

การออกแบบสายอากาศแพทช์วงแหวนรูปวงกลม
บนพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแยก
สำหรับการประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่

**Design of Circular Ring Patch Antenna on Split-Ring
Resonator Metasurface for Dual-Band Applications**

จินนัทธ งามเมือง^{1,*} ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Jinnattha Hemmuang^{1,*} Chuwong Phongcharoenpanich¹

¹Department of Telecommunications Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

*Corresponding Author E-mail: jinnattha.hemmuang@gmail.com

Received: May 18, 2021 Revised: June 11, 2021 Accepted: June 14, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติ (Metasurface) โดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS) แบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกชนิดแถบหยุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพทช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายให้รองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientific and Medical Band) ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยโครงสร้างทั้งสองถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 หนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.3 สายอากาศมีขนาด 30×45 mm และพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติมีขนาด 82×82 mm สายอากาศถูกวางไว้ด้านบนพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติที่ระยะห่าง 12 mm จากผลการจำลองของอัตราขยายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากเดิมมีค่าเท่ากับ 1.70 dBi และ 4.01 dBi เมื่อปรับปรุงสายอากาศอัตราขยายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5.66 dBi และ 9.02 dBi ตามลำดับ โดยสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional Pattern)

คำสำคัญ: สายอากาศแพทช์วงแหวน พื้นผิวเลือกความถี่ ย่านความถี่ ISM

Abstract

This article presents the design of a metasurface using Frequency Selective Surface on a bandstop split-ring resonator to work with a ring patch antenna to enhance the gain that is operated along the ISM band of 2.45 GHz and 5.8 GHz. Both structures have been designed on FR-4 substrate with thickness of 1.6 mm and dielectric constant of 4.3. The ring patch antenna and the metasurface have the size of 30 mm×45 mm and 82 mm×82 mm, respectively. The antenna located above the metasurface with the spacing of 12 mm. The simulation results of gain at 2.45 GHz and 5.8 GHz was 1.70 dBi and 4.01 dBi. When the antenna gain was improved, the gain was increased to 5.66 dBi and 9.02 dBi, respectively. The radiation pattern of the proposed antenna is unidirectional beam.

Keywords: Ring patch antenna, Frequency selective surface (FSS), ISM band

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น จึงทำให้ช่องสัญญาณและอัตราขยายของสายอากาศรองรับการใช้งานได้ไม่เพียงพอ โดยสายอากาศแพตช์ได้รับความนิยมเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น อาทิเช่น มีน้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการวิเคราะห์และการประดิษฐ์ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย อย่างไรก็ตามสายอากาศแพตช์ยังมีข้อบกพร่องบางประการคือ อัตราขยายต่ำและแบนด์วิธแคบ [1] ซึ่งมีการศึกษาบางส่วนในการหาวิธีพัฒนาหรือลดข้อบกพร่องเหล่านี้ [2,3] ซึ่งหนึ่งในวิธีการปรับปรุงข้อบกพร่องคือการใช้ตัวสะท้อนคลื่นหยุดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS)

พื้นผิวเลือกความถี่คืออภิวัดในรูปแบบสองมิติที่มีคุณสมบัติเป็นตัวกรองความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถออกแบบให้มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวกรองความถี่ทั่วไป โดยเฉพาะพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุด ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแผ่นสะท้อนให้กับสายอากาศแพตช์วงแหวนทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นและความกว้างแถบความถี่เพิ่มขึ้น [4] เมื่อพิจารณาพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดเทียบกับแผ่นโลหะสะท้อน โดยทั้งสองมีข้อแตกต่างกันคือพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดสามารถออกแบบให้สะท้อนคลื่นมากกว่าหนึ่งย่านความถี่ได้ ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานกับสายอากาศหลายย่านความถี่มากกว่าแผ่นโลหะสะท้อน เนื่องจากคุณสมบัติของแผ่นโลหะสะท้อนมีขนาดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ 1 และเฟสการสะท้อนเท่ากับ 180° เมื่อนำมาทำงานร่วมกับสายอากาศจะทำให้แต่ละความถี่จะถูกจำกัดด้วยระยะห่างระหว่างสายอากาศกับแผ่นโลหะสะท้อนส่งผลให้แผ่นโลหะสะท้อนสามารถตอบสนองได้เพียงย่านความถี่เดียว

บทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดที่สามารถทำงานในย่านความถี่ ISM

(Industrial, Scientific and Medical Band) ที่ย่านความถี่ 2.45 (2.401-2.495) GHz และ 5.8 (5.15-5.895) GHz

2. การออกแบบและโครงสร้างสายอากาศ

จากการจำลองโดยโปรแกรม CST Studio Suit 2017 เริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนให้สามารถทำงานได้ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากนั้นออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดที่สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz เช่นเดียวกันเพื่อนำมาวางไว้ทางด้านหลังของตัวสายอากาศแพตช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายและแบนด์วิธ โดยโครงสร้างทั้งสองถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีความหนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant : ϵ_r) เท่ากับ 4.3 และมีขนาดโดยรวมเท่ากับ $82 \times 82 \times 15.34$ mm

2.1 การออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวน

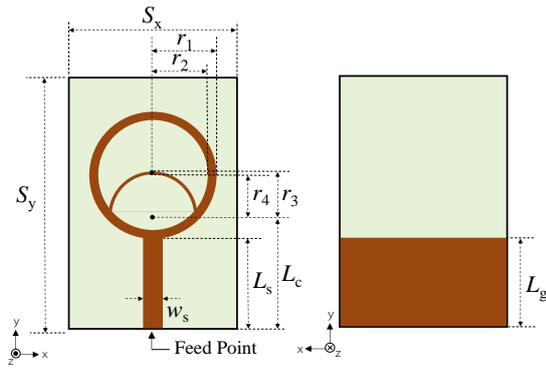
สายอากาศแพตช์วงแหวนที่ออกแบบมีพื้นฐานมาจากสายอากาศแพตช์วงกลมซึ่งรัศมีของแพตช์วงกลมสามารถคำนวณได้สมการดังต่อไปนี้ [5]

$$r_1 = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

เมื่อ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

โดยที่ f_r คือความถี่เรโซแนนซ์และ h คือความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนแสดงในรูปที่ 1 โดยเส้นไมโครสตริปถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแพตช์วงแหวนที่มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ใกล้ 50 Ω ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงแหวนแสดงดังตารางที่ 1



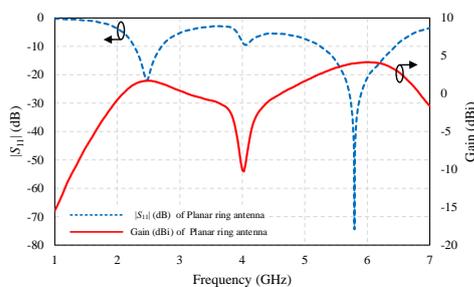
(ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านหลัง

รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศแพทช์วงแหวน

ตารางที่ 1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศแพทช์วงแหวน

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
S_x	30	r_4	7.5
S_y	45	w_s	3.5
r_1	11.5	L_c	20
r_2	10	L_s	16.1
r_3	8	L_g	15

จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพทช์วงแหวนดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทำการพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -21.16 dB และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -50.55 dB และอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 1.70 dBi และ 4.01 dBi ตามลำดับ

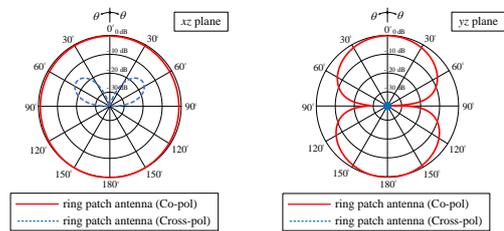


รูปที่ 2 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

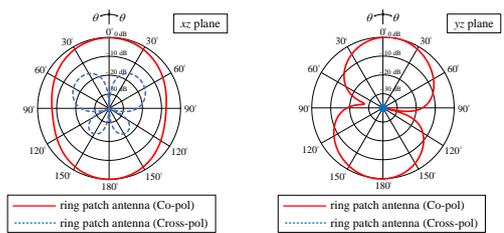
และอัตราขยายของสายอากาศแพทช์วงแหวน

การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized radiation pattern) ของสายอากาศแพทช์วงแหวนในระนาบ xz และ yz

ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3 จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพทช์วงแหวนมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional radiation pattern)



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



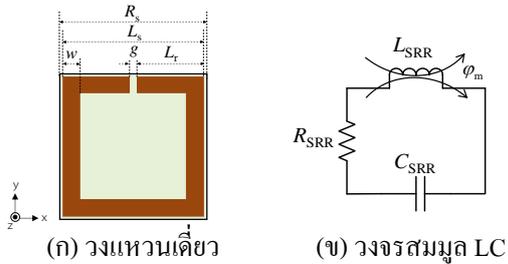
(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพทช์วงแหวน

2.2 การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่

ในหัวข้อนี้ได้ออกแบบโครงสร้างของพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหูดรูปแบบบ่วงสี่เหลี่ยม 2 บ่วง ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปร่างองค์ประกอบของพื้นผิวเลือกความถี่แสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [6] โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าบ่วงสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบอื่น ๆ ในด้านความเสถียรเชิงมุม ระดับโพลาไรซ์ไขว้ ความกว้างแถบความถี่และการแยกแบนด์ขนาดเล็ก ดังนั้นบทความนี้ได้ออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหูดเนื่องจากต้องการให้พื้นผิวเลือกความถี่สามารถทำการสะท้อนคลื่นที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยประเภทและการตอบสนองของพื้นผิวเลือกความถี่แสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [7]

พื้นผิวเลือกความถี่ที่นำเสนอถูกบรรจุด้วยโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators: SRRs) ที่มีขนาดมิติ 3×3 cell ซึ่งโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างวงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก

โดยความถี่เรโซแนนซ์วงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [8]

$$f_{SRR} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{SRR}C_{SRR}}} \quad (2)$$

เมื่อ L_{SRR} คือค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนเดี่ยว และ C_{SRR} คือค่าความประจุสมมูลซึ่ง L_{SRR} และ C_{SRR} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L_{SRR} = \frac{\mu_0\pi L_m^2}{h} \quad (3)$$

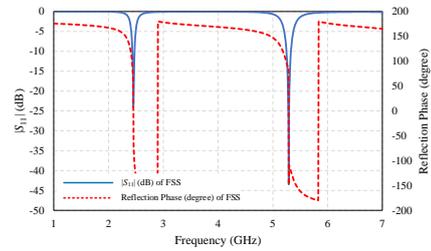
$$C_{SRR} = \frac{\epsilon_0hw}{g} \quad (4)$$

โดยที่ $L_m = L_s/2 - w/2$ และ μ_0 คือค่าความซาวซึมแม่เหล็กในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m ϵ_0 คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ $1/36\pi \times 10^9$ F/m และ h คือความหนาของวัสดุฐานรองมีค่าเท่ากับ 1.6 mm

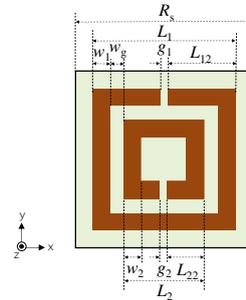
ดังนั้นการคำนวณพารามิเตอร์ทางโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกของย่านความถี่ 2.45 GHz จากรูปที่ 4 เมื่อ $L_s = 20$ mm $w = 2.5$ mm และ $g = 1$ mm จะได้ $L_{SRR(2.45\text{ GHz})} = 0.19$ μ H และ $C_{SRR(2.45\text{ GHz})} = 0.03$ pF นำไปแทนค่าในสมการที่ (2) $f_{SRR(2.45\text{ GHz})} = 2.11$ GHz และเมื่อทำการคำนวณหาการประมาณค่าโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกของย่านความถี่ 5.8 GHz เมื่อ $L_s = 11$ mm $w = 2.5$ mm และ $g = 1$ mm จะได้ $L_{SRR(5.8\text{ GHz})} = 0.04$ μ H และ $C_{SRR(5.8\text{ GHz})} = 0.03$ pF เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (2) $f_{SRR(5.8\text{ GHz})} = 4.59$ GHz

จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดมาทำการจำลองผลเพื่อดูเฟสการสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ดังแสดงใน

รูปที่ 5 จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ -10 dB มีการตอบสนองที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.29 GHz มีค่าเท่ากับ -24.16 dB และ -43.47 dB ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองมีผลใกล้เคียงกับผลคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งโครงสร้างหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่แสดงดังรูปที่ 6 ขนาดและพารามิเตอร์เริ่มต้นของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 5 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสการสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่



รูปที่ 6 โครงสร้างของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

ตารางที่ 2 ขนาดและพารามิเตอร์เริ่มต้นของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
R_s	25	w_1	2.5
L_1	20	w_2	2.5
L_{12}	9.5	w_g	2
L_2	11	g_1	1
L_{22}	5	g_2	1

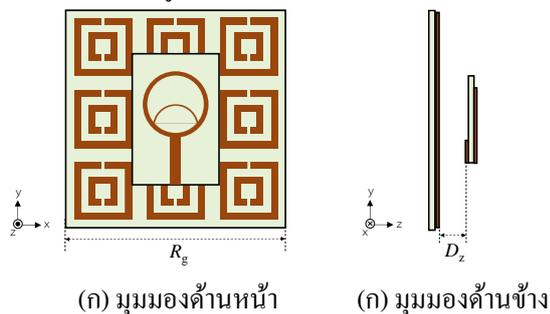
2.3 การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ที่ทำงานร่วมกับสายอากาศแพดซ์วงแหวน

2.3.1 ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพดซ์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่

ในหัวข้อนี้เป็นารออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ที่ทำงานร่วมกับสายอากาศแพดซ์วงแหวน จากรูปที่ 6 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสการสะท้อนที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.29 GHz มีค่าเฟสการสะท้อนเท่ากับ 38.903° และ -148.36° ตามลำดับ เมื่อทราบค่าเฟสการสะท้อนจึงทำการหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแพดซ์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ได้จากสมการดังต่อไปนี้ [9]

$$D_z = \frac{\phi_r (\text{rad}) \cdot c}{2 \times 360 \times f \times 10^{-3}} \quad (5)$$

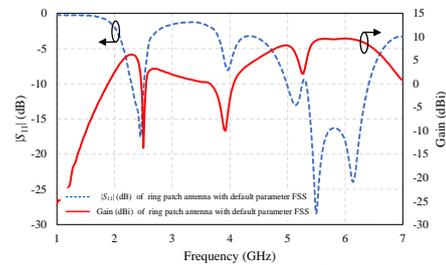
โดยที่ D_z คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแพดซ์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ ϕ_r คือค่าเฟสการสะท้อน c คือความเร็วแสงและ f คือความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อนำค่าเฟสการสะท้อนมาคำนวณในสมการที่ (5) จะได้ D_z ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 6.14 mm และที่ความถี่ 5.29 GHz มีค่าเท่ากับ 11.68 mm จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ย D_z ของทั้งสองความถี่จะมีค่าประมาณ 9 mm โดยในลำดับถัดไปจะใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพดซ์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ระยะ 9 mm ในการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยโครงสร้างสายอากาศแพดซ์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างสายอากาศแพดซ์วงแหวนทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพดซ์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -17.50 dB มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 2.29 GHz ถึง 2.51 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

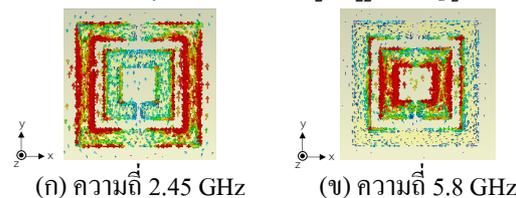
ที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -16.28 dB มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 5.32 GHz ถึง 6.41 GHz และอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 2.26 dBi และ 9.49 dBi จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าอัตราขยายของความถี่ 2.45 GHz ยังคงมีอัตราขยายต่ำและความกว้างแถบความถี่ในย่านความถี่ 5.8 GHz ยังไม่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน



รูปที่ 8 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพดซ์วงแหวนทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

2.3.2 การปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่

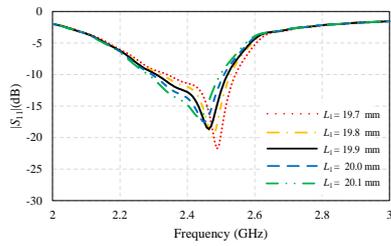
จากรูปที่ 9 แสดงผลการจำลองของการกระจายกระแสเชิงพื้นผิว (Surface current distributions) ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากรูปที่ 9 (ก) ความเข้มของกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณบ่วงสี่เหลี่ยมบ่วงนอกและรูปที่ 9 (ข) ความเข้มของกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณบ่วงสี่เหลี่ยมบ่วงใน ดังนั้นจากผลการจำลองจะทำให้ทราบการตอบสนองของแต่ละความถี่และทราบตำแหน่งที่สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ได้ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ L_1 L_{22} และ g_1 ที่ความถี่ 5.8 GHz สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ L_2 L_{22} และ g_2



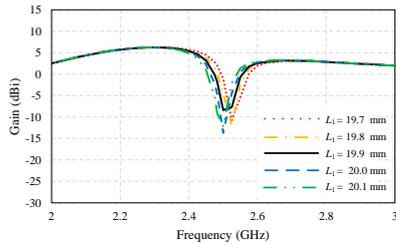
รูปที่ 9 ผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

รูปที่ 10 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_1 จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อ L_1 เท่ากับ 19.9 mm อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นจาก

2.26 dBi เป็น 3.17 dBi ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะมีการแมตซ์ที่ลดลงเพียงเล็กน้อย อยู่ที่ -17.43 dB



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

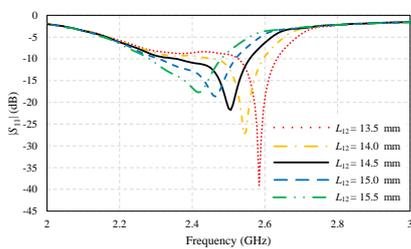


(ข) อัตราขยาย

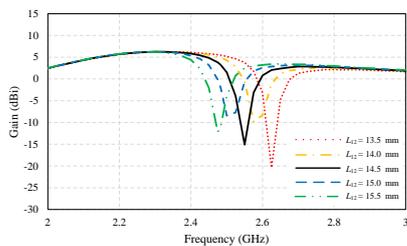
รูปที่ 10 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_1

รูปที่ 11 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{12} จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อ L_{12} เท่ากับ 14.5 mm อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.17 dBi เป็น 4.85 dBi ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีการแมตซ์ที่ลดลงอยู่ที่ -12.05 dB



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

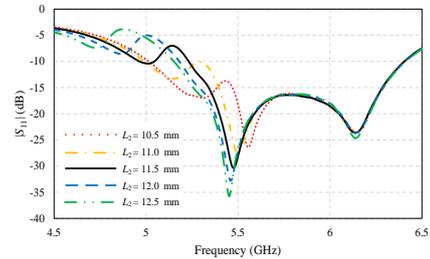


(ข) อัตราขยาย

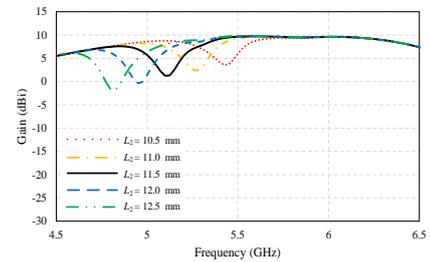
รูปที่ 11 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{12}

รูปที่ 12 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_2 จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาด L_2 ส่งผลให้แถบความถี่ของย่านความถี่ 5.8 GHz กว้างขึ้นเมื่อ L_2 เท่ากับ 11.5 mm โดยมีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 5.23 GHz ถึง 6.40 GHz และมีอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz เท่ากับ 9.53 dBi



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

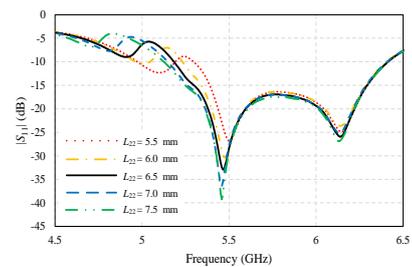


(ข) อัตราขยาย

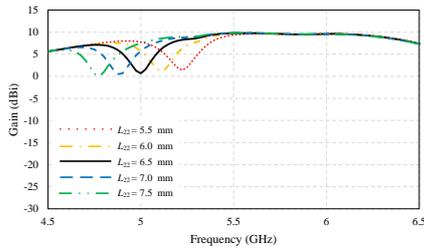
รูปที่ 12 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_2

รูปที่ 13 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{22} จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อ L_{22} เท่ากับ 6.5 mm ส่งผลให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้นตั้งแต่ความถี่ 5.19 GHz ถึง 6.41 GHz และมีอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz เท่ากับ 9.54 dBi



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

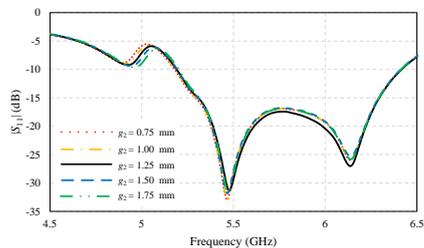


(ข) อัตรายาย

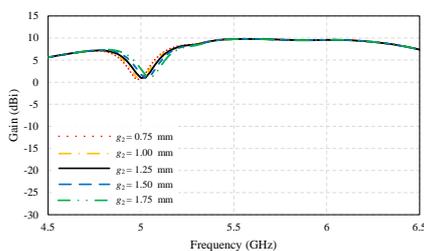
รูปที่ 13 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตรายายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{22}

รูปที่ 14 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตรายายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ g_2 จากผลการจำลองสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อ g_2 เท่ากับ 1.25 mm ส่งผลให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้นตั้งแต่ความถี่ 5.18 GHz ถึง 6.21 GHz และอัตรายายที่ความถี่ 5.8 GHz เท่ากับ 9.57 dBi ซึ่งความกว้างแถบความถี่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



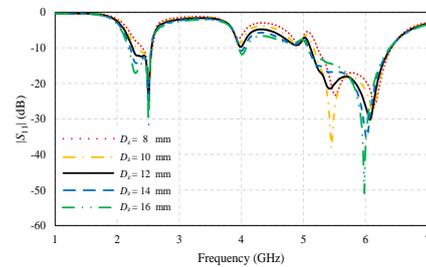
(ข) อัตรายาย

รูปที่ 14 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

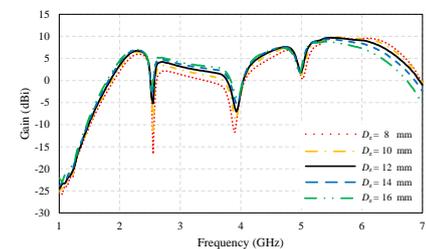
และอัตรายายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ g_2

เมื่อได้คุณสมบัติที่เหมาะสม ลำดับถัดไปทำการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ถูกปรับปรุงพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) จากผลการคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ถูกปรับปรุงพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับ 16 mm จึงทำการจำลองผลเปรียบเทียบกับระยะห่างอื่น ดังแสดงในรูปที่ 15 จากผลการจำลองเมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์

D_z ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งสองย่านความถี่มีการแมตซ์ที่ดีขึ้นและอัตรายายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของอัตรายายที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีอัตรายายที่ลดลง ดังนั้นบทความนี้จึงเลือก D_z ที่มีขนาดเท่ากับ 12 mm เพื่อให้ได้คุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตรายายของทั้งสองย่านความถี่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากที่สุด



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

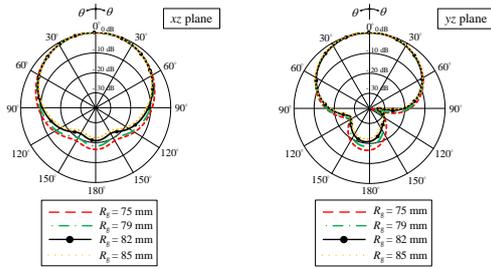


(ข) อัตรายาย

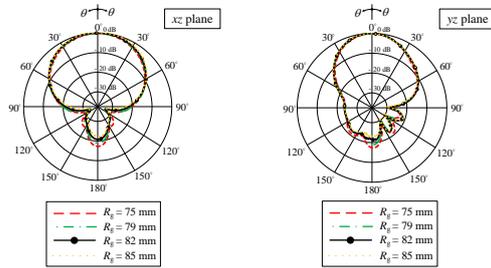
รูปที่ 15 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตรายายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ D_z

ลำดับถัดมาได้จำลองการเพิ่มขนาดระนาบกราวด์ให้กับพื้นผิวเลือกความถี่เพื่อทำการลดค่าคลื่นด้านหลัง (Back lobe) โดยการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_y จากเดิมพารามิเตอร์ R_y มีขนาดเท่ากับ 75 mm โดยบทความนี้ทำการจำลองผลการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_y ที่มีขนาดเท่ากับ 75 79 82 และ 85 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16 จากผลการจำลองพารามิเตอร์ R_y ที่มีขนาดเท่ากับ 82 mm มีขนาดที่เหมาะสมที่สุด จากเดิมอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (Front-to-back ratio) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 17.48 dB และ 18.98 dB ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_y ให้มีค่าเท่ากับ 82 mm ส่งผลให้อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับ



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 16 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์แมลไลซ์ของการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_g

3. สายอากาศที่นำเสนอ

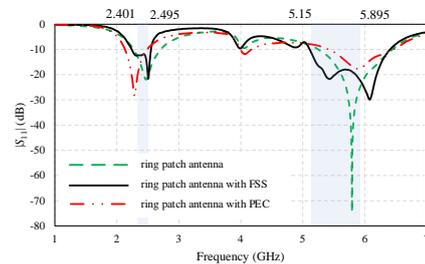
จากการปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่ในหัวข้อที่ผ่านมา ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ

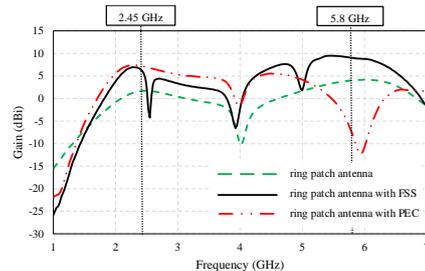
พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
S_x	30	R_g	82
S_y	45	D_z	12
r_1	11.5	L_1	19.9
r_2	10	L_{12}	9.45
r_3	8	L_2	11.5
r_4	7.5	L_{22}	5.125
w_s	3.5	w_1	2.7
L_c	20	w_2	2.5
L_s	16.1	w_g	1.5
L_g	15	g_1	1
R_s	25	g_2	1.25

รูปที่ 17 เป็นการแสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอจากรูปที่ 17 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนพิจารณาที่ -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.06 dB

และที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -18.90 dB จากรูปที่ 17 (ข) อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 5.66 dBi และ 9.02 dBi ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าความกว้างแถบความถี่ที่ขยับความถี่ 5.8 GHz ของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่มีแถบความถี่ที่กว้างกว่าสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบตัวเดี่ยวและสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นโลหะสะท้อน ถึงแม้ว่าอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นพื้นผิวเลือกความถี่จะมีอัตราขยายที่ต่ำกว่าสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นโลหะสะท้อน แต่ถึงอย่างไรอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz ก็ยังคงมีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศทั้งสอง



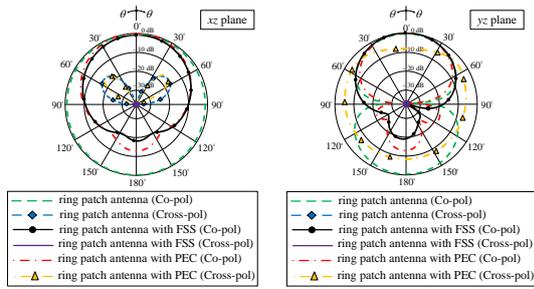
(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



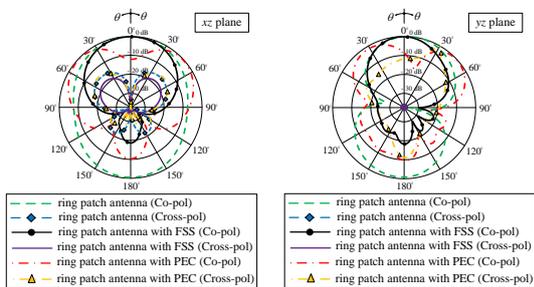
(ข) อัตราขยาย

รูปที่ 17 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอ

รูปที่ 18 เป็นการแสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์แมลไลซ์ของสายอากาศที่นำเสนอในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional pattern) ซึ่งอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับโดยมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง 0°



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 18 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศที่นำเสนอ

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบพื้นผิววงรีด้วยใช้ตัวสะท้อนคลื่นหุ้ดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเลือกความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพดช่วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายที่รองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM โดยย่านความถี่ 2.45 GHz สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 2.24 GHz ถึง 2.55 GHz และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 5.11 GHz ถึง 6.41 GHz จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.06 dB และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -18.90 dB โดยอัตราขยายของความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 5.66 dBi และ 9.02 dBi ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนกลับคลื่นด้านหน้าต่อคลื่นด้านหลังมีค่าเท่ากับ 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับ โดยมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง 0°

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley and Sons, U.S.A., New York, 2005.
- [2] B. Yildirim and B. A. Cetiner, "Enhanced Gain Patch Antenna With a Rectangular Loop Shaped Parasitic

Radiator," IEEE Antennas and Wireless propagation letters, Vol. 7, pp.229-232, March 2008.

- [3] S.G. Zhou and J.Y. Li, "Low-Profile and Wideband Antenna," IEEE Antennas and Wireless propagation letters, Vol. 10., No. 3, pp.373-376, April 2011.
- [4] R. S. Anwar, L. Mao and H. Ning, "Frequency Selective Surfaces: A Review," Applied Sciences, Vol. 8, No. 9, pp.1-46, September 2018.
- [5] N. Supreeyatitikul, S. Jantori, P. Boontamchau and U. Torteanchai, "Design of Circular Monopole Antenna using a Ground Plane Modifications for LTE and UWB Applications," International Conference on Information, Communication and Networks, China, pp. 6-10, 2019.
- [6] M. Raspopoulos and S. Stavrou, "Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 8, pp. 2998-3005, August 2011.
- [7] J. T. Murugan, T. R. S. Kumar, P. Salill and C. Venkatesh, "Dual Frequency Selective Transparent Front Doors for Microwave Oven with Different Opening Areas," Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 52, pp.11-16, February 2015.
- [8] M. Ameen, S. Kalraiya and R. K. Chaudhary, "Coplanar Waveguide-fed Electrically Small Dual-Polarized Short-ended Zeroth-Order Resonating Antenna Using Ω -Shaped Capacitor and Single-Split Ring Resonator for GPS/WiMAX/WLAN/C-band applications," International Journal of RF and Microwave Computer- Aided Engineering, Vol. 29, No. 12, pp.1-15, August 2019
- [9] C. Ratnaratorn, C. Mahatthanajatuphat and P. Akkaraekthalin, "Gain Enhancement for Multiband Antenna with Frequency Selective Fractal Surface Reflector," Asia-Pracific Microwave Conference, Japan, pp.714-716, 2014.