



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

การพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณ
แบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสตับจูนสำหรับการใช้งานในการสื่อสาร WLAN
Development of Wide-Slot Antenna Fed by microstrip line
width Tuning Stub for WLAN Operations

เทพ เกื้อทวีกุล
Thep Kueathaweekun

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสตับจูนรูปสี่เหลี่ยมที่มีการปรับปรุงโดยนำแผ่นสี่เหลี่ยมเล็กๆ มาวางเพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศได้ของนำวิธีระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D มาใช้ในการวิเคราะห์ และทำการศึกษาคุณสมบัติพารามิเตอร์ของสายอากาศบางตัวของสายอากาศประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองพบว่า มีความถี่และแบนด์วิดท์ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.15-5.54 GHz สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศนี้เป็นแบบสองทิศทาง

คำสำคัญ : สายอากาศช่องเปิดแบบกว้าง/สตับจูน/โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Abstract

This paper presents a design and development of wide-slot antenna fed by microstrip line with improved rectangular shaped add in tuning stub to increase impedance bandwidth for WLAN operations. Bandwidth enhancement techniques are composed of hexagon-shaped stub tuning and inset slot in tuning stub. This proposed antenna is analyzed by using MoM method of IE3D software. The proposed antenna is analyzed for return loss (S_{11} parameter), input impedance (Z_{in}), VSWR, bandwidth and far field radiation patterns, respectively. The simulations results of the proposed antenna can be obtained the impedance bandwidth cover the frequency band from 2.15 GHz to 5.54 GHz for WLAN communication systems. The far-field radiation pattern of resonance frequencies is bi-directional.

Keywords : Wide-slot antenna/stub tuning/WLAN



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬงเพชร

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะ โครงข่าย ท้องถิ่น ไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ซึ่งถูกกำหนดอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.11a (5.150-5.350 GHz) IEEE 802.11b และ IEEE 802.11 g (2.4-2.4835 GHz) ตามลำดับ ซึ่งได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากระบบมีความยืดหยุ่นสูง และ สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยทำออกแบบและพัฒนาสายอากาศเพื่อนำไปใช้ในการสื่อสารไร้สาย สายอากาศชนิดหนึ่งที่มีความสนใจและนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยเฉพาะสายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากสายอากาศนี้มีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก เป็นต้น จึงมีนักวิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาสายอากาศเพื่อนำมาใช้กับย่านการสื่อสารต่างๆ เช่น WLAN WiMAX UWB เป็นต้น โดยได้การออกแบบและพัฒนาสายอากาศหนึ่งความถี่ และสองความถี่ (Chulvanich และคณะ, 2007), (เทพ เกื้อทวีกุล, 2558), (เทพ เกื้อทวีกุล และคณะ, 2558) และ (Chavan, et al., 2013) สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ซึ่งสายอากาศเหล่านี้ออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานเฉพาะความถี่ที่ต้องการเท่านั้น และมีการออกแบบเฉพาะความถี่เท่านั้นจึงไม่สอดคล้องกับความต้องการใช้งานในปัจจุบัน และได้มีการออกแบบสายอากาศที่มีความถี่แบบแถบกว้าง (Kueathaweekun W.และคณะ, 2007) โดยที่ได้จากการออกแบบของสายอากาศนี้มีแบนด์วิดท์ประมาณ 60% และมีการพัฒนาสายอากาศโดยใช้การปรับเปลี่ยนรูปร่างสายอากาศและสลับเพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น โดย Pratap และ Jayashree (2015) ออกแบบสายอากาศแบบเปิดรูปห้าเหลี่ยมโดยมีแบนด์วิดท์ครอบคลุม 3.281-7.45 GHz โดยสายอากาศเหล่านี้ยังไม่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการ และมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อน ทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ค่อนข้างยาก และมีสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์ที่สามารถนำไปใช้งานในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ แต่จะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นที่มาในการพัฒนาสายอากาศที่รูปร่างที่กระทัดรัด ไม่ซับซ้อน ทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆ ได้อย่างเหมาะสม

ในงานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอแนะการออกแบบและพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสลับจูนรูปสี่เหลี่ยมที่มีการปรับปรุงโดยนำแผ่นสี่เหลี่ยมเล็กๆ มาวางเพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศได้ของนำวิธีระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D มาใช้ในการวิเคราะห์ และทำการศึกษาคูณสมบัติพารามิเตอร์ของสายอากาศบางตัวของสายอากาศ คือ การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่พลังงานสนามระยะไกล ตามลำดับ ตามลำดับ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสลับจูนสำหรับการใช้งานย่านการสื่อสาร WLAN

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอแนะการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสลับจูนสำหรับใช้งานย่านโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) โดยนำวิธีระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศบางตัวเพื่อดูคุณสมบัติของสายอากาศ ประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่พลังงานสนามระยะไกล ตามลำดับ



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสลับจูน

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสลับจูน อันดับแรกคือ การเลือกชนิดของวัสดุฐานรอง(Substrate) และความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เพื่อนำคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาความกว้างของ W_m และความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) (Balanis, A. C., 2005) เพื่อออกแบบความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้วัสดุฐานรอง (Substrate) FR4 โดยมีค่าคุณสมบัติดังนี้คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.5 ค่า Loss tangent เท่ากับ 0.02 และความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตรตามลำดับ การออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสลับจูนตัวที่สองตัว ซึ่งในการออกแบบสายอากาศมีพารามิเตอร์สำคัญที่เป็นตัวกำหนดโซแนนซ์ที่ต้องการ เพื่อนำมาคำนวณความยาวรวมทั้งหมดของวงรอบช่องเปิด การออกแบบสายอากาศในบทความนี้จะเริ่มทำการออกแบบที่ความถี่แรก คือ ความถี่ 2.4 GHz โดยค่าความยาวที่ทำการคำนวณจาก (1)-(3) ซึ่งจะมีการอ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) เพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

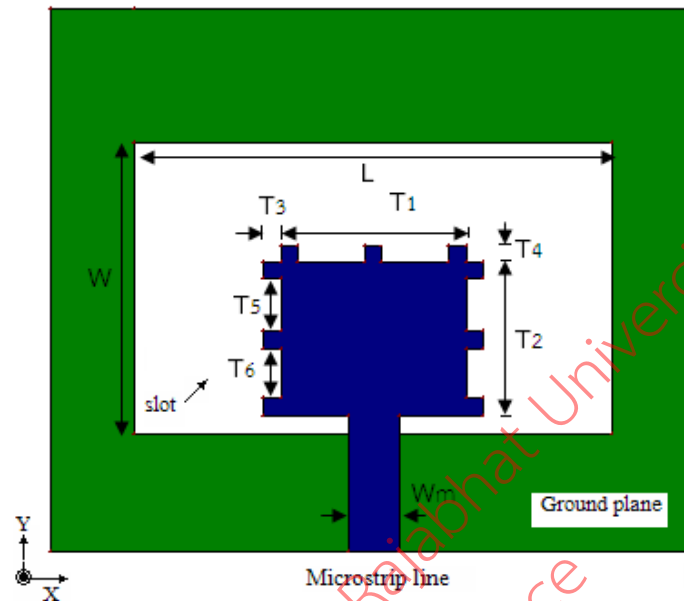
$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2)$$

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (3)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของแสง (3×10^8 เมตร/วินาที) λ_g คือ ความยาวคลื่นสัมพันธ์ f คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ และ ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง h คือ ความหนา (สูง) ของวัสดุฐานรอง



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



ภาพที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสตัปจูน การออกแบบสายอากาศเมื่อคำนวณค่าความยาวคลื่นกับความกว้างของสายส่งสัญญาณได้แล้ว โดยความถี่ที่นำมาทำออกแบบคือ 2.4 GHz ลำดับแรกเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ เพื่อศึกษาวิธีการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น ลำดับที่สองทำการปรับปรุงร่างของสตัปจูนที่สายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์จากสี่เหลี่ยมผืนผ้า และวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ ลำดับที่สามทำการปรับปรุงร่างสตัปจูนโดยทำการเพิ่มแผ่นสตริปรูปลี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็กๆ แสดงดังภาพที่ 1 เพื่อให้สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นครอบคลุมแถบความถี่ในย่าน WLAN ในการออกแบบและพัฒนาสายอากาศในงานวิจัยฉบับนี้มีพารามิเตอร์สำคัญแสดงในภาพที่ 1 และค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างโดยป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

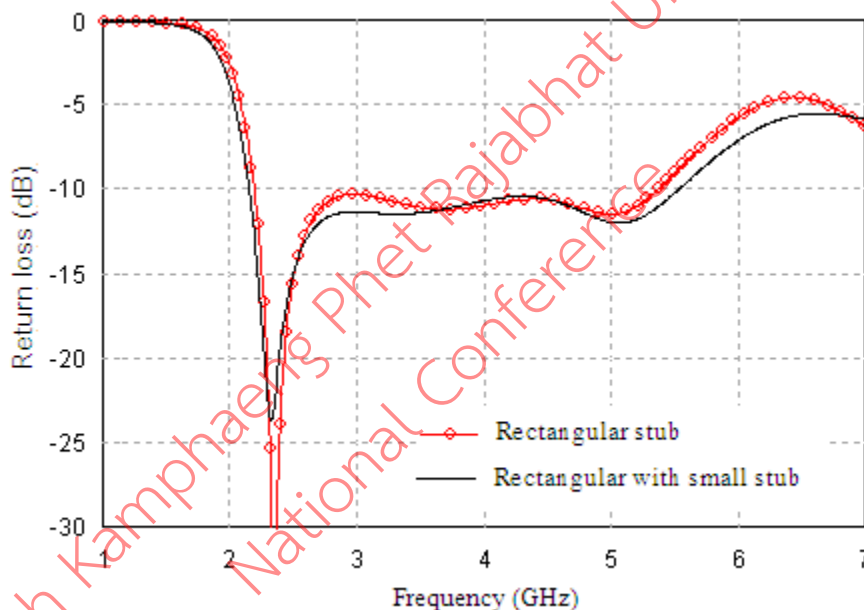
พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความยาวของสายอากาศช่องเปิดด้านนอก (L)	28.4 มิลลิเมตร
ความกว้างของสายอากาศช่องเปิดด้านนอก (W)	17.3 มิลลิเมตร
ความยาวของสตัปจูน (T_1)	11 มิลลิเมตร
ความกว้างของสตัปจูน (T_2)	9.0 มิลลิเมตร
ขนาดความยาวของสตัปจูนแผ่นสี่เหลี่ยม (T_3)	1.0 มิลลิเมตร
ขนาดความกว้างของสตัปจูนแผ่นสี่เหลี่ยม (T_4)	1.0 มิลลิเมตร
ความกว้างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมสตัปจูนด้านบน (T_5)	3.0 มิลลิเมตร
ความกว้างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมสตัปจูนด้านล่าง (T_6)	3.0 มิลลิเมตร
ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (W_m)	3.0 มิลลิเมตร
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (ϵ_r)	4.5
ความหนาของวัสดุฐานรอง (h)	1.6 มิลลิเมตร



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

2. ผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์
ที่มีสตับจูน

จากผลการศึกษาวิเคราะห์ออกแบบและพัฒนาสายอากาศแบบแถบกว้างช่องเปิดที่มีสตับจูนเพื่อขยายแบนด์
วิดท์ให้สามารถใช้งานย่านการสื่อสารไร้สาย ซึ่งในการจำลองเพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ ได้นำระเบียบ
วิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D (Zeland Software, 2010) มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ และ
ทำการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศบางตัวเพื่อดูคุณสมบัติของสายอากาศ ประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ
(S_{11}) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่พลังงานสนาม
ระยะไกล ตามลำดับ โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แสดงดังภาพที่ 2

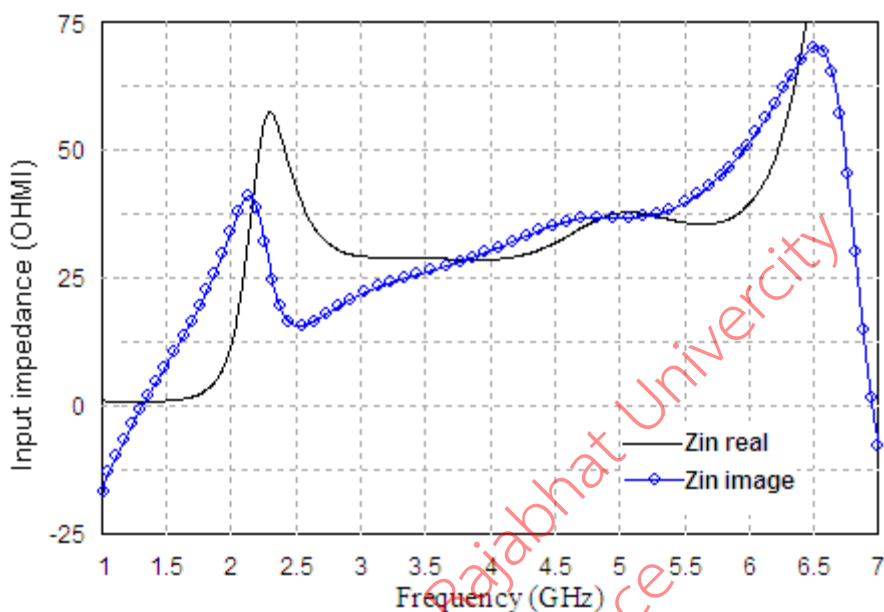


ภาพที่ 2 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศแบบช่องเปิด

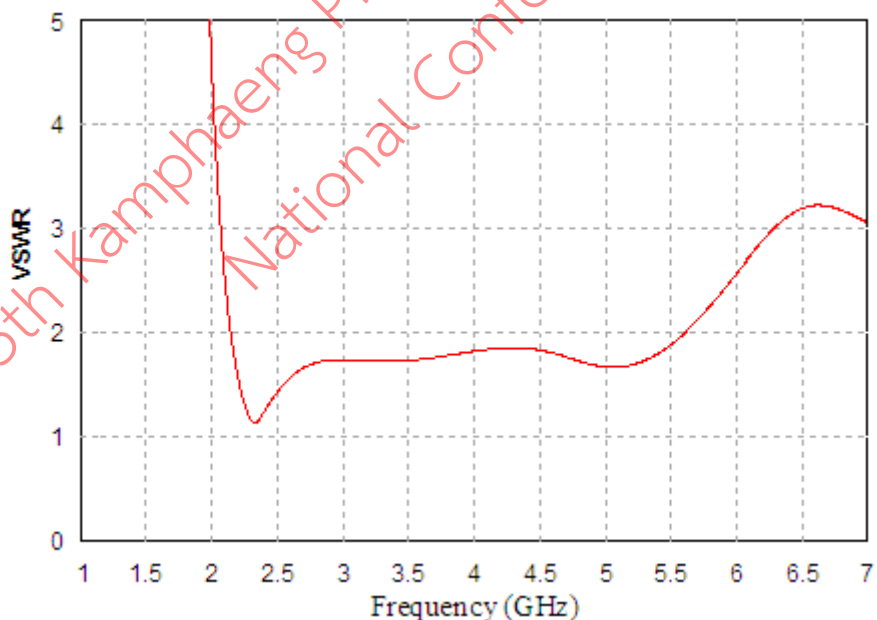
จากภาพที่ 2 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ในกรณีคือ สตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
(Rectangular Shaped stub) และสตับรูปกากบาท หรือสี่เหลี่ยมซ้อนกันสองรูป โดยผลที่ได้จากการจำลองในกรณีแรก
ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB อยู่ในช่วง -10 dB ถึง -30 dB ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.18-5.4 GHz
และในกรณีที่สองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งอยู่ในช่วง -10 dB ถึง -23.68 dB ครอบคลุมแถบ
ความถี่ตั้งแต่ 2.15-5.54 GHz ดังแสดงในภาพที่ 2



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



ภาพที่ 3 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของสายอากาศแบบช่องเปิด

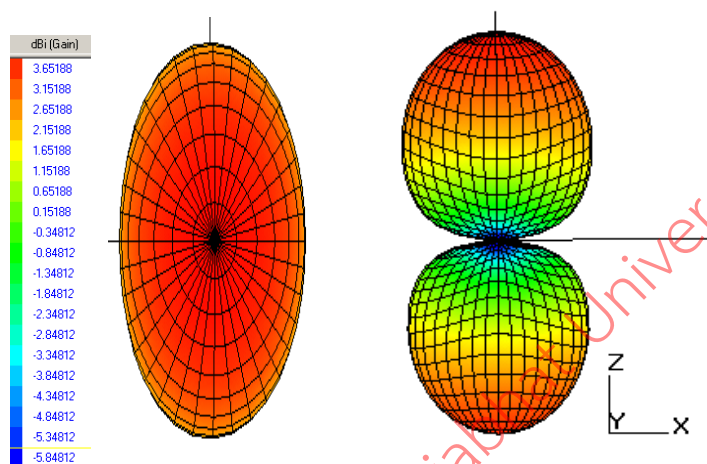


ภาพที่ 4 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศแบบช่องเปิด

จากภาพที่ 3 แสดงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สายอากาศแบบช่องเปิดทั้งเทอมจริง และเทอมจินตภาพ ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.15-5.54 GHz ซึ่งทั้งสองเทอมนี้เมื่อนำมารวมกันจะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณเท่ากับ 50 โอห์มตามสายส่งสัญญาณ และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่แสดงในภาพที่ 4 จะมีค่าอยู่ในช่วง 1-2 ซึ่งครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.15-5.54 GHz โดยทั่วไปแล้วค่าที่ยอมรับได้คือ VSWR ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 2 และ รูปการแผ่พลังงานในระยะไกลจะแสดงในภาพที่ 5-6



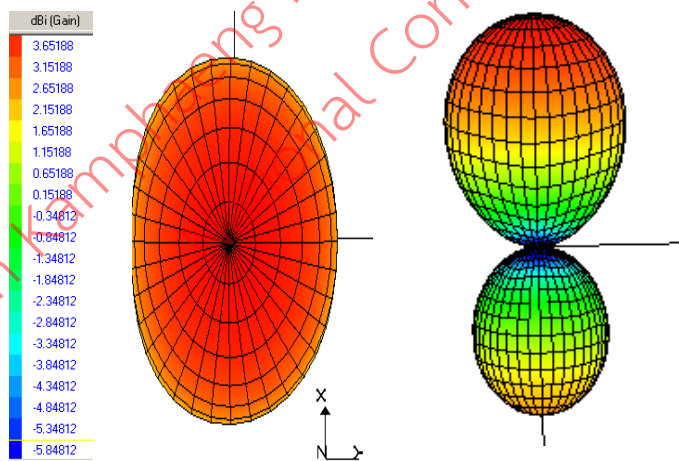
รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (xy-plane)

(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า (xz-plane)

ภาพที่ 5 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 2.40 GHz



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (xy-plane)

(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า (xz-plane)

ภาพที่ 6 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล ของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 5.20 GHz

จากภาพที่ 5 และภาพที่ 6 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 2.40 GHz และที่ความถี่ 5.20 GHz จากผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบแอสิมัท (azimuth) (xy-plane) เป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) และระนาบมุมเงย (elevation) (xz-plane) เป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional)



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การออกแบบและพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีสัดบุนิวิตที่มากขึ้นสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยใช้สัดบุนิวิตที่เหลื่อมที่มีการปรับปรุงโดยนำแผ่นสี่เหลี่ยมเล็กๆ มาวางเพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ที่มากขึ้นสำหรับใช้งานในการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามต้องการ ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D จากผลการจำลองได้แถบความถี่และแบนด์วิดท์ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 2.15-5.54 GHz ครอบคลุมมาตรฐานของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเป็นแบบสองทิศทาง ดังนั้นสายอากาศที่ทำการพัฒนานี้สามารถนำไปใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN)

เอกสารอ้างอิง

- เทพ เกื้อทวีกุล. (2558). การออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปแอกคูลสำหรับใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย. **การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมครั้งที่ 1** (หน้า 68-71). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
- เทพ เกื้อทวีกุล และคณะ. (2558). การออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองความถี่ที่มีแผ่นสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วิธี FDTD สำหรับประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย. **การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมครั้งที่ 1** (หน้า 76-79). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
- Balanis, A. C. (2005). **Antenna Theory Analysis and Design**. John Wiley & Sons, Inc.
- Chavan, A. S., Pragnesh, N. S. and Seema, M. (2013). Analysis of Dual Frequency Microstrip Antenna Using Shorting Wall. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, 3, 578-582.
- Chulvanich, C., Nakasuwan, J., Songthanapitak, N., Anantrasirichai, N. and T. Wakabayashi. (2007). Design Narrow Slot Antenna for Dual Frequency. **PIERS**, 3, 1024-1028.
- Kueathaweekun, W., Anantrasirichai N., Nakasuwan, J. and Wakabayashi, T. (2007). Broadband Slot Antenna Fed by Microstrip Line. **The International conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)**, 21-23 November, Thailand.
- Pratap N. Shinde & Jayashree P. Shinde. (2015). Design of compact pentagonal slot antenna with bandwidth enhancement for multiband wireless applications. **Int. J. Electron. Commun. (AEU)**, 69, 1489-1494.
- Sanchita, B., Srivastava, A. and Goswami, A. (2013). Dual Frequency Hexagonal Microstrip Patch Antenna. **International Journal of Scientific and Research Publications**, 3, 1-9.
- Zeland Software, Inc., IE3D, New York.