

การออกแบบและจำลองสายอากาศยาگی-อูเดแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่าย LoRa

Design and Simulation of Yagi-Uda Switched Beam Array Antenna to Enhance the Efficiency of LoRa Networks

ธนพงศ์ คุ้มญาติ^{1*}, พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย² และ พีระพงษ์ อุธารสกุล³

Tanapong Khumyat^{1*}, Pongnarin Sriploy² and Peerapong Uthansakul³

Received: 19 August 2020, Revised: 7 November 2020, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

“LoRa คือ เครือข่ายสื่อสารแบบกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ หรือเรียกว่า เครือข่าย LPWAN (Low power wide area network)” ซึ่งมีความสำคัญกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง ส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลต่ำ และใช้พลังงานต่ำในการส่งสัญญาณระยะทางไกล ในพื้นที่ที่สัญญาณอินเทอร์เน็ต หรือเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไม่ครอบคลุม ดังนั้นการขยายพื้นที่ครอบคลุมโดยการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงมีความสำคัญ งานวิจัยนี้ได้เสนอการออกแบบและจำลองสายอากาศยาگی-อูเดแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นที่ความถี่ 920 MHz เพื่อเพิ่มอัตราขยายสายอากาศให้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศ LoRa แบบทั่วไป หลักการออกแบบ และจำลองสายอากาศได้อธิบายไว้เป็นขั้นตอนตามหลักการในทางปฏิบัติ ผลคือ เมื่อเพิ่มจำนวนอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยาگی-อูเด และจัดรูปแบบสายอากาศยาگی-อูเดแบบแถวลำดับทำให้ได้อัตราขยายสายอากาศเพิ่มขึ้น และได้ระยะทางการส่งสัญญาณที่ไกลมากขึ้นบนเครือข่าย LoRa ในขณะเดียวกันการปรับทิศทางของลำคลื่นสามารถทำได้โดยการปรับเฟสของสัญญาณ

คำสำคัญ: เครือข่าย LoRa, สายอากาศยาگی-อูเด, สายอากาศแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand.

² คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

³ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): k_tnp@hotmail.com Tel: 09 3347 0181

ABSTRACT

LoRa is a type of Low Power Wide Area Networks (LPWANs) using low energy, which is important for internet of things technology that transfers data with low data rate and uses low energy for long distance transmission in the area without the use of internet signals or mobile phone networks. Thus, expanding of an area coverage by increasing antenna gain is significant. This research proposes the design and simulation of Yagi-Uda switched beam array antenna in the 920 MHz frequency band in order to enhance antenna gain compared to general LoRa antennas. Criteria of antenna design and simulation are orderly described according to the practical principle. As shown in the results, when increasing the number of elements in Yagi-Uda antenna and arranging Yagi-Uda antennas in the array form, the antenna gain can be increased and the longer distance transmission on the LoRa networks can be achieved. Meanwhile, beam steering can be performed by adjusting phases of signals.

Key words: LoRa networks, Yagi-Uda antenna, switched beam array antenna

บทนำ

พื้นที่สำหรับทำเกษตรกรรมส่วนใหญ่ของประเทศไทย มักอยู่บนพื้นที่ห่างไกล ไม่สามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลที่มีความจำเป็นในชีวิตประจำวัน ข้อมูลทางด้านการเกษตร การเตือนภัย หรือสถานการณ์ต่างๆ รอบตัว เนื่องจาก ไม่มีสัญญาณจากเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือสัญญาณอินเทอร์เน็ต เทคโนโลยี LoRa คือโปรโตคอลการสื่อสารไร้สายที่ถูกพัฒนาและออกแบบมาเพื่อการสื่อสารระยะไกล (Long-range) และใช้พลังงานต่ำ จึงสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการชาร์จประจุกับแบตเตอรี่ได้ เหมาะสมกับการใช้ในพื้นที่ๆ ไม่มีไฟฟ้า และเหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกล LoRa เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญกับเครือข่ายเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT) ที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์จำนวนมาก มีการรายงานข้อมูลที่มีอัตราข้อมูลความเร็วต่ำตลอดเวลา ข้อมูลที่ได้มาจากโนด หรือเซนเซอร์จะถูกส่งผ่านเกตเวย์ ไปยังเซิร์ฟเวอร์ที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยเครือข่าย LoRa แบ่งออกเป็น 3 คลาสที่มีลักษณะการใช้งานแตกต่างกัน

(Ron *et al.*, 2020) โดยที่คลาสเอ มีโนดหรือเซนเซอร์ที่อยู่ในโหมดสลีปหลังจากส่งข้อมูล และจะรับสัญญาณตามช่วงเวลาที่กำหนดเท่านั้น ทำให้ประหยัดพลังงาน เหมาะสมกับโนดที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และการส่งสัญญาณเตือนภัยต่างๆ ส่วนคลาสบี ทางสถานีเกตเวย์สามารถกำหนดช่วงเวลาส่งได้ และสามารถส่งข้อมูลไปยังหลายโนดพร้อมกัน เหมาะสมกับงานที่ต้องการส่งข้อมูลจากโนดแบบสม่ำเสมอ เช่น พื้นที่ทำการเกษตร หรือทำงานวิจัยภาคสนาม และคลาสซี ทางสถานีเกตเวย์และโนดสามารถสื่อสารข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง แต่ใช้พลังงานสูง จึงเหมาะกับพื้นที่ที่มีไฟฟ้าใช้ ข้อดีอีกประการของเครือข่าย LoRa คือมีความไวของภาครับสัญญาณสูงกว่าระบบสื่อสารชนิดอื่นทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกล (Zhou *et al.*, 2019) เครือข่ายชนิดนี้เหมาะสำหรับเทคโนโลยีด้านอื่นๆ อีก เช่น สมาร์ทซิตี้ การบริการข้อมูลทางสุขภาพ การทำสมาร์ทฟาร์ม เป็นต้น การใช้ในพื้นที่ยังมีประโยชน์หลายด้าน เช่น ข้อมูลมิเตอร์ไฟฟ้า ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบจราจร การติดตามวัตถุ การจัดการของเสีย

เป็นต้น (Toma and Gemein, 2018) เทคโนโลยี LoRa มีหลายโมดูลให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับพื้นที่และลักษณะการใช้งาน (Khutsoane *et al.*, 2017) ข้อจำกัดสิ่งหนึ่งของระบบสื่อสารทุกชนิดคือ กำลังงาน ความไวของภาครับ ซึ่งรวมถึงระยะทางในการสื่อสารข้อมูล ซึ่งปัจจัยสำคัญคือ ชนิดของสายอากาศที่มีอัตราขยายและรูปแบบการแพร่กระจายของลำคลื่นที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไป LoRa สื่อสารได้ทั้งระยะทางไกลและไกลขึ้นอยู่กับโมดูลที่ใช้ บางรุ่นสื่อสารได้ไกล 10-30 กิโลเมตร (Seye *et al.*, 2018) โดยมีการใช้สายอากาศหลายชนิด ทั้งที่มีวางจำหน่ายทั่วไป และแบบที่พัฒนาในงานวิจัย (Mushtaq *et al.*, 2020; Pham *et al.*, 2017) ซึ่งมีอัตราขยายไม่สูงมากนัก อย่างไรก็ตามโมดูลเครื่องส่ง เครื่องรับ LoRa จะมีสายวงจร หรือคอนเน็คเตอร์สำหรับเชื่อมต่อสายอากาศจากภายนอกได้ วิธีการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศวิธีหนึ่งคือ การใช้สายอากาศแถวลำดับ (Phased array antenna) ที่ใช้สายอากาศหลายต้นนำมาวางเรียงกันเป็นเส้นตรง หรือเรียงกันทั้งแนวแถวและหลัก (Takano *et al.*, 2013) โดยที่สัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้นจะต้องมีการปรับเฟสโดยใช้อุปกรณ์เลื่อนเฟส (Phase shifter) ให้เหมาะสม เพื่อรวมสัญญาณให้มีกำลังแรงขึ้นในทิศทางที่ต้องการ สามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณ และลดอัตราผิดพลาดบิต (Silva *et al.*, 2003) รวมถึงมีงานวิจัยที่จำลองผล และทำการทดลองการใช้สายอากาศแบบปรับตัว และการใช้สายอากาศแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น ที่มีจำนวนสายอากาศหลายต้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และเพิ่มอัตราบิตได้ (Rehfuess and Ivanov, 2000) ซึ่งส่วนใหญ่จะทดลองกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานในเครือข่าย LoRa ที่มีสถานีฐานกับลูกข่ายเป็นแบบไม่เคลื่อนที่ ซึ่งถ้าใช้สายอากาศแบบลำคลื่นแคบจะทำให้ได้ระยะส่งสัญญาณได้ไกล

กว่า และคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่า มีการทำวิจัยออกแบบสายอากาศวิทยุ-อู๊ดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นในหลายช่วงความถี่ สามารถเพิ่มอัตราขยายและปรับทิศทางของลำคลื่นได้ (Dao *et al.*, 2016; Nacini and Fakharzadeh, 2017; Ramadan and Gabriel, 2009) จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศวิทยุ-อู๊ดะที่มีการแผ่ลำคลื่นแคบนำมาจำลองเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นด้วยโปรแกรม CST Studio เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เครือข่าย LoRa ที่ได้รับอนุญาตในประเทศไทยในช่วงความถี่ 920-925 MHz ที่กำลังส่งไม่เกิน 4 วัตต์ และงานวิจัยนี้มีผลการทดลองการกำหนดทิศทางลำคลื่นจากการปรับความต่างเฟสระหว่างสายอากาศเพื่อพิสูจน์สมมุติฐานงานวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

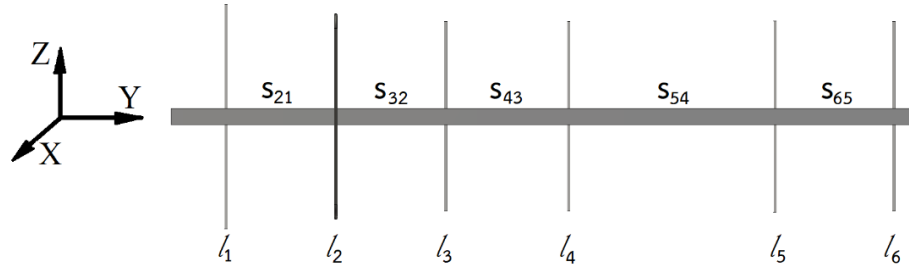
งานวิจัยนี้ ในส่วนแรกดำเนินการศึกษาหลักการออกแบบสายอากาศวิทยุ-อู๊ดะ ในส่วนของ การกำหนดความยาวของแต่ละอิลิเมนต์ และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ ที่มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น และจำนวนของอิลิเมนต์ที่ใช้ การใช้โปรแกรม CST Studio เพื่อออกแบบและจำลองสายอากาศวิทยุ-อู๊ดะเมื่อเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ โดยอธิบายวิธีการปรับความยาว และการปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนที่สอง จำลองการจัดเรียงสายอากาศวิทยุ-อู๊ดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น เพื่อหาประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีรูปแบบแถวลำดับที่แตกต่างกัน ส่วนสุดท้ายคือผลการจำลอง และผลการทดลองการเบนทิศทางพหุหลักของลำคลื่น เมื่อมีการปรับความต่างเฟสที่แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

1. หลักการออกแบบสายอากาศวิทยุ-อู๊ดะ

สายอากาศวิทยุ-อู๊ดะเป็นสายอากาศที่ใช้ได้กับหลายช่วงความถี่ตั้งแต่ 3MHz - 3GHz สายอากาศ

ประกอบด้วยส่วนประกอบของไดโพลหลายชิ้น มีส่วนที่ต่อกับสายส่งโดยตรง 1 ชิ้นคือ สายอากาศโพลีเค็ดไดโพล ด้านหลังเป็นส่วนสะท้อนคลื่น และที่

เหลือด้านหน้าหลายชิ้นเป็นไดเรกเตอร์ ซึ่งมีได้ตั้งแต่ 6 - 12 ชิ้น โดยชิ้นส่วน



ภาพที่ 1 ลักษณะของสายอากาศยาภิ-อุดะ 6 อิลิเมนต์

ทั้งหมดมีความยาวน้อยกว่าครึ่งคลื่น การออกแบบสามารถปรับได้ทั้งความยาว และระยะห่างของ

ชิ้นส่วน (Balanis, 2005; Thiele, 1969) ลักษณะของสายอากาศมีลักษณะตามการอธิบายในภาพที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดขนาดและระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ของสายอากาศยาภิ-อุดะ 6 อิลิเมนต์ (Balanis, 2005)

l_1/λ	l_2/λ	l_3/λ	l_4/λ	l_5/λ	l_6/λ	s_{21}/λ	s_{32}/λ	s_{43}/λ	s_{54}/λ	s_{65}/λ	Directivity (dB)
0.51	0.490	0.430	0.430	0.430	0.430	0.250	0.310	0.310	0.310	0.310	10.93
0.51	0.490	0.430	0.430	0.430	0.430	0.250	0.289	0.406	0.323	0.422	12.83
0.472	0.452	0.436	0.430	0.434	0.430	0.250	0.289	0.406	0.323	0.422	13.41

มีงานวิจัยหลายเรื่องที่เสนอการออกแบบสายอากาศยาภิ-อุดะ ทั้งการทดลอง และการคำนวณ โดยการปรับขนาด ความยาวของอิลิเมนต์ และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ เพื่อให้มีการสะท้อนน้อยที่สุด และให้มีอัตราขยายสูงสุด ในหนังสือทฤษฎีสายอากาศ (Balanis, 2005) เสนอการออกแบบสายอากาศยาภิ-อุดะแบบ 6 อิลิเมนต์ โดยมีขนาดตาม

ตารางที่ 1 โดยรูปแบบการแผ่สัญญาณของสายอากาศยาภิ-อุดะ มีลักษณะตามสมการ ดังนี้

1.1 รูปแบบการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศยาภิ-อุดะ (Far-Field Pattern)

ขนาดสนามไฟฟ้ารวมจากชิ้นส่วนสายอากาศจำนวน N ชิ้นตามฟังก์ชันของมุม α เขียนได้ดังสมการ

$$E_\alpha = \sum_{n=1}^N E_{\alpha n} = -j\omega A_\alpha$$

(1)

เมื่อ

$$A_\alpha = \sum_{n=1}^N A_{\alpha n}$$

$$= -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\alpha \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(x_n \sin\alpha \cos\varphi + y_n \sin\alpha \sin\varphi)} \times \left[\int_{-\frac{l_n}{2}}^{+\frac{l_n}{2}} I_n e^{jkz'_n \cos\alpha} dz'_n \right] \right\} \quad (2)$$

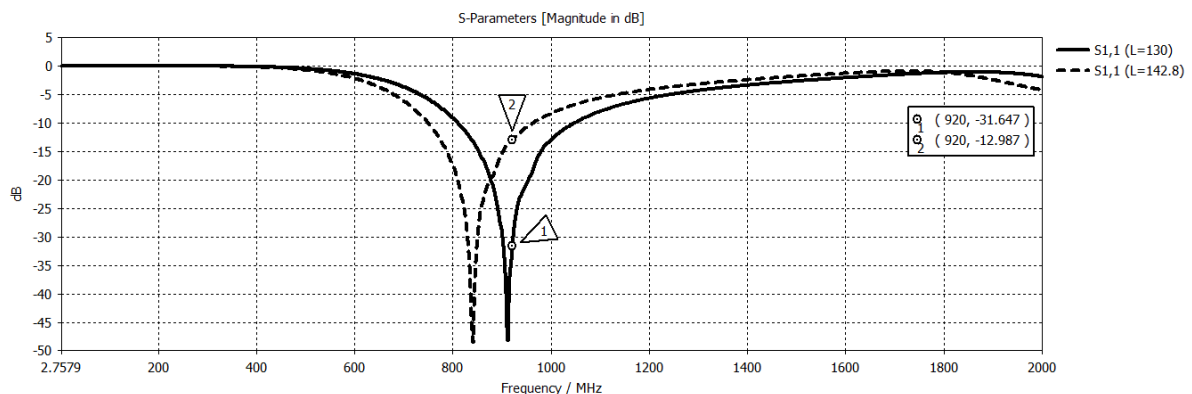
และ

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz'_n \cos\alpha} dz'_n = \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[\frac{\sin(Z^+)}{Z^+} + \frac{\sin(Z^-)}{Z^-} \right] \frac{l_n}{2} \quad (3)$$

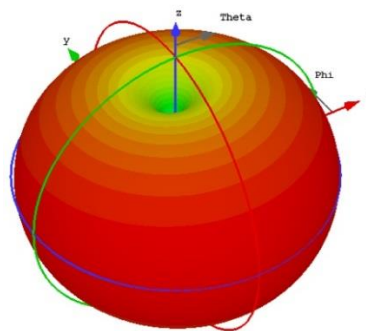
โดยที่ $Z^+ = [(2m-1)\pi/l_n + k\cos\alpha] l_n/2$ และ $Z^- = [(2m-1)\pi/l_n - k\cos\alpha] l_n/2$

จากภาพที่ 1 เมื่อสายอากาศตั้งบนแกน z วางที่พิกัด x_n และ y_n โดยที่ l_n คือความยาวลวดตัวนำเส้นที่ n ที่สนามมีการแผ่ตามมุมก้มเงยตามแกน z และมุมกวาดรอบรัศมีเส้นลวด เป็นมุม α และมุม φ ตามลำดับ ระยะ r วัดจากจุดป้อนสัญญาณไปถึงจุดสังเกตสนาม และ I_n คือกระแสไฟฟ้าบนลวดตัวนำลำดับที่ n และ z'_n คือตำแหน่งตามทิศทางแกน

z ของเส้นลวดลำดับที่ n โดยที่ M คือจำนวนที่แบ่งส่วนย่อยในการอินทิเกรตกระแสไฟฟ้าบนอิลิเมนต์รูปแบบการแผ่กำลังงานของสายอากาศวิทยุ-อู๊ดจะสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (1) (2) และ (3) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการจำลองการแผ่กำลังงานของสายอากาศวิทยุ-อู๊ดที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CST Studio เมื่อพิจารณาจากทิศทางของสนามไฟฟ้า



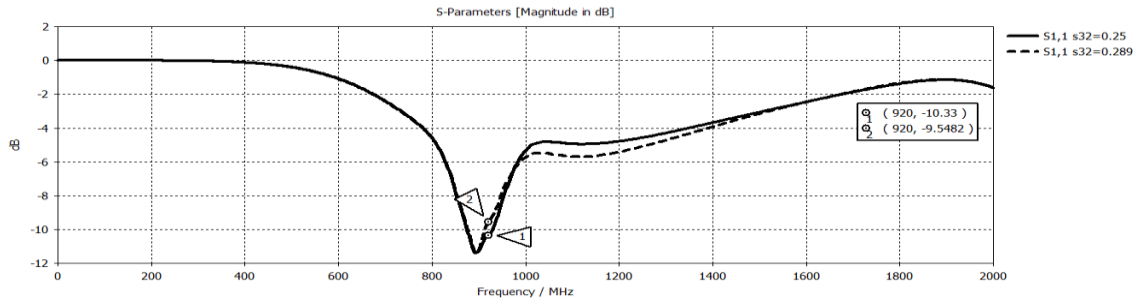
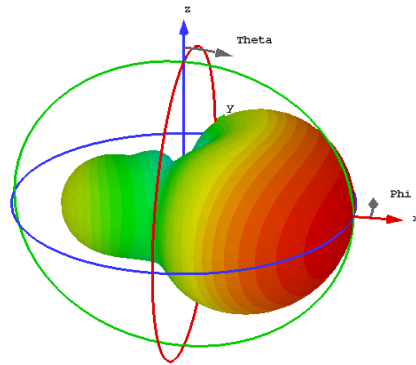
ภาพที่ 2 เปรียบเทียบค่า s_{11} ก่อนและหลังการปรับความยาวเส้นลวด



ภาพที่ 3 การแผ่กำลังงานของสายอากาศโพเลดี้ไดโพล



ภาพที่ 4 สายอากาศโฟลด์เค็ดโคโพล

ภาพที่ 5 เปรียบเทียบค่า s_{11} ก่อนและหลังการปรับความยาว s_{21} และ s_{32} 

ภาพที่ 6 การแผ่กำลังงานของสายอากาศยาภิ-อูตะ 3 อิลิเมนต์

การออกแบบสายอากาศยาภิ-อูตะในหนังสือทฤษฎีสายอากาศ (Balanis, 2005) ได้ผลมาจากการทดลอง ซึ่งมีข้อสังเกตที่แตกต่างจากการจำลองในคอมพิวเตอร์ โดยให้ผลการจำลองการสะท้อน $s_{11} = -10.829$ dB เมื่อใช้ขนาดต่างๆ จากการออกแบบตามตารางที่ 1 (ลำดับที่สองที่แรงเงา) ซึ่งมีค่าไม่ดีพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในบทความนี้จะทดลองปรับความยาว และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์สายอากาศ ดังขั้นตอนในหัวข้อถัดไป

1.2 การออกแบบสายอากาศโฟลด์เค็ดโคโพล

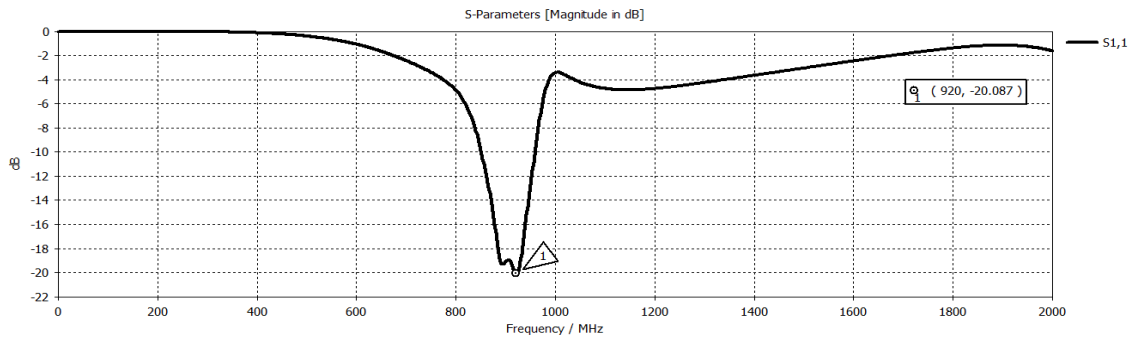
สายอากาศยาภิ-อูตะป้อนสัญญาณเข้าที่สายอากาศโฟลด์เค็ดโคโพล เพื่อเหนี่ยวนำสัญญาณไปยังไดเรกเตอร์ที่อยู่ใกล้กัน การกำหนดความยาวของโฟลด์เค็ดโคโพล ใช้ความยาว $l_2/\lambda = 0.5$ ซึ่งคิดเป็น

ความยาว 162 มิลลิเมตร หรือ 142.8 มิลลิเมตร เมื่อห้กระแสมัดโค้งทั้งสองด้าน และความยาวคลื่นที่ 920 MHz ยาว $\lambda = 324$ มิลลิเมตร ใช้ลวดตัวนำรัศมี 0.003369λ คิดเป็น 1.0916 มิลลิเมตร คัดโค้งเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.2 มิลลิเมตร และมีช่องว่างขนาด 3 มิลลิเมตร เพื่อใช้ป้อนสัญญาณ กำหนดอิมพีแดนซ์ 300 โอห์ม โดยสายอากาศมีลักษณะดังภาพที่ 4 เมื่อจำลองสายอากาศด้วยคอมพิวเตอร์ ค่าการสะท้อนของสัญญาณยังสูงเกินไป ก็ได้ค่า $s_{11} = -12.987$ dB ดังอธิบายในภาพที่ 2 จากนั้นทดลองปรับความยาวของสายอากาศหลายขนาด จนได้ค่าการสะท้อนของสัญญาณ ที่ค่า $s_{11} = -31.647$ dB ซึ่งอธิบายไว้ในภาพที่ 2 และได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศสูงสุดที่ 2.7 dBi เมื่อสายอากาศมีความยาว 130 มิลลิเมตร เมื่อไม่รวม

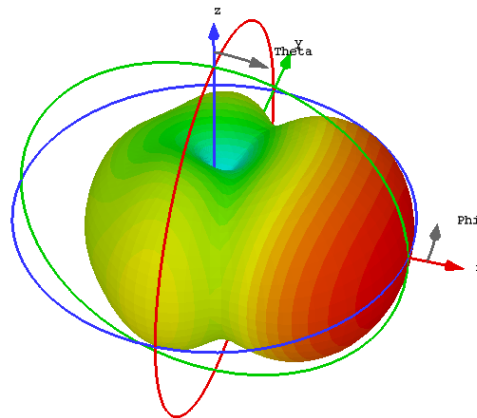
ความยาวรัศมีดัดโค้งของเส้นลวด หรือ $l_2/\lambda = 0.4605$ ดังภาพที่ 3

1.3 การออกแบบสายอากาศวิทยากิ-อุดะ 3 อิลิเมนต์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศโฟลด์เค็ดโคโพล แล้ว นำไปจำลองกับรีเฟล็กเตอร์ที่มีขนาด $l_1/\lambda = 0.51$ และ



ภาพที่ 7 ค่า s_{11} หลังการปรับความยาว s_{43}



ภาพที่ 8 การแผ่กำลังงานของสายอากาศวิทยากิ-อุดะ 4 อิลิเมนต์

ไดเรกเตอร์ชิ้นแรกขนาด $l_3/\lambda = 0.43$ ตามขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ $s_{21}/\lambda = 0.25$ และ $s_{32}/\lambda = 0.289$ ได้ค่า $s_{11} = -9.5482$ dB ซึ่งมีค่าสูงเกินไป ดังนั้นจึงปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -10.33 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 8.57 dBi เมื่อ $s_{21}/\lambda = 0.25$ และ $s_{32}/\lambda = 0.25$ ตามภาพที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

1.4 การออกแบบสายอากาศวิทยากิ-อุดะ 4 อิลิเมนต์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศวิทยากิ-อุดะ 3 อิลิเมนต์จากหัวข้อที่ 1.3 แล้ว นำไปจำลองร่วมกับ

ไดเรกเตอร์ชิ้นที่สองที่มีขนาด $l_4/\lambda = 0.43$ ตามขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ $s_{43}/\lambda = 0.406$ ได้ค่า s_{11} ซึ่งมีค่าสูงเกินไป ดังนั้นจึงปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -20.087 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 9.18 dBi เมื่อปรับระยะ $s_{43}/\lambda = 0.28$ ตามภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

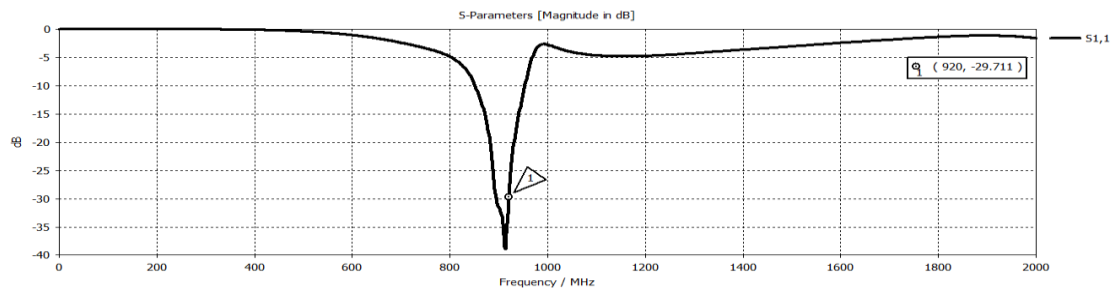
1.5 การออกแบบสายอากาศวิทยากิ-อุดะ 5 อิลิเมนต์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศวิทยากิ-อุดะ 4 อิลิเมนต์จากหัวข้อที่ 1.4 แล้ว นำไปจำลองร่วมกับไดเรกเตอร์ชิ้นที่สามที่มีขนาด $l_5/\lambda = 0.43$ ตาม

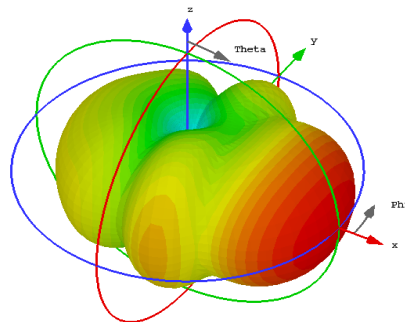
ขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ $s_{54}/\lambda = 0.323$ ได้ค่า s_{11} ซึ่งมีค่าสูงเกินไป ดังนั้นจึงปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -29.711 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 9.85 dBi เมื่อปรับความยาวไดเรกเตอร์ $l_5/\lambda = 0.434$ และปรับระยะ $s_{54}/\lambda = 0.47$ ดังภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

1.6 การออกแบบสายอากาศวิทยากิ-อูตะ 6 อิลิเมนต์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศวิทยากิ-อูตะ 5 อิลิเมนต์จากหัวข้อที่ 1.5 แล้ว นำไปจำลองร่วมกับไดเรกเตอร์ขึ้นที่สี่ที่มีขนาด $l_6/\lambda = 0.43$ ตามขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ $s_{65}/\lambda = 0.422$ ได้ค่า s_{11} ซึ่งมีค่าสูง



ภาพที่ 9 ค่า s_{11} หลังการปรับความยาว s_{54}



ภาพที่ 10 การแผ่กำลังงานของสายอากาศวิทยากิ-อูตะ 5 อิลิเมนต์

เกินไป ดังนั้นจึงปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -23.681 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 11.1 dBi เมื่อปรับระยะ $s_{65}/\lambda = 0.27$ ดังภาพที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

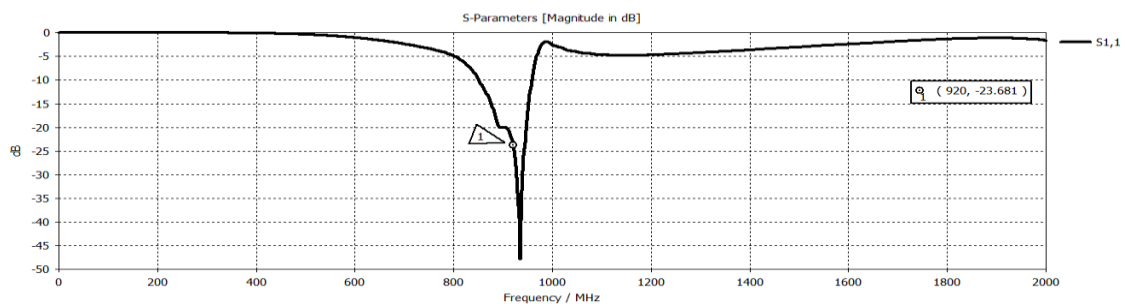
จากผลการออกแบบและการจำลอง พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ของสายอากาศวิทยากิ-อูตะจะทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นสายอากาศวิทยากิ-อูตะ 3 อิลิเมนต์ มีอัตราขยายสูงสุด 8.57 dBi แบบ 4 อิลิเมนต์ มีอัตราขยายสูงสุด 9.18 dBi แบบ 5 อิลิเมนต์ มีอัตราขยายสูงสุด 9.85 dBi

และแบบ 6 อิลิเมนต์ มีอัตราขยายสูงสุด 11.1 dBi นั่นคือแบบ 4 อิลิเมนต์มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 0.61 dB เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ 3 อิลิเมนต์ โดยที่แบบ 5 อิลิเมนต์มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 0.67 dB เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ 4 อิลิเมนต์ และแบบ 6 อิลิเมนต์มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 1.25 dB เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ 5 อิลิเมนต์ สายอากาศวิทยากิ-อูตะที่ออกแบบสามารถใช้งานได้กับเครือข่าย LoRa ภายในประเทศไทย ซึ่งได้รับอนุญาตจาก กสทช. ให้ใช้ความถี่ $920-925$ MHz โดยไม่ต้องขออนุญาตถ้ากำลังส่งไม่เกิน 500 มิลลิวัตต์

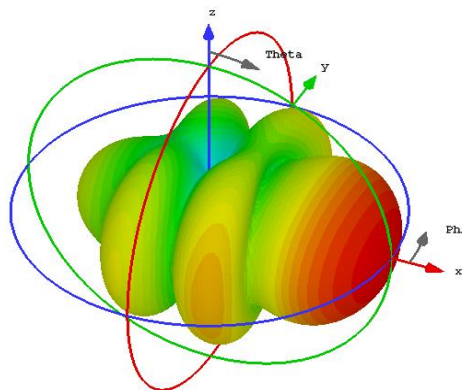
เมื่อพิจารณา ค่า s_{11} จากภาพที่ 11 สายอากาศที่ออกแบบสามารถใช้ได้ในช่วงความถี่ 890-940 MHz ที่มีค่า s_{11} ต่ำกว่า -20 dB ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ได้รับอนุญาต และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เครือข่าย LoRa การใช้เทคนิคการสลัดลาคี่นจะสามารถเพิ่มอัตราขยาย และสามารถปรับทิศทางของลาคี่นได้ตามต้องการ ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2. ระบบสายอากาศแบบสลัดลาคี่น

สายอากาศแถวลาคี่นคือ การนำสายอากาศหลายต้นวางเป็นรูปแบบต่างๆ ที่เหมาะสม จะทำให้สามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับภาคส่ง และสามารถเพิ่มอัตรากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนได้ที่ภาครับ และการปรับเฟส

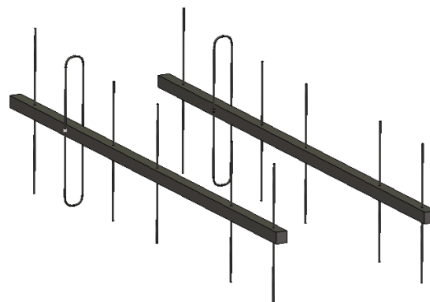


ภาพที่ 11 ค่า s_{11} หลังการปรับความยาว s_{65}



ภาพที่ 12 การแผ่กำลังงานของสายอากาศยาคี่-อุดะ 6 อิลิเมนต์

สัญญาณบนสายอากาศแถวลาคี่นแต่ละต้น จะสามารถกำหนดทิศทางของลาคี่นได้ โดยใช้หลักการต่อไปนี้



ภาพที่ 13 สายอากาศยาคี่-อุดะแถวลาคี่นแบบเส้น 1x2

2.1 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับมีการวางตัวหลายรูปแบบ เช่น สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น สายอากาศแถวลำดับระนาบ สายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับกำลังงานที่ต้องการ ลักษณะพื้นที่ใช้งาน เป็นต้น งานวิจัยนี้จำลองสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น สายอากาศแถวลำดับระนาบ ที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานใน

เครือข่าย LoRa สายอากาศที่ใช้จำลองมีลักษณะตามภาพที่ 13

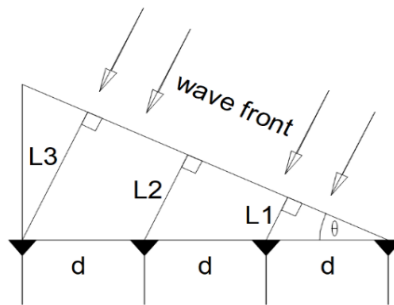
โดยพลังงานรวมของสนามไฟฟ้า E_T จากสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น (Pongnarin, 2009) คำนวณจากความเข้มสนามไฟฟ้าของสายอากาศยาคิ-อูตะ 1 ดันที่มุมใดๆ และค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบเส้น (AF : Array factor) ดังสมการ

$$E_T = E_\alpha \times AF \quad (4)$$

เมื่อ

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\epsilon\right)}{\frac{\epsilon}{2}} \right] \quad (5)$$

เมื่อ $\epsilon = kdcos\beta$, $k = 2\pi/\lambda$ และ $\beta = 90 - \theta$ (ในภาพที่ 14)

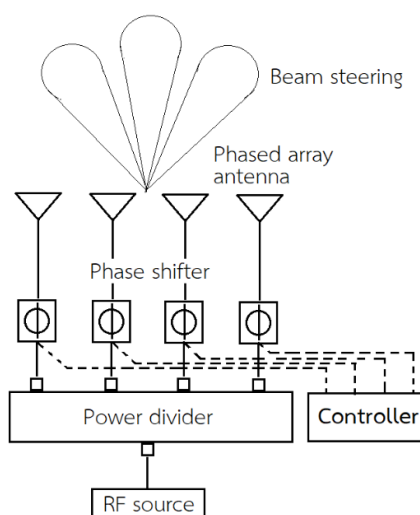


ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของหน้าคลื่นและความต่างเฟสบนสายอากาศ

2.2 การควบคุมทิศทางลำคลื่นจากการปรับเฟส

ลำคลื่นที่พุ่งออก หรือพุ่งเข้า สายอากาศแถวลำดับ (Phased array antenna) จะทำมุม θ เท่ากัน เมื่อ

พิจารณาที่สนามระยะไกล (Far-fields) ซึ่งเป็นระยะที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่น หรือความถี่ ดังการอธิบายในภาพที่ 14 คือ



ภาพที่ 15 การควบคุมเฟสของระบบสลับลำคลื่น

สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น 1x4 ที่มีสายอากาศ 4 ต้น สายอากาศต้นทางขวาสุดจะมีระยะห่างจากหน้าคลื่น (Wave front) สั้นที่สุด ในขณะที่สายอากาศต้นถัดมาทางซ้ายจะมีระยะห่างยาวกว่าเป็นระยะ L_1 L_2

และ L_3 ซึ่งจะมีผลกับการหน่วงเวลา หรือความต่างเฟสของสัญญาณบนสายอากาศแต่ละต้นในชุดแถวลำดับ ดังนั้นความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นจะคำนวณได้จาก

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} \quad (6)$$

เมื่อ L คือระยะห่างระหว่างสายอากาศกับหน้าคลื่นที่แตกต่างกันระหว่างสายอากาศที่อยู่ติดกัน เมื่อ $L_1 = d \sin\theta = L_2 - L_1 = L_3 - L_2$ โดยที่ θ คือมุมที่หน้าคลื่นทำกับระนาบสายอากาศ และ d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในงานวิจัยนี้ใช้ $d = \lambda/2$ ทำให้สายอากาศแต่ละต้นมีเฟสต่างกัน $\Delta\phi = \pi \sin\theta$

2.3 ระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น

การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศลำดับ ใช้การกำหนดความต่างเฟสของสัญญาณบนสายอากาศแต่ละต้น โดยคำนวณจากสมการที่ 6 นำไปกำหนดค่าของตัวเลื่อนเฟส (Phase shifter) เพื่อให้เพื่อให้สัญญาณที่ออก หรือเข้าสู่ชุดสายอากาศแถวลำดับ มีกำลังรวมสูงสุดที่เกิดจากการมีเฟสตรงกันของสัญญาณแต่ละเส้นทาง ตัวเลื่อนเฟสใช้สัญญาณทางไฟฟ้าควบคุมมีสองประเภท คือ แบบสัญญาณ

แอนะล็อกปรับการเลื่อนเฟสโดยใช้การปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแบบสัญญาณดิจิทัลที่ใช้การป้อนชุดบิตดิจิทัลให้อุปกรณ์เพื่อปรับเฟสสัญญาณที่เข้ามา ดังภาพที่ 15 เป็นระบบสลับลำคลื่น เมื่อ การ ควบคุม ทิศ ทาง ของ ลำ คลื่น ใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล และควบคุมการเลื่อนเฟสของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวอย่างเหมาะสม เพื่อให้ลำคลื่นที่รวมตัวกันมีทิศทางตามต้องการ

นอกจากนี้การปรับลำคลื่นอีกวิธีคือ การใช้ บัทเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) ซึ่งประกอบด้วยวงจรปรับเฟส ร่วมกับไฮบริดคัปเลอร์ เพื่อเลื่อนเฟสของสัญญาณที่มีหลายเส้นทางในอุปกรณ์ โดยพอร์ตขาเข้าและขาออกมีหลายพอร์ต การกำหนดทิศทางของลำคลื่น จะต้องเลือกพอร์ตขาเข้า 1 พอร์ต โดยใช้แบบแมนนวล หรือใช้พินไดโอดสวิตช์ (SPST: Single

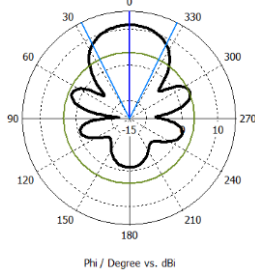
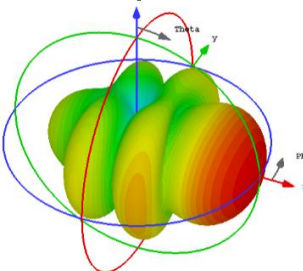
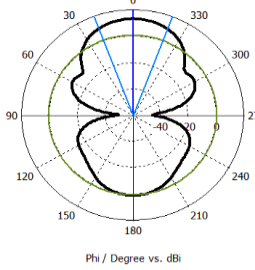
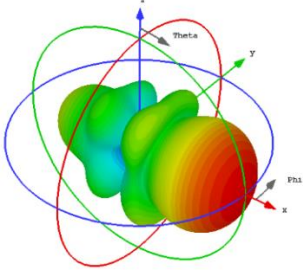
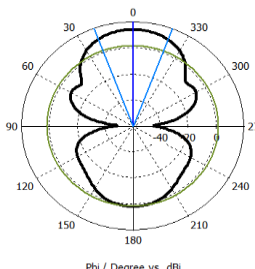
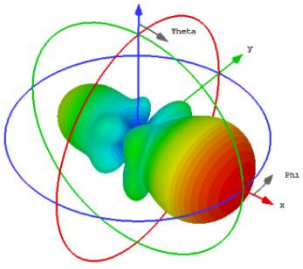
pole single throw) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเลือกเส้นทางการป้อนสัญญาณเข้าพอร์ทบัสเทอร์เมทริกซ์

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

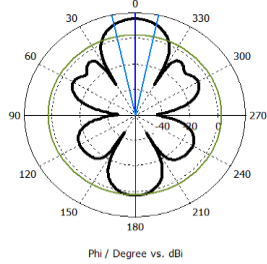
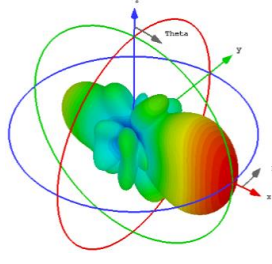
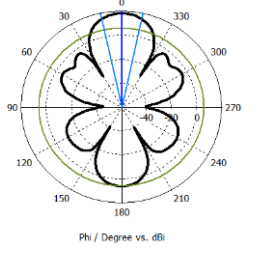
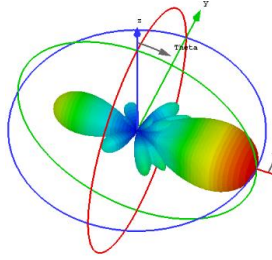
เมื่อนำสายอากาศยาภิ-อูตะมาเรียงเป็นแถว ลำดับแบบต่างๆ รูปแบบการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศ ก็จะเปลี่ยนแปลงไป และอัตราขยายของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับพลังงานรวมของสนามไฟฟ้า

ในสมการที่ 4 (Pongnarin, 2009) ในส่วนของการวิเคราะห์ด้านกำลังงาน และระยะทางการส่งสัญญาณ ได้อธิบายไว้ในส่วนแรก โดยใช้คุณสมบัติต่างๆ ของเครือข่าย LoRa เช่น กำลังส่ง อัตราการสูญเสียกำลังงาน และความไวของเครื่องรับ LoRa ที่ทำงานบนความถี่ 920 MHz และส่วนสุดท้ายได้กล่าวถึงผลการจำลอง และผลการทดลองปรับทิศทางพหุหลักของลำคลื่น เมื่อมีการปรับความต่างเฟสของสายอากาศแถวลำดับแต่ละชุด ผลการวิจัยทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2 ลักษณะการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศยาภิ-อูตะแถวลำดับรูปแบบต่างๆ

รูปแบบแถวลำดับ	2Ds-Farfields	3Ds-Farfields	อัตราขยาย (dBi)
1x1			11.1
1x2			13.0
2x2			14.0

ตารางที่ 2 (ต่อ)

รูปแบบแถวลำดับ	2Ds-Farfields	3Ds-Farfields	อัตราขยาย (dBi)
1x4			15.2
4x4			18.1

3.1 ผลการจำลอง

จากภาพที่อธิบายไว้ในตารางที่ 2 อัตราขยายของสายอากาศยา-อูอะแถวลำดับ รูปแบบต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน สัมพันธ์กับจำนวนของแถวลำดับ โดยรูปแบบ 1x1 มีอัตราขยาย 11.1 dBi รูปแบบ 1x2 มีอัตราขยาย 13.0 dBi รูปแบบ 2x2 มีอัตราขยาย 14.0 dBi รูปแบบ 1x4 มีอัตราขยาย 15.2 dBi และรูปแบบ 4x4 มีอัตราขยาย 18.1 dBi จึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนแถวลำดับ จะส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สายอากาศแถวลำดับ 1x4 จะมีอัตราขยายมากกว่าแบบต้นเดี่ยว (1x1) ประมาณ 4 dB (Dao *et al.*, 2016; Naeini and Fakharzadeh, 2017; Ramadan and Gabriel, 2009) เมื่อพิจารณาการคำนวณกำลังงานในตารางที่ 3 ที่มีการกำหนดกำลังส่ง อัตราขยาย การสูญเสียกำลังงานระบบที่ใช้สายอากาศแถวลำดับ 1x4 ส่งได้ไกลกว่าแบบสายอากาศต้นเดี่ยวประมาณ 34 กิโลเมตร (Seye *et al.*, 2018) และจากผลการจำลองพบว่าสายอากาศยา-อูอะ รูปแบบแถวลำดับ 4x4 มีอัตราขยายสูงสุดที่ 18.1 dBi ซึ่งสูงกว่าแบบแถวลำดับ 1x4 เกือบ 3 dBi

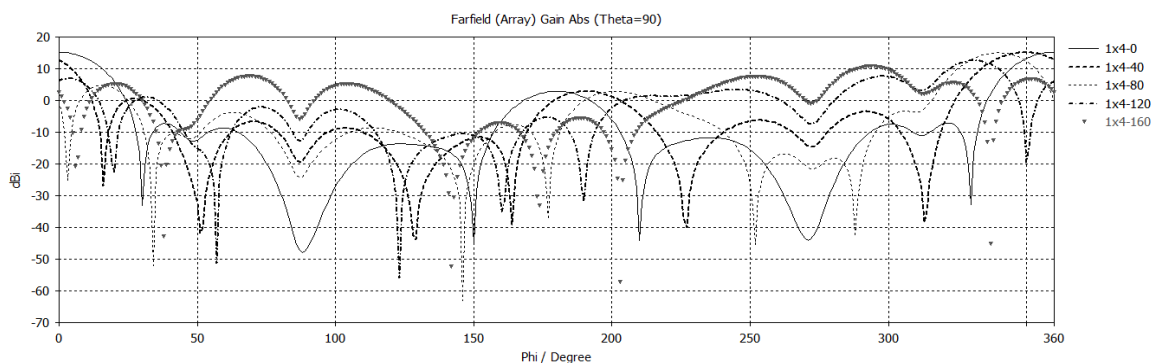
ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุด สัมพันธ์กับข้อมูลในตารางที่ 3 นอกจากนี้สายอากาศยา-อูอะรูปแบบแถวลำดับ 4x4 มีมุมการแผ่กำลังงานของพูลหลักแคบที่สุด สามารถลดการแทรกสอดกับสถานีข้างเคียงได้ดี แต่ในทางปฏิบัติ การใช้สายอากาศหลายต้นต้องใช้พื้นที่การติดตั้งมากกว่าแบบต้นเดี่ยวเพื่อลดปัญหาการเชื่อมต่อรวมของสายอากาศ (Mutual coupling) ที่ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง (Lui *et al.*, 2009) โดยทั่วไปการวางสายอากาศแต่ละต้นห่างกัน 0.5λ แต่ไม่เกิน 1λ เพื่อลดการรบกวนระหว่างสายอากาศ ซึ่งการจำลองสายอากาศในบทความนี้ทดลองที่ความถี่ 920 MHz สายอากาศแต่ละชุดวางห่างกันไม่เกิน 32.6 เซนติเมตร ดังนั้นการเลือกใช้รูปแบบแถวลำดับของสายอากาศจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่ในการติดตั้งสายอากาศด้วย

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกำลังงาน และระยะทางการส่งสัญญาณจากภาคส่งใช้สายอากาศโพลีเอทไคโพล สายอากาศยา-อูอะแบบต้นเดี่ยว และแบบสายอากาศยา-อูอะแถวลำดับ โดยที่ภาครับใช้

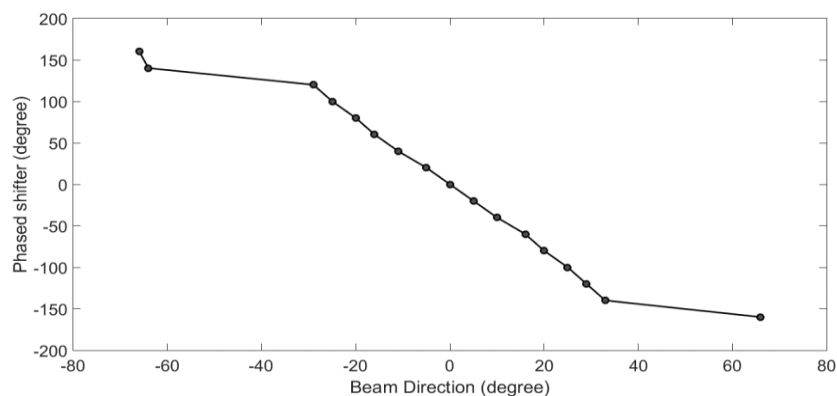
สายอากาศแบบโพลเด็คไดโพล (แบบ A ในตาราง) เปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศยาคิ-อูเดต้นเดี่ยว (แบบ B ในตาราง) โดยกำหนดให้ระบบสื่อสาร LoRa ที่จำลองมีกำลังส่งเท่ากับที่ 20 มิลลิวัตต์หรือประมาณ 13 dBm มีการสูญเสียกำลังงานรวม 40 dB ที่เกิดในเครื่องส่งรวมกับเครื่องรับ ประกอบด้วย การสูญเสียกำลังในสายส่ง คอนเน็คเตอร์ จัมเปอร์ วงจรเลื่อนเฟส และอุปกรณ์แยกสัญญาณ กำหนดให้อัตราขยายสายอากาศด้านส่งมีค่าแตกต่างกันตามรูปแบบของสายอากาศ โดยที่อัตราขยายสายอากาศด้านรับคงที่ที่ 2.7 dBi และ 11.1 dBi และเครื่องรับมีความไวในการรับสัญญาณเท่ากับที่ -140 dBm ในส่วนของค่า EIRP (Effective Isotropic Radiated

Power) ของสายอากาศยาคิ-อูเด รูปแบบต่างๆ จะมีค่าแตกต่างกันตามอัตราขยายสายอากาศที่ไม่เท่ากัน เช่น สายอากาศยาคิ-อูเด รูปแบบแถวลำดับ 1x4 มีค่า EIRP 8.2 dBm และรูปแบบแถวลำดับ 4x4 มีค่า EIRP 11.1 dBm เมื่อกำหนดให้ภาคส่งและภาครับมีการสูญเสียกำลังงาน 20 dB เท่ากัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศในแถวลำดับจะทำให้ได้อัตราขยาย และระยะทางส่งสัญญาณได้มากขึ้น โดยเฉพาะถ้าเปลี่ยนสายอากาศภาครับจากสายอากาศโพลเด็คไดโพลไปเป็นสายอากาศยาคิ-อูเดต้นเดี่ยวจะสามารถเพิ่มระยะส่งสัญญาณได้เกือบ 2 เท่า ระยะทางส่งสัญญาณในตารางที่ 3 ได้มาจากสมการต่อไปนี้

$$RSL = P_T - (92.45 + 20\log f + 20\log d) + G_T - L_T + G_R - L_R \quad (7)$$



ภาพที่ 16 ลักษณะการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศยาคิ-อูเดแถวลำดับ 1x4 เมื่อปรับความต่างเฟส



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสในสายอากาศยาคิ-อูเดแถวลำดับ 1x4 และทิศทางลำคลื่น

เมื่อ RSL คือระดับสัญญาณที่เครื่องรับ, P_T คือ กำลังงานเครื่องส่ง, f คือความถี่หน่วย GHz, d คือระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับหน่วยกิโลเมตร, G_T และ G_R คืออัตราขยายสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ตามลำดับ, L_T และ L_R คือการสูญเสียกำลังงานในภาคส่งและภาครับ ตามลำดับ โดยที่ภาครับมีการเผื่อระดับกำลังงานด้วยค่าเฟสมาจึน $P_{MG} = RSL - R_x$ เมื่อ R_x คือความไวของวงจรเครื่องรับ

ตารางที่ 4 อธิบายลักษณะทิศทางลำคลื่นของสายอากาศยagi-อูเดลำดับ 1x4 เมื่อปรับความต่างเฟสจะเห็นได้ว่าทิศทางพหุหลักของลำคลื่นค่อยๆ เบนไปที่ละนิด ในช่วงความต่างเฟส 0-120 องศา และทิศทางพหุหลักของลำคลื่นจะเบนไปอย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างเฟสของสายอากาศมากกว่า 120 องศา ซึ่งสัมพันธ์กับภาพที่ 16 และ 17 เมื่อพิจารณา

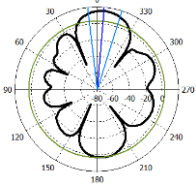
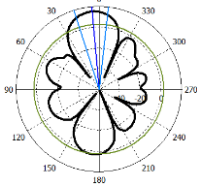
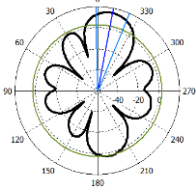
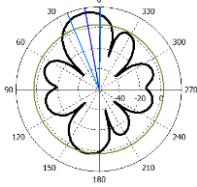
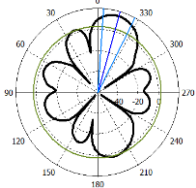
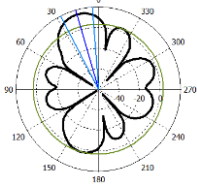
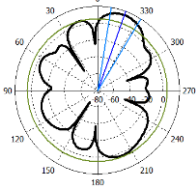
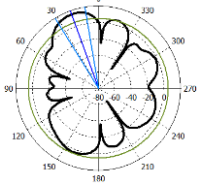
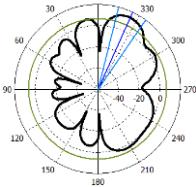
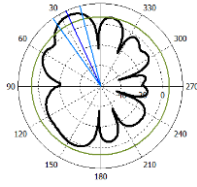
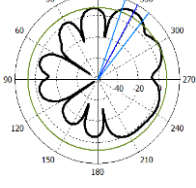
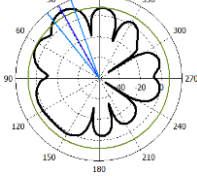
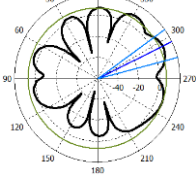
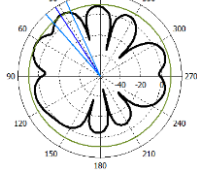
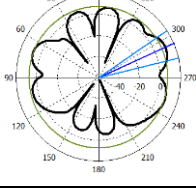
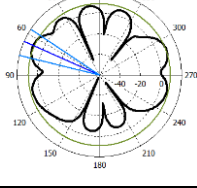
ความต่างเฟสที่ 160 ทั้งด้านบวกและลบ จะมีทิศทางพหุหลักเบนไปประมาณ 70 องศา ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าต้องการปรับทิศทางพหุหลักให้เบนมากขึ้น สามารถทำได้โดยหมุนสายอากาศไปในทิศทางที่ต้องการเนื่องจากเมื่อปรับความต่างเฟสมากกว่า 160 องศาจะมีเปลี่ยนแปลงการเบนทิศทางพหุหลักไม่มากนัก

ภาพที่ 16 อธิบายลักษณะการแผ่สนามระยะไกล เมื่อปรับเฟสแตกต่างกัน ตั้งแต่ 0 - 160 องศา จะสังเกตได้ว่าในช่วงความต่างเฟส 0 - 120 องศา มีทิศทางการแผ่สัญญาณของพหุหลักไม่ต่างกันมากนัก ในขณะที่ช่วงการเลื่อนเฟส 160 องศา มีทิศทางของพหุหลักเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความละเอียดในการปรับทิศทางของพหุหลักจะมีช่วงที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ในภาพที่ 17 ที่อธิบายความสัมพันธ์ของความต่างเฟสในสายอากาศลำดับและทิศทางลำคลื่น

ตารางที่ 3 กำลังงานและระยะทางส่งสัญญาณ

Antenna Fc=920MHz	Tx Power (dBm)	Loss in systems (dB)	G _T (dBi)	G _R (dBi)	Rx Sensitivity (dBm)	FSPL (dB)	Distance (km)
Folded dipole	13	-40	2.7	2.7 (A)	-140	-118.4	21.58
Yagi-Uda			11.1			-126.8	56.77
Yagi-Uda 1x2			13.0			-128.7	70.65
Yagi-Uda 2x2			14.0			-129.7	79.27
Yagi-Uda 1x4			15.2			-130.9	91.02
Yagi-Uda 4x4			18.1	-133.8		127.09	
Yagi-Uda 1x4			15.2	11.1 (B)		-139.3	239.40
Yagi-Uda 4x4			18.1	11.1 (B)		-142.2	334.29

ตารางที่ 4 ทิศทางพู่หลักของสายอากาศยagi-อูเดแวลำดับ 1x4 เมื่อปรับความต่างเฟส

ความต่างเฟส ($\Delta\phi$)	2Ds-Farfields	ความต่างเฟส ($\Delta\phi$)	2Ds-Farfields
20		-20	
40		-40	
60		-60	
80		-80	
100		-100	
120		-120	
140		-140	
160		-160	

3.2 ผลการทดลองปรับทิศทางลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ

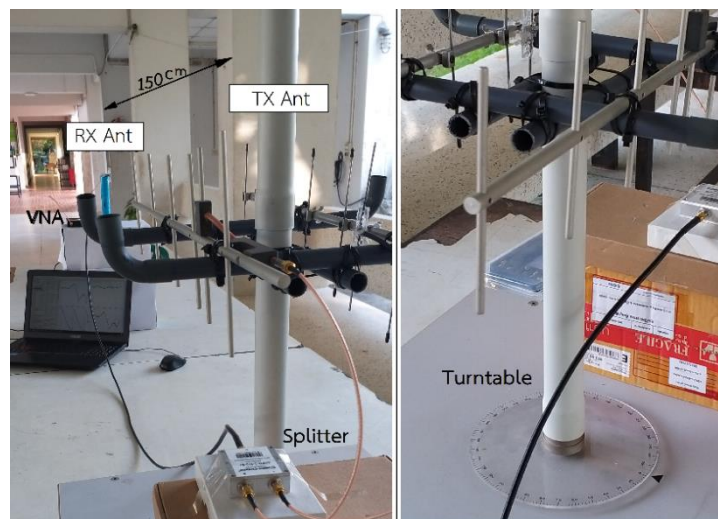
จัดทำทดลองที่อาคารวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายต่อกับสายอากาศยาคิ-อุตะ 6 อิลิเมนต์แถวลำดับแบบเส้น 1x2 ส่งสัญญาณผ่านอากาศไปยังสายอากาศไดโพลห่างออกไป 150 เซนติเมตร โดยสายอากาศสูงจากพื้น 50 เซนติเมตร ตามภาพที่ 18 ใช้ตัวปรับเฟสแบบคงที่ 120 องศา ที่ความถี่ 920 MHz เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายต่อกับตัวแยกสัญญาณของ Mini-Circuits แบบ 2 ทางรุ่น ZAPD-2-272-S+ ใช้แทนหมุนปรับมุมกวาดของสายอากาศยาคิ-อุตะ 6 อิลิเมนต์แถวลำดับแบบเส้น 1x2 วางห่างกันครึ่งคลื่น โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใช้ตัวปรับเฟส กับกรณีใช้ตัวปรับเฟส จากการทดลองพบว่าทิศทางลำคลื่นมีความแตกต่างกันดังตารางที่ 5

ภาพที่ 19 การวัดเฟสสัญญาณช่วงความถี่ 700-1200 MHz เมื่อเส้นกราฟ Reference phase คือ เฟสของสายจัมเปอร์ที่ต่อกับสายอากาศยาคิต้นแรก

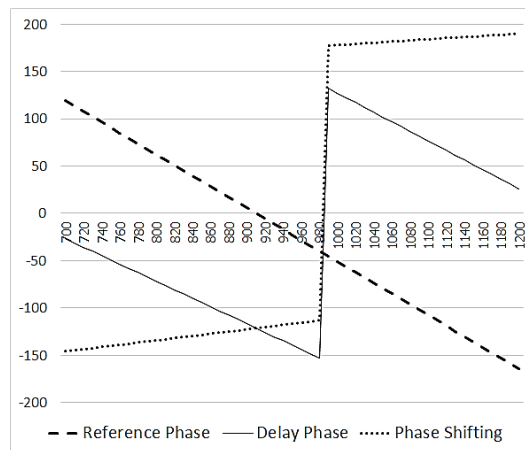
เส้นกราฟ Delay phase คือ เฟสของสายจัมเปอร์ที่ต่อกับตัวเลื่อนเฟสและต่อกับสายอากาศยาคิต้นที่สอง และเส้นกราฟ Phase shifting คือความต่างเฟสระหว่างสายอากาศทั้งสองต้น มีค่าประมาณ 120 องศาที่ความถี่ 920 MHz

ภาพที่ 20 ค่า S_{21} ที่วัดจากเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายที่ทำการทดลองตามภาพที่ 18 ในช่วง 700-1200 MHz

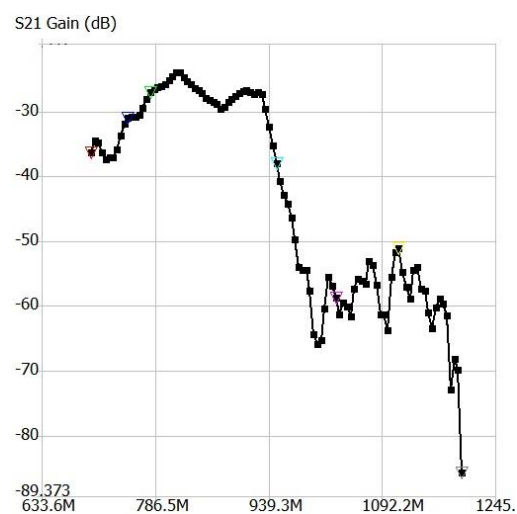
ตารางที่ 5 เมื่อปรับมุมกวาดสายอากาศบน Turntable ในภาพที่ 18 พบว่า เมื่อความต่างเฟส $\Delta\phi=0^\circ$ มีค่า S_{21} สูงสุด -27.5 dB ที่มุมกวาด 0° และเมื่อความต่างเฟส $\Delta\phi=120^\circ$ มีค่า S_{21} สูงสุด -27.7 dB ที่มุมกวาด -30° ดังนั้น เมื่อปรับความต่างเฟสระหว่างสายอากาศจะทำให้ลำคลื่นปรับทิศทางไปประมาณ -30° ซึ่งสัมพันธ์กับทฤษฎีในสมการที่ 6 ลำคลื่นปรับมุม -41.8° เมื่อความต่างเฟส $\Delta\phi=120^\circ$ จึงมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 28 เนื่องจากพื้นที่ทดลองบางจุดมีวัตถุสะท้อนคลื่น



ภาพที่ 18 การทดลองปรับทิศทางลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ



ภาพที่ 19 ความต่างเฟสระหว่างสายอากาศ



ภาพที่ 20 ค่า S_{21} จากการทดลอง

ตารางที่ 5 การวัดทิศทางพหุหลักเมื่อปรับเฟส

มุมกวาด (องศา)	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} : dB)	
	$\Delta\phi=0^\circ$	$\Delta\phi=120^\circ$
-60	-42.7	-41.3
-45	-40.0	-32.6
-30	-37.5	-27.7
-15	-34.0	-29.2
0	-27.5	-33.1
15	-28.1	-35.7
30	-28.7	-36.4
45	-33.3	-37.3
60	-43.5	-45.1

สรุป

งานวิจัยนี้อธิบายขั้นตอนการออกแบบสายอากาศยาคี-อู๊ดะสำหรับนำไปจำลองใช้เป็นสายอากาศยาคี-อู๊ดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่าย LoRa ที่ย่าน 920 MHz มีการจำลอง และการทดลองการเบนพหุหลักของลำคลื่นเมื่อมีการปรับเฟสในระบบสลับลำคลื่น พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ของสายอากาศยาคี-อู๊ดะ จะทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปจัดเรียงเป็นสายอากาศยาคี-อู๊ดะแถวลำดับ จะสามารถเพิ่มอัตราขยายมากขึ้นไปอีก สามารถส่งสัญญาณได้ไกลกว่าสายอากาศแบบทั่วไปหลายกิโลเมตร นอกจากนี้เมื่อสถานีเกิดเวกซ์ของระบบ LoRa หรือสถานีเซนเซอร์ของระบบ LoRa เปลี่ยนพิกัดตำแหน่ง จากผลการจำลองและผลการทดลอง พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถปรับเบนทิศทางลำคลื่นได้ โดยการควบคุมความต่างเฟสระหว่างสายอากาศ

เอกสารอ้างอิง

- Balanis, C.A. 2005. **Antenna Theory Analysis and Design**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Dao, H.N., Krairiksh, M. and Le, D.T. 2016. A design of Switched-Beam Yagi-Uda antenna for wireless sensor networks, pp. 393-396. *In 2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. Radio Electronics Association of Vietnam (REV) and the IEEE Communications Society (IEEE ComSoc), Bangkok, Thailand.
- Khutsoane, O., Isong, B. and Abu-Mahfouz, A.M. 2017. IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN, pp. 6107-6112. *In IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, Beijing, China.
- Lui, H., Hui, H. and Leong, M.S. 2009. A note on the Mutual-Coupling problems in transmitting and receiving antenna arrays. **IEEE Antennas and Propagation Magazine** 51(5): 171-176.
- Mushtaq, A., Gupta, S.H. and Rajawat, A. 2020. Design and performance analysis of LoRa LPWAN antenna for IoT applications, pp. 1153-1156. *In 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. IEEE, Noida, India.
- Naeini, M.R. and Fakharzadeh, M. 2017. A 28 GHz Beam-Switching Yagi-Uda array using Rotman lens for 5G wireless communications, pp. 2617-2618. *In 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. San Diego, CA.
- Pham, C., Ferrero, F., Diop, M., Lizzi, L., Dieng, O. and Thiare. 2017. Low-cost antenna technology for LPWAN IoT in rural applications, pp. 1-6. *In 2017 7th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*. Vieste, Italy.
- Pongnarin, S. 2009. Performance enhancement of GPRS systems for the mobile client using switched beam antennas. Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)

- Ramadan, A.A. and Gabriel, M.R. 2009. High-Gain Yagi-Uda antennas for Millimeter-Wave Switched-Beam systems. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation** 57(11): 3672-3676.
- Rehfuess, U. and Ivanov, K. 2000. Estimating the gains of adaptive antenna systems for GPRS and EDGE data services in GSM networks, pp. 3026-332. *In* **2000 52nd Vehicular Technology Conference (VTC)**. IEEE, Tokyo, Japan.
- Ron, D., Lee, C., Lee, K., Choi, H. and Lee, J. 2020. Performance analysis and optimization of downlink transmission in LoRaWAN class B mode. **IEEE Internet of Things Journal** 7(8): 7836-7847.
- Seye, M.R., Ngom, B., Gueye, B. and Diallo, M. 2018. A Study of LoRa coverage: Range evaluation and channel attenuation model, pp. 1-4. *In* **2018 1st International Conference on Smart Cities and Communities (SCCIC)**. IEEE, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Silva, J.M., Roy, S. and Fortier, P. 2003. The impact on the capacity of a GSM/GPRS system using space-time processing techniques, pp. 977-980. *In* **Electrical and Computer Engineering, 2003. (CCECE 2003)**. IEEE, Montreal, Quebec, Canada.
- Takano, T., Saegusa, K. and Hosono, H. 2013. A Large -Scale phased array antenna its applications and key technologies, pp. 1-6. *In* **2013 International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)**. IEEE, Dhanbad, India.
- Thiele, G.A. 1969. Analysis of Yagi-Uda-Type antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation** 17(1): 24-31.
- Toma, R. and Gemein, O.G. 2018. LoRa network for cities private and complete secured by design, pp. 1-5. *In* **2018 Global Internet of Things Summit (GloTS)**. IEEE, Bilbao, Spain.
- Zhou, Q., Zheng, K., Hou, L., Xing, J. and Xu, R. 2019. Design and implementation of open LoRa for IoT. **IEEE Access** 7: 100649-100657.