเป็นผลรวมของสายอากาศทั้งสอง เมื่อคิดในระนาบ  $YZ$  จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\vec{E}_t = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos \theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 - (\beta/2)]}}{r_2} \cos \theta_2 \right\} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\beta$  คือค่าความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้องค์ประกอบทั้งสอง โดยป้อนขนาดของกระแสให้องค์ประกอบทั้งสองเท่ากัน และถ้าทำการสังเกตหาสนามที่ระยะไกล ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) จะสามารถประมาณค่าได้ดังต่อไปนี้

$$\theta_1 \simeq \theta_2 \simeq \theta \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &\simeq r - \frac{d}{2} \cos \theta \\ r_2 &\simeq r + \frac{d}{2} \cos \theta \end{aligned} \right\} \text{สำหรับการแปรผันของเฟส} \quad (2.3)$$

$$r_1 \simeq r_2 \simeq r \quad \text{สำหรับการแปรผันของขนาด} \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.1) จะกลายเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{E}_t &= \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \left[ e^{j(kd \cos \theta + \beta)/2} + e^{-j(kd \cos \theta + \beta)/2} \right] \\ \vec{E}_t &= \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta 2 \cos \left[ \frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

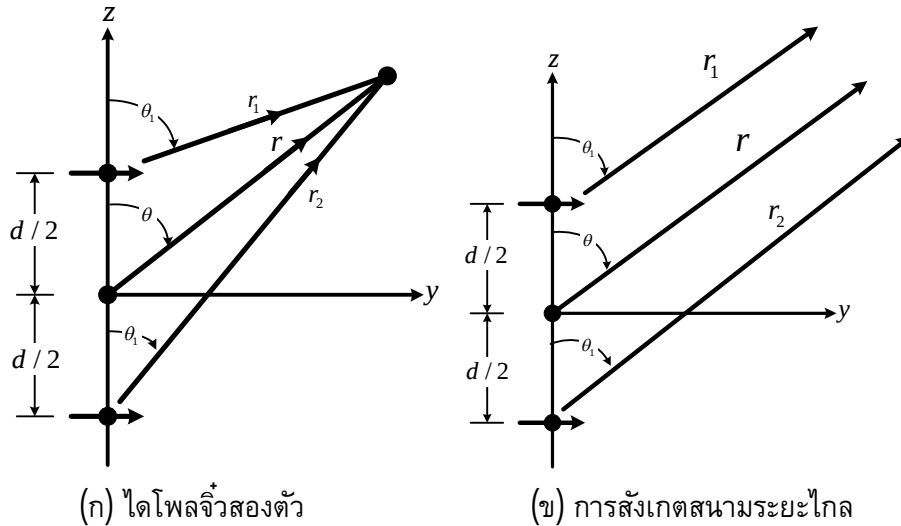
จากสมการที่ (2.5) จะเห็นได้ว่าสนามรวมของสายอากาศแถวลำดับจะมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางอยู่ที่จุดเริ่มต้นคูณด้วยตัวประกอบซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) เพราะฉะนั้นตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับ 2 องค์ประกอบ ที่ป้อนขนาดของกระแสให้แต่ละองค์ประกอบเท่ากันจะมีค่าดังนี้คือ

$$AF = 2 \cos \left[ \frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (2.6)$$

ซึ่งรูปแบบนอร์มอลไลซ์จะมีค่าดังนี้

$$(AF)_n = \cos\left[\frac{1}{2}(kd \cos \theta + \beta)\right] \quad (2.7)$$

เมื่อตัวประกอบแถวลำดับเป็นฟังก์ชันของรูปทรงของสายอากาศแถวลำดับและการป้อนเฟส โดยการปรับเปลี่ยนระยะห่าง  $d$  และ/หรือ ค่าเฟส  $\beta$  ระหว่างองค์ประกอบจะสามารถที่จะควบคุมคุณสมบัติของตัวประกอบแถวลำดับและสนามรวมของสายอากาศแถวลำดับได้



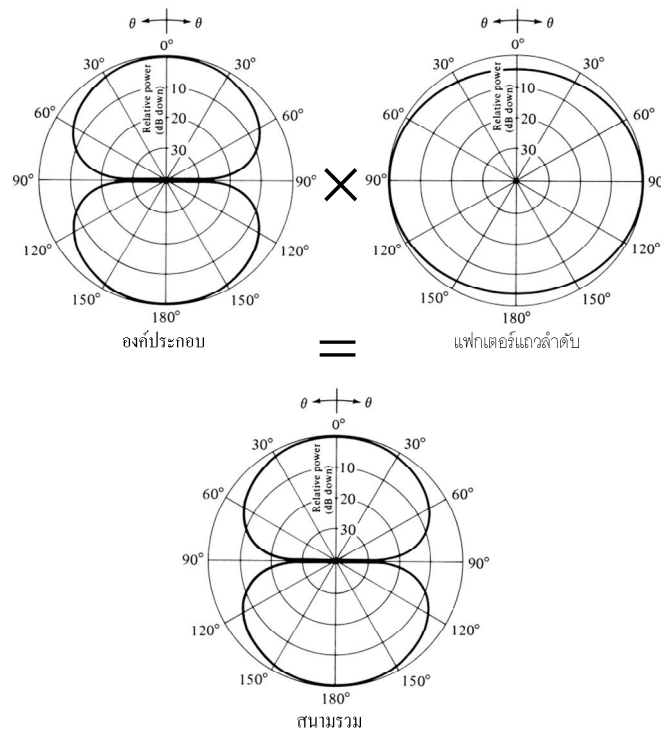
รูปที่ 2.1 รูปทรงของสายอากาศแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ ที่วางตามแนวแกน Z

ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้เห็นได้ว่าสนามระยะไกลของสายอากาศแถวลำดับจำนวนสององค์ประกอบวางตัวอย่างเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Two-Element Array) ที่แต่ละองค์ประกอบมีลักษณะเหมือนกันจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางตัวที่จุดอ้างอิง (จุดเริ่มต้น หรือ จุดกำเนิด) กับตัวประกอบแถวลำดับจะมีค่าดังต่อไปนี้

$$\bar{E}(\text{รวม}) = [\bar{E}(\text{องค์ประกอบเดี่ยวอยู่ที่กำเนิด})] \times [\text{ตัวประกอบแถวลำดับ}] \quad (2.8)$$

เรียกสมการที่ (2.8) ว่าหลักการคูณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern Multiplication) สำหรับสายอากาศแบบแถวลำดับที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน ซึ่งสายอากาศแบบแถวลำดับแต่ละแบบก็จะมี ตัวประกอบแถวลำดับที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปก็จะเป็นฟังก์ชันของ จำนวนขององค์ประกอบ รูปทรงการจัดวางขององค์ประกอบ ขนาดและเฟสของสัญญาณที่ป้อน และระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งตัวประกอบแถวลำดับมักจะถูกทำให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายได้หากแต่ละองค์ประกอบมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ขนาดและเฟสของสัญญาณที่เท่ากัน จึงทำให้ตัวประกอบแถวลำดับขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแบบรูปการ

แพร์กระจายคลื่นเท่านั้น เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงหลักการของการคูณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น นอร์มัลไลซ์ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบเดี่ยว ตัวประกอบแวลลำดับ และผลรวมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบเดี่ยว ตัวประกอบแวลลำดับ และผลรวมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแวลลำดับสององค์ประกอบของสายอากาศไดโพลจั่วที่วางตัวในแนวแกนนอน เมื่อมีการป้อนสัญญาณที่มีเฟสเท่ากัน ( $\beta = 0^\circ, d = \lambda/4$ )

สายอากาศแวลลำดับแบบเฟส

ในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นได้ว่าจะสามารถปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยสายอากาศแวลลำดับได้อย่างไร และยังสามารถที่จะทำได้โดยการปรับเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้กับแต่ละองค์ประกอบ ด้วยแนวความคิดนี้สามารถที่จะสมมุติได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้ด้วยการสแกนเฟสของแวลลำดับ (Phased Array) เมื่อสมมุติว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดของแวลลำดับนั้นต้องการปรับให้อยู่ในช่วงมุม  $\theta_0$  เท่ากับ  $0^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$  สามารถทำได้ด้วยการป้อนเฟส  $\beta$  ระหว่างองค์ประกอบให้เป็นดังนี้

$$\psi = kd \cos \theta_0 + \beta|_{\theta=\theta_0} = kd \cos \theta_0 + \beta = 0 \Rightarrow \beta = -kd \cos \theta_0 \quad (2.9)$$

ดังนั้นการควบคุมความต่างเฟสระหว่างองค์ประกอบ จะทำให้ค่าสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่นสามารถย้ายไปอยู่ในทิศทางใดๆ ตามที่ต้องการได้ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของแถวลำดับแบบเฟสที่ปรับตัววงจรีเล็กทรอนิกส์ (Electronic Scanning Phased Array) ดังนั้นในเทคโนโลยีของแถวลำดับปรับเฟสจะต้องทำการปรับเฟสอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบก็ควรที่จะสามารถปรับความต่างเฟสของแต่ละองค์ประกอบได้เช่นกัน ในทางปฏิบัติทำได้โดยใช้ตัวปรับเฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite Phase Shifter) หรือ ไดโอดเฟสชิฟเตอร์ (Diode Phase Shifter) สำหรับตัวปรับเฟสเฟอร์ไรท์จะปรับเฟสได้ด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็กภายในเฟอร์ไรท์ ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสที่ไหลผ่านเส้นลวดที่หมุนรอบตัวปรับเฟส สำหรับตัวปรับเฟสไดโอดจะใช้วงจรบาลานซ์ (Balanced) วาแรกเตอร์เชื่อมต่อแบบไฮบริด (Hybrid-Coupled Varactors) ซึ่งการปรับเฟสที่จริงทำได้โดยการปรับไบอัสเป็นแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วง 0-30 V) หรือด้วยคำสั่งดิจิทัลผ่านวงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital-to-analog Converter : D/A)

### 2.3 องค์ประกอบแถวลำดับและลักษณะการจัดวาง

องค์ประกอบแถวลำดับแบบสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด

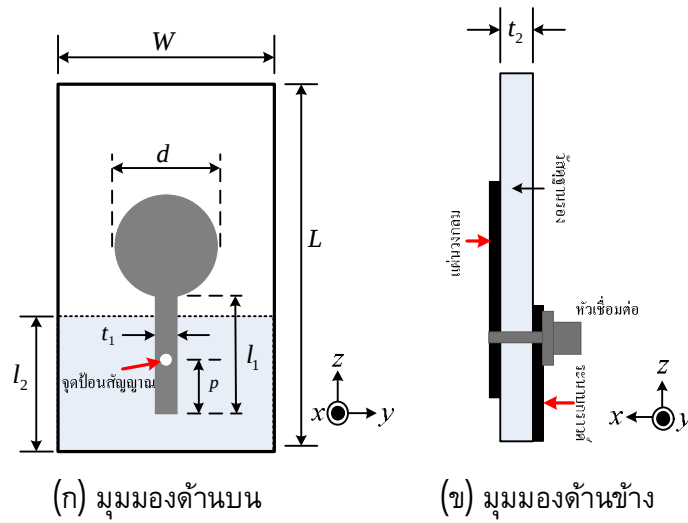
ในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับในโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอองค์ประกอบแถวลำดับแบบสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับ โดยการออกแบบสายอากาศแผ่นคู่วงกลมนี้จะเริ่มจากโครงสร้างของสายอากาศแผ่นวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อทำการออกแบบให้สามารถตอบสนองช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz ของเทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย เริ่มจากการพิจารณาใช้แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) ชนิด FR4 มีความหนาเท่ากับ 1.8mm มีค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Relative Permittivity :  $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 สายอากาศที่ได้ทำการออกแบบเบื้องต้นนี้มีขนาดโดยรวมเท่ากับ 30mm×45mm×1.8mm และถูกบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล ซึ่งขนาดเริ่มต้นของสายนำสัญญาณไมโครสตริปจะถูกออกแบบด้วยสมการที่ (2.10) [20] ให้มีความหนา ( $t_1$ ) เท่ากับ 3.5mm มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω จากนั้นค่าเริ่มต้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นวงกลม ( $d$ ) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 19.50mm ซึ่งจะพิจารณาจากการให้ค่าของเส้นรอบวงมีค่าใกล้เคียงกับค่าครึ่งความยาวคลื่น ( $\lambda / 2$ ) ของความถี่กลาง 2.45 GHz และมีความหนาเท่ากับ 61.22mm

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}, \quad \frac{W_0}{h} > 1 \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\epsilon_{eff}$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

$W_0$  คือค่าความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

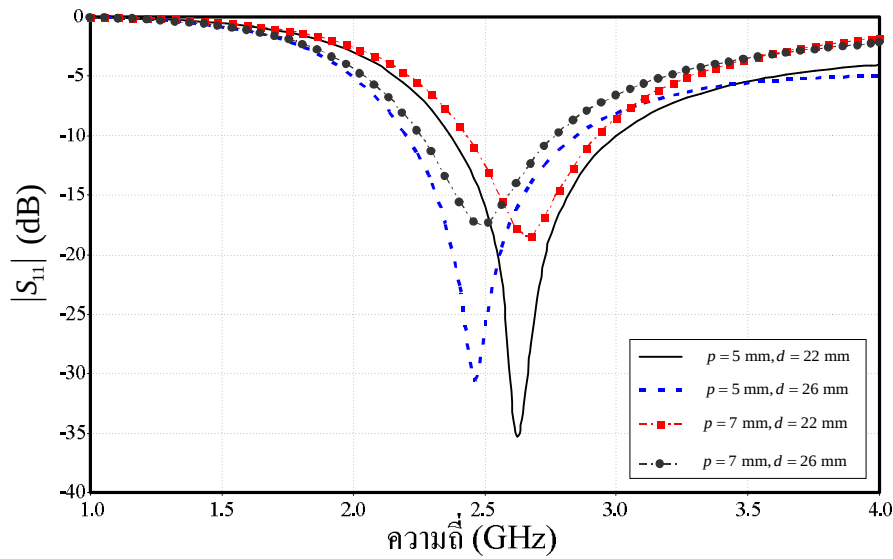
$h$  คือค่าความหนาของวัสดุฐานรอง



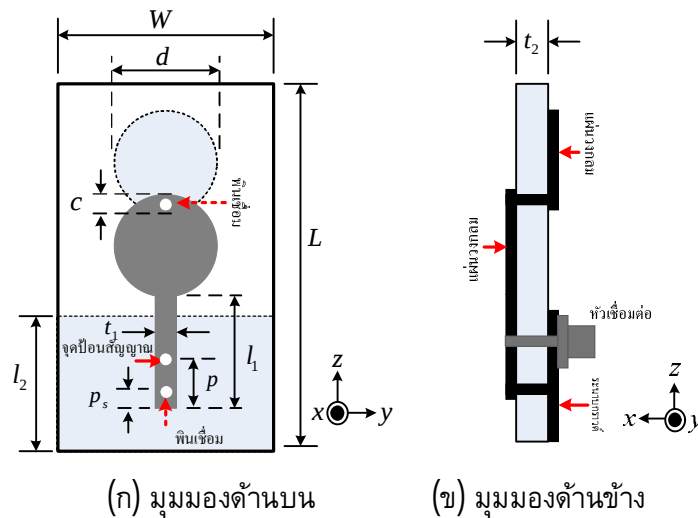
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นวงกลม

เริ่มจากการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นวงกลมโดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นวงกลม ( $d$ ) และตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณ ( $p$ ) โดยได้ทำการปรับค่าในช่วง 22-26mm และ 5-7mm ตามลำดับ เนื่องจากทั้งสองพารามิเตอร์นี้เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความกว้างรวม ( $W$ ) มีค่าเท่ากับ 30mm ความยาวรวม ( $L$ ) มีค่าเท่ากับ 45mm ความหนาของสายนำสัญญาณไมโครสตริป ( $t_1$ ) มีค่าเท่ากับ 3.5mm ค่าความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริป ( $l_1$ ) มีค่าเท่ากับ 12mm และความยาวของระนาบกราวด์ ( $l_2$ ) มีค่าเท่ากับ 13mm โดยโครงสร้างของสายอากาศและค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวถูกแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

จากผลการจำลองที่ได้แสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์จะแปรผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นวงกลม ( $d$ ) และค่าแมตซ์ชิงอิมพีแดนซ์จะแปรผันตรงกับจุดป้อนสัญญาณ โดยจากการเลือกพิจารณาค่าที่เหมาะสมจากการจำลองพบว่าค่า  $p$  มีค่าเท่ากับ 5mm และค่า  $d$  มีค่าเท่ากับ 5mm จากค่าดังกล่าวจะได้ผลของ  $|S_{11}|$  เท่ากับ -32dB ที่ความถี่กลาง (2.45 GHz) และจากผลการจำลองพบว่าสายอากาศแบบแผ่นวงกลมสามารถที่จะตอบสนองช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz ได้



รูปที่ 2.4 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแผ่นวงกลมเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $p$  และ  $d$

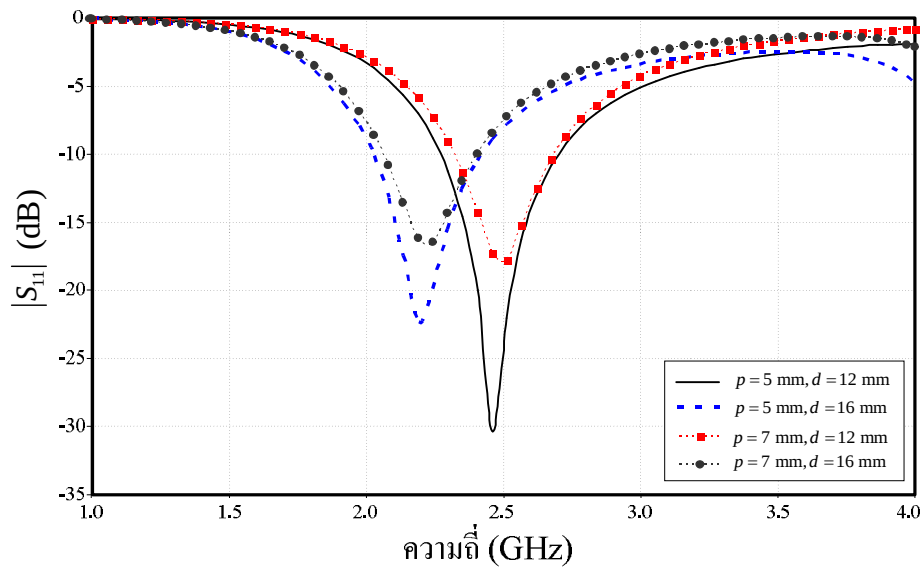


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นวงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด

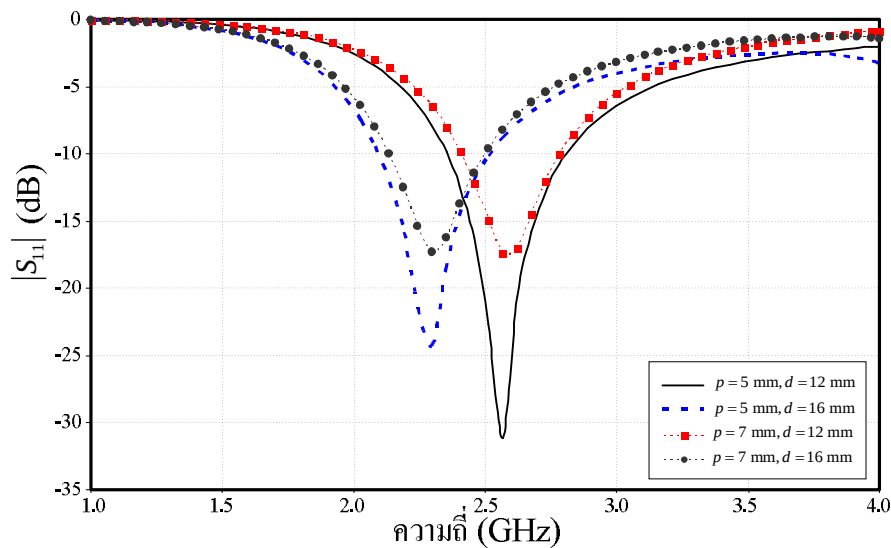
จากนั้นเพื่อที่จะลดขนาดของสายอากาศแผ่นวงกลมให้มีขนาดโดยรวมเล็กลงและเหมาะสมที่จะเป็นองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับ จึงได้มีการเพิ่มแผ่นวงกลมอีกหนึ่งแผ่นที่ด้านหลังแล้วทำการเชื่อมแผ่นวงกลมทั้งคู่ให้ต่อกันด้วยเข็มเชื่อม (เข็มเชื่อมอันที่ 1) จากนั้นโครงสร้างของสายอากาศก็จะกลายเป็นสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ในการจำลองของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมได้มีการพิจารณาพื้นที่ที่ทับซ้อนกัน (c) โดยได้ปรับค่าที่มีผลกระทบมากที่สุดสองค่าคือ 2mm และ 3mm จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกับความถี่เรโซแนนซ์และซึ่งทั้งสองค่าจะถูกนำมาใช้ตั้งนั้นในการ

จำลองครั้งนี้ รูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการปรับพารามิเตอร์  $d$  และ  $p$  เมื่อค่า  $c$  มีค่าเท่ากับ 2mm และ 3mm ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับพารามิเตอร์  $c$   $p$  และ  $d$  ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมมีค่าเท่ากับ 1mm 5mm และ 12mm ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวจะได้ผลของ  $|S_{11}|$  เท่ากับ -30dB ที่ความถี่กลาง (2.45 GHz) มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 500MHz และมีขนาดโดยรวมลดลง 30% เมื่อเทียบกับสายอากาศแผ่นวงกลม จึงเป็นผลทำให้สายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมมีขนาดโดยรวม 20mm×45mm×1.8mm ลดจากขนาดเดิมที่มีค่าเท่ากับ 30mm×45mm×1.8mm



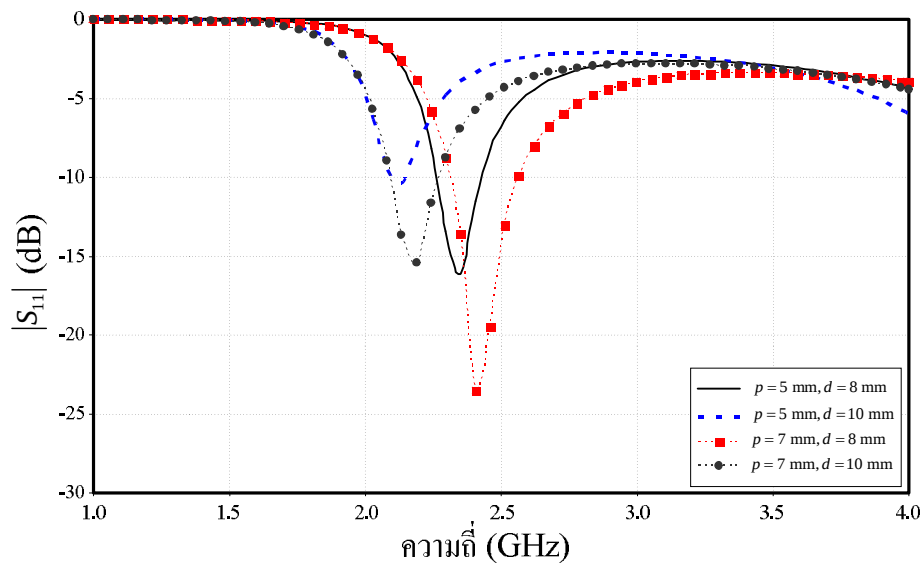
รูปที่ 2.6 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $p$  และ  $d$  เมื่อ  $c = 1\text{mm}$



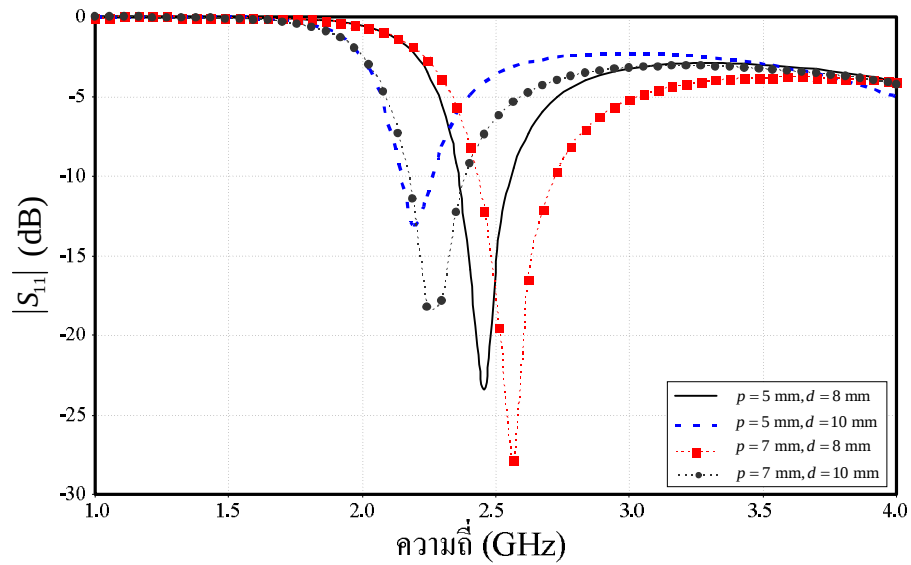
รูปที่ 2.7 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $p$  และ  $d$  เมื่อ  $c = 3\text{mm}$

เพื่อการลดขนาดโดยรวมของสายอากาศอีกครั้งหนึ่งได้มีการเพิ่มเข็มเชื่อมอันที่ 2 โดยจะอยู่ในตำแหน่งปลายของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปและเชื่อมต่อไปยังระนาบกราวนด์ และเนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของแผ่นคู่วงกลมจึงทำให้ตำแหน่งของเข็มเชื่อมอันที่ 2 ( $p_s$ ) มีค่าเท่ากับ 1mm ดังแสดงในรูปที่ 2.5

จากการนำเสนอของเข็มเชื่อมอันที่ 2 จึงได้มีการจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมอีกครั้ง โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์  $c$   $p$  และ  $d$  ซึ่งจากผลการจำลองในรูปที่ 2.8 และ 2.9 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ  $c$   $p$  และ  $d$  มีค่าเท่ากับ 3mm 5 mm และ 8mm ตามลำดับ โดยขนาดรวมของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดมีขนาดลดลง 48% เมื่อเทียบกับสายอากาศแผ่นวงกลม สายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดสามารถตอบสนองความถี่ในช่วง 2.31-2.55GHz และ  $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ -24dB ที่ความถี่กลาง (2.45 GHz) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Pattern) และมีอัตราขยายเท่ากับ 1.6dBi ทั้งนี้ขนาดทั้งหมดของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดมีค่าเท่ากับ 20mm×35mm×1.8mm และจะถูกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับจำนวน 4 องค์ประกอบ โดยผลการจำลองค่า  $|S_{11}|$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมถูกแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $p$  และ  $d$  เมื่อ  $c = 1\text{mm}$



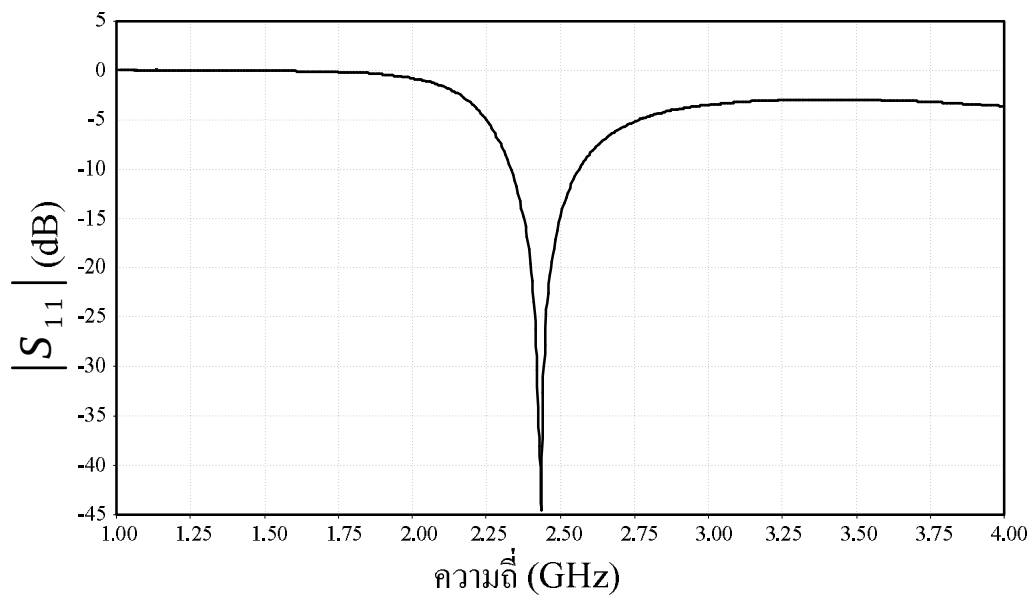
รูปที่ 2.9 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $p$  และ  $d$  เมื่อ  $c = 3\text{ mm}$

จากรูปที่ 2.5 สายอากาศที่นำเสนอสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยแผ่นวงกลมด้านหน้าวัสดุฐานรองหนึ่งแผ่นและแผ่นวงกลมด้านหลังวัสดุฐานรองอีกหนึ่งแผ่น แผ่นวงกลมทั้งสองแผ่นถูกเชื่อมต่อกันด้วยเข็มเชื่อมอันที่ 1 และแผ่นวงกลมทั้งคู่ถูกบ่อนสัญญาณด้วยโพรงโคแอกเซียลผ่านสายส่งไมโครสตริปไปยังแผ่นวงกลมทั้งคู่และเชื่อมต่อจุดปลายของสายส่งไมโครสตริปกับระนาบกราวด์ด้วยพินเชื่อมอันที่ 2 และจะพบว่าจากผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นวงกลม ( $d$ ) และพื้นที่ทับซ้อนกัน ( $c$ ) มีผลกระทบกับความถี่เรโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์แมตชิง และช่วงกว้างความถี่

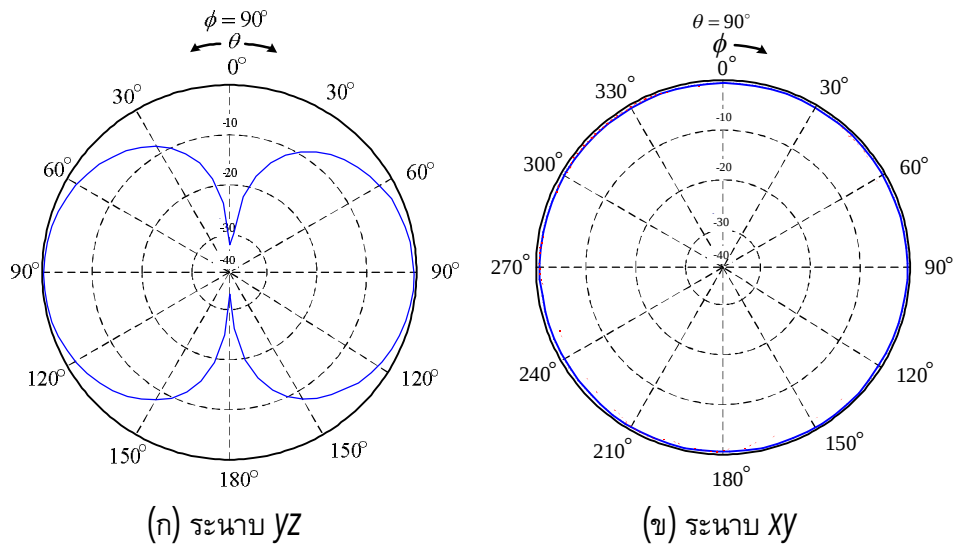
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด ซึ่งจะใช้เป็นองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับจากการจำลองสายอากาศสามารถตอบสนองความถี่ในช่วง 2.31-2.55GHz มีช่วงกว้างความถี่ 240 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Pattern) โพลาริเซชันเชิงเส้น และมีอัตราขยายเท่ากับ 1.6dBi

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด

| พารามิเตอร์ | รายละเอียด                            | ขนาด (mm) |
|-------------|---------------------------------------|-----------|
| $W$         | ความกว้างโดยรวม                       | 20        |
| $L$         | ความยาวโดยรวม                         | 35        |
| $l_1$       | ความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริป       | 12        |
| $l_2$       | ความยาวของระนาบกราวด์                 | 13.5      |
| $c$         | พื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างแผ่นวงกลม     | 3         |
| $d$         | เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นวงกลม         | 8         |
| $t_1$       | ความหนาของสายส่งไมโครสตริป            | 2         |
| $l_2$       | ความหนาของวัสดุฐานรอง                 | 1.8       |
| $p$         | ตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณ               | 5         |
| $p_s$       | ตำแหน่งการเชื่อมของเข็มเชื่อมอันที่ 2 | 1         |



รูปที่ 2.10 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด



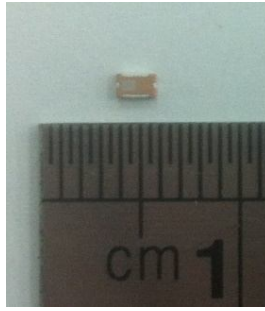
รูปที่ 2.11 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดที่ความถี่ 2.45GHz

จากนั้นจะนำสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดที่มีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.1 มาจัดวางเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบซิงเกิ้ล 4 องค์ประกอบและสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน  $2 \times 2$  องค์ประกอบ โดยตัวประกอบแถวลำดับนั้นได้แสดงใน [20] ยังสามารถที่จะแสดงให้เห็นว่าการปรับเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้กับแต่ละองค์ประกอบสามารถปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้

## 2.4 ระบบย่อยของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้

วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter : BPF)

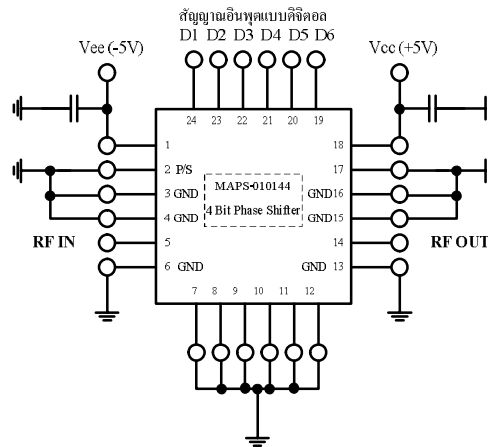
วงจรกรองแถบความถี่ผ่านได้ออกแบบเพื่อนำมาใช้สำหรับสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ โดยใช้ชิพไอซีเบอร์ P/N : 2450BP15E0100 บริษัท Johanson Technology สามารถตอบสนองการใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  ที่ความถี่กลาง (2.45GHz) มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) มีค่าเท่ากับ 1.5dB และ 25dB ตามลำดับ อีกทั้งชิพไอซีดังกล่าวยังมีโครงสร้างที่สามารถเชื่อมต่อกับแผ่นวงจรพิมพ์ได้ง่าย



รูปที่ 2.12 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

### วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณ (Phase Shifter)

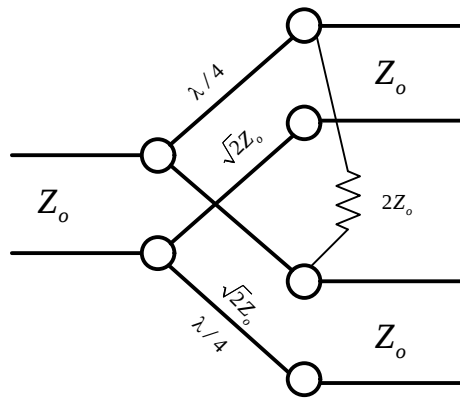
วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณได้ออกแบบโดยใช้ชิปไอซีเบอร์ MAPS-010144 ซึ่งเป็นตัวปรับเฟสแบบดิจิทัล 4 บิต ครอบคลุม 360 องศา สามารถปรับละเอียดได้ที่ละ 22.5 องศา ใช้งานที่ช่วงความถี่ 2.3 GHz ถึง 3.8 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์  $50\Omega$  มีอัตราการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ประมาณ 2.5 dB และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 20dB วงจรใช้งานสำหรับตัวปรับเฟสแบบดิจิทัล 4 บิต แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรใช้งานสำหรับเลื่อนเฟสแบบดิจิทัล 4 บิต

### วงจรรวม/แยกสัญญาณ (Power Combiner/Power Splitter)

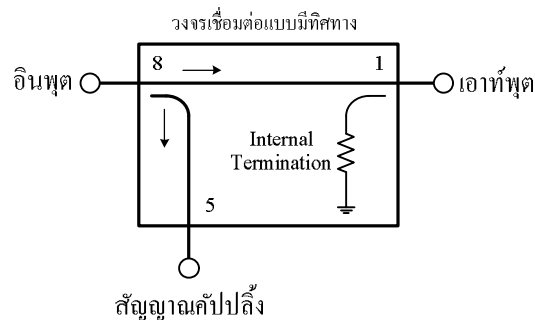
วงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 ใช้ชนิดวิลคินสัน (Wilkinson) [22] ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ถูกออกแบบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 มีอัตราการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ประมาณ 2dB และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 15dB



รูปที่ 2.14 วงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 ชนิดวิลคินสัน

### วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง (Directional Coupler)

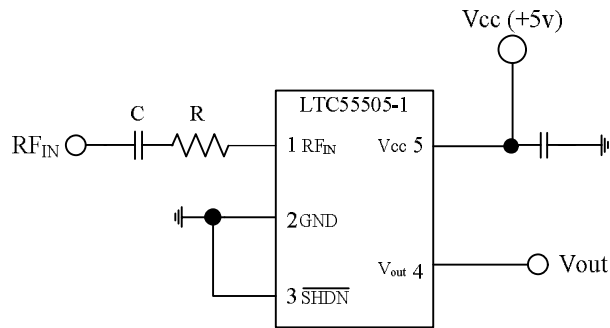
วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทางใช้สำหรับคัปปลิงสัญญาณความถี่เพื่อนำมาวิเคราะห์ความแรงของสัญญาณ โดยถูกออกแบบด้วยโครงสร้างไมโครสตริป [20] มีอัตราการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ประมาณ 0.5dB และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 22dB แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง

### วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ (RF Detector)

วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณได้ออกแบบโดยใช้ชิปไอซีเบอร์ LTC5505-1 + ใช้งานที่ช่วงความถี่ 300MHz ถึง 3GHz มีค่าอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  สามารถตรวจจับความแรงต่ำสุดที่ -32dBm วงจรใช้งานสำหรับส่วนตรวจจับความแรงของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.16



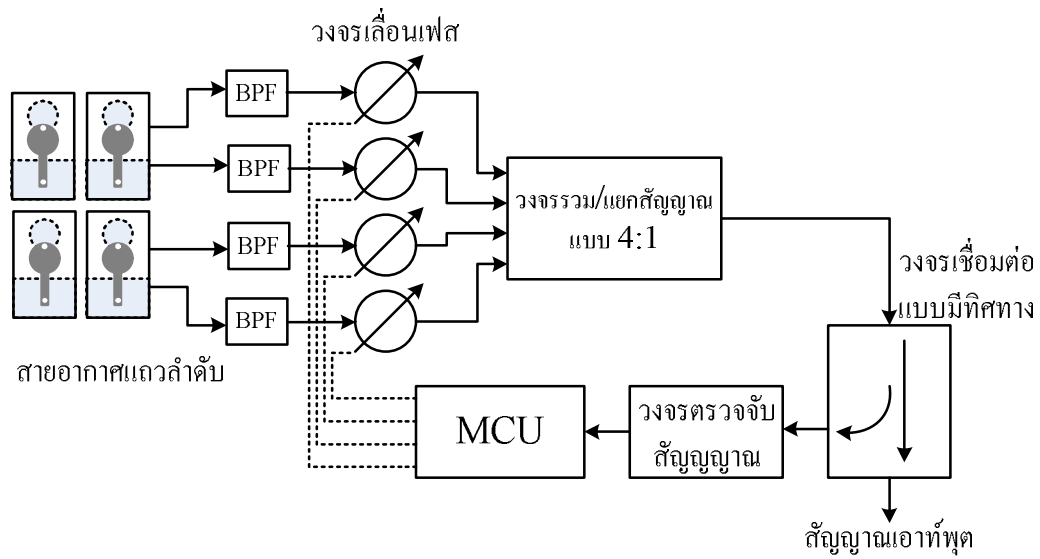
รูปที่ 2.16 วงจรใช้งานสำหรับตรวจจับความแรงของสัญญาณ

### ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit : MCU)

ในส่วนนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F877A เพื่อประมวลผลกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบปรับปรุงแมลงหวี่และปรับค่าเฟสของสัญญาณผ่านวงจรเลื่อนเฟสและจะเป็นผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงในที่สุด ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้มี 40 ขามีช่องรับสัญญาณ ADC ขนาด 10Bits จำนวน 8 ช่อง

## 2.5 ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้

จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงแผนผังของระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ โดยมีส่วนประกอบและหลักการทำงานคือ สายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดจำนวน 4 องค์ประกอบ วงจรกรองแถบความถี่ผ่านจำนวน 4 วงจร วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณจำนวน 4 วงจร วงจรรวม/แยกสัญญาณ วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ และไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งหมดจะทำงานในช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz เมื่อมีสัญญาณเข้ามาจากองค์ประกอบย่อยแต่ละตัว สัญญาณเหล่านั้นจะถูกกรองเอาแต่ช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz และจะถูกปรับเฟสด้วยวงจรเลื่อนเฟสซึ่งจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะพิจารณาปรับเฟสด้วยหลักการกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงที่มีการพิจารณาค่าความแรงของผลรวมของสัญญาณจากวงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 และเชื่อมต่อผ่านวงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทางมาให้วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณที่ป้อนกลับเข้าไปยังตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นค่าเป้าหมายและจะทำการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าไปหาทิศทางที่มีคลื่นเข้ามาแรงที่สุด



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้นำเสนอ

### บทที่ 3

#### กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

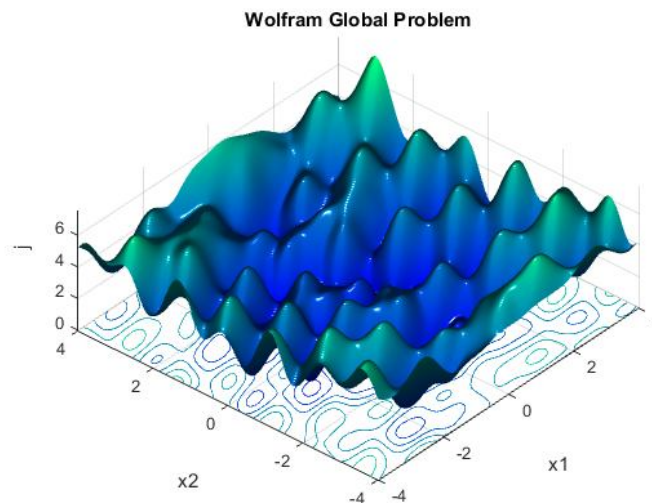
##### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวและการพัฒนาเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง รวมไปถึงผลการทดสอบการใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบปรับปรุงแมลงหิวในการหาค่าที่เหมาะสมฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และสุดท้ายได้นำกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงในการประมวลผลปัญหาของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้

##### 3.2 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสมทางคณิตศาสตร์คือ การเลือกองค์ประกอบที่ดีที่สุดจากชุดของทางเลือกที่มีอยู่ ในกรณีที่ง่ายที่สุดปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสมจะประกอบด้วยการหาค่าที่สูงที่สุดหรือค่าที่ต่ำที่สุดของฟังก์ชันจริงด้วยการเลือกค่าแล้วป้อนเข้าไปยังฟังก์ชัน โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่อยู่ในชุดข้อมูลที่ได้คำนวณมาจากค่าของฟังก์ชันนั้นๆ โดยจะเห็นว่าฟังก์ชันเป็นความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลอินพุตและชุดข้อมูลของค่าเอาต์พุต

ทั้งนี้ลักษณะการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันนั้นยังถูกแบ่งออกเป็นลักษณะของปัญหาที่มีจุดที่เหมาะสมเฉพาะพื้นที่ (Local Optimum) และจุดที่เหมาะสมของทั้งหมด (Global Optimum) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 [23]

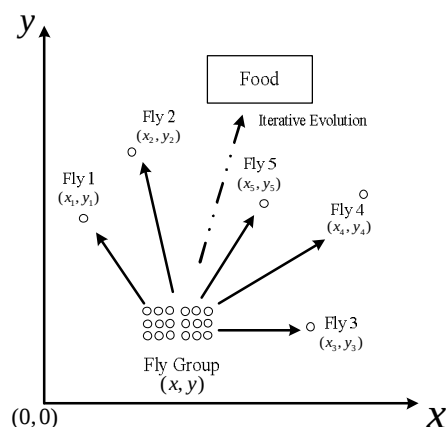


รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีจุดที่เหมาะสมทั้งแบบเฉพาะพื้นที่และจุดที่เหมาะสมของทั้งหมด [23]

อย่างไรก็ตามในทางคณิตศาสตร์มีกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมหลากหลายชนิดทั้งแบบที่เป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมเฉพาะพื้นที่ (Local Optimization Algorithm) และกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมของทั้งหมด (Global Optimization Algorithm) แต่ในโครงการวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอการใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในการปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าและมีลักษณะเป็นปัญหาแบบจุดที่เหมาะสมของทั้งหมด จึงได้นำเสนอกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง (Modified Fruit Fly Optimization Algorithm : MFOA) ที่พัฒนามาจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ (Fruit Fly Optimization Algorithm : MFOA) เพื่อใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีลักษณะที่ไม่ซับซ้อนและสามารถหาค่าที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมของทั้งหมด โดยจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### 3.3 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ดั้งเดิมถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2011 โดย Wan-Tsao Pan วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมในการค้นหาแหล่งอาหารของกลุ่มแมลงหวี่ โดยปกติแล้วแมลงหวี่จะเป็นสัตว์ ที่มีประสาทสัมผัสในการมองเห็นและรับกลิ่นที่ดีมาก ดังนั้นกระบวนการหลักๆ ในการค้นหาแหล่งอาหารของแมลงหวี่จะมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 2 กระบวนการด้วยกันนั่นคือ ขั้นตอนแรกแมลงหวี่จะใช้ประสาทสัมผัสในการรับกลิ่นของแหล่งอาหาร จากนั้นจะทำการบินไปยังบริเวณที่ใกล้เคียงกับแหล่งอาหารและขั้นตอนที่สองจะเป็นการใช้ประสาทสัมผัสในการมองเห็น โดยจะบินไปยังแหล่งอาหารเพื่อทำการค้นหาอาหารจากรูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบการบินของแมลงวันที่ดีคล้ายกับการบินหาอาหารของฝูงแมลงวัน โดยจะบินกันเป็นกลุ่มย่อยหลายกลุ่มหลายกลุ่มใดพบเจออาหารก่อนก็จะสื่อสารให้กลุ่มอื่นๆ มาหา



รูปที่ 3.2 ลักษณะการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่

จากการทำงานกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่สามารถแสดงการทำงานในรูปแบบของโปรแกรมได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการวนซ้ำ ( $K$ )
2. กำหนดค่าเริ่มต้นของกลุ่มสมาชิก ( $P$ )
3. กำหนดค่าตำแหน่งเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $X$ -axis และ  $Y$ -axis แบบสุ่ม
4. หาค่าทิศทางและระยะห่างสำหรับสมาชิกทุกตัวสำหรับการวนซ้ำรอบแรก  
for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

$X_i = X\text{-axis} + \text{ค่าที่ได้จากการสุ่ม}$  และ  $Y_i = Y\text{-axis} + \text{ค่าที่ได้จากการสุ่ม}$   
คำนวณค่าระยะห่างและคำนวณค่ากลิ่น smell concentration ( $S$ ) โดย

$$Dist_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)} \text{ และ } S_i = 1 / Dist_i$$

คำนวณค่า  $Smell_i = Function(S_i)$  และหาค่ากลิ่นที่ดีที่สุด

กำหนดค่ากลิ่นที่ดีที่สุดให้เป็น "bestSmell"

end

5. จากนั้นจะเป็นลำดับการค้นหาโดยเริ่มจากรอบที่ 2 ไปจนถึงรอบสุดท้าย

หาค่าทิศทางและระยะห่างสำหรับสมาชิกทุกตัว

for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

$X_i = X\text{-axis} + \text{ค่าที่ได้จากการสุ่ม}$  และ  $Y_i = Y\text{-axis} + \text{ค่าที่ได้จากการสุ่ม}$   
ประมาณค่าระยะห่างและคำนวณค่ากลิ่น smell concentration ( $S$ ) โดย

$$Dist_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)} \text{ และ } S_i = 1 / Dist_i$$

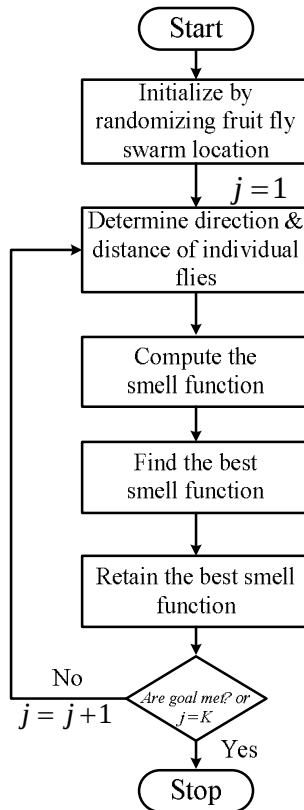
คำนวณค่า  $Smell_i = Function(S_i)$  และหาค่ากลิ่นที่ดีที่สุด

ถ้าค่ากลิ่นที่ดีที่สุด มีค่าดีกว่าค่าเดิมก็จะทำการอัปเดตค่าดังกล่าว

กำหนดค่า  $X$ -axis และ  $Y$ -axis เป็นค่าที่ดีที่สุดอันล่าสุด

end

6. ทำซ้ำข้อที่ 5 จนกระทั่งพบค่าที่ดีที่สุดหรือจำนวนค่าการวนซ้ำจบลง



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่

### 3.4 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง

จากปัญหาของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่จึงได้พัฒนามาเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง ซึ่งได้ปรับปรุงด้วยการปรับเปลี่ยนจำนวนสมาชิกแบบสุ่มในรอบการทำงานและทำการแบ่งกลุ่มสมาชิกออกเป็น 2 กลุ่มเพื่อที่จะใช้หาค่าที่เหมาะสมใน 2 รูปแบบคือ ในพื้นที่ใกล้เคียงและในพื้นที่ห่างไกล จะทำให้กระบวนการค้นหาไม่มีปัญหาการพบค่าที่เหมาะสมปลอมดังแสดงในรูปที่ 3.4 สามารถแสดงการทำงานในรูปแบบของโปรแกรมได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการวนซ้ำ ( $K$ )
  2. กำหนดค่าเริ่มต้นของกลุ่มสมาชิก ( $P$ )
  3. กำหนดค่าตำแหน่งเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $X$ -axis และ  $Y$ -axis แบบสุ่ม
  4. หาค่าทิศทางและระยะห่างสำหรับสมาชิกทุกตัวสำหรับการวนซ้ำรอบแรก
- for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

กลุ่มที่ 1

$X_i$  = ค่าที่ได้จากการสุ่ม และ  $Y_i$  = ค่าที่ได้จากการสุ่ม

กลุ่มที่ 2

$X_i$  =  $X$ -axis + ค่าที่ได้จากการสุ่ม และ

$Y_i$  =  $Y$ -axis + ค่าที่ได้จากการสุ่ม

ประมาณค่าระยะห่างและคำนวณค่ากลิ่น smell concentration (S) โดย

$$Dist_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)} \text{ และ } S_i = 1 / Dist_i$$

คำนวณค่า  $Smell_i = Function(S_i)$  และหาค่ากลิ่นที่ดีที่สุด

กำหนดค่ากลิ่นที่ดีที่สุดให้เป็น "bestSmell"

จัดเก็บค่าจุด  $X_i$  และ  $Y_i$  ที่ดีที่สุด

end

5. จากนั้นจะเป็นลำดับการค้นหาโดยเริ่มจากรอบที่ 2 ไปจนถึงรอบสุดท้าย

ปรับจำนวนสมาชิกแบบสุ่ม

หาค่าทิศทางและระยะห่างสำหรับสมาชิกทุกตัว

for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

กลุ่มที่ 1

$X_i =$  ค่าที่ได้จากการสุ่ม และ  $Y_i =$  ค่าที่ได้จากการสุ่ม

กลุ่มที่ 2

$X_i = X\text{-axis} +$  ค่าที่ได้จากการสุ่ม

และ  $Y_i = Y\text{-axis} +$  ค่าที่ได้จากการสุ่ม

ประมาณค่าระยะห่างและคำนวณค่ากลิ่น smell concentration (S) โดย

$$Dist_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)} \text{ และ } S_i = 1 / Dist_i$$

คำนวณค่า  $Smell_i = Function(S_i)$  และหาค่ากลิ่นที่ดีที่สุด

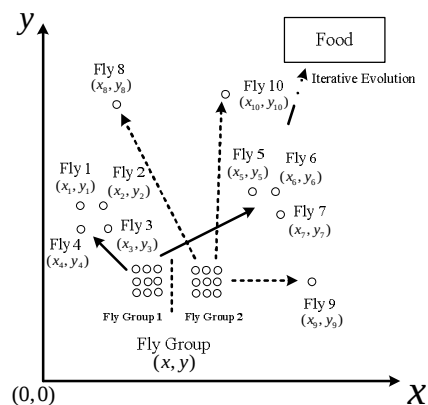
ถ้าค่ากลิ่นที่ดีที่สุด มีค่าดีกว่าค่าเดิมก็จะทำการอัปเดตค่าดังกล่าว

กำหนดค่า  $X\text{-axis}$  และ  $Y\text{-axis}$  เป็นค่าที่ดีที่สุดอันล่าสุด

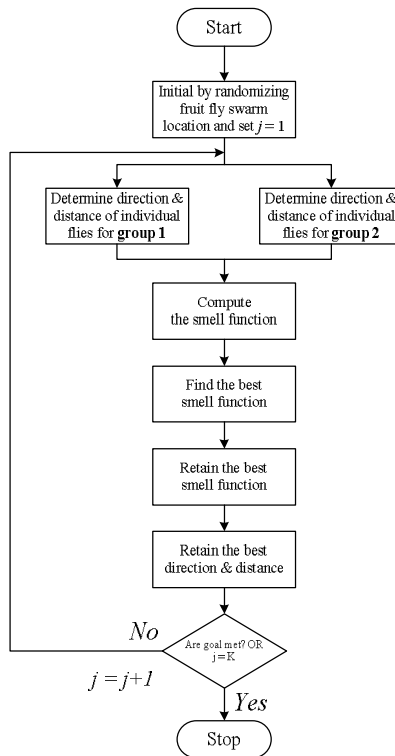
จัดเก็บค่าจุด  $X_i$  และ  $Y_i$  ที่ดีที่สุด

end

6. ทำซ้ำข้อที่ 5 จนกระทั่งพบค่าที่ดีที่สุดหรือจำนวนค่าการวนซ้ำจบลง



รูปที่ 3.4 ลักษณะการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง

### 3.5 ผลการคำนวณเชิงเลข

เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง จึงได้มีการทดสอบการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นสองตัวแปรจำนวนสามฟังก์ชัน [24] เปรียบเทียบกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่และกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบการสืบทอดพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) ดังแสดงต่อไปนี้

#### 1. ฟังก์ชันสี่จุดยอด (Four Peak Function)

$$f(x, y) = e^{-(x-4)^2-(y-4)^2} + e^{-(x+4)^2-(y-4)^2} + 2[e^{-x^2-y^2} + e^{-x^2-(y+4)^2}] \quad (3.1)$$

#### 2. ฟังก์ชันพาราโบลา (Parabolic Function)

$$f(x, y) = 12 - (x^2 + y^2) / 100 \quad (3.2)$$

#### 3. ฟังก์ชันโกลด์สไตน์ไพร (Goldstein-Price Function)

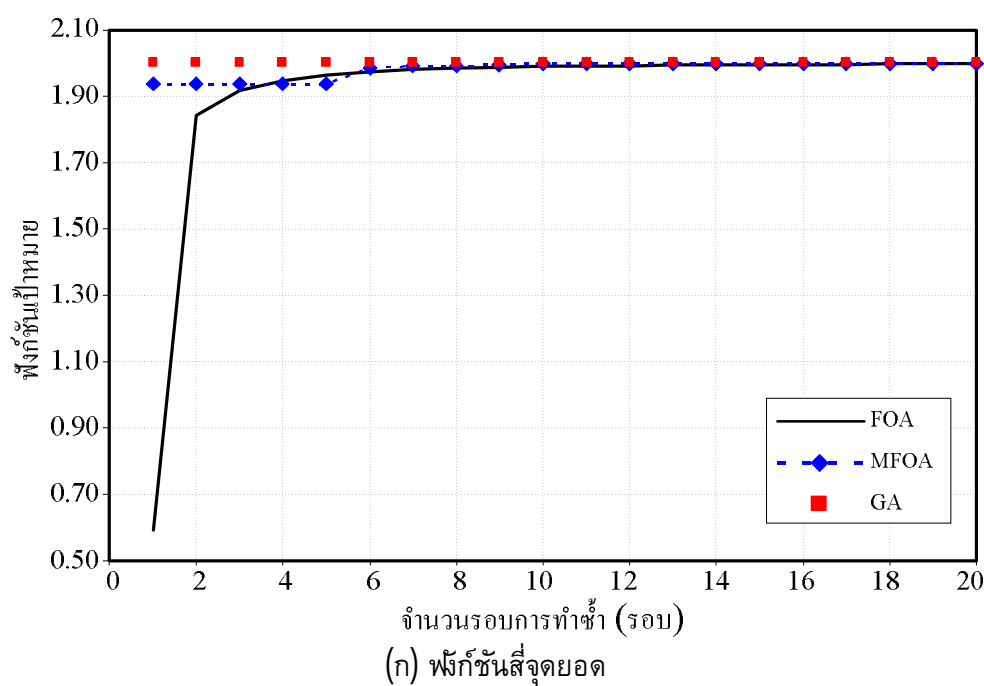
$$f(x, y) = 10 + \log \left[ \frac{1}{\{1 + (1 + x + y)(19 - 14x + 3x^2 - 14y + 6xy + 3y^2)\}} * \frac{1}{\{1 + (1 + x + y)(19 - 14x + 3x^2 - 14y + 6xy + 3y^2)\}} \right] \quad (3.3)$$

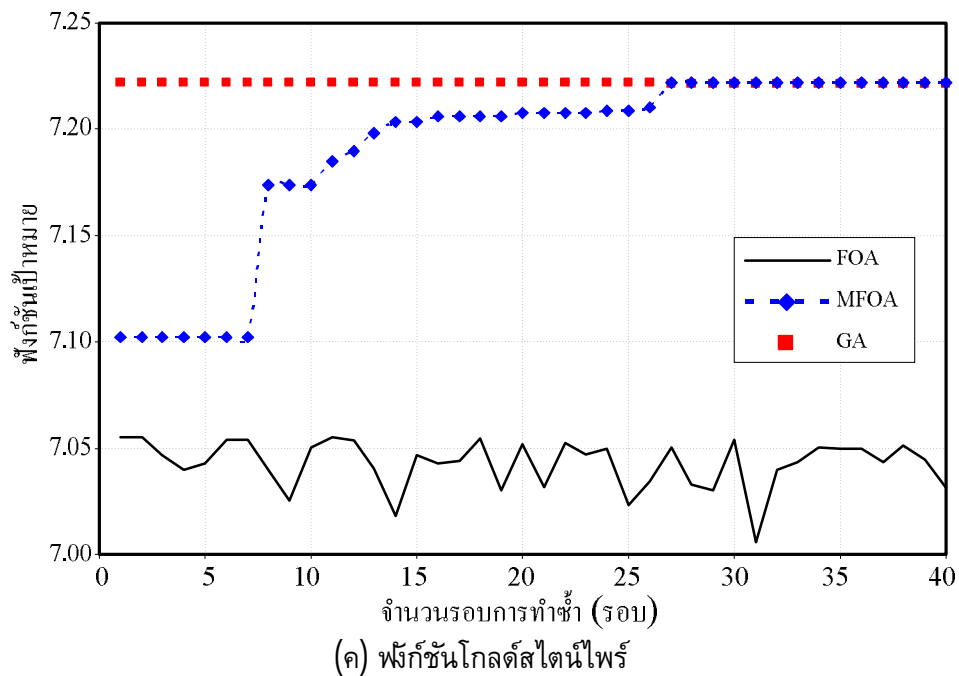
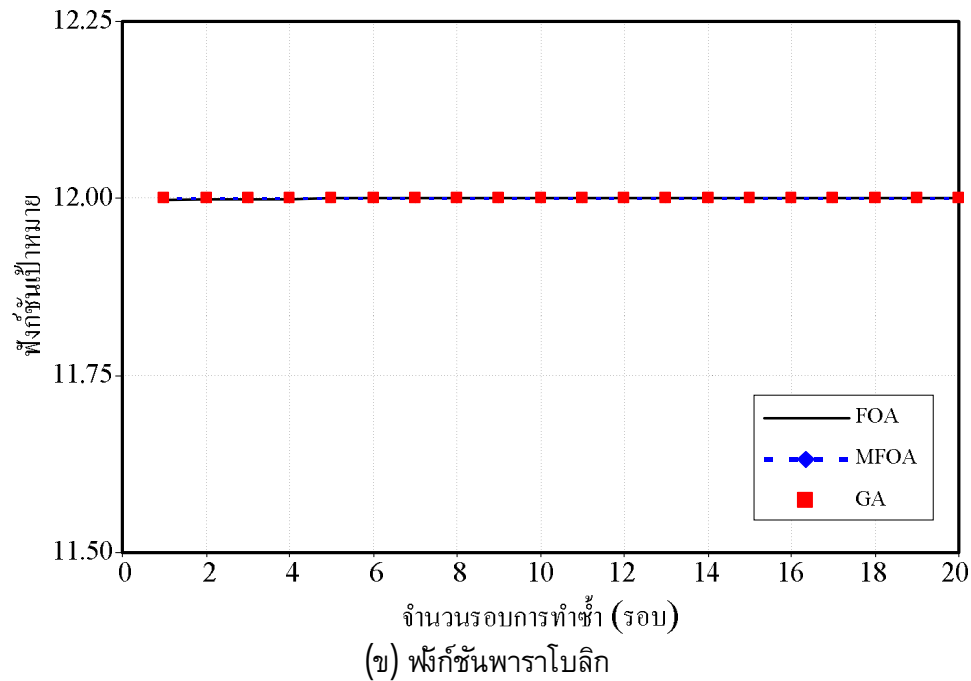
จากผลการคำนวณเชิงเลขของทั้งสามกระบวนการพบว่าสามารถที่จะหาค่าที่เหมาะสมของทั้งสามฟังก์ชันได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ยกเว้นในกรณีของฟังก์ชันโกลด์สไตน์ไพรพบว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้เพียงกระบวนการ

เดียวกันนั้น จากนั้นผลของอัตราการลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมของทั้งสามกระบวนการได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.6 ในรูปที่ 3.6 (ก) สำหรับฟังก์ชันสี่จุดยอดพบว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบกระบวนการสืบทอดพันธุกรรมและกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงสามารถลู่เข้าได้อย่างรวดเร็วแต่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่จะลู่เข้าในการทำซ้ำครั้งที่ 4 ถัดมาสำหรับฟังก์ชันพาราโบลิคพบว่าทั้งกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมทั้งสามแบบสามารถลู่เข้าได้ในวงรอบการทำงานแรกดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข) แต่อย่างไรก็ตามสำหรับฟังก์ชันโกลด์สไตน์ไฟร์พบว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้เพียงกระบวนการเดียวกันนั้นรูปที่ 3.6 (ค)

ตารางที่ 3.1 ผลการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง และกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบการสืบทอดพันธุกรรมกับฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น

| ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์  | FOA         |        |        | MFOA        |        |        | GA          |   |   |
|------------------------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|---|---|
|                        | ค่าเป้าหมาย | X      | y      | ค่าเป้าหมาย | X      | y      | ค่าเป้าหมาย | X | y |
| ฟังก์ชันสี่จุดยอด      | 2           | 0.0014 | 0.0008 | 2           | 0.0014 | 0.001  | 2           | 0 | 0 |
| ฟังก์ชันพาราโบลิค      | 12          | 0.0014 | 0.0008 | 12          | 0.0013 | 0.001  | 12          | 0 | 0 |
| ฟังก์ชันโกลด์สไตน์ไฟร์ | 7.0549      | 0.5206 | 0.6841 | 7.22        | 0.0014 | 0.0009 | 7.22        | 0 | 0 |





รูปที่ 3.6 อัตราการลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมของทั้งสามกระบวนการกับฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น

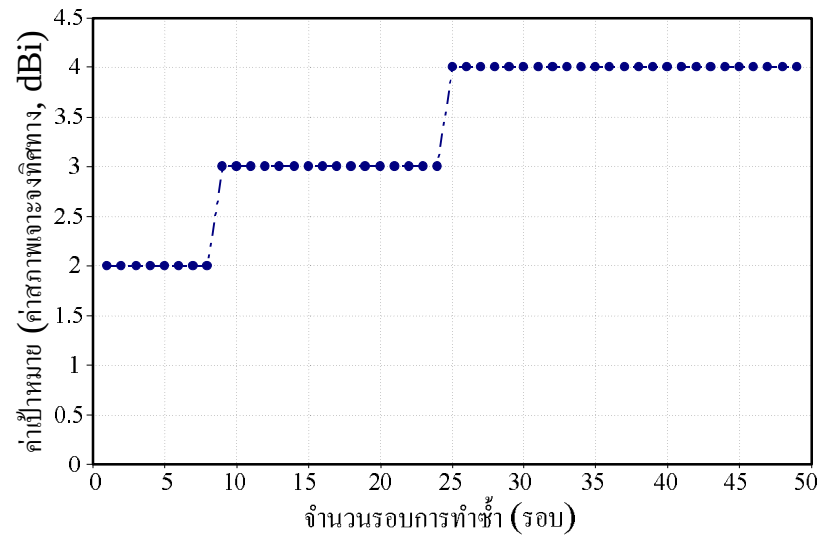
จากผลการคำนวณเชิงเลขที่ผ่านมานั้นแสดงให้เห็นแล้วว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงมีประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ และมีความประสิทธิภาพใกล้เคียงกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบการสืบทอดพันธุกรรมแต่มีความซับซ้อนน้อยกว่าตามลำดับ จากนั้นจึงได้นำกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงไปทดสอบหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทดสอบกับปัญหาของสายอากาศ

แถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวนสี่องค์ประกอบและสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน  $2 \times 2$  องค์ประกอบ

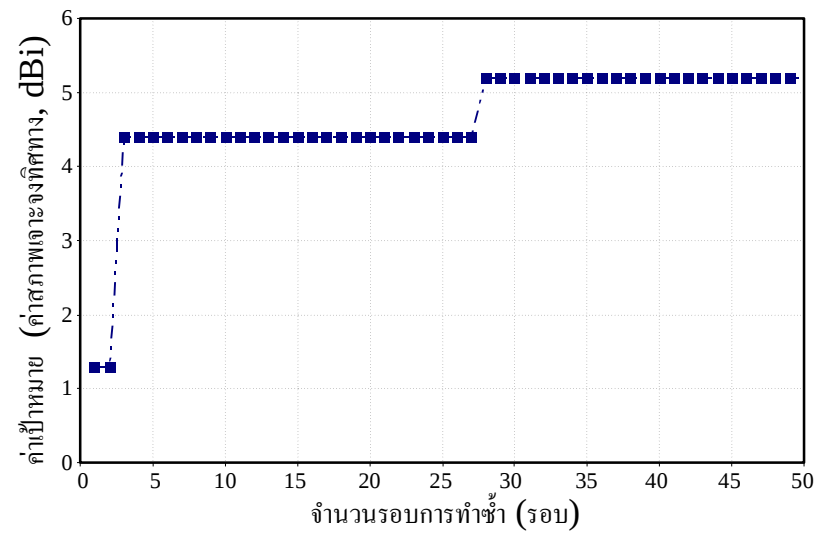
ในการหาค่าที่เหมาะสมของสายอากาศแถวลำดับนี้ได้ทำการจำลองให้แหล่งกำเนิดแบบจุด (Point Source) แทนองค์ประกอบย่อยจริง และวางองค์ประกอบย่อยห่างกับ 10mm และมีค่าขนาดของกระแสในแต่ละองค์ประกอบเท่ากับหนึ่งทุกองค์ประกอบ และให้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมนั้นหาค่าเฟสของสัญญาณที่เหมาะสมของแต่ละองค์ประกอบ ( $\beta_i$  หรือ  $S_i$  ของ MFOA) เมื่อ  $i$  คือหมายเลขลำดับขององค์ประกอบย่อยเช่น 1 2 3 และ 4 โดยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบปรับปรุงแมลงหวี่จะทำการวนซ้ำจนสามารถพบค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่มากที่สุด

ในที่นี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงคือจำนวนประชากรการค้นหาค่า (Population Size) เท่ากับ 10 ด้วยการแบ่งออกเป็นสองกลุ่มเท่าๆ กัน และมีการเก็บค่าที่ดีที่สุดในแต่ละวงรอบการทำงาน (Elitism) เท่ากับ 2 ตัว จากผลการคำนวณเชิงเลขของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมระเบียบวิธีขั้นตอนของแมลงหวี่ชนิดปรับปรุงสามารถค้นหาค่าเฟสที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุดได้ รูปที่ 3.7 แสดงอัตราการลู่เข้าของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่มีระยะห่างคงที่จำนวน 4 องค์ประกอบพบว่าสามารถลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมได้ภายในรอบการทำงานที่ 25 โดยมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 4dBi ด้วยค่าเฟสที่เหมาะสมของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 92.51 องศา 223.56 องศา 207.32 องศา และ 183.12 องศา ตามลำดับขององค์ประกอบที่ 1 2 3 และ 4

สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน  $2 \times 2$  องค์ประกอบที่มีระยะห่างคงที่พบว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงสามารถลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมได้เช่นกันด้วยรอบการทำงานที่ 27 โดยมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 5.2dBi ด้วยค่าเฟสที่เหมาะสมของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 193.72 องศา 318.1 องศา 95.21 องศา และ 89.69 องศา ตามลำดับขององค์ประกอบที่ 1 2 3 และ 4 จากผลการคำนวณกับสายอากาศแถวลำดับทั้งสองแบบแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมระเบียบวิธีขั้นตอนของแมลงหวี่ชนิดปรับปรุงสามารถที่จะนำมาใช้งานในการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยการปรับเฟสของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถที่จะลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย จากนั้นจะนำเอากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบปรับปรุงแมลงหวี่โปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ของระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ต่อไป



รูปที่ 3.7 อัตราการลู่เข้าของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง  
สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่มีระยะห่างคงที่จำนวน 4 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.8 อัตราการลู่เข้าของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง  
สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบที่มีระยะห่างคงที่จำนวน 2x2 องค์ประกอบ

## บทที่ 4

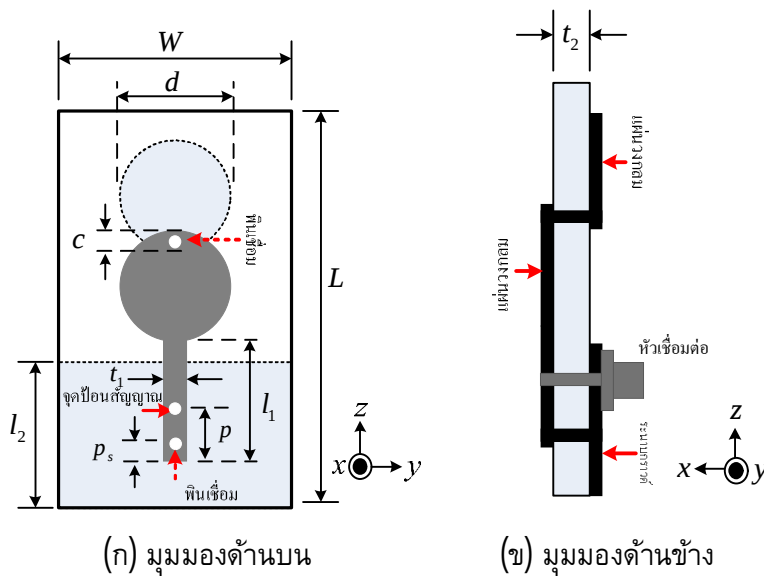
### การสร้างและผลการทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการสร้างและการทดสอบระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ โดยเริ่มจากการสร้างและทดสอบในแต่ละภาคส่วนคือ สายอากาศแบบแผ่นคู่วงกลม วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณ วงจรรวม/แยกสัญญาณ วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ และไมโครคอนโทรลเลอร์ สุดท้ายจะเป็นการสร้างและทดสอบระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้เพื่อใช้หาทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุดที่รับได้

#### 4.2 สายอากาศแบบแผ่นคู่วงกลมกับพินเชื่อมสองจุด

จากผลการออกแบบและจำลองในบทที่ผ่านมาได้นำเอาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังกล่าวมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ความหนา 1.8mm ที่มีค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 ซึ่งรูปแบบโครงสร้างของสายอากาศแสดงในรูปที่ 4.1 และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศต้นแบบแสดงในตารางที่ 4.1



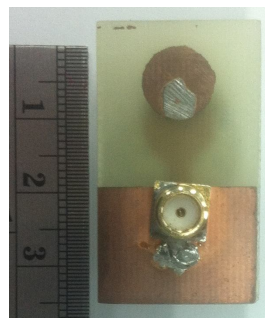
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด

| พารามิเตอร์ | รายละเอียด                            | ขนาด (mm) |
|-------------|---------------------------------------|-----------|
| $W$         | ความกว้างโดยรวม                       | 20        |
| $L$         | ความยาวโดยรวม                         | 35        |
| $l_1$       | ความยาวของสายส่งไมโครสตริป            | 12        |
| $l_2$       | ความยาวของระนาบกราวนด์                | 13.5      |
| $c$         | พื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างแผ่นวงกลม     | 3         |
| $d$         | เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นวงกลม         | 8         |
| $t_1$       | ความหนาของสายส่งไมโครสตริป            | 2         |
| $l_2$       | ความหนาของวัสดุฐานรอง                 | 1.8       |
| $p$         | ตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณ               | 5         |
| $p_s$       | ตำแหน่งการเชื่อมของเข็มเชื่อมอันที่ 2 | 1         |



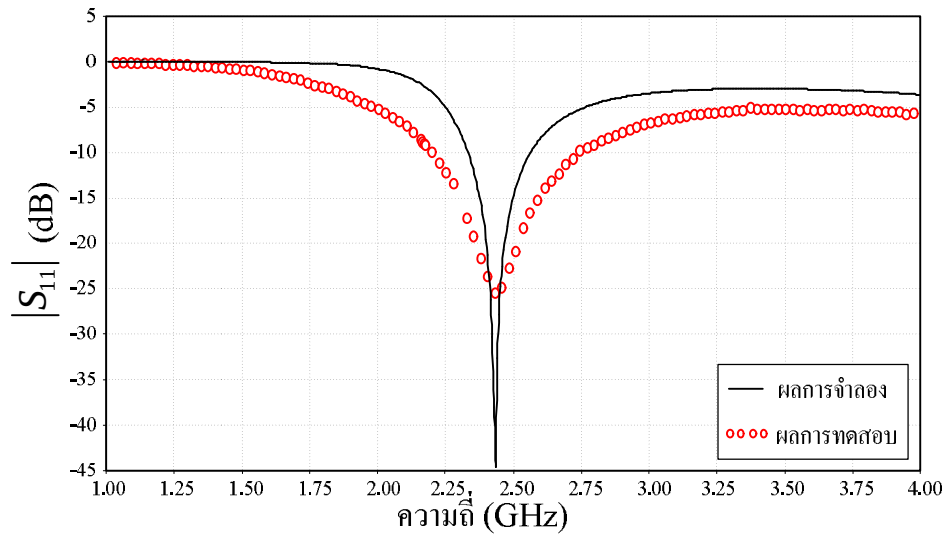
(ก) มุมมองด้านหน้า



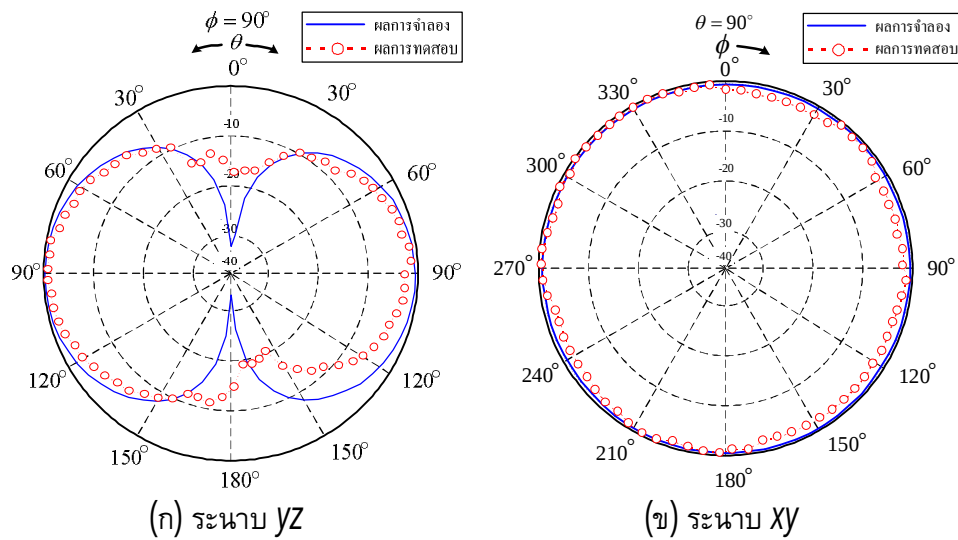
(ข) มุมมองด้านหลัง

รูปที่ 4.2 ต้นแบบของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด

รูปที่ 4.2 แสดงรูปถ่ายของสายอากาศต้นแบบของคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดที่ได้สร้างขึ้น จากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 8753ES จากผลการทดสอบ  $|S_{11}|$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการจำลองและสามารถตอบสนองช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz ด้วยค่า  $|S_{11}|$  น้อยกว่า -10dB จากนั้นทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งในที่นี้จะทดสอบที่ความถี่กลาง 2.45GHz ในระนาบที่ตั้งฉากกัน 2 ระนาบ คือระนาบ XY และ YZ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Pattern)



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบและผลการจำลองของสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุด

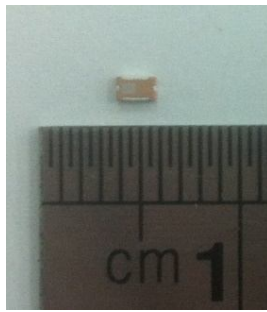


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบและผลการจำลองของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับเข็มเชื่อมสองจุดที่ความถี่ 2.45GHz

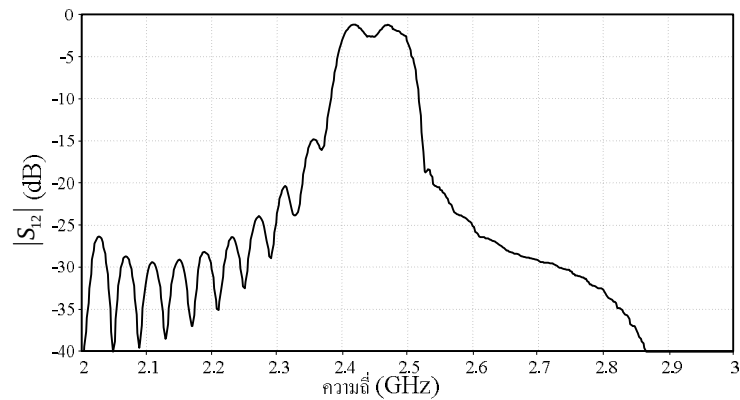
#### 4.3 ระบบย่อยของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้

วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

จากการสร้างและทดสอบวงจรกรองแถบความถี่ผ่านโดยใช้ชิพไอซีเบอร์ P/N 2450BP15E0100 บริษัท Johanson Technology พบว่าสามารถตอบสนองการใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50  $\Omega$  ที่ความถี่กลาง (2.45GHz) มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) มีค่าเท่ากับ 2.5dB และ 26dB ตามลำดับ



(ก) วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

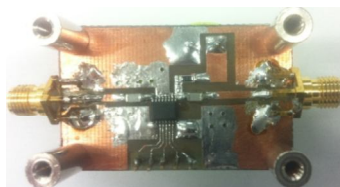


(ข) ผลการทดสอบ

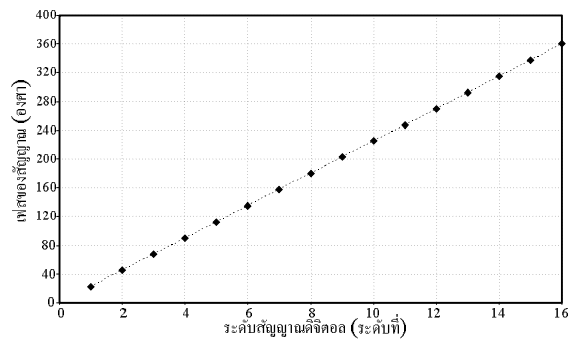
รูปที่ 4.5 รูปถ่ายวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและผลการทดสอบ

#### วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณ

จากการสร้างและทดสอบวงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณจากชิพไอซีเบอร์ MAPS-010144 ซึ่งเป็นตัวปรับเฟสแบบดิจิทัล 4 บิต ครบวงจร 360 องศา สามารถปรับละเอียดได้ที่ละ 22.5 องศา ใช้งานในช่วงความถี่ 2.3 GHz ถึง 3.8 GHz พบว่ามีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง  $50\Omega$  มีอัตราการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ประมาณ 3 dB และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 18dB รูปถ่ายวงจรเลื่อนเฟสแบบดิจิทัล 4 บิตแสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) และผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งหมด 16 ระดับ ระดับละ 22.5 องศา ครบวงจร 360 องศา



(ก) วงจรเลื่อนเฟส

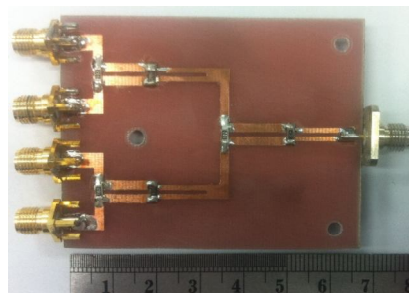


(ข) ผลการทดสอบ

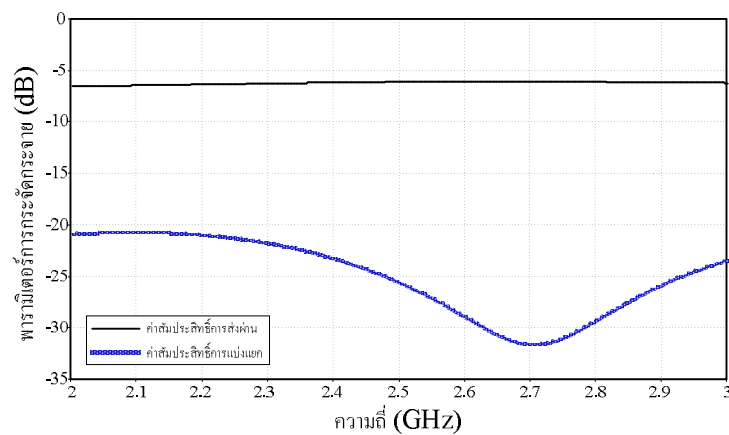
รูปที่ 4.6 รูปถ่ายวงจรเลื่อนเฟสแบบดิจิทัล 4 บิต และผลการทดสอบ

#### วงจรรวม/แยกสัญญาณ

จากการสร้างและทดสอบวงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 ชนิดวิลคินสัน (Wilkinson) [22] ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถูกออกแบบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 มีอัตราการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ประมาณ 6dB ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 17dB และค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกต่ำกว่า 20dB



(ก) วงจรรวม/แยกสัญญาณ

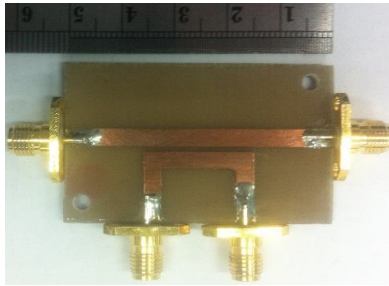


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.7 รูปถ่ายของวงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 ชนิดวิลคินสัน และผลการทดสอบ

วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง

จากการสร้างและทดสอบวงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทางใช้สำหรับคัปปลิงสัญญาณความถี่ เพื่อนำมาวิเคราะห์ความแรงของสัญญาณต่อไปถูกออกแบบด้วยไมโครสตริป [20] มีอัตราการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ประมาณ 3dB และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 18dB แสดงดังรูปที่ 4.8



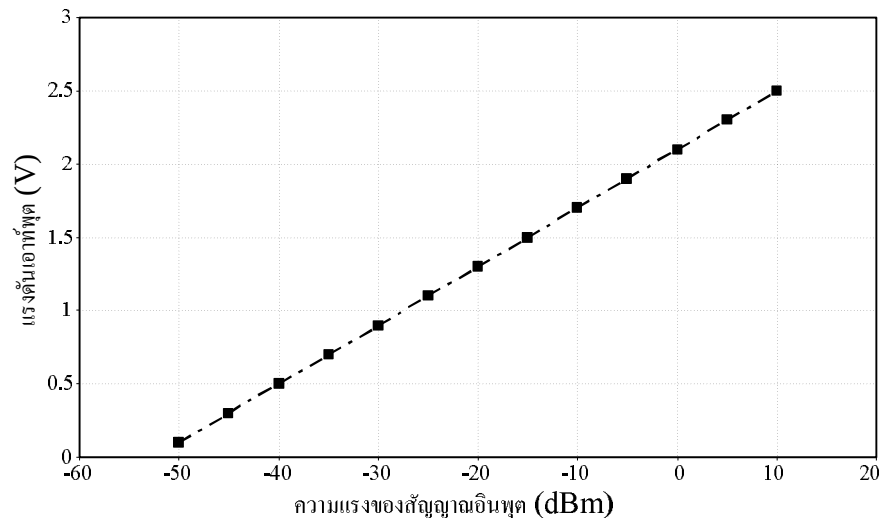
รูปที่ 4.8 รูปถ่ายของวงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง

วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ (RF Detector)

จากการสร้างและทดสอบวงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณด้วยชิพไอซีเบอร์ LTC5505-1 + ใช้งานที่ช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50  $\Omega$  สามารถตรวจจับความแรงต่ำสุดที่ -50 dBm ในกรณีได้ทำการเพิ่มวงจรขยายเข้ากับวงจรด้วย รูปถ่ายของวงจรใช้งานสำหรับส่วนตรวจจับความแรงของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.9 (ก) จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.9 (ข) พบว่าวงจรนี้สามารถตรวจจับความแรงของสัญญาณและให้อาท์พุทมาเป็นระดับแรงดันไปกระแสดงได้



(ก) วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ



(ข) ผลการทดสอบ

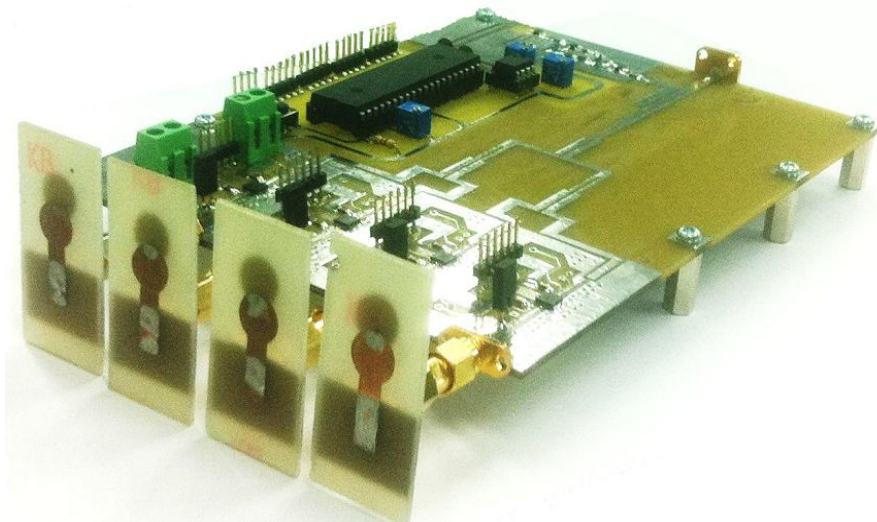
รูปที่ 4.9 รูปถ่ายของวงจรใช้งานสำหรับส่วนตรวจจับความแรงของสัญญาณและผลการทดสอบ

#### ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit : MCU)

จากการสร้างและทดสอบโปรแกรมและการทำงานในส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A เพื่อประมวลผลกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบปรับปรุงแมลงหวี่และปรับค่าเฟสของสัญญาณผ่านตัวเลื่อนเฟสและเป็นผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงในที่สุดพบว่าสามารถใช้งานได้อย่างปกติ

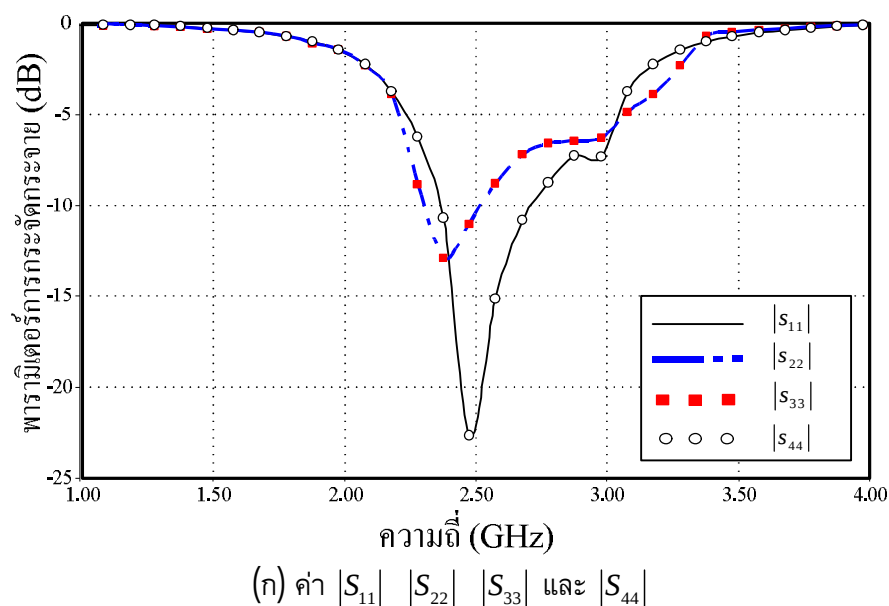
#### 4.4 ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้

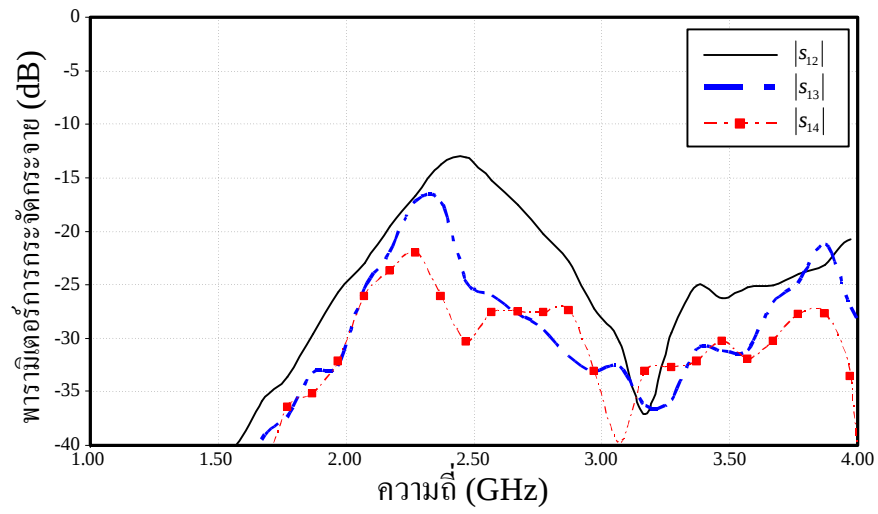
จากการออกแบบและทดสอบในส่วนขององค์ประกอบย่อยและระบบย่อยของระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงได้นำเอาแต่ละส่วนมารวมเป็นระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้และโปรแกรมกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบปรับปรุงแมลงหวี่ลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ของระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ โดยการจัดวางองค์ประกอบย่อยสองแบบคือ จัดวางเป็นแถวลำดับเชิงเส้นจำนวน 4 องค์ประกอบที่มีระยะห่างเท่ากันคือ 10mm และจัดวางเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2 องค์ประกอบที่มีระยะห่างเท่ากันคือ 10mm ซึ่งองค์ประกอบย่อยของระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้นั้นจะใช้สายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับพินเชื่อมสองจุดรูปที่ 4.10 แสดงรูปถ่ายของระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ต้นแบบ



รูปที่ 4.10 รูปถ่ายของระบบของสายอากาศแกลวลำดับปรับตัวได้ต้นแบบ

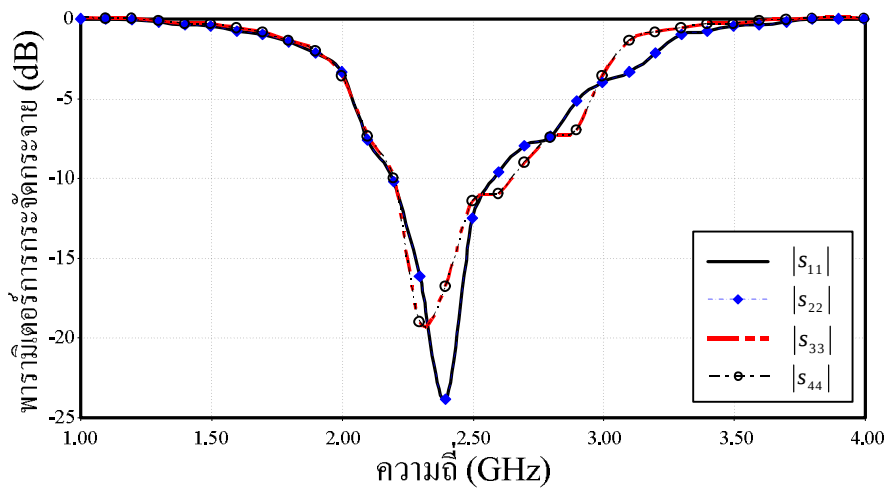
ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบของสายอากาศแกลวลำดับปรับตัวได้จะเริ่มจากการทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (Scattering (S) Parameter) เพื่อดูลักษณะการแผ่รังสีและการคลี่ปลิงระหว่างองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ามีการคลี่ปลิงระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแกลวลำดับทั้งสองแบบแต่มีค่าน้อยกว่า  $-10\text{dB}$  สามารถสังเกตได้จากค่า  $|S_{12}|$   $|S_{13}|$  และ  $|S_{14}|$  จำเป็นผลทำให้เกิดผลกระทบกับการแผ่รังสีของแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแกลวลำดับทั้งสองแบบสังเกตได้จากค่า  $|S_{11}|$   $|S_{22}|$   $|S_{33}|$   $|S_{44}|$  ที่ยังสามารถตอบสนองย่านความถี่  $2.4\text{--}2.5\text{GHz}$  ได้เป็นอย่างดีและมีค่าต่ำกว่า  $-10\text{dB}$



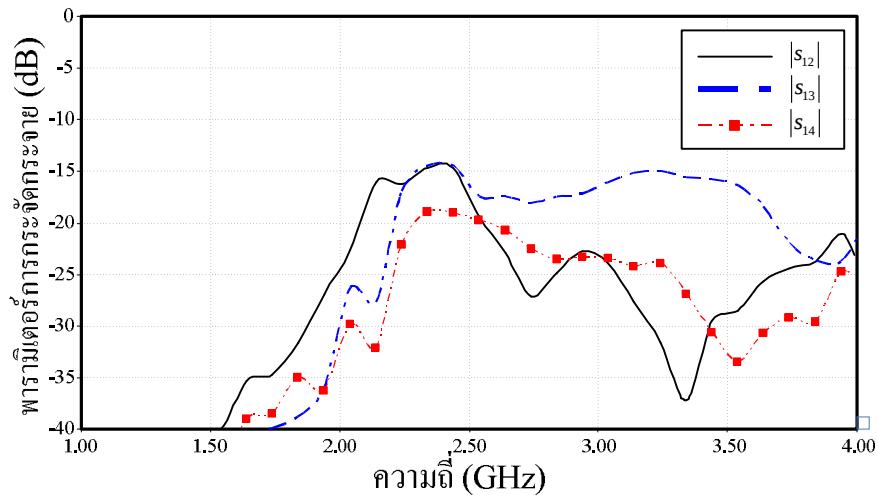


(ข) ค่า  $|S_{12}|$   $|S_{13}|$  และ  $|S_{14}|$

รูปที่ 4.11 พารามิเตอร์การกระจายของสายอากาศแถวลำดับที่จัดวางแบบเชิงเส้นที่มีระยะห่างเท่ากันจำนวน 4 องค์ประกอบ



(ค)  $|S_{11}|$   $|S_{22}|$   $|S_{33}|$  และ  $|S_{44}|$

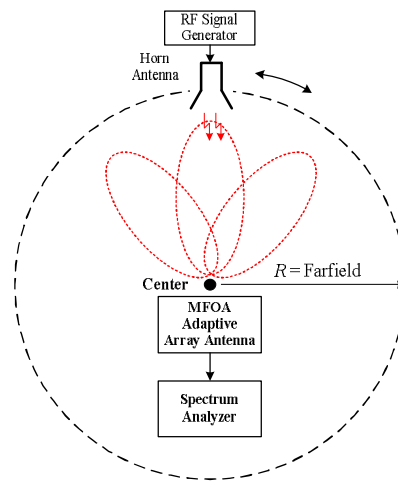


(ข)  $|S_{12}|$   $|S_{13}|$  และ  $|S_{14}|$

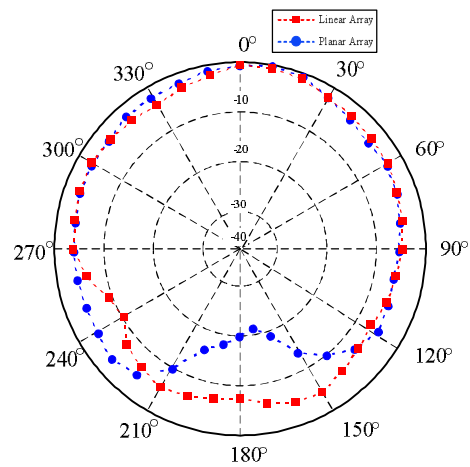
รูปที่ 4.12 พารามิเตอร์การกระจายของสายอากาศแถวลำดับที่จัดวางแบบระนาบที่มีระยะห่างเท่ากันจำนวน  $2 \times 2$  องค์ประกอบ

จากนั้นนำเสนอการทดสอบระบบการทำงานโดยรวมของระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ต้นแบบ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะทดสอบความสามารถในการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าหาทิศทางที่มีคลื่นเดินทางเข้ามาและมีขนาดแรงที่สุด โดยได้กำหนดเงื่อนไขการทดสอบด้วยการวางแหล่งกำเนิดคลื่นไว้ที่จุดใดจุดหนึ่ง แล้วรอให้ระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ทำการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าหาทิศทางที่มีคลื่นเดินทางเข้ามาและมีขนาดแรงที่สุด เมื่อระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ทำงานเสร็จแล้วจึงจะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเพื่อยืนยันว่าระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้สามารถที่จะปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าหาทิศทางที่มีคลื่นเดินทางเข้ามาและมีขนาดแรงที่สุดได้อย่างถูกต้อง โดยตำแหน่งที่ได้วางแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นจะทำการวางอยู่ทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

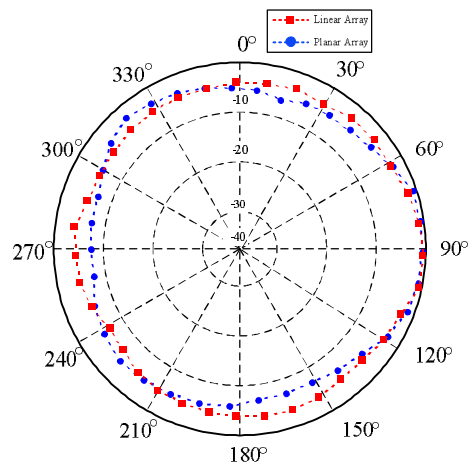
จากผลการทดสอบที่ได้แสดงในรูปที่ 4.14 จะแสดงเฉพาะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $XY$  เท่านั้น และสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ทั้งที่จัดวางแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่มีระยะห่างเท่ากันจำนวน 4 องค์ประกอบและแบบระนาบที่มีระยะห่างเท่ากันจำนวน  $2 \times 2$  องค์ประกอบ นั้นสามารถที่จะปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าหาทิศทางที่มีคลื่นเดินทางเข้ามาและมีขนาดแรงที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



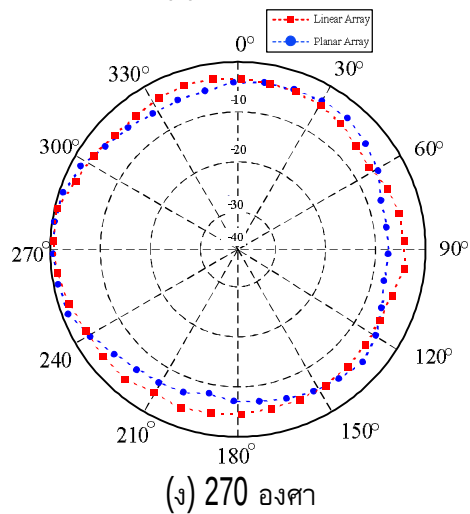
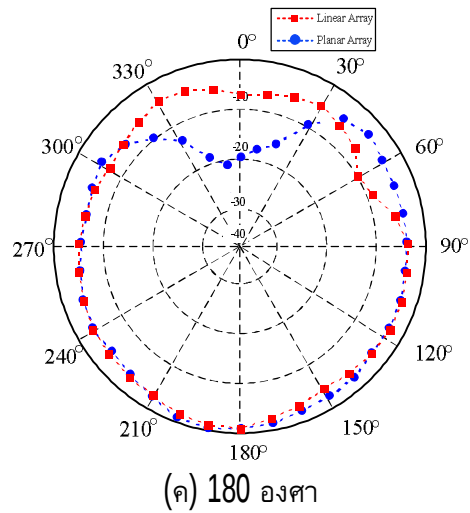
รูปที่ 4.13 รูปแบบการทดสอบระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้



(ก) 0 องศา



(ข) 90 องศา



รูปที่ 4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $XY$  ของระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่จัดวางแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่มีระยะห่างเท่ากันจำนวน 4 องค์ประกอบและแบบระนาบจำนวน  $2 \times 2$  องค์ประกอบ เมื่อมีแหล่งกำเนิดคลื่นที่ตำแหน่ง

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะต่างๆ และแนวทางในการพัฒนาต่อสำหรับโครงการวิจัยนี้ต่อไป

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของโครงการ

โครงการวิจัยนำเสนอการออกแบบสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่มีกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงมาใช้ในการหาค่าเฟสที่เหมาะสมสำหรับแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับเพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน โดยระบบจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับ วงจรกรองความถี่ผ่าน วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณ วงจรรวม/แยกสัญญาณชนิดวิลคินสัน วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ และไมโครคอนโทรลเลอร์

จากนั้นได้ออกแบบและสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ที่จัดวาง 2 แบบคือ แถวลำดับเชิงเส้น 4 องค์ประกอบและแถวลำดับแบบระนาบ 2x2 องค์ประกอบ โดยมีหลักการทำงานคือ สายอากาศแผ่นคู่วงกลมกับพินเชื่อมสองจุดจำนวน 4 องค์ประกอบ วงจรกรองแถบความถี่ผ่านจำนวน 4 วงจร วงจรปรับเฟสของสัญญาณจำนวน 4 วงจร วงจรรวม/แยกสัญญาณ วงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณ และไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งหมดจะทำงานในช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz เมื่อมีสัญญาณเข้ามาจากองค์ประกอบย่อยแถวลำดับ สัญญาณเหล่านั้นจะถูกกรองเอาแต่ช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz และจะถูกปรับเฟสด้วยตัวปรับเฟสซึ่งจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะพิจารณาปรับเฟสด้วยหลักการกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบปรับปรุงแมลงหิวที่มีการพิจารณาค่าความแรงของผลรวมของสัญญาณจากวงจรรวม/แยกสัญญาณแบบ 4 ต่อ 1 และคลี่ปลี่ยนผ่านวงจรเชื่อมต่อแบบมีทิศทางมาให่วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณที่ป้อนกลับเข้าไปยังตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นค่าเป้าหมายและจะทำการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าไปหาทิศทางที่มีคลื่นเข้ามาแรงที่สุด

จากผลการทดสอบโดยการวางแหล่งกำเนิดคลื่นและทดสอบให้ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ทำการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าหาคลื่นที่เดินทางเข้ามาและมีขนาดแรงที่สุดพบว่าสามารถปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบ WLAN ในช่วงความถี่ 2.4-2.5GHz

#### 5.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา

ในโครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการลู่ลงไปได้ด้วยดี แต่อย่างไรก็ตามยังคงพบปัญหาที่เกิดขึ้นบ้างโดยเฉพาะในการจำลองระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้ โดยเป็นการคิดรวมส่วนย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกัน แต่เนื่องมาจากโปรแกรมจำลองนั้นไม่สามารถที่จะจำลองการ

ทำงานทั้งหมดรวมกันได้ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองและออกแบบที่ละส่วนแยกกันแล้วจึงนำมาประกอบกันเป็นระบบในภายหลัง จึงทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดและไม่ตรงกับผลการจำลองในบางส่วน แต่อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถที่จะแก้ได้ด้วยการปรับแต่งชิ้นงานด้วยเครื่องมือทดสอบระหว่างกระบวนการสร้างและทดสอบ

อีกทั้งเนื่องมาจากโครงการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับปรับตัวได้จำนวน 4 องค์ประกอบ จึงทำให้ความสามารถในการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีลักษณะที่แคบและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงนั้นทำได้ยาก จึงสามารถมีแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้ด้วยการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบย่อยของแถวลำดับให้มีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้มีลักษณะที่แคบและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้นได้

ภาคผนวก

## Research Article

# Modified Fruit Fly Optimization Algorithm for Analysis of Large Antenna Array

**Nattaset Mhudsongon,<sup>1</sup> Chuwong Phongcharoenpanich,<sup>1</sup> and Supakit Kawdungta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

<sup>2</sup>*Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiangmai 50300, Thailand*

Correspondence should be addressed to Chuwong Phongcharoenpanich; pchuwong@gmail.com

Received 2 March 2015; Revised 27 May 2015; Accepted 14 June 2015

Academic Editor: Jun Hu

Copyright © 2015 Nattaset Mhudsongon et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This research paper deals with the optimization of a large antenna array for maximum directivity using a modified fruit fly optimization algorithm (MFOA) with random search of two groups of swarm and adaptive fruit fly swarm population size. The MFOA is utilized to determine three nonlinear mathematical test functions, analysis of the optimal number of elements and optimal element spacing of the large antenna array, and analysis of nonuniform amplitude of antenna array. The numerical results demonstrate that the MFOA is effective in solving all test function and electromagnetic problems. The advantages of the proposed algorithm are ease of implementation, large search range, less processing time, and reduced memory requirement.

## 1. Introduction

The nature of an electromagnetic (EM) problem which contains a myriad of local and global optimal solutions contributes to its complexity and difficulty to locate the best solution to the problem. An EM problem refers to a large radiation problem with a vast search space. Prior research on large EM problems focused mostly on the problems of antenna array radiation [1, 2] and of radio wave scattering of ships, aircraft, and rough surfaces. To obtain an optimal global solution to an EM problem requires high performance optimization algorithms, particularly for the EM problems associated with the antenna array radiation and the wave scattering. Currently, the application of optimization algorithms has been extended beyond engineering to other fields, for example, sciences and finance.

Optimization algorithms can be classified into two types: local optimization and global optimization. This paper has focused on the global optimization since this optimization type is often applied to solving EM problems. Examples of global optimization algorithms applied to EM problems are the genetic algorithm (GA), evolution strategy (ES), particle

swarm optimization (PSO), ant colony optimization (ACO), and simulated annealing (SA). In [3], GA was adopted to optimize the radiation patterns of linear and planar antenna arrays and it was found that GA was suitable for the EM problems of both types of antenna arrays. Although GA returned an optimal solution in a very short time period, according to [4], it is difficult to identify the optimal GA initial parameters. To address this issue, [5] proposed an evolutionary program (EP) and evolutionary strategies (ES) in which the optimal parameters of the algorithms were self-adaptive. The hybrid EP and ES were proved to be effective in solving EM problems, but the convergence to the optimum solution required a great amount of time.

In [6, 7], a PSO algorithm was proposed to minimize the side lobe level (SLL) of a phased array antenna. The algorithm was employed to solve a number of EM problems related to radio communications. In [8], a multiobjective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm was used in a symmetric phased linear array to optimize energy consumption. It is found that the MOPSO algorithm is effective in energy saving and minimizing the SLL in the symmetric phased linear array. In [9], a thinned linear array and another planar

antenna array both with minimum SLL were designed using ACO. To successfully minimize SLL, [10] applied SA to an array antenna.

The aforementioned optimization algorithms have been proved to be optimally applicable to their respective designs of antenna array; however, these algorithms are so advanced and complicated that it requires great amount of time and efforts for a beginner to comprehend. A new optimization algorithm, which is called the fruit fly optimization algorithm (FOA), has thus been recently proposed by Pan [11]. FOA is a stochastic searching algorithm based on the principle of natural selection. The algorithm has its use in numerous applications, for example, financial distress detection, web-auction logistics service, neural network, PID controller parameters tuning, key control characteristics optimization, and swarms of miniautonomous surface vehicles [12–18]. However, FOA has never been applied to EM problems because it has no enough search space and is often meeting a local optimum solution for EM problems.

This research has proposed the modified fruit fly optimization algorithm (MFOA) to analyze the radiation pattern of the large antenna array. The MFOA is improved upon by incorporating random search of two groups of swarm and self-adaptive population size feature into the conventional FOA. The modified algorithm is found to be effective in solving three nonlinear test functions and EM problems for the large antenna array. In addition, the advantages of the MFOA are ease of implementation, large search range, less processing time, and reduced memory requirement.

The organization of the rest of this research is as follows: Section 2 discusses the modified fruit fly optimization algorithm with adaptive population size. Section 3 deals with the geometry of the large antenna array and its problem formulation. Section 4 presents the numerical results. The conclusions are provided in Section 5.

## 2. Modified Fruit Fly Optimization Algorithm

The conventional FOA is a technique to search for a global optimization. The algorithm is modeled after the food-seeking behavior of fruit flies [11]. Figure 1 illustrates a food-seeking iterative process of a fruit fly swarm [11].

The FOA can be efficiently used with several problems [11–18], but it has never been used with EM problems. Naturally, EM problems have large search space, complexity, and discontinuous behaviour, which may be affected to the optimization algorithms to meet the local optimum solution. From the FOA procedure, it likes the food-seeking behaviour of fruit flies. When some swarms meet the optimum solution, another swarm will follow that solution. It can make the algorithm converge to the wrong solution or local optimum. Therefore, the FOA is modified to have more search space and global search for complexity and discontinuous function such as EM problems which is referred to as “modified FOA or MFOA.” The conventional FOA procedure is shown below, and the flow diagram is shown in Figure 2(a):

- (1) Initiate the number of iterations ( $K$ ).
- (2) Initiate the population size ( $P$ ).

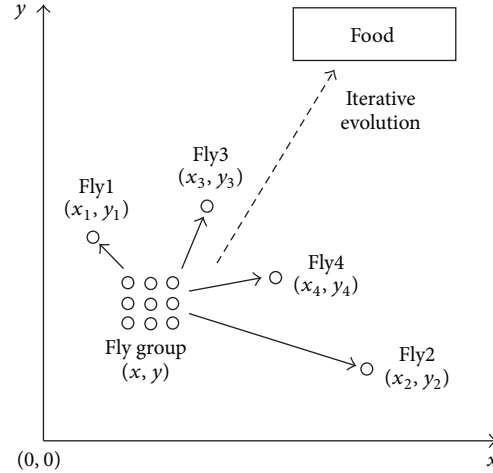


FIGURE 1: A food-seeking iterative process of a fruit fly swarm.

- (3) Randomly generate the initial location of the fruit fly parameters: X-axis and Y-axis.
- (4) Generate the direction and distance for all population ( $P$ ) of the first iteration

for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

$$\begin{aligned} X_i &= x\text{-axis} + \text{random value}, \\ Y_i &= y\text{-axis} + \text{random value}. \end{aligned} \quad (1)$$

Estimate the distance and calculate the smell concentration ( $S_i$ ),

$$\begin{aligned} \text{Dist}_i &= \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)}, \\ S_i &= \frac{1}{\text{Dist}_i}. \end{aligned} \quad (2)$$

Calculate  $\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i)$  and find the best smell.

Set the best smell concentration “bestSmell.”

End.

- (5) Search the procedure from the second to the last iteration.

Randomize the assigned direction and distance for all population size,

for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

$$\begin{aligned} X_i &= X\text{-axis} + \text{random value}, \\ Y_i &= Y\text{-axis} + \text{random value}. \end{aligned} \quad (3)$$

Estimate  $\text{Dist}_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)}$  and  $S_i = 1/\text{Dist}_i$ .

Calculate  $\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i)$  and find the best-Smell.

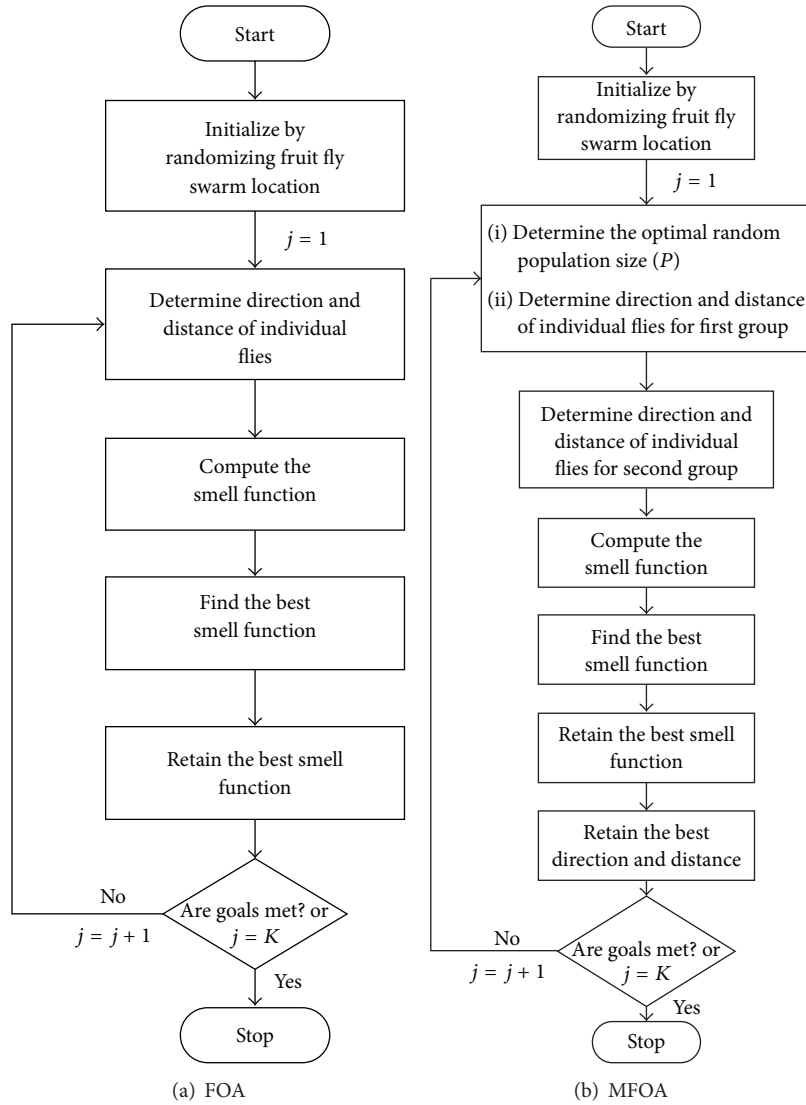


FIGURE 2: Flow diagrams of the (a) conventional FOA and (b) MFOA with adaptive population size.

If the new bestSmell is better than the old one, the bestSmell will be updated.

Set the X-axis and Y-axis into the bestSmell.

End.

- (6) Iterate for number (5) until the optimum solution is met by considering a bestSmell or the last number of iterations is reached.

For the MFOA, it separated the population size into two groups. The first group is assigned to find a new search space with the wide area, and the second group is assigned to find nearby optimum space. This procedure can achieve a wider search space. Moreover, [19] found the limitation of FOA in some applications because it cannot estimate the negative value of searching parameters, in which they put the random value of sign ( $\text{sign}(\epsilon)$ ) on point  $(-1, 1)$  at the smell function ( $S_i = \text{sign}(\epsilon)/\text{Dist}_i$ ). It is also employed in this paper.

Although MFOA can search in the large space, it is dispersed too much and does not converge to the optimum solution. To avoid this problem, the best parameter is collected for use in the next iteration. The MFOA procedure is shown below and the flow diagram is shown in Figure 2(b):

- (1) Initiate the number of iterations ( $K$ ).
- (2) Initiate the population size ( $P$ ).
- (3) Randomly generate initial location of fruit fly parameters: X-axis and Y-axis.
- (4) Generate direction and distance for all population ( $P$ ) for the first iteration  
for  $i = 1$  to  $i = P$ .

For group 1,

$$X_i = \text{random value},$$

$$Y_i = \text{random value}.$$

(4)

TABLE 1: Compared results of the FOA, MFOA, and GA with nonlinear mathematical test functions.

| Mathematical functions   | FOA           |        |        | MFOA          |        |        | GA            |     |     |
|--------------------------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|-----|-----|
|                          | Fitness value | $x$    | $y$    | Fitness value | $x$    | $y$    | Fitness value | $x$ | $y$ |
| Four-peak function       | 2             | 0.0014 | 0.0008 | 2             | 0.0014 | 0.001  | 2             | 0   | 0   |
| Parabolic function       | 12            | 0.0014 | 0.0008 | 12            | 0.0013 | 0.001  | 12            | 0   | 0   |
| Goldstein-Price function | 7.0549        | 0.5206 | 0.6841 | 7.22          | 0.0014 | 0.0009 | 7.22          | 0   | 0   |

For group 2,

$$\begin{aligned} X_i &= X\text{-axis} + \text{random value}, \\ Y_i &= Y\text{-axis} + \text{random value}. \end{aligned} \quad (5)$$

Estimate the distance and calculate the smell concentration ( $S$ ):

$$\begin{aligned} \text{Dist}_i &= \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)}, \\ S_i &= \frac{\text{sign}(\epsilon)}{\text{Dist}_i}. \end{aligned} \quad (6)$$

Calculate  $\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i)$  and find the best smell.

Set the best smell concentration “bestSmell.”

Collect the best  $X_i$  and  $Y_i$ .

End.

(5) Search procedure from the second to the last iteration.

Determine the optimal random population size.  
Randomly assign direction and distance for all population size

for  $i = 1$  to  $i = P$ .

For group 1,

$$\begin{aligned} X_i &= \text{random value}, \\ Y_i &= \text{random value}. \end{aligned} \quad (7)$$

For group 2,

$$\begin{aligned} X_i &= X\text{-axis} + \text{random value}, \\ Y_i &= Y\text{-axis} + \text{random value}. \end{aligned} \quad (8)$$

Use the best direction and distance  $X_i$  and  $Y_i$  from the previous iteration.

Estimate  $\text{Dist}_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)}$  and  $S_i = \text{sign}(\epsilon)/\text{Dist}_i$ .

Calculate  $\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i)$  and find the bestSmell.

If the new bestSmell is better than the old one, the bestSmell will be updated.

Set the  $X$ -axis and  $Y$ -axis into the bestSmell.

Collect the best  $X_i$  and  $Y_i$ .

End.

(6) Iterate for number (5) until the optimum solution is met by considering a bestSmell or the last number of iterations is reached.

To demonstrate the efficiency of MFOA, it is employed with three basic functions and compared with the conventional FOA and GA. They are employed to find the maximum value of three nonlinear mathematical functions, where two variables ( $x$  and  $y$ ) are adjusted by optimization algorithms. Therefore, smell function (for FOA and MFOA) and fitness function (for GA) are the value of considered functions. This section considers three nonlinear mathematical functions [20] with two variables as below.

(1) Four-peak function is

$$\begin{aligned} f(x, y) &= e^{-(x-4)^2 - (y-4)^2} + e^{-(x+4)^2 - (y-4)^2} \\ &+ 2 \left[ e^{-x^2 - y^2} + e^{-x^2 - (y+4)^2} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

(2) Parabolic function is

$$f(x, y) = 12 - \frac{(x^2 + y^2)}{100}. \quad (10)$$

(3) Goldstein-Price function is

$$\begin{aligned} f(x, y) &= 10 \\ &+ \log \left[ \frac{1}{\{1 + (1 + x + y)^2 (19 - 14x + 3x^2 - 14y + 6xy + 3y^2)\}} \right] \\ &\times \left[ \frac{1}{\{1 + (1 + x + y)^2 (19 - 14x + 3x^2 - 14y + 6xy + 3y^2)\}} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

From the numerical results, FOA, MFOA, and GA can find the optimum parameter of three mathematical functions as shown in Table 1, except that FOA cannot find the optimum parameter of Goldstein-Price function. Moreover, the convergence rates of FOA, MFOA, and GA are shown in Figure 3. In Figure 3(a), GA and MFOA are rapidly converged, but

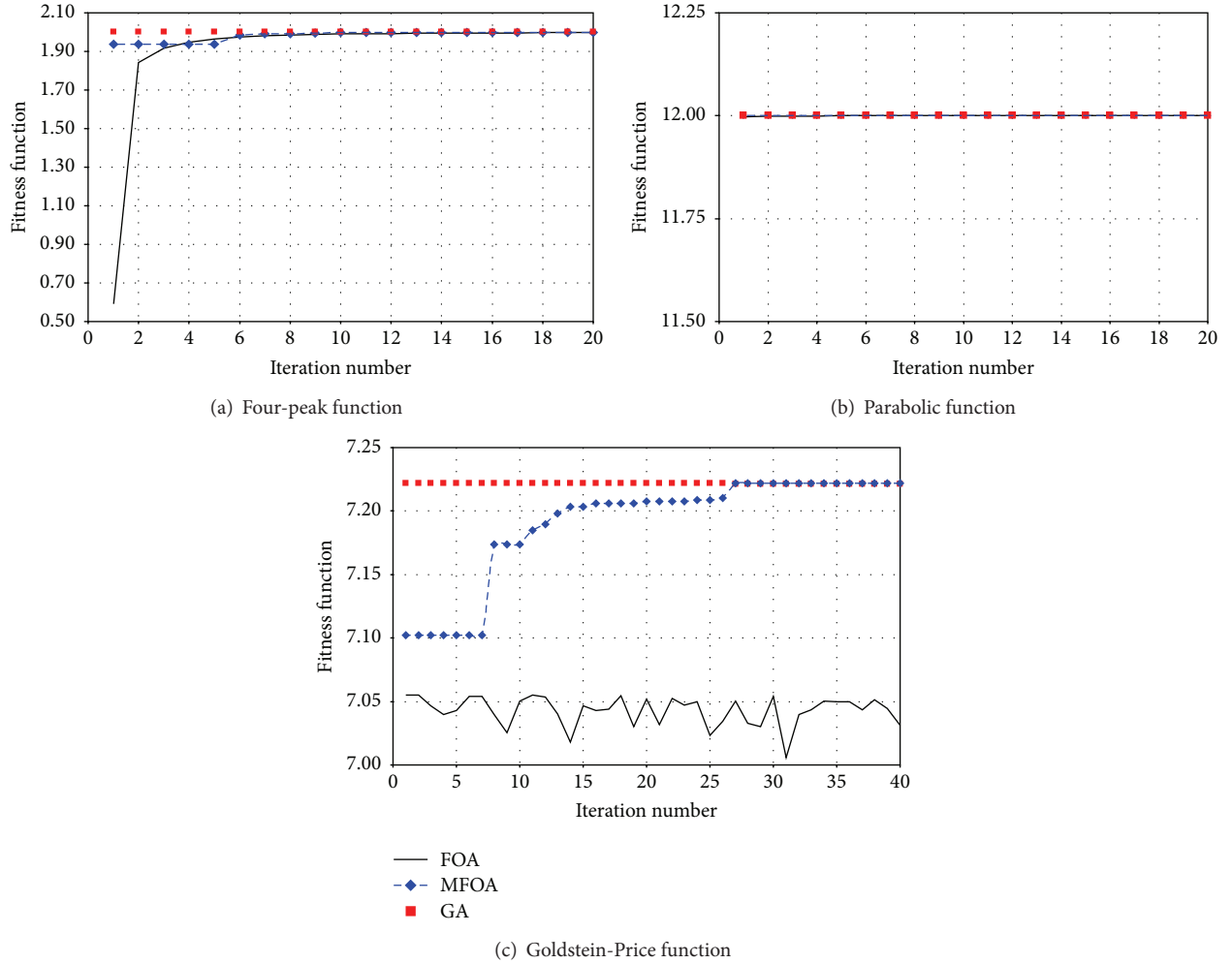


FIGURE 3: Compared convergence rate of the FOA, MFOA, and GA with nonlinear mathematical test functions.

FOA is converged in the fourth iteration. Next, FOA, MFOA, and GA can find the optimum solution of parabolic function within the first iteration as shown in Figure 3(b). However, Goldstein-Price function is solved. It is found that MFOA and GA can find the optimum parameter, but FOA cannot achieve it, as shown in Figure 3(c). It is obvious that the MFOA is more efficient than the FOA. In addition, the MFOA has slower convergence rate than the GA. Moreover, the MFOA is not complexity algorithm and it is easy to implement, while the GA is difficult to specify the optimum GA parameters such as crossover and mutation probability for appropriate problems.

To monitor the behavior of FOA and MFOA, the parameter distribution due to the optimization algorithm is considered as shown in Figures 4, 5, 6, and 7, respectively. It is obvious that the MFOA has more spread than the FOA, where the FOA has faster convergence for four-peak function as shown in Figures 4 and 5. For Goldstein-Price function, the FOA is not converged, while the MFOA is converged with larger distribution. It is found that the MFOA has the larger search space than the FOA and can be converged to

the optimum parameter as well. Next, the adaptive population is presented in the MFOA to save the time consumption. It is still converged with a large search space.

The parameter distribution of the MFOA for four-peak function is shown in Figure 4. In this figure, it is obviously demonstrated that the distributions of the MFOA method for four-peak function between both  $x$  and  $y$  parameters are similar. The random distribution caused by the first population size group is shown in the initial phase to determine the solution in the entire search space. Then, the uniform distribution which is caused by the second population size group appears to converge to the optimum solution. From the parameter distribution above, it can conclude that the solution produced from the distribution procedure of the first population size group will affect the behavior of the distribution procedure of the second population size group to converge to the optimum solution.

The MFOA method can be proposed in the other aspect. The population size has been divided into 2 individual groups. Each group will increase randomizing procedure into system to optimize the best solution. The first population size group

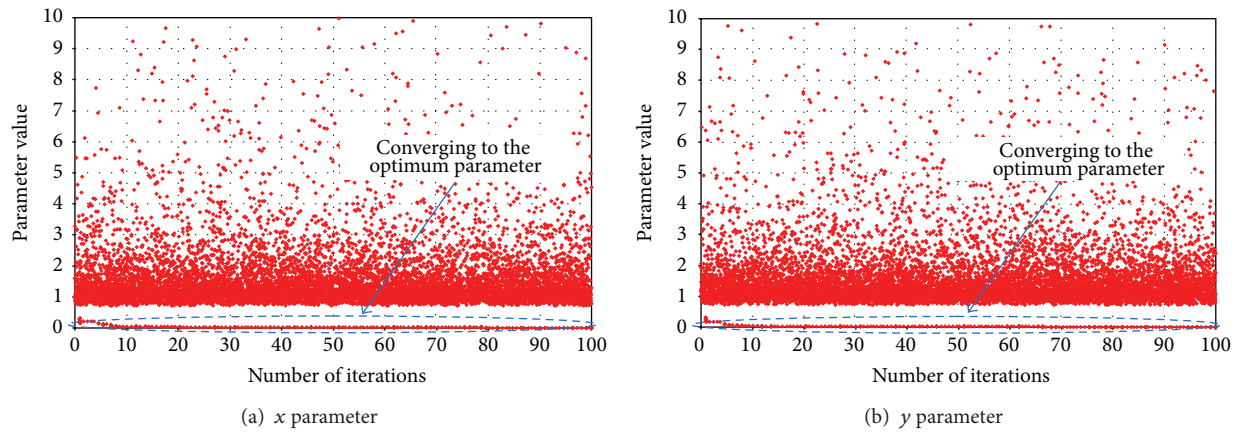


FIGURE 4: Parameter distribution of the MFOA for four-peak function.

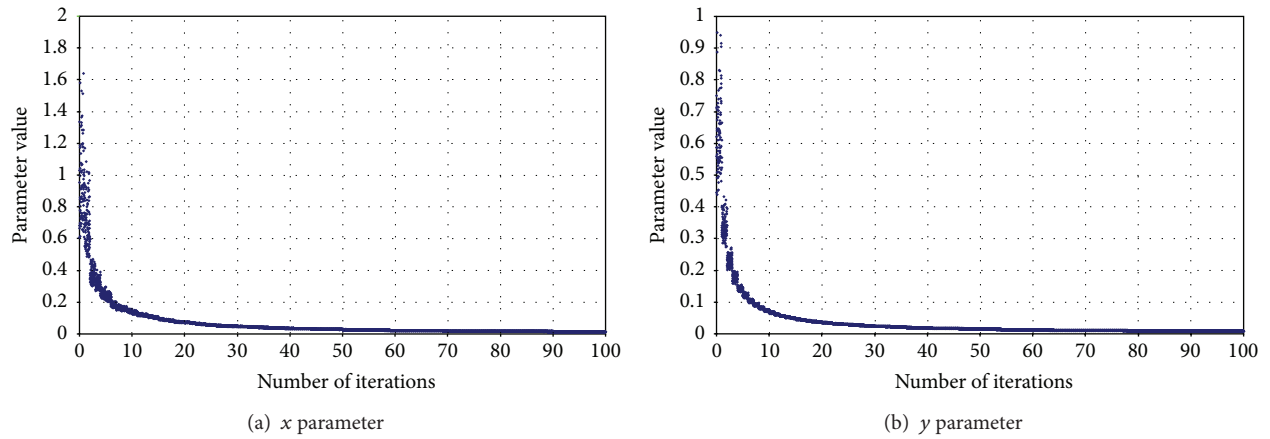


FIGURE 5: Parameter distribution of the FOA for four-peak function.

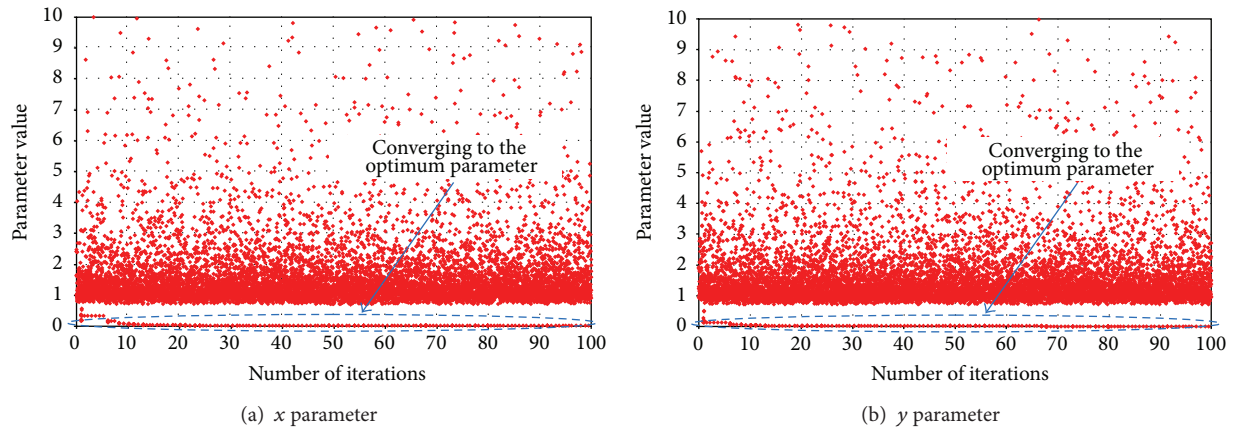


FIGURE 6: Parameter distribution of the MFOA for Goldstein-Price function.

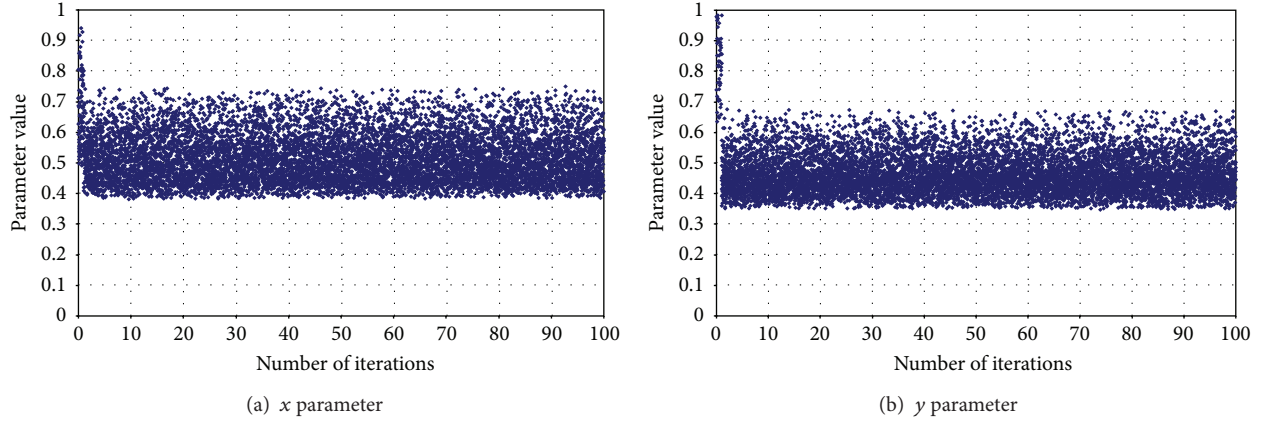


FIGURE 7: Parameter distribution of the FOA for Goldstein-Price function.

runs randomizing procedure upon the large search space. Therefore, the solution produced from system is the region near an optimum point. Then, the solution from the first procedure is used as an initial point for the second population size group to determine the solution in the local search space.

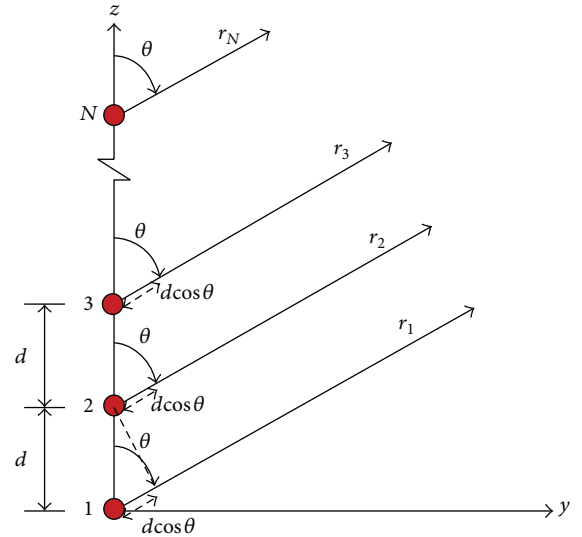
The parameter distribution of the FOA for four-peak function is illustrated in Figure 5. From this figure, both  $x$  and  $y$  parameters' distributions of four-peak function which is analyzed by the FOA method show that the distributions of population size tend to converge to the optimum solution when the number of iterations reaches 10, comparing to the MFOA method whose convergence to the optimum solution appears when the number of iterations is 4. From this point, the MFOA method suggests high efficiency in terms of time consuming and processing of memory space requirement.

The distributions of  $x$  and  $y$  parameters considered from the MFOA method for Goldstein-Price function are plotted as shown in Figures 6(a) and 6(b), respectively. The above parameters present the similar distribution of the MFOA method between Goldstein-Price function and four-peak function. The pattern of the distribution spreads over the large search space and later on yields specific outcome to the fitness function in order to obtain the optimum solution from the complex function. The distribution has been activated by randomizing procedure of two groups of population size to help increasing population diversity.

From Figures 7(a) and 7(b), the distributions analyzed from the FOA method for Goldstein-Price function shown in  $x$  and  $y$  parameters describe distribution which creates non-convergence to the optimum solution due to the lack of diversity which is the key of the function to determine the optimum solution.

### 3. Geometry and Problem Formulation

The performance of a single element antenna is limited because of its broad radiation pattern and low directivity. Nevertheless, several applications, for example, radar and sonar communications, require an antenna with narrow radiation pattern and high directivity. To overcome the limitations of single element antennas, in other words, to obtain

FIGURE 8: The geometry of  $N$ -element array with isotropic sources along the  $z$ -axis.

a narrow beam and high gain, more single elements must be added to the antenna design to produce an array antenna.

A linear array antenna is an antenna in which individual elements of the array are arranged in a straight line and spaced equally apart. Let us assume a linear array of  $N$  isotropic elements. The elements are aligned along the  $z$ -axis and are equidistant. The geometry of the  $N$ -element array is shown in Figure 8 and an array factor (AF) can be written as [21]

$$\begin{aligned} \text{AF} = & I_0 + I_1 e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + I_2 e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots \\ & + I_N e^{j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)}. \end{aligned} \quad (12)$$

If we further assume that the excitation of amplitude ( $I_n$ ) and phase ( $\beta$ ) is 1 and 0, respectively, for all elements, the array factor (AF) can be expressed as

$$\text{AF} = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta)}, \quad (13)$$

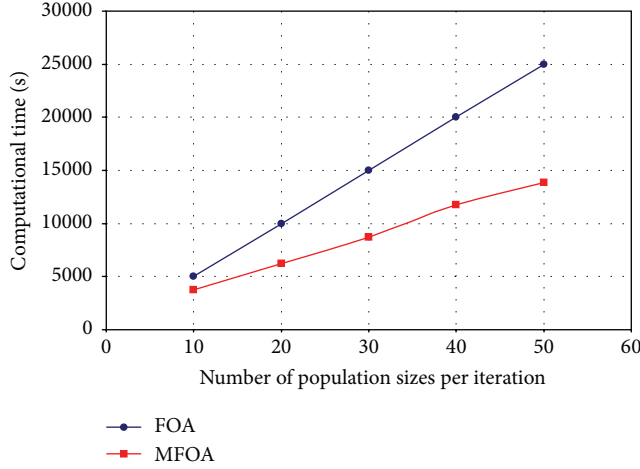


FIGURE 9: The computational time versus the population size for the conventional FOA and MFOA with adaptive population size.

where  $N$  is the number of elements;  $I_n$  is the amplitude current excitation coefficient;  $\beta$  is the phase current excitation coefficient;  $d$  is the spacing between elements;  $k$  is the wave number;  $\theta$  is the angle between the field direction and the  $z$ -axis.

In this research paper, the focus is on the application of the MFOA with adaptive population size to optimize the number of elements and element spacing of the broadside linear array antenna (i.e.,  $\theta_{\max} = 90^\circ$  and  $\beta = 0$ ) to achieve maximum directivity. Thus, a fitness function (or smell function) can be expressed as

$$\text{Directivity } (D_o) = \frac{2 |AF(\theta_{\max} = 90^\circ)|^2}{\int_0^\pi |AF(\theta)|^2 \sin \theta d\theta}. \quad (14)$$

#### 4. Numerical Results

The numerical results of the conventional FOA and MFOA with adaptive population size are determined for comparison purpose and for verification of the accuracy and efficiency of the MFOA. The large antenna array under consideration is uniform linear array with a broadside radiation pattern,  $\theta_{\max} = 90^\circ$ , and  $\beta = 0$ . The MFOA is employed to optimize the large antenna array to obtain the optimal number of elements and element spacing that yield the maximum directivity.

In this research, the population size of the conventional FOA is varied from 10, 20, 30, and 40 to 50, while that of the MFOA with adaptive population size is varied in the ranges of 5–10, 5–20, 5–30, 5–40, and 5–50. The numerical results of the conventional FOA and MFOA show the identical optimum global solution for the large broadside array antenna. In Figure 9, the computational time increases with increase in population size in both FOAs. Nevertheless, the MFOA with adaptive population size requires significantly less computational time than the conventional FOA.

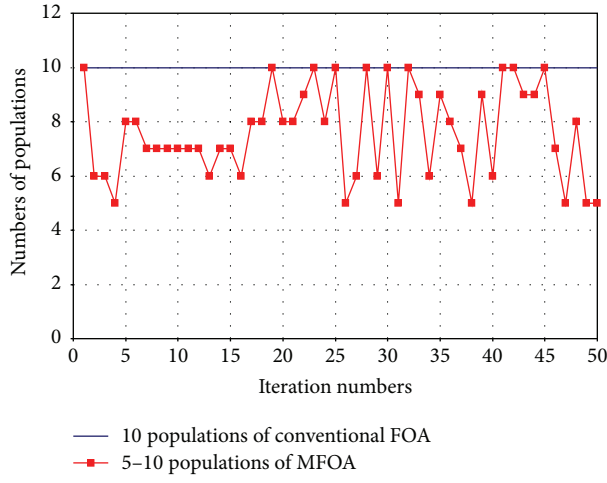
Figures 10(a)–10(e) illustrate the population size relative to the number of iterations of the conventional FOA and the MFOA with adaptive population size with a maximum iteration of 50. The population size of the MFOA is self-adaptive in a range of 5–10 for the population size of 10; 5–20 for 20; 5–30 for 30; 5–40 for 40; and 5–50 for 50. The self-adaptation of the MFOA helps avoid premature convergence due to diverse population sizes and reduces the processing time in comparison with the conventional FOA. Figure 11 illustrates the convergence rates of the GA, MFOA, and conventional FOA for uniform linear array with a broadside radiation pattern. The same figure shows that the MFOA with adaptive population size can perform well in searching for the best global solution, that is, the maximum directivity, while FOA met the local solution. In addition, the MFOA and GA converge to the same solution with stable convergence rate. Although the solution is identical, the proposed FOA takes up less memory and time with increase in population size in comparison with the conventional FOA.

Figure 12 shows the optimum radiation pattern of the large broadside antenna array, in which the optimal number of elements is 81 and the optimal distance between elements is  $0.8\lambda$ . Under the aforesaid optimal condition, the directivity is 21 dBi with low side lobe level.

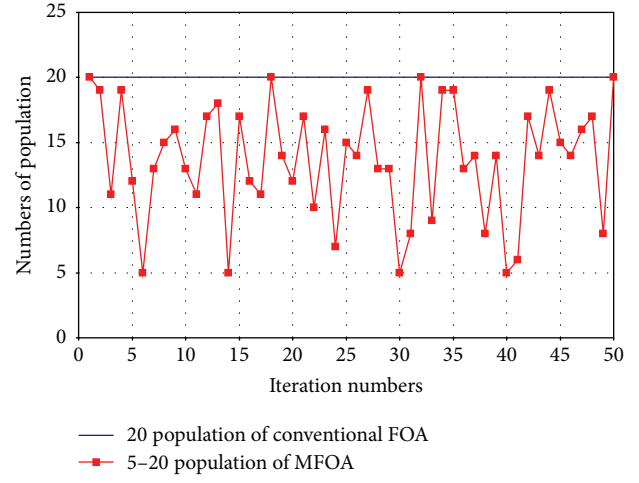
To get insight into the design procedure, a demonstration of 9 elements with nonuniform amplitude of broadside linear array is considered by the proposed optimization compared with the GA and conventional FOA. A fitness function (or smell function) is defined as a maximum directivity. The spacing between elements is equal to  $0.5\lambda$ . For numerical results, the GA and MFOA found that the optimum amplitudes with 9 elements are equal to 0.39, 0.85, 0.79, 0.89, 1.00, 0.89, 0.79, 0.85, and 0.39, respectively. The obtained maximum directivity is 9.23 dBi. Figure 13 depicts the convergence rates of the GA, MFOA, and conventional FOA. The conventional FOA converges to other fitness values, but the GA and MFOA converge to the best directivity within 4 and 5 iterations, respectively. The optimal radiation pattern of the nonuniform amplitude of broadside linear array with 9 elements is shown in Figure 14.

#### 5. Conclusion

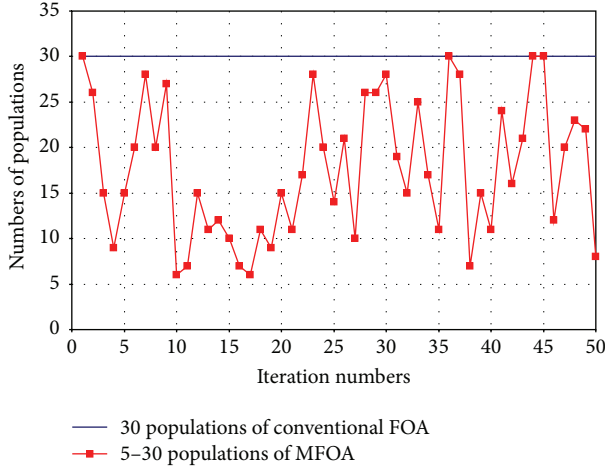
The modified fruit fly optimization algorithm (MFOA) with adaptive population size can be effectively applied to optimize the electrically large antenna array. The aim of the application of the modified algorithm to the large antenna array is to determine the optimal number of elements and element spacing that yield the maximum directivity at  $\theta_{\max} = 90^\circ$ . The numerical results show that the MFOA and GA converge to the same solution with stable convergence rate but FOA is not converging. For the uniform spacing and nonuniform amplitude of linear array with 9 elements, the MFOA is employed to determine the amplitude of all elements. It is obvious that the optimum amplitude can be found at 9 elements within 5 iterations. The MFOA has slow convergence rate compared with the GA. The advantages of the proposed algorithm are easy implementation, stable convergence rate,



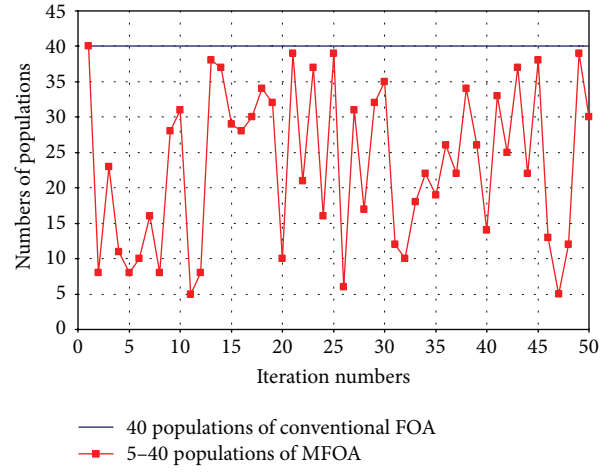
(a) The population sizes for the conventional and modified FOA are, respectively, 10 and 5-10



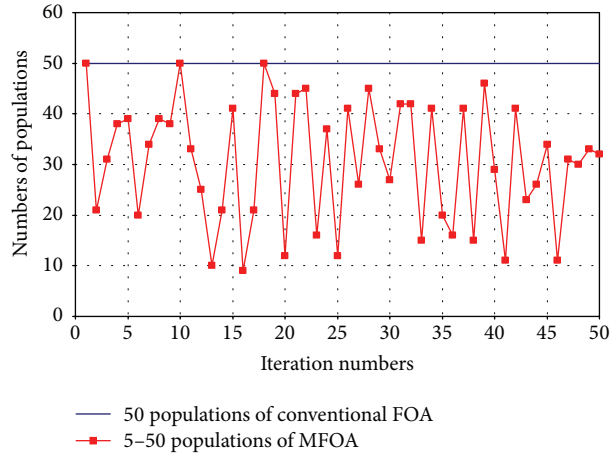
(b) The population sizes for the conventional and modified FOA are, respectively, 20 and 5-20



(c) The population sizes for the conventional and modified FOA are, respectively, 30 and 5-30



(d) The population sizes for the conventional and modified FOA are, respectively, 40 and 5-40



(e) The population sizes for the conventional and modified FOA are, respectively, 50 and 5-50

FIGURE 10: The population size relative to iteration of the conventional FOA and MFOA for a maximum iteration of 50: (a) population sizes are 10 and 5-10 for the conventional and modified FOA, (b) 20 and 5-20, (c) 30 and 5-30, (d) 40 and 5-40, and (e) 50 and 5-50.

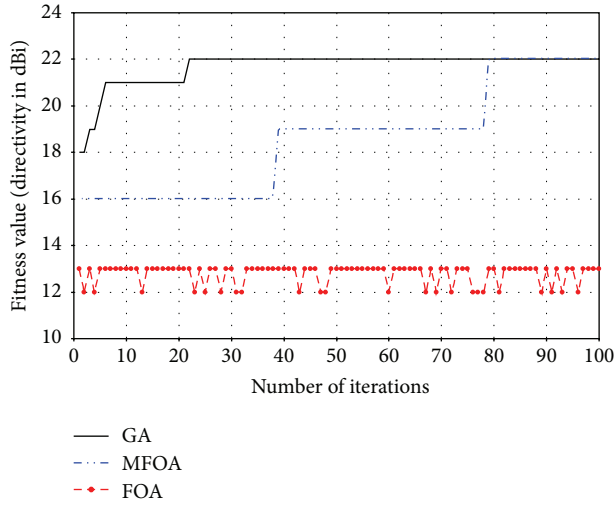


FIGURE 11: The convergence rates of the GA, MFOA with adaptive population size, and conventional FOA for uniform linear array with a broadside radiation pattern.

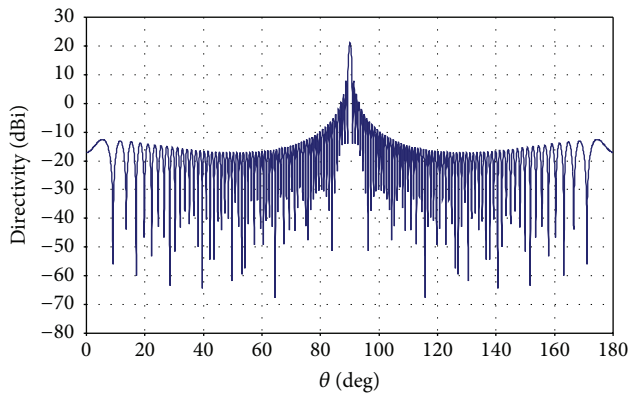


FIGURE 12: The optimal radiation pattern of the large broadside antenna array from the MFOA with adaptive population size.

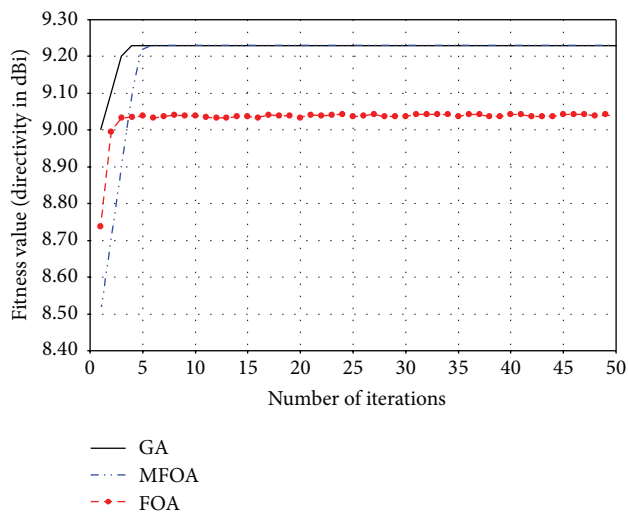


FIGURE 13: The convergence rates of the GA, MFOA with adaptive population size, and conventional FOA for nonuniform amplitude of broadside linear array with 9 elements.

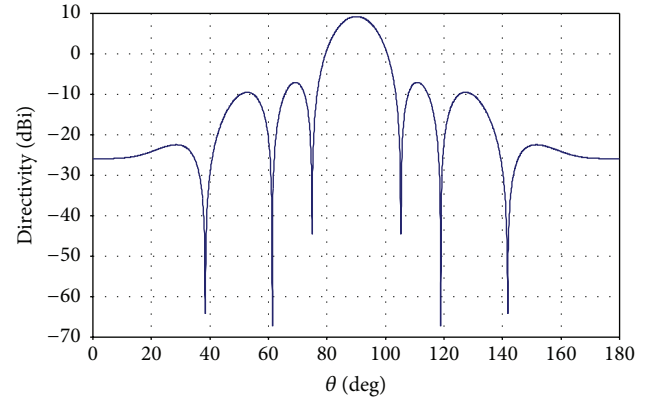


FIGURE 14: The optimal radiation pattern of nonuniform amplitude of broadside linear array with 9 elements from the MFOA with adaptive population size.

large search range, less processing time, and reduced memory requirement, while the GA is difficult to set up the initial optimization parameters.

## Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

## Acknowledgments

The part of the research undertaken by Nattaset Mhudsongon was funded by the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program under Grant no. PHD/0331/2551 and that under the care of Supakit Kawdungta was sponsored by the Thailand Research Fund (TRF) and Rajamangala University of Technology Lanna under Grant no. TRG5780080. The authors would like to extend deep gratitude to the aforementioned organizations for the financial support, without which this research would not have materialized.

## References

- [1] S. Kawdungta, C. Phongcharoenpanich, and D. Torrungrueng, "A novel analysis of planar dipole antenna arrays in free space with the multiple-sweep method of moments," *Electromagnetics*, vol. 31, no. 4, pp. 258–272, 2011.
- [2] S. Kawdungta, C. Phongcharoenpanich, and D. Torrungrueng, "An analysis of electrically large planar dipole antenna arrays with an efficient hybrid MSMM/CG method," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 189–202, 2011.
- [3] F. J. Ares-Pena, J. A. Rodriguez-Gonzalez, E. Villanueva-Lopez, and S. R. Rengarajan, "Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 3, pp. 506–510, 1999.
- [4] J. J. Grefenstette, "Optimization of control parameters for genetic algorithms," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 16, no. 1, pp. 122–128, 1986.

- [5] A. Hoorfar, "Evolutionary programming in electromagnetic optimization: a review," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 523–537, 2007.
- [6] W. T. Li, X. W. Shi, and Y. Q. Hei, "An improved particle swarm optimization algorithm for pattern synthesis of phased arrays," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 82, pp. 319–332, 2008.
- [7] D. I. Abu-Al-Nadi, T. H. Ismail, H. Al-Tous, and M. J. Mismar, "Design of linear phased array for interference suppression using array polynomial method and particle swarm optimization," *Wireless Personal Communications*, vol. 63, no. 2, pp. 501–513, 2012.
- [8] K. A. Papadopoulos, C. A. Papagianni, P. K. Gkonis, I. S. Venieris, and D. I. Kaklamani, "Particle swarm optimization of antenna arrays with efficiency constraints," *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 17, pp. 237–251, 2011.
- [9] Ó. Quevedo-Teruel and E. Rajo-Iglesias, "Ant colony optimization in thinned array synthesis with minimum side lobe level," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 349–352, 2006.
- [10] V. Murino, A. Trucco, and C. S. Regazzoni, "Synthesis of unequally spaced arrays by simulated annealing," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 1, pp. 119–123, 1996.
- [11] W.-T. Pan, "A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example," *Knowledge-Based Systems*, vol. 26, pp. 69–74, 2012.
- [12] H. Dai, G. Zhao, J. Lu, and S. Dai, "Comment and improvement on 'a new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example,'" *Knowledge-Based Systems*, vol. 59, pp. 159–160, 2014.
- [13] S.-M. Lin, "Analysis of service satisfaction in web auction logistics service using a combination of fruit fly optimization algorithm and general regression neural network," *Neural Computing and Applications*, vol. 22, no. 3-4, pp. 783–791, 2013.
- [14] H.-Z. Li, S. Guo, C.-J. Li, and J.-Q. Sun, "A hybrid annual power load forecasting model based on generalized regression neural network with fruit fly optimization algorithm," *Knowledge-Based Systems*, vol. 37, pp. 378–387, 2013.
- [15] W. Sheng and Y. Bao, "Fruit fly optimization algorithm based fractional order fuzzy-PID controller for electronic throttle," *Nonlinear Dynamics*, vol. 73, no. 1-2, pp. 611–619, 2013.
- [16] Y. F. Xing, "Design and optimization of key control characteristics based on improved fruit fly optimization algorithm," *Kybernetes*, vol. 42, no. 3, pp. 466–481, 2013.
- [17] Z. Z. Abidin, M. R. Arshad, and U. K. Ngah, "A simulation based fly optimization algorithm for swarms of mini autonomous surface vehicles application," *Indian Journal of Marine Sciences*, vol. 40, no. 2, pp. 250–266, 2011.
- [18] L. Wang, X.-L. Zheng, and S.-Y. Wang, "A novel binary fruit fly optimization algorithm for solving the multidimensional knapsack problem," *Knowledge-Based Systems*, vol. 48, pp. 17–23, 2013.
- [19] F. Xu and Y. Tao, "The improvement of fruit fly optimization algorithm," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Information Application (ICCIA '12)*, pp. 1516–1520, Taiyuan, China, 2012.
- [20] S. K. Pal, C. S. Rai, and A. P. Singh, "Comparative study of firefly algorithm and particle swarm optimization for noisy nonlinear optimization problems," *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, vol. 4, no. 10, pp. 50–57, 2012.
- [21] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley and Son, New York, NY, USA, 2nd edition, 1997.

# International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering - Manuscript ID MMCE-2016-0121 [email ref: SE-6-a]

inderj@cox.net

Mon 5/2/2016 12:26 AM

To: kpchuwong@gmail.com <kpchuwong@gmail.com>;

Cc: supakitting@hotmail.com <supakitting@hotmail.com>; kpchuwong@gmail.com <kpchuwong@gmail.com>;

01-May-2016

Dear Dr. Phongcharoenpanich:

Your manuscript entitled "MFOA-integrated Double Circular Patch-based Adaptive Array Antenna for 2.4 GHz Band Applications" by Kawdungta, Supakit; Phongcharoenpanich, Chuwong, has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering.

Co-authors: Please contact the Editor-in-Chiefial Office as soon as possible if you disagree with being listed as a co-author for this manuscript.

Your manuscript ID is MMCE-2016-0121.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to ScholarOne Manuscripts at <https://mc.manuscriptcentral.com/mmce> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc.manuscriptcentral.com/mmce>.

Thank you for submitting your manuscript to International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering.

Sincerely,

International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering Editorial Office

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. T. Okamoto, and W. J. Nicholsom WJ, Smart antenna systems and wireless LANS, New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] A. E. Zooghby, Smart antenna engineering, Artech House, 2005.
- [3] 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 (2001), vol. 50, no. 2, 605-616.
- [4] T. S. Ghouse Basha, G. Aloysius, B. R. Rajakumar, M. N. Giri Prasad, and P. V. Sridevi, A constructive smart antenna beam-forming technique with spatial diversity, IET Microwaves Antenna&Propagation (2012), vol. 6, no. 7, 773-780.
- [5] H.T. Liu, S. Gao, and T.-H. Loh, Electrically small and low cost smart antenna for wireless communication, IEEE Transactions on Antennas and Propagation (2012), vol. 60, no. 3, 1540-1549.
- [6] X. Huang, Y. J. Guo, and J. D. Bunton, A hybrid adaptive antenna array, IEEE Transactions on Wireless Communications (2010), vol. 9, no. 5, 1770-1779.
- [7] N. Celik, and M. F. Iskander, Genetic-algorithm-based antenna array design for a 60-GHz hybrid smart antenna system, IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters (2008), vol. 7, 795-798.
- [8] K. Ogawa, A. Yamamoto, and J.-I. Takada, Multipath performance of handset adaptive array antennas in the vicinity of a human operator, IEEE Transactions on Antennas and Propagation (2005), vol. 53, no. 8, 2422-2436.
- [9] F. Xu, and Y. Tao, The improvement of fruit fly optimization algorithm using bivariable function as example, International Conference on Computer and Information Application (ICCIA 2012), 1516-1520.
- [10] J. Han, P. Wang, and X. Yang, Tuning of PID controller based on fruit fly optimization algorithm. International Conference on Mechatronics and Automation (2012), 409-413.
- [11] N. Mhudsongon, C. Phongcharoenpanich, and S. Kawdungta, Modified fruit fly optimization algorithm for analysis of large antenna array, International Journal of Antennas and Propagation (2015), 1-11.
- [12] T. S. Sijher, and A. A. Kishk, Antenna modeling by infinitesimal dipoles using genetic algorithms, Progress In Electromagnetic Research (2005), PIER 52, 225-254.

- [13] T. S. Ng, and M. A. Magdy, Fast algorithm for optimal weight computation in linear array pattern synthesis having null constraints, IEE Proceedings H Microwaves, Optics and Antennas (1984), vol. 131, no. 6, 395-396.
- [14] S. A. Mitilineos, K. S. Mougiakos, and C. A. Thomopoulos Stelios, Design and optimization of ESPAR antennas via impedance measurements and a genetic algorithm, IEEE Antennas and Propagation Magazine (2009), vol. 51, no. 2, 118-123.
- [15] W.-H. Fang, S.-C. Huang, and Y.-T. Chen, Genetic algorithm-assisted joint quantised precoding and transmit antenna selection in multi-user multi-input multi-output systems, IET Communications (2011), vol. 5, no. 9, 1220-1229.
- [16] E. S. Moghaddam, Design of a printed quadrifilar-helical antenna on a dielectric cylinder by means of a genetic algorithm. IEEE Antennas and Propagation Magazine (2011), vol. 53, no. 4, 262-268.
- [17] D.-H. Shin, K.-B. Kim, J.-G. Kim, and S.-O. Park, Design of null-filling antenna for automotive radar using the genetic algorithm, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters (2014), vol. 13, 738-741.
- [18] Y. Yang, S. Yan, J. Liu, and J. Liang, Genetic-ant colony optimization algorithm and its application to design of antenna, International Conference on Natural Computation (ICNC) (2014), 611-616.
- [19] P. I. Lazaridis, E. N. Tziris, Z. D. Zaharis, et al., Comparison of evolutionary algorithms for LPDA antenna optimization, URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC) (2015), 1.
- [20] C. A. Balanis, Antenna theory analysis and design, John Wiley&Sons (2005).
- [21] CST Microwave Studio. User's Manual; 2013.
- [22] D. M. Pozar, Microwave engineering, John Wiley&Sons (2005).
- [23] Nonlinear Program (NLP) in Problem Definition, Available from: <http://www.i2c2.aut.ac.nz/Wiki/OPT1/index.php/Probs/NLP> [Accessed 24th June 2016].
- [24] S. K. Pal, C. S. Rai, and A. P. Singh, Comparative study of firefly algorithm and particle swarm optimization for noisy non-linear optimization problems, I.J. Intelligent Systems and Applications, Vol. 10, pp. 50-57, 2012.

## Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ
  - **Supakit Kawdungta**, Chuwong Phongcharoenpanich, " MFOA-integrated Double Circular Patch-based Adaptive Array Antenna for 2.4 GHz Band Applications ", (อยู่ระหว่างรอผลการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ) อยู่ในฐานข้อมูล ISI Journal Citation มี Impact Factor: 0.524
  - Nattaset Mhudtongon, Chuwong Phongcharoenpanich, and **Supakit Kawdungta**, " Modified Fruit Fly Optimization Algorithm for Analysis of Large Antenna Array ", International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2015, Article ID 124675, 11 pages, 2015. สำนักพิมพ์ Hindawi Publishing Corporation, DOI : <http://dx.doi.org/10.1155/2015/124675> (ได้รับการตีพิมพ์แล้ว) อยู่ในฐานข้อมูล ISI Journal Citation มี Impact Factor: 0.750
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
  - เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป)
  - เชิงนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายอิงงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับหรือวิธีทำงาน)
  - เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)  
จากการที่ได้รับทุนวิจัยนี้ทำให้เกิดประโยชน์ในเชิงสาธารณะโดยทำให้ผู้วิจัยมีความสัมพันธ์ที่เกิดจากความร่วมมือในการร่วมทำวิจัยกับทีมงานของอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและตัวอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการด้วยเป็นอย่างดี
  - เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)  
จากการที่ได้รับทุนวิจัยนี้ทำให้เกิดประโยชน์ในเชิงวิชาการ โดยทำให้มีองค์ความรู้เฉพาะทางในด้านสายอากาศปรับลำตัวได้และมีชิ้นงานจริงเพื่อใช้สำหรับการเรียนการสอนในรายวิชา วิศวกรรมสายอากาศ ของนักศึกษาในภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)