



## การพัฒนาสายอากาศระนาบแบบช่องเปิดโดยใช้สตัด์ครึ่งวงกลมที่ป้อนด้วยสายส่ง ระนาบร่วมสำหรับใช้งานในย่านความถี่ WLAN/WiMAX และ UWB

นิพนธ์ ทางทอง\* และ สมศักดิ์ อรรถทิมากุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-5483-6851 อีเมล: nipont.t@rmutk.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.002

รับเมื่อ 29 ธันวาคม 2558 ตอรับเมื่อ 1 มีนาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 23 กันยายน 2559

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอ การพัฒนาสายอากาศระนาบแบบช่องเปิดโดยใช้สตัด์ครึ่งวงกลมที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วมสำหรับใช้งานในย่านความถี่ WLAN/WiMAX และ UWB สายอากาศที่นำเสนอนี้มีเทคนิคการออกแบบที่ทำให้สายอากาศมีแถบความถี่การใช้งานเป็นแบบแถบความถี่ที่กว้างมาก โดยใช้วิธีปรับเปลี่ยนบริเวณด้านข้างของช่องเปิดของสายอากาศและปรับเปลี่ยนสายส่งแบบระนาบร่วมให้มีลักษณะเป็นแบบรีเวก กระตุ้นการทำงานด้วยสตัด์รูปครึ่งวงกลมทำให้สายอากาศสามารถตอบสนองความถี่แถบความถี่ที่กว้างมากครอบคลุมช่วงความถี่ 2.4–10.9 GHz สำหรับใช้งาน WLAN/WiMAX และย่านความถี่ UWB การออกแบบและจำลองการทำงานของสายอากาศจะใช้โปรแกรม IE3D สายอากาศจะถูกสร้างบนแผ่นพิมพ์ FR-4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.4 และความหนา 1.6 มิลลิเมตร สายอากาศที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สร้างได้ง่าย ผลจากการวัดคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้น พบว่าสายอากาศตอบสนองความถี่ในช่วง 2.4–10.9 GHz ส่วนผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นพบว่ามีการแผ่กระจายเป็นแบบรอบตัวในระนาบสนามแม่เหล็ก และเป็นแบบสองทิศทางในระนาบสนามไฟฟ้า ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอ สามารถรองรับกับระบบการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน WLAN/WiMAX และประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ที่กว้างมากได้

**คำสำคัญ:** สายอากาศระนาบแบบช่องเปิด, สตัด์ครึ่งวงกลม, แถบความถี่ที่กว้างมาก

การอ้างอิงบทความ: นิพนธ์ ทางทอง และ สมศักดิ์ อรรถทิมากุล, “การพัฒนาสายอากาศระนาบแบบช่องเปิดโดยใช้สตัด์ครึ่งวงกลมที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วมสำหรับใช้งานในย่านความถี่ WLAN/WiMAX และ UWB,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, หน้า 47–56, ม.ค.-เม.ย. 2560



## **Development of Planar Slot Antenna with Semicircle Stub Using CPW Fed for WLAN/WiMAX and UWB Applications**

Nipont Tangthong\* and Somsak Akatimakool

Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08-5483-6851, E-mail: nipont.t@rmutk.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.002

Received 29 December 2015; Accepted 1 March 2016; Published online: 23 September 2016

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### **Abstract**

This paper presents a development of a planar slot antenna with a tuning semicircle stub using CPW transmission line fed for WLAN/WiMAX and UWB applications. The extremely wide impedance bandwidth is achieved by using the modified rectangular slot and the tapered CPW fed. The appropriate semicircle shaped stub is proposed to obtain the desired wideband performance. The proposed antenna capably operates from 2.4–10.9 GHz covering WLAN/WiMAX and UWB. The antenna has simple structure with compact size, light weight and an easy-to-fabricate structure. The antenna is designed and simulated by IE3D software and constructed on FR4 substrate with dielectric constant of 4.4 and thickness of 1.6 mm. The measured results show that the designed antenna provides the impedance bandwidth from 2.4–10.9 GHz. The measured radiation pattern presents nearly omnidirectional and bi-directional in  $xz$  and  $yz$  planes, respectively. The proposed antenna is suitable to apply for WLAN/WiMAX and various UWB applications.

**Keywords:** Planar Slot Antenna, Semicircle Stub, Ultra-wideband Frequency

## 1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารความถี่สูง รวมทั้งระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้รับความนิยมแพร่หลาย จึงทำให้ระบบการสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบการสื่อสารไร้สาย ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบสายอากาศจึงมีความยุ่งยากสำหรับรองรับระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้งานในย่านความถี่ที่ต่างกัน เช่น การใช้งานมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g/h/j/n สำหรับ WLAN และมาตรฐาน IEEE 802.16-2004 สำหรับ WiMAX [1] ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเสนอรูปแบบการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมสายอากาศ [2] สำหรับรองรับกับความรู้พื้นฐานทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสารที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้พัฒนาและออกแบบสายอากาศย่านความถี่กว้างมาก [3], [4] โดยส่วนใหญ่นิยมใช้สายอากาศแบบช่องเปิด ที่สามารถป้องกันสัญญาณได้หลายรูปแบบ เช่น ป้องกันด้วยสายส่งไมโครสตริป และแบบระนาบร่วม นิยมออกแบบร่วมกับสายอากาศแบบช่องเปิดเนื่องจากสะดวกต่อการใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมโดยที่ไม่ต้องเจาะช่องเชื่อมต่อ (Via Hole) นอกจากนี้พบว่ามีการออกแบบสายอากาศใช้กับระบบสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน WLAN/ WiMAX เป็นจำนวนมากแต่ไม่สามารถใช้งานย่านความถี่กว้างมาก (Ultra-wideband) [5], [6] และยังมีงานวิจัยที่ออกแบบให้สายอากาศทำงานในย่านความถี่กว้างมากแต่ไม่สามารถรองรับการใช้งานในระบบ WLAN/ WiMAX [7], [8] ดังนั้นบทความนี้จึงพัฒนาสายอากาศโครงสร้างระนาบกราวด์ด้านบนที่สามารถใช้งานในย่านความถี่กว้างมากและรองรับการใช้งานตามมาตรฐาน WLAN/ WiMAX ได้ข้อดีของสายอากาศที่มีระนาบกราวด์ด้านบนจะมีความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทแอกทีฟ และพาสซีฟ เพราะไม่ต้องเจาะรูผ่านวัสดุฐานรองทำให้ไม่เกิดการสูญเสียที่ย่านความถี่สูง และนำเสนอการพัฒนา

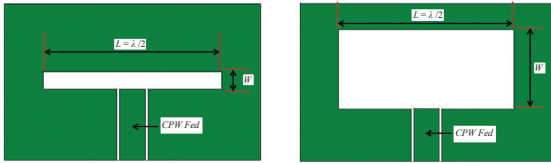
สายอากาศระนาบแบบช่องเปิดโดยใช้สตัด์บั้งวงกลมที่ป้องกันด้วยสายส่งระนาบร่วม สำหรับใช้งานในย่านความถี่ WLAN/WiMAX และ UWB ที่ทำให้สายอากาศมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถรองรับกับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย WLAN/WiMAX และ UWB ได้อย่างเหมาะสม

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและมีความจำเป็นต่อระบบการสื่อสารไร้สายที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณไฟฟ้า สำหรับกรณีการส่งสัญญาณ สายอากาศจะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้แผ่กระจาย (Radiation) ออกไปในอากาศ และในทำนองเดียวกันในกรณีการรับสัญญาณ สายอากาศจะเป็นตัวเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับเข้ามาจากสายอากาศให้กลับมากำลังไฟฟ้า โดยในปัจจุบันสายอากาศมีด้วยกันหลายชนิด แต่ละชนิดมีความเหมาะสมที่จะใช้งานที่แตกต่างกัน สำหรับในย่านความถี่ไมโครเวฟ ส่วนใหญ่จะนิยมสร้างสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ [9] เช่น สายอากาศแบบไดโพล สายอากาศแบบแพดซ์ สายอากาศแบบช่องเปิด ฯลฯ

### 2.1 สายอากาศแบบช่องเปิด (Slot Antenna)

สายอากาศแบบช่องเปิดเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เพราะสามารถออกแบบได้ง่าย เนื่องจากมีลักษณะแบนราบและมีขนาดเล็ก สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีสายส่งสัญญาณและหลักการของบาบินเนต (Babinet's Principle) [10] โดยช่องเปิดของสายอากาศที่ใช้งานมีทั้งช่องเปิดแบบแคบ (Narrow Slot) และแบบกว้าง (Wide Slot) ช่องเปิดแบบแคบมีจุดเด่นคืออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศแมตซ์กับสายส่งสัญญาณได้ดีในขณะที่ช่องเปิดแบบกว้างมีข้อจำกัดให้อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แคบมีค่าโพลาไรซ์เซชันไขว้สูง (Cross Polarization) ทำให้เกิด



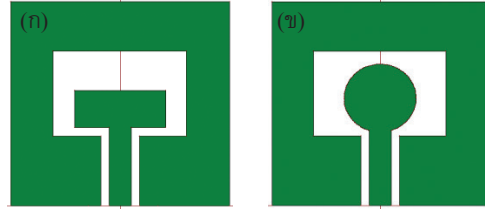
รูปที่ 1 สายอากาศแบบช่องเปิดแบบแคบและกว้าง

การกระจายเฟสของสนามไฟฟ้าในช่องเปิดที่ไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และทำให้ทิศทางของการแผ่กระจายหลักในระนาบสนามไฟฟ้าเกิดมุมเอียง ลักษณะของสายอากาศแบบช่องเปิดแสดงดังรูปที่ 1

สายอากาศแบบช่องเปิดสามารถปรับขนาดความกว้าง (W) ของช่องเปิดให้มากขึ้นซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุให้มากขึ้นจึงส่งผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์ (Matching Impedance) เกิดการสูญเสียย้อนกลับสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อโพลาไรซ์เซชันไขว้ อัตราขยายและประสิทธิภาพของสายอากาศโดยตรง การปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวสามารถทำได้สองวิธี [11] ได้แก่ วิธีที่หนึ่งเป็นการเลือกโครงสร้างของช่องเปิดและเทคนิคการปรับสตับจูน (Stub Tuning) โดยต่ออยู่ที่ปลายสายส่งสัญญาณ สตับจูนจะแมทชิงระหว่างสายส่งสัญญาณกับช่องเปิด รวมถึงทำการจัดเรียงสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กในช่องเปิดให้อยู่ในทิศทางเดียวกัน และวิธีที่สองเป็นการใส่สตริปโหลดเพื่อรบกวนช่องเปิด (Perturbation) ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์แยกห่างกัน หรือเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใหม่ ส่งผลให้แบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์มีค่ามากขึ้นตลอดจนสามารถลดค่าโพลาไรซ์เซชันไขว้ลงได้

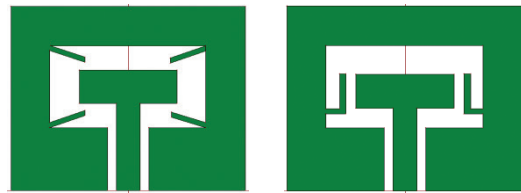
## 2.2 การเลือกโครงสร้างของช่องเปิดและเทคนิคการปรับสตับจูน

การเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดแบบกว้างคือการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของสตับจูนโดยทั่วไปรูปร่างของสตับจูนที่ใช้กันจะมีสองรูปแบบคือ แบบที่หนึ่งซึ่งนิยมใช้ชึ่งานกันมากเป็นตัวป้อนที่มีรูปร่างคล้ายกับช่องเปิด กล่าวคือ ถ้าช่องเปิดมีรูปร่างเป็นวงกลม สตับจูนก็จะมีรูปเป็น



(ก) สตับจูนคล้ายช่องเปิด (ข) สตับจูนแตกต่างกับช่องเปิด

รูปที่ 2 โครงสร้างของช่องเปิดและสตับจูน

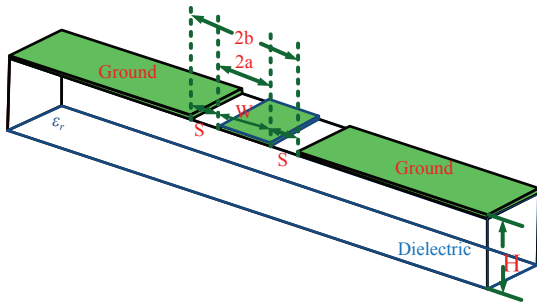


รูปที่ 3 การใส่สตริปโหลดแบบต่างๆ ในช่องเปิด

วงกลม หรือถ้าช่องเปิดมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม สตับจูนก็จะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมเช่นกัน ตัวอย่างของช่องเปิดและสตับจูนที่มีรูปร่างเดียวกันแสดงดังรูปที่ 2 (ก) ส่วนแบบที่สองเป็นสตับจูนมีลักษณะที่แตกต่างกับช่องเปิดแสดงดังรูปที่ 2 (ข) การใช้สตับจูนป้อนที่มีรูปร่างคล้ายกับช่องเปิดจะมีข้อดีที่จะทำให้ค่าแบนด์วิดท์กว้าง สำหรับการใส่สตับจูนในช่องเปิดแบบกว้างจะทำให้สนามไฟฟ้ามีการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันส่งผลให้มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ดีขึ้นคล้ายกับสายอากาศช่องเปิดแบบแคบ

## 2.3 การใส่สตริปโหลดในช่องเปิด

วิธีการทำให้สายอากาศช่องเปิดมีความถี่เรโซแนนซ์และค่าโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการสามารถทำได้โดยการใส่สตริปโหลดเข้าไปในช่องเปิดดังรูปที่ 3 ซึ่งจะทำให้ค่าโพลาไรซ์เซชันไขว้ลดลงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์และมีแบนด์วิดท์ที่เพิ่มมากขึ้น การใส่สตริปโหลดในช่องเปิดของสายอากาศเปรียบเสมือนการใส่ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง ซึ่งค่าความจุหรือค่าความเหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดและความยาวของสตริปโหลด ส่งผลให้สามารถปรับความถี่เรโซแนนซ์ตามต้องการได้



รูปที่ 4 สายส่งแบบระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านบน

## 2.4 การป้อนสัญญาณของสายอากาศแบบช่องเปิด

การออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดสามารถป้อนด้วยสายส่งสัญญาณที่เป็นสายส่งไมโครสตริป และสายส่งแบบระนาบร่วม ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งแบบระนาบร่วม (Coplanar Waveguide) ชนิดระนาบกราวด์ด้านบน แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยตัวนำวางอยู่ตรงกลางด้านบนของฐานรอง โดยมีความกว้าง S ระหว่างแถบตัวนำกับระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน แถบตัวนำมีความกว้าง W และฐานรองมีความหนา H ซึ่งข้อดีของสายส่งระนาบร่วมจะมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับระนาบกราวด์ทำได้ง่าย เนื่องจากกราวด์อยู่บนระนาบเดียวกันกับตัวนำได้ และการกระจายของสนามไฟฟ้าในสายส่งระนาบร่วมจะดีกว่าสายส่งไมโครสตริป

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายส่งแบบระนาบร่วม จะใช้การวิเคราะห์แบบ Quasi Static ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งคงรูป (Conformal Mapping) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายส่ง การหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งแบบระนาบร่วม สามารถหาได้ดังนี้ [12]

$$Z_0 = \left( \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \right) \frac{K(k')}{K(k)} \quad (1)$$

โดยที่สมการของการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) มีดังนี้

$$\epsilon_{re} = 1 + (\epsilon_r - 1) \frac{K(k') K(k_1)}{2K(k)K(k'_1)} \quad (2)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของฐานรอง  
 $Z_0$  คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง  
 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$$k = \frac{W}{W + 2S} \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi W}{4H}\right)}{\sinh\left(\frac{(W + 2S)\pi}{4H}\right)} \quad (4)$$

โดย  $K$  เป็นค่าของ Complete Elliptical Integral ลำดับที่หนึ่ง และค่าของ  $k' = (\sqrt{1 - k^2})$  โดยที่สามารถหาค่าโดยประมาณของอัตราส่วน  $\frac{K(k)}{K(k')}$  ได้ดังนี้

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \frac{1}{2\pi} \ln \left( 2 \frac{\sqrt{1+k} + \sqrt[4]{4k}}{\sqrt{1+k} - \sqrt[4]{4k}} \right) \quad (6)$$

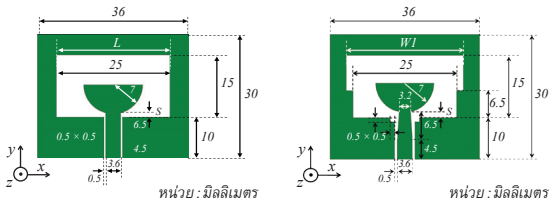
เมื่อ  $1 \leq \frac{K}{K'} \leq \infty, 0.707 \leq k \leq 1$  และ

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \frac{2\pi}{\ln \left( 2 \frac{\sqrt{1+k'} + \sqrt[4]{4k'}}{\sqrt{1+k'} - \sqrt[4]{4k'}} \right)} \quad (7)$$

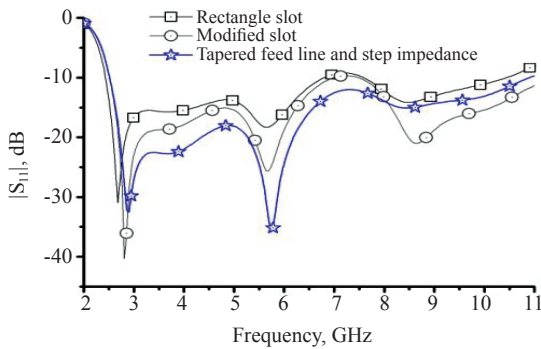
เมื่อ  $0 \leq \frac{K}{K'} \leq 1, 0 \leq k \leq 0.707$

## 3. วิธีการวิจัย

ผู้วิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนแบบระนาบร่วม โดยมีการอ้างอิงมาจากงานวิจัยต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบสายอากาศ เมื่อได้รูปแบบหรือโครงสร้างที่ต้องการจึงออกแบบและจำลองผลของการทำงานที่มีรายละเอียดดังนี้



(ก) สายอากาศต้นแบบ (ข) สายอากาศที่พัฒนาขึ้น  
รูปที่ 5 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิด

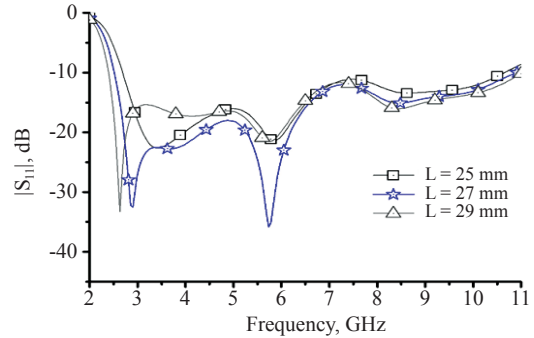


รูปที่ 6 ผลการจำลองของสายอากาศที่พัฒนาขึ้น

### 3.1 การออกแบบสายอากาศช่องเปิด

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบแถบตัวนำสำหรับป้อนสัญญาณที่มีโครงสร้างแบบระนาบร่วมซึ่งมีระนาบกราวด์ด้านบน และมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ  $50\Omega$  โดยเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์รุ่น FR-4 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพเท่ากับ 4.4 การสูญเสียของวัสดุฐานรองมีค่าเท่ากับ 0.019 ความสูงของวัสดุฐานรองมีค่าเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร การออกแบบช่องเปิดของสายอากาศกำหนดให้มีขนาดความยาวเท่ากับ  $0.3\lambda_g$  และความกว้างเท่ากับ  $0.36\lambda_g$  ดังแสดงในรูปที่ 5

สายอากาศต้นแบบที่ออกแบบมีขนาด  $36 \times 30$  มิลลิเมตร ช่องเปิดของสายอากาศมีขนาด  $25 \times 15$  มิลลิเมตร สายส่งสัญญาณแบบระนาบร่วมมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $50$  ความกว้างเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร ใช้สตัดจ์จูนเป็นแบบครึ่งวงกลมมีรัศมีเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ผลจำลองการทำงานของสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D แสดงดังรูปที่ 6

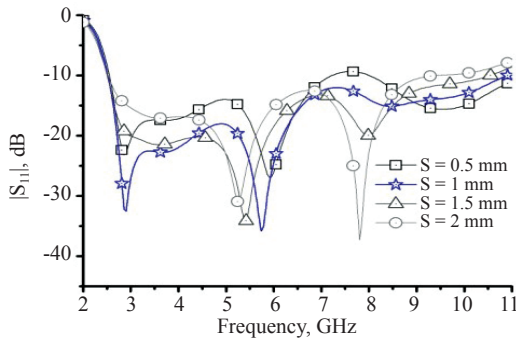


รูปที่ 7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่องเปิด L

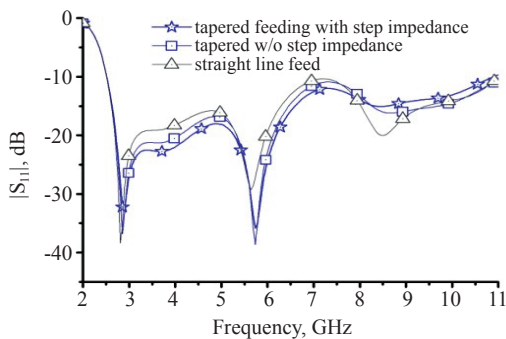
ผลการจำลองพบว่าสายอากาศมีลักษณะการตอบสนองความถี่เป็นแถบความถี่กว้าง มีแบนด์วิดท์การทำงานอยู่ในช่วง 2.3–6.7 กิกะเฮิรตซ์ โดยพิจารณาจากค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ต่ำกว่า  $-10$  dB ที่ครอบคลุมตามมาตรฐาน WLAN/WiMAX อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ต้องการให้สายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ UWB จึงได้ทำการเจาะช่องด้านข้างที่ช่องเปิดของสายอากาศ เพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้พบว่า สายอากาศไม่สามารถตอบสนองความถี่ในช่วง 6.8–8.2 กิกะเฮิรตซ์ ได้ดีมากนัก จึงได้ทำการพัฒนาโดยการปรับโครงสร้างของสายส่งสัญญาณให้มีลักษณะเป็นแบบปลายเรียว ซึ่งทำให้ค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศสามารถตอบสนองในย่านความถี่ UWB ในช่วงความถี่ 2.4–10.9 กิกะเฮิรตซ์ ได้ดี และครอบคลุมการใช้งานตามมาตรฐาน WLAN/WiMAX ได้ด้วย

### 3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศ

การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดจะใช้โปรแกรม IE3D เพื่อวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความกว้างของช่องเปิด L ค่าระยะห่าง S ของสตัดจ์จูนกับระนาบกราวด์และโครงสร้างของสายส่งสัญญาณ ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 7–9 ตามลำดับ



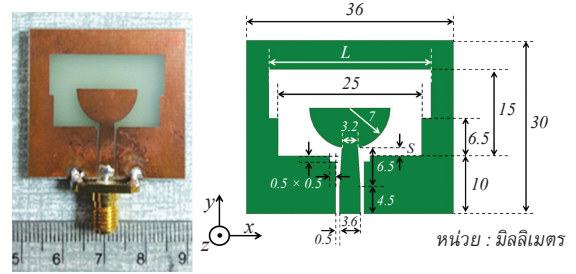
**รูปที่ 8** ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่าง S



**รูปที่ 9** ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสายส่งแบบระนาบร่วม

รูปที่ 7 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของช่องเปิด L ตั้งแต่ 25, 27 และ 29 มิลลิเมตรตามลำดับ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า L เพิ่มสูงขึ้นแถบความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าลดต่ำลง และสำหรับค่า L มีค่า 27 มิลลิเมตร จะเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลง ค่าระยะห่าง S ระหว่างระนาบกราวนกับสตัดจ์ของสายอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงค่า S ตั้งแต่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะพบว่าความถี่เรโซแนนซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องเลือกค่า S ที่เหมาะสมเพื่อให้การตอบสนองสอดคล้องกับแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน



**รูปที่ 10** โครงสร้างของสายอากาศที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับระหว่างสายอากาศต้นแบบ สายอากาศที่สายส่งสัญญาณบริเวณที่ต่อกับสตัดจ์เป็นปลายเรียว และสายอากาศที่เพิ่มการเจาะช่องบริเวณส่วนมุมของระนาบกราวนเพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม ซึ่งพบว่าสายอากาศที่สายส่งเป็นปลายเรียวเกิดการแมตซ์ซึ่งทางอิมพีแดนซ์ได้ดีกว่าสายอากาศต้นแบบ และเมื่อเจาะช่องบริเวณส่วนมุมของระนาบกราวน จะส่งผลให้การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศมีค่าน้อยลง

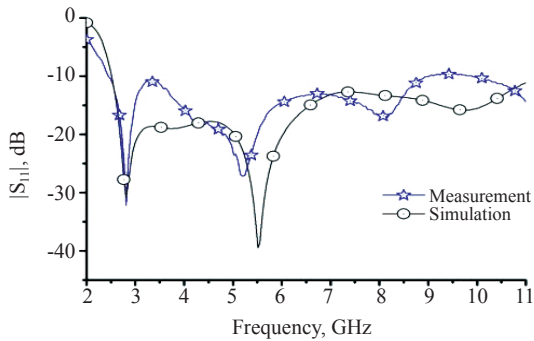
### 3.3 การสร้างสายอากาศแบบช่องเปิด

หลังจากการออกแบบและจำลองการทำงานของสายอากาศแบบช่องเปิดด้วยโปรแกรม IE3D เพื่อให้สามารถตอบสนองการทำงานตามมาตรฐาน WLAN/WiMAX และ UWB ได้ ผู้วิจัยจึงได้สร้างสายอากาศแบบช่องเปิดที่ใช้สตัดจ์แบบครึ่งวงกลมที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วมบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR-4 ที่มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 10

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศ

การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจะใช้เครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า (Network Analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น N5230C ในย่านความถี่ตั้งแต่ 2–11 กิกะเฮิรตซ์ ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 11



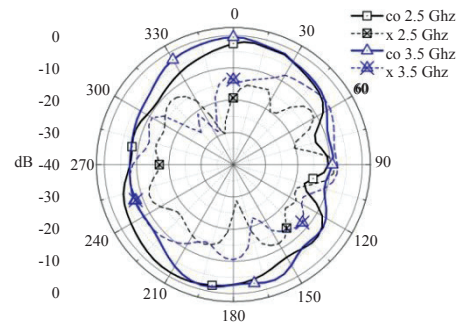
**รูปที่ 11** เปรียบเทียบค่าการสูญเสียการย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) จากการจำลองและการทดสอบ

รูปที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการย้อนกลับ โดยเส้นกราฟที่มีสัญลักษณ์รูปดาวเป็นผลวัด และรูปวงกลมเป็นผลของการจำลอง พบว่าผลตอบสนองของความถี่เรโซแนนซ์ที่สองมีค่าต่ำกว่าผลของการจำลองเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการทดสอบมีความสอดคล้องกัน และสามารถตอบสนองที่เป็นแบบแถบความถี่กว้างมาก (UWB) และรองรับกับการใช้งานตามมาตรฐานของ WLAN/WiMAX ที่มีค่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.4–10.9 กิกะเฮิรตซ์และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 8.5 กิกะเฮิรตซ์

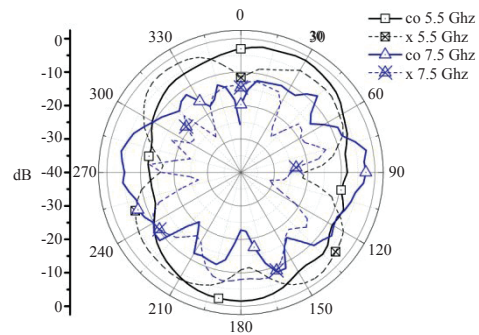
#### 4.2 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะใช้สายอากาศแบบฮอร์นเป็นตัวส่งสัญญาณและใช้สายอากาศที่พัฒนาขึ้นเป็นตัวรับสัญญาณ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองตัวเท่ากับ 2 เมตรที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field) โดยจะวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ

ผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  ที่พิจารณาจากความถี่ในย่านที่ใช้งานต่างๆ ได้แก่ ความถี่ 2.5, 3.5, 5.5 และ 7.5 กิกะเฮิรตซ์ แสดงดังรูปที่ 12 โดยเส้นทึบที่มีสัญลักษณ์แบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยมจะแสดงแบบรูปการแผ่กระจายแบบโพลาไรซ์เดียวกัน



(ก) ความถี่ 2.5 และ 3.5 กิกะเฮิรตซ์



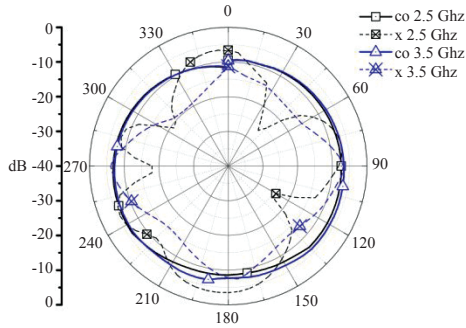
(ข) ความถี่ 5.5 และ 7.5 กิกะเฮิรตซ์

#### รูปที่ 12 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่บนระนาบ $xz$

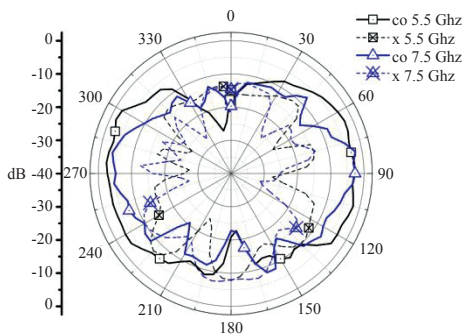
(Co-polarization) ส่วนเส้นประที่มีสัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยมพร้อมกากบาทแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ที่ความถี่ 2.5, 3.5, 5.5 และ 7.5 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ ผลจากการทดสอบพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายแบบรอบตัว (Omni-directional) โดยในบางช่วงความถี่สูงๆ อาจมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยเนื่องมาจากผลกระทบของการรบกวนของคลื่นในโหมดลำดับสูง (Higher Order Mode) ที่มีต่อการแผ่กระจายในทิศทางต่างๆ ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ  $yz$  จะแสดงดังรูปที่ 13 เส้นทึบที่มีสัญลักษณ์แบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยมจะแสดงแบบรูปการแผ่กระจายแบบโพลาไรซ์เดียวกัน ส่วนเส้นประสัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมและ





(ก) ความถี่ 2.5 และ 3.5 กิกะเฮิรตซ์



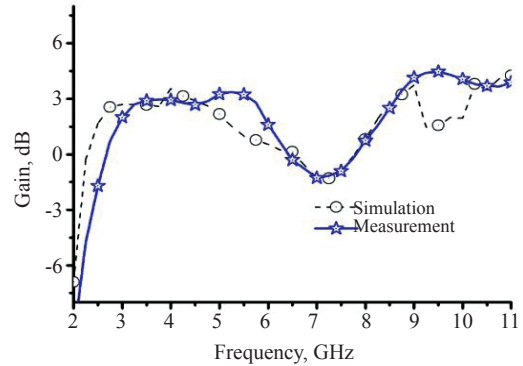
(ข) ความถี่ 5.5 และ 7.5 กิกะเฮิรตซ์

รูปที่ 13 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่บนระนาบ yz

สามเหลี่ยมพร้อมกากบาทแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบโพลาริซซ์ไคว์ ที่ความถี่ 2.5, 3.5, 5.5 และ 7.5 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ ผลจากการวัดพบว่าบนระนาบ yz ที่ความถี่ 2.5 และ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะรอบตัว และที่ความถี่ 5.5 และ 7.5 กิกะเฮิรตซ์ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะเป็นแบบสองทิศทาง

#### 4.3 การวัดอัตราขยายของสายอากาศ

การวัดอัตราขยายของสายอากาศแบบช่องเปิดทำได้โดยใช้สายอากาศที่ออกแบบจำนวนสองตัวที่มีคุณสมบัติเหมือนกันวางห่างกันในระยะ 35 เซนติเมตร จากนั้นวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้ายี่ห้อ Agilent รุ่น N5230C เพื่อหาค่า  $S_{21}$  ผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศที่พัฒนาขึ้นนี้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบอัตราการขยายของสายอากาศที่พัฒนาขึ้นจากการจำลองและการทดสอบ

แสดงดังรูปที่ 14 ซึ่งพบว่า ผลการทดสอบและผลการจำลองมีค่าที่สอดคล้องกันที่ความถี่ 3–5 กิกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่ 6–9 กิกะเฮิรตซ์ และมีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อยเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสายส่งสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศและคุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่ไม่รองรับการทำงานในย่านความถี่สูงๆ โดยสายอากาศที่พัฒนาขึ้นนี้มีค่าอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 4.5 dB ที่ความถี่ 9.5 กิกะเฮิรตซ์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -1.7 dB ที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์

#### 5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาสายอากาศแบบช่องเปิดโดยใช้สแต็คครึ่งวงกลมที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วม ใช้งานตามมาตรฐาน WLAN/WiMAX และสามารถตอบสนองแถบความถี่แบบกว้างมาก (UWB) ในช่วงความถี่ 2.4–10.9 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งพิจารณาจากค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ ระหว่างผลการจำลองและการทดสอบมีค่าที่สอดคล้องกัน ผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบรอบตัวในระนาบ xz และแบบสองทิศทางในระนาบ yz โดยข้อดีของโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สร้างได้ง่าย เหมาะกับการใช้ในระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้แถบความถี่แบบกว้างมากได้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Koohestani, M. Khaghani, and H. Asadi, "A compact wideband antenna with CPW-fed monopole for WLAN/WiMAX operation," *Journal of Telecommunications*, vol. 10, no. 2, pp. 10–13, September 2011.
- [2] S. Thanaputtiwirot and S. Akatimagool, "Development and design of the instruction package in telecommunication engineering laboratory on microwave passive circuits using PESDEEP learning model," *Technical Education Journal King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 5, no. 2, July–December 2014 (in Thai).
- [3] N. Tangthong, V. Pirajnanchai, and N. Songthanapitak, "Wideband CPW-Fed aperture antenna by using a semicircle ring tuning stub," in *Proceedings The 8<sup>th</sup> Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI)*, 2011, pp. 228–231 (in Thai).
- [4] J. William and R. Nakkeeran "CPW-Fed UWB slot antenna with cross like tuning stub," in *Proceedings International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2010, pp. 1–6.
- [5] P. Moeikham and P. Akkaraekthalin, "A pentagonal slot antenna with two circle stack patch for WLAN/WiMAX," in *Proceedings Intelligent Signal and Communication Systems (ISPACS)*, November 2011, pp. 1–6 (in Thai).
- [6] L. Dang, Z. Ya Lei, Y. Jun Xie, G. Li Ning, and J. Fan, "A compact microstrip slot Triple-Band antenna for WLAN/WiMAX applications," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, vol. 9, pp. 1178–1181, 2010.
- [7] M. Naser-Moghadasi, A. Danideh, R. Sadeghifakhr, and M. Reza-Azadi, "CPW-fed ultra wideband slot antenna with arc-shaped stub," *The Institution of Engineering and Technology, Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 3, pp. 681–686, June 2009.
- [8] J. William and R. Nakkeeran. "Heuristic design of CPW-Fed UWB slot antenna," in *Proceedings International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation*, 2009, pp. 1–4.
- [9] R. Jeenawong and S. Akatimagool, "The development of CPS-Fed dipole antenna for wireless communication Applications," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 23, no. 3, pp. 594–606, September–December, 2013 (in Thai).
- [10] G. S. N. Raju, *Antenna and Wave Propagation*. India: Published by Dorling Kindersley Pvt.Ltd, 2006.
- [11] S. Chaimool and P. Akkaraekthalin, "CPW-Fed antennas for WiFi and WiMAX," in *Advanced Transmission Techniques in WiMAX*. Published: InTech, January 18, 2012.
- [12] H. J. Visser, *Antenna Theory and Applications*. New York : John Wiley & Sons Ltd., 2012.