

สายอากาศแบบร่องที่มีสตัปตัวเอฟกลับด้านป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม  
Slot Antennas with Inverted F Stub Fed by Coplanar Waveguide  
Pathumwan Academic Journal

ประพจน์ จิระสกุลพร

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0-2219-3833 E-mail: prapojir@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

สายอากาศตัวเอฟกลับด้านเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติเด่นคือมีขนาดเล็กทำให้สามารถติดตั้งลงบนอุปกรณ์สื่อสารแบบเคลื่อนที่หรือแบบพกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ สายอากาศตัวเอฟกลับด้านมีโครงสร้างได้หลายรูปแบบ เช่น แบบระนาบ แบบแผ่นพิมพ์ บทความนี้ได้นำเสนอแนวคิด และการออกแบบสายอากาศแบบร่องบนแผ่นพิมพ์โดยนำโครงสร้างของตัวเอฟกลับด้านวางในร่องสายอากาศเพื่อทำหน้าที่เป็นสตัปในการแมตช์อิมพีแดนซ์ และป้องกันกำลังงานให้สายอากาศด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม เพื่อประยุกต์ใช้งานตามมาตรฐาน WLAN 802.11a/b/g จำนวน 3 รูปแบบ ทั้งแบบทำงานที่ย่านความถี่เดียวและแบบสองย่านความถี่และผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงาน แบบดัดเวิร์กและอัตราขยายของสายอากาศระหว่างผลการวัดและผลการจำลองด้วยโปรแกรมออกแบบ

**คำสำคัญ:** สายอากาศตัวเอฟกลับด้าน สายอากาศแบบร่อง สายนำสัญญาณระนาบร่วม โหลดสตริบไลซ์

#### Abstract

The Inverted F antenna is one type of small size antennas, because it can be installed on the mobile communication device such as cellular phones. It has several structures including planar and printed antennas. This paper presents the concept and design procedures of printed slot antenna, which the inverted F structure is placed in to the slot as an impedance matching stub, fed by a coplanar waveguide for WLAN 802.11a/b/g. All three prototype antennas are explained. The experimental results are presented and also compared with simulation results using a commercial software tool.

**Keywords:** inverted F antenna, slot antenna, coplanar waveguide feed, loading metallic strips

#### 1. คำนำ

โครงสร้างและรูปร่างของสายอากาศแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์นำทางจีพีเอส จำเป็นต้องมีส่วนของสายอากาศติดตั้งอยู่เพื่อใช้ในการรับและส่งคลื่นวิทยุ อุปกรณ์แบบพกพาโดยทั่วไปออกแบบให้มีขนาดเล็ก อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในจึงต้องมีขนาดเล็กด้วยเนื่องจากมีพื้นที่ในการติดตั้งอย่างจำกัด สายอากาศที่มีขนาดเล็ก

มีหลายโครงสร้าง [1] เช่น โมโนโพล ตัวเอฟกลับด้าน แฟคทิล และแบบพับโครงสร้าง (Meander line) เป็นต้น ในหลายปีที่ผ่านมาด้วยจุดเด่นของสายอากาศตัวเอฟกลับด้าน (Inverted F Antenna: IFA) ที่สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กที่ความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น สามารถออกแบบบนโครงสร้างระนาบ ปรับให้ตอบสนองความถี่กว้างหรือหลายย่านความถี่ได้ และมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว เป็นผลให้นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาและออกแบบสายอากาศ IF ที่ติดตั้งในอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา ในปี พ.ศ. 2503 R. King และคณะ [2] ได้นำเสนอต้นแบบของโครงสร้างสายอากาศ IF แบบระนาบ โดยปรับโครงสร้างมาจากสายอากาศตัวแอลกลับด้าน ในปี พ.ศ. 2530 Tokio Taga และ Kouichi Tsuekawa [3] ได้ออกแบบสายอากาศ IF แบบระนาบบนวิทยุแบบเคลื่อนที่ที่ย่านความถี่ 800 MHz สายอากาศ IF ได้มีการวิจัยมาอย่างต่อเนื่องในปี พ.ศ. 2554 นี้ Lev Pazin และ Yehuda Leviatan [4] ได้เผยแพร่บทความการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศตัวเอฟกลับด้านที่ใช้กับคอมพิวเตอร์แล็ปท็อปที่ย่าน Wi-Fi และ WIMAX

การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศ IF สามารถทำได้หลายวิธี เช่น โพรบพิด สายนำสัญญาณระนาบร่วม และไมโครสตริบ สายนำสัญญาณระนาบร่วมเป็นสายนำสัญญาณที่มีโครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อนและมีข้อดีหลายข้อ [5] เช่น การเชื่อมต่อระนาบกราวด์ทำได้ง่าย มีการกระจายของสนามไฟฟ้าในสายนำสัญญาณดีกว่าไมโครสตริบ ไม่ต้องเจาะรูแผ่นพิมพ์เพื่อป้อนสัญญาณจากด้านล่าง โครงสร้างประกอบเข้ากับอุปกรณ์อื่นได้ง่าย

ด้วยโครงสร้างที่สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กของสายอากาศ IF และข้อดีของสายนำสัญญาณระนาบร่วม โครงสร้างทั้งสองได้นำมาใช้ออกแบบสายอากาศแบบร่องโดยใช้โครงสร้าง IF เป็นสตัปในการปรับจูนที่ย่านระบบเครือข่ายไร้สาย (WLAN) เพื่อให้สายอากาศมีขนาดเล็กและทำการวัดผลเพื่อศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบ

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

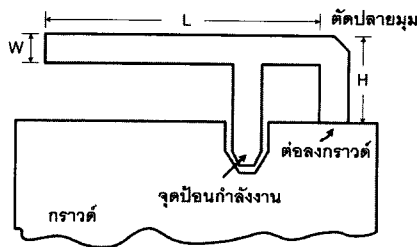
### 2.1 สายอากาศตัวเอฟกลับด้าน

สายอากาศ IF ประกอบด้วยโครงสร้างส่วนที่เป็นแผ่นตัวนำระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางอยู่เหนือระนาบกราวด์โดยที่ส่วนปลายด้านหนึ่งปล่อยลอยไว้และปลายอีกด้านหนึ่งหักมุมฉากและต่อลงกราวด์ การป้องกันกำลังงานให้กับสายอากาศจะป้อนเข้าที่ตำแหน่งห่างจากปลายด้านที่ต่อลงกราวด์มาทางด้านซ้ายเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 1

การหักมุมเพื่อต่อลงกราวด์ของโครงสร้าง IF จะมีผลต่ออัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน [5] ของสายอากาศเนื่องจากค่าความจุบริเวณมุม ซึ่งสามารถชดเชยค่าความจุนี้โดยการตัดปลายมุมของส่วนที่ต่อลงกราวด์ออก การออกแบบสายอากาศ IF ที่ความถี่ใช้งานในกรณีแผ่นตัวนำมี

ความบางมากเช่นแผ่นทองแดงของแผ่นพิมพ์ องค์ประกอบของสายอากาศในรูปที่ 1 สามารถคำนวณได้จากสมการ [6]

$$L + H = \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

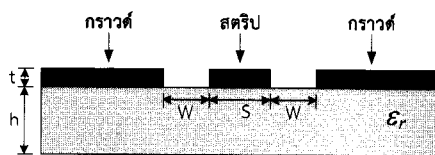


รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศ IF [6]

แผ่นตัวนำระยะนาโนสเกลเลียนผืนผ้าประกอบด้วย W คือความกว้าง L คือความยาวซึ่งวางขนานกับระยะนาโนกราวด์ และ H คือความยาวของส่วนที่หักมุมต่อลงกราวด์  $\lambda$  คือความยาวคลื่น ขนาดความกว้างและความยาวของระยะนาโนกราวด์จะมีผลต่อการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ IF โดยทั่วไประยะนาโนกราวด์จะมีความยาวมากกว่า L เพื่อครอบคลุมแผ่นตัวนำระยะนาโนสเกลเลียนผืนผ้า IF นอกจากความยาวที่เป็นส่วนกำหนดความถี่รีโซแนนซ์ ความกว้างของ W จะมีผลต่อความถี่รีโซแนนซ์และแบนด์วิดท์เช่นกัน การออกแบบให้สายอากาศทำงานที่ความถี่รีโซแนนซ์และมีแถบกว้างความถี่แบนด์วิดท์ที่ต้องการทำได้โดยการออกแบบส่วนป้อนสัญญาณให้มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำที่สุดที่อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม

## 2.2 สายนำสัญญาณระยะนาโนรวม

โครงสร้างของสายนำสัญญาณระยะนาโนรวมแบบไม่มีกราวด์ด้านล่าง ประกอบขึ้นจากแผ่นสตริปที่มีความกว้าง S วางไว้ตรงกลางบนพื้นผิวขั้วสเตรตด้านข้างขนาดด้วยระยะนาโนกราวด์ที่วางขนานกับสตริปทั้งสองด้าน โดยมีร่องแคบๆ W ขึ้นระหว่างสตริปและระยะนาโนกราวด์ทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดย h เป็นความหนาของขั้วสเตรต และ t เป็นความหนาของแผ่นตัวนำสตริปและระยะนาโนกราวด์



รูปที่ 2 สายนำสัญญาณระยะนาโนรวม [5]

การออกแบบสายนำสัญญาณระยะนาโนรวม สามารถคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ ( $Z_0$ ) [5]

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}} [K(k_1)/K'(k_1) + K(k_2)/K'(k_2)]} \quad \Omega \quad (2)$$

ค่า  $K(k)$  คือค่าอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชนิดแรก และ  $K'(k)$  เป็นค่าคอมพลีเมนต์  $\epsilon_{re}$  คือค่าไดอิเล็กทริกประสิทธิภาพ การออกแบบสายนำสัญญาณระยะนาโนรวมสามารถใช้โปรแกรมการออกแบบ IE3D ด้วยฟังก์ชันการออกแบบสายนำสัญญาณ (LineGauge) คำนวณขนาดความกว้าง S และความยาวสาย โดยกำหนดค่าของ t h W  $\epsilon_r$  ที่ความถี่กลางและการเลื่อนเฟสที่ปลายสาย 90° ที่อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ลงในโปรแกรมออกแบบ ด้วยคุณสมบัติที่ดีของโครงสร้าง IF และสายนำสัญญาณระยะนาโนรวมได้นำมาประยุกต์กับการออกแบบสายอากาศแบบร่องโดยนำโครงสร้างของ IF มาวางลงในร่องเป็นสตัปเพื่อปรับการแมตช์อิมพีแดนซ์และป้อนกำลังงานให้สายอากาศด้วยสายนำสัญญาณระยะนาโนรวม การออกแบบเบื้องต้นจะต้องคำนวณหาความยาวของแผ่นตัวนำระยะนาโนสเกลเลียนผืนผ้าของสตัป IF ที่ความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น และออกแบบขนาดความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณระยะนาโนรวมที่ความถี่รีโซแนนซ์ โดยจะได้อธิบายถึงโครงสร้างและการออกแบบสายอากาศในหัวข้อต่อไป

## 3. สายอากาศแบบร่องที่มีสตัปตัวเอฟฟลักซ์ด้านป้อนด้วยสายนำสัญญาณระยะนาโนรวม

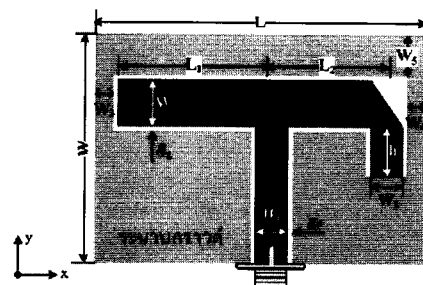
บทความนี้นำเสนอการศึกษาสายอากาศแบบร่องโดยป้อนด้วยสายนำสัญญาณระยะนาโนรวมและปรับจูนด้วยสตัป IF รวม 3 รูปแบบ สายอากาศแบบที่ 1 ออกแบบที่ความถี่เดียว 2.45 GHz แบบที่ 2 และแบบที่ 3 ออกแบบที่สอย่านความถี่คือ 2.45 GHz และ 5.25 GHz โดยได้นำเสนอการออกแบบ และแสดงผลการวัดเปรียบเทียบกับผลการจำลองคุณสมบัติของสายอากาศทั้ง 3 แบบ

### 3.1 สายอากาศร่องแบบใหม่ขนาดเล็กป้อนด้วยสายนำสัญญาณระยะนาโนรวมปรับจูนด้วยสตัป IF ย่าน WLAN 2.45 GHz [7]

สายอากาศแบบที่ 1 ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่เดียวเพื่อประยุกต์ใช้งานที่ย่านความถี่ WLAN มาตรฐาน 802.11b/g และบลูทูธ (Bluetooth)

#### 3.1.1 การออกแบบสายอากาศร่องปรับจูนด้วยสตัป IF ย่าน WLAN 2.45 GHz

การสื่อสารไร้สายตามมาตรฐานของ WLAN 802.11b/g กำหนดความถี่กลางที่ 2.45 GHz และมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่ 2.40 – 2.48 GHz โครงสร้างของสายอากาศแบบที่ 1 เป็นสายอากาศแบบร่องป้อนด้วยสายนำสัญญาณระยะนาโนรวมและปรับจูนด้วยสตัป IF มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3



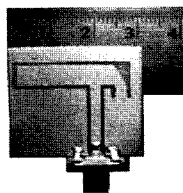
รูปที่ 3 สายอากาศร่องปรับจูนด้วยสตัป IF ย่าน WLAN 2.45 GHz

สายอากาศสร้างลงบนแผ่นพิมพ์ FR-4 ที่มีค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.4 และชั้นสเตรตนา 1.6 มม. โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องในรูปที่ 3 ประกอบด้วยสแตป IF มี  $W_1$  เป็นความกว้าง  $L_1$  และ  $L_2$  เป็นความยาวด้านระนาบที่ขนานกับกราวด์  $W_2$  และ  $h$  เป็นความกว้างและความยาวด้านที่ต่อลงกราวด์ตามลำดับ สายนำสัญญาณระนาบร่วมประกอบด้วย  $W_f$  เป็นความกว้างส่วนป้อนสัญญาณ  $g_f$  เป็นระยะช่องว่าง  $W_3$   $W_4$  และ  $W_5$  เป็นความกว้างระนาบกราวด์ที่ด้านซ้าย ด้านบน และด้านขวาของสแตป IF ตามลำดับและมี  $g_1$  เป็นช่องว่างชั้นอยู่ การออกแบบเริ่มจากคำนวณหาความยาวคลื่นในสายนำสัญญาณ ( $\lambda_g$ ) ที่ความถี่ 2.45 GHz = 78.3 มม. และกำหนดขนาดของ  $L_1+L_2+h$  เท่ากับหนึ่งในสี่ของ  $\lambda_g$  โดย  $h$  มีค่าน้อยกว่า  $\lambda_g$  มากๆ หลังจากนั้นทำการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศให้เหมาะสมที่สุด (optimization) ด้วยโปรแกรมออกแบบ IE3D โดยศึกษาการปรับขนาดของพารามิเตอร์  $W_1$   $W_2$   $W_3$   $W_4$   $L_1$  และ  $h$  ผลการศึกษาสรุปได้ดังตารางที่ 1 โดยการจำลองปรับพารามิเตอร์ให้มีขนาดเพิ่มขึ้น สัญลักษณ์ลูกศรชี้ขึ้นหมายถึงความถี่สูงขึ้น การแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีขึ้น และแบนด์วิดท์กว้างขึ้นและลูกศรชี้ลงจะมีความหมายตรงกันข้าม

ตารางที่ 1 ศึกษาการปรับเพิ่มขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศ

| พารามิเตอร์        | $W_1$ | $W_2$ | $W_3$ | $W_4$ | $W_5$ | $L_1$ | $h$ |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| ความถี่กลาง        | ↓     | ↓     | ↑     | ↑     | ↑     | ↓     | ↓   |
| การแมตซ์อิมพีแดนซ์ | ↑     | ↑     | ↓     | ↓     | ↓     | ↑     | -   |
| แบนด์วิดท์         | -     | ↑     | -     | -     | ↓     | ↑     | -   |

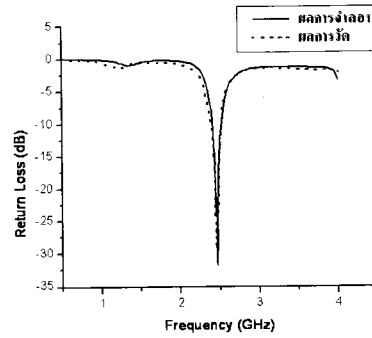
ผลจากการปรับค่าพารามิเตอร์ให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ที่อิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  ความยาวของสแตป IF เท่ากับ 21.04 มม.  $h = 3.29$  มม. (เท่ากับ  $0.04\lambda_g$ )  $W_1 = 5.6$  มม.  $W_2 = 3$  มม.  $W_3 = 1.5$  มม.  $W_4 = 2.1$  มม.  $W_5 = 3.83$  มม.  $W_f = 2.73$  มม.  $g_f = 0.3$  มม. และ  $g_1 = 0.6$  มม. ขนาดของสายอากาศกว้าง ( $W$ ) 28.3 มม. ยาว ( $L$ ) 30.1 มม. ดันแบบของสายอากาศร่องปรับจูนด้วยสแตป IF ที่ความถี่ 2.45 GHz แสดงในรูปที่ 4



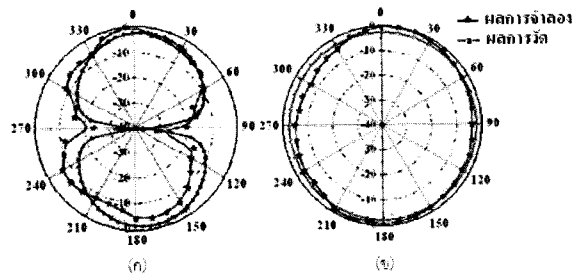
รูปที่ 4 ดันแบบสายอากาศร่องปรับจูนด้วยสแตป IF ย่าน WLAN 2.45 GHz

### 3.1.2 ผลการจำลองและผลการวัดสายอากาศร่องปรับจูนด้วยสแตป IF ย่าน WLAN 2.4 GHz

ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับที่สอดคล้องกับผลการจำลองของสายอากาศแสดงในรูปที่ 5 ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz ผลจากการจำลองและการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ 33 dB และ 28 dB ตามลำดับ ที่ 10 dB แบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่ 2.4-2.5 GHz ซึ่งกว้างกว่าแถบความถี่มาตรฐาน WLAN 802.11b/g



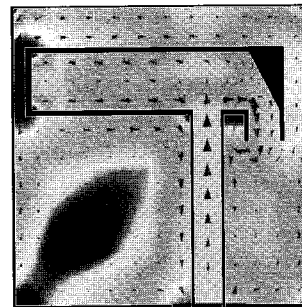
รูปที่ 5 ผลการวัดและผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับย่าน 2.45 GHz



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศย่าน WLAN 2.45 GHz (ก) ระนาบ x-y (ข) ระนาบ y-z

ตารางที่ 2 ผลการวัดคุณสมบัติของสายอากาศตามข้อกำหนด 802.11b/g

| แบบรูปการแผ่พลังงาน          | 2.4 GHz | 2.45 GHz | 2.48 GHz |
|------------------------------|---------|----------|----------|
| สภาพเจาะจงทิศทาง (dB)        | 3.45    | 3.44     | 3.44     |
| อัตราขยาย (dB <sub>i</sub> ) | 2.49    | 3.03     | 2.92     |
| ประสิทธิภาพ (%)              | 80.2    | 90.8     | 88.7     |



รูปที่ 7 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าบนสายอากาศ

การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศจากผลการจำลองและการวัดได้ผลสอดคล้องกันแสดงในรูปที่ 6 รูป (ก) แสดงระนาบ x-y ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง รูป(ข) แสดงระนาบ y-z มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional) การวัดคุณสมบัติของสายอากาศตามมาตรฐานของ WLAN 802.11b/g แสดงในตารางที่ 2 ที่ความถี่กลางมีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราขยายและประสิทธิภาพสูงสุด การจำลองการกระจายของ

สนามไฟฟ้าบนสายอากาศแสดงในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นการเชื่อมต่อของสนามไฟฟ้าจากสตัป IF กับระนาบกราวด์ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไหลบริเวณรอบของสตัป IF บริเวณระนาบกราวด์ในทิศทางตรงกันข้ามแสดงว่าการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากบริเวณรอบของสตัป IF

จากผลการวัดทดสอบแสดงว่าสายอากาศมีคุณสมบัติการทำงานครอบคลุมตามมาตรฐานที่กำหนดและมีอัตราขยายสูงถึง 3.03 dBi มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวซึ่งเหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศส่งและรับในย่าน WLAN 2.45 GHz

### 3.2 สายอากาศร่องแบบใหม่ขนาดเล็กสองย่านความถี่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมปรับจูนด้วยสตัป IF [8]

สายอากาศแบบที่ 2 พัฒนาจากสายอากาศแบบที่ 1 ซึ่งออกแบบให้ทำงานที่ความถี่เดียว 2.45 GHz โดยได้ปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศเพื่อตอบสนองการทำงานสองย่านความถี่ตามมาตรฐาน WLAN 802.11a/b/g ที่ย่านความถี่ต่ำ 2.40-2.483 GHz และย่านความถี่สูง 5.25-5.35 GHz

#### 3.2.1 การออกแบบสายอากาศร่องสองย่านความถี่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมปรับจูนด้วยสตัป IF

จากโครงสร้างสายอากาศแบบแรก การออกแบบความถี่ที่สองทำได้โดยการขยายร่องที่ด้านบนสายอากาศ พร้อมกับต่อขยายส่วนสตัป IF ยื่นเข้าไปภายในร่องเพื่อปรับจูนความถี่ย่าน 5.25 GHz โดยสตัปที่ยื่นเข้าไปมีความยาวประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 8 สายอากาศสร้างบนแผ่นพิมพ์ FR4 เช่นเดียวกับสายอากาศแบบที่ 1

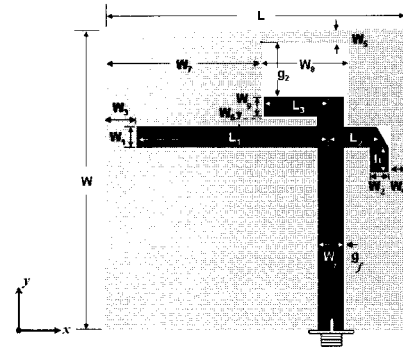
ขั้นตอนการออกแบบที่ความถี่ย่านต่ำ 2.45 GHz พารามิเตอร์ของสายอากาศยังมีขนาดเท่าเดิม และได้ศึกษาการจำลองด้วยโปรแกรมโดยการปรับพารามิเตอร์ให้มีขนาดลดลงดังแสดงในตารางที่ 3 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศ จากผลในตารางที่ 3 สรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการปรับเลื่อนความถี่รีโซแนนซ์ทั้งสองย่านคือ  $W_3$ ,  $W_4$ ,  $W_5$ ,  $W_6$ ,  $W_8$  และ  $g_2$  ส่วนพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการปรับเลื่อนความถี่ย่านเดียวคือ  $W_7$  และ  $L_3$  และพบว่าจะสามารถปรับจูนความถี่ต่ำด้วย  $W_7$  และความถี่สูงด้วย  $L_3$  อย่างเป็นอิสระต่อกัน ส่วนพารามิเตอร์อื่นปรับเพื่อให้การแมตช์อิมพีแดนซ์และแบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่ตามมาตรฐาน WLAN 802.11a/b/g

ตารางที่ 3 ศึกษาการปรับลดขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศ

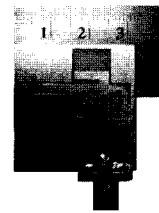
| พารามิเตอร์        | $W_3$      | $W_4$      | $W_5$      | $W_6$      | $W_7$ | $W_8$      | $L_3$ | $g_2$      |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|-------|------------|-------|------------|
| ความถี่กลาง        | f1↓<br>f2↑ | f1↓        | -          | f1↓<br>f2↑ | f1↓   | f1↑<br>f2↑ | f2↑   | f1↓        |
| การแมตช์อิมพีแดนซ์ | f1↓<br>f2↑ | f1↓<br>f2↑ | f1↓<br>f2↑ | f1↓<br>f2↓ | f1↓   | f1↑<br>f2↑ | -     | f1↓<br>f2↓ |
| แบนด์วิดท์         | -          | -          | -          | -          | -     | f2↑        | -     | -          |

ผลจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศให้สามารถตอบสนองความถี่สองย่านที่ 2.45 GHz และ 5.25 GHz ด้วยโปรแกรมการออกแบบ พารามิเตอร์ของสายอากาศในรูปที่ 8 มีขนาดดังนี้  $W_1 = 2.2$  มม.  $W_3 = 3.12$  มม.  $W_4 = 1.54$  มม.  $W_5 = 1.34$  มม.  $W_6 = 0.5$  มม.  $W_7 = 16.72$  มม.  $W_8 = 9.34$  มม.  $L_1 = 20.75$  มม.  $L_3 = 7.23$  มม. และ  $g_2 = 5.9$  มม. ขนาดของสายอากาศกว้าง (W) 32.22 มม. ยาว (L) 32.29 มม. ต้นแบบของสายอากาศแบบร่องสองย่าน

ความถี่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมปรับจูนด้วยสตัป IF แสดงในรูปที่ 9



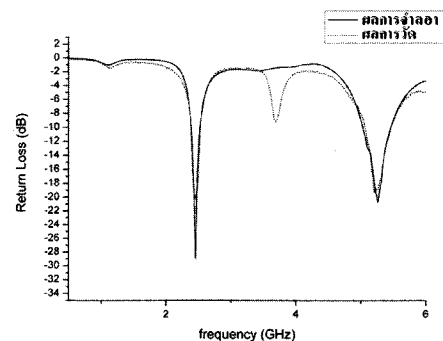
รูปที่ 8 สายอากาศร่องปรับจูนด้วยสตัป IF 2 ย่านความถี่



รูปที่ 9 ต้นแบบสายอากาศแบบร่องสองย่านความถี่ปรับจูนด้วยสตัป IF

#### 3.2.2 ผลการจำลองและผลวัดสายอากาศร่องสองย่านความถี่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมปรับจูนด้วยสตัป IF

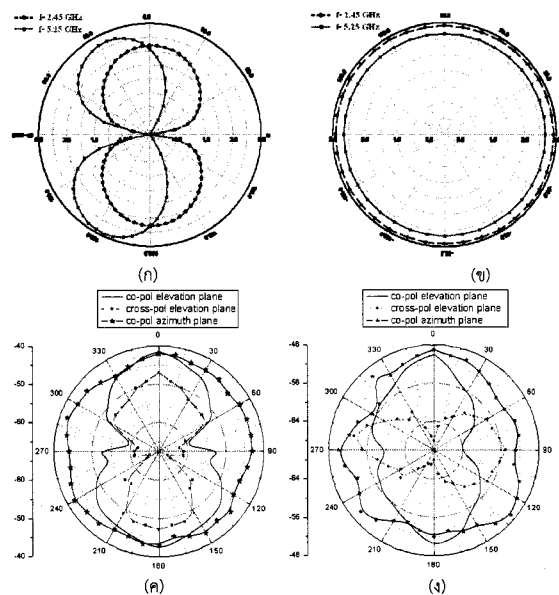
ผลการจำลองและผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงในรูปที่ 10 ผลการวัดค่าแบนด์วิดท์ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ 10 dB ครอบคลุมความถี่ 2.385-2.65 GHz ที่ย่านความถี่ต่ำ และครอบคลุมความถี่ 5.02-5.41 GHz ที่ย่านความถี่สูง ซึ่งครอบคลุมความถี่ตามมาตรฐาน WLAN 802.11a/b/g



รูปที่ 10 ผลการวัดและผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับสายอากาศแบบร่องสองย่านความถี่ปรับจูนด้วยสตัป IF

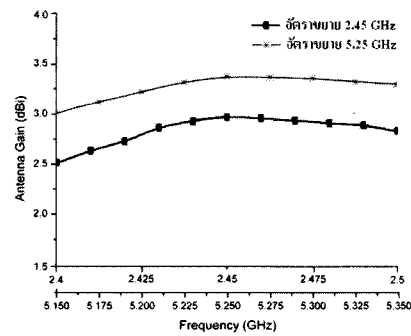
ผลการจำลองและผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแสดงในรูปที่ 11 ผลการจำลองรูป (ก) แสดงระนาบ x-y มีแบบ

รูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทางที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดที่มุม  $0^\circ$  และ  $180^\circ$  ส่วนที่ความถี่ 5.25 GHz มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดที่มุม  $150^\circ$  และ  $330^\circ$  ผลการจำลองรูป (ข) ระนาบ y-z มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว ผลการวัดในรูป (ค) ที่ความถี่ 2.45 GHz แสดงการโพลาไรซ์ร่วมและการโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบ x-y สายอากาศสามารถแยกการโพลาไรซ์ได้ดี กล่าวคือการโพลาไรซ์ร่วมมีค่าสูงกว่าการโพลาไรซ์ไขว้ 5.5 dB ที่  $0^\circ$  และ 8.5 dB ที่  $90^\circ$  ในระนาบ y-z สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว และผลการวัดในรูป (ง) ที่ความถี่ 5.25 GHz ระนาบ x-y มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง การแยกการโพลาไรซ์มีค่าต่ำเกิดที่มุม  $90^\circ$  คือค่าโพลาไรซ์ไขว้มีค่าสูงกว่าการโพลาไรซ์ร่วม 9 dB ระนาบ y-z มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวแต่มีการผิดเพี้ยนโดยมีระดับสัญญาณลดลงเล็กน้อยที่มุม  $90^\circ$   $180^\circ$  และมุม  $300^\circ$  รูปที่ 12 แสดงผลการวัดอัตราขยายสายอากาศที่มีค่าสูงสุดที่ 2.98 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.41 dBi ที่ความถี่ 5.25 GHz รูปที่ 13 การจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าบนสายอากาศแบบร่อง (ก) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ (ข) ที่ความถี่ 5.25 GHz

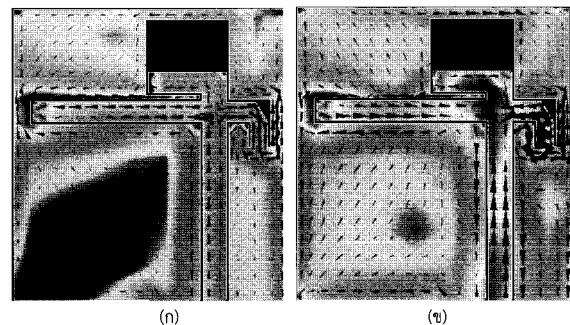


รูปที่ 11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ผลการจำลอง (ก) ระนาบ x-y (ข) ระนาบ y-z และผลการวัดระนาบ x-y และระนาบ y-z (ค) 2.45 GHz (ง) 5.25GHz

ผลการวัดสายอากาศร่องสองย่านความถี่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมปรับจูนด้วยสตัป IF มีคุณสมบัติครอบคลุมมาตรฐาน WLAN 802.11a/b/g ผลการวัดสอดคล้องกับผลการจำลอง แต่แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.25 GHz มีความเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ เนื่องจากมาจากโครงสร้างส่วนที่แผ่พลังงานของสายอากาศความถี่ย่านต่ำและความถี่ย่านสูงอยู่ใกล้กันจึงเกิดการรบกวนกัน ข้อดีของสายอากาศนี้คือมีขนาดเล็กและมีอัตราขยายที่สูง



รูปที่ 12 ผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.25 GHz



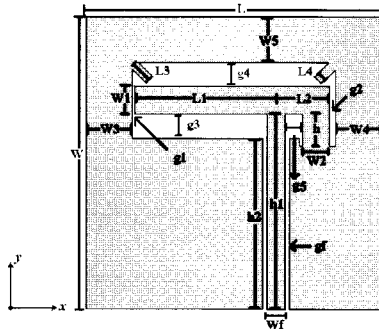
รูปที่ 13 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าบนสายอากาศสองย่านความถี่

### 3.3 สายอากาศร่องสองย่านความถี่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมปรับด้วยสตัป IF และโหลดสตริบไลน [9]

สายอากาศแบบที่ 3 พัฒนาจากสายอากาศแบบที่ 1 เช่นกันแต่ใช้วิธีการปรับความยาวของสตัป IF และขยายร่องของสายอากาศให้กว้างขึ้นเพื่อตอบสนองการทำงานสองย่านความถี่โดยใช้โหลดสตริบไลนช่วยในการปรับจูนความถี่และการแมตช์อิมพีแดนซ์

#### 3.3.1 การออกแบบสายอากาศร่องสองย่านความถี่ปรับด้วยสตัป IF และโหลดสตริบไลน

การออกแบบสายอากาศกำหนดตามมาตรฐานความถี่ย่าน WLAN 802.11a/b/g โดยสายนำสัญญาณระนาบร่วมออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz โดยมีช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ 0.5 มม. ผลการออกแบบด้วยโปรแกรม สายนำสัญญาณมีความกว้าง 7.16 มม. และยาว 20.97 มม. สร้างบนแผ่นพิมพ์ FR4 ในรูปที่ 14 แสดงโครงสร้างของสายอากาศ โดยได้เพิ่มโหลดสตริบไลนซึ่งมีความยาวเท่ากับ  $L_3$  และความกว้างเท่ากับ  $L_4$  การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการปรับจูนขนาดสายอากาศให้มีความเหมาะสมที่สุด ประกอบด้วยพารามิเตอร์  $W_3$   $W_4$   $W_5$   $g_1$   $g_4$   $g_5$   $L_3$  และ  $L_4$  ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4 สรุปได้ว่าพารามิเตอร์  $W_3$   $W_4$   $W_5$   $g_1$   $g_4$  และ  $g_5$  มีผลต่อการเลื่อนความถี่กลางของความถี่ย่านสูง การแมตช์อิมพีแดนซ์ของทั้งสองย่านความถี่ และแบนด์วิดท์ ยกเว้น  $W_3$  และ  $g_5$  ไม่มีผลต่อแบนด์วิดท์ ต่อมาได้ทำการศึกษาผลของโหลดสตริบไลน  $L_3$  และ  $L_4$  ผลคือ  $L_3$  มีผลต่อความถี่กลางของความถี่ย่านสูง  $L_4$  มีผลต่อความถี่กลางของทั้งสองย่านความถี่ และทั้งสองพารามิเตอร์มีผลต่อการแมตช์อิมพีแดนซ์ของทั้งสองย่านความถี่ และแบนด์วิดท์ของความถี่ย่านสูง

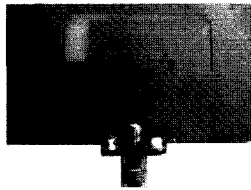


รูปที่ 14 สายอากาศร่่องปรับจูนด้วยสตัป IF และโหลตสตริปโลหะ 2 ย่านความถี่

ตารางที่ 4 ศึกษาการปรับลดขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศ

| พารามิเตอร์        | $W_3$                             | $W_4$            | $W_5$                         | $g_1$                           |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| ความถี่            | $f_2 \uparrow$                    | $f_2 \uparrow$   | $f_2 \downarrow$              | $f_1 \uparrow$                  |
| การสูญเสียย้อนกลับ | $f_1 \downarrow$ $f_2 \downarrow$ | $f_2 \downarrow$ | $f_1 \downarrow$              | $f_1 \uparrow$ $f_2 \downarrow$ |
| แบนด์วิดท์         | -                                 | $f_2 \uparrow$   | $f_2 \downarrow$              | $f_2 \uparrow$                  |
| พารามิเตอร์        | $g_4$                             | $g_5$            | $L_3$                         | $L_4$                           |
| ความถี่            | $f_2 \downarrow$                  | -                | $f_2 \uparrow$                | -                               |
| การสูญเสียย้อนกลับ | $f_1 \downarrow$ $f_2 \downarrow$ | $f_2 \downarrow$ | $f_1 \uparrow$ $f_2 \uparrow$ | $f_1 \uparrow$                  |
| แบนด์วิดท์         | -                                 | -                | -                             | -                               |

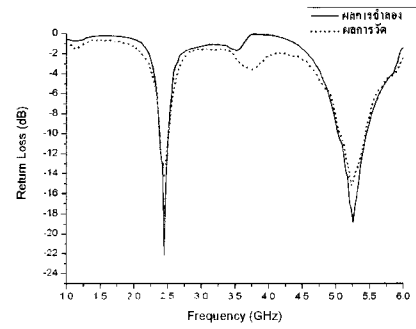
ผลการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศให้มีความเหมาะสมที่สุด พารามิเตอร์ของสายอากาศในรูปที่ 14 มีค่าดังต่อไปนี้  $W_1 = 9.2$  มม.  $W_2 = 10.13$  มม.  $W_3 = 13.4$  มม.  $W_4 = 7.1$  มม.  $W_5 = 3.0$  มม.  $g_1 = 5.3$  มม.  $g_2 = 0.5$  มม.  $g_3 = 0.6$  มม.  $g_4 = 2.0$  มม.  $g_5 = 1.5$  มม.  $L_1 = 8.11$  มม.  $L_2 = 16.55$  มม.  $L_3 = 1$  มม. และ  $L_4 = 1.4$  มม. สายอากาศมีขนาดกว้าง 34.17 มม. และยาว 50.96 มม. ต้นแบบของสายอากาศร่่องสองย่านความถี่ปรับด้วยสตัป IF และโหลตสตริปโลหะแสดงในรูปที่ 15



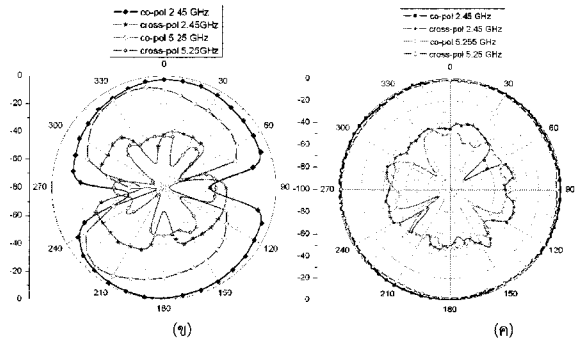
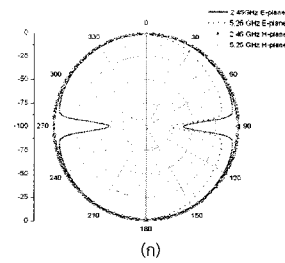
รูปที่ 15 ต้นแบบของสายอากาศร่่องสองย่านความถี่ปรับด้วยสตัป IF และโหลตสตริปโลหะ

### 3.3.2 ผลการจำลองและผลการวัดสายอากาศแบบร่่องสองย่านความถี่ปรับด้วยสตัป IF และโหลตสตริปโลหะ

การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแสดงในรูปที่ 16 ผลการวัดค่าแบนด์วิดท์ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ 10 dB มีแถบความถี่ 2.38-2.51 GHz ที่ย่านความถี่ต่ำ และแถบความถี่ 5.12-5.42 GHz ที่ย่านความถี่สูง ซึ่งครอบคลุมความถี่ตามมาตรฐาน WLAN 802.11a/b/g



รูปที่ 16 ผลการวัดและผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ

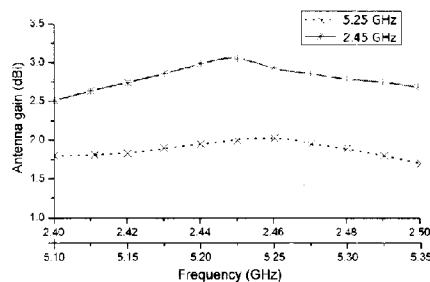


รูปที่ 17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ผลการจำลอง (ก) ระนาบ x-y และระนาบ y-z และผลการวัด (ค) ระนาบ x-y (ง) ระนาบ y-z

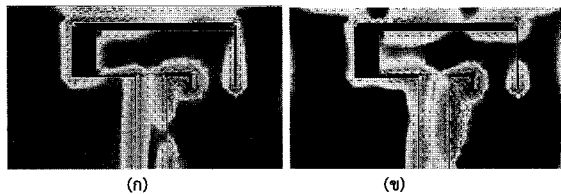
ผลการจำลองและผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแสดงในรูปที่ 17 รูป (ก) แสดงผลการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.25 GHz ในระนาบ x-y มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง และระนาบ y-z แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว ผลการวัดรูป (ข) ระนาบ x-y ทั้งสองย่านความถี่มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทางและการโพลาไรซ์ไขว้มีค่าต่ำกว่าการโพลาไรซ์ร่วม รูป (ค) ระนาบ y-z รูปแบบการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวทั้งสองย่านความถี่และมีระดับกำลังงานการโพลาไรซ์ไขว้ที่ต่ำ ผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศแสดงในรูปที่ 18 ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราขยายสูงสุดที่ 3.1 dBi และที่ความถี่ 5.25 GHz มีค่าอัตราขยายสูงสุดที่ 2.15 dBi รูปที่ 19 การจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าบนสายอากาศแบบร่่อง (ก) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ (ข) ที่ความถี่ 5.25 GHz

จากผลการวัดสายอากาศแบบร่่องสองย่านความถี่ปรับด้วยสตัป IF และโหลตสตริปโลหะเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบที่ 2 สายอากาศแบบที่ 3 มีแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งระนาบ x-y และระนาบ y-z ที่ดีไม่มี

การผิดเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานและมีการแยกการโพลาไรซ์ดี แต่มีขนาดของสายอากาศใหญ่กว่า ส่วนอัตราขยายมีค่าต่ำกว่าที่ความถี่ 2.45 GHz แต่มีค่าอัตราขยายสูงกว่าที่ความถี่ 5.25 GHz



รูปที่ 18 ผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.25 GHz



รูปที่ 19 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าบนสายอากาศแบบที่ 3 ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.25 GHz

#### 4. สรุปผล

บทความนี้ได้เสนอแนวคิด การออกแบบ และเปรียบเทียบผลการวัดของสายอากาศแบบร่อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม ปรับจูนด้วยสแต็ค IF จำนวน 3 แบบ สายอากาศแบบที่ 1 ออกแบบที่ย่านความถี่ WLAN 2.45 GHz มีข้อดีคือมีขนาดเล็ก มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการติดตั้งบนอุปกรณ์แบบพกพา คือมีแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว และเป็นต้นแบบเพื่อพัฒนาสายอากาศแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ตอบสนองการทำงานได้ 2 ความถี่ ย่าน WLAN 2.45 GHz และ 5.25 GHz สายอากาศแบบที่ 2 มีข้อดีคือมีขนาดเล็กมีค่าอัตราขยายสูงทั้งสองย่านความถี่ แต่ด้วยโครงสร้างของสายอากาศย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงออกแบบอยู่ใกล้กันจึงทำให้เกิดการรบกวนกันทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศผิดเพี้ยนไปทั้งในระนาบ x-y และระนาบ y-z และค่าการโพลาไรซ์ไขว้มีค่าสูง สายอากาศแบบที่ 3 ออกแบบเพื่อแก้ปัญหาการผิดเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 2 โดยออกแบบสายอากาศแบบร่อนเดียวและใช้โพลสตริคเพื่อช่วยในการแมตช์อิมพีแดนซ์ ทำให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ x-y เป็นแบบสองทิศทางและระนาบ y-z เป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวและมีค่าการโพลาไรซ์ไขว้ต่ำ ข้อเสียคือสายอากาศมีขนาดใหญ่กว่าสายอากาศแบบที่ 2 ประมาณ 65 % และอัตราขยายต่ำกว่า 1.26 dB ที่ความถี่ 5.25 GHz จากผลการวัดสายอากาศทั้ง 3 แบบแสดงว่าสายอากาศแบบที่ 1 สามารถตอบสนองการใช้งานตามมาตรฐาน WLAN 802.11b/g และสายอากาศแบบที่ 2

และแบบที่ 3 สามารถตอบสนองการใช้งานตามมาตรฐาน WLAN 802.11a/b/g

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] John L. Volakis, Chi-Chi Chen and Kyohei Fujimoto, "Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications", McGraw-Hill, United State of America, 2010, pp. 131-147
- [2] R. King, C.W. Harisson, and D. H. Denton, "Transmission-line missile antennas," IRE Trans. Antennas Propagat., vol. 8, no. 1, 1960, pp. 88-90
- [3] Tokio Taga and Kouichi Tsunekawa, "Performance Analysis of a Built-In Planar Inverted F Antenna for 800 MHz Band Portable Radio Units", IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. SAC-5, No. 5, June 1987, pp. 921-929
- [4] Lev Pazin and Yehuda Leviatan, "Inverted-F Laptop Antenna with Enhanced Bandwidth for Wi-Fi/WiMAX Applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 3, March 2011, pp.1065-1068
- [5] ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน "การออกแบบวงจรไมโครเวฟ" บริษัทมิสเตอร์ ก๊อปปี้จำกัด กรุงเทพฯ 2550 หน้า 27-28
- [6] Iulian rosu. (2007). PIFA-Planar Inverted F Antenna [Online]. Available: <http://www.qsl.net/va3iul>
- [7] Prapoch Jirasakulporn, Sarawuth Chaimool and Prayoot Akkaraekthalin, "A New Compact WLAN 2.4 GHz CPW-fed Slot Antenna with Inverted-F Shaped Tuning Stub", ISAP 2007, Nigata, Japan, 20-24 August 2007, pp. 1190-1193
- [8] Sarawuth Chaimool, Prapoch Jirasakulporn and Prayoot Akkaraekthalin, "A New Compact Dual-band CPW-fed Slot Antenna with Inverted-F Tuning Stub", ISAP 2008, Taipei International Convention Center, 27- 30 October 2008, pp. 445-448
- [9] Prapoch Jirasakulporn and Prayoot Akkaraekthalin, "A Dual-band CPW-fed Slot Antenna with Inverted-F Stub and Loading Metallic Strips" การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓ วันที่ ๑-๓ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๓ หน้า 961-964

#### ประวัติผู้เขียนบทความ



นายประพนธ์ จิระสกุลพร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตธัญบุรี และระดับปริญญาโท MSc. Eng.communication สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน งานวิจัยที่สนใจ สายอากาศแบบแผ่นพิมพ์ การออกแบบสายอากาศด้วยอิลิว