

เทคนิคการขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม  
สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย

**Bandwidth Enhancement Techniques of Slot Antenna CPW-Fed  
for Wireless Communication Systems**

เทพ เกื้อทวีกุล<sup>1</sup>

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย โดยใช้เทคนิคการตัดช่องเปิดของสายอากาศให้เป็นขั้นบันได และการแทรกแผ่นสตริปลงในช่องเปิดของสายอากาศเพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น และทำการจำลองโครงสร้างของสายอากาศ โดยนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (FDTD) และนำมาเปรียบเทียบกับวิธี MoM ด้วยโปรแกรม IE3D ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศได้หลากหลายรูปแบบและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ในการออกแบบสายอากาศนี้จะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศบางตัว เพื่อดูคุณสมบัติของสายอากาศประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า การแพร่กระจายคลื่นสนามระยะไกล และ อัตราขยายตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองจะให้ความถี่ และแบนด์วิดท์ครอบคลุมมาตรฐานของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายคือ IEEE 802.11 b/g (2.4-2.4835 GHz) IEEE 802.11j (4.9-5.0 GHz) IEEE 802.11 a (5.150-5.350GHz) และ โครงข่าย WiMAX (2-6 GHz) นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาสายอากาศเพื่อนำไปใช้งานกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่ง (UWB) โดยมีแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเป็นแบบสองทิศทาง

**คำสำคัญ:** แบนด์วิดท์, อิมพีแดนซ์,พัลส์, ไดอิเล็กตริก, พัลส์แบบเกาส์, แมตช์

**Abstract**

In this paper presents bandwidth enhancement techniques of slot antenna CPW-Fed for wireless communication systems. Bandwidth enhancement techniques are composed of step slot antenna and insert strip in the slot antenna. This antenna is analyzed by using Finite Difference Time Domain (FDTD) method compared with MoM of IE3D software. Herein, slot antenna fed by CPW is analyzed for return loss ( $S_{11}$  parameter), input impedance ( $Z_{in}$ ), VSWR, density of current, magnetic field and electrical field, bandwidth and far field radiation patterns, respectively. Simulated results can be obtained resonance frequency and impedance bandwidth for four operating bands which cover the requirement in bandwidths of IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz), IEEE 802.11j (4.9-5.0 GHz), IEEE 802.11a (5.150-5.350 GHz) and coverage WiMAX (2-6 GHz), and extended the slot antenna for UWB operation. The far-field radiation pattern of resonance frequencies is bi-directional.

**Keywords:** bandwidth, impedance, pulse, dielectric, gaussian pulse, match

<sup>1</sup> อาจารย์ประจำ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลข่าวสารได้มีการพัฒนาและเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารดาวเทียม ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) เป็นต้น ซึ่งการสื่อสารเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ใช้แถบความถี่ในย่านความถี่ไมโครเวฟในการรับ-ส่งข้อมูลทั้งสิ้น โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย นับเป็นการสื่อสารไร้สายหนึ่งในปัจจุบันที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากระบบมีความยืดหยุ่นสูง เพราะเป็นระบบที่ใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งข้อมูล และย่านความถี่สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายนี้กำหนดคอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.11a/b/g สายอากาศนับว่าเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากที่ใช้รับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ดังนั้นปัจจุบันนักวิจัยและอุตสาหกรรมทางด้านการสื่อสาร ได้ทำการศึกษาออกแบบและพัฒนาสายอากาศ โดยสายอากาศชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ และนิยมใช้งาน ย่านความถี่ไมโครเวฟ คือ สายอากาศแบบไมโครสตริป [2-5] เนื่องจากมีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ออกแบบได้ง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ เช่น การออกแบบสายอากาศความถี่เดี่ยว และสองความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายในมาตรฐานของ IEEE 802.11a/b/g/j และ IEEE 802.16d [6-9] แต่สายอากาศที่ออกแบบนั้น มีแบนด์วิดท์น้อยกว่า 40% และสายอากาศที่ออกแบบให้มีความถี่แบบแถบกว้างจะมีแบนด์วิดท์ประมาณ 90% ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2-6 GHz [10-11]

ในงานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างด้วยสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW) และใช้เทคนิคในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นด้วยการตัดช่องเปิดของสายอากาศให้เป็นขั้นบันได และการแทรกแผ่นสตริปลงในช่องเปิดของสายอากาศ เพื่อนำไปใช้งานย่านโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย การสื่อสารย่าน WiMAX และทำการพัฒนาสายอากาศรูปแบบนี้ไปใช้งานในย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่ง (UWB) โดยในการออกแบบสายอากาศนี้

จะทำการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศ ประกอบด้วย การสูญเสีย เนื่องจากการสะท้อนกลับ หรือ การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) แบนด์วิดท์ (Bandwidth) อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล และ อัตราขยาย ตามลำดับ

## 2. การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ใช้รูปแบบการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW สิ่งที่จะต้องทำเป็นอันดับแรกคือ การเลือกชนิดของวัสดุฐานรอง (Substrate) เพื่อนำเอาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ มาใช้ในการคำนวณหาความกว้างของ CPW ค่าของความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_g$ ) ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ และการออกแบบจำลองสายอากาศด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) [13] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ การออกแบบสายอากาศในบทความฉบับนี้เลือกใช้วัสดุฐานรอง (Substrate) แบบ RT/duroid 5880 ซึ่งมีค่าคุณสมบัติดังนี้ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 2.20 ค่า Loss tangent เท่ากับ 0.0009 ความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) เท่ากับ 1.575 มิลลิเมตร ตามลำดับ

การออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดด้วยสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม พารามิเตอร์สำคัญที่เป็นตัวกำหนดอันดับแรกคือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ เพื่อนำมาคำนวณความยาวรวมทั้งหมดของวงรอบช่องเปิด การออกแบบสายอากาศในบทความนี้จะเริ่มทำการออกแบบที่ความถี่แรกคือ ความถี่ 2.4 GHz โดยค่าความยาวที่ทำการคำนวณนั้นจะมีการอ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_g$ ) หลังจากนั้นจะทำการพัฒนาต่อโดยทำการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น เพื่อครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการ โดยความยาวคลื่นสัมพัทธ์สามารถหาได้จาก (1)-(3)

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

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

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

เมื่อ  $\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นสัมพัทธ์  $c$  คือ ความเร็วของแสง ( $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที)  $f$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ  $\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง  $h$  คือ ความหนา (สูง) ของวัสดุฐานรอง

## 2.1 การจำลองสายอากาศด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (FDTD)

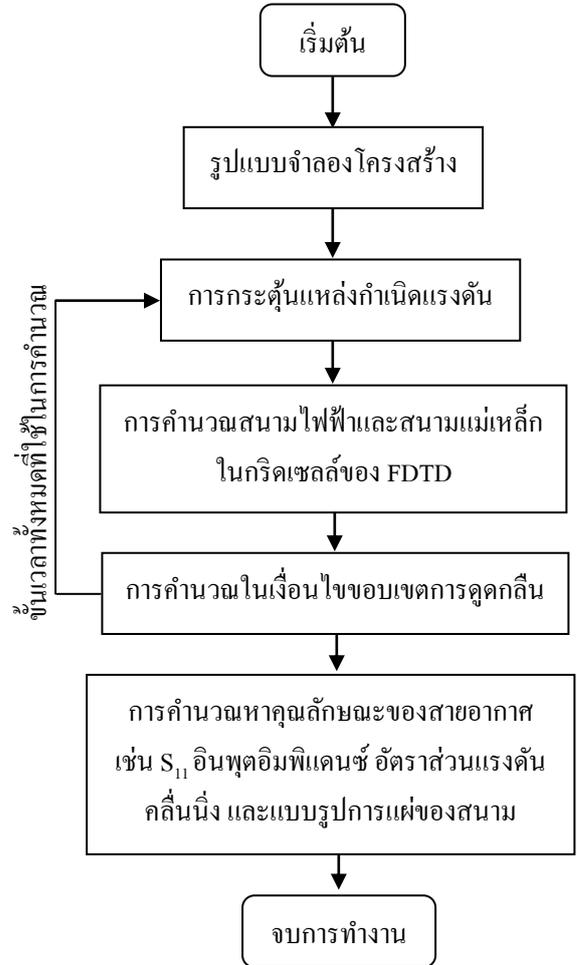
จากที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นบทความนี้ใช้การจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม FDTD โปรแกรมนี้จะใช้หลักการของวิธีผลต่างสลับเนื่องจำกัดในโดเมนเวลามาใช้ในการคำนวณ และวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ การออกแบบจำลองสายอากาศโดยใช้วิธี FDTD ในบทความนี้กำหนดขนาดหนึ่งหน่วยของยี่เซลล์ (Yee cell) ให้มีขนาดเล็กกว่าหนึ่งส่วนยี่สิบของขนาดความยาวคลื่นสัมพัทธ์ที่ต้องการ โดยการออกแบบให้มีขนาดหนึ่งหน่วยยี่เซลล์ในทิศทาง  $x$  คือ  $\Delta_x = 0.1575$  มิลลิเมตร และขนาดหนึ่งหน่วยยี่เซลล์ในทิศทาง  $y$  และ  $z$  เท่ากัน คือ  $\Delta_y = \Delta_z = 0.3$  มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถครอบคลุมขนาดสายอากาศทั้งหมดที่ออกแบบ และเพื่อให้มีความผิดพลาดในการคำนวณน้อยที่สุด นอกจากนี้แล้วเมื่อทำการกำหนดขนาดหนึ่งหน่วยเซลล์แล้วทำให้สามารถคำนวณหาช่วงเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ (4) แล้วแทนค่าต่างๆ ลงในสมการได้ดังนี้

$$\Delta_t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta_y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta_z}\right)^2}} \quad (4)$$

$$\Delta_t \leq \frac{1}{3 \times 10^8 \sqrt{\left(\frac{1}{0.1575 \times 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{0.3 \times 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{0.3 \times 10^{-3}}\right)^2}}$$

$$\Delta_t \leq 52.3 \text{ ps}$$

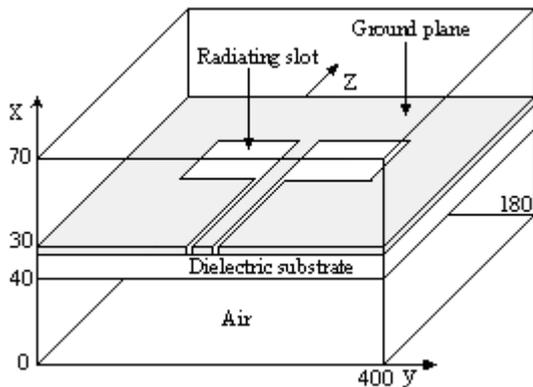
ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม FDTD สามารถอธิบายได้ดังบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 1



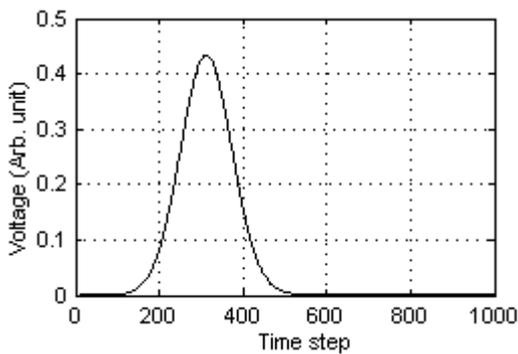
รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมสำหรับ FDTD อัลกอริทึม

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศที่ใช้วิธี FDTD ซึ่งในการคำนวณด้วยวิธีนี้จะคำนวณส่วนที่เป็นอากาศ (Air) ด้วย เพื่อให้ได้ค่าสนามระยะใกล้ของสายอากาศ การคำนวณรูปแบบโครงสร้างของสายอากาศนั้นจะมีวิธีการคำนวณ 2 ครั้ง คือ ครั้งแรกจะคำนวณเฉพาะรูปแบบจำลองโครงสร้างของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปเพียงอย่างเดียว เพื่อสร้างแหล่งกำเนิดแรงดันพัลส์แบบเกาส์ และนำเอาแหล่งกำเนิด

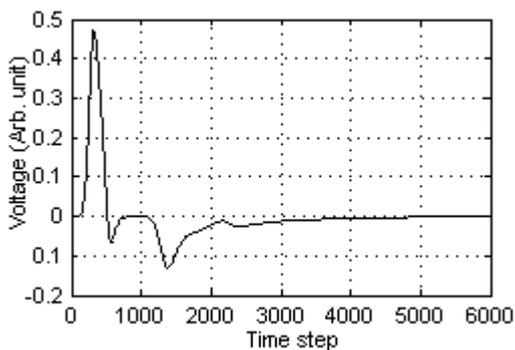
พัลส์ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณครั้งที่สอง และในการคำนวณครั้งที่สองนี้ จะเป็นการคำนวณหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิด เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อินพุตอิมพีแดนซ์ และ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง



รูปที่ 2 รูปแบบการจำลองโครงสร้างสายอากาศที่ใช้การคำนวณด้วยวิธี FDTD



(ก) แหล่งกำเนิดแรงดันพัลส์แบบเกาส์



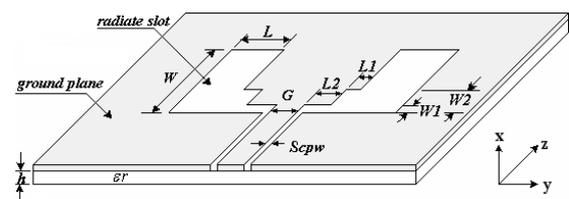
(ข) พัลส์แบบเกาส์เมื่อป้อนให้แก่โครงสร้างสายอากาศรูปที่ 3 พัลส์แบบเกาส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ

แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล และ อัตราการขยายของสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งรูปของ

แหล่งกำเนิดพัลส์แบบเกาส์ที่เป็นอินพุต และพัลส์แบบเกาส์เมื่อป้อนให้สายอากาศแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 3(ก)-3(ข)

### 3. โครงสร้างของสายอากาศและผลการจำลอง

#### 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบขั้นบันได



รูปที่ 4 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดขั้นบันได

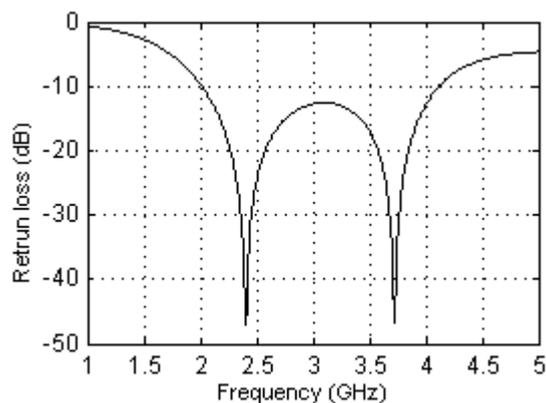
จากรูปที่ 4 แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดขั้นบันได โดยมีพารามิเตอร์ ดังนี้ L คือ ความยาวของช่องเปิดขั้นบันไดบน L1 คือ ความยาวของช่องเปิดขั้นบันไดกลาง L2 คือ ความยาวของช่องเปิดขั้นบันไดล่าง W คือ ความกว้างของช่องเปิดขั้นบันไดบน W1 คือ ความกว้างของช่องเปิดขั้นบันไดล่าง W2 คือ ความกว้างของช่องเปิดขั้นบันไดกลาง G คือ ระยะห่างระหว่างสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระยะนำรวม และ Scpw คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระยะนำรวม ตามลำดับ

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างอันดับแรก คือ การออกแบบสายอากาศที่ความถี่ที่ต้องการ ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวคลื่นสัมพันธ์ของสายอากาศ โดยค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ของสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz สามารถหาได้จาก (1) ซึ่งมีค่าประมาณ 99 มิลลิเมตร ความยาวรวมทั้งหมดของวงรอบช่องเปิดที่อ้างอิงจากรูปที่ 4 คือ  $2(L+L1+L2+W)$  จะมีขนาดความยาวทั้งหมดประมาณ  $\lambda_g$  ของความถี่ที่ต้องการ กล่าวคือ ความยาวด้าน  $L_T$  หรือ  $L+L1+L2$  เท่ากับ 41.1 มิลลิเมตร และความกว้าง W เท่ากับ 9 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระยะนำรวม (G) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระยะนำรวม (Scpw)

เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ หลังจากการออกแบบสายอากาศให้ได้ตามความถี่ที่ต้องการแล้ว แต่เนื่องจากในอนาคตต้องการสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์มาก ๆ เพื่อรองรับกับเทคโนโลยีในอนาคต ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบสายอากาศแบบแถบกว้าง โดยใช้เทคนิคการตัดช่องเปิดแบบขึ้นบันได และการแทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลลงในช่องเปิดของสายอากาศ อันดับแรกจะเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบขึ้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 4

### 3.2 ผลการจำลองของสายอากาศแบบขึ้นบันได

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบขึ้นบันได จะเริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศที่มีความถี่ที่ต้องการกล่าวคือความถี่ 2.4 GHz หลังจากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดแบบขึ้นบันได จากผลการศึกษาพบว่า การปรับค่าพารามิเตอร์ L1 L2 W1 และ W2 ช่วยในการทำแมทชิ่งและขยายแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น และ



รูปที่ 5 การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศช่องเปิดขึ้นบันได

ผลการจำลองที่ดีที่สุดของสายอากาศรูปแบบนี้ มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ L เท่ากับ 41.1 มิลลิเมตร L1 เท่ากับ 9.9 มิลลิเมตร L2 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร W1 เท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร G และ W2 เท่ากับ 0.90 มิลลิเมตร ตามลำดับ การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ได้จากการ

จำลองแสดงดังรูปที่ 5 และ คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดขึ้นบันได แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดขึ้นบันได

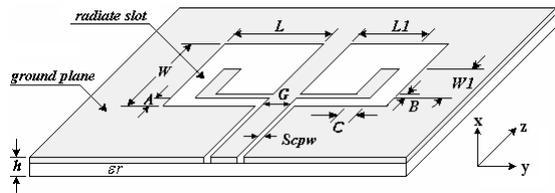
คุณลักษณะของสายอากาศ	ความถี่ที่ 2.40 GHz	ความถี่ที่ 3.72 GHz
$S_{11}$ พารามิเตอร์	-46.94 dB	-46.84 dB
VSWR	1.005	1.006
Zin (Zin real)	50.40 โอห์ม	50.36 โอห์ม
Zin (Zin Imag)	0.20 โอห์ม	0.28 โอห์ม
อัตราขยาย	3.13 dBi	4.91 dBi
แบนด์วิดท์	2.19 GHz (2.01-4.20 GHz)	

ตารางที่ 1 แสดงคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดขึ้นบันไดที่ได้จากการจำลอง โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ -46.94 dB ที่ความถี่ 2.40 GHz และ -46.84 dB ที่ความถี่ 3.72 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.01-4.20 GHz อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.005 ที่ความถี่ 2.40 GHz และ 1.006 ที่ความถี่ 3.72 GHz อินพุตอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ 2.40 GHz และ 3.72 GHz มีค่าประมาณ 50 โอห์ม และมีอัตราขยายที่ความถี่ 2.4 GHz เท่ากับ 3.13 dBi และที่ความถี่ 3.72 GHz เท่ากับ 4.91 dBi และ จากผลการจำลองสายอากาศรูปแบบนี้ได้ รูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเป็นแบบสองทิศทาง

จากผลการจำลองทำให้ทราบว่า การออกแบบสายอากาศช่องเปิดขึ้นบันได เป็นเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้เพิ่มขึ้น แต่จะนำไปใช้งานได้ ในแถบความถี่ที่ไม่กว้างมากนัก ดังนั้นจึงหาวิธีที่สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นอีก ลำดับถัดไปจะเป็นการนำเสนอสายอากาศช่องเปิดโดยใช้เทคนิคการแทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลลงไปในช่องเปิด

### 3.3 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล เพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น โดยโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล

จากรูปที่ 6 แสดงโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ มีดังนี้ L คือ ความยาวของช่องเปิด L1 คือ ความยาวของแผ่นสตริปตามแนวนอน W คือ ความกว้างของช่องเปิด W1 คือ ความยาวของแผ่นสตริปตามแนวตั้ง A คือ ระยะระหว่างแผ่นสตริปกับขอบล่างของสายอากาศ B คือ ขนาดของแผ่นสตริปแนวนอน C คือ ขนาดของแผ่นสตริปแนวตั้ง G คือ ระยะห่างระหว่างสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม Scpw คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง และ h คือ ค่าความหนาของวัสดุฐานรอง ตามลำดับ

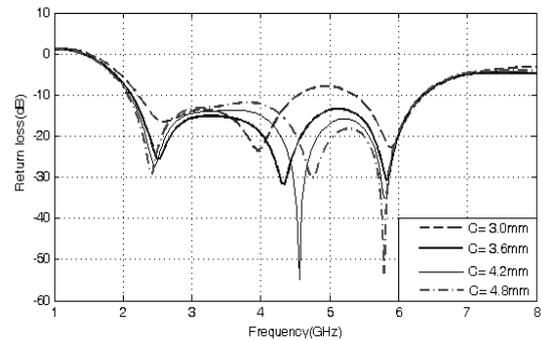
### 3.4 ผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล

การศึกษาออกแบบสายอากาศช่องเปิดกรณีช่องสตริปรูปตัวแอลมีขนาดไม่เท่ากัน โดยทำการวิเคราะห์สายอากาศรูปแบบนี้โดยจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ W เท่ากับ 23 มิลลิเมตร L เท่ากับ 27 มิลลิเมตร L1 เท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร W1 เท่ากับ 18 มิลลิเมตร Scpw เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร และ G เท่ากับ 3 มิลลิเมตร คงที่ แล้วทำ

การปรับค่าพารามิเตอร์ A B และ C เพื่อดูผลกระทบ โดยเริ่มต้นออกแบบให้ A เท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร B เท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร และ C เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

#### 3.4.1 กรณีปรับขนาดความกว้างของ C

การศึกษาการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อศึกษาผลกระทบกรณีแรก คือ การปรับความกว้างแผ่นสตริปรูปตัวแอลแนวตั้ง (C) โดยในการศึกษาได้กำหนดให้ความกว้างของ A และ B เท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร และปรับขนาดของแผ่นสตริปแนวตั้ง เท่ากับ 3.0 3.6 4.2 และ 4.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ



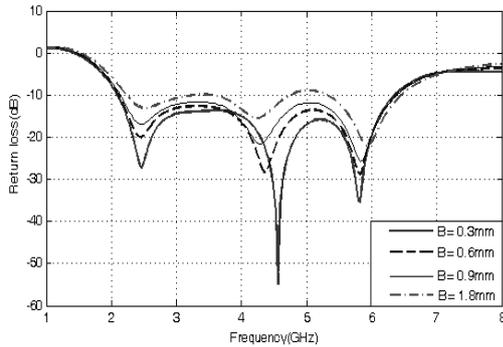
รูปที่ 7 การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) กรณีปรับค่า C

จากรูปที่ 7 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) กรณีปรับความกว้างของแผ่นสตริปแนวตั้ง จากผลการจำลองเมื่อปรับความกว้างของแผ่นสตริปให้มากขึ้นจะช่วยให้แบนด์วิดท์ดีขึ้น โดยที่แบนด์วิดท์ยังเท่าเดิม และผลที่ดีที่สุดเมื่อปรับค่า C คือที่ C เท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) จะต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.09-6.33 GHz ซึ่งจะได้แบนด์วิดท์เท่ากับ 4.24 GHz จากการวิเคราะห์จะทำให้ทราบว่า การปรับค่าความกว้างของช่องสตริปแนวตั้งช่วยในการปรับแบนด์วิดท์ นำค่าความกว้างของช่องสตริปแนวตั้งที่ได้ผลดีที่สุดไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

#### 3.4.2 กรณีปรับขนาดความกว้างของ B

กรณีนี้เป็นการปรับความกว้างของแผ่นสตริปตามแนวนอน (B) โดยกำหนดให้ความกว้างของแผ่นสตริปแนวตั้ง (C) คงที่ เท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร และ

กำหนดให้ทำการปรับความกว้างของ B เท่ากับ 0.3 0.6 0.9 และ 1.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 8

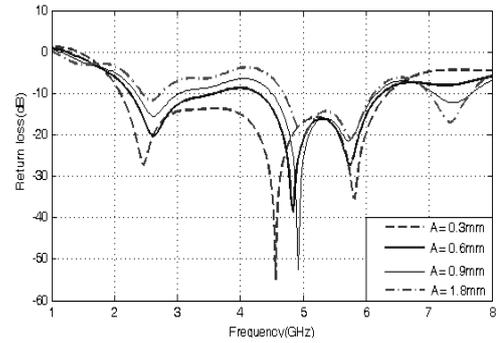


รูปที่ 8 การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) กรณีปรับค่า B

จากรูปที่ 8 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) กรณีปรับค่า B เมื่อปรับของความกว้าง B มากขึ้น จะทำให้เมทซ์ซึ่งลดลง จากผลการจำลอง กรณีปรับค่า B เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร จะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.09-6.33 GHz และได้แบนด์วิดท์ เท่ากับ 4.24 GHz ดังนั้นจึงนำค่าของพารามิเตอร์ C และ B เท่ากับ 4.2 และ 0.3 มิลลิเมตร ไปใช้วิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

### 3.4.3 กรณีปรับขนาดความกว้างของ A

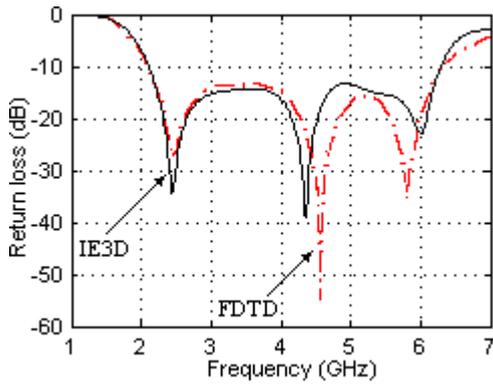
การศึกษาการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศในกรณีแรกคือ การปรับความกว้างของช่องสตัดรูปตัวแอลแนวนอน โดยในการศึกษาได้กำหนดให้ความกว้างของแผ่นสตัดแนวนอน (C) และแนวนอน (B) คงที่ เท่ากับ 4.2 และ 0.3 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ A เท่ากับ 0.3 0.6 0.9 และ 1.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) กรณีปรับค่า B

จากรูปที่ 9 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) กรณีปรับระยะระหว่างแผ่นสตัดกับขอบล่างของสายอากาศ (A) การปรับขนาด A ตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.9 มิลลิเมตร ทำให้ทราบว่า การปรับ ระยะระหว่างแผ่นสตัดกับขอบล่างของสายอากาศจะมีผลต่อเมทซ์ซึ่งและความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อปรับระยะให้มากขึ้น จะทำให้เมทซ์ซึ่งและแบนด์วิดท์ลดลง จากผลการจำลอง เนื่องจากการปรับระยะระหว่างแผ่นสตัดกับขอบล่างของสายอากาศได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) จะต่ำกว่า -10 dB ที่ต่ำสุด ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.09-6.33 GHz และจะได้แบนด์วิดท์ เท่ากับ 4.24 GHz โดยที่ระยะระหว่างแผ่นสตัดกับขอบล่างของสายอากาศ (A) เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร

จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศทำให้ทราบถึงผลกระทบต่าง ๆ ดังนั้น ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้ผลดีที่สุด และนำผลที่ได้มาเทียบกับระเบียบวิธีแบบ MoM ด้วยโปรแกรม IE3D [12] โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จากผลการจำลองสายอากาศรูปแบบนี้ คือ L เท่ากับ 27 มิลลิเมตร L1 เท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร W เท่ากับ 23.1 มิลลิเมตร W1 เท่ากับ 18 มิลลิเมตร G และ W2 เท่ากับ 0.90 มิลลิเมตร C เท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร และ A B และ  $S_{cpw}$  เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 10 การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล

และการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี FDTD และ MoM ของ IE3D แสดงดังรูปที่ 10 และ คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล (FDTD)

คุณลักษณะ	ความถี่	ความถี่	ความถี่
ของสายอากาศ	2.45 GHz	4.55 GHz	5.82 GHz
$S_{11}$ พารามิเตอร์	-27.31 dB	-54.83 dB	-35.24 dB
VSWR	1.09	1.00	1.03
$Z_{in}$ ( $Z_{in}$ real)	48.19 โอห์ม	49.83 โอห์ม	51.73 โอห์ม
$Z_{in}$ ( $Z_{in}$ Imag)	3.83 โอห์ม	0.07 โอห์ม	0.31 โอห์ม
อัตราขยาย	2.80 dBi	4.55 dBi	3.47 dBi
แบนด์วิดท์	4.24 GHz (2.09- 6.33 GHz)		

จากตารางที่ 2 แสดงคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอล ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองมีความถี่เรโซแนนซ์คือ 2.45 GHz 4.52 GHz และ 5.78 GHz โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -23.41 dB -46.89 dB และ -30.55 dB ตามลำดับ

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 โอห์ม อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งใกล้เคียงกับ 1 และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 4.24 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ ตั้งแต่ 2.09- 6.33 GHz ตามลำดับ

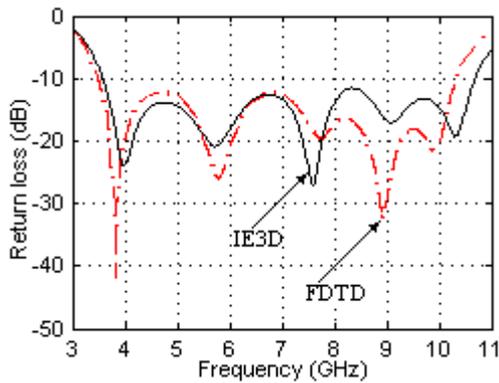
การออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลทำให้ทราบว่า การแทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลเป็นเทคนิคอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยให้สามารถเพิ่มแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นได้ เนื่องจากการแทรกแผ่นสตริปลงไปช่องเปิดจะทำให้มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่แถบความถี่อื่น ๆ ด้วย จึงส่งผลให้สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อผลจำลองที่ได้ของวิธี FDTD มาเทียบกับวิธี MoM ของ IE3D ผลที่ได้จะใกล้เคียงกันซึ่งสามารถนำไปใช้งานด้านการสื่อสารไร้สายตั้งแต่ความถี่ 2-6 GHz นอกจากนั้นสายอากาศรูปแบบนี้ยังสามารถนำไปปรับใช้ในด้านการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง (UWB) ด้วย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 3.5 ผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลสำหรับ UWB

ในหัวข้อนี้แสดงผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดที่แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลสำหรับ UWB โดยเริ่มออกแบบที่ความถี่ 3.1 GHz และใช้เทคนิคแทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลลงในช่องเปิดของสายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศให้ผลที่สุดแสดงในตารางที่ 3 จากผลการจำลอง ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแสดงในรูปที่ 11 และ คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิด ที่มีช่องสตัดรูปตัวแอล

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศช่องเปิด
W	14.1 มิลลิเมตร
L	18.0 มิลลิเมตร
L1	15.9 มิลลิเมตร
W1	10.2 มิลลิเมตร
A	0.3 มิลลิเมตร
B	1.65 มิลลิเมตร
C	5.4 มิลลิเมตร

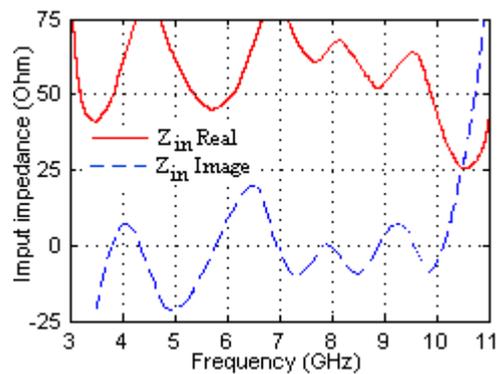


รูปที่ 11 การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศ UWB

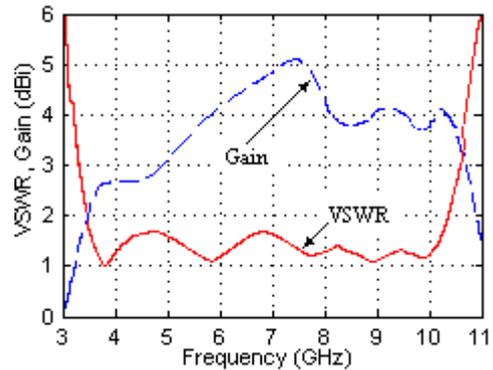
ตารางที่ 4 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดที่ แทรกแผ่นสตริปรูปตัวแอลสำหรับ UWB

คุณลักษณะ	ความถี่ 3.80	ความถี่ 5.80	ความถี่ 8.90	ความถี่ 9.90
ของสายอากาศ	GHz	GHz	GHz	GHz
$S_{11}$ พารามิเตอร์	-41.83 dB	-25.91 dB	-32.51 dB	-21.56 dB
VSWR	1.01	1.10	1.04	1.18
$Z_{in}$ ( $Z_{in}$ real)	50.20 โอห์ม	45.28 โอห์ม	52.4 โอห์ม	48.78 โอห์ม
$Z_{in}$ ( $Z_{in}$ Imag)	-0.78 โอห์ม	1.12 โอห์ม	-0.53 โอห์ม	-8.18 โอห์ม
อัตราขยาย ( $Gain$ )	2.59 dBi	3.93 dBi	3.8 dBi	3.7 dBi
แบนด์วิดท์	6.95 GHz (3.4-10.35GHz)			

จากตารางที่ 4 แสดงการออกแบบสายอากาศช่องเปิดด้วยสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่มีสตัดรูปตัวแอลผลที่ได้จากการจำลองมีที่ความถี่เรโซแนนซ์คือ 3.80 GHz 5.80 GHz 8.90 GHz และ 9.90 GHz โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -41.83 dB -25.91 dB -32.51 dB และ -21.56 dB ตามลำดับ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง จะใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม และ ใกล้เคียง 1 ทั้งสี่ความถี่เรโซแนนซ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และมีแบนด์วิดท์ เท่ากับ 6.95 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 3.4–10.35 GHz

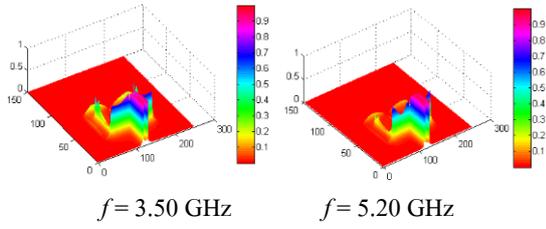


รูปที่ 12 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ UWB

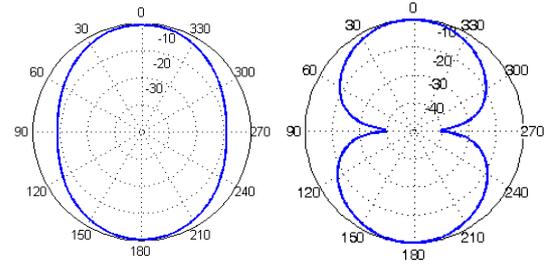


รูปที่ 13 VSWR และอัตราขยายของสายอากาศ UWB

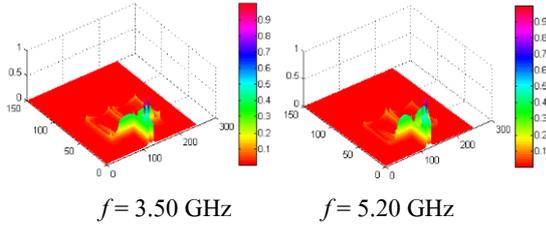
รูปที่ 12 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์สายอากาศ UWB ที่มีทั้งเทอมจริง และเทอมจินตภาพ ตั้งแต่ความถี่ 3-11 GHz และมีอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งแสดงในรูปแบบที่ 13 ซึ่งค่าที่ยอมรับได้ คือ VSWR ต่ำกว่า 2 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 3.4-10.35 GHz และมีอัตราขยายสูงสุด เท่ากับ 5.06 dBi ที่ความถี่ 7.5 GHz แสดงในรูปแบบที่ 13 ตามลำดับ



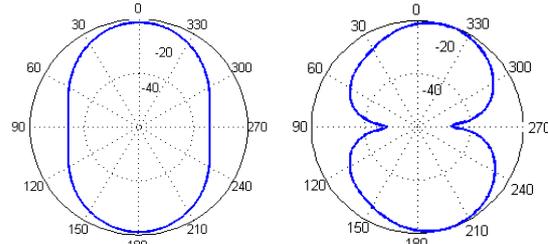
(ก) ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า



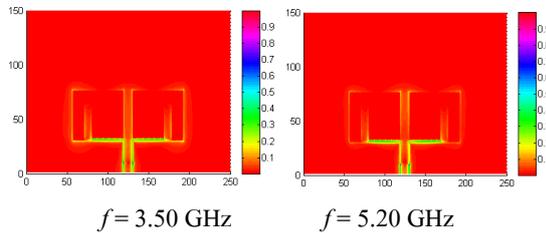
xy-plane ความถี่ 5.20 GHz xz-plane



(ข) ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก



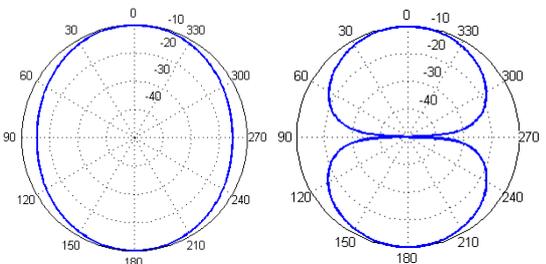
xy-plane ความถี่ 9 GHz xz-plane  
รูปที่ 15 รูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกล



(ค) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 14 ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้าของสายอากาศ UWB

จากรูปที่ 14 แสดงสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ซึ่งความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าจะอยู่ที่บริเวณปลายสตัดตัวแอลขนาดเท่ากัน และตรงกลางของขอบสายอากาศช่องเปิด และสนามแม่เหล็กจะมีความหนาแน่นที่กลางของสตัดรูปตัวแอล และที่มุมของสายอากาศช่องเปิด ดังนั้นกล่าวได้ว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ และการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์



xy-plane ความถี่ 3.50 GHz xz-plane

รูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ xy และระนาบ xz แสดงในรูปที่ 15 รูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดที่ความถี่ 3.50 GHz 5.2 GHz และ 9.0 GHz ซึ่งผลของรูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ xy จะแสดงสนามแม่เหล็กโดยมีรูปแบบการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง และระนาบ xz จะแสดงสนามไฟฟ้าโดยมีรูปแบบการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง (Bidirectional)

#### 4. สรุป

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย โดยใช้เทคนิคการตัดช่องเปิดของสายอากาศให้เป็นขั้นบันได และการแทรกแผ่นสตริปลงในช่องเปิดของสายอากาศเพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น โดยใช้วิธี FDTD และ IE3D มาทำการวิเคราะห์ ผลที่ได้จากการจำลองได้แบนด์วิดท์ครอบคลุมมาตรฐานของโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สายคือ IEEE 802.11 a/b/g และโครงข่ายการสื่อสารย่าน WiMAX (2-6 GHz) และยังสามารถพัฒนาสายอากาศเพื่อนำไปใช้งานกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่ง (UWB)

อีกด้วย และมีแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล เป็นแบบสองทิศทาง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล  
ธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม IE3D

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Federal Communications Commission, 2002. "First Report and Order, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems," FCC.
- [2] C. A. Balanis, 2005. **Antenna theory analysis and design**, third editions, John Wiley & Son, Inc.
- [3] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl and A. Ittipiboon, 2001. **Microstrip Antenna Handbook**, Boston: Artech House.
- [4] I. J. Bahl, and P. Bharita, 1980. **Microstrip Antenna**, Dedham: Artech House.
- [5] K. F. Lee and W. Chen, 1997. **Advances in Microstrip and Printed Antennas**, New York John Wiley & Sons, Inc.
- [6] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, J. Nakasuwan, and T. Wakabayashi, 2007. "Broadband Slot Antenna Fed by Microstrip Line", **ICEAST**, 21-23 November, Thailand.
- [7] Y. Shih-Huang and W. Kin-Lu, 2002. "Dual-band F-Shaped Monopole Antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN Application", **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, vol. 4, Jun.
- [8] H. D. Chen, J. S. Chen, and Y. T. Cheng, 2007. "Modified Inverted-L Monopole Antenna for 2.4/5.2 GHz Dual-Band Operations," **Electron. Letter**, Vol.39:1567-1568.
- [9] C. Horng-Dean, 2003. "Slot Antenna Coupled by Microstrip Line for Dual Frequency," **IEEE Trans. on Antennas and Propagation**, Vol. 51, No. 8:1982-1986.
- [10] P. Jearapraditkul, W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, O. Sangaroon and T. Wakabayashi, "Bandwidth Enhancement of CPW-Fed Slot Antenna with Inset Tuning Stub", **ISCIT**, 21-23 October, Vientiane, Lao.
- [11] W. Kueathaweekun, P. Jearapraditkul, N. Anantrasirichai, O. Sangaroon, and T. Wakabayashi, 2008. "Wide-band CPW-fed Slot Antenna with Tuning Stub and  $\pi$ -Strip for WLAN/WiMAX Application", **ISPACS**, 8-11 December, Bangkok, Thailand.
- [12] Zeland Software, Inc., IE3D, New York.
- [13] Yongxi Qian, Tatsuo Itoh, 1999. "**FDTD Analysis and Design of Microwave Circuits and antennas Software and Applications**", Tokyo: Realize Inc.