

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณในการทำโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการอนุเคราะห์การวัดผลของงานวิจัยนี้

อรลภ แสงอรุณ ผู้วิจัย



RCH

@ 369ค

2554

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **137737**
วันเดือนปี **17 ก.ค. 2558**

.b. 12694836
.i.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การขยายแบนด์วิธของสายอากาศแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมเพื่อการใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายและในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

ชื่อโครงการ (ภาษาอังกฤษ) Bandwidth Enhancement of CPW Antenna for WLAN and UWB Applications

แหล่งเงิน.....เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์.....

ประจำปีงบประมาณ.....2557.....จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....60,000.....บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556.....ถึง.....30 กันยายน 2557.

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

หัวหน้าโครงการวิจัย.....รศ. อรลภก แสงอรุณ.....

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อีเมล: ksornlar@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย.....1. รศ. นภพินท์ อนันตรศิริชัย.....

ข้าราชการบำนาญ

อีเมล: a_nop@hotmail.com

2. ดร. ไพฑูรย์ รักเหลือ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อีเมล: PAITOON_R@RMUTT.AC.TH

คำสำคัญ (Keywords) CPW Antenna, Slot Loop Antenna, U-Shaped Stripe, Bandwidth

Enhancement

บทคัดย่อ

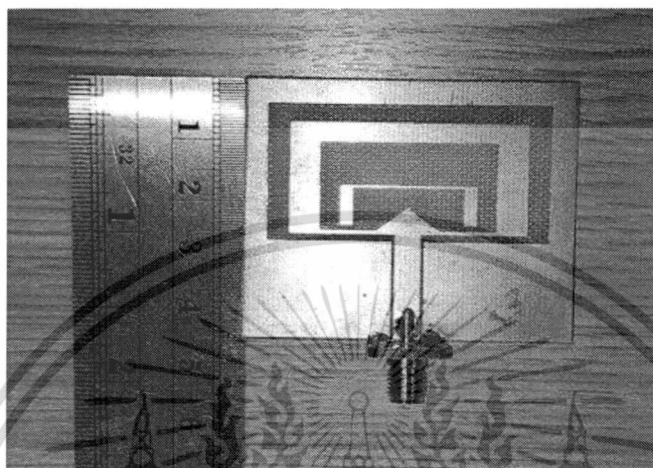
งานวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) เพื่อให้ได้แบนด์วิธที่กว้างที่สุดครอบคลุมมาตรฐานความถี่ ได้แก่ เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Area Network: WLAN), ไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access: WiMAX), แถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra-wideband: UWB) สายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นการพัฒนามาจากสายอากาศช่องเปิดวงรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปร่างพื้นฐานและนำมาขยายแบนด์วิธให้กว้างครอบคลุมมาตรฐานความถี่โดยมี 3 ขั้นตอน คือ 1) แทรกช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าลงในสายอากาศวงรอบช่องเปิด 2) พัฒนารูปร่างช่องเปิดที่แทรกเข้าไป และ 3) แทรกเส้นตัวนำรูปตัวยู ลงในช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เทคนิคที่นำเสนอเหล่านี้ทำให้ได้รับแบนด์วิธตั้งแต่ความถี่ 2.34 GHz ถึง 11.24 GHz ซึ่งครอบคลุม WLAN, WiMAX, และ UWB การนำเสนอต่อไปคือขยายแบนด์วิธให้กว้างมากขึ้นทางด้านความถี่ต่ำเพื่อให้รองรับมาตรฐานมือถือระบบ 3G ดังนั้นเราจึง

ทำการขยายขนาดของสายอากาศวงรอบช่องเปิดที่มีแบนด์วิดท์กว้างนี้ การออกแบบสายอากาศสุดท้ายนี้จะถูกนำไปสร้างจริงบนวัสดุฐานรองแบบแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ผลการวัดสายอากาศที่สร้างจริงนี้จะเป็นการยืนยันว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถทำได้ช่วงความถี่ที่กว้างมาก ๆ ตั้งแต่ 1.83 GHz ถึง 13.56 GHz ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานทุกมาตรฐานความถี่ใน WLAN, WiMAX, UWB, และมีมือถือ 3G

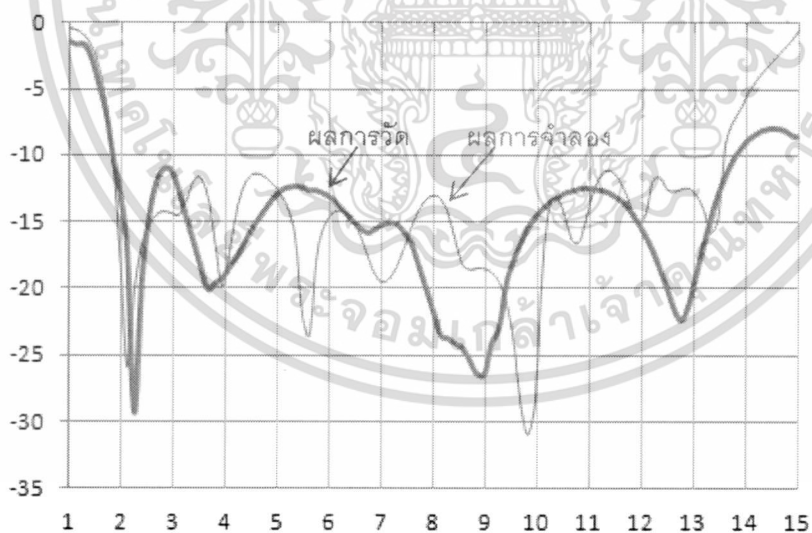
Abstract

This paper presents a novel coplanar waveguide (CPW) fed slot loop antenna which achieves the widest bandwidth coverage for four standards, i.e. WLAN, WiMAX, UWB, and mobile 3G (2.1 GHz). Our proposed antenna is developed from a simple rectangular slot loop antenna and its bandwidth coverage is enhanced using three steps: i) inserting an inner rectangular slot into the slot loop antenna, ii) developing the shape of inner rectangular slot, and iii) inserting a U-shaped stripe in the inner rectangular slot. These proposed techniques achieve the simulated impedance bandwidth at 2.34-11.24 GHz which covers WLAN, WiMAX and UWB. To further widen the bandwidth to the lower frequencies for mobile 3G standard, we then enlarge the size of our wideband slot loop antenna. This final design antenna was fabricated on the FR4 substrate. The measurements from this real antenna confirm that our proposed techniques can achieve very wide frequency range of 1.83-13.75 GHz, which is suitable for all WLAN, WiMAX, UWB, and mobile (2.1 GHz) applications.

ผลการจำลองสายอากาศที่ได้ออกแบบ ถูกนำไปสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่มีราคาถูก คุณภาพปานกลาง ผลสุดท้ายจะได้เป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างมากรองรับทุกมาตรฐานความถี่ที่ต้องการ รูปร่างสายอากาศวงรอบช่องเปิดที่ได้ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 2 และผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2. สายอากาศวงรอบช่องเปิดที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4



รูปที่ 3. ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อไทย	II
บทคัดย่ออังกฤษ	III
ผลการสร้างสายอากาศ	IV
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 โครงการวิจัยสายอากาศ	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
1.7 คุณสมบัติ และ รายละเอียดของชิ้นงานในโครงการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง: ทฤษฎีพื้นฐานสายอากาศ	6
2.1 บทนำ	6
2.2 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ	6
2.2.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio)	6
2.2.2 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)	7
2.2.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)	7
2.2.4 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	7
2.2.5 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)	8
2.2.6 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)	9
2.2.7 แบนด์วิดธ์ (Bandwidth)	9
2.3 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม	10
2.3.1 ลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง	10
2.3.2 ลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง	12
2.4 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)	13
2.4.1 เวกเตอร์โพเทนเชียล (Vector Potential)	13
2.4.2 การวิเคราะห์ที่ใช้สายส่งสัญญาณ (Transmission Line Model)	13
2.4.3 การวิเคราะห์ที่ใช้รูปแบบของโพรง (Cavity Model)	13
2.4.4 วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การจำลองแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D	14
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างสายอากาศวงรอบช่องเปิดแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม	15
3.1 หลักการออกแบบสายอากาศ	15
3.2 โครงสร้างของสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม	15
3.3 การออกแบบวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมพื้นฐาน	16
3.4 การขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศวงรอบช่องเปิด	18
3.4.1 การแทรกช่องเปิดกว้าง	18
3.4.2 การปรับแต่งช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	18
3.4.3 การแทรกเส้นตัวนำรูปตัวยู	19
3.5 การขยายขนาดของสายอากาศวงรอบช่องเปิด	20
3.6 ผลการสร้างและวัดสายอากาศวงรอบช่องเปิด	21
สรุปผลการวิจัย	21
เอกสารอ้างอิง	22



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1 ขนาดและผลการจำลองของสายอากาศวงรอบช่องเปิดห้าขนาด

17



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ผังแสดงขั้นตอนการออกแบบ วัสดุ และการนำเสนอผลงาน	4
1.2 ขนาดของสายอากาศ	5
2.1 โครงสร้างสายสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (coplanar waveguide)	10
2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (coplanar waveguide)	12
3.1 โครงสร้างโครงสร้างสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมป้อนด้วย CPW	15
3.2 รูปร่างสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วย CPW	16
3.3 เปรียบเทียบผลการจำลอง S_{11} ของสายอากาศวงรอบช่องเปิด 5 ขนาด	17
3.4 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #1 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})	18
3.5 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #2 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})	19
3.6 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #3 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})	19
3.7 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #4 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})	20
3.8 สายอากาศวงรอบช่องเปิดแบบ CPW ที่สร้างบน FR4	21
3.9 เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการวัดของสายอากาศ Ant. #4	21

บทที่ 1

โครงการวิจัยสายอากาศ

การขยายแบนด์วิธของสายอากาศแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมเพื่อการใช้งานในเครือข่าย ท้องถิ่นไร้สายและในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

Bandwidth Enhancement of CPW Antenna for WLAN and UWB Applications

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การสื่อสารและโทรคมนาคมเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นต่อการดำรงชีพของมนุษย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการสื่อสารให้สูงขึ้น เช่น การสื่อสารไร้สาย การสื่อสารดาวเทียม และการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น การสื่อสารเหล่านี้ล้วนแต่ใช้คลื่นความถี่ไมโครเวฟในการรับส่งข้อมูลทั้งสิ้น สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำหน้าที่ทั้งรับและส่งคลื่นได้ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศ จึงขอกล่าวถึงสายอากาศที่ทำหน้าที่ในการส่งคลื่นออกไปในอากาศเพียงอย่างเดียว สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่นิยมใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟมีหลากหลายรูปแบบ มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก รวมทั้งยังออกแบบและสร้างได้ง่ายอีกด้วย สายอากาศไมโครสตริปจะมีโครงสร้างพื้นฐานที่ได้รับความนิยมอยู่ 3 รูปแบบ คือ สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (microstrip patch antenna) สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (microstrip slot antenna) และสายอากาศไมโครสตริปไดโพล (microstrip dipole antenna) สายอากาศแต่ละชนิดมีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบแตกต่างกันไป การพิจารณาเลือกสายอากาศชนิดใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและประเภทของงานที่ต้องใช้สายอากาศ และเนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้งานระบบสื่อสารต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการกำหนดมาตรฐานความถี่ต่าง ๆ ขึ้นมารับรอง ซึ่งแต่ละประเทศหรือแต่ละพื้นที่ก็จะใช้มาตรฐานความถี่แตกต่างกันออกไป ทำให้การรับส่งข้อมูลต่างพื้นที่หรือต่างระบบไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากสายอากาศที่ใช้กันนั้นได้ถูกออกแบบให้ใช้ได้เฉพาะระบบใดระบบหนึ่งหรือมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่ง ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นสายอากาศที่สามารถใช้งานได้หลายความถี่หรือหลายย่านการใช้งาน ซึ่งจะเป็นการช่วยให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน สายนำสัญญาณที่ใช้ในการป้อนสัญญาณผ่านเข้าไปภายในสายอากาศไมโครสตริปมีหลายแบบ เช่น สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (microstrip line) สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (coplanar waveguide: CPW) สายนำสัญญาณแบบเส้นตัวนำระนาบร่วม (coplanar stripline: CPS) เป็นต้น แต่ที่ได้รับความนิยมสูง คือ ไมโครสตริปไลน์ และท่อนำคลื่นระนาบร่วม เนื่องจากมีหลักในการออกแบบและวิธีการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ (matching impedance) ที่ง่ายไม่ซับซ้อน จากงานวิจัยด้านสายอากาศที่ผ่านมาส่วนหนึ่งจะเป็นการออกแบบสายอากาศแถบความถี่กว้างที่ครอบคลุมมาตรฐานความถี่ใน WLAN คือตั้งแต่ 2.4 GHz ถึง 6 GHz และครอบคลุมมาตรฐานความถี่ในย่าน UWB คือ 3.1GHz ถึง 10.6 GHz แต่ก็มีบางงานวิจัยที่ออกแบบสายอากาศที่มีแถบความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ 2.4 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งทำให้สามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งย่าน WLAN และUWB รวมทั้งยังสามารถใช้งานได้ในมาตรฐานความถี่ไวแมกซ์ (WiMAX) ได้ด้วย

งานวิจัยที่จัดทำนี้ มีแนวคิดในการวิเคราะห์ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW Antenna) แบบง่ายไม่ซับซ้อนที่สามารถรองรับการใช้งานย่าน WLAN, WiMAX, และ UWB โครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบนี้ ประกอบด้วยวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบ

กราวด์ที่ป้องกันสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW) โดยมีการจัดวางวงรอบช่องเปิดที่ใช้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมบนวัสดุฐานรองที่เป็นเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 การจัดวางวงรอบช่องเปิดที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นนี้ จะต้องศึกษาถึงวิธีการออกแบบสายอากาศให้ได้แบนด์วิดท์ตามที่ต้องการ และจะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ที่สำคัญของสายอากาศเพื่อผลต่อการนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ที่มีแบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่มาตรฐานใน WLAN (Wireless Local Area Network) คือ 2.45 GHz, 5.2 GHz, 5.8 GHz ครอบคลุมมาตรฐาน WiMAX คือ 2.6 GHz, 3.5 GHz, 5.8 GHz และครอบคลุมมาตรฐาน UWB คือ 3.1-10.6 GHz และอาจจะออกแบบให้สายอากาศมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมลงมาถึงมือถือในระบบ 3G (2.1 GHz) และ 4G (2.3 GHz)
2. การออกแบบสายอากาศ จะใช้วิธีการควบคุมช่องเปิดที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นเพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ๆ และปรับให้เกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุด
3. เพื่อสามารถนำไปใช้ในระบบสื่อสารย่านไร้สายได้หลายย่านความถี่มาตรฐาน
4. เพื่อเผยแพร่แนวคิดในการทำวิจัยที่ใช้รูปร่างสายอากาศที่ยังไม่เคยเผยแพร่ในงานวิจัยอื่นมาก่อน
5. เพื่อนำไปเผยแพร่ด้วยการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. เป็นแนวทางในการศึกษาเทคนิคในการขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริป
2. สายอากาศวงรอบช่องเปิดที่ออกแบบนี้ สามารถนำไปใช้งานได้ตามมาตรฐานในระบบสื่อสารไร้สายที่เป็นความถี่ประมาณกึ่งกลางของความถี่มาตรฐานในระบบ WLAN, WiMAX, UWB, และ โทรศัพท์เคลื่อนที่
3. เพื่อเผยแพร่แนวคิดในการทำวิจัยที่ยังไม่มีงานวิจัยอื่นทำมาก่อน
4. เป็นการเผยแพร่ชื่อเสียงของสถาบันฯ ให้เป็นที่รู้จักในหมู่นักวิจัยในระดับนานาชาติผ่านสื่อสิ่งพิมพ์ที่เป็นวารสารนานาชาติ
5. สามารถนำผลการวิจัยนี้ไปสร้างจริง และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบ CPW สำหรับรองรับหลายความถี่
2. ได้สายอากาศไมโครสตริปที่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานความถี่ของ WLAN, WiMAX, UWB
3. ทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง (Simulation) จากโปรแกรม IE3D ด้วยคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
4. สามารถนำไปใช้ในระบบสื่อสารไร้สายได้หลายความถี่มาตรฐาน

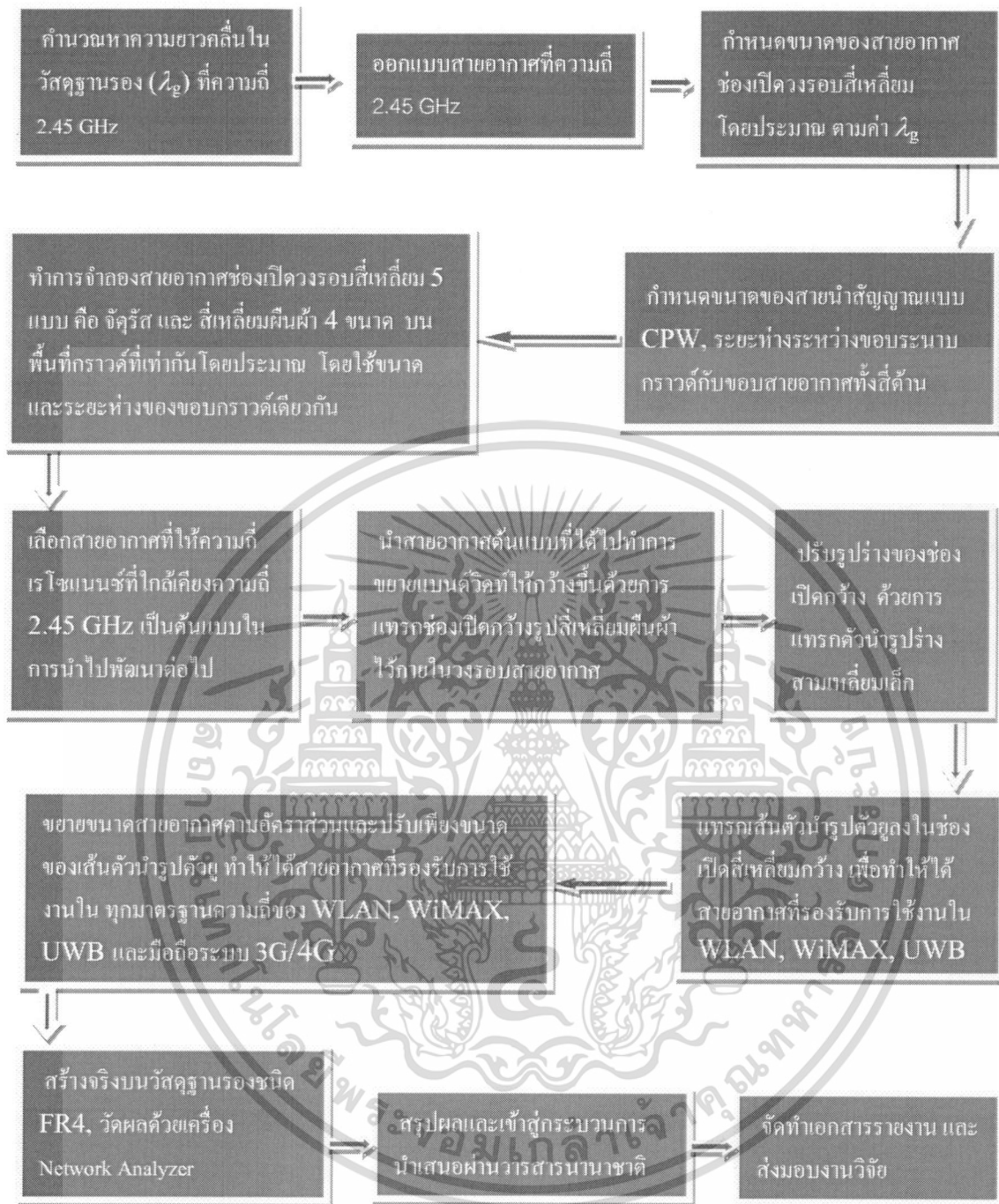
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบสายอากาศวงรอบช่องเปิดแบบง่ายรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นตัวแพร่กระจายและรับคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เลือกวัสดุฐานรอง ชนิด FR4 ที่มีความหนา 1.6 มม ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) = 4.5 และ loss tangent=0.02
3. ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D Zeland [1] โดยเริ่มจากวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส จากนั้นทำการปรับเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบกรวดที่เท่ากันโดยประมาณ ซึ่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีหลายขนาดตามอัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาวของวงรอบช่องเปิด ผลการจำลองของสายอากาศใดที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ 2.45 GHz จะสิ่งที่ใช้ในการตัดสินใจในการเลือกสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขึ้นมาเป็นสายอากาศต้นแบบที่จะนำไปพัฒนาให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ต่อไป
4. นำสายอากาศต้นแบบมาพัฒนาเพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้น ด้วยการแทรกช่องเปิดกว้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าไว้ภายในวงรอบช่องเปิด
5. ปรับแต่งรูปร่างของช่องเปิดกว้างในข้อ 4 ด้วยการต่อยื่นตัวนำรูปสามเหลี่ยมเล็กที่ด้านล่างของช่องเปิดกว้าง
6. แทรกเส้นตัวนำรูปตัวยู ไว้ในช่องเปิดกว้าง
7. นำสายอากาศที่พัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้วไปจำลองผล ด้วยโปรแกรม IE3D พบว่าได้สายอากาศที่แบนด์วิดท์กว้างรองรับมาตรฐานความถี่ของ WLAN, WIMAX, และ UWB
8. นำสายอากาศที่ได้ออกแบบไปทำการขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้รับแบนด์วิดท์ที่กว้างมากยิ่งขึ้น โดยขยายแบนด์วิดท์ที่ความถี่ด้านต่ำ ซึ่งในการขยายขนาดสายอากาศนี้จะใช้วิธีการกำหนดจากอัตราส่วนของขนาดเดิม
9. นำสายอากาศที่ขยายขนาดนี้ไปจำลองผล ด้วยโปรแกรม IE3D พบว่าได้สายอากาศที่แบนด์วิดท์กว้างรองรับมาตรฐานความถี่ของ WLAN, WIMAX, UWB, และ มือถือระบบ 3G/4G
10. นำสายอากาศที่ได้ไปทำการสร้างจริงและวัดผลด้วยเครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)
11. นำผลจากการวิเคราะห์และวัดไปจัดทำเอกสารเผยแพร่ผ่านวารสารนานาชาติ

การวิจัยจะใช้วิธีการจำลองผ่านโปรแกรมวิเคราะห์สายอากาศ โดยเริ่มวิเคราะห์ด้วยการออกแบบสายอากาศวงรอบช่องเปิดแบบง่ายจำนวน 5 ขนาดบนพื้นที่ระนาบกรวดที่ใกล้เคียงกัน คือ วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 25.4 มม x 25.4 มม วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสี่ขนาด คือ 28.0 มม x 22.0 มม, 31.0 มม x 18.8 มม, 34.0 มม x 16.0 มม และ 37.0 มม x 13.6 มม สายอากาศทั้งห้าจะเกิดความถี่เรโซแนนซ์ต่างกัน สายอากาศที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ประมาณ 2.45 GHz จะถูกเลือกให้เป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับนำไปพัฒนาต่อไปด้วยการจำลองและวิเคราะห์ผล เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ๆ รองรับได้สี่มาตรฐาน คือ WLAN, WIMAX, UWB และมือถือในระบบ 3G/4G การวิจัยเน้นการศึกษา วิเคราะห์ วัดผลและสรุปผล โดยมีรายละเอียดดังผังงานตามรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ผังแสดงขั้นตอนการออกแบบ วัสดุผล และการนำเสนอผลงาน

1.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

การออกแบบสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมเพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ๆ นี้ ได้ศึกษาและวิเคราะห์จากผลงานวิจัยสายอากาศอื่นที่ใกล้เคียง ที่สามารถนำมาเปรียบเทียบและอ้างอิงได้ คือ A Novel CPW-Fed Ultra-Wideband Antenna Design, *Microwave and Optical Technology Letters*, (Seong H. Lee, Jong K. Park, and Jung N. Lee, Vol. 44, No. 5, March, 2006) [2]., A CPW-Fed Ultra-Wideband Planar Inverted Cone Antenna, (H. Wang and H. Zhang, X. Liu, K.

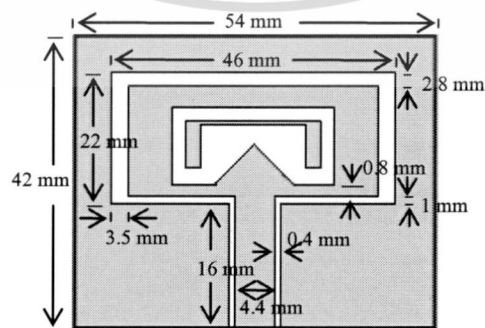
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Huang, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 12, pp101-112, 2010) [3]., On the Operating Principles of UWB, CPW-Fed Printed Antennas, (F. Muge Tanyer-Tigrek, Altunkan Hizal, Ioan E. Lager, and Leonardus P. Ligthart, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 52, No. 3, June 2010) [4]., On the Design of CPW-Fed Ultra Wideband Triangular Wheel Shape Fractal Antenna, (Raj Kumar, P. Malathi, *International Journal of Microwave and Optical Technology*, Vol. 5, No. 2, March 2010) [5]., CPW-Fed UWB Slot Antenna with Triangular Tuning Stub, (J. William and R. Nakkeeran, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 4, August, 2010) [6].

1.7 คุณสมบัติ และ รายละเอียดของชิ้นงานในโครงการวิจัย

สายอากาศที่ออกแบบ ประกอบด้วยคุณสมบัติและรายละเอียดเฉพาะทางเทคนิค ดังนี้

- ใช้วัสดุฐานรอง (substrate) ชนิด FR4 ที่มีความหนา 1.6 มม ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) = 4.5 และ loss tangent=0.02
- แผ่นสายอากาศมีขนาดที่รวมระนาบกราวด์ = 54 x 42 ตารางมิลลิเมตร
- วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นหรือรับคลื่น ถูกวางอยู่บนระนาบกราวด์ ขนาดของวงรอบช่องเปิดและส่วนต่าง ๆ ของสายอากาศมีขนาดตามรูปที่ 1.2
- สายนำสัญญาณแบบ CPW มีแผ่นตัวนำกลางกว้าง 4.4 มม ท่อนำคลื่นกว้าง 0.4 มม และยาว 16 มม ทั้งหมดนี้จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยถูกออกแบบให้อยู่บนระนาบเดียวกับระนาบกราวด์
- กรรมวิธีการผลิต ใช้วิธีการกัดเซาะให้เป็นช่องเปิดบนระนาบกราวด์
- วิธีการจัดวางสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เริ่มจากกำหนดขนาดของท่อนำคลื่นระนาบร่วม กำหนดระยะห่างระหว่างขอบระนาบกราวด์กับขอบสายอากาศที่เหลืออีกสามด้านให้คงที่ที่ 4 มม
- มีการแทรกช่องเปิดและตัวนำไว้ภายในวงรอบช่องเปิด เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ๆ ตามที่ต้องการ และทำการปรับให้มีการแมทชิ่งพีแดนซ์ที่ให้ผลดีที่สุดด้วย (ไม่เปลี่ยนตำแหน่งการวางที่อยู่ในแนวแกนของสายส่งไมโครสตริปไลน์)
- ใช้โปรแกรม IE3D ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มาช่วยในการจำลองผล ซึ่งผลการจำลองที่ได้จะแสดงอยู่ในเอกสารแนบ



รูปที่ 1.2 ขนาดของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีพื้นฐานสายอากาศ

2.1 บทนำ

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในย่านความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นบางประการ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และต้นทุนต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัยและพัฒนาารูปแบบของสายอากาศไมโครสตริปมาอย่างต่อเนื่อง สายอากาศไมโครสตริปมีหลายแบบ [7] คือแบบแผ่นที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ แบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์หรือป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม แบบวงรอบที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์หรือป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม นอกจากนี้สายอากาศเหล่านี้อาจมีการออกแบบให้มีรูปร่างต่าง ๆ กันได้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รูปแบบวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมเป็นต้นแบบในการนำไปศึกษาและพัฒนาให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ๆ ด้วยการเพิ่มชิ้นส่วนต่าง ๆ ไว้ภายในวงรอบสายอากาศ ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงรอบช่องเปิด คือ สามารถทำให้มีแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลได้ทั้งแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) และแบบสองทิศทาง (Bidirectional) นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชัน (Polarization) น้อยกว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น รวมทั้งคลอสโพลาไรเซชัน (Cross Polarization) ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดจะมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสายอากาศไมโครสตริปแบบวงรอบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม กับสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ และเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมนั้นเป็นการต่อสายอากาศโดยตรงเข้ากับท่อนำคลื่นระนาบร่วม ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและง่ายต่อการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์

2.2 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ

สายอากาศชนิดต่าง ๆ ที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไปมีคุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ [8] ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเพื่อช่วยในการตัดสินใจและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่าง ๆ มากมาย โดยมีส่วนสำคัญ ดังนี้

2.2.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio)

อัตราส่วนระหว่างแรงดันค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่งเรียกว่า อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ดังสมการที่ (2.1)

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.1)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.2)$$

Γ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage reflection coefficients)

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน ยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโหนดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.2)

V_r แรงดันสะท้อนกลับ

V_i แรงดันตกกระทบ

Z_L โหลดอิมพีแดนซ์

Z_0 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในกรณีที่ต่อไว้ด้วยแมตซ์ชิงโหนดนั้นค่า VSWR จะเป็น 1 ซึ่งจัดว่าเป็นค่าที่ดีที่สุด

2.2.2 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหนด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตซ์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการ การสูญเสียย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$S_{11} = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (\text{dB}) \quad (2.3)$$

สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าความสูญเสียย้อนกลับเป็นอนันต์ แสดงว่าไม่มีกำลังงานสะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ $\Gamma = 1$ ค่าความสูญเสียย้อนกลับจะเป็น 0 dB ซึ่งแสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด

2.2.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่าง ๆ หาได้จาก

- การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
- การสูญเสียจากตัวนำและฉนวน

ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.4)

$$e_r = e_r e_c e_d \quad (2.4)$$

e_r ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ

$e_r = (1 - |\Gamma|^2)$ ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตซ์กัน

e_c ประสิทธิภาพของตัวนำ

e_d ประสิทธิภาพของฉนวน (dielectric)

โดยทั่วไป e_c และ e_d จะรวมเป็นตัวเดียวกันตามสมการที่ (2.5)

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.5)$$

R_r ความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป

R_L ความต้านทานที่โหนด

2.2.4 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ไดเรกทิวิตีเป็นการบอกความสามารถเชิงทิศทางของสายอากาศ เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแผ่พลังงานโดยเฉลี่ย เมื่อมีการแผ่พลังงาน

ออกโปรบทิศทางอย่างเท่าเทียมกัน โดยไม่คิดกำลังงานส่วนที่สูญเสียไปดังสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7)

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

D คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

U คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงาน

U_i คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงานเฉลี่ย

P_{rad} คือ กำลังงานที่สายอากาศแผ่ออกไป

โดยทั่วไปถ้าไม่กำหนดทิศทางใช้สภาพเจาะจงทิศทางในทิศที่สายอากาศแผ่พลังงานได้ดีที่สุด

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.7)$$

2.2.5 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไดเรกตีวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรกตีวิตีแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้นการคิดอัตราขยายของสายอากาศ วัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศส่ง คือกำลังสองของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรือแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน

อัตราขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อ (หาร) กำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามสมการที่ (2.8)

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.8)$$

โดยทั่วไปอัตราขยายสัมพัทธ์ เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่น ๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจึงได้เป็นสมการที่ (2.9)

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_m) ดังสมการที่ (2.10)

$$P_{rad} = e_r P_m \quad (2.10)$$

เมื่อ e_r คือประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้สมการที่ (2.9) และ (2.10) มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (2.11)

$$G_g(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (2.11)$$

และมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรกทิฟ ตามสมการที่ (2.12)

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.12)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี ดังสมการที่ (2.13)

$$\begin{aligned} G_0 &= G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_r D_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_r D_0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติ เมื่อกำลังอัตราขยายหมายถึงอัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด แสดงดังสมการที่ (2.14)

$$G_0(\text{dB}) = 10 \log_{10} [e_r D_0] \quad (2.14)$$

2.2.6 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)

พิจารณาสายอากาศเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เมื่อต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณเพื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ พลังงานจะไหลเข้าสู่สายอากาศที่ละน้อยเนื่องจากการต้านทานการไหลของพลังงานที่เรียกว่าอิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อนเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะปรากฏที่ขั้วของสายอากาศ เรียกว่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Z_{in}) ดังสมการที่ (2.15)

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.15)$$

X_{in} คือความต้านทานเชิงจินตภาพที่ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานในบริเวณสนามใกล้สายอากาศโดยไม่แผ่กระจายออกไป และ R_{in} ประกอบด้วยสองส่วนคือ R_r หมายถึงความต้านทานพลังงานคลื่นที่แผ่ออกไปโดยสายอากาศ และ R_L หมายถึงความต้านทานที่โหลด ซึ่งรวมถึงความต้านทานจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความร้อน สารไดอิเล็กตริก และตัวนำ

2.2.7 แบนด์วิธ (Bandwidth)

แบนด์วิธของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดย $VSWR \cong 2$ หรือพิจารณาจากการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ระดับ -10 dB ดังสมการที่ (2.16) และสมการที่ (2.17)

$$BW_{\text{narrowband}} (\%) = \frac{f_u - f_l}{f_c} \times 100 \quad (2.16)$$

$$BW_{\text{broadband}} (\%) = \frac{f_u}{f_l} \times 100 \quad (2.17)$$

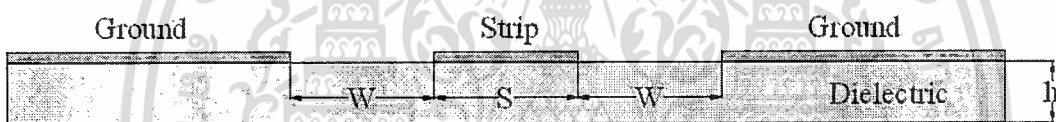
- เมื่อ BW คือ แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ
 f_u คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่
 f_l คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่
 f_c คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

2.3 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมถูกคิดค้นโดย Wen ในปี ค.ศ. 1969 ในที่นี้กล่าวถึงสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม 2 ชนิดคือ สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (coplanar waveguide) และชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (conductor-backed coplanar waveguide) [9-10]

2.3.1 ลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่างประกอบด้วย เส้นตัวนำที่เรียกว่า สตริป (strip) อยู่ตรงกลางด้านบนของวัสดุฐานรอง (substrate) ที่เป็นฉนวน โดยมีความกว้างของสตริปคือ S ด้านข้างทั้งสองด้านของสตริปมีร่อง (slot) คั่นอยู่ระหว่างระนาบกราวด์กับสตริปตามลำดับ ความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกราวด์ (ความกว้างร่อง) คือ W และมีความหนาของฐานรองไดอิเล็กทริกคือ h ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (coplanar waveguide)

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะใช้วิเคราะห์แบบ Quasi-Static ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งคงรูป (conformal mapping) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณ ซึ่งการวิเคราะห์แบบนี้สามารถหาค่าคุณลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมได้

ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ สามารถหาได้จากผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของครึ่งระนาบด้านบน ซึ่งอยู่ในอากาศกับครึ่งระนาบด้านล่างซึ่งอยู่ในชั้นของไดอิเล็กทริก (dielectric layer) โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูปเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (effective dielectric constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) ซึ่งอยู่ในเทอมอินทิกรัลส่วนของการอินทิกรัลวงรี แบบสมบูรณ์ขั้นแรก (complete elliptic integral of the first kind) เมื่อกำหนดให้

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ

C^a คือค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับ C แต่จะแทนไดอิเล็กทริกทั้งหมดด้วยอากาศ

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C^a} \quad (2.18)$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.19)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.20)$$

$$Z_o = \frac{1}{C_{V_p}} = \frac{C}{C\sqrt{\epsilon_{re}}C^a} \quad (2.21)$$

เมื่อ

- ϵ_{re} หมายถึงสภาพยอมสัมพัทธ์ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 V_p หมายถึงความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ
 λ_g หมายถึงความยาวคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ
 C หมายถึงความเร็วของสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง
 Z_o หมายถึงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ ใช้วิธีการส่งคงรูปซึ่งในที่นี้ไม่กล่าวถึงวิธีการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ แต่พิจารณาเฉพาะการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ หาได้จากดังสมการที่ (2.22)

$$Z_o = \frac{30\pi K'(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k_1)} \quad (2.22)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.23)$$

โดยที่

$$q = \frac{1}{2} \left[\frac{K(k_2)K'(k_1)}{K'(k_2)K(k_1)} \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ q หมายถึง ตัวประกอบการคูณ (Filling Factor) และ

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (2.25)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi/2h)}{\sinh(\pi/2h)} \quad (2.26)$$

$$k_3 = \frac{\tanh(\pi/2h_1)}{\tanh(\pi/2h_1)} \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$a = \frac{S}{2} \quad (2.28)$$

$$b = \frac{(2W + S)}{2} \quad (2.29)$$

โดยที่

h หมายถึงความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก

S หมายถึงความกว้างของตัวนำที่อยู่กึ่งกลางระหว่างร่องทั้งสองของสายนำสัญญาณ

W หมายถึงความกว้างของร่อง

การอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.30)

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} \quad (2.30)$$

เมื่อ θ หมายถึงตัวแปรเชิงซ้อน

$$K'(k) = K(k') \quad (2.31)$$

$$k' = \sqrt{1-k^2} \quad (2.32)$$

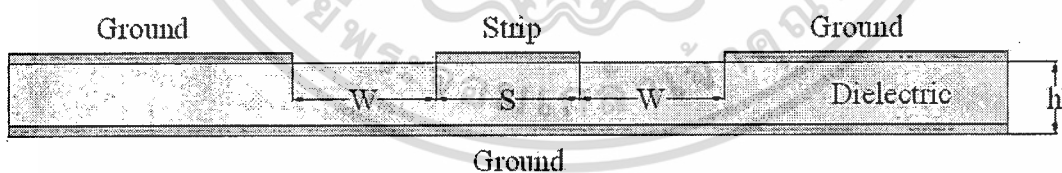
และอัตราส่วนของ $\frac{K(k)}{K'(k)}$ สามารถหาได้โดยการประมาณคือ

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln[2(1+\sqrt{k'})/(1-\sqrt{k'})]} \quad \text{กรณี } 0 \leq K \leq 0.707 \quad (2.33)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln[2(1+\sqrt{k})/(1-\sqrt{k})] \quad \text{กรณี } 0.707 \leq K \leq 1 \quad (2.34)$$

2.3.2 ลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง

โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง ต่างกับชนิดแรกตรงที่ จะมีกราวด์ด้านล่างของฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นมา ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง (coplanar waveguide)

การวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่างทำได้เช่นเดียวกับที่ใช้ในสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง ดังสมการที่ (2.35)

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{K(k_3)/K'(k_3) + K(k_4)/K'(k_4)} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จากสมการที่ (2.36)

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.36)$$

โดยที่

$$q = \frac{K(k_4)/K'(k_4)}{K(k_3)/K'(k_3) + K(k_4)/K'(k_4)} \quad (2.37)$$

$$k_4 = \frac{\tanh(\pi a/2h)}{\tanh(\pi b/2h)} \quad (2.38)$$

ข้อดีของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม คือ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่ายมาก เนื่องจากไม่ต้องมีการเจาะรูผ่านฐานรองไดอิเล็กตริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้นจึงทำให้สามารถนำมาต่อรวมในวงจรเดียวกันกับไมโครสตริปได้ง่าย การบิดเบี้ยวของรูปสัญญาณ (dispersion) และความสูญเสีย (loss) ต่ำกว่าการใช้ไมโครสตริปไลน์ จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นทำให้โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมเหมาะกับการทำเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ

2.4 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริป

การวิเคราะห์รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสายอากาศไมโครสตริป เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆเช่น คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย อิมพีแดนซ์ขาเข้า (input impedance) ของสายอากาศ โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการคณิตศาสตร์กับวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ และขนาดของสายอากาศ ซึ่งมีด้วยกันหลายรูปแบบ [11-12] เช่น

2.4.1 เวกเตอร์โพเทนเชียล (Vector Potential)

เป็นการหาสนามไฟฟ้าโดยใช้เวกเตอร์โพเทนเชียล ซึ่งประกอบไปด้วย เวกเตอร์โพเทนเชียลของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก (electric and magnetic vector potential) ที่สัมพันธ์กับกระแสและเป็นผลให้เกิดสนามแม่เหล็ก \vec{M}_s และกระแส \vec{j}_s ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้า

2.4.2 การวิเคราะห์โดยใช้สายส่งสัญญาณ (Transmission Line Model)

เป็นการใช้สายอากาศที่มีความกว้าง (W) และความยาว (L) ประมาณ $\lambda/2$ ที่ปลายของแพทช์ จะมีลักษณะเป็นร่องและสนามไฟฟ้าแพร่กระจายออกจากร่อง โดยประมาณว่าร่องนี้วางขนานกับแผ่นกราวด์และสนามไฟฟ้ามีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นกราวด์ ในการหาสนามไฟฟ้าจาก 2 ร่องทำได้โดยอาศัยสมการเวกเตอร์โพเทนเชียลของสนามไฟฟ้า ประกอบกับใช้ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก \vec{M}_s และอินทิเกรตสมการออกมาในรูปของเวกเตอร์โพเทนเชียลของสนามไฟฟ้า $\vec{F}(\theta, \phi)$ จากนั้นนำไปสู่ค่าสนามไฟฟ้าแบบร่องเดี่ยว

2.4.3 การวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบของโพรง (Cavity Model)

การวิเคราะห์รูปแบบนี้จะใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศที่มีแพทช์เป็นรูปแบบใดก็ได้ โดยมีข้อกำหนดเบื้องต้นว่า ความหนาของไดอิเล็กตริกซบสเตรตต้องมีค่าน้อย ซึ่งในการวิเคราะห์วิธีนี้จะแทนปัญหาโดยใช้หลักการของความหนาแน่นกระแสสมมูล และการสมมติให้ในบริเวณแผ่นแพทช์และแผ่นกราวด์เป็นบริเวณโพรงด้านบน และด้านล่างเป็นตัวนำสมบูรณ์ ส่วนด้านข้างซึ่งตัดออกให้พอดีกับแพทช์

เป็นผิวตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นลักษณะของร่องที่กระจายคลื่น ที่ใช้ทฤษฎีความหนาแน่นกระแสสมมูล มาใช้ในการหากระแสแม่เหล็กสมมูล และใช้เวกเตอร์โพเทนเชียลในการหาต่อไป

2.4.4 วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

เป็นวิธีการที่สามารถใช้วิเคราะห์สายอากาศแบบต่าง ๆ ได้ โดยมีหลายแบบมาก แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ วิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ (finite element method) และวิธีโมเมนต์ (moment method) ทั้งสองวิธีนี้ถูกนำมาใช้การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปอย่างแพร่หลาย

2.5 การจำลองแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D

สำหรับโปรแกรม IE3D มีวิวัฒนาการมาจากวิธีการ MPIE (Mixed-Potential Integral Equation) ซึ่งใช้วิเคราะห์โครงสร้างไมโครสตริปที่ไม่สม่ำเสมอ และสายอากาศหลากหลายรูปทรง โดยอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎี Roof-top Basis Function บนรูปทรงของสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยมที่ถูกนำมาประกอบกันเป็นสายอากาศ วิธีการนี้มีความแม่นยำ มีประสิทธิภาพและตอบสนองกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการวัดที่ได้มีความถูกต้อง วิธีนี้ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพในการคำนวณเท่านั้น แต่ช่วยในการตีความหมายสนามทางกายภาพกับรูปทรงทางกายภาพที่เหมือนกัน เพื่อให้รู้ว่ากระแสปฏิบัติตัวอย่างไรบนโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ โดยเฉพาะกระแสที่ไหลบริเวณขอบเขตรอยต่อ อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาและเรียกว่า Pseudo-mesh หรือ P-mesh ซึ่งได้มาจากการประยุกต์ของวิธีโมเมนต์ คือ MIPE ที่ใช้สำหรับหาการกระจายของกระแสและประจุบนผิวของโครงสร้าง

บทที่ 3

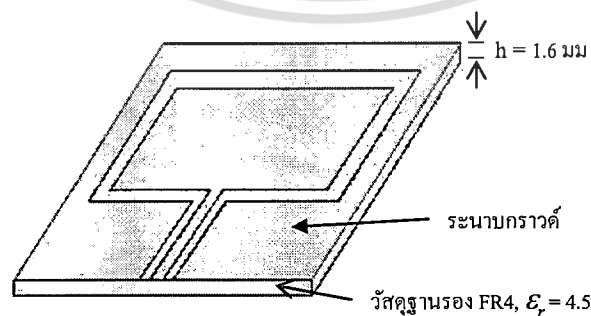
การออกแบบและการสร้าง สายอากาศวงรอบช่องเปิดแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

3.1 หลักการออกแบบสายอากาศ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอ สายอากาศไมโครสตริปวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (coplanar waveguide: CPW) ที่จัดวางอยู่บนระนาบกราวด์เดียวกันกับสายอากาศ ส่วนระนาบตรงข้ามเป็นฉนวน วงรอบช่องเปิดเป็นตัวแพร่กระจายคลื่น ขนาดของวงรอบช่องเปิดจะเป็นรูปแบบหลักที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้ความถี่ด้านต่ำตามต้องการ แต่แบนด์วิดท์ที่ได้จะไม่กว้างมากเพียงพอกับความต้องการ จากการศึกษาและวิเคราะห์พบว่าเมื่อมีการแทรกช่องเปิดกว้างไว้ภายในวงรอบช่องเปิดจะทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น และถ้ามีการปรับรูปร่างบางส่วนของช่องเปิดกว้างพร้อมกับแทรกเส้นตัวนำไว้ภายในช่องเปิดกว้างจะทำให้ได้แบนด์วิดท์ของสายอากาศที่กว้างมาก ๆ ตามที่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจึงมีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นต้นแบบในการนำมาปรับแต่งให้ได้แบนด์วิดท์กว้างรองรับการใช้งานในสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน WLAN, WiMAX, UWB, และมีอยู่ในระบบ 3G/4G ในการออกแบบนี้ จะใช้ความยาวและความกว้างของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW) และระยะห่างระหว่างขอบระนาบกราวด์กับขอบวงรอบช่องเปิดคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยจะเริ่มวิเคราะห์หาต้นแบบสายอากาศวงรอบช่องเปิดที่เหมาะสม คือ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดต่างกันจำนวน 4 วงรอบ ทั้งหมดรวม 5 วงรอบนี้จะอยู่บนพื้นที่กราวด์ที่เท่ากันโดยประมาณ สายอากาศวงรอบช่องเปิดใดที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ประมาณ 2.45 GHz จะถูกเลือกให้เป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับนำไปพัฒนาต่อไป และเพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างมากๆ จึงสร้างช่องเปิดกว้างไว้ภายในวงรอบช่องเปิดพร้อมกับแทรกเส้นตัวนำรูปตัวยูเพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ครอบคลุมมาตรฐานความถี่ไร้สายใน WLAN, WiMAX, UWB, และ โทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบ 3G/4G (2.1 GHz/2.3 GHz)

3.2 โครงสร้างของสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม

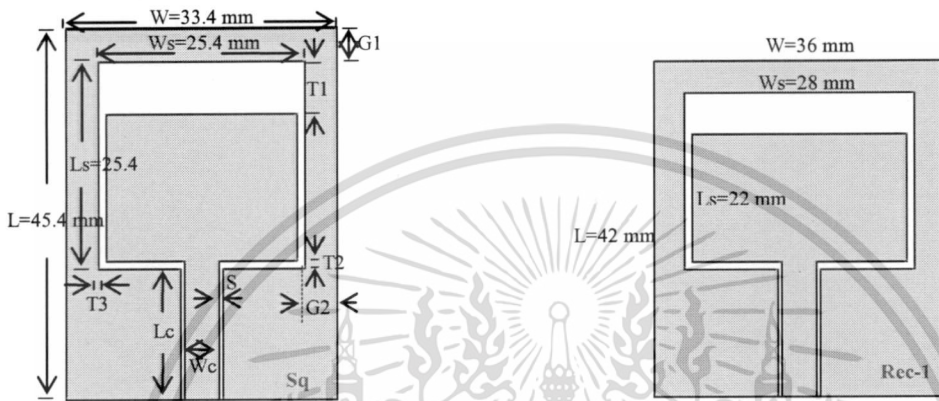
โครงสร้างสายอากาศแสดงในรูปที่ 3.1 สายอากาศวงรอบช่องเปิดและสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW) จะอยู่บนระนาบกราวด์เดียวกันที่ทำด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ (print circuit board) ชนิด FR4 และระนาบตรงข้ามเป็นระนาบฉนวน วัสดุฐานรอง FR4 มีค่าไดอิเล็กตริกคงที่ (ϵ_r)=4.5 มีความหนา (h)=1.6 มม ค่าการสูญเสียที่ความถี่ 10 GHz (loss tangent) = 0.02



รูปที่ 3.1. โครงสร้างสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมป้อนด้วย CPW

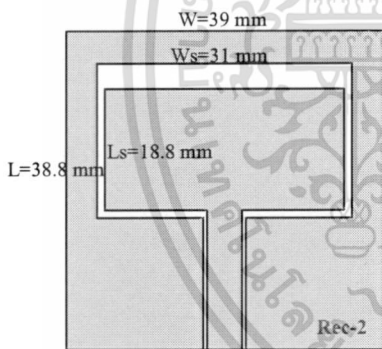
3.3 การออกแบบวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมพื้นฐาน

การเลือกขนาดของวงรอบช่องเปิดจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์มาก ดังนั้นในการออกแบบจึงกำหนดให้ใช้พื้นที่ของระนาบกราวด์ที่เท่ากันโดยประมาณ แต่มีขนาดวงรอบที่ต่างกัน เพื่อหาขนาดวงรอบช่องเปิดที่สามารถให้ความถี่เรโซแนนซ์ด้านต่ำที่ความถี่ประมาณ 2.45 GHz มาใช้เป็นต้นแบบสำหรับที่จะนำไปพัฒนาให้ได้แบนด์วิธที่กว้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะออกแบบวงรอบช่องเปิดทั้งหมด 5 วงรอบ ที่มีขนาดแตกต่างกันที่อยู่บนพื้นที่ระนาบกราวด์ที่เท่ากันโดยประมาณ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำการจำลองผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D Zeland

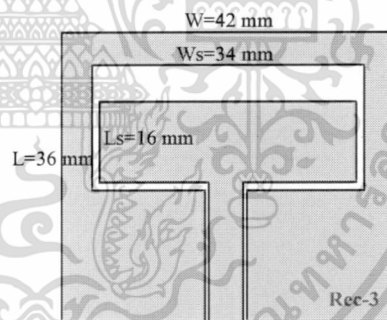


(ก) วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส: T1=6.5 มม
พื้นที่กราวด์ = $W \times L = 1516.36 \text{ มม}^2$

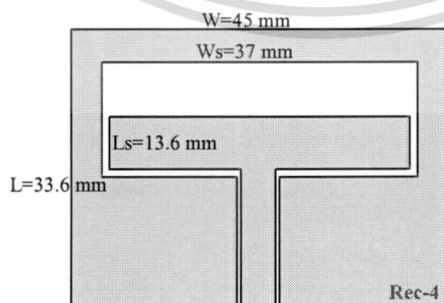
(ข) วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, T1=4.9 มม
พื้นที่กราวด์ = $W \times L = 1512 \text{ มม}^2$



(ค) วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า: T1=3.1 มม
พื้นที่กราวด์ = $W \times L = 1513.2 \text{ มม}^2$



(ง) วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า: T1=4.8 มม
พื้นที่กราวด์ = $W \times L = 1512 \text{ มม}^2$



(จ) วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า: T1=6.3 มม
พื้นที่กราวด์ = $W \times L = 1512 \text{ มม}^2$

รูปที่ 3.2 รูปร่างสายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วย CPW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

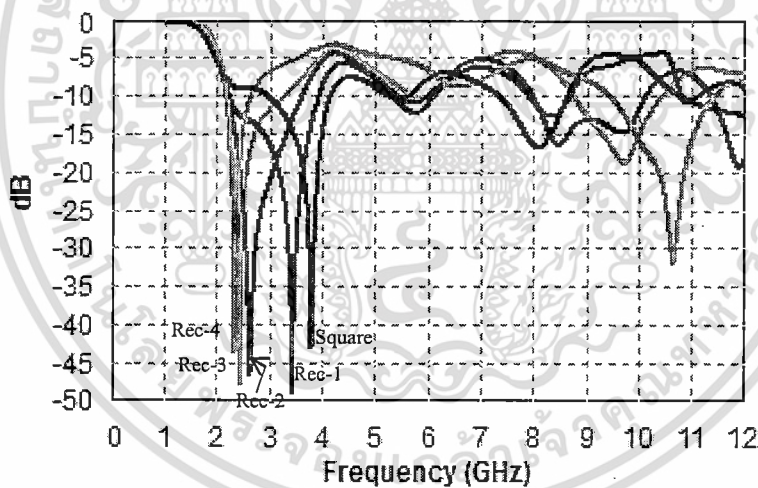
ขั้นตอนแรกของการออกแบบ คือ กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.45 GHz จากนั้นคำนวณหาความยาวคลื่นสัมพัทธ์และความกว้างของท่อนำคลื่นระนาบร่วม (CPW) โดยใช้สมการที่ (2.18)-(2.29) ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่าความยาวคลื่นในวัสดุฐานรองหรืออาจเรียกว่าความยาวคลื่นสัมพัทธ์ (λ_g) = 73.85 มม ความกว้างของท่อนำคลื่น $s = 0.4$ มม ความกว้างของตัวนำระหว่างท่อนำคลื่น $w_c = 4.4$ มม ขั้นตอนต่อไปมีดังนี้

1. เนื่องจากความถี่ 2.45 GHz เป็นความถี่กึ่งกลางของมาตรฐานความถี่ใน WLAN ดังนั้นจะใช้ความถี่นี้ในการหาความยาวคลื่นสัมพัทธ์ (λ_g) เพื่อนำมาใช้ในการอ้างอิงในการกำหนดเส้นรอบรูปของวงรอบช่องเปิด ในการออกแบบควรกำหนดให้ครึ่งหนึ่งของความยาวเส้นรอบรูปของวงรอบช่องเปิดมากกว่า $0.5\lambda_g$ แต่ต้องไม่เกินกว่า $1.0\lambda_g$ ซึ่งจากการจำลองพบว่าควรอยู่ในช่วงประมาณ $0.6\lambda_g - 0.7\lambda_g$ ของความถี่ออกแบบที่ 2.45 GHz

2. กำหนดความยาวของ CPW คือ $L_c = 16$ มม และระยะห่างระหว่างขอบกราวด์กับขอบสายอากาศด้านบน (G1) และด้านล่าง (G2) เท่ากัน คือ 4 มม

3. สร้างวงรอบช่องเปิดรูปจัตุรัสและพื้นผ้าจำนวน 5 ขนาด ด้วยการกำหนดให้ความกว้างช่องเปิดแนวตั้ง T3 และแนวนอนล่าง T2 เท่ากันคือ 1 มม โดยที่วงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมทั้งหมดจะอยู่บนพื้นที่กราวด์ประมาณ 1512 มม² ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2

การเปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของสายอากาศวงรอบช่องเปิดทั้ง 5 ขนาด แสดงดังรูปที่ 3.3 และขนาดพร้อมความกว้างแบนด์วิดท์ของสายอากาศทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบผลการจำลอง S_{11} ของสายอากาศวงรอบช่องเปิด 5 ขนาด

ตารางที่ 3.1 ขนาดและผลการจำลองของสายอากาศวงรอบช่องเปิดห้าขนาด

ขนาด/ผลการจำลอง	จัตุรัส	พื้นผ้า Rec-1	พื้นผ้า Rec-2	พื้นผ้า Rec-3	พื้นผ้า Rec-4	
ระนาบกราวด์ (มม ²)	1516.36	1512	1513.2	1512	1512	
ขนาดวงรอบช่องเปิด (มม)	Ws	25.4	28.0	31.0	34.0	37.0
	Ls	25.4	22.0	18.8	16.0	13.6
ความถี่เรโซแนนซ์แรก (GHz)	3.8	3.45	2.64	2.46	2.35	
ช่วงแบนด์วิดท์ (GHz)	2.97-4.15	2.23-3.93	2.22-3.61	2.21-3.29	2.18-2.65	

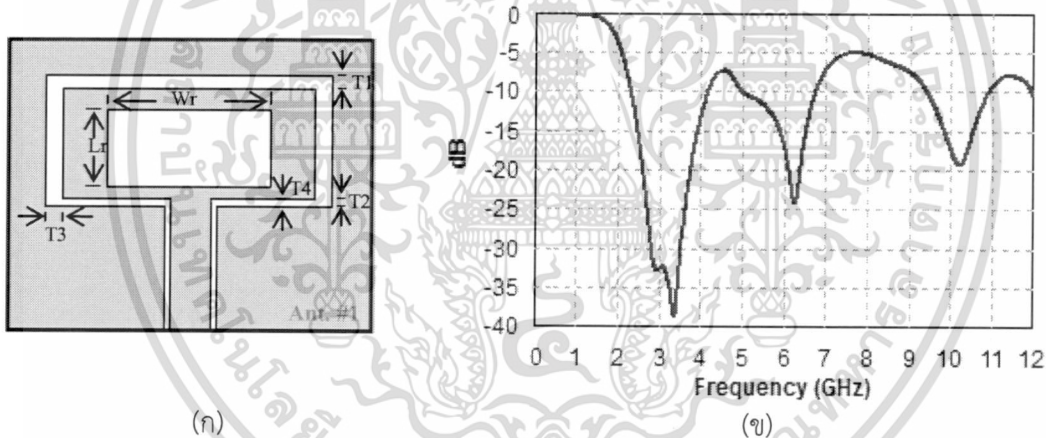
จากผลการจำลองที่แสดงในตารางที่ 3.1 พบว่า สายอากาศวงรอบช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า Rec-3 มีความถี่เรโซแนนซ์แรกๆ ที่ 2.46 GHz ใกล้เคียงกับความถี่ 2.45 GHz มากที่สุด ดังนั้นสายอากาศรูปแบบพื้นฐานวงรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า Rec-3 จะถูกนำไปใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาเพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างมากขึ้น

3.4 การขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศวงรอบช่องเปิด

สายอากาศ Rec-3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.3 จะถูกนำมาใช้เป็นต้นแบบเพื่อพัฒนาแบนด์วิดท์ให้กว้างมาก ๆ โดยจะทำการเป็นลำดับขั้นตอน ตั้งแต่การแทรกช่องเปิดสี่เหลี่ยมกว้าง และแทรกเส้นตัวนำ ซึ่งในการพัฒนานี้จะมีพารามิเตอร์ที่คง คือ พารามิเตอร์ของส่วนป้อนสัญญาณ CPW พื้นที่ระนาบกราวด์ ขนาดของวงรอบช่องเปิด และระยะห่างระหว่างขอบระนาบกราวด์กับขอบวงรอบช่องเปิด

3.4.1 การแทรกช่องเปิดกว้าง

ช่องเปิดกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกนำมาใช้โดยแทรกอยู่ในวงรอบช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) สายอากาศนี้ถูกตั้งชื่อว่า Ant. #1 ขนาดของสายอากาศนี้เท่ากับสายอากาศต้นแบบ Rec-3 ขนาดของช่องเปิดกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกเข้ามา คือ $W_r \times L_r = 19.6 \text{ มม} \times 9.6 \text{ มม}$ โดย $T_2 = 1 \text{ มม}$ และทำการปรับพารามิเตอร์ T1, T3, และ T4 เป็น 2 มม, 12.5 มม และ 0.8 มม ตามลำดับ ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แสดงดังรูปที่ 3.4 (ข)



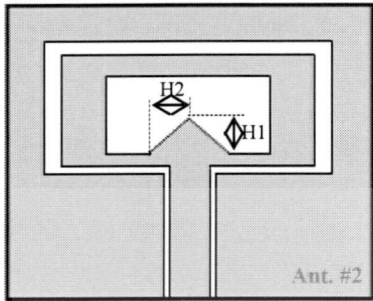
รูปที่ 3.4 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #1 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

จากการวิเคราะห์ผลของ พบว่าสายอากาศ Ant. #1 มี 3 แบนด์วิดท์ อยู่ในช่วงความถี่ 2.33 GHz ถึง 4.17 GHz, 5.0 GHz ถึง 6.75 GHz, และ 9.45 GHz ถึง 10.91 GHz สายอากาศนี้สามารถรองรับการใช้งานใน WLAN มาตรฐานของ IEEE 802.11b/g/a/n (2.4 GHz, 5.25 GHz, 5.8 GHz) และ WiMAX (3.5 GHz) แต่ยังไม่สามารถรองรับการใช้งานใน UWB ดังนั้น แบนด์วิดท์แรกและแบนด์วิดท์ที่สองควรนำมารวมกันให้เป็นแบนด์วิดท์เดียวกัน ด้วยการลดการสูญเสียย้อนกลับที่เกิดขึ้นระหว่างความถี่ 4.17 GHz ถึง 5.0 GHz

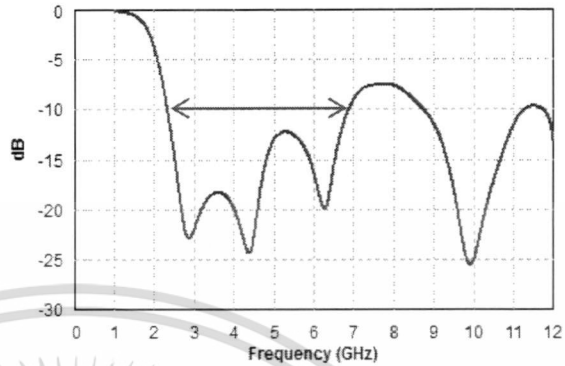
3.4.2 การปรับแต่งช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการลดการสูญเสียระหว่างความถี่ 4 GHz และ 5 GHz เพื่อให้มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์กับ 50 โอห์มของสายส่งสัญญาณ ช่องเปิดกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าของสายอากาศ Ant. #1 จะต้องถูกปรับแต่ง

โดยการต่อยืนตัวนำรูปสามเหลี่ยมเล็กจากด้านล่างของช่องเปิดกว้างเข้าไปในช่องเปิดนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) ให้ชื่อสายอากาศนี้ว่า Ant. #2 พารามิเตอร์ของสามเหลี่ยมคือ $H1=3.8$ มม, $H2= 5.2$ มม ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.5 (ข)



(ก)



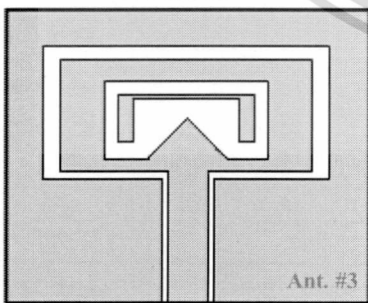
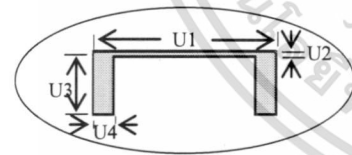
(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #2 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

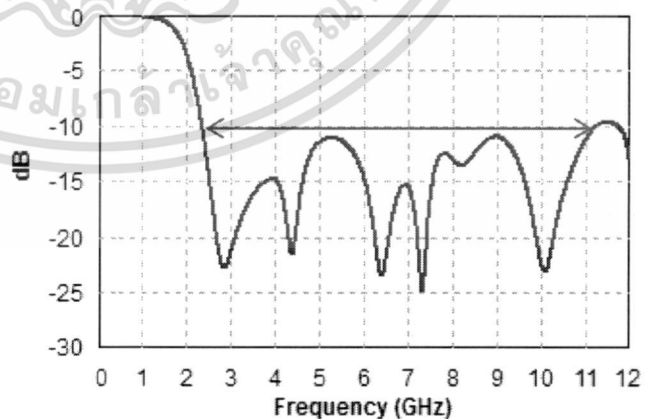
ผลการจำลองพบว่าสายอากาศ มีแบนด์วิดท์คู่ โดยที่แบนด์วิดท์แรกอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.35 GHz ถึง 6.87 GHz และแบนด์วิดท์ที่สองอยู่ในช่วง 8.75 GHz ถึง 11.28 GHz ในกรณีนี้แบนด์วิดท์แรกสามารถครอบคลุมการใช้งานใน WLAN และ WiMAX

3.4.3 การแทรกเส้นตัวนำรูปตัวยู

จากผลการจำลองของสายอากาศ Ant. #2 พบว่าการสูญเสียย้อนกลับระหว่างความถี่ของแบนด์แรกและแบนด์ที่สองลดลงต่ำกว่า -10 dB ก็จะทำให้สายอากาศที่ออกแบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ดังนั้นเทคนิคในการทำให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างมาก คือการแทรกเส้นตัวนำรูปตัวยู ดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 (ก) ซึ่งขนาดของตัวยู คือ $U1= 15.4$ มม $U2= 0.6$ มม $U3= 5.6$ มม และ $U4= 1.7$ มม สายอากาศนี้มีชื่อว่า Ant. #3 ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.6 (ข)



(ก)



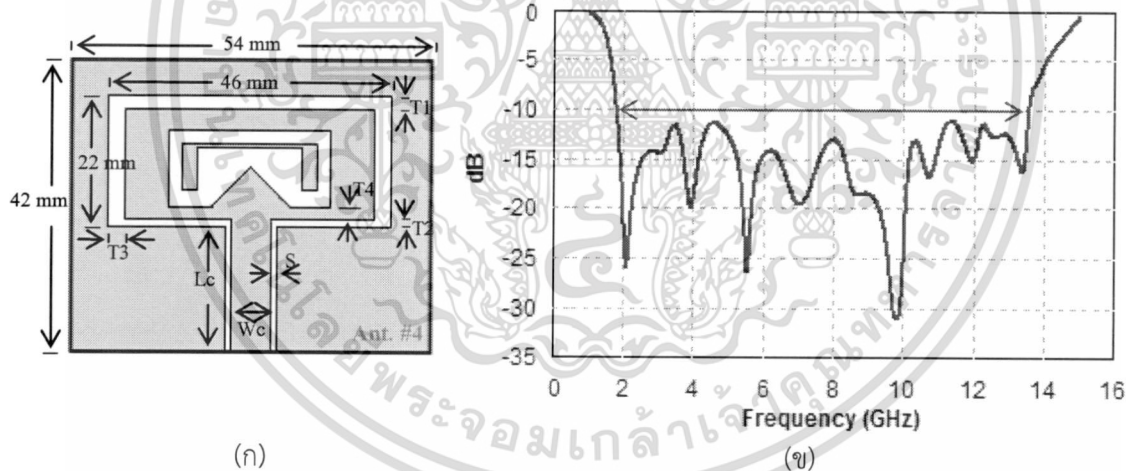
(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #3 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

ผลการจำลองแสดงให้เห็นได้ว่าสายอากาศ Ant. #3 มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก คือ ตั้งแต่ความถี่ 2.34 GHz ถึง 11.24 GHz สามารถรองรับการใช้งานในสามมาตรฐานความถี่คือ WLAN, WiMAX, และ UWB

3.5 การขยายขนาดของสายอากาศวงรอบช่องเปิด

ในการขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศ Ant. #3 ให้ต่ำกว่า 2.4 GHz เพื่อให้ครอบคลุมมาตรฐานของโทรศัพท์มือถือ 3G (2.1 GHz) และ 4G (2.3 GHz) พร้อมทั้งให้ครอบคลุมมาตรฐานของ WLAN, WiMAX, และ UWB ขนาดของสายอากาศ Ant. #3 จะต้องถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น สายอากาศใหม่ที่ขยายนี้มีรูปร่างเช่นเดียวกับสายอากาศ Ant. #3 ทุกประการ ขนาดของสายอากาศใหม่นี้แสดงในรูปที่ 3.7 (ก) ให้ชื่อว่า Ant. #4 ระยะห่างคือ $G_1=G_2=0.4$ มม. เหมือนกับสายอากาศ Ant. #3 เช่นเดียวกันขนาดของ CPW ก็ยังคงใช้ขนาดเดิม มีพารามิเตอร์บางตัวของสายอากาศ Ant. #4 คล้ายกับสายอากาศ Ant. #3 คือ T2, T4, H1, H2, และ U2 ขณะที่อัตราส่วนของสายอากาศ Ant. #3 จะถูกนำมาใช้กับสายอากาศ Ant. #4 ได้แก่ วงรอบช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า $\approx 2.1:1$ ช่องเปิดกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $W_r:L_r=2.04:1$ และความกว้างของวงรอบช่องเปิดแนวตั้งต่อแนวนอนบน $T_3:T_1=1.25:1$ เพื่อให้ได้รับแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด พารามิเตอร์สามตัวคือ U1, U3, และ U4 จะถูกปรับค่าเป็น 22.4 มม, 6.6 มม, และ 2.2 มม ตามลำดับ ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.7 (ข) แบนด์วิดท์ที่อยู่ในช่วงความถี่ 1.83 GHz ถึง 13.56 GHz ทำให้สายอากาศนี้มีแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในมาตรฐาน WLAN, WiMAX, UWB, และ โทรศัพท์มือถือ 3G และ 4G

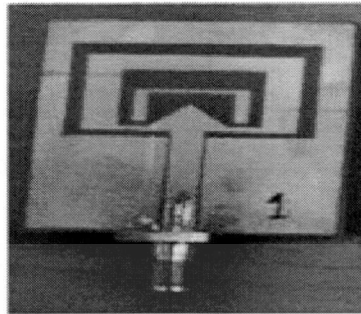


รูปที่ 3.7 (ก) รูปร่างสายอากาศ Ant. #4 (ข) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

สรุป สายอากาศตามรูปแบบที่ได้จำลองและส่งมอบงานมานี้จะถูกนำไปสร้างจริงพร้อมการวัดผลต่อไป

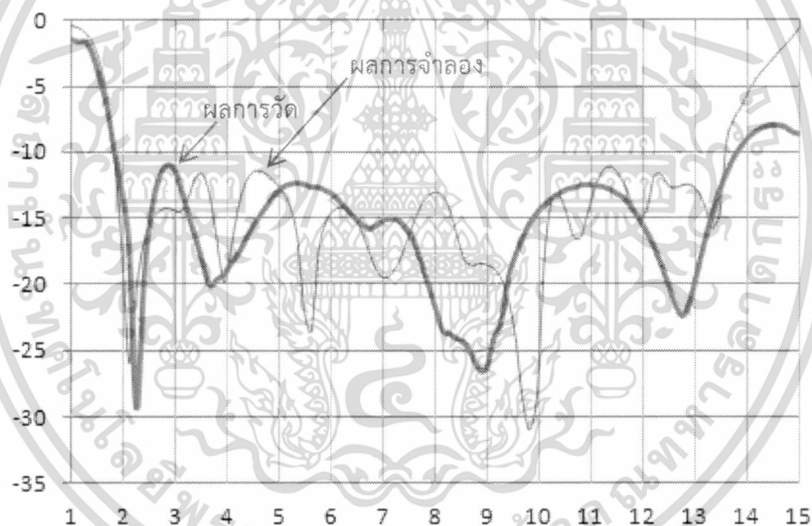
3.6 ผลการสร้างและวัดสายอากาศวงรอบช่องเปิด

สายอากาศ Ant. #4 จะถูกนำไปสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ดังที่แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 สายอากาศวงรอบช่องเปิดแบบ CPW ที่สร้างบน FR4

ผลการจำลองและการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศ Ant. #4 แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าความกว้างของแบนด์วิดท์ที่จำลองได้และจากการวัดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบ S_{11} ระหว่างผลการจำลองและการวัดของสายอากาศ Ant. #4

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์และจำลองผลด้วยโปรแกรม IE3 จนได้รูปแบบและแบนด์วิดท์ตรงกับความต้องการ แล้วนำไปสร้างจริง ผลการวัดในห้องปฏิบัติการสายอากาศด้วยเครื่อง Network Analyzer ทำให้เชื่อได้ว่าโปรแกรม IE3D มีเหมาะสมต่อการนำไปจำลองผลก่อนการสร้างจริงได้อย่างดี ทำให้ได้สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก สามารถนำไปใช้งานได้ตามมาตรฐานความถี่ที่ต้องการ คือ ในระบบมือถือ 3G และ 4G รวมทั้งการนำไปใช้งานใน WLAN, WIMAX, UWB

เอกสารอ้างอิง

- [1] IE3D User's Manual Release 9, Zeland software, Inc., U.S.A., 2002.
- [2] Seong H. Lee, Jong K. Park, and Jung N. Lee, "A Novel CPW-Fed Ultra-Wideband Antenna Design", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 44, No. 5, March, 2006.
- [3] H. Wang and H. Zhang, X. Liu, K. Huang, "A CPW-Fed Ultra-Wideband Planar Inverted Cone Antenna", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 12, pp101-112, 2010.
- [4] F. Muge Tanyer-Tigrek, Altunkan Hizal, Ioan E. Lager, and Leonardus P. Ligthart, "On the Operating Principles of UWB, CPW-Fed Printed Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 52, No. 3, June 2010.
- [5] Raj Kumar, P. Malathi, "On the Design of CPW-Fed Ultra Wideband Triangular Wheel Shape Fractal Antenna", *International Journal of Microwave and Optical Technology*, Vol. 5, No. 2, March 2010.
- [6] J. William and R. Nakkeeran, "CPW-Fed UWB Slot Antenna with Triangular Tuning Stub", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 4, August, 2010.
- [7] Giauffret, L., J.-M. Laheurte, and A. Papiernik, "Study of various shapes of the coupling slot in CPW-fed microstrip antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 4, 642-647, 1997.
- [8] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [9] F. A. Benson and T. M. Benson, *Fields Waves and Transmission Lines*, Chaman&Hall, 1991.
- [10] Raine, N. Simon, *Coplanar Waveguide Circuit Component, and System*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [11] Lal Chand Godara, *Hand book of Antennas in Wireless Communications*, CRC Press LLC, 2002.
- [12] Thomas A. Milligan, *Modern Antenna Design*, John Wiley & Sons, Inc., 2005.