

# สายอากาศปรับลำคลื่นแนวตั้งสำหรับการประยุกต์ใช้งาน อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

## Vertical Beam Adjustable Antenna for Internet of Things Applications

เอกภาพ อ้ายน้อย<sup>1</sup> ณรงค์ นันทกุล<sup>1</sup> รัฐพล จินะวงศ์<sup>1</sup> ชูวงศ์ พงษ์เจริญพาณิชย์<sup>2</sup> และ สุภกิต แก้วดวงตา<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Ekkapap Aynoi, Narong Nanthakusol, Ratapon Jeenawong<sup>1</sup>, Chuwong Phongcharoenpanich<sup>2</sup> and Supakit Kawdungta<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

<sup>2</sup>Department of Telecommunications Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

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

Received: April 19, 2021 Revised: May 13, 2021 Accepted: May 17, 2021

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศปรับลำคลื่นสำหรับระบบลอว์แวนในช่วงความถี่ 920-925 MHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอสามารถปรับลำคลื่นได้ 4 ทิศทางในระนาบแนวตั้ง โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างโมโนโพลแบบเส้นลวดวางอยู่บนระนาบกราวด์ร่วมกับแผ่นพาราซิติกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 แผ่นวางล้อมรอบและพินไดโอดจำนวน 4 ตัว ถูกนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางการปรับลำคลื่นด้วยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพาราซิติกกับระนาบกราวด์ จากผลการออกแบบและทดสอบพบว่าสายอากาศปรับลำคลื่นมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง  $50 \Omega$  และมีค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 920-925 MHz มีอัตราการขยายเท่ากับ 2.85 dBi และสามารถปรับลำคลื่นได้ 4 ทิศทางในระนาบแนวตั้ง

คำสำคัญ: พินไดโอด แผ่นพาราซิติก สายอากาศปรับลำคลื่น ลอว์แวน

### Abstract

This article presents an adjustable beam antenna for Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) in the frequency of 920-925 MHz. The proposed antenna can be adjusted in four directions of the vertical plane. The antenna structure consists of a wire monopole structure placed on the ground plane with surrounding four parasitic patches and four PIN diodes used to adjust the beam of the antenna. From simulated and measured results, it is found that the proposed antenna has an input impedance of  $50 \Omega$ ,  $|S_{11}|$  less than -10 dB in the frequency of 920-925 MHz and antenna gain equal to 2.48 dBi. It can be efficiently adjusted the main beam of the antenna in four directions on the vertical plane.

**Keywords:** Adjustable Beam Antenna, Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), PIN diode and Parasitic Patch

## 1. บทนำ

จากวิวัฒนาการของการสื่อสารแบบไร้สายที่มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นจนถึงปัจจุบันนี้เทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกมุ่งเน้นและมีแนวโน้มว่าจะมีความต้องการในการใช้งานมากยิ่งขึ้นก็คือ เทคโนโลยีการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet Of Things : IoT) ซึ่งเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งนี้มีการใช้งานหลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแบบช่วงความถี่แคบ (Narrowband Internet Of Things : NB-IoT) ลอราแวน (Long Range Wide Area Network : LoRaWAN) เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) หรือ ไวไฟ (Wireless Fidelity : Wi-Fi) และ บลูทูธ (Bluetooth) เป็นต้น โดยเทคโนโลยีแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปคือ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแบบช่วงความถี่แคบและลอราแวนจะเป็นลักษณะของการสื่อสารแบบไร้สายที่สามารถครอบคลุมได้บริเวณกว้างไกลโดยใช้พลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Network : LPWAN) ระยะทางการติดต่อสื่อสารประมาณ 1 km ถึง 15 km จากสถานีฐานแต่อัตราการส่งผ่านข้อมูลจะไม่สูงมากนัก ในส่วนของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายและบลูทูธจะเป็นการสื่อสารแบบไร้สายแบบเฉพาะพื้นที่ที่จำกัดหรือในพื้นที่ส่วนบุคคลมีระยะทางการติดต่อสื่อสาร 5 m ถึง 100 m จากตัวกระจายสัญญาณแต่จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงจากการพัฒนาของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่จะเป็นส่วนผลักดันให้เกิดการพัฒนาในด้านต่างๆ เช่น บ้านอัจฉริยะ (Smart Home) เมืองอัจฉริยะ (Smart City) เกษตรอัจฉริยะ (Smart Agriculture) และ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) เป็นต้น [1]

จากการพัฒนาในด้านต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่สามารถรองรับระบบอัจฉริยะต่างๆ ได้ต้องมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารในระยะไกลและใช้กำลังงานต่ำ จึงเป็นเหตุให้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแบบช่วงความถี่แคบและลอราแวนได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นและสิ่งที่สำคัญของระบบการ

ติดต่อสื่อสารแบบไร้สายทั่วไปก็คือ การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายและสถานีฐาน โดยปัญหาส่วนใหญ่ที่ทำให้การติดต่อสื่อสารมีประสิทธิภาพลดลงคือ สายอากาศของเครื่องลูกข่ายที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้เกิดการพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องลูกข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีขนาดเล็กกะทัดรัดเพียงพอที่จะฝังตัวอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [2]-[3] อย่างไรก็ตามหากเกิดปัญหาระดับความแรงของสัญญาณระหว่างสถานีฐานและเครื่องลูกข่ายลดต่ำลงหรือเกิดสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ จะทำให้การติดต่อสื่อสารมีประสิทธิภาพลดลงได้เช่นกัน จึงทำให้เกิดการพัฒนาสายอากาศที่สามารถเลือกทิศทางการรับส่งสัญญาณได้หรือสายอากาศปรับลำคลื่น ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะสามารถควบคุมและเลือกทิศทางการรับส่งสัญญาณได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้าและจะเพิ่มประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสารและลดการเกิดสัญญาณรบกวนในระบบการติดต่อสื่อสารได้ โดยได้มีการนำเสนอสายอากาศปรับลำคลื่นในหลายรูปแบบดังในงานวิจัยและบทความวิชาการดังนี้ สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น (Linear Array) ที่มีองค์ประกอบย่อยแบบยาก็ร่วมกับระบบสวิตช์ลำคลื่นถูกนำเสนอสำหรับการใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่สถานีฐาน (Base Station) เพื่อปรับปรุงการส่งสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่และปรับปรุงระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องลูกข่ายได้ [4] และในเอกสารอ้างอิงที่ [5] ได้มีการนำเสนอระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Beam Switching Antenna : EBSA) ในบทความนี้ใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นองค์ประกอบย่อยร่วมกับระบบการปรับลำคลื่นที่มีสวิตช์ความถี่สูงอยู่ภายในโดยสายอากาศถูกนำไปใช้ในการสื่อสารแบบจุดไปยังหลายจุด (Point to Multipoint) ในระบบของอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) จากบทความที่กล่าวผ่านมานั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศปรับลำคลื่นนั้นสามารถใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้

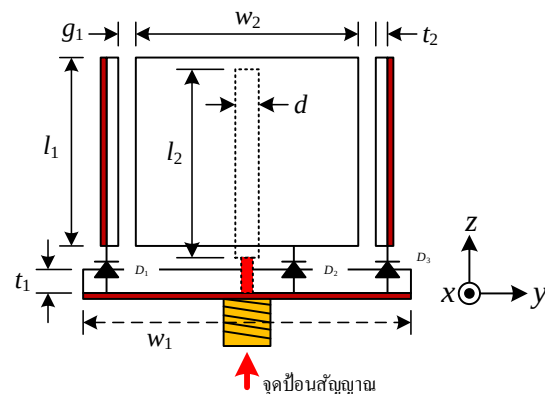
ด้วยการเลือกทิศทางการรับส่งสัญญาณและยังสามารถปรับปรุงระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนได้ โดยทั่วไปการปรับค่าคลื่นนี้สามารถออกแบบได้ด้วยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 2 แบบคือ การออกแบบด้วยการใช้สวิตช์ความถี่สูง (RF Switch) ซึ่งอุปกรณ์นี้จะมีลักษณะการทำงานด้วยการรับระดับแรงดันแบบดิจิทัลเพื่อทำการควบคุมการเชื่อมต่อหรือตัดวงจรของระบบสายอากาศสวิตช์ค่าคลื่นดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [6]-[8] และอุปกรณ์แบบที่สองที่นิยมใช้คือ พินไดโอด (PIN Diode) โดยมีหลักการทำงานเหมือนกับไดโอดทั่วไปแต่จะสามารถรองรับการทำงานที่ความถี่สูงได้ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [9]-[10] อีกทั้ง L. H. Trinh และคณะ ได้มีการนำเสนอการใช้สายอากาศที่สามารถปรับค่าคลื่นนี้ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในส่วนของการสื่อสาร [11]

ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศปรับค่าคลื่นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบลอราแวนในช่วงความถี่ 920-925 MHz โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้สามารถปรับค่าคลื่นได้ 4 ทิศทางครอบคลุม 360 องศา ในระนาบมุมยก [12] เหมาะสำหรับการใช้งานกับเครื่องลูกข่ายเพื่อใช้ติดต่อสื่อสารกับสถานีฐานที่อยู่รอบๆ เครื่องลูกข่ายในระดับความสูงต่างกัน โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างโมโนโพลแบบเส้นลวดวางอยู่บนระนาบกราวด์ร่วมกับแผ่นพาราซิติกรุปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 แผ่นวางล้อมรอบและพินไดโอดจำนวน 4 ตัว ถูกนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางการปรับค่าคลื่นด้วยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพาราซิติกรอกับระนาบกราวด์

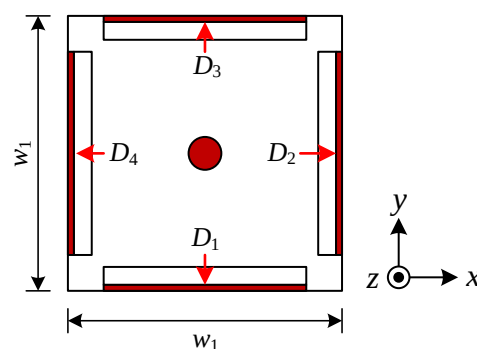
## 2. โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศปรับค่าคลื่น

บทความนี้นำเสนอสายอากาศปรับค่าคลื่นที่สามารถปรับค่าคลื่นหลักได้ในระนาบแนวตั้ง (Vertical Plane) ใน 4 ทิศทาง โดยมีโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยโครงสร้างโมโนโพลร่วมกับระนาบกราวด์เป็นส่วนแพร่กระจายคลื่นและมีแผ่นพาราซิติกรุปสี่เหลี่ยมจำนวน 4 แผ่น วางอยู่บนระนาบกราวด์รอบตัวสายอากาศโมโนโพล ซึ่งแผ่นพาราซิติกรอกแต่ละแผ่นจะถูกเชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ด้วยพินไดโอด (PIN Diode) ณ จุดกึ่งกลาง

ของขอบล่างของแผ่นพาราซิติกรอกแต่ละแผ่นเพื่อใช้สำหรับปรับค่าคลื่นหลักใน 4 ทิศทาง ด้วยพินไดโอดจำนวน 4 ตัว คือ  $D_1$   $D_2$   $D_3$  และ  $D_4$  ตามลำดับ ตารางที่ 1 แสดงการอธิบายเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติกรอก



(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติกรอก

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติกรอก

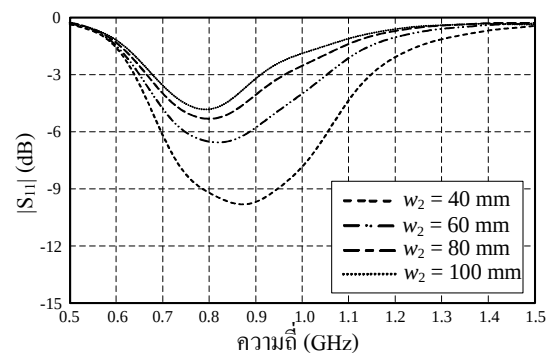
| พารามิเตอร์ | คำอธิบาย                            | ขนาด (mm) |
|-------------|-------------------------------------|-----------|
| $w_1$       | ความกว้างของแผ่นระนาบกราวด์         | 55        |
| $w_2$       | ความกว้างของแผ่นพาราซิติกรอก        | 40        |
| $l_1$       | ความยาวของแผ่นพาราซิติกรอก          | 43        |
| $l_2$       | ความยาวของสายอากาศโมโนโพล           | 43        |
| $t_1$       | ความหนาของวัสดุฐานรอง               | 1.6       |
| $g_1$       | ระยะห่างระหว่างแผ่นพาราซิติกรอก     | 5.8       |
| $d$         | เส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศโมโนโพล | 6         |

### 3. ผลการจำลองแบบ

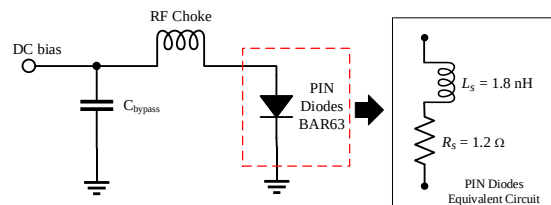
จากโครงสร้างของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคที่แสดงดังรูปที่ 1 ในการออกแบบสายอากาศที่น่าเสนอนี้จะเริ่มจากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่วางอยู่บนระนาบกราวด์ก่อน ซึ่งจะพิจารณาที่ความถี่กลาง ( $f_c$ ) เท่ากับ 922.5 MHz และมีความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เท่ากับ 325.20 mm โดยพิจารณาความยาวของสายอากาศโมโนโพล ( $l_2$ ) เท่ากับ  $\lambda/4$  (81.30 mm) ค่าความกว้างและความยาวของระนาบกราวด์เท่ากับ  $\lambda$  (325.20 mm) แล้วทำการปรับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศโมโนโพล ( $d$ ) เพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ที่ความถี่กลางและเพื่อให้มีช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งาน พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีที่สุดและทำให้ช่วงกว้างความถี่เพียงพอต่อการใช้งานมีค่าเท่ากับ 6 mm อย่างไรก็ตามพบว่าหากเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศโมโนโพลมีขนาดเล็กเกินไปจะเป็นผลทำให้ช่วงความถี่ของสายอากาศแคบลงและทำให้ความสูงของแผ่นพาราซิติคที่ใช้ในการปรับค่าคลื่นเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นนำแผ่นพาราซิติคที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) ชนิด FR4 ( $\epsilon_r = 4.3$ ) ที่มีความหนาเท่ากับ 1.6 mm โดยมีแผ่นทองแดงด้านเดียวรูปทรงสี่เหลี่ยมมาวางล้อมรอบตัวสายอากาศโมโนโพลทั้งสี่ด้านแล้วทำการปรับความกว้างของแผ่นพาราซิติคหรือ  $w_2$  เท่ากับ 40 mm 60 mm 80 mm และ 100 mm โดยกำหนดให้  $l_1$  มีค่าเท่ากับ  $\lambda/4$  (81.30 mm) พบว่าความกว้างของแผ่นพาราซิติคที่วางล้อมรอบสายอากาศโมโนโพลนั้นมีผลทำให้ค่า  $|S_{11}|$  เลื่อนไปเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำลงตามความกว้างของแผ่นพาราซิติคที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของแผ่นพาราซิติคที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับความถี่กลางมากที่สุดคือ  $w_2$  เท่ากับ 40 mm อย่างไรก็ตามในขณะที่ทำการปรับค่า  $w_2$  จะเป็นผลทำให้ค่าความกว้างของแผ่นระนาบกราวด์ ( $w_1$ ) และระยะห่างระหว่างแผ่นพาราซิติค ( $g_1$ ) มีค่าลดลงตามกันไปด้วยและจะเป็นผลทำให้แผ่นพาราซิติคนั้นสามารถที่จะปรับค่าคลื่นได้ดีขึ้นด้วย จากนั้นทำการปรับขนาดของระนาบกราวด์ให้มีขนาดเล็กพอติด

กับระยะของแผ่นพาราซิติคแล้วจึงปรับค่าความสูงของแผ่นพาราซิติคต่อไปเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางมากยิ่งขึ้นและทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมค่าคลื่นของสายอากาศโมโนโพลได้จึงทำการปรับค่าความยาวของแผ่นพาราซิติคไปพร้อมกับความยาวของสายอากาศโมโนโพล

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคแล้วจึงทำการพิจารณาในส่วนของการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าคลื่น โดยจะใช้พินไดโอดเบอร์ BAR63 [13] จำนวน 4 ตัว แต่ละตัวเชื่อมต่อกับแผ่นพาราซิติค ณ จุดกึ่งกลางของขอบล่างเพื่อใช้สำหรับปรับค่าคลื่นหลักใน 4 ทิศทาง และจะทำการควบคุมสถานะการนำกระแสของพินไดโอดด้วยการป้อนไบอัสตรง (Forward Bias) และสถานะหยุดนำกระแสด้วยการป้อนไบอัสกลับ (Reverse Bias) รูปที่ 3 แสดงวงจรควบคุมสถานะของพินไดโอดและวงจรสมมูลในกรณีที่พินไดโอดนำกระแส

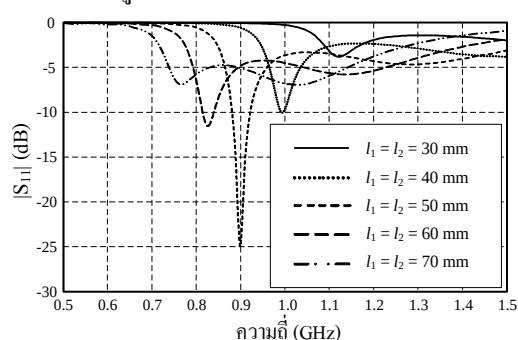


รูปที่ 2 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อปรับค่า  $w_2$



รูปที่ 3 วงจรควบคุมสถานะการทำงานของพินไดโอดและวงจรสมมูลในสถานะนำกระแส

จากการที่นำพินไดโอดมาเชื่อมต่อกับโครงสร้างของสายอากาศพบว่าในสภาวะการนำกระแสของพินไดโอดเพื่อการควบคุมทิศทางของลำคลื่นหลักนั้นจะเกิดค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำขึ้นซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ได้ดังแสดงในรูปที่ 3 และจะเป็นผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจึงต้องทำการปรับค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพล ( $I_2$ ) และความยาวของแผ่นพาราซิติค ( $I_1$ ) เพื่อให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางอีกครั้ง จากผลการจำลองในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อปรับค่า  $I_1$  และ  $I_2$  จาก 30 mm ถึง 70 mm ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงและที่ความยาว 50 mm มีค่า  $|S_{11}|$  ที่ต่ำที่สุดที่ความถี่ 900 MHz สังเกตเห็นว่าความยาวของสายอากาศโมโนโพลนั้นจะสั้นกว่า  $\lambda/4$  เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างซึ่งทำให้ช่วงกว้างความถี่เพิ่มขึ้นแต่ในขณะที่ความยาวสั้นลง เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเป็นที่เรียบร้อยแล้วทำการปรับค่าที่เหมาะสมอีกครั้งจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามแนวทางการออกแบบสายอากาศโมโนโพลในเอกสารอ้างอิงที่ [14] ดังแสดงในตารางที่ 1 และผลการจำลองของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อเชื่อมต่อกับพินไดโอดแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



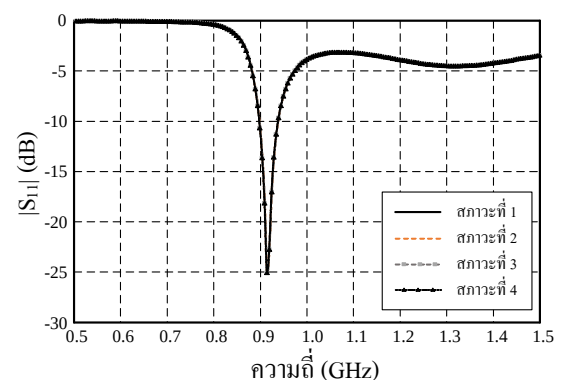
รูปที่ 4 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเชื่อมต่อกับพินไดโอดเมื่อปรับค่า  $I_1$  และ  $I_2$

จากผลการจำลองของสายอากาศแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อเชื่อมต่อกับพินไดโอดสามารถทำการปรับเปลี่ยนลำคลื่นได้ 4 สภาวะ ด้วยการควบคุมการ

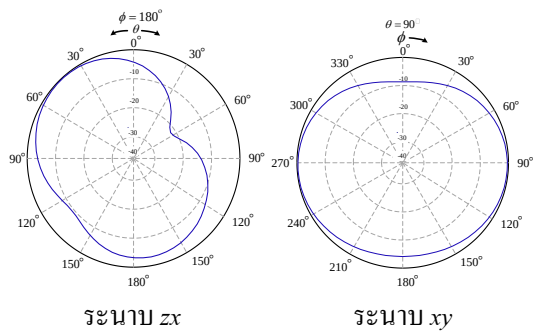
นำกระแสของพินไดโอดดังแสดงในตารางที่ 2 โดยทั้ง 4 สภาวะนั้นจะสามารถเลือกทิศทางการแพร่กระจายคลื่นได้ 4 ทิศทาง ในระนาบแนวตั้ง (Vertical Plane,  $\theta$ ) ที่มุม  $\theta$  เท่ากับ 43 องศา ไปตามระนาบแนวนอน (Horizontal Plane,  $\phi$ ) ที่มุม  $\phi$  เท่ากับ 180 270 0 และ 90 องศาตามลำดับ ทั้ง 4 สภาวะมีความกว้างลำคลื่นเท่ากันเท่ากับ 97.7 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 2.48 dBi ทั้งนี้ ค่า  $|S_{11}|$  ของทั้ง 4 สภาวะ ได้แสดงในรูปที่ 5 พบว่ามีลักษณะที่เหมือนกันเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศที่สมมาตรกันและมี  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 900 – 937 MHz

ตารางที่ 2 การควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคด้วยพินไดโอด

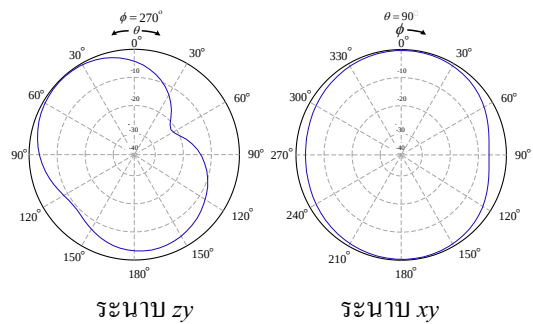
| สภาวะที่ | พินไดโอด |       |       |       | ทิศทางของลำคลื่นหลัก<br>( $\phi, \theta$ ) | ความกว้างลำคลื่น |
|----------|----------|-------|-------|-------|--------------------------------------------|------------------|
|          | $D_1$    | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ |                                            |                  |
| 1        | ON       | OFF   | OFF   | OFF   | (180°, 43°)                                | 97.7°            |
| 2        | OFF      | ON    | OFF   | OFF   | (270°, 43°)                                | 97.7°            |
| 3        | OFF      | OFF   | ON    | OFF   | (0°, 43°)                                  | 97.7°            |
| 4        | OFF      | OFF   | OFF   | ON    | (90°, 43°)                                 | 97.7°            |



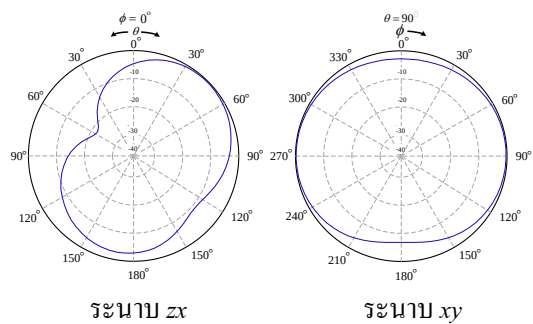
รูปที่ 5 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อทำการควบคุมด้วยพินไดโอด



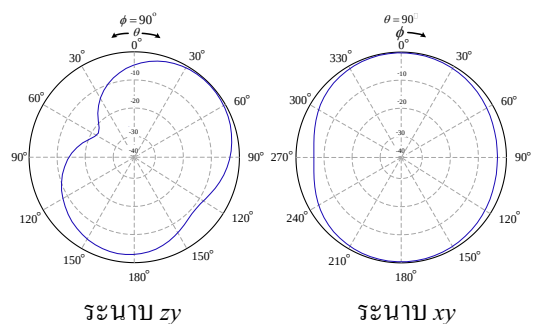
(ก) สภาวะที่ 1



(ข) สภาวะที่ 2



(ค) สภาวะที่ 3



(ง) สภาวะที่ 4

รูปที่ 6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อทำการควบคุมด้วยพินไดโอด

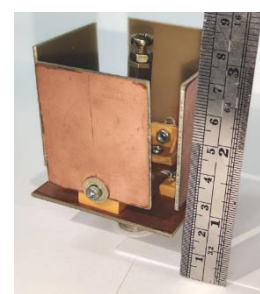
#### 4. ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำผลที่จากการจำลองมาสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบคุณสมบัติ โดยสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคที่ได้ทำการออกแบบถูกสร้างขึ้น โดยสายอากาศโมโนโพลสร้างด้วยแท่งโลหะ ในส่วนของระนาบกราวด์และแผ่นพาราซิติคถูกสร้างด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ( $\epsilon_r = 4.3$ ) ที่มีความหนาเท่ากับ 1.6 mm และได้นำเอาทองแดงออกหนึ่งด้าน รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้น

จากนั้นนำพินไดโอดมาเชื่อมต่อ ณ จุดที่ได้ทำการออกแบบไว้ทั้ง 4 ด้าน และทำการเชื่อมต่อกับวงจรควบคุมเมื่อได้ต้นแบบที่สมบูรณ์แล้วจึงทำการทดสอบค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศต้นแบบซึ่งพบว่าสายอากาศต้นแบบสามารถที่จะปรับลำคลื่นได้ทั้ง 4 สภาวะ ด้วยการควบคุมการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเมื่อสายอากาศต้นแบบเปลี่ยนแปลงไปทั้ง 4 สภาวะค่าของ  $|S_{11}|$  ที่ทดสอบได้นั้นค่อนข้างที่จะสอดคล้องกันในที่นี้จึงแสดงผลเฉพาะค่า  $|S_{11}|$  ของสภาวะที่ 1 เปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ จากผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 8 สายอากาศต้นแบบมีค่า  $|S_{11}|$  ครอบคลุมช่วงความถี่ 900-980 MHz และมีค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ

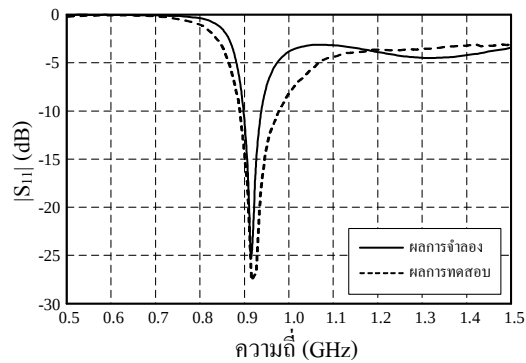


(ก) ด้านบน



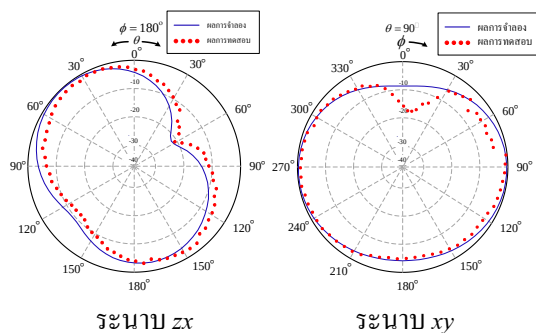
(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 7 ภาพถ่ายของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้น

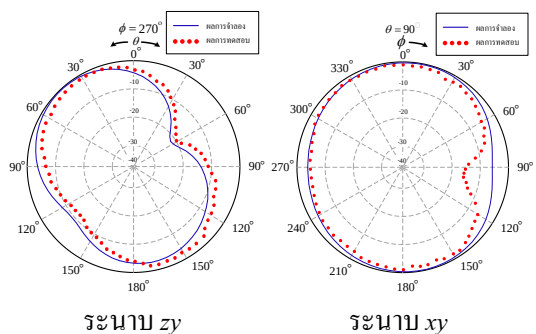


รูปที่ 8 ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมนิโพล ร่วมกับแผ่นพาราซิติคต้นแบบเมื่อทำการควบคุม ด้วยพินไดโอดในสภาวะที่ 1

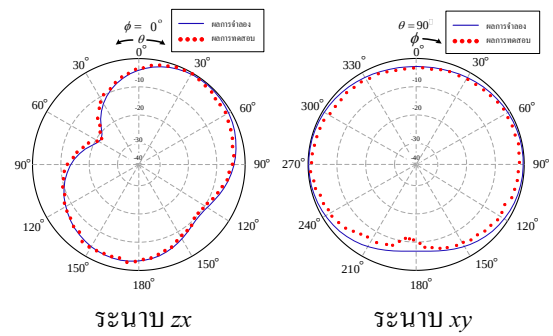
สุดท้ายได้ทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบทั้ง 4 สภาวะ ทั้งในระนาบแนวนอนและระนาบแนวตั้งพบว่าสายอากาศสามารถที่จะปรับค่าคลื่นหลักที่พุ่งขึ้นตามระนาบแนวตั้งไปตามระนาบแนวนอนได้ทั้งหมด 4 ทิศทาง มีความกว้างลำคลื่น 90 องศาและอัตราขยาย 2.85 dBi ดังแสดงในรูปที่ 9



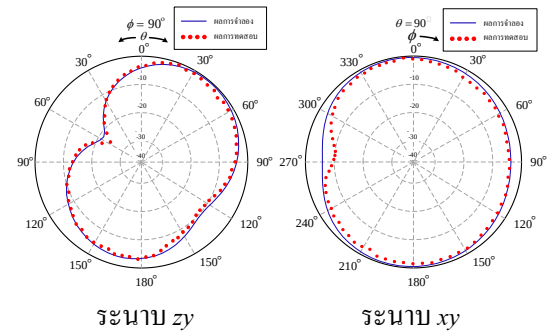
(ก) สภาวะที่ 1



(ข) สภาวะที่ 2



(ค) สภาวะที่ 3



(ง) สภาวะที่ 4

รูปที่ 9 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมนิโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อทำการควบคุมด้วยพินไดโอด

## 5. สรุปผล

สายอากาศปรับค่าคลื่นสำหรับระบบลอว์แวนในช่วงความถี่ 920-925 MHz ที่ได้ทำการออกแบบและทดสอบนั้นสามารถปรับค่าคลื่นได้ 4 ทิศทางในระนาบแนวตั้ง จากโครงสร้างของสายอากาศที่ประกอบด้วยสายอากาศโมนิโพลวางอยู่บนระนาบกราวด์ร่วมกับแผ่นพาราซิติครูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 แผ่น วางล้อมรอบและพินไดโอดจำนวน 4 ตัว สามารถนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางการปรับค่าคลื่นด้วยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพาราซิติคกับระนาบกราวด์ จากผลการออกแบบและทดสอบพบว่าสายอากาศปรับค่าคลื่นมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50  $\Omega$  และมีค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 900-980 MHz มีอัตราขยายเท่ากับ 2.85 dBi

## 6.เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Khunboa, "IoT Architecture: Internet of Things", Se-Ed, Bangkok, 2019.
- [2] L.H. Trinh, T. Q. K. Nguyen, D. D. Phan, V. Q. Tran, V. X Bui, N. V. Truong and F. Ferrero, "Miniature Antenna for IoT Devices Using LoRa Technology," 2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), pp. 170-173, October 2017.
- [3] Q. Zhang and Y. Gao, "Embedded Antenna Design On LoRa Radio for IoT Applications," 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), pp. 1-3, April 2018.
- [4] V. Ludwig-Barbosa, E. Schlosser, R. Machado, F. G. Ferreira, S. M. Tolfo and M. V. T. Heckler, "Linear Array Design with Switched Beams for Wireless Communications Systems," International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2015, Article ID 278160, pp. 1-9, April 2015.
- [5] D. R. Jahagirdar and K. Sambasiva Rao, "Design and Development of Electronic Beam Switching Antenna for Point-to-Multipoint Long Range Data Link Applications," 2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM), Bangalore, India, pp. 1-4, November 2017.
- [6] Y. Li and Z.-C. Hao, "A Wideband Switched Beam Antenna for Full 360° Coverage," 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, China, pp. 1-3, October 2017.
- [7] C. W. Jung, M.-J. Lee, G. P. Li and F. De Flaviis, "Reconfigurable Scan-Beam Single-Arm Spiral Antenna Integrated with RF-MEMS Switches," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 54, no. 2, pp. 455-463, February 2006.
- [8] S. Cheng, P. Rantakari, R. Malmqvist, C. Samuelsson, T. Vaha-Heikkila, A. Rydberg and J. Varis, "Switched Beam Antenna Based on RF MEMS SPDT Switch on Quartz Substrate," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8, pp. 383-386, March 2009.
- [9] Y.-Y. Lin, C.-L. Liao, T.-H. Hsieh and W.-J. Liao, "A Novel Beam-Switching Array Antenna Using Series-Fed Slots With PIN Diodes," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 16, pp. 1393-1396, December 2016.
- [10] V. A. Nguyen and P. S. Ook, "Compact Switched and Reconfigurable 4-ports Beam Antenna Array for MIMO Applications," 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Intelligent Radio for Future Personal Terminals, Daejeon, South Korea, pp. 1-3, August 2011.
- [11] L. H. Trinh, T. N. Le, R. Staraj, F. Ferrero and L. Lizzi, "A Pattern-Reconfigurable Slot Antenna for IoT Network Concentrators," Electronics 2017, 6, 105, pp. 1-7, November 2017.
- [12] S. V. Shynu Nair and M. J. Ammann, "Reconfigurable Antenna With Elevation and Azimuth Beam Switching," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 9, pp. 367-370, April 2010.
- [13] Infineon Technologies, Silicon PIN Diodes, BAR63, datasheet October 1999.
- [14] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.