



สายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสดวงลำดับสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากการสื่อสาร 5G

คมกฤษ บุญยิ่ง^{1*} ภัทรวดี บุญยิ่ง² และ คมยุทธ ไชยวงษ์³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

² คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ, มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ

³ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ E-mail: komkris.boo@rmutr.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 มีนาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 14 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 16 กรกฎาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายผ่านการใช้สายอากาศพื้นผิวอภิวัดและวงจรจัดเรียงกระแสดวงที่ออกแบบมาในรูปแบบอาร์เรย์ขนาด 4×4 ประกอบด้วย สายอากาศ 16 ตัว และวงจรจัดเรียงกระแสดวง 32 วงจร โดยมีจุดประสงค์เพื่อเก็บพลังงานไร้สายจากสถานีฐาน 5G ที่ความถี่ 2.6 GHz สายอากาศได้รับการออกแบบชนิดแชนเนลพร้อมแผ่นแพร่กระจายคลื่นแบบวงกลม มีลักษณะโพลาริซเซชันเส้นคู่ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับคลื่นและเหมาะกับระบบ 5G สำหรับชั้นวางซ้อน หน่วยเซลล์ถูกสร้างในรูปแบบวงแหวนหกเหลี่ยมขนาด 3×3 ซึ่งช่วยให้การแพร่กระจายคลื่นเป็นไปในลักษณะเจาะจงทิศทาง และให้ค่าอัตราขยายสูงกว่า 9 dBi สำหรับทั้งสองโพลาริซเซชันที่ความถี่ 2.6 GHz วงจรจัดเรียงกระแสดวงเลือกใช้ไดโอดชอตต์กีรุ่น SMS7360 ซึ่งมีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานเท่ากับ 26.7% และสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 1.53 V เมื่อได้ระดับกำลังงานด้านเข้า 4 dBm และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 3 kΩ จากการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัดอาร์เรย์ 4×4 พบว่า การเชื่อมต่อวงจรแบบอนุกรมและแบบขนาน สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุดได้เท่ากับ 9.78 V และ 0.42 V ตามลำดับ โดยวัดจากด้านหลังของสายอากาศ 5G มีระยะ 3.5 เมตร งานวิจัยนี้แสดงถึงศักยภาพของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสดวงลำดับสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพในระบบ 5G โดยเน้นค่าอัตราขยายสูงของสายอากาศและความสามารถในการแปลงกำลังงานของวงจรจัดเรียงกระแส

คำสำคัญ: เก็บเกี่ยวพลังงาน; สายอากาศพื้นผิวอภิวัด; วงจรจัดเรียงกระแส และการสื่อสาร 5G

Metasurface Rectenna Array for Wireless Energy Harvesting from 5G Communications

Komkris Boonying^{1*}, Patharawadee Boonying² and Komyuth Chaiwong³

¹ Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin

² Faculty of Sports Science and Health, Thailand National Sports University,

³ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Loei Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: komkris.boon@rmutr.ac.th

Received: 1 March 2025; Revised 14 July 2024; Accepted: 16 July 2025

Online Published: 20 August 2025

Abstract: This article introduces a novel approach to wireless energy harvesting using a metasurface antenna array and rectifier circuits, designed in a 4×4 array configuration consisting of 16 antennas and 32 rectifier circuits. The system is aimed at harvesting wireless energy from 5G base stations operating at a frequency of 2.6 GHz. The antennas are designed with a suspended structure and circular radiating plate, featuring dual-linear polarization to enhance signal reception and ensure compatibility with 5G systems. For the superstrate layer, unit cells are arranged in a 3×3 hexagonal ring pattern, enabling unidirectional radiation and achieving a gain exceeding 9 dBi for both polarizations at the 2.6 GHz. The rectifier circuits utilize SMS736 Schottky diodes, offering a conversion efficiency of 26.7% and generating a maximum DC voltage of 1.53 V under an input power of 4 dBm with a load resistance of 3 kΩ. Experimental evaluation of the 4×4 metasurface antenna array revealed that series and parallel connections of the rectifier circuits produced maximum DC voltages of 9.78 V and 0.42 V, respectively, at a distance of 3.5 meters from the rear of the 5G antenna. This work demonstrates the potential of metasurface-based rectenna arrays for efficient wireless energy harvesting in 5G applications, highlighting their high gain performance and effective energy conversion capabilities.

Keywords: Energy harvesting; Metasurface antenna; Rectifying circuit and 5G communications



1. บทนำ

สายอากาศจัดเรียงกระแสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย (Wireless Energy Harvesting: WEH) โดยทำหน้าที่แปลงกำลังงานของคลื่นความถี่วิทยุให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และถูกซาร์จแบตเตอรี่หรือถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กต่างๆ [1-3] การเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีพื้นฐานจากเทคโนโลยีการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย (Wireless Power Transfer: WPT) ซึ่งเกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1888 และหลังจากปี ค.ศ. 1891 นิโคลา เทสลา ได้ทำการแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สำเร็จครั้งแรกของโลก [4,5] ด้วยเทคโนโลยีการส่งผ่านกำลังงานไร้สายได้ถูกพัฒนาและถูกใช้งานในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น การส่งผ่านพลังงานแสงอาทิตย์บนสถานีฐานอวกาศ การส่งผ่านกำลังงานคลื่นไมโครเวฟในอวกาศ และเทคโนโลยีการระบุตัวตน เป็นต้น

โดยทั่วไป สายอากาศจัดเรียงกระแสประกอบไปด้วยสายอากาศภาครับและวงจรจัดเรียงกระแส วงจรดังกล่าวจะถูกประกอบด้วย ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกับไดโอดจัดเรียงกระแส วงจรกรองความถี่ต่ำ และความต้านทาน (Load Resistor) สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานสามารถทำได้หลากหลายเทคนิควิธี อาทิเช่น การออกแบบสายอากาศต่อลำดับแถว [6,7] การออกแบบวงจรจัดเรียงกระแสไฟฟ้าให้มีหลายวงจร หรือการเพิ่มกำลังงานความถี่วิทยุทางด้านขาเข้า [8,9] การแทรกวงจรตัดฮาโมนิคเข้าไปยังวงจรจัดเรียงกระแสไฟฟ้า [10] และการเลือกประเภทไดโอดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกสูงสุด เช่น ไดโอดตัวถึง

SOT-23 ชนิดอนุกรมคู่ (Series Pair) จากผลจำลองการเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้งานประกอบด้วยไดโอดเบอร์ SMS7630 HSMS282x HSMS285x และ HSMS286x ตามลำดับ [11] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ไดโอดเบอร์ SMS7630 มีความไวต่อการรับกำลังงานต่ำๆ ได้ดีกว่าไดโอดเบอร์อื่นๆ และมีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ดีกว่าไดโอดเบอร์อื่นๆ แต่ในทางกลับกันจะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงน้อยกว่าไดโอดเบอร์อื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G (Sub-6 GHz) ที่ความถี่ 2.6 GHz กำลังงานที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศมีระดับกำลังงานต่ำ ดังนั้น ไดโอดซอตต์ก็ SMS7630 จึงมีความสำคัญและได้ถูกเลือกใช้งานในบทความวิจัยนี้ และยังมีบทความวิจัยอื่นได้เลือกใช้ไดโอดซอตต์ก็ SMS7630 ร่วมกับการออกแบบสายอากาศ เช่น บทความนี้ได้ออกแบบสายอากาศเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นชั้นบนสุดมีรูลักษณะ 3 แขน ชั้นที่ 2 เป็นชั้นล่างสุดออกแบบให้เป็นร่องว่างรูปทรงดอกจิก วงจรจัดเรียงกระแสเลือกใช้ไดโอดซอตต์ก็ SMS7630 ผลทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงาน 43% โดยสามารถนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ไปใช้งานกับอุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆ และ LED [12] คณะนักวิจัยได้ทำการออกแบบสายอากาศลีดฟิลิโอดิกบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่สามารถทำงานได้ถึง 4 ย่านความถี่ได้แก่ ย่าน FM GSM900 GSM1800 และ WIFI โดยใช้ไดโอดซอตต์ก็ SMS7630 ผลทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานเท่ากับ 70.28%, 41.7%, 33.37% และ 27.69% ณ ความถี่ 89 MHz, 900 MHz, 1,800 MHz และ 2,400 MHz ที่ระดับกำลังงาน



-6 dBm และการทดสอบประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานของสายอากาศนี้เท่ากับ 31.3% ที่ระดับกำลังงาน -15 dBm [13]

บทความวิจัยฉบับนี้นำเสนอสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสดวงลำดับขนาด 4x4 จำนวน 16 ตัว และวงจรจัดเรียงกระแสดวงจำนวน 32 วงจร เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G (2.6 GHz) การทดสอบใช้อาศัยเครื่อง Anritsu MS2090 ต่อเข้ากับโพรบไอโซทรอปิก (Isotropic Probe) วัดในโหมดความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field: EMF) โดยค่าที่วัดได้เป็นความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) มีหน่วยเป็น W/cm^2 ซึ่งเครื่องที่ใช้ในการทดสอบดังกล่าวแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ และจะถูกนำไปเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการจัดเรียงกระแสดวงของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

2. สายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสดวง

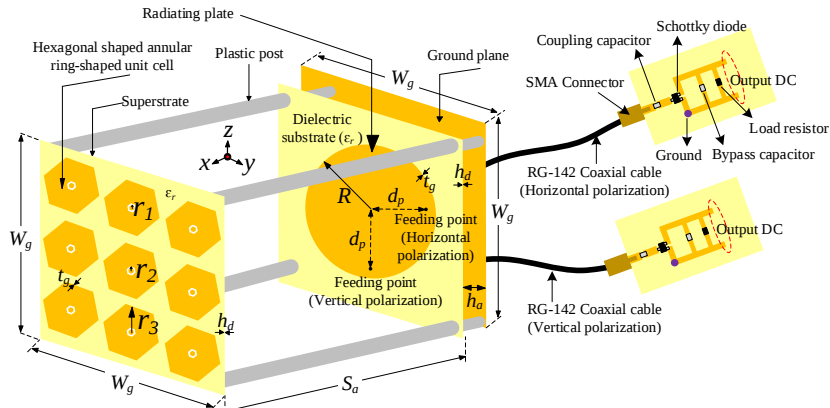
2.1 สายอากาศพื้นผิวอภิวัด

สายอากาศที่ได้นำเสนอถูกจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Studio Suit [14] และออกแบบโครงสร้างสายอากาศชนิดแขวนลอย (Suspended) [15] มีช่องว่างอากาศ (Air Gap: h_a) คั่นกลางระหว่างแผ่นแผ่กระจายคลื่น (Radiating Plate) และระนาบกราวด์ (Ground Plane) โดยโครงสร้างชนิดนี้มีอัตราขยายสูงกว่าสายอากาศโครงสร้างพื้นฐาน ในส่วนของแผ่นแผ่กระจายคลื่นออกแบบให้มีรูปร่างเป็นวงกลมพร้อมกระตุ้นสัญญาณโคแอกเซียล แบบโพลาริซิงเส้นคู่ คือ โพลาริซิงเส้นแนวตั้งและ

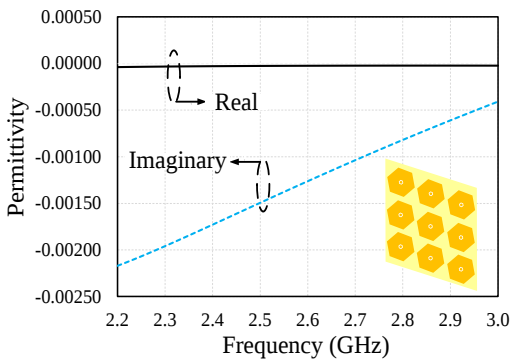
แนวนอน (Vertical and Horizontal Polarizations) โดยมีระยะจุดศูนย์กลางแผ่นแผ่กระจายคลื่นถึงจุดกระตุ้นสัญญาณ (d_p) ดังรูปที่ 1 สำหรับวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศเป็นชนิดอีพ็อกซี (Epoxy) มีความสูงเป็น h_d มีความหนา (t_g) ของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.035 mm มีค่าไดอิเล็กตริกคงที่ (ϵ_r) เท่ากับ 3.2 และค่าการสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับ 0.003 ตามลำดับ สำหรับชั้นวางซ้อน (Superstrate) ถูกวางเหนือสายอากาศชนิดแขวนลอยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ประกอบด้วย หน่วยเซลล์ (Unit Cell) มีขนาด 3x3 จำนวน 9 หน่วยเซลล์ แต่ละหน่วยเซลล์ออกแบบให้มีรูปร่างเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม (Hexagonal Annular Ring-shaped) โดยมีรัศมีวงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน (r_1) รัศมีช่องว่างวงแหวนหกเหลี่ยม (r_2) และรัศมีหกเหลี่ยมด้านนอก (r_3) นอกจากนี้ยังมีระยะห่างแต่ละหน่วยเซลล์คือ S_{uc} และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศชนิดแขวนลอยกับชั้นวางซ้อนเป็น S_a แสดงขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดที่ได้นำเสนอความถี่ 2.6 GHz

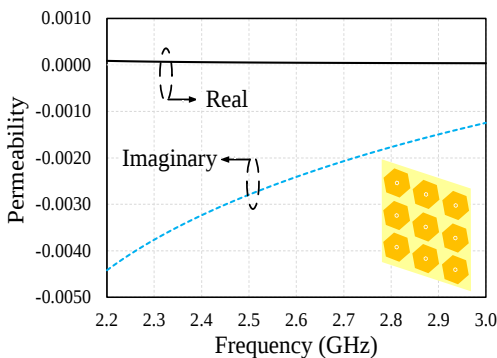
พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W_g	80	R	28.62
h_d	1.6	r_1	1.26
h_a	6	r_2	1.96
d_p	18	r_3	11.24
S_a	100	S_{uc}	24.6



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศพื้นผิววงรีจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 2 ผลจำลองค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของพื้นผิว
อภิวัด 3x3 ที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 3 ผลจำลองค่าความซึมซาบแม่เหล็กของพื้นผิว
อภิวัด 3x3 ที่ได้นำเสนอ

ในส่วนของชั้นวางซ้อนที่ได้นำเสนอได้ออกแบบเป็นวัสดุดัชนีเป็นศูนย์ (Zero-index Materials: ZIMs) มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity: ϵ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability: μ) เป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งเหมาะสมใช้ในงานเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย โดยพิสูจน์วัสดุดังกล่าวได้จากการจำลองผลดังรูปที่ 2 และ 3 ผลการจำลองค่าจริง (Real) ที่ความถี่ 2.6 GHz พบว่า มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก เท่ากับ 0.00002 และ 0.00005 ตามลำดับ ในส่วนของผลการจำลองค่าจินตภาพ (Imaginary) ที่ความถี่ 2.6 GHz พบว่า มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก เท่ากับ -0.00125 และ -0.0024 ตามลำดับ

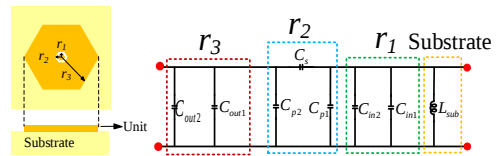
สำหรับวงจรสมมูลของหน่วยเซลล์ที่ได้นำเสนอถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย 1) ส่วนของวัสดุฐานรองปราศจากกระนาบกราวด์แทนด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L_{sub}) 2) รัศมีวงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน (r_1) แทนด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว (C_{in1} และ C_{in2}) 3) รัศมีวงแหวนหกเหลี่ยม (r_2) แทนด้วยตัวเก็บประจุ 3 ตัว (C_{p1} , C_{p2} และ C_s) และ 4) รัศมีหกเหลี่ยมด้าน



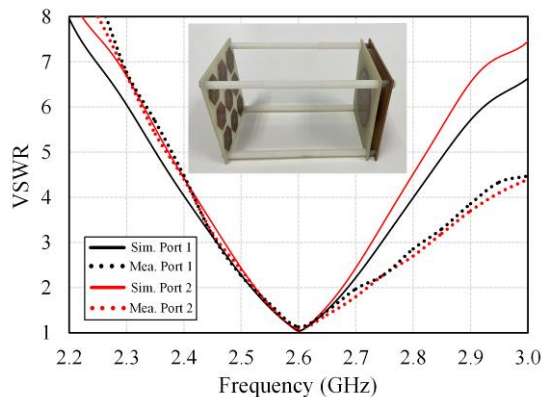
นอก (r_3) แทนด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว (C_{out1} และ C_{out2}) โดยผลรวมของตัวเก็บประจุของ r_1 r_2 และ r_3 จะขนานกับตัวเหนี่ยวนำของวัสดุฐานรองจะเกิดเป็นวงจรรีโซเนเตอร์ (LC Resonator) ดังรูปที่ 4

รูปที่ 5 เป็นผลจำลองและผลทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ของสายอากาศที่ได้นำเสนอ จากการจำลองผลพบว่า พอร์ตที่ 1 (Port 1) หรือโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้งครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.524-2.676 GHz และพอร์ตที่ 2 (Port 2) หรือโพลาริซเซชันเส้นแนวนอนครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.518-2.686 GHz ด้วยเงื่อนไข $VSWR \leq 2$ ในส่วนผลการทดสอบพบว่า พอร์ตที่ 1 ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.57-2.72 GHz และพอร์ตที่ 2 ครอบคลุมความถี่ 2.56-2.71 GHz ที่ความถี่กลาง 2.6 GHz พอร์ตที่ 1 และ 2 มีค่า VSWR เท่ากับ 1.100 และ 1.135 ตามลำดับ รูปที่ 6 คือผลจำลองและผลทดสอบค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Efficiency) ของโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้งและแนวนอน จากผลจำลองพบว่า โพลาริซเซชันเส้นแนวตั้งและแนวนอน มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ย (2.5-2.7 GHz) เท่ากับ 94.31 และ 93.31% และที่ความถี่กลาง 2.6 GHz มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นเท่ากับ 99% ทั้งสองโพลาริซ

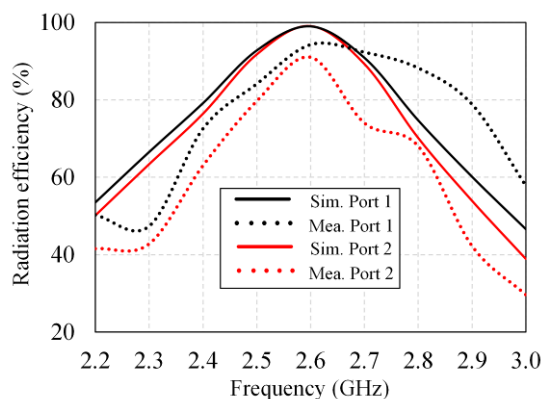
สำหรับในส่วนการทดสอบ ค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ยโพลาริซเซชันเส้นตั้งและแนวนอนพบว่า มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายกำลังงานเฉลี่ยโพลาริซเซชันเส้นตั้งและแนวนอนเท่ากับ 90.25 และ 81.55% และที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้งและแนวนอนเท่ากับ 94.28 และ 91.00% ตามลำดับ



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่ได้นำเสนอ



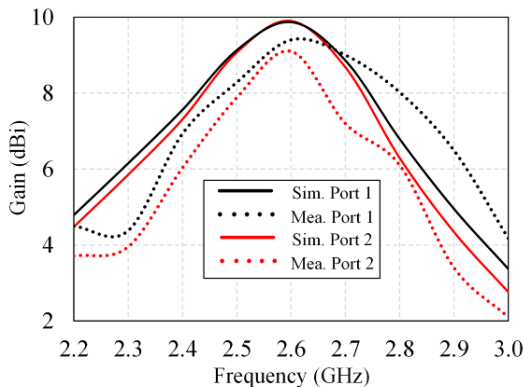
รูปที่ 5 ผลจำลองและผลทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดที่ได้นำเสนอ



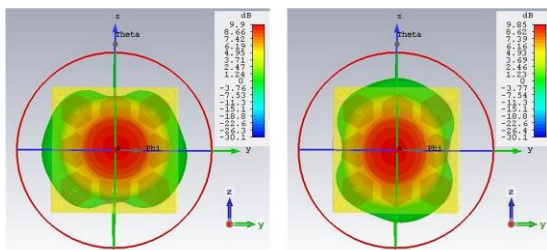
รูปที่ 6 ผลจำลองและผลทดสอบประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศพื้นผิวอภิวัด



บทความวิจัย



รูปที่ 7 ผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยายของสายอากาศพื้นผิวอวกาศที่ได้นำเสนอ

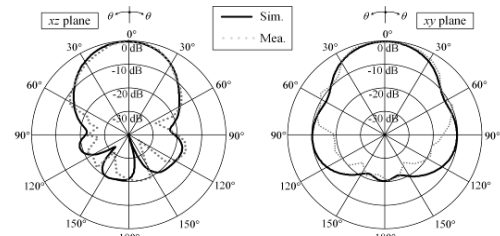


(ก) พอร์ตที่ 1

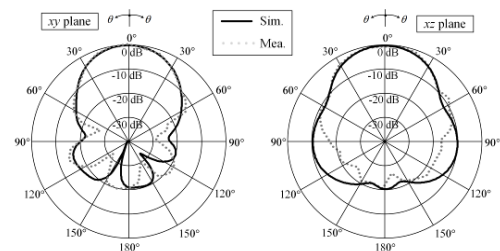
(ข) พอร์ตที่ 2

รูปที่ 8 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติของสายอากาศพื้นผิวอวกาศที่ได้นำเสนอ

จากรูปที่ 7 เป็นผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยาย (Gain) สายอากาศพื้นผิวอวกาศที่ได้นำเสนอผลจำลองพบว่า มีค่าอัตราขยายสายอากาศเฉลี่ยของพอร์ตที่ 1 และ 2 เท่ากับ 9.29 และ 9.22 dBi ที่ความถี่กลางมีค่าอัตราขยายสายอากาศที่พอร์ต 1 และ 2 เท่ากับ 9.90 และ 9.85 dBi ดังรูปที่ 7 และ 8 ในส่วนการทดสอบอัตราขยายสายอากาศ พบว่ามีค่าอัตราขยายเฉลี่ยพอร์ตที่ 1 และ 2 เท่ากับ 8.89 และ 8.06 dBi และที่ความถี่กลางมีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 9.40 และ 9.10 dBi ที่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 ตามลำดับ



(ก) พอร์ตที่ 1 (โพลาริเซชันเส้นแนวตั้ง)



(ข) พอร์ตที่ 2 (โพลาริเซชันเส้นแนวนอน)

รูปที่ 9 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

รูปที่ 9 เป็นผลจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศที่ได้นำเสนอทั้งสองพอร์ตบนระนาบ xz และ xy พบว่า ทั้งผลจำลองและผลทดสอบสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง (Uni-directional Radiation) ทั้งสองระนาบและทั้งโพลาริเซชันเส้นแนวตั้งและแนวนอน

2.2 วงจรจัดเรียงกระแส

จากรูปที่ 1 และ 10 แสดงโครงสร้างวงจรจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอประกอบด้วย ตัวเก็บประจุคัปปลิ่งทำหน้าที่ป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงไหลออกไปยังพอร์ตด้านขาเข้าหรือไหลเข้าไปยังฝั่งความถี่วิทยุ (RF) มีค่าเท่ากับ 100 pF ตัวเก็บประจุบายพาสทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมและกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบ



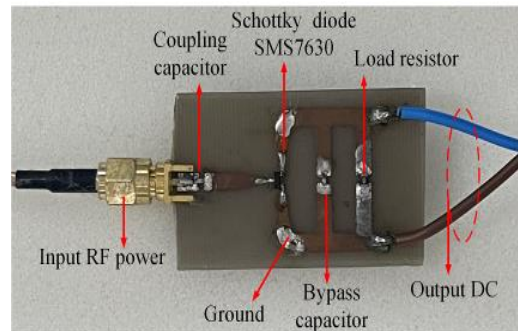
รวมถึงลดการเกิดฮาโมนิคระดับสูง มีค่าเท่ากับ 100 pF ไดโอดชอตต์กีเบอร์ SMS7630 ชนิดอนุกรมคู่ มีตัวถังขนาด SOT-23 ทำหน้าที่แปลงกำลังงานให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและตัวต้านทานโหลดของวงจรมีค่าเท่ากับ 3 k Ω

วงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบไม่ได้ใส่วงจรแมตชิ่งส่งผลทำให้ค่า S_{11} ที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าเท่ากับ -8.04 dB ดังรูปที่ 11

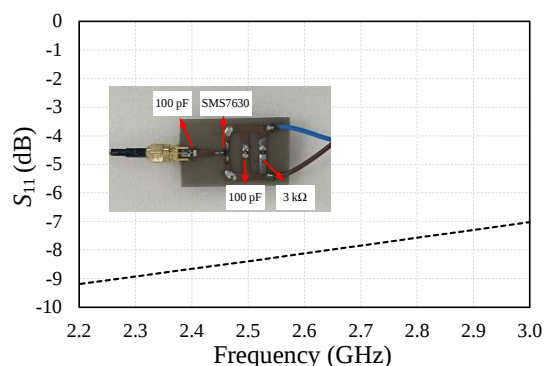
ส่วนการทดสอบวงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบ ได้อาศัยเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุหือ Rohde & Schwarz รุ่น SMC100A บ้อนความถี่ 2.6 GHz และทำการปรับเปลี่ยนระดับกำลังงานความถี่วิทยุด้านขาเข้าตั้งแต่ -30 dBm ถึง 20 dBm ในส่วนทางด้านขาออกของวงจรใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 12 จากการทดสอบพบว่า มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 1.75 V ที่ระดับกำลังงานขาเข้า 15 dBm แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุดเท่ากับ 0.01 V ที่ระดับกำลังงานขาเข้า -30 dBm และระดับกำลังงานขาเข้า 0 dBm จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0.94 V วงจรที่ได้นำเสนอพบว่า มีค่าประสิทธิภาพการแปลงสูงสุดเท่ากับ 26.7% ที่ระดับกำลังงาน 4 dBm และมีค่าประสิทธิภาพการแปลงเท่ากับ 10% มีระดับกำลังงานเท่ากับ -10 dBm ประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [13] สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\eta = \frac{V_{DC}^2}{P_{in} R_L} \times 100 \quad (1)$$

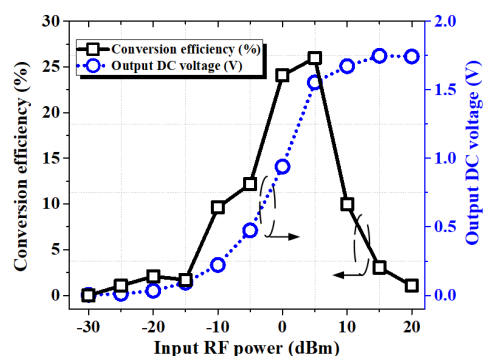
เมื่อ V_{DC} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง P_{in} คือ ระดับกำลังงานขาเข้า และ R_L คือ ตัวต้านทานโหลดของวงจร



รูปที่ 10 โครงสร้างวงจรต้นแบบ



รูปที่ 11 ผลการทดสอบค่า S_{11} ของวงจรจัดเรียงกระแส



ผลทดสอบวงจร

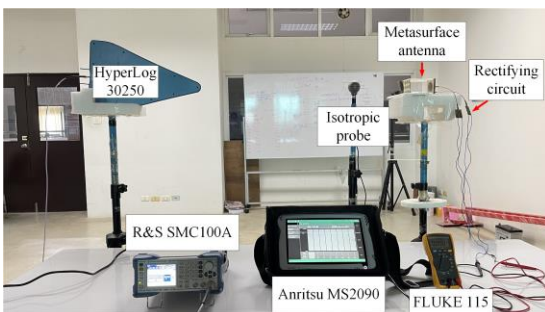
รูปที่ 12 วงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบที่ได้นำเสนอ



3. สายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสนับแบบ

3.1 การทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสนับ

สายอากาศพื้นผิวอภิวัดต่อเข้ากับวงจรจัดเรียงกระแสนับรูปที่ 1 ในส่วนการติดตั้งเพื่อใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ส่วนของภาคส่งใช้สายอากาศมาตรฐานล็อกพริไลโอติก ยี่ห้อ AARONIA AG รุ่น HyperLOG 30250 ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุยี่ห้อ Rohde & Schwarz รุ่น SMC100A และ 2) ส่วนของภาครับเป็นสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสนับที่ได้นำเสนอและใช้มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 115 วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านขาออกของวงจร ที่ความถี่ 2.6 GHz ได้ปรับเปลี่ยนระยะทางตั้งแต่ 0.5-2.5 m และทำการปรับเปลี่ยนระดับกำลังงานไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศที่เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก (Effective Isotropically Radiated Power: EIRP) ตั้งแต่ระดับกำลังงาน -18.6 ถึง 16.4 dBm ดังรูปที่ 13



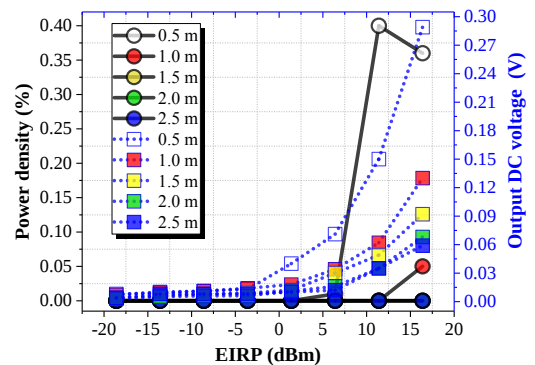
รูปที่ 13 การติดตั้งและการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสนับ

นอกจากนี้เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่วิทยุ Anritsu MS2090 ถูกต่อเข้ากับโพรบไอโซทรอปิกใช้โหมดความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อวัดค่าความหนาแน่นกำลังงาน ซึ่งจะถูกเปรียบเทียบกับสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสนับที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้ดังรูปที่ 13 โดยค่าความหนาแน่นกำลังงานมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังสมการที่ 2 และ 3

$$W_i = \frac{P_r}{A_{eff}} \quad (2)$$

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2 D_o}{4\pi} = \frac{V_{DC}^2}{R_A W_i} \quad (3)$$

โดยที่ P_r คือ กำลังงานที่รับได้ (W) A_{eff} คือ พื้นที่ประสิทธิภาพของสายอากาศ (m^2) และ R_A คือ ค่าความต้านทานสายอากาศ (Ω)



รูปที่ 14 ผลการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสนับที่ความถี่ 2.6 GHz (โพลาริซเซชันแนวดิ่ง)

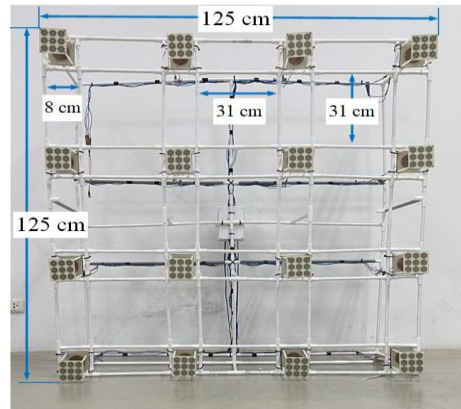
การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกำลังงานที่ความถี่ 2.6 GHz พบว่า ที่ระยะทาง 0.5 m เมื่อปรับเปลี่ยนกำลังงาน EIRP เท่ากับ 6.4, 11.4 และ 16.4 dBm



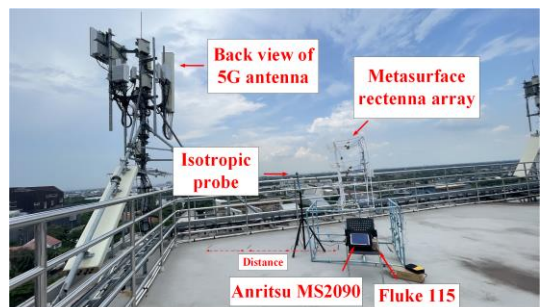
เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่วิทยุ MS2090 วัดค่า ความหนาแน่นกำลังงานได้เท่ากับ 0.01, 0.40 และ 0.36% บนระยะทาง 1.0 m เมื่อปรับเปลี่ยนกำลังงาน EIRP เท่ากับ 6.4, 11.4 และ 16.4 dBm เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่วิทยุ MS2090 วัดค่าความหนาแน่นกำลังงานได้เท่ากับ 0.00 และ 0.00% (ไม่สามารถอ่านค่าได้เนื่องจากมีระดับกำลังงานต่ำมาก) และ 0.05% ดังรูปที่ 14 สำหรับการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอวิสตูดจัดเรียงกระแสดังได้นำเสนอที่ความถี่ 2.6 GHz ด้วยโพลาริซเซชันแนวดิ่ง โดยกำหนดระยะทางการทดสอบเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 m เมื่อกำลังงาน EIRP เท่ากับ -18.6 dBm จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านขาออกเท่ากับ และ 0.008 0.007 0.004 0.003 และ 0.004 V ตามลำดับ เมื่อระดับกำลังงาน EIRP เท่ากับ -3.6 dBm ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านขาออกเท่ากับ 0.013 0.014 0.009 0.006 และ 0.008 V และเมื่อระดับกำลังงาน EIRP เท่ากับ 16.4 dBm จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0.289, 0.130, 0.092, 0.068 และ 0.059 V ตามลำดับ

3.2 การทดสอบสายอากาศพื้นผิวอวิสตูดจัดเรียงกระแสดลัดับ 4x4 ต้นแบบ

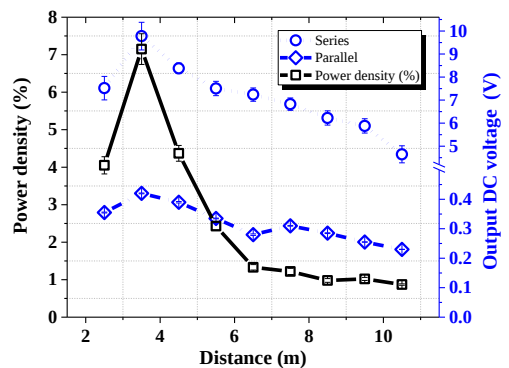
สายอากาศพื้นผิวอวิสตูดจัดเรียงกระแสดลัดับ (Array) ขนาด 4x4 จำนวน 16 ตัว และมีโพลาริซเซชันแนวดิ่งและแนวนอนรวมกัน 32 โพลาริซเซชันถูกต่อเข้ากับวงจรจัดเรียงกระแสดทั้งหมด 32 วงจร โดยโครงสร้างสายอากาศพื้นผิวอวิสตูดจัดเรียงกระแสดลัดับมีขนาด 125x125 cm สายอากาศพื้นผิวอวิสตูดจัดเรียงกระแสดแต่ละตัววางห่างกัน 31 cm ดังรูปที่ 15 ในส่วนรูปที่ 16 (ก) เป็นการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกำลังงานที่แพร่กระจายกำลังงานออกจากด้านหลัง



รูปที่ 15 สายอากาศพื้นผิวอวิสตูดจัดเรียงกระแสดลัดับต้นแบบ



(ก) การทดสอบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย



(ข) ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกำลังงานและผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย

รูปที่ 16 การทดสอบและผลการทดสอบ



สายอากาศ 5G ณ ชั้น 10 อาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ. นครปฐม

จากการทดสอบพบว่า ระยะทางระหว่างด้านหลังสายอากาศ 5G กับโพรบไอโซทรอปิก ที่ระยะทาง 3.5 m มีค่าความหนาแน่นกำลังงานมากที่สุดเท่ากับ 7.15% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เท่ากับ 0.41 สำหรับค่าความหนาแน่นกำลังงานน้อยที่สุด เท่ากับ 0.87% มีค่า SD เท่ากับ 0.02 ที่ระยะทาง 10.5 m ดังรูปที่ 16 (ข) ในส่วนการทดสอบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากด้านหลังของสายอากาศ 5G การทดสอบดังกล่าวได้ทำการปรับเปลี่ยนระยะทางการทดสอบตั้งแต่ 2.5-10.5 m และการทดสอบนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การต่อแบบอนุกรมและการต่อแบบขนาน การต่อแบบอนุกรมทั้ง 32 วงจร พบว่ามีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุด 9.78 V ที่ระยะทาง 3.5 m และการต่อแบบขนานทั้ง 32 วงจร พบว่า มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุดเท่ากับ 0.42 V ที่ระยะทาง 3.5 m ดังรูปที่ 16 (ข)

4. สรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอสายอากาศพื้นผิวอวิสต์จัดเรียงกระแสสำหรับเก็บเกี่ยวกำลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G ออกแบบให้มีขนาด 4x4 จำนวน 16 ตัว มีโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้งและแนวนอนรวมกัน 32 พอร์ต แต่ละพอร์ตจะถูกต่อเข้ากับวงจรจัดเรียงกระแสรวมกับ 32 วงจร ในการทดสอบได้อาศัยเครื่องวัดค่าความหนาแน่นกำลังงาน ที่ถูกปล่อยออกจากด้านหลังสายอากาศ 5G และใช้เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดได้จากสายอากาศที่นำเสนอ ในการทดสอบ เมื่อทำการต่ออนุกรมทางด้าน

ขาออกของวงจรจัดเรียงกระแสทั้ง 32 วงจร พบว่าให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุดเท่ากับ 9.78 V มีค่าความหนาแน่นกำลังงานเท่ากับ 7.15% ที่ระยะทางห่างจากด้านหลังสายอากาศ 5G เท่ากับ 3.5 m แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้สามารถนำไปประจุให้แก่แบตเตอรี่ขนาด 9 V หรือขับหลอด LED หรือนำไปเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำๆ ได้ สำหรับการทดสอบ เมื่อทำการต่อขนานทางด้านขาออกของวงจรจัดเรียงกระแสทั้ง 32 วงจร พบว่า ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุดเท่ากับ 0.42 V มีค่าความหนาแน่นกำลังงานเท่ากับ 7.15% ที่ระยะทางห่างจากด้านหลังสายอากาศ 5G เท่ากับ 3.5 m ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ดังกล่าวไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่น้อยมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับโครงการวิจัยมูลฐานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สัญญาเลขที่ FRB6710/2567 รหัสโครงการ 192856 โครงการวิจัย เรื่องการพัฒนาสายอากาศจัดเรียงกระแสสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปิงปประมาณ 2567

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Shinohara, Development of rectenna with wireless communication system, The 5th European Conference on Antennas and Propagation, Proceedings, 2011, 3970-3973.



- [2] Z. Popović, S. Korhummel, S. Dunbar, R. Scheeler, A. Dolgov, R. Zane, E. Falkenstein and J. Hagerty, Scalable RF energy harvesting, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(4), 1046-1056.
- [3] S. Tsukamoto, N. Iizasa, K. Yoshitomi, R. Pokharel, K. Yoshida, R. Hattori, H. Kanaya and D. Kanemoto, Development of a rectenna for batteryless electronic paper, *The IEEE Region 19 Conference, Proceedings*, 2013 1-4.
- [4] A.S. Marincic, Nikola tesla and the wireless transmission of energy, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, PAS-101(10), 4064-4068.
- [5] W.C. Brown, The history of power transmission by radio wave, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1984, 32(9), 1230-1242.
- [6] N. Shinohara and H. Matsumoto, Experimental study of large rectenna array for microwave energy transmission, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1998, 261-268.
- [7] J.A. Hagerty and Z. Popovic, An experimental and theoretical characterization of broadband arbitrarily polarized rectenna array, *IEEE International Microwave Symposium Digest*, 2001, 46(3), 1855-1858.
- [8] Y. H. Suh and K. Chang, A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45 and 5.8-GHz wireless power transmission, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(7), 1784-1789.
- [9] A. Slavova and A.S. Omar, Wideband rectenna for energy recycling, *IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium*, 2003, 954-957.
- [10] J.H. Chou, D -B. Lin, K.-L. Weng and H.J. Li, All polarization receiving rectenna with harmonic rejection property for wireless power transmission, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(10), 5242-5249.
- [11] C. Phongcharoenpanich and K. Boonying, A 2.4-GHz dual polarized suspended square plate rectenna with inserted annular rectangular ring slot, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2015, 26(2), 164-173.



- [12] D.H. Sadek, H.A. Shawkey and A.A. Zekry, Compact and high-efficiency rectenna for wireless power-harvesting applications, International Journal of Antennas and Propagation, 2021, 1109850.
- [13] F. Khalid, W. Saeed, N. Shoaib, M. U. Khan and H. M. Cheema, Quad-band 3D rectenna array for ambient RF energy harvesting, International Journal of Antennas and Propagation, 2020, 7169846.
- [14] CST® Microwave Studio, Research Base, 2020.
- [15] K. Boonying and C. Phongcharoenpanich, Analysis and design of circularly polarized capacitively-fed planar suspended antenna for universal UHF RFID applications, Przegląd Elektrotechniczny, 2020, 96(1), 100-107.