

การออกแบบเสาอากาศช่องเปิดกว้างที่มีการควบคุมลักษณะของแบนด์
นอตช์สำหรับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด

DESIGN OF WIDE-SLOT ANTENNA WITH CONTROLLABLE BAND-NOTCHED
CHARACTERISTICS FOR ULTRA WIDEBAND COMMUNICATION SYSTEMS

วีรเทพ เกื้อทวีกุล

WEERATHER KUEATHAWEEKUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-EN-D-018-176

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดกว้างที่มีการควบคุมคุณลักษณะของแบนด์
นอตช์สำหรับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด

DESIGN OF WIDE-SLOT ANTENNA WITH CONTROLLABLE BAND-NOTCHED
CHARACTERISTICS FOR ULTRA WIDEBAND COMMUNICATION SYSTEMS

วีรเทพ เกื้อทวีกุล

WEERATHEP KUEATHAWEEKUN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน เดือน ปี 29 ต.ค. 2556



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555

KMITL-2012-EN-D-018-176

DESIGN OF WIDE-SLOT ANTENNA WITH CONTROLLABLE BAND-NOTCHED
CHARACTERISTICS FOR ULTRA WIDEBAND COMMUNICATION SYSTEMS

WEERATHEP KUEATHAWEEKUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-D-018-176

COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศช่องเปิดกว้างที่มีการควบคุมคุณลักษณะของแบนด์นอตช์สำหรับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด
ชื่อนักศึกษา	นาย วีรเทพ เกื้อทวีกุล
รหัสประจำตัว	50060011
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ขวลิต เบญจางคประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ. ดร. โตชิโอะ วากาบายาชิ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดกว้างเพื่อใช้งานในย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband: UWB) และพัฒนาให้มีการกรองแถบความถี่ไม่ผ่าน หรือแบนด์นอตช์ โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ (Parasitic element) ที่มีโครงสร้างง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการควบคุมการเลื่อนตำแหน่งและการขยายความกว้างของนอตช์ โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอประกอบด้วย ช่องเปิดกว้างวางอยู่บนระนาบกราวด์ และ บนระนาบตรงข้ามเป็นสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ที่ด้านปลายสาย เพื่อทำหน้าที่ขยายแบนด์วิดท์ให้เป็นสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB antenna) และเพื่อหลีกเลี่ยงการสอดแทรกของการสื่อสารไร้สายอื่นๆ จึงได้นำเสนอพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped) และ รูปตัวเจ (J-shaped) แทรกในช่องเปิดของสายอากาศเพื่อกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ออกไป สายอากาศ UWB ที่มีการออกแบบแบนด์นอตช์นี้ สามารถนำไปใช้งานในระบบ UWB ที่มีการหลีกเลี่ยงการแทรกแซงจากการสื่อสาร WLAN ได้ดี พาราซิติกอิลิเมนต์ที่นำเสนอสามารถปรับแต่งขนาดเพื่อควบคุมการเลื่อนแบนด์นอตช์เป็นแถบความถี่ 4-5 GHz หรือ 6-7 GHz และสามารถขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์จาก 1 GHz ขึ้นไปถึง 2 GHz ตามลำดับ นอกจากนี้ สายอากาศนี้ยังสามารถหลีกเลี่ยงการสอดแทรกของสัญญาณย่านความถี่ WiMAX (3.5 GHz) และ WLAN (5-6 GHz) ได้พร้อมกัน โดยใช้พาราซิติกรูปตัวแอล (L-shaped) สำหรับการทำให้แบนด์นอตช์ที่ความถี่ 3.5 GHz และ รูปตัวเจ (J-shaped) สำหรับการทำให้แบนด์นอตช์ที่ความถี่ 5.5 GHz นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่งและขยายแบนด์วิดท์ของสองแบนด์นอตช์ได้เช่นกัน ผลการจำลองและผลการวัดของสายอากาศที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะที่ดีของการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แบนด์วิดท์ (Bandwidth) อัตราขยาย (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกล (Radiation pattern) สายอากาศที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่ UWB ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Thesis Title	Design of Wide-Slot Antenna with Controllable Band-Notched Characteristics for Ultra wideband Communication Systems
Student	Mr. Weerathep Kueathaweekun
Student ID.	50060011
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chawalit Benjangkprasert
Thesis Co-Advisor	Prof. Dr. Toshio Wakabayashi

ABSTRACT

This thesis presents a wide-slot antenna designed for ultra-wideband (UWB) applications. This antenna was also developed to filter the rejection band or band-notch by using simple structure of parasitic elements. These elements can control shift easily and enhance bandwidth of the notches. The structure of the proposed antenna consists of a wide rectangular slot on the ground plane and the opposite plane is a microstrip line with a rectangular-ring shaped tuning at the end of the microsteip line to enhance bandwidth to UWB antenna. To avoid the interference from other wireless communications, the L-shaped and J-shaped parasitic elements are introduced by inserting them in the slot antenna for reject band at frequency range 5-6 GHz. This UWB antenna with band-notched design can be deployed in UWB systems and reducing interference from WLAN communications. The size of these proposed parasitic elements can be modified in order to control the shift of band-notch at frequency range 4-5 GHz or 6-7 GHz and to enhance bandwidth of the band-notch from 1 GHz up to 2 GHz, respectively. Moreover, this antenna can avoid interference in WiMAX (3.5 GHz) and WLAN (5-6 GHz) by using parasitic L-shaped and J-shaped for the notches at 3.5 GHz and 5.5 GHz, respectively. In addition, this antenna can control the shift and can enhance bandwidth of two band-notches. The simulation and measurement results are presented to demonstrate the good characteristics of return loss, impedance bandwidth, antenna gains and radiation patterns. The proposed antenna can efficiently be employed in UWB communication systems.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความกรุณาของท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ขวลิต เบญจางคประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ. ดร. โตชิโอะ วากาบายาชิ และ รศ. นภพินท์ อนันตรศิริชัย ที่คอยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และ คำชี้แนะในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในทุก ๆ เรื่องเสมอมา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง

I would like to express my deeply sincere thanks to Prof. Dr. Toshio Wakabayashi at Department of Electronic System Engineering, Malaysia-Japan International Institute of Technology (MIIT), Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Kuala Lumpur, Malaysia, for all advices and very good support to me concerning about my paper and thesis.

ขอกราบขอบคุณ รศ. ดร. กนก เจนจิระพงษ์เวช รศ. ดร. สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์ รศ. ดร. อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล ดร. พนารัตน์ เขิญถนอมวงศ์ ผศ. จินตนา นาคะสุวรรณ ดร. ไพฑูรย์ รักเหลือ อาจารย์สุธรรม สัทธรรมสกุล และอาจารย์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้า ตลอดจนข้อชี้แนะต่างๆ จนในที่สุดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ที่ดี ๆ ตลอดมา

ขอกราบขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม IE3D ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการทดสอบสายอากาศ

ขอกราบขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุน การทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ คุณค่า ประโยชน์ และคุณงามความดีใด ๆ อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนครูอาจารย์ ทุก ๆ ท่านที่ประสิทธิประสาทความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี ๆ แก่ข้าพเจ้า

วีรเทพ เกื้อทวีกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	4
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป.....	6
2.2.1 แผ่นตัวนำสายอากาศ.....	7
2.2.2 วัสดุฐานรอง.....	7
2.2.3 ระนาบกราวด์ (Ground Plane).....	8
2.2.4 สายส่งสัญญาณ (Transmission Line).....	8
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์.....	8
2.3.1 ลักษณะคลื่นบนสายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์.....	9
2.3.2 ลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณของสายส่งไมโครสตริปไลน์.....	14
2.4 การออกแบบสายไมโครสตริป.....	16
2.5 คุณลักษณะสายอากาศแบบช่องเปิดและแบบแพทช์.....	17
2.5.1 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ (Induction Theorem).....	17
2.5.2 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด.....	19
2.5.3 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศแพทช์.....	20
2.5.4 การออกแบบสายอากาศแบบแพทช์.....	20
2.6 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ.....	22
2.6.1 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance).....	22
2.6.2 แผนภูมิสมิท (Smith chart).....	23
2.6.3 แบนด์วิดท์ (Bandwidth).....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.4 อัตราขยาย (Gain).....	31
2.6.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	33
2.7 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน.....	37
2.7.1 สมการแมกซ์เวลล์ในรูปดิฟเฟอเรนเชียล.....	37
2.7.2 สมการแมกซ์เวลล์ในรูปอินทิกรัล.....	38
2.8 บทสรุป.....	39
บทที่ 3 สายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	40
3.1 บทนำ.....	40
3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป.....	40
3.3 ผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วย สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์.....	42
3.4 ผลการจำลองสายอากาศแบบแพทช์.....	44
3.5 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศแบบแพทช์.....	46
3.6 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	48
3.6.1 กรณีปรับค่าความยาวขอบนอกของสายท่อนสั้น (Tuning stub) ตามแนวนอน (S_1).....	50
3.6.2 กรณีปรับค่าความยาวขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_2).....	51
3.6.3 กรณีปรับค่าความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_3).....	52
3.6.4 กรณีปรับค่าความกว้างขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_4).....	53
3.6.5 กรณีปรับระยะระหว่างขอบล่างของสายท่อนสั้นกับขอบล่างของช่องเปิด (S_5).....	54
3.6.6 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	55
3.7 วงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	59
3.8 บทสรุป.....	61
บทที่ 4 สายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีแบนด์นอตช์.....	62
4.1 บทนำ.....	62
4.2 สายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดียวที่มีการกรองแถบความถี่ 5-6 GHz.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยว.....	62
4.2.2 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยว ที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped).....	65
4.2.3 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยว ที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped).....	76
4.3 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์ ที่มีการกรองย่านความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz.....	88
4.3.1 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์.....	88
4.3.2 เทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz.....	92
4.3.3 เทคนิคการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz.....	93
4.3.4 เทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz.....	94
4.3.5 เทคนิคการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz.....	95
4.4 บทสรุป.....	96
บทที่ 5 ผลการวัดคุณลักษณะของสายอากาศ.....	98
5.1 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยั้งที่มีตัวปรับ แบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	98
5.1.1 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยั้งยวด ที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	98
5.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิด แบบแถบกว้างยั้งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	100
5.1.3 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยั้งยวดที่มีตัว ปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	101
5.2 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่มีการ กรองช่วงความถี่ 5-6 GHz.....	102
5.2.1 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้ พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped).....	102
5.2.2 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้ พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped).....	106
5.3 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์ที่มีการกรอง ย่านความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz.....	110
5.3.1 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์.....	111
5.3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิด สองแบนด์นอตช์.....	112

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์.....	113
5.4 บทสรุป.....	114
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	115
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	115
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	116
บรรณานุกรม.....	117
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก. ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิด.....	121
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....	124
ประวัติผู้เขียน.....	126

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิด ที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์.....	43
3.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบแพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	46
3.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศแบบแพทช์.....	47
3.4 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	49
3.5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	56
4.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped).....	69
4.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) กรณีการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์ 1 GHz.....	73
4.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) กรณีการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์ 1.5 GHz.....	74
4.4 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) กรณีการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์.....	75
4.5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	82
4.6 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) กรณีการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์.....	86
4.7 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) กรณีการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์.....	87
4.8 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped).....	89
4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ กรณีการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz.....	93
4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ กรณีการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz.....	94
4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ กรณีการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์ที่ย่าน 5.5 GHz.....	95
4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ กรณีการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz.....	96
5.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวด ที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากผลการจำลองและผลการวัดจริง.....	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.2 ผลการจำลองและการผลวัดคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยว ที่ใช้พาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped).....	104
5.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศจากการจำลอง และผลวัดจริงของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยว ที่ใช้พาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped).....	108
5.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิด ที่มีสองแบนด์นอตช์.....	112

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป.....6
2.2	โครงสร้างทางกายภาพของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์.....9
2.3	สายส่งที่มีความยาวเป็นอนันต์.....9
2.4	วงจรมุมของรูปที่ 2.3.....10
2.5	สายส่งที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย.....11
2.6	เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของสายไมโครสตริป.....14
2.7	สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายไมโครสตริป.....15
2.8	การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น.....18
2.9	การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด.....19
2.10	กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพตช์.....20
2.11	โครงสร้างและความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....21
2.12	สายอากาศส่งและลักษณะวงจรมีมือน.....23
2.13	แผนภูมิสมิตที่เป็นวงกลมหนึ่งหน่วย.....24
2.14	แผนภูมิสมิตในพิกัดฉาก.....26
2.15	แผนภูมิสมิตในพิกัดเชิงขั้ว.....28
2.16	แผนภูมิสมิต (จุด P เป็นจุดเดียวกับรูปที่ 2.14 และ 2.15).....30
2.17	ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ.....34
2.18	แบบรูปของสายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล (Omni-directional).....34
2.19	แบบรูปหลักสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร (Horn Antenna).....35
2.20	การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ.....36
3.1	โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์.....43
3.2	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศแบบช่องเปิด ที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์.....44
3.3	โครงสร้างสายอากาศแบบแพทช์.....45
3.4	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศแบบแพทช์.....45
3.5	โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศแบบแพทช์.....46
3.6	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศ แบบแพทช์ กรณียังไม่มีขนาดของสายท่อนสั้น (Stub).....47
3.7	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศ แบบแพทช์ กรณีมีการปรับขนาดของสายท่อนสั้น (Stub).....48
3.8	โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....49
3.9	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับ แบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....50
3.10	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_151

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_2	52
3.12 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_3	53
3.13 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_4	54
3.14 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_5	55
3.15 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยั้งที่มีตัวปรับแบบ สายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	56
3.16 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับ แบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	57
3.17 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิตของสายอากาศ ช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	58
3.18 อัตราขยายของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	58
3.18 วงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	59
4.1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยว.....	63
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่คำนวณและค่าที่ได้จากการจำลองผลของความยาว ครึ่งรอบรูปของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล.....	65
4.3 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ รูปตัวแอล (L-Shaped).....	65
4.4 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์ รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง (S_{s1}).....	66
4.5 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความยาว ของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s2}).....	67
4.6 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์ รูปตัวแอล (S_{s3}).....	68
4.7 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์ รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{s4}).....	69
4.8 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยว ที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped).....	70
4.9 VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ รูปตัวแอล (L-Shaped).....	70
4.10 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิตของสายอากาศ ช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped).....	71
4.11 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยว ที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped).....	72

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์โดยที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 GHz.....	73
4.13 การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปแอล (L-Shaped).....	75
4.14 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์โดยที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.5 GHz.....	76
4.15 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	76
4.16 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับค่าระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{d1}).....	77
4.17 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d2}).....	78
4.18 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านบน (S_{d3}).....	79
4.19 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอน (S_{d4}).....	80
4.20 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d5}).....	81
4.21 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านล่าง (S_{d6}).....	82
4.22 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	83
4.23 VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	83
4.24 อินพุตอิมพีแดนซ์ในทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	84
4.25 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	85
4.26 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	86
4.27 การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped).....	87
4.28 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์.....	88
4.29 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์.....	89
4.30 ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์.....	90
4.31 VSWR ของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 อินพุตอิมพีแดนซ์ในทอมค่าจริงกับจิตรภาพและในรูปแผนภูมิสมิตซของสายอากาศ ช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์.....	91
4.33 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์.....	92
4.34 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่มีย่านความถี่ 3.5 GHz.....	93
4.35 การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz.....	94
4.36 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่มีย่านความถี่ 5.5 GHz.....	95
4.37 การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz.....	96
5.1 ต้นแบบสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	98
5.2 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลวัดจริงค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	99
5.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz.....	100
5.4 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz.....	100
5.5 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz.....	101
5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลวัดจริงอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบบ แถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	102
5.7 สายอากาศที่สร้างจริงของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ รูปตัวแอล (L-shaped).....	103
5.8 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลวัดจริงค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้ พาราซิติกอิลิเมนต์รูปแอล (L-shaped).....	103
5.9 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz.....	104
5.10 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz.....	105
5.11 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz.....	105
5.12 เปรียบเทียบผลการจำลองและการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิด แบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped).....	106
5.13 ต้นแบบสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)....	107
5.14 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์ที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped).....	107
5.15 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz.....	108
5.16 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz.....	109
5.17 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz.....	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped).....	110
5.19 ต้นแบบสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์.....	111
5.20 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์.....	111
5.21 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz.....	112
5.22 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz.....	113
5.23 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz.....	113
5.24 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์.....	114
6.1 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิด.....	115

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้การสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จะสังเกตได้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสื่อสารไร้สาย เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook) ไอแพด (Ipad) เป็นต้น ล้วนแต่ต้องมีอุปกรณ์ไร้สายเชื่อมต่อ คือ สายอากาศ เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลหรือกระจายสัญญาณ ทั้งนี้สายอากาศที่นำมาใช้จะต้องรองรับกับเทคโนโลยีไร้สายต่าง ๆ ตามมาตรฐานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband: UWB) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนำมาใช้งานในย่านการสื่อสารไร้สายระดับบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) เนื่องจาก มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ใช้กำลังงานในการส่งต่ำ และมีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลสูงสุดถึง 480 Mbps ที่ระยะทาง 2 เมตร และความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทาง 10 เมตร ซึ่งจะเหนือกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Fi-Wi หรือ Bluetooth ที่สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ 54 Mbps เท่านั้น ด้วยความเร็วในระดับดังกล่าว จึงทำให้การสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวดเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในบ้าน โรงเรียน บริษัท เช่น โทรศัพท์ที่สามารถส่งรายการไปยังหน้าจอโทรศัพท์เครื่องอื่น ๆ ได้แบบไร้สายโดยไม่มีปัญหาการกระตุกของสัญญาณภาพ การเชื่อมต่อเพื่อถ่ายโอนภาพจากกล้องวิดีโอไปยังคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย และหากเป็นการใช้งานภายในสำนักงาน การสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวดก็จะเข้ามาช่วยลดความยุ่งยากในการติดตั้งสายเคเบิลต่าง ๆ ได้เป็นอย่างมาก การสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวดถูกกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งอเมริกา (Federal Communications Commission: FCC) [1] มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.5 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.60 GHz อย่างไรก็ตามในระบบเครือข่ายไร้สายได้มีการกำหนดมาตรฐานอื่น ๆ อีก เช่น โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ที่อยู่ภายใต้มาตรฐานของ IEEE 802.11a มีความถี่ใช้งาน 5.150-5.350 GHz และ 5.725-5.825 GHz และระบบไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access: WiMAX) ตามมาตรฐาน IEEE 802.16 มีความถี่ใช้งาน 2.5-2.7 GHz 3.4-3.69 GHz และ 5.47-5.825 GHz ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความถี่มาตรฐานของ WLAN และ WiMAX ที่ได้กล่าวมานี้จะสามารถสอดแทรกเข้าไปในระหว่างการใช้งานของการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งยวดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบสายอากาศเพื่อลดการสอดแทรกของช่วงสัญญาณดังกล่าวออกไป สายอากาศชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการนำมาออกแบบคือสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งปัจจุบันนักวิจัยได้พัฒนาสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ส่วนใหญ่สายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB antenna) ที่ได้นำเสนอมานี้แล้วมักจะมีโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อน และเมื่อทำแบนด์นอตซ์ก็ไม่สามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่งและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ได้ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ผู้วิจัยต้องการออกแบบสายอากาศให้มีขนาดไม่ใหญ่เพื่อรองรับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) และเป็นสายอากาศที่สามารถพัฒนาให้มีแบนด์นอตซ์เพื่อลดการรบกวนของคลื่นความถี่ที่อยู่ใกล้กัน

ได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมคุณลักษณะของแบนด์นอตซ์ได้ คือ การเลื่อนตำแหน่งและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ เพื่อให้ย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่ง (UWB) สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นที่มาของการนำเสนอวิทยานิพนธ์นี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดที่มีขนาดไม่ใหญ่ โครงสร้างไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการทำแมทซ์อิมพีแดนซ์ โดยใช้เทคนิคของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) มาช่วยในการขยายแบนด์วิดท์สำหรับใช้งาน ย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ตามมาตรฐาน FCC ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.6 GHz และมีการพัฒนาสายอากาศที่นำเสนอให้มีแบนด์นอตซ์ โดยมีความมุ่งหมายเพื่อไม่ให้เกิดการสอดแทรกของสัญญาณ (Interference signal) ระหว่าง ย่านความถี่ไร้สายอื่น ๆ กับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband) โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) มาช่วยในการทำแบนด์นอตซ์เดี่ยว และยังสามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ และขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ได้โดยการปรับความกว้างและความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถออกแบบสายอากาศให้มีสองแบนด์นอตซ์ได้ โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) ร่วมกัน และสามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ และขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ทั้งสองได้อีกด้วย สุดท้ายวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อให้สายอากาศที่ออกแบบนี้ สามารถใช้งานกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง สายอากาศนับเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการรับส่งข้อมูล ปัจจุบันนักวิจัยและอุตสาหกรรมทางด้านการสื่อสารได้ทำการศึกษาออกแบบและพัฒนาสายอากาศมาอย่างต่อเนื่อง สายอากาศชนิดหนึ่งที่มีความสนใจและนิยมใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ คือสายอากาศแบบไมโครสตริป [2-5] เนื่องจากมีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ออกแบบง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ โดยทั่วไปการออกแบบสายอากาศความถี่เดี่ยว และสองความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายในมาตรฐานของ IEEE 802.11 a/b/g/j และ IEEE 802.16d [6-9] จะมีแบนด์วิดท์น้อยกว่า 40% และสายอากาศที่ออกแบบให้มีความถี่แบบแถบกว้างจะมีแบนด์วิดท์ประมาณ 90% ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2-6 GHz [10-13] นอกจากนี้ยังมีการออกแบบสายอากาศที่ต้องการให้มีแบนด์วิดท์กว้างมาก ๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ซึ่งก็มีหลาย ๆ งานวิจัยได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ [14-18] แต่ปัจจุบันงานวิจัยที่ออกแบบนิยมให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัด [19-20] และสามารถนำไปพัฒนาให้รองรับกับเทคโนโลยีไร้สายในอนาคตได้ แต่ปัญหาที่พบคือ การสอดแทรกของสัญญาณระหว่างย่านความถี่ไร้สายอื่นกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband) ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบสายอากาศที่มีตัวกรองแถบความถี่ที่ไม่ต้องการออกไป

มีหลายงานวิจัยที่นำเสนอการออกแบบสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB Antenna) ที่มีแบนด์นอตซ์ เพื่อให้สามารถรองรับความถี่ที่ 5-6 GHz ออก [21-24] แต่ไม่ได้นำเสนอการเลื่อนและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ และไม่ได้พัฒนาสายอากาศให้มีสองแบนด์นอตซ์ เพื่อรองรับความถี่ที่ไม่ต้องการออก หรือขจัดการสอดแทรกของสัญญาณที่ย่านความถี่ WiMAX 3.5 GHz และ WLAN 5.5 GHz ในขณะที่เดียวกันได้มีนักวิจัยออกแบบสายอากาศที่มีสองแบนด์นอตซ์ [25-28] เพื่อรองรับความถี่ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม สายอากาศที่ออกแบบนั้นค่อนข้างซับซ้อน และไม่มีการนำเสนอการเลื่อนตำแหน่งและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ ดังนั้นเพื่อการใช้งานย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สายอากาศที่ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ ที่มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา โครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาถูก และง่ายในการสร้าง สายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้จะใช้เทคนิคของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) มาช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ เพื่อให้สามารถรองรับกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) และมีการพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์นอตซ์เพื่อไม่ให้เกิดการสอดแทรกของสัญญาณ (Interference signal) ระหว่างย่านความถี่ไร้สายอื่น ๆ กับ ย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) มาช่วยในการทำแบนด์นอตซ์เดี่ยว และสามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ การลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ได้ โดยการปรับความกว้างและความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาสายอากาศที่มีแบนด์นอตซ์เดี่ยวไปเป็นสองแบนด์นอตซ์ได้ โดยใช้ความยาวที่แตกต่างกันของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped)

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย เพื่อออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ โดยอาศัยคุณลักษณะของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) ที่มีการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ มาช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างมาก ๆ เพื่อให้เพียงพอสำหรับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) และเพื่อขจัดการสอดแทรกของสัญญาณ (Interference signal) ระหว่างย่านความถี่ไร้สายอื่น ๆ กับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาสายอากาศให้มีตัวกรองช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกไป โดยจะอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) มาช่วยในการทำแบนด์นอตซ์ ซึ่งพาราซิติกอิลิเมนต์จะวางในช่องเปิดที่อยู่บนระนาบกราวด์ จากคุณลักษณะของพาราซิติกอิลิเมนต์ยังสามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ และขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ได้ โดยอาศัยหลักการปรับความกว้างกับความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาสายอากาศให้มีสองแบนด์นอตซ์ได้ โดยอาศัยคุณสมบัติของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) ร่วมกัน มาช่วยในการพัฒนาให้ได้สองแบนด์นอตซ์ เพื่อรองรับช่วงความถี่ที่ WiMAX (3.5 GHz) และ WLAN (5-6 GHz) ออกไป

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอสายอากาศช่องเปิดที่ใช้ตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีการพัฒนาให้มีแบนด์นอตช์เดี่ยวและสองแบนด์นอตช์ โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) เพื่อลดการสอดแทรกของสัญญาณ (Interference signal) ระหว่างย่านความถี่ไร้สายอื่น ๆ กับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ซึ่งสายอากาศที่ถูกนำเสนอเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่ง การลดและขยายแบนด์วิดท์ของแต่ละแบนด์นอตช์ได้อย่างอิสระต่อกัน และมีการสร้างสมการเพื่อใช้ในการออกแบบแบนด์นอตช์ที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ โดยนำข้อมูลจากผลการจำลองของพาราซิติกอิลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์เพื่อให้ได้สมการที่ค่อนข้างเที่ยงตรง ถ้าเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศที่ออกแบบกับสายอากาศที่มีอยู่เดิมนั้น พบว่าสายอากาศเดิมที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้นี้จะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่า และไม่มีการนำเสนอการควบคุมการเลื่อนตำแหน่ง การลดและขยายแบนด์วิดท์ของแต่ละแบนด์นอตช์ได้อย่างอิสระต่อกันได้ ดังนั้น สายอากาศนี้จึงเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB)

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ โดยนำเสนอเทคนิคของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) มาใช้เพื่อช่วยขยายแบนด์วิดท์สำหรับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) พร้อมทั้งมีการพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์นอตช์ โดยมีความมุ่งหมายเพื่อไม่ให้เกิดการสอดแทรกของสัญญาณ (Interference signal) ระหว่าง ย่านความถี่ไร้สายอื่น ๆ กับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) โดยจะใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) มาช่วยในการทำแบนด์นอตช์ที่แถบความถี่ 5-6 GHz พร้อมกับนำเสนอการควบคุมการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ การลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์อีกด้วย นอกจากนี้จะนำเสนอเทคนิคการนำพาราซิติกอิลิเมนต์รูปแอล (L-Shaped) ร่วมกับรูปตัวเจ (J-Shaped) มาพัฒนาให้สายอากาศมีสองแบนด์นอตช์เพื่อกรองแถบความถี่ที่ WiMAX (3.5 GHz) และ WLAN (5-6 GHz) ออก ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอจึงสามารถนำไปใช้งานกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สุดท้ายจะเป็นการนำรูปแบบสายอากาศที่ผ่านการออกแบบและจำลองผลไปสร้างจริงและวัดผล คุณลักษณะของสายอากาศที่วัด ได้แก่ การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss: S_{11}) อัตราการขยาย (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกล (Radiation Pattern)

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท ประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึง การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดสำหรับการสื่อสารย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่ง (UWB) ด้วยการใช้โปรแกรม IE3D มาช่วยในการจำลองผล โดยเริ่มต้นจากการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดกว้าง ที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ สายอากาศแบบแพทช์ หรือ แผ่นปะ (Patch antenna) สายอากาศช่องเปิดโดยใส่ตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อช่วยขยายแบนด์วิดท์ ซึ่งในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดนี้จะทำการปรับพารามิเตอร์ของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) เพื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ

บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวและสองแบนด์นอตช์ ลำดับแรกจะเป็นการออกแบบสายอากาศที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยใช้พาราซิติคกิลิเมนต์ 2 รูปแบบคือ รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองความถี่ 5-6 GHz และการออกแบบสายอากาศที่มีสองแบนด์นอตช์โดยอาศัยคุณลักษณะของพาราซิติคกิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) ร่วมกับรูปตัวเจ (J-Shaped) มาพัฒนาเพื่อกรองย่านความถี่ WiMAX (3.5 GHz) และ WLAN (5-6 GHz) ออก นอกจากนี้ยังนำเสนอเทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์และการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวและสองแบนด์นอตช์

บทที่ 5 กล่าวถึง ผลที่ได้จากการวัดคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดกว้างที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวและสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ เพื่อนำผลวัดที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองผล

บทที่ 6 กล่าวถึง บทสรุป พร้อมทั้งปัญหาและข้อเสนอแนะ

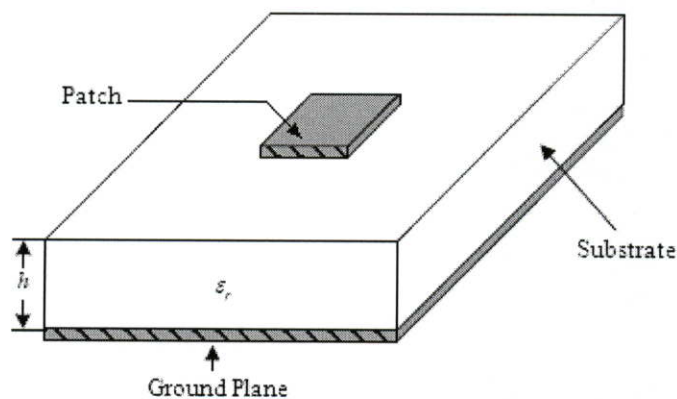
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริปและสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สายอากาศ ในการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ [2-9] และเพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบสายอากาศที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมุ่งเน้นทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป พารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ รวมทั้งการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริป การแก้ปัญหาสมการแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านชุดสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสายอากาศ ซึ่งจะเสนอในรายละเอียดดังนี้

2.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาพัฒนาเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีคือ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถผลิตด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมได้และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ได้ สายอากาศไมโครสตริปถูกนำไปใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน คือ แผ่นตัวนำสายอากาศ (Patch) ชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate) ระนาบกราวด์ (Ground plane) และสายส่งสัญญาณ (Transmission line) โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป

2.2.1 แผ่นตัวนำสายอากาศ

แผ่นตัวนำสายอากาศเป็นแผ่นโลหะแบบบางทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน และมีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อม สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปจะทำจากทองแดง ทองคำ หรือ อลูมิเนียม แผ่นตัวนำสามารถนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศให้มีรูปร่างต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่ใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และความซับซ้อนในการผลิต นอกจากนี้ ขนาดและรูปร่างของสายอากาศแบบแผ่นตัวนำยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแผ่พลังงาน และอิมพีแดนซ์ขาเข้า ปัจจุบันสายอากาศแบบแผ่นตัวนำที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยม และวงกลม เนื่องจากการออกแบบ และง่ายในการนำไปทำสายอากาศต้นแบบ

2.2.2 วัสดุฐานรอง

วัสดุฐานรองของสายอากาศเป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรองของแผ่นตัวนำ ชนิดและขนาดของวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจนกว่าความหนาของชั้นวัสดุฐานรองต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 (1 ต่อ 20) การแผ่พลังงานจะมีปริมาณลดลง การเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากจะต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะ และสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้ นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงดังต่อไปนี้

- ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric Constants: ϵ_r) วัสดุที่ใช้ควรเป็นวัสดุเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริก โดยเทียบกับอากาศ ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ควรจะมีค่าต่ำ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดี และทำให้การผลิตมีความผิดพลาดน้อย

- ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสดิสเพลซเมนต์ โดยเมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยค่านี้ควรจะมีค่าที่ต่ำ เพื่อลดพลังงานการสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

- ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal Conductivity) จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นจะมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใดซึ่งค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี

2.2.3 ระนาบกราวด์ (Ground Plane)

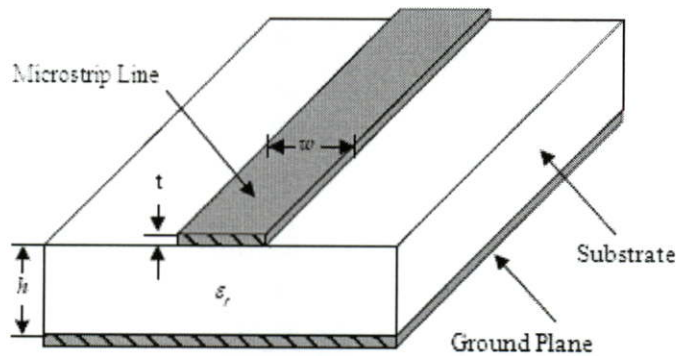
ระนาบกราวด์จะเป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับแผ่นตัวนำสายอากาศ โดยขนาดของระนาบกราวด์นี้จะส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระนาบกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจาก การวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่จะมีการตั้งสมมติฐานว่าแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมาก ๆ จนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ โดยขนาดที่จำกัดของระนาบกราวด์จะมีผลต่อลำคลื่นหลัก (Main Lobe) น้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

2.2.4 สายส่งสัญญาณ (Transmission Line)

สายส่งสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีหลายรูปแบบ เช่น ท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW), สายส่งสัญญาณระนาบร่วม (Coplanar Strip Line: CPS), สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip Line) เป็นต้น ในการออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป หรือไมโครสตริปไลน์ ซึ่งเป็นสายที่ได้รับความนิยมนำมาใช้กับความถี่ในย่านไมโครเวฟ ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายต่อไป

2.3 โครงสร้างพื้นฐานของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์

สายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์เป็นสายส่งสัญญาณได้รับความนิยมนำมาใช้กับความถี่ในย่านไมโครเวฟ เพราะง่ายต่อการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์และการสร้างแสดงดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปไลน์จะมีรูปร่างเป็นแถบตัวนำแคบ ๆ วางอยู่บนชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ (Ground plane) ซึ่งเป็นโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองในบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำแคบ ๆ กับผิวโลหะของระนาบกราวด์ด้านล่าง การที่แถบตัวนำของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปมีด้านบนสัมผัสกับอากาศและด้านล่างสัมผัสกับสารไดอิเล็กตริก ทำให้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกแยกไปในอากาศส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะผ่านไปในสารไดอิเล็กตริก แถบตัวนำซึ่งเป็นสายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์มีความกว้าง w ความหนา t ถูกวางบนวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยที่ความกว้างของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการ สำหรับความหนาของตัวนำบนวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ออกแบบสายอากาศจะมีค่าประมาณ 0.017 มิลลิเมตร



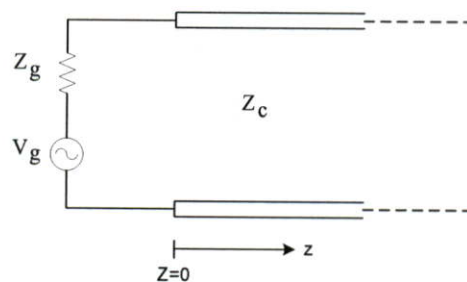
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

2.3.1 ลักษณะคลื่นบนสายส่งสัญญาณไมโครสตริปไลน์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการส่งผ่านของคลื่นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณต้นทางไปตามสายส่ง ในกรณีสายยาวเป็นอนันต์ กรณีที่สายมีความยาวจำกัดและมีโหลดต่ออยู่ ซึ่งเป็นกรณีที่มีคลื่นสะท้อนเกิดขึ้นรวมทั้งการเกิดคลื่นนิ่งบนสายส่ง

2.3.1.1 คลื่นจร (Traveling Wave)

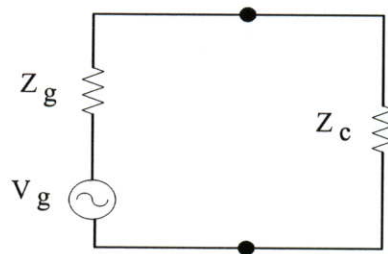
สายส่งหรือสายนำสัญญาณที่มีความยาวเป็นอนันต์และถูกป้อนด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณ V_g ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ภายในเป็น Z_g ดังในรูปที่ 2.3 การที่สายยาวอนันต์หมายถึง $Z = \infty$ การส่งผ่านของคลื่นไปในทิศ $+Z$ ถือว่าเป็นทิศทางปกติหรือมีการส่งผ่านไปด้านหน้า คลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ $-Z$ จะถือว่าเป็นคลื่นสะท้อน ในกรณีที่สายส่งยาวอนันต์และคลื่นที่ถูกป้อนจากต้นทางจะสามารถส่งผ่านไปในทิศ $+Z$ ตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณโดยไม่มีการสะท้อนหรือสะท้อนกลับ คลื่นที่ส่งผ่านในสภาพที่กล่าวนี้เรียกว่าคลื่นจร (Traveling Wave)



รูปที่ 2.3 สายส่งที่มีความยาวเป็นอนันต์

ในการหาค่าขนาดของคลื่นจรนี้โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.4 ประกอบและคิดในรูปของเฟสเซอร์ของสัญญาณ ตามรูปเนื่องจากที่ตำแหน่ง $Z = 0$ อิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปทางสายนำสัญญาณเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งคือ Z_c ดังนั้น จึงเปรียบเสมือนมีอิมพีแดนซ์ Z_c มาต่ออยู่ดังวงจรสมมูลตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 จากวงจรสมมูลนี้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม Z_c ได้ดังนี้

$$V_i = \frac{Z_c}{Z_g + Z_c} V_g \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของรูปที่ 2.3

ผลที่ได้ตามสมการจะเป็นขนาดของคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $Z = 0$ ซึ่งจะส่งผ่านไปตามสายส่ง เนื่องจาก ตามหลักการของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่า Z_g และ Z_c จะต้องมีความสัมพันธ์กัน ในรูป $Z_g = Z_c$ แต่เนื่องจาก Z_c จะเป็นค่าจริง ดังนั้น Z_g จะเป็นค่าจริงและมีค่าเท่ากับ Z_c ซึ่งในภาคปฏิบัติต้องสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณหรือเครื่องส่งให้มีอิมพีแดนซ์ภายในเท่ากับค่า Z_c ตัวอย่างเช่น ถ้านำไปใช้กับสายโคแอกเซียลแบบ 50 โอห์ม อิมพีแดนซ์ภายในของเครื่องกำเนิดสัญญาณก็ต้องเท่ากับ 50 โอห์ม ด้วย เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้เรียกว่ามีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ที่ต้นทาง และขนาดของแรงดันต้นทางก็จะมีค่าเป็นดังนี้

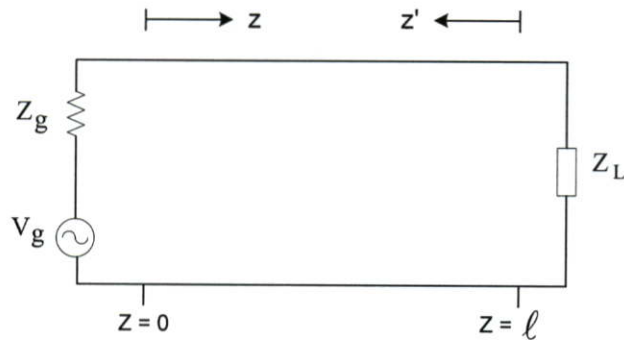
$$V_i = \frac{V_g}{2} \quad (2.2)$$

2.3.1.2 การสะท้อนของคลื่น

กรณีที่สายส่งไม่ได้ยาวอนันต์หรือมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะไม่สม่ำเสมอตามแกน Z ดังนั้น คลื่นจรที่ส่งผ่านไปจะได้รับผลกระทบจากสภาพนั้น ๆ ถ้าสายส่งมีความยาวจำกัดโดยที่ปลายสายต่อไว้ด้วยโหลดที่มีค่าเป็น Z_L ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ผลที่ได้คือกำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมาตามสาย อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่โหลดกลายเป็นความร้อน ในส่วนกำลังงานจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ (Voltage reflection coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.3)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ
 V_r คือ แรงดันสะท้อนกลับ
 V_i คือ แรงดันตกกระทบ



รูปที่ 2.5 สายส่งที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย

จากสมการที่ (2.3) ถ้าสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน (in phase) แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกันข้าม (out of phase) การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับหาได้ ดังนี้

$$\% \text{ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (2.4)$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_c

$$P = \frac{V^2}{Z_c} \quad (2.5)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์กำลังงานสะท้อนกลับ (Power reflection coefficient) จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.6)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ
 P_r คือ กำลังงานสะท้อนกลับ
 P_i คือ กำลังงานตกกระทบ

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\% \text{ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (2.7)$$

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างและผลรวมระหว่างโหนดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (2.8)$$

2.3.1.3 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

กรณีปลายสายส่งต่อไว้ด้วยโหลดทั่วไปที่ไม่ใช่แมทซ์ซึ่งโหลด สัญญาณคลื่นส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนหรือสิ้นเปลืองที่โหลดคือตัวต้านทาน อีกส่วนหนึ่งที่เหลือจะสะท้อนกลับไปตามสาย และเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับแปรเปลี่ยนตามเวลา คลื่นรวมหรือคลื่นผลลัพธ์จะได้อมาจากการรวมแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า คลื่นนิ่ง (Standing wave)

คลื่นนิ่งเกิดจากการรวมหรือบวกกันของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับ โดยมีจุดโหนดอยู่กับที่ระหว่างจุดโหนดทั้งหลาย ลูกคลื่นจะเปลี่ยนขึ้นไปถึงจุดสูงสุด และลดลงจนถึงจุดต่ำสุด และคลื่นนิ่งจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ความถี่ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับมีค่าเท่ากันเท่านั้น

ค่าแรงดันสูงสุด V_{\max} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V_{\max}(V) = V_i + V_r \quad (2.9)$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{\min} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงข้ามกัน

$$V_{\min}(V) = V_i - V_r \quad (2.10)$$

อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำเรียกว่า อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.11)$$

อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง หรือ VSWR แสดงในหน่วย dB จะมีชื่อเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR)

$$SWR (dB) = 20 \log VSWR \quad (2.12)$$

การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับของแรงดัน โดยจะเริ่มคำนวณจากสมการที่ (2.11) แทนค่าด้วยสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} \quad (2.13)$$

ทำการหารเศษและส่วนด้วย V_i และแทนค่าด้วยสมการที่ (2.3) จะได้เป็น

$$VSWR = \frac{1 + V_r/V_i}{1 - V_r/V_i} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจะได้ค่า Γ เป็น

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (2.15)$$

2.3.1.4 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจะแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตช์กัน ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะเป็นการแสดงผลการแมตช์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

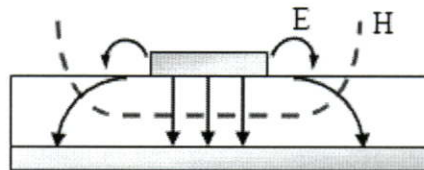
$$S_{11} = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (dB) \quad (2.16)$$

การแมทซ์กันที่สมบรูณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะเป็นค่าอนันต์ ซึ่งแสดงว่าไม่มีกำลังงานที่สะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ $\Gamma = 1$ ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะเป็น 0 dB แสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด สำหรับการนำไปใช้งานที่แสดงถึงประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นั้น VSWR ไม่ควรมีค่าเกิน 2 ซึ่งที่ตำแหน่งนี้ค่าของการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} จะเป็นมีค่า -9.54 dB โดยประมาณ

2.3.1.5 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM แต่จะไม่ใช้โหมด TEM เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวว่า โหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) รูปที่ 2.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ในระนาบตามขวางของสายไมโครสตริป การที่มีสนามในแนวแกนอยู่นั้นเป็นเพราะโครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริก และอากาศอยู่ในระนาบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้นนี้ โหมดที่ส่งผ่านอยู่นั้นก็จะเป็นไฮบริดโหมด

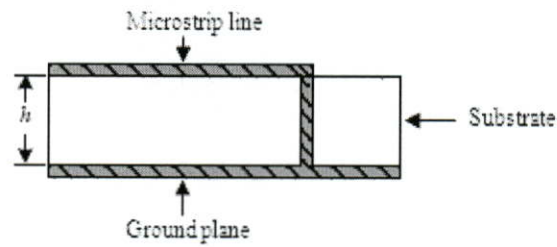
การที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้ ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ โดยวิธีการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant: ϵ_{eff}) ของระบบ ซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริก และอากาศเข้าด้วยกัน



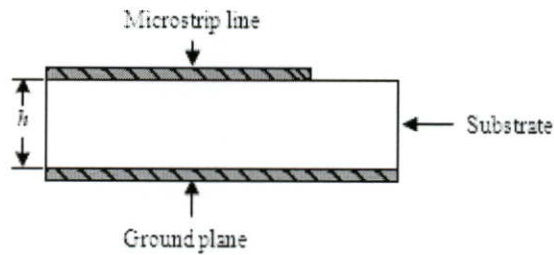
รูปที่ 2.6 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของสายส่งไมโครสตริป

2.3.2 ลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณของสายส่งไมโครสตริปไลน์

โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปจะประกอบไปด้วยสายอากาศแบบช่องเปิดที่อยู่บนแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์และสายไมโครสตริปที่อยู่บนระนาบตรงกันข้าม สำหรับลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณนี้จะมีหลักการรูปแบบพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบ คือ การต่อแบบปิดวงจร (Microstrip Terminated Short Circuit) ซึ่งการต่อแบบปิดวงจรนี้จะไม่นิยมนำมาออกแบบเนื่องจากมีรูปแบบที่ยากต่อการนำไปสร้างในเทคโนโลยีวงจรมินิมัม ดังรูปที่ 2.7(ก) และการต่อแบบเปิดวงจร (Microstrip Terminated Open Circuit) แสดงดังรูปที่ 2.7(ข) ซึ่งความยาวที่เหมาะสมของสายไมโครสตริปในกรณีนี้จะมีความยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น



(ก) การต่อแบบปิดวงจร



(ข) การต่อแบบเปิดวงจร

รูปที่ 2.7 สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป (Microstrip Fed Slot Antenna) ตามรูปที่ 2.7(ข) นั้น จะมีการจัดวางสายอากาศช่องเปิดให้อยู่ตรงกลางระหว่างด้านซ้ายและขวาบนระนาบกราวด์ และวางตำแหน่งของสายส่งไมโครสตริปไว้บนระนาบตรงข้ามบริเวณกึ่งกลางกับช่องเปิด โดยมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ปลายของสายส่งไมโครสตริป การจัดวางในลักษณะแบบนี้จะทำให้เกิดความต้านทานในการแพร่กระจายสูง ดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัยเพื่อให้มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี โดยวิธีพื้นฐานที่สำคัญในการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีดังนี้

1. วิธีการปรับความยาวของสายส่งไมโครสตริป ความยาวของสายส่งไมโครสตริปนั้นมีผลโดยตรงกับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นในการออกแบบควรให้ความยาวของสายส่งไมโครสตริปยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นสัมพันธ์ โดยอาจจะมากหรือน้อยกว่าเล็กน้อยก็ได้ ซึ่งความยาวของสายส่งไมโครสตริปนี้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายอากาศด้วย

2. วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งไมโครสตริป

2.4 การออกแบบสายส่งไมโครสตริป

สายส่งไมโครสตริปที่จะนำมาใช้จะอยู่ในรูปแบบแบบเปิดวงจรร ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.7(ข) โดยจะมีลักษณะเป็นแถบโลหะแคบ (แผ่นโลหะยาว) ความกว้างของแถบโลหะจะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปที่ต้องการออกแบบเพื่อให้แมตช์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่จะนำมาต่อเข้ากับสายส่งไมโครสตริป ส่วนความยาวจะเป็นตัวช่วยในการปรับแต่งให้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเกิดน้อยที่สุด ถ้ากำหนดให้ W เป็นความกว้างของสายส่งไมโครสตริป h เป็นความสูงของวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่มีความหนาของชั้นโลหะน้อยมาก และ Z_C เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกเซียล สมการในการคำนวณหาความกว้าง W มีดังนี้

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \leq 1$$

$$Z_C = 60 \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right) / (\epsilon_{eff})^{1/2} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right) + 0.5(\epsilon_r - 1)\left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-1/2} \quad (2.18)$$

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \geq 1$$

$$Z_C = \frac{120\pi / (\epsilon_{eff})^{1/2}}{w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.44)} \quad (2.19)$$

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \leq 2$$

$$\frac{w}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (2.20)$$

$$\text{กรณี } \frac{w}{h} \geq 2$$

$$\frac{W_m}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_C}{60} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right) \quad (2.22)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\epsilon_r^{1/2}} \quad (2.23)$$

โดยธรรมชาติ สายส่งไมโครสตริปมีคุณสมบัติในการทำให้คลื่นกระจัดกระจาย (Dispersive) นั่นคือ การที่ ϵ_{eff} แปรตามค่าความถี่ และโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นในสายส่งไมโครสตริป คือ

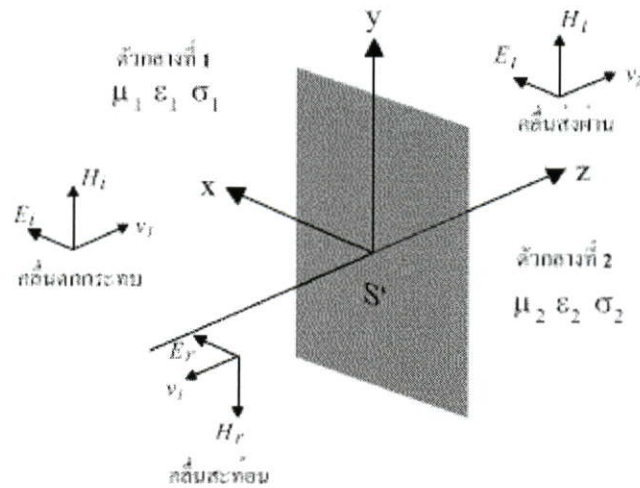
$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.24)$$

- เมื่อ λ_g คือ ความยาวคลื่นสัมพัทธ์
 c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)
 ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective dielectric constant)
 f คือ ความถี่หลักที่ต้องการออกแบบของสายอากาศ

2.5 คุณลักษณะสายอากาศแบบช่องเปิดและแบบแพทช์

2.5.1 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ (Induction Theorem)

สายอากาศแบบช่องเปิดโดยทั่วไปปัญหาจะอยู่ในลักษณะที่ว่าด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นจะอยู่ภายในอาณาบริเวณหนึ่ง และคลื่นที่กระจายออกจากสายอากาศจะกระจายไปในอีกอาณาบริเวณหนึ่งซึ่งมีตัวกลางไม่เหมือนกัน รูปที่ 2.8 แสดงรูปทั่วไปของปัญหาดังกล่าวนี้ คือ แหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ในตัวกลางที่ 1 ซึ่งอาณาบริเวณถูกล้อมรอบไว้ด้วยผิวปิด S' และตัวกลางที่ 2 ที่อยู่ชิดกับอาณาบริเวณของตัวกลางที่ 1 เป็นบริเวณที่ต้องกรู้อการกระจายคลื่นจะเป็นไปในลักษณะใด ในปัญหาเช่นนี้ ถ้าตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 มีค่าคงตัวของตัวกลางไม่เหมือนกันหรือมีค่าอินทรินสิคิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ไม่เหมือนกัน คลื่นเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นเมื่อปะทะกับผิวขอบเขตจะเกิดการสะท้อนของคลื่นกลับเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 และส่งผ่านคลื่นเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ด้วยเพราะฉะนั้น ถ้าให้ E^t และ H^t เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นตกกระทบบน E^i และ H^i เป็นคลื่นที่เกิดจากการสะท้อนที่ผิวขอบเขต E^r และ H^r เป็นคลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ดังนั้นในตัวกลางที่ 1 คลื่นที่ปรากฏอยู่ก็จะเป็นผลบวกของคลื่นตกกระทบบนและคลื่นสะท้อนรวมกัน คือ $E^i + E^r$ และ $H^i + H^r$ ส่วนในตัวกลางที่ 2 ก็จะมีเพียงคลื่นที่ส่งผ่าน คือ E^t และ H^t ซึ่งก็คือคลื่นที่กระจายไปในตัวกลางที่ 2 ที่ต้องการรู้ค่านั้นเอง



รูปที่ 2.8 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น

ในการคำนวณหาคลื่น \vec{E}^t และ \vec{H}^t นี้ทำได้โดยวิธีการต่อไปนี้ ก่อนอื่นที่ผิวขอบเขตสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องมีความสัมพันธ์กันในรูปต่อไปนี้

$$\vec{E}_t^i + \vec{E}_t^r = \vec{E}_t^t \quad (2.25)$$

$$\vec{H}_t^i + \vec{H}_t^r = \vec{H}_t^t \quad (2.26)$$

โดยที่ตัวพ่วง t หมายถึงส่วนประกอบของสนามในแนวขนานกับผิวขอบเขต คลื่นสะท้อน E^r และ H^r และคลื่นส่งผ่าน E^t และ H^t จะได้ผลว่าคลื่นทั้งสองชุดนี้จะถูกต้องตามสมการแมกซ์เวลล์ที่ทุก ๆ ตำแหน่งยกเว้นที่ผิวขอบเขตซึ่งมีความไม่ต่อเนื่องเกิดอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\vec{E}_t^i - \vec{E}_t^r = \vec{E}_t^i \quad (2.27)$$

$$\vec{H}_t^i - \vec{H}_t^r = \vec{H}_t^i \quad (2.28)$$

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตรงผิวขอบเขตนั้น ทำให้สามารถคิดได้ว่าเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าสมมูลและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่กระจายอยู่บนผิวขอบเขตในรูปสมการต่อไปนี้คือ

$$\vec{J} = \vec{n} \times (\vec{H}_t^i - \vec{H}_t^r) \quad (2.29)$$

$$\vec{M} = -\vec{n} \times (\vec{E}_t^i - \vec{E}_t^r) \quad (2.30)$$

โดยที่ \vec{J} และ \vec{M} เป็นกระแสไฟฟ้าสมมูล และกระแสแม่เหล็กสมมูลตามลำดับ นั่นคือในการหาคลื่นสะท้อน E^i และ E^r และคลื่นที่ส่งผ่านเข้าตัวกลางที่ 2 คือ H^i และ H^r นั้น แทนที่จะแก้ปัญหาจากแหล่งกำเนิดคลื่นโดยตรง อาจคิดได้ว่าคลื่นทั้งสองชุดนี้ เกิดจากกระแสไฟฟ้าสมมูลและกระแสแม่เหล็กสมมูลดังกล่าวนี้ และเนื่องจากเป็นเวกเตอร์หน่วยที่ผิวขอบเขต เพราะฉะนั้นสมการ (2.29) และสมการ (2.30) จะเขียนได้โดยใช้ \vec{n} , E^i ดังนี้

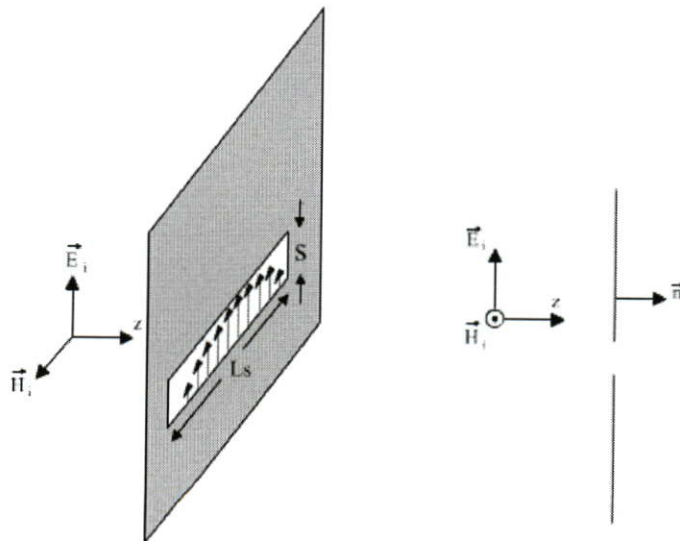
$$\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}^i \quad (2.31)$$

$$\vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E}^i \quad (2.32)$$

2.5.2 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด

การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศแบบช่องเปิด เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบช่องเปิดแคบ โดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศตั้งฉากกับแนวของช่องเปิด จะเห็นได้ว่าที่ตรงช่องเปิดจะมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงมากเกิดขึ้น ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกไปยังบริเวณที่อยู่อีกด้านหนึ่งในกรณีช่องเปิดแคบมาก ๆ กระแสไฟฟ้าสมมูลคือ $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}^i$ จะมีขนาดจำกัด และเมื่อคิดว่าความกว้างของช่องเปิดซึ่งอ้างอิงจากรูปคือ S เข้าหาศูนย์ กระแสไฟฟ้าสมมูลส่วนนี้จะตัดทิ้งได้เพราะมีขนาดเล็ก แต่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูลคือ $\vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E}^i$ นั้นไม่สามารถตัดทิ้งได้ เพราะเมื่อ S เข้าหาศูนย์สนามแม่เหล็กที่ช่องเปิดก็จะเข้าหอนันต์จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

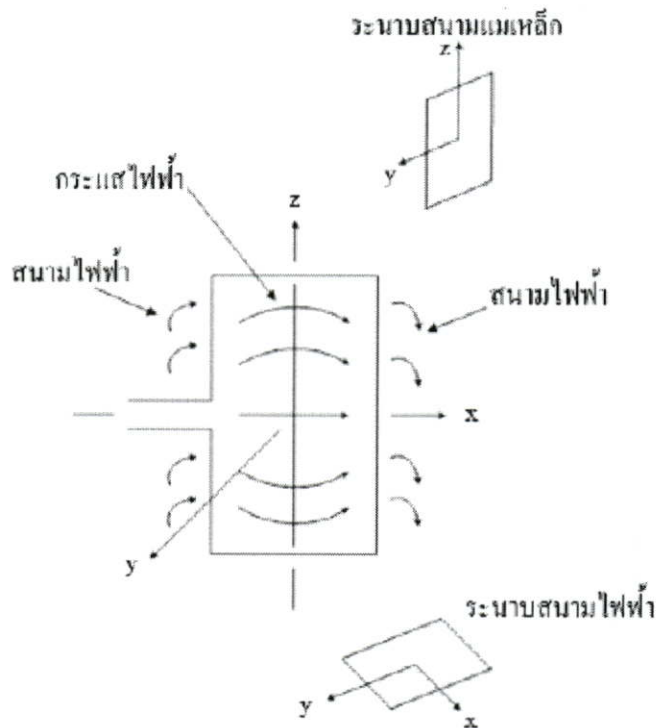
ถ้าให้ E_s เป็นสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิด และช่องเปิดยาว L_s เนื่องจากปลายทั้งสองของช่องเปิดสนามไฟฟ้าจะต้องเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นการกระจายของสนามไฟฟ้าบนช่องเปิดจะเขียนได้ดังรูปที่ 2.9 กระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากแผ่นตัวนำมีความหนาจำกัด จะเกิดขึ้นที่ทางด้านหน้าและด้านหลังโดยมีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 2.9 การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิด

2.5.3 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศแบบแพทช์

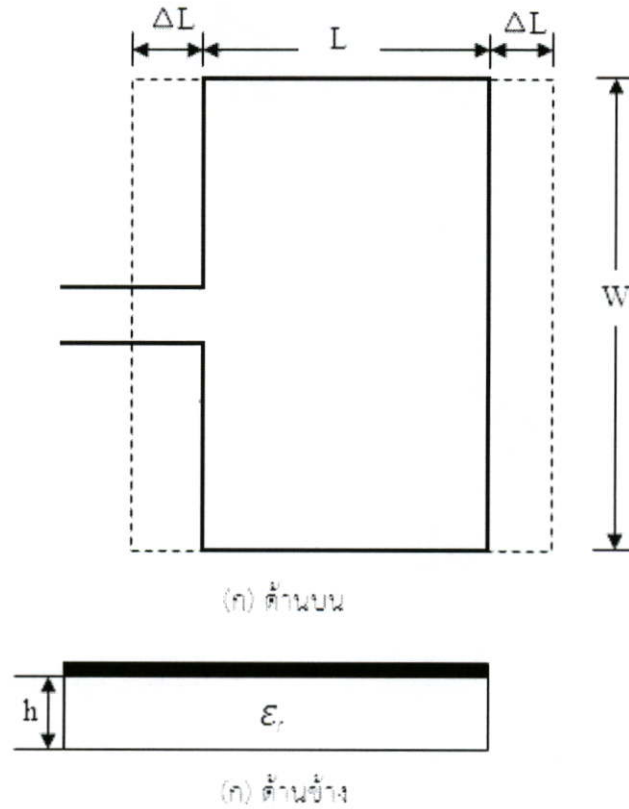
คุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการแสดงคุณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Characteristics of a rectangular patch) แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการแสดงกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงของสนามไฟฟ้าทั้งภายในและบริเวณรอบ ๆ แพทช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพทช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบนั้น จะมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 2.10 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้ง



รูปที่ 2.10 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์

2.5.4 การออกแบบสายอากาศแบบแพทช์

การออกแบบสายอากาศแบบแพทช์นั้นมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบ ได้แก่ ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (dielectric constant: ϵ_r) และความหนาของวัสดุฐานรอง (h)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างและความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

กรณีที่ $W/h > 1$ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพันธ์หาได้จากสมการที่ (2.33)

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.33)$$

การหาความยาวที่เพิ่มขึ้นแต่ละด้าน (ΔL) สามารถหาค่าโดยประมาณของความยาวที่เพิ่มขึ้นได้ดังสมการที่ (2.34)

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{\epsilon_{eff} + 0.3 \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.34)$$

ดังนั้นความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศแบบแพทช์คือ (ปกติ $L = \lambda/2$ สำหรับโหมด TM_{010} ที่ไม่มี Fringing)

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (2.35)$$

สำหรับโหมด TM_{010} ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแบบแพทช์สามารถหาได้ดังนี้

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.36)$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดค่า ϵ_r, f_r และ h ทำให้หาความยาว L และความกว้าง W ได้ดังนี้

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (2.37)$$

และ

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.38)$$

โดย c คือความเร็วของแสงในอากาศ มีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที

2.6 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.6.1 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)

อิมพีแดนซ์ขาเข้า คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วต่อของสายอากาศ หรือก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแสของบริเวณขั้วต่อ หรืออีกนัยหนึ่งคืออัตราส่วนของส่วนประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดนั้น ในที่นี้จะกำหนดให้อิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ขั้วคู่ต่อสายอากาศเป็น $a - b$ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 และให้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ไม่มีการต่อโหลดใด ๆ ดังนั้นจะหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ ดังนี้

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.39)$$

โดยที่

Z_A = อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่บริเวณขั้วต่อ $a - b$ (ohms)

R_A = ความต้านทานของสายอากาศบริเวณขั้วต่อ $a - b$ (ohms)

X_A = ค่าความต้านทานเชิงจินตภาพบริเวณขั้วต่อ $a - b$ (ohms)

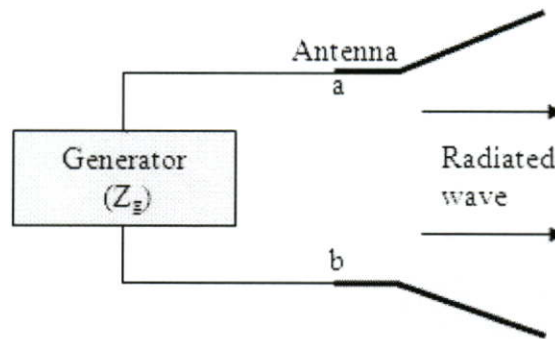
โดยทั่วไปค่าความต้านทานจาก (2.39) จะประกอบด้วย 2 องค์ประกอบดังนี้

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.40)$$

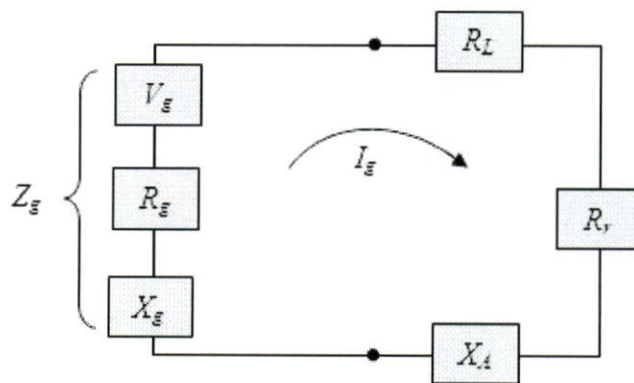
ขณะที่

R_r คือ ค่าความต้านทานในการแผ่คลื่นออกไปของสายอากาศ

R_L คือ ค่าความต้านทานจากการสูญเสียของสายอากาศ



(ก) สายอากาศในรูปแบบการส่ง



(ข) วงจรสมมูลเทวินินของสายอากาศในรูปแบบการส่ง

รูปที่ 2.12 สายอากาศส่งและลักษณะวงจรเสมือน

2.6.2 แผนภูมิสมิท (Smith chart)

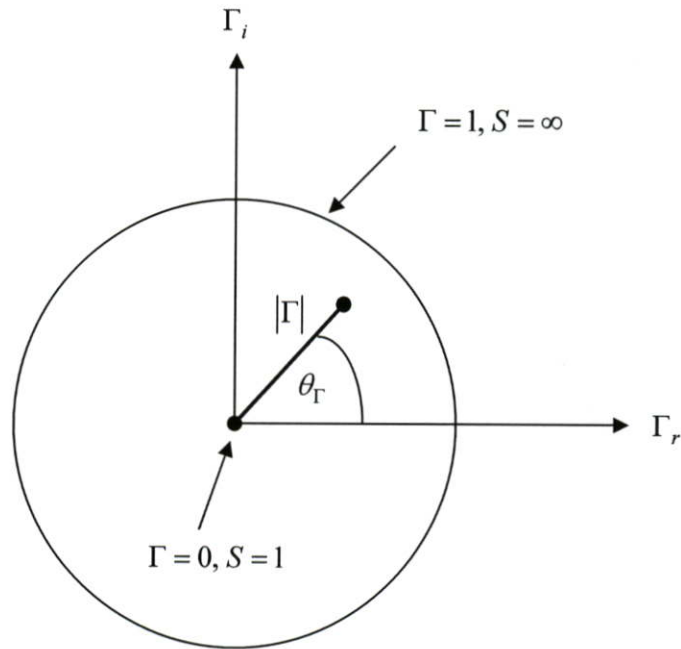
แผนภูมิสมิท (Smith chart) เป็นวิธีการใช้วิถีเชิงกราฟ ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานในเชิงกราฟ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง แผนภูมิสมิทถูกเสนอโดย นาย Smith ที่ Bell Lab ในอเมริกาประมาณ 70 กว่าปีที่แล้ว แผนภูมิของ Smith มีพื้นฐานมาจากการแปลงอิมพีแดนซ์ Z ไปเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) โดยในการสร้างแผนภูมิสมิทจะกำหนดให้สายส่งไม่มีการสูญเสีย ($Z_0=R_0$) และรัศมีหนึ่งหน่วย ($|\Gamma| \leq 1$) ในแผนภูมิสมิท ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งโครงสร้างของแผนภูมิจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ในสมการ (2.41)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.41)$$

หรือ

$$\Gamma = |\Gamma| \angle \theta_{\Gamma} = \Gamma_r + j\Gamma_i \quad (2.42)$$

เมื่อ Γ_r และ Γ_i เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ



รูปที่ 2.13 แผนภูมิสมิตที่เป็นวงกลมหนึ่งหน่วย

การใช้แผนภูมิเพื่อแยกสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์แตกต่างกันไป เช่น Z_0 เท่ากับ 60 โอห์ม 100 โอห์ม และ 120 โอห์ม ซึ่งทำได้ด้วยการใช้แผนภูมิบรรทัดฐาน (Normalized chart) กับทุก ๆ อิมพีแดนซ์ที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานที่เกี่ยวข้องกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_0 ของสายเฉพาะภายใต้การพิจารณา กับอิมพีแดนซ์ของโหลด (Load impedance: Z_L) สามารถกำหนดอิมพีแดนซ์นอร์มอลไลส์ (Normalized impedance: z_L) ได้โดย

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = r + jx \quad (2.43)$$

แทนสมการที่ (2.43) ลงในสมการที่ (2.41) และ (2.42) จะได้

$$\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{z_L - 1}{z_L + 1} \quad (2.44a)$$

หรือ

$$z_L = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = \frac{1 + |\Gamma|e^{j\theta_\Gamma}}{1 - |\Gamma|e^{j\theta_\Gamma}} \quad (2.44b)$$

หรือ

$$z_L = r + jx = \frac{(1 + \Gamma_r) + j\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r) - j\Gamma_i} \quad (2.44c)$$

เมื่อทำให้เป็นบรรทัดฐานและทำการเข้าสมการ จะได้

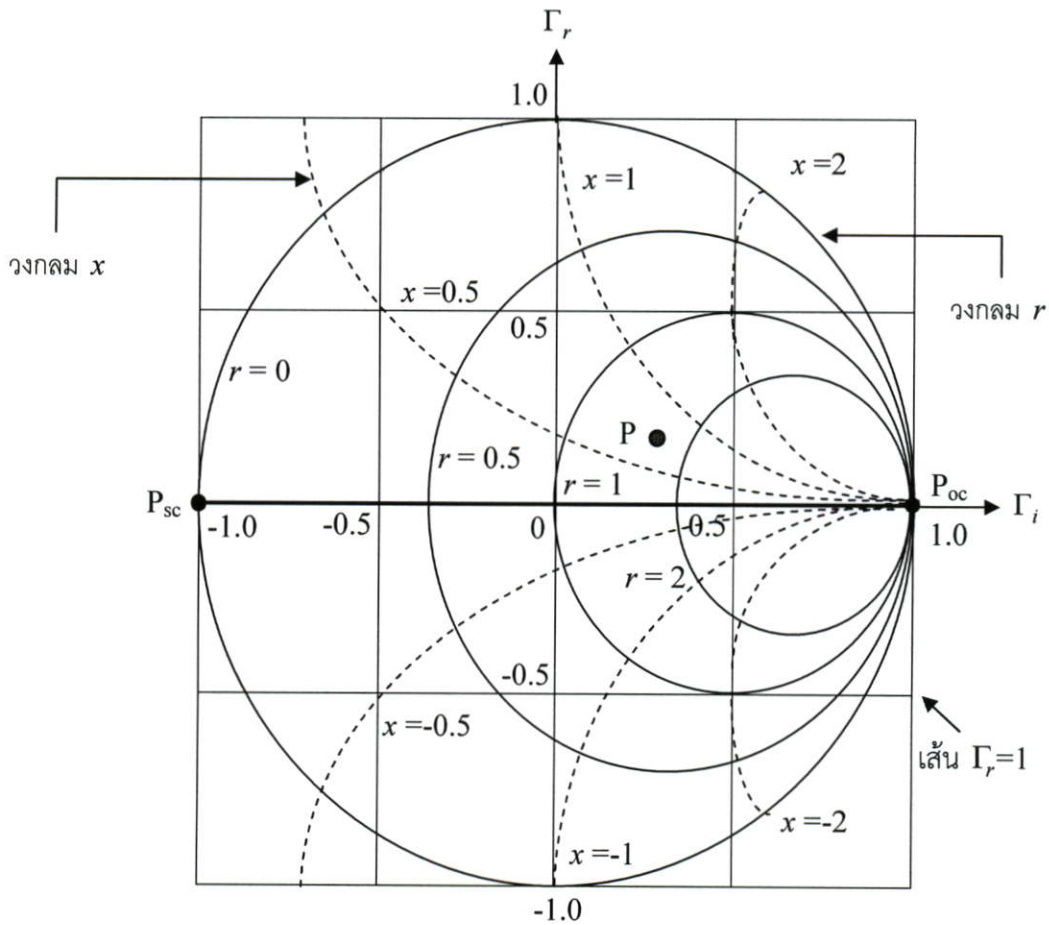
$$r = \frac{(1 + \Gamma_r^2) + j\Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 - j\Gamma_i^2} \quad (2.45a)$$

$$x = \frac{2\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r)^2 - \Gamma_i^2} \quad (2.45b)$$

ทำการพล็อตสมการที่ (2.45a) ในระนาบ $\Gamma_r - \Gamma_i$ ที่ค่า r ที่กำหนดให้กราฟผลลัพธ์ของมันจะเป็นโลคัส (Locus) ของค่า r นี้ ซึ่งโลคัสนี้สามารถแสดงอยู่ในรูปสมการคือ

$$\left[\Gamma_r - \frac{r}{1+r} \right]^2 + \Gamma_i^2 = \left[\frac{1}{1+r} \right]^2 \quad (2.46)$$

สมการที่ (2.46) เป็นการของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ $1/(1+r)$ และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $\Gamma = r/(1+r)$ และที่ $\Gamma_i = 0$ ถ้า r มีค่าต่าง ๆ จะทำให้ได้วงกลมที่มีรัศมีต่างกัน และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนแกน Γ_r ซึ่งกลุ่มของวงกลม r เหล่านี้ได้แสดงด้วยเส้นทึบในรูปที่ 2.14 เนื่องจากสายส่งไม่มีการสูญเสียมี $|\Gamma| \leq 1$ ดังนั้นจึงมีเพียงกราฟบางส่วนเท่านั้นที่อยู่ภายใต้วงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยซึ่งอยู่บนระนาบ $\Gamma_r - \Gamma_i$ ซึ่งทั้งนี้ส่วนที่อยู่ภายนอกวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย จะไม่นำมาพิจารณา จะเห็นได้ว่าทุกวงกลมจะผ่านจุด $(\Gamma_r, \Gamma_i = 1, 0)$ วงกลม r เท่ากับ 0 จะมีรัศมีเป็นหนึ่งหน่วย และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งจะเป็นวงกลมที่ใหญ่ที่สุด



รูปที่ 2.14 แผนภูมิสมิธในพิกัดฉาก

ในทำนองเดียวกัน สามารถจัดสรรสมการที่ (2.45b) ได้เป็น

$$[\Gamma_r - 1]^2 + \left[\Gamma_i - \frac{1}{x}\right]^2 = \left[\frac{1}{x}\right]^2 \tag{2.47}$$

สมการที่ (2.47) เป็นสมการของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ $1/|x|$ และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $\Gamma_r = 1$ และที่ $\Gamma_i = 1/x$ ถ้า x มีค่าต่าง ๆ จะทำให้วงกลมมีรัศมีที่ต่างกัน และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้น $\Gamma_r = 1$ ส่วนวงกลม x ที่วางอยู่ภายใต้ขอบเขต $|\Gamma| = 1$ จะแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.14 วงกลม x ทั้งหมดจะผ่านจุด (1,0) ซึ่งจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านี้จะอยู่เหนือแกน Γ_r เมื่อ $x > 0$ (รีแอกแตนซ์สภาพเหนี่ยวนำ) และจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านี้จะอยู่ใต้แกน Γ_r เมื่อ $x < 0$ (รีแอก

แดนซ์สภาพความจุ) รัศมีของวงกลม x จะเพิ่มมากขึ้นขณะที่ $|x|$ ลดลง และเมื่อ $x=0$ โลกัศจะเปลี่ยนไปสู่แกน Γ_r

สมการที่ (2.46) และสมการที่ (2.47) จะมาจากรูปแบบสูตรดังต่อไปนี้คือ

$$[x-h]^2 + [y-k]^2 = a^2 \quad (2.48)$$

ซึ่งเป็นสมการโดยทั่วไปของวงกลมที่มีรัศมี a มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ (h, k) ดังนั้นสมการที่ (2.46) ก็คือวงกลม r (r -circle) หรือวงกลมความต้านทาน (resistance circle) ซึ่งมี

$$\text{จุดศูนย์กลางอยู่ที่ } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left(\frac{r}{1+r}, 0\right) \quad (2.49)$$

$$\text{รัศมี} = \frac{1}{1+r} \quad (2.50)$$

ในการทำงานเดียวกัน สมการที่ (2.47) ก็คือวงกลม x (x -circle) หรือวงกลมรีเอกแตนซ์ (reactance circle) ซึ่งมี

$$\text{จุดศูนย์กลางอยู่ที่ } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left(1, \frac{1}{x}\right) \quad (2.51)$$

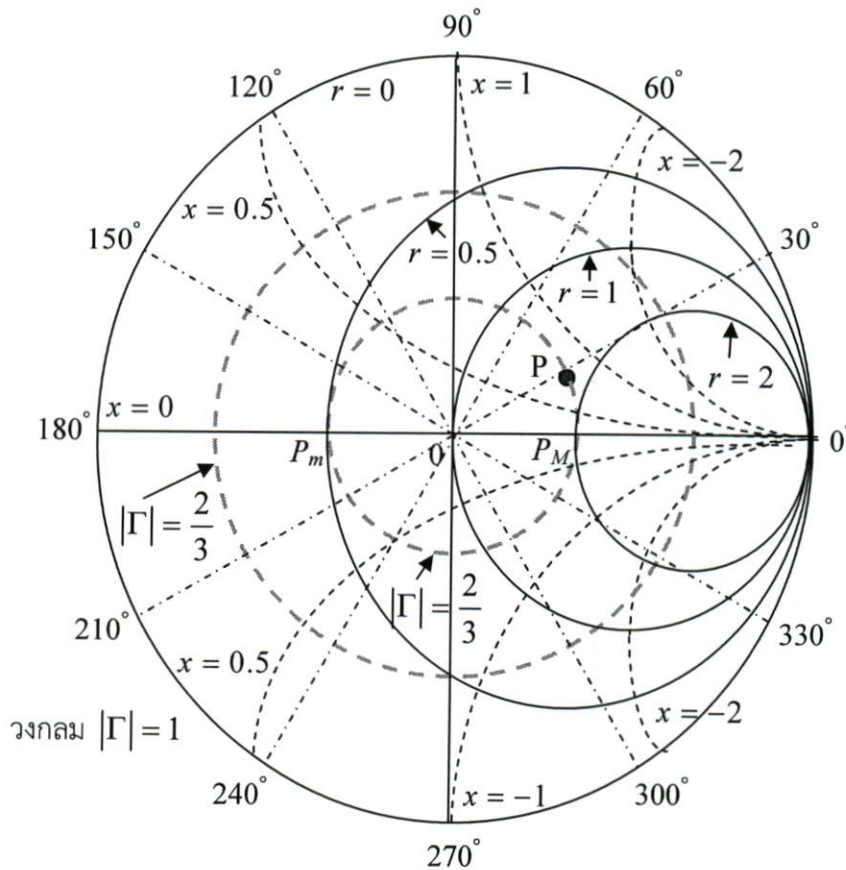
$$\text{รัศมี} = \frac{1}{x} \quad (2.52)$$

จากการสังเกตจะเห็นได้ว่า ค่า r จะเป็นบวกเสมอ แต่ค่า x สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกสำหรับสภาพการเหนี่ยวนำ (inductive impedance) หรือเป็นค่าลบสำหรับสภาพความจุ (inductive impedance) ดังนั้นจึงพิสูจน์ได้ว่า วงกลม r และวงกลม x ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งการตัดกันของวงกลม r และวงกลม x ที่แต่ละจุด จะถูกกำหนดเป็นอิมพีแดนซ์ของโหลดแบบนอร์แมลไลซ์ (normalized) $z_L = r + jx$ และอิมพีแดนซ์ของโหลดจริง คือ $z_L = R_0(r + jx)$

จากรูปที่ 2.14 ที่จุด P แสดงถึงการตัดกันของวงกลม $r=1.7$ และวงกลม $x=0.6$ ดังนั้นจุดนี้จะแสดงถึง $z_L=1.7+j0.6$ จุด P_{sc} ที่ $(\Gamma_r = -1, \Gamma_i = 0)$ จะตรงกับ $r=0$ และ $x=0$ ดังนั้นมันจะแสดงถึงวงจรลัด จุด P_{oc} ที่ $(\Gamma_r = 1, \Gamma_i = 0)$ จะตรงกับอิมพีแดนซ์อินันต์ซึ่งแสดงถึงวงจรเปิด

แผนภูมิสมิธในรูปที่ 2.14 สามารถกำหนดในพิกัดเชิงขั้วได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งทุก ๆ จุดในระนาบ Γ จะถูกกำหนดโดยขนาด $|\Gamma|$ และมุมเฟส θ_Γ ซึ่งขนาดของวงกลม $|\Gamma|$ จะถูกแสดงด้วยเส้นหนา และมุม θ_Γ จะถูกกำหนดรอบ ๆ วงกลม $|\Gamma|=1$ ซึ่งเป็นวงกลมเดียวกันกับวงกลม $r=0$ โดยปกติแล้ววงกลม

$|\Gamma|$ จะไม่แสดงไว้ในแผนภูมิสมิททั่วไป แต่การกำหนดจุดดังกล่าวข้างต้นมักแสดงถึงตำแหน่ง $z_L = r + jx$ ที่แน่นอน เพียงแต่วาดวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่จุดกำเนิดผ่านจุด z_L เช่น รัศมีที่เป็นเศษส่วนซึ่งวัดจากจุดศูนย์กลางไปยังจุดจะเท่ากับ $|\Gamma|$ ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดัน และมุมที่วัดจากสายส่งไปยังจุดที่ทำกับแกนจริงคือ θ_Γ ซึ่งการกำหนดกราฟดังกล่าวข้างต้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการคำนวณ Γ ด้วยสมการที่ (2.44a)



รูปที่ 2.15 แผนภูมิสมิทในพิกัดเชิงขั้ว

วงกลม $|\Gamma|$ แต่ละวงจะตัดกับแกนจริงสองจุดในรูปที่ 2.15 ได้กำหนดจุดบนแกนจริงบวก (OP_{oc}) เป็น P_M และจุดบนแกนจริงลบ (OP_{sc}) เป็น P_m ทั้งสองตำแหน่งจึงแสดงถึงโหนดความต้านทานบริสุทธิ์ $z_L = R_L$ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $R_L > R_0$ ที่ P_m เมื่อ $r_L > 1$ และ $R_L < R_0$ ที่ P_m เมื่อ $r_L < 1$ จุด P_M และ P_m จะเป็นไปตามตำแหน่งของ V_{max} และ V_{min} ตามลำดับ เพราะฉะนั้น

$$\Gamma = \frac{R_L - R_0}{R_L + R_0} = \frac{r_L - 1}{r_L + 1} = \frac{S - 1}{S + 1} \quad (2.53)$$

ดังนั้น $S = r_L = R_L / R_0$ เมื่อ $R_L > R_0$ มันไปได้ว่าค่าของวงกลม r ที่ผ่านจุด P_M คืออัตราส่วนคลื่นนิ่ง ดังเช่นจุด $z_L = 1.7 + j0.6$ ที่จุด P ในรูปที่ 2.15 จะได้ค่า $|\Gamma| = 1/3$ และ $\theta_\Gamma = 28$ องศา ที่จุด P_M จะได้ $r = S = 2.0$ เป็นต้น จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการกำหนดสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดันอิมพีแดนซ์ โดยกำหนดให้ z' ซึ่งห่างจากโหลดเป็นอัตราส่วนระหว่าง γ ด้วย $j\beta$ ในกรณีของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย จะได้

$$Z_{in}(z') = \frac{V_s(z')}{I_s(z')} = R_0 \left[\frac{1 + \Gamma e^{-j2\beta z'}}{1 - \Gamma e^{-j2\beta z'}} \right] \quad (2.54)$$

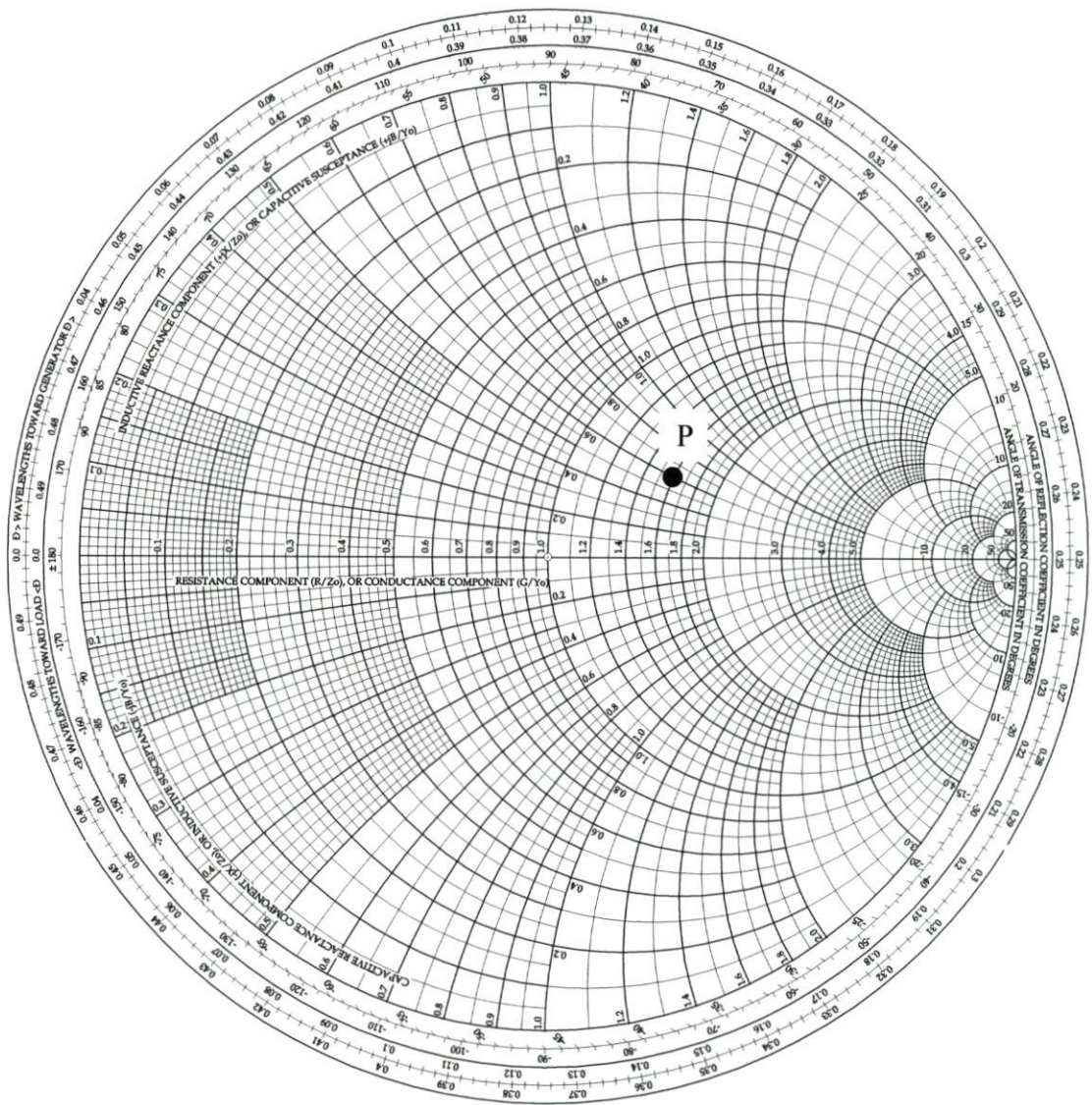
ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแบบนอร์มอลไลซ์คือ

$$z_{in} = \frac{Z_{in}}{R_0} = \frac{1 + \Gamma e^{-j2\beta z'}}{1 - \Gamma e^{-j2\beta z'}} = \frac{1 + |\Gamma| e^{j\phi}}{1 - |\Gamma| e^{j\phi}} \quad (2.55)$$

เมื่อ

$$\phi = \theta_\Gamma - 2\beta z' \quad (2.56)$$

จะเห็นได้ว่าในสมการที่ (2.55) จะสัมพันธ์กับ z_{in} และถ้า $\Gamma e^{-j2\beta z'} = |\Gamma| e^{j\phi}$ แล้วสมการที่ (2.55) จะเหมือนกันกับสมการที่ (2.44b) ซึ่งสัมพันธ์กับ z_L และ $\Gamma = |\Gamma| e^{j\theta_\Gamma}$ ตามความเป็นจริงแล้ว กรณีก่อนหน้านี้เป็นกรณีพิเศษของ $z' = 0$ ($\phi = \theta_\Gamma$) ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ($|\Gamma|$) และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (S) จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการเพิ่มขึ้นของความยาวสาย z' ดังนั้นจึงสามารถใช้แผนภูมิสมิตเพื่อหา $|\Gamma|$ และ θ_Γ เมื่อหา z_L ที่โหลดได้ โดยกำหนดให้ $|\Gamma|$ คงที่ และหักลบออกจากมุม θ_Γ (หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\beta z' = 4\pi z' / \lambda$ กรณีเช่นนี้ $|\Gamma| e^{j\phi}$ จะกำหนดจุด z_{in} ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแบบนอร์มอลไลซ์ที่มองเข้าไปยังสายที่ไม่มีการสูญเสียที่อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ R_0 ที่มีความยาว z' และอิมพีแดนซ์ของโหลดแบบนอร์มอลไลซ์ z_L ต่ออยู่ ทั้งสองสเกลที่เพิ่มเข้าไปใน $\Delta z' / \lambda$ โดยปกติจะกำหนดตามเส้นรอบวงของวงกลม $|\Gamma| = 1$ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการอ่านของเฟสที่เปลี่ยนไป $2\beta(\Delta z')$ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความยาว $\Delta z'$: สเกลภายนอกมีเครื่องหมายเป็น ความยาวคลื่นตรงไป ยังเครื่องกำเนิด (wavelength toward generator) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (z' เพิ่มขึ้น) และสเกลภายในกำหนดเป็น ความยาวคลื่นตรงไปยังโหลด (wavelength toward load) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (z' ลดลง) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภูมิสมิท (จุด P เป็นจุดเดียวกับรูปที่ 2.14 และ 2.15)

จากรูปที่ 2.16 เป็นแผนภูมิสมิททั่วไปที่ประกอบด้วยวงกลม r และวงกลม x จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในความยาวคลื่น ($\Delta z' = \lambda/2$) จะเป็นไปตาม $2\beta(\Delta z') = 2\pi$ ที่เปลี่ยนแปลงใน ϕ การหมุนครบรอบวงกลม $|Γ|$ จะกลับไปยังจุดเดียวกัน และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในอิมพีแดนซ์ ซึ่งจากการกล่าวมาเบื้องต้นเหล่านี้ทำให้สามารถนำแผนภูมิสมิทไปใช้ในการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศต่อไป

2.6.3 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแผ่พลังงาน บีมวิดท์ โพลาริเซชัน ระดับของไซด์โลบ อัตราขยาย ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ ด้านสูงต่อความถี่ใช้งานด้านต่ำ ยกตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์ 10 : 1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานในด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ใช้งานด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศเป็น 5% ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

$$BW (\%) = \frac{f_u - f_l}{f_0} \times 100 \quad (2.57)$$

เมื่อ	BW	คือ ค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศ
	f_u	คือ ขอบเขตความถี่สูงของย่านความถี่
	f_l	คือ ขอบเขตความถี่ต่ำของย่านความถี่
	f_0	คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราขยาย รูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกล โพลาริเซชัน ฯลฯ ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงแต่อย่างเดียวได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของแพทเทิร์นกับอิมพีแดนซ์แบนด์กับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

2.6.4 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศนั้นเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไดเรกทิวิตีโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ไดเรกทิวิตีแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น การคิดค่าอัตราขยายของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิงโดยอัตราขยายของสายอากาศ คือกำลังสองของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด เมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่สูงสุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรืออาจจะแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสองเพื่อให้เกิดความเข้มของสนามขนาดเท่ากัน ณ จุดเดียวกันในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดหรืออัตราขยายของสายอากาศรับคือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลที่ยาว $\lambda/2$ หรือแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน

กำลังอัตราขยาย (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากหัวต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปแล้วจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.58)$$

โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของกำลังอัตราขยายในทิศทางที่กำหนดให้ต่อกำลังอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราขยายได้ง่าย หรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.59)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ดังสมการที่ (2.60)

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.60)$$

เมื่อ e_r คือประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้สมการที่ (2.59) และ (2.60) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (2.61)$$

และมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรคทีฟ คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_t D_g(\theta, \phi) \quad (2.62)$$

ในการทำงานเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี คือ

$$\begin{aligned} G_0 &= G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_t D_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_t D_0 \end{aligned} \quad (2.63)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะมีค่าเป็น

$$G_0 \cong \frac{30,000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2.64)$$

ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อกล่าวถึงอัตราขยายจะหมายถึง กำลังอัตราขยายที่มีค่าสูงสุดแสดงดังนี้

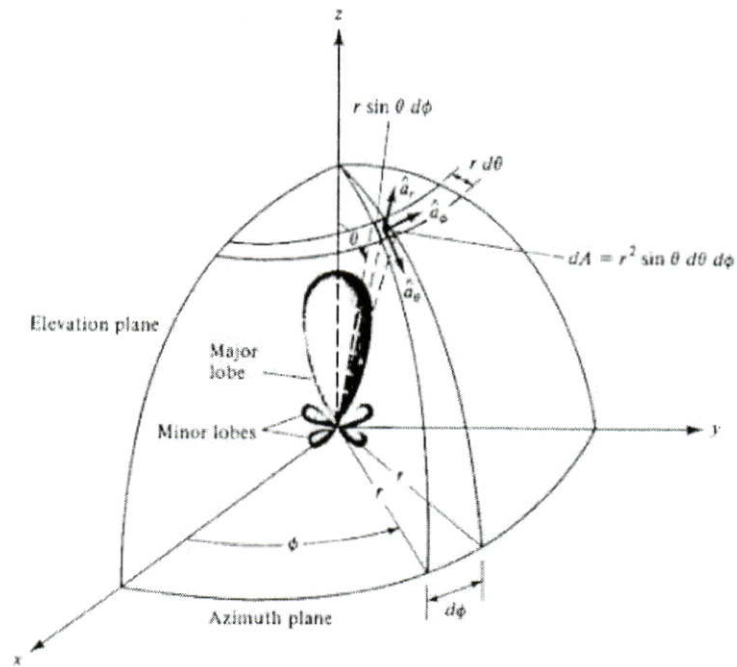
$$G_0 (dB) = 10 \log_{10} [e_t D_0] \quad (2.65)$$

2.6.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดในอากาศ (Space Coordinate) โดยส่วนใหญ่แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นนี้มักจะพิจารณาในบริเวณสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงรูปแบบของพลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่มีรัศมีคงที่

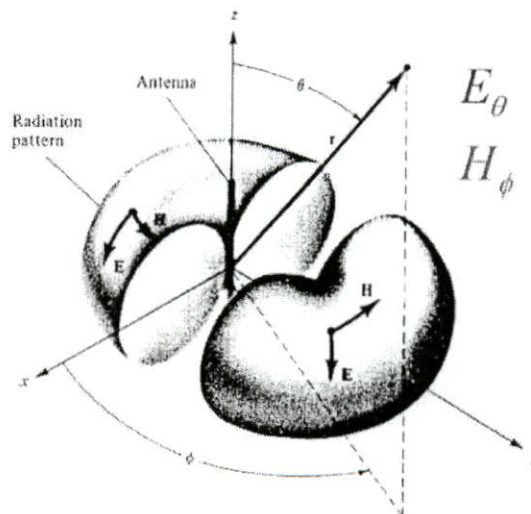
รูปที่ 2.17 แสดงระบบโคออดิเนต ที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น สำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่ เรียกว่าแบบรูปสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.17 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.6.5.1 แบบรูปแบบไอโซทรอปิก ไดรেকชันแนล และออมนิไดเรกชันแนล

ตัวแผ่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทางด้วยความเข้มสนามเท่ากัน โดยจะเป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างจริงได้ แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ



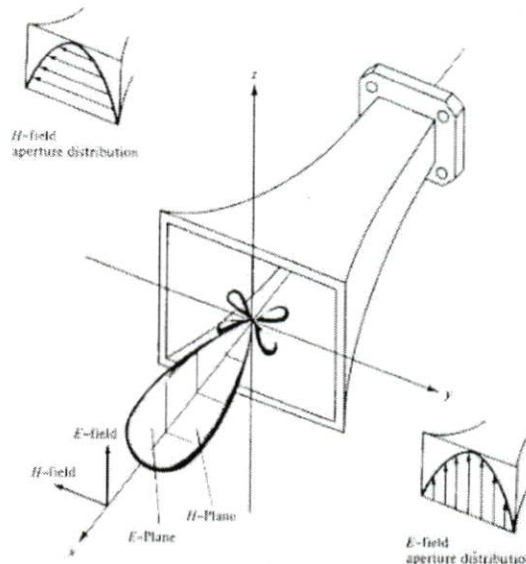
รูปที่ 2.18 แบบรูปของสายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล (Omni-directional)

สายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omni-directional Antenna) นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ส่วนสายอากาศแบบชี้ทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี โดยเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น

จากรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าแบบรูป แบบนี้ไม่มีทิศทางในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) [$f(\phi), \theta = \text{ค่าคงที่}$] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบมุมยก (Elevation Plane) [$g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}$]

2.6.5.2 แบบรูปหลัก (Principle Pattern)

โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปหลัก (Principle Pattern) ของสนามไฟฟ้า (Electric Field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) สำหรับสายอากาศแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly Polarization) แบบรูปในระนาบ E เป็นระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบ H จะเป็นระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปของการแผ่กระจายคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.19 โดยมีระนาบ xz (ระนาบมุมกวาด, $\phi = 0$) เป็นระนาบ E และมีระนาบ xy (ระนาบมุมยก, $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H



รูปที่ 2.19 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร (Horn Antenna)

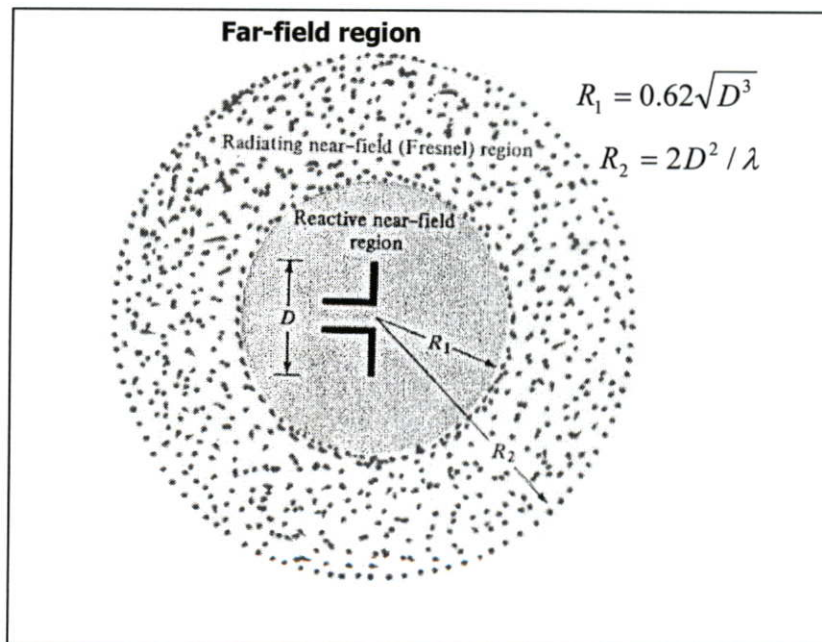
2.6.5.3 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟ (reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.20

บริเวณสนามรีแอกทีฟที่ระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และเป็นสนามชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟที่ระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่เป็นการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากสายอากาศ ถ้าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับ สนามในบริเวณนี้อาจจะไม่เกิดขึ้น ดังนั้นบริเวณขอบภายในของสนามนี้จะอยู่ที่ระยะทาง $R \geq 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ และขอบนอกอยู่ที่ระยะ $R < \frac{2D^2}{\lambda}$ โดยที่ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ นั่นคือ $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R < \frac{2D^2}{\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแผ่กระจายของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะห่างจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$ ห่างจากสายอากาศ ในบริเวณนี้ส่วนประกอบสนามโดยพื้นฐานจะมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแผ่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ จะไม่ขึ้นอยู่กับระยะรัศมีที่วัดได้ ขอบในของบริเวณดังกล่าวจะกลายเป็นระยะรัศมี คือ $R = \frac{2D^2}{\lambda}$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งบริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

2.7 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงรูปแบบพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสายอากาศและการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ทางวิศวกรรมสายอากาศ โดยทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าได้มีการรวบรวมโดย เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ โดยแมกซ์เวลล์ได้เสนอแนวคิดเรื่องกระแสดิสเพลซเมนต์ ซึ่งได้รับการยอมรับในเวลาต่อมาว่า อำนาจแม่เหล็กและอำนาจไฟฟ้าไม่ใช่สิ่งที่แยกจากกันได้ จึงสร้างชุดสมการแมกซ์เวลล์ขึ้นมา โดยปกติจะนำเสนอในลักษณะสมการดิฟเฟอเรนเชียล ดังต่อไปนี้

2.7.1 สมการแมกซ์เวลล์ในรูปดิฟเฟอเรนเชียล

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.66)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.67)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.68)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.69)$$

สมการ (2.66) มาจากกฎของฟาราเดย์ เป็นกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าที่กล่าวไว้ว่า ถ้าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านบ่วงเส้นลวดมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าเท่ากับอัตราการลดลงตามเวลาของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กนั้น

สมการ (2.67) มาจากกฎของแอมแปร์ แมกซ์เวลล์ได้เสนอให้รวมกระแสดิสเพลซเมนต์ ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

สมการ (2.68) และ (2.69) มาจากกฎของเกาส์ เป็นการอธิบายว่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต้นกำเนิดมาจากประจุไฟฟ้า ซึ่งมีได้จริงในทางกายภาพ ประจุแม่เหล็กนั้นไม่มีอยู่ในธรรมชาติและไม่สามารถสร้างขึ้นได้ เพราะฉะนั้นไดเวอร์เจนซ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะต้องเป็นศูนย์เสมอ ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปมักนำเสนอชุดสมการแมกซ์เวลล์เชิงความถี่ในลักษณะต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\vec{M} - j\omega\mu\vec{H} \quad (2.70)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} \quad (2.71)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (2.72)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \rho_m \quad (2.73)$$

เมื่อ	\vec{E}	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (volts/meter)
	\vec{H}	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (amperes/meter)
	\vec{D}	คือ ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า (coulombs/square meter)
	\vec{B}	คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (webers/square meter)
	\vec{J}	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (amperes/square meter)
	\vec{M}	คือ ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก (volts/square meter)
	ρ_e	คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (coulombs/cubic meter)
	ρ_m	คือ ความหนาแน่นประจุแม่เหล็ก (webers/cubic meter)

2.7.2 สมการแมกซ์เวลล์ในรูปอินทิกรัล

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{L} = - \int_s \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad (2.74)$$

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{L} = I + \int_s \frac{d\vec{D}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad (2.75)$$

$$\int_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_{vol.} \rho \cdot dv \quad (2.76)$$

$$\int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.77)$$

สมการ (2.74) มาจากกฎของฟาราเดย์ จะเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยในเทอมซ้ายมือ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ ค่าลบของการอินทิกรัลพื้นที่ผิวของสนามแม่เหล็ก \vec{B} ที่เปลี่ยนค่าตามเวลา คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็ก \vec{B} ผ่าน

สมการ (2.75) มาจากกฎของแอมป์จะเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า โดยในเทอมซ้ายมือ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรแบบปิด

สมการ (2.76) มาจากกฎของเกาส์ กล่าวคือ เส้นสนามไฟฟ้าที่พุ่งออกจากพื้นที่ผิวปิดใด ๆ จะมีค่าเท่ากับประจุไฟฟ้าที่ถูกล้อมอย่างมิดชิดโดยพื้นที่ผิวนั้น

สมการ (2.77) คือ การอินทิกรัลพื้นที่ผิวของสนามแม่เหล็ก \vec{B} คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็ก \vec{B} ไหลผ่านมีค่าเท่ากับศูนย์ และยังมีสมการที่บอกถึงลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางคือ

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.78)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.79)$$

โดย

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

เมื่อ

ϵ_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (relative permittivity)

μ_r คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (permeability)

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในอากาศว่าง (free space permittivity) มีค่า 8.854×10^{-12} หรือ ประมาณ $10^{-9} / 36\pi$ (farads per meter)

μ_0 คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กในอากาศว่าง (free space permeability) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (henries per meter)

2.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป พารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ รวมทั้งการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริป การแก้ปัญหาสมการแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านชุดสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ซึ่งสิ่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นความรู้พื้นฐานที่จำเป็นต้องเรียนรู้เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปสำหรับใช้งานย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) โดยเริ่มจากการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ตามที่ต้องการ กำหนดความกว้างของสายส่งสัญญาณและใช้ตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) มาช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นเพื่อรองรับการสื่อสารย่าน UWB และใช้คุณสมบัติของพารามิเตอร์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วไปใช้ในการปรับแต่งเพื่อช่วยในการทำแบนด์นอตช์ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบสายอากาศที่มีแบนด์นอตช์แต่ละรูปแบบจะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 3

สายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสาย ท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.1 บทนำ

สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ช่องเปิดจะถูกวางอยู่บนระนาบกราวด์ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นและมีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ทำหน้าที่ในการป้อนสัญญาณ การออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปร่างต่างๆ เช่น รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เส้นตรง รูปตัวยู (U-Shaped) รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปมุมแหลม ก็เพื่อรองรับการใช้งานที่มีหนึ่งความถี่ และสองความถี่ เช่น ย่านความถี่ที่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz เป็นต้น นอกจากนี้ ได้มีนักวิจัยนำเสนอบทความที่เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดโดยมีการป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปร่างต่างๆ เช่น รูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม วงกลม [10-17] เพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น สำหรับการสื่อสารที่ต้องการแบนด์วิดท์มากๆ เช่น การสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband: UWB) ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1-10.6 GHz ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่จำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D [29] การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศจะเริ่มต้นจากการศึกษาโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดกว้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และศึกษาสายอากาศแบบแพทช์ซึ่งมีระนาบกราวด์อยู่ด้านตรงข้าม จากนั้นศึกษาและวิเคราะห์ผลจากการรวมสายอากาศทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ซึ่งก็คือ สายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สุดท้ายจะทำการปรับแต่งสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้เป็นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างมากขึ้นรองรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ในการออกแบบสายอากาศผู้วิจัยจะทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวปรับแบบสายท่อนสั้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในลำดับถัดไป

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

การออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ สิ่งที่ต้องทำเป็นอันดับแรก คือ การเลือกชนิดของวัสดุฐานรอง (Substrate) เพื่อนำเอาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ มาใช้ในการคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) และความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ เป็นต้น การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศจะใช้โปรแกรม IE3D ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามลำดับดังนี้

การออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้วัสดุฐานรอง (Substrate) แบบ FR4 ซึ่งมีค่าคุณสมบัติดังนี้

- ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.5
- ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.02
- ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร
- ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง) σ เท่ากับ 5.8×10^7 s/m
- ค่าความหนาของวัสดุตัวนำ t เท่ากับ 0.017 มิลลิเมตร

การออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ มีพารามิเตอร์สำคัญที่เป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ คือ ความยาวโดยรอบของช่องเปิด การออกแบบสายอากาศในบนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศสำหรับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.6 GHz ดังนั้นการออกแบบเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ จะเริ่มจากการออกแบบความกว้างของไมโครสตริปไลน์ (W_m) โดยจะอ้างอิงกับความถี่ที่ออกแบบ ซึ่งความถี่ที่ออกแบบคือ 3 GHz สำหรับสมการในการหาค่าความกว้างของไมโครสตริปไลน์แสดงดังสมการที่ (3.1a)

$$\frac{W_m}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.1a)$$

โดยที่

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1b)$$

เมื่อ W_m คือ ความกว้างของไมโครสตริปไลน์

h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณโคแอกเซียล คือ 50 โอห์ม

เมื่อนำค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุฐานรองแทนลงไปในสมการที่ (3.1a) จะได้ความกว้างของไมโครสตริปไลน์ (W_m) ประมาณ 1.50 มิลลิเมตร สำหรับสายอากาศแบบช่องเปิดจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ความกว้างและความยาวของช่องเปิด ซึ่งมักจะใช้อ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) การคำนวณหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ จะต้องกำหนดความถี่ใช้งานของสายอากาศที่ต้องการออกแบบ คือ ออกแบบความถี่ที่ 3 GHz สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ แสดงดังสมการที่ (3.2a)-(3.2c)

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.2a)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3.2b)$$

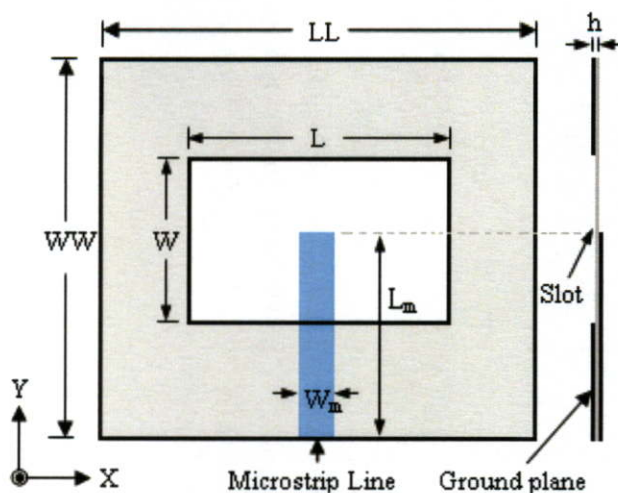
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_m} \right]^{-1/2} \quad (3.2c)$$

- เมื่อ λ_g คือ ความยาวคลื่นสัมพัทธ์
 c คือ ความเร็วของแสงในอากาศ ประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที
 f คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของวัสดุฐานรอง

การคำนวณหาความยาวคลื่นสัมพัทธ์ (λ_g) ของสายอากาศช่องเปิดที่กล่าวมานี้ จะได้ความยาวเท่ากับ 54.5 มิลลิเมตร ค่าที่คำนวณได้เบื้องต้นนี้จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบความกว้าง และความยาวของสายอากาศแบบช่องเปิด โดยที่โครงสร้าง และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศนี้ จะถูกกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

3.3 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์เป็นการศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศ เพื่อใช้ในการพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์วิดท์กว้าง ๆ โดยใช้เทคนิคต่างๆ ในการขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างเพื่อรองรับกับย่านความถี่ที่ต้องการนำไปใช้งาน ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศนี้ประกอบด้วย ช่องเปิดกว้างที่ตัดออกจากระนาบกราวด์ และในระนาบตรงข้ามเป็นสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ โครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศนี้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

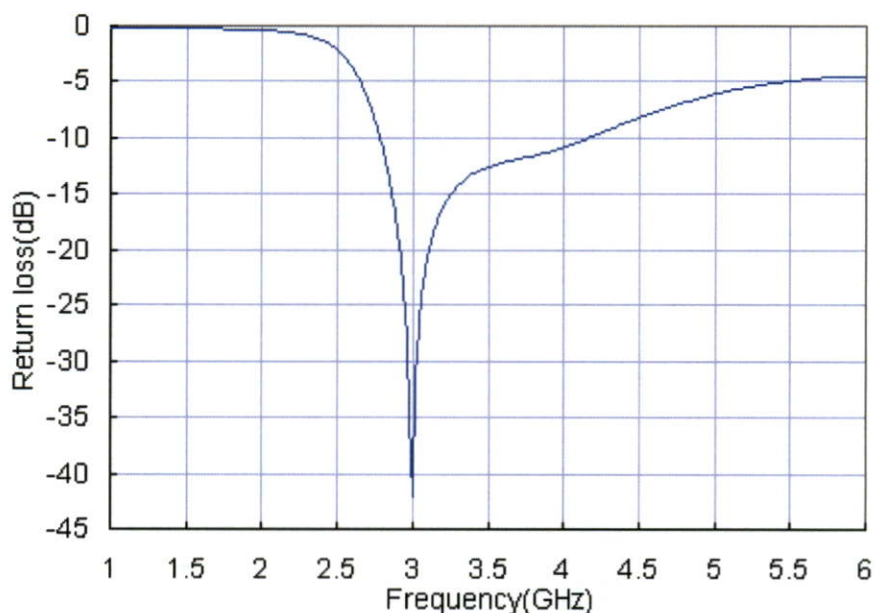
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

- L คือ ความยาวของช่องเปิด
- W คือ ความกว้างของช่องเปิด
- L_m คือ ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์
- W_m คือ ความกว้างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์
- h คือ ค่าความหนาของวัสดุฐานรอง

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ ในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบที่ความถี่ 3 GHz จากการคำนวณเบื้องต้นและทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ 3 GHz ค่าของพารามิเตอร์ที่ให้ผลที่ดีที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศแบบช่องเปิด
LL	33 มิลลิเมตร
WW	27 มิลลิเมตร
L	23 มิลลิเมตร
W	14 มิลลิเมตร
L_m	15 มิลลิเมตร
W_m	1.5 มิลลิเมตร
ϵ_r	4.5
h	0.8 มิลลิเมตร

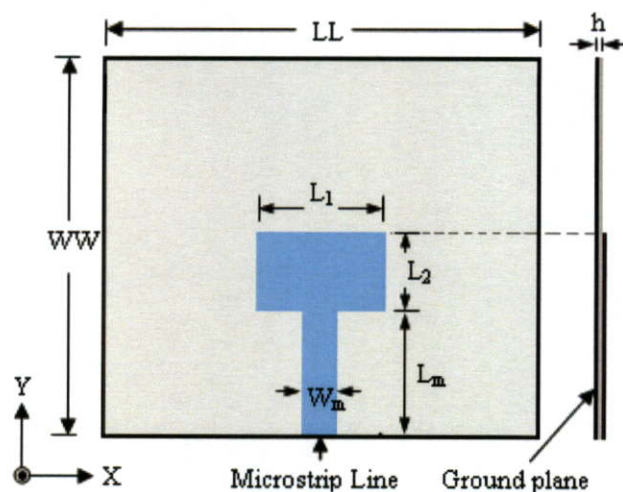


รูปที่ 3.2 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

รูปที่ 3.2 แสดงการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ -40.02 dB ที่ความถี่ 3.0 GHz และแบนด์วิดท์ เท่ากับ 1.36 GHz (2.8 - 4.16 GHz) จากคุณลักษณะของสายอากาศทำให้ทราบได้ว่า การปรับความกว้างและความยาว จะช่วยในการกำหนดความถี่และการปรับความยาวของสายส่งสัญญาณช่วยในการปรับแมทชิงที่ความถี่ที่ต้องการ

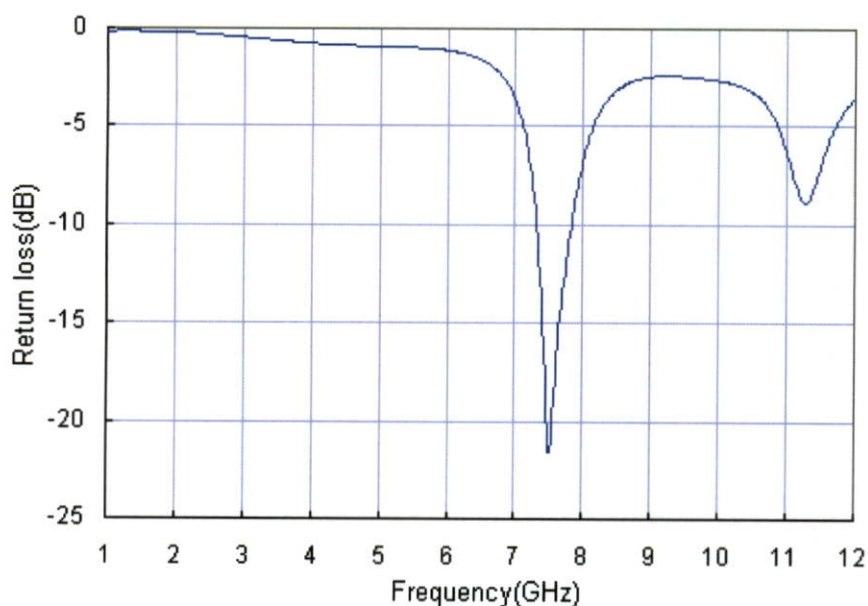
3.4 ผลการจำลองสายอากาศแบบแพทช์

ในหัวข้อนี้จะทำการออกแบบและศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแบบแพทช์ เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาสายอากาศร่วมกับสายอากาศช่องเปิด ซึ่งการออกแบบสายอากาศชนิดนี้ เป็นการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์ที่ความถี่ 7.5 GHz โดยมีความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) ของสายอากาศเท่ากับ 21.71 มิลลิเมตร โครงสร้างของสายอากาศนี้ประกอบด้วย ระบายกราวด์ และระนาบตรงข้ามเป็นสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีสายอากาศแบบแพทช์วางอยู่ที่ปลายของไมโครสตริปไลน์ โครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศนี้แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศ และจะนำสายอากาศนี้ไปปรับใช้ร่วมกับสายอากาศช่องเปิดเพื่อทำการวิเคราะห์ให้ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างมากๆ ซึ่งผลการจำลองจะแสดงในรูปที่ 3.4 และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นคือ ขนาดระนาบกราวด์และความกว้างไมโครสตริปไลน์เหมือนกับสายอากาศช่องเปิดที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ แสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศแบบแพทช์

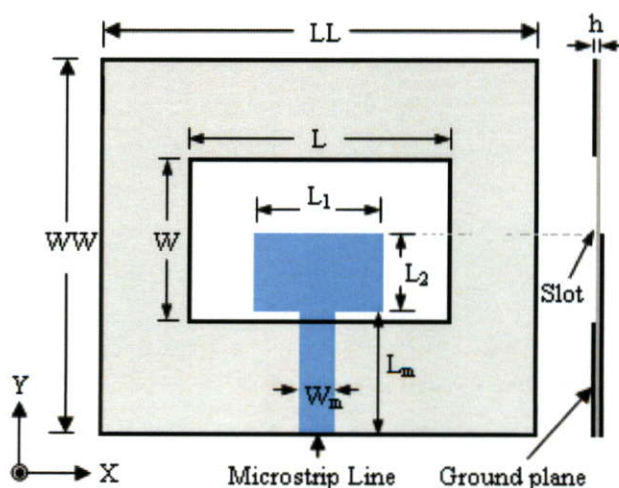
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศแบบแพทช์
L_1	18 มิลลิเมตร
L_2	9 มิลลิเมตร
L_m	13.5 มิลลิเมตร

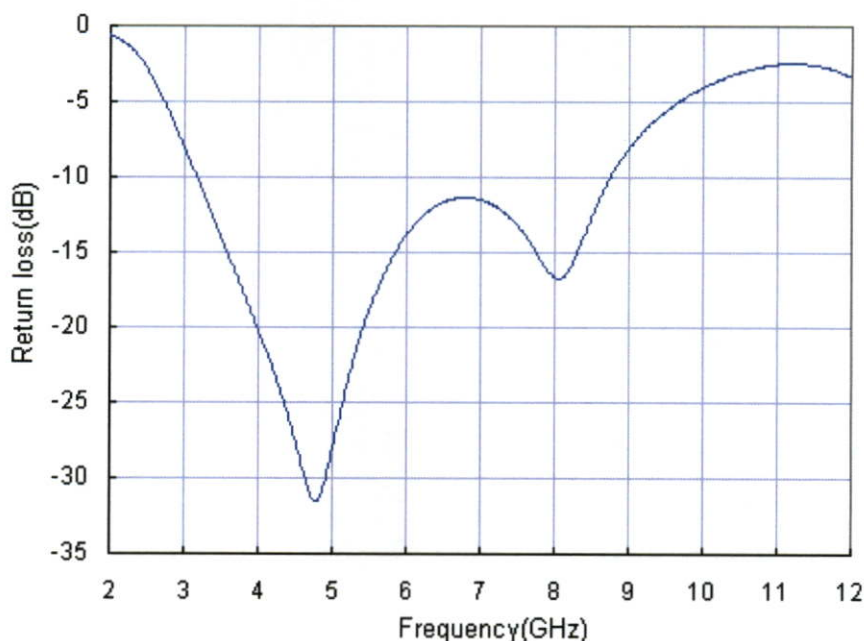
รูปที่ 3.4 แสดงการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแพทช์เท่ากับ -21.63 dB ที่ความถี่ 7.5 GHz และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 0.5 GHz (7.33 - 7.83 GHz) จากคุณลักษณะของสายอากาศนี้ทำให้ทราบได้ว่า การปรับความกว้างและความยาวจะช่วยให้การกำหนดความถี่และการปรับความยาวของสายส่งสัญญาณช่วยในการปรับแมทซิ่งที่ความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจำเป็นการนำสายอากาศแบบแพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้าไปรวมกับสายอากาศช่องเปิดเพื่อขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศให้กว้างขึ้น

3.5 ผลการจำลองสายอากาศแบบช่องเปิดร่วมกับแบบแพทช์

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศที่เป็นการรวมกันของสายอากาศช่องเปิดและสายอากาศแบบแพทช์ หรือเรียกว่า สายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นผู้วิจัยจะเรียกสายอากาศนี้ว่า สายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โครงสร้างของสายอากาศแบบนี้แสดงดังรูปที่ 3.5 และพารามิเตอร์ต่างๆ เบื้องต้นของสายอากาศแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 โดยความยาวของสายส่งสัญญาณ (L_m) จะถูกนำไปรวมกับความกว้างของแพทช์ (L_2) และให้มีความยาวเท่ากับความยาวของสายส่งสัญญาณของสายอากาศช่องเปิดในรูปที่ 3.1 คือ 15 มิลลิเมตร ดังนั้นความยาวของสายส่งสัญญาณ (L_m) ใหม่ตามรูปที่ 3.5 คือ 6 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดร่วมกับสายอากาศแบบแพทช์

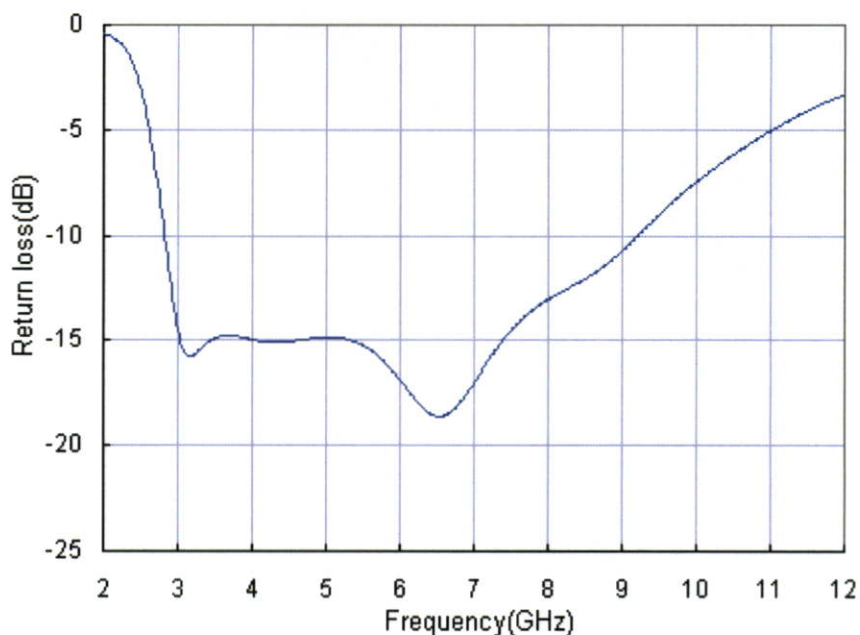


รูปที่ 3.6 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศแบบแพทช์ กรณียังไม่มีการปรับขนาดของสายท่อนสั้น (Stub)

รูปที่ 3.6 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศแบบแพทช์ หรือเรียกว่า สายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้นสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าแบนด์วิดท์กว้างมากขึ้น แต่ในช่วงความถี่สูงยังมีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ไม่ค่อยดี และแบนด์วิดท์ยังไม่สามารถครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ได้ จากการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศที่ผ่านมาทำให้ผู้วิจัยทราบว่า การปรับค่าความกว้างและความยาวของสายอากาศแพทช์ จะช่วยในการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่สูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อให้แมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่สูงให้ดีขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.7 และค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศนี้แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศแบบแพทช์

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ
LL	33 มิลลิเมตร
WW	27 มิลลิเมตร
L	23 มิลลิเมตร
W	14 มิลลิเมตร
L_1	12 มิลลิเมตร
L_2	8 มิลลิเมตร
L_m	6 มิลลิเมตร

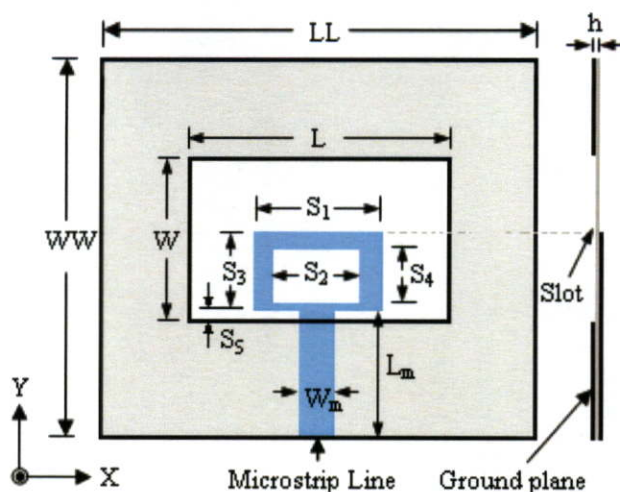


รูปที่ 3.7 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดรวมกับสายอากาศแบบแพทช์ กรณีมีการปรับขนาดของสายท่อนสั้น (Stub)

รูปที่ 3.7 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่ถูกนำไปรวมกับสายอากาศแบบแพทช์ (สายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า) จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่ามีผลการสูญเสียย้อนกลับที่ดีและมีแบนด์วิดท์กว้างมากเท่ากับ 6.4 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.81-9.21 GHz แต่ยังไม่สามารถครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างมาก ๆ ครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.6 ผลการจำลองสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ทำการออกแบบสายอากาศที่มีการรวมกันของสายอากาศแบบช่องเปิดและแบบแพทช์ (สายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า) แต่เนื่องจากในช่วงความถี่สูงยังมีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ไม่ค่อยดีและแบนด์วิดท์ยังไม่ครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนวคิดในการเจาะที่สายท่อนสั้นหรือส่วนที่เป็นแพทช์ให้เป็นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งจะช่วยขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างมาก ๆ ครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ได้ โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดมีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

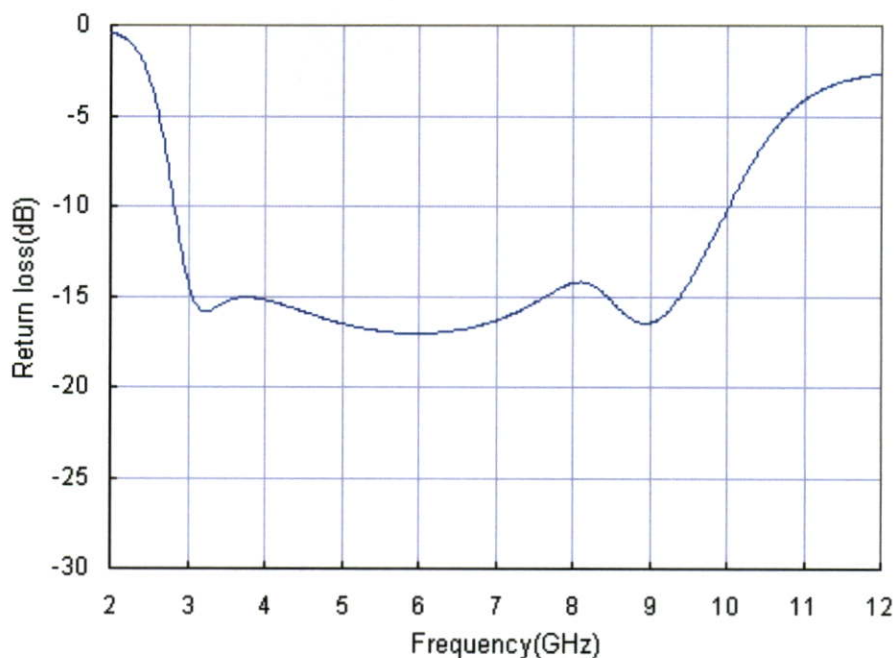
จากรูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นดังนี้

- S_1 คือ ความยาวขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน
- S_2 คือ ความยาวขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน
- S_3 คือ ความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง
- S_4 คือ ความกว้างขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง
- S_5 คือ ระยะระหว่างขอบกลางของสายท่อนสั้นกับขอบกลางของช่องเปิด

พารามิเตอร์ข้างต้นจะถูกใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศ โดยมีค่าแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พารามิเตอร์	ขนาดของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub)
S_1	12 มิลลิเมตร
S_2	8 มิลลิเมตร
S_3	8 มิลลิเมตร
S_4	4 มิลลิเมตร
S_5	1 มิลลิเมตร



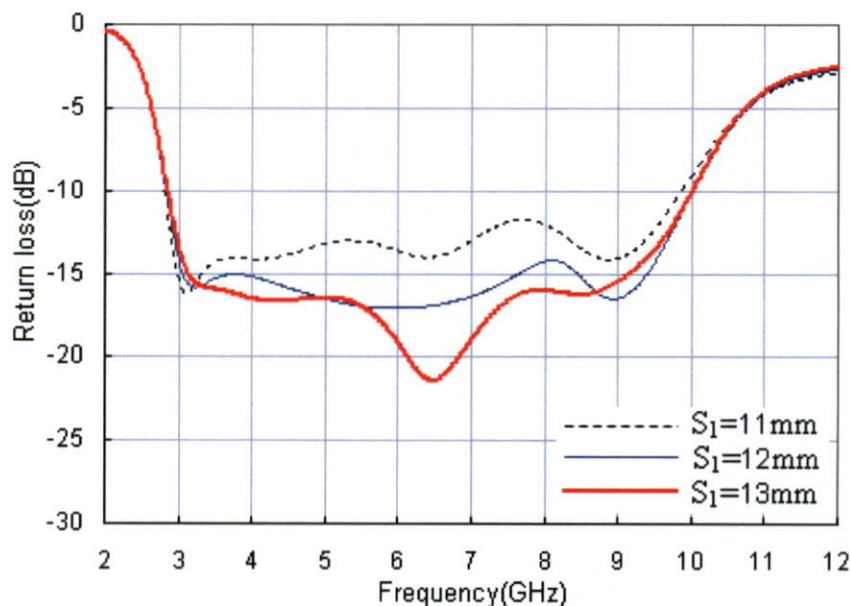
รูปที่ 3.9 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 3.9 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าสามารถปรับให้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ดีที่สุดที่ช่วงความถี่สูงได้ ทำให้มีแบนด์วิดท์มากขึ้นเท่ากับ 7.19 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.83-10.2 GHz อย่างไรก็ตาม สายอากาศที่นำเสนออยู่ยังไม่สามารถครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ได้ จากคุณสมบัติของตัวปรับแบบสายท่อนสั้นสามารถขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการศึกษาคูณลักษณะของตัวปรับแบบสายท่อนสั้นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าอย่างละเอียดเพื่อช่วยขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างขึ้นครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) โดยจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 ได้แก่ ความยาวระนาบกราวด์ (LL) ความกว้างระนาบกราวด์ (WW) ความกว้างช่องเปิด (W) ความยาวช่องเปิด (L) ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) จากนั้นจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์อื่น คือ ความยาวขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวอน (S_1) ความยาวขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวอน (S_2) ความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_3) ความกว้างขอบในของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) ตามแนวตั้ง (S_4) และระยะระหว่างขอบล่างของสายท่อนสั้นกับขอบล่างของช่องเปิด (S_5) เพื่อศึกษาคูณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.6.1 กรณีปรับความยาวขอบนอกของสายท่อนสั้น (Tuning stub) ตามแนวอน (S_1)

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาคูณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในกรณีแรกจะทำการศึกษาคูณลักษณะโดยการปรับความยาวของขอบนอกสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวอน (S_1) โดยจะกำหนดค่าพารามิเตอร์

เบื้องต้นให้มีค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ S_1 เท่ากับ 11 มิลลิเมตร 12 มิลลิเมตร และ 13 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองในการปรับค่าความยาวของขอบนอกสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_1) แสดงดังรูปที่ 3.10

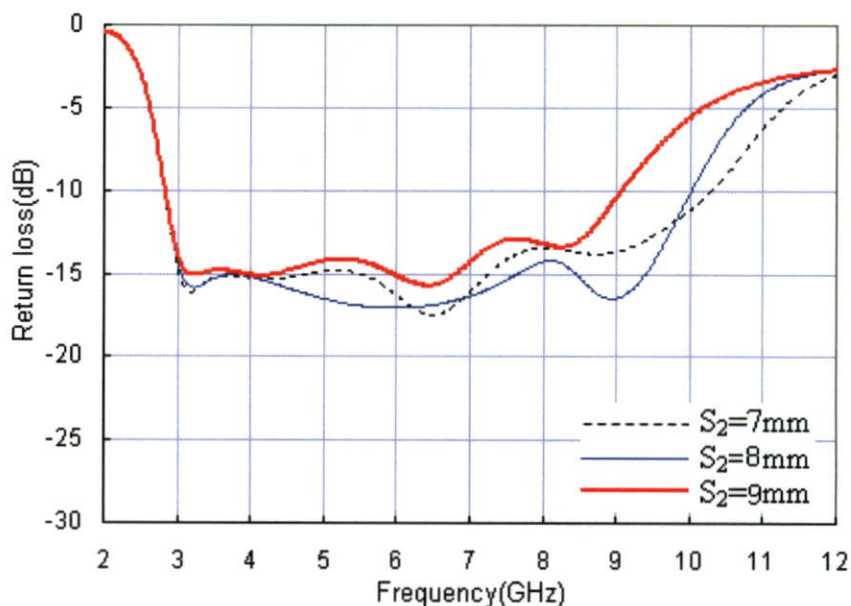


รูปที่ 3.10 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_1

รูปที่ 3.10 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ในกรณีปรับพารามิเตอร์ S_1 จากผลการจำลองที่ได้จากการปรับค่าความยาวของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_1) จะมีผลต่อแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่ โดยจะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.86-10 GHz โดยแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.14 GHz จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า การปรับค่าความยาวของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_1) จะช่วยในการปรับแมตซ์ซิ่งตลอดย่านความถี่ ดังนั้น จึงนำค่าความยาวของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอนที่มีผลดีที่สุดคือ S_1 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร ไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

3.6.2 กรณีปรับความยาวขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_2)

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาการปรับความยาวขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_2) โดยนำค่าพารามิเตอร์ S_1 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตาราง 3.4 มีค่าคงที่ ในกรณีนี้ จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ S_2 โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7 มิลลิเมตร 8 มิลลิเมตร และ 9 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.11

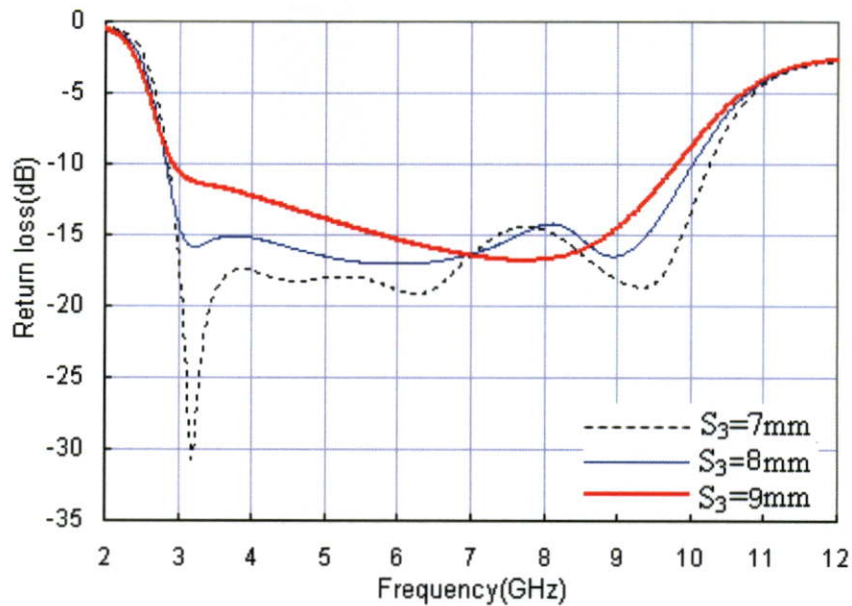


รูปที่ 3.11 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_2

รูปที่ 3.11 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีการปรับความยาวขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_2) จากผลการจำลองพบว่า การปรับค่าพารามิเตอร์ของ S_2 จะมีผลกระทบต่อการทำแมทซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่ โดยจะมีผลกระทบในช่วงความถี่สูงมากกว่า เมื่อลดความกว้างของพารามิเตอร์ S_2 จะทำให้แมทซ์ที่ความถี่สูงขึ้น และแบนด์วิดท์เพิ่มมากขึ้น และถ้าเพิ่มความยาวมากเกินไปจะทำให้แบนด์วิดท์ลดลง ดังนั้นผลที่ดีที่สุดจากการจำลองเมื่อปรับค่าความยาวของพารามิเตอร์ S_2 เท่ากับ 8 มิลลิเมตร จะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.86 ถึง 10 GHz และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.14 GHz ดังนั้นจะนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.6.3 กรณีปรับความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_3)

การปรับความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_3) โดยนำผลของค่าพารามิเตอร์ S_1 และ S_2 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งได้จากการจำลองที่ผ่านมา มาใช้วิเคราะห์โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ในตารางที่ 3.4 คงที่ และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ S_3 เท่ากับ 7 มิลลิเมตร 8 มิลลิเมตร และ 9 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.12

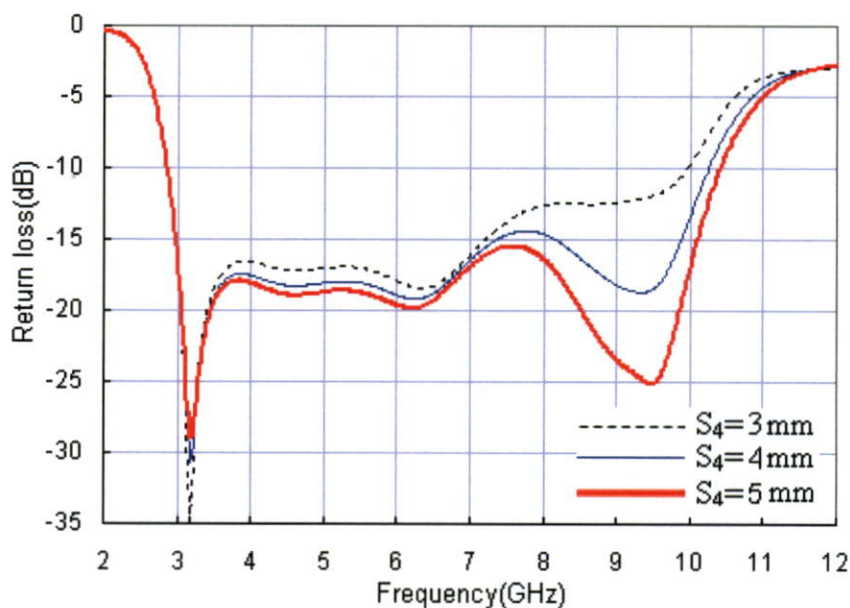


รูปที่ 3.12 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณี ปรับพารามิเตอร์ S_3

จากรูปที่ 3.12 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_3) ผลการจำลองทำให้ทราบได้ว่าการปรับความกว้างของพารามิเตอร์ (S_3) มีผลต่อตลอดย่านความถี่ เมื่อปรับความกว้างให้มากขึ้นจะทำให้การแมทซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่ดีขึ้น จากผลการจำลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ S_3 ที่ดีสุดมีค่าเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงนำค่านี้ไปใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ในหัวข้อถัดไป

3.6.4 กรณีปรับความกว้างขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_4)

การศึกษาผลกระทบเนื่องจากการปรับความกว้างขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_4) โดยนำผลที่ได้จากการจำลองที่ผ่านมาของพารามิเตอร์ S_1 , S_2 และ S_3 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร 8 มิลลิเมตร และ 7 มิลลิเมตร โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ในตารางที่ 3.4 คงที่ และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ S_4 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.13

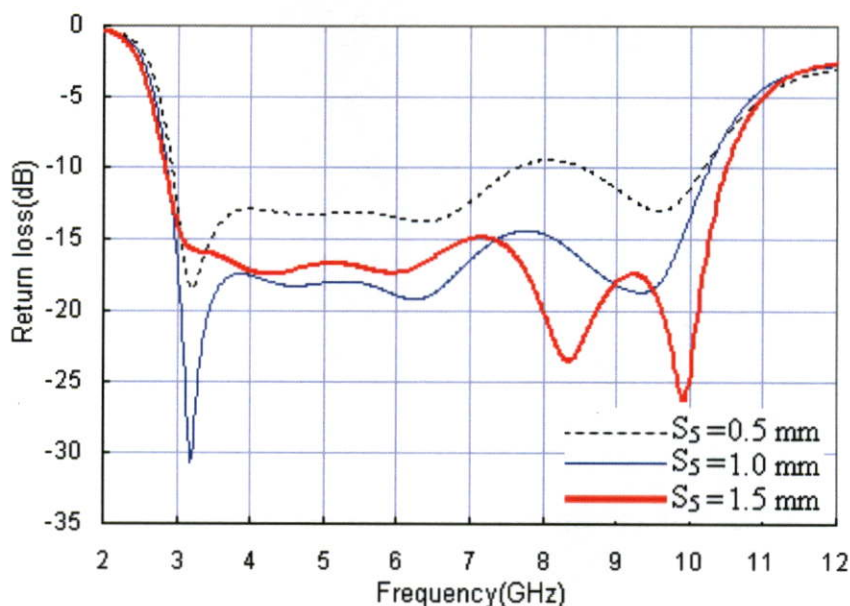


รูปที่ 3.13 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_4

รูปที่ 3.13 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีความกว้างขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_4) โดยทำการปรับทีละ 1 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 3 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร จากผลการจำลองทำให้ทราบว่า การปรับความกว้างขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_4) จะมีผลต่อการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูง และมีผลต่อการขยายแบนด์วิดท์ที่ความถี่สูงกล่าวคือ เมื่อปรับความกว้างให้มากขึ้นจะทำให้การแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูงดีขึ้นและทำให้แบนด์วิดท์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อปรับความกว้างให้ลดลงจะทำให้การแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูงลดลงและทำให้แบนด์วิดท์ลดลงเช่นกัน จากผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB จะมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.86-10.45 GHz มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.59 GHz และค่าที่พารามิเตอร์ S_4 ที่ดีที่สุดคือ 5 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

3.6.5 กรณีปรับระยะระหว่างขอบล่างของสายท่อนสั้นกับขอบล่างของช่องเปิด (S_5)

การศึกษาผลกระทบเนื่องการปรับระยะระหว่างขอบล่างของสายท่อนสั้นกับขอบล่างของช่องเปิด (S_5) โดยนำผลของค่าพารามิเตอร์ S_1 , S_2 , S_3 , และ S_4 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร 8 มิลลิเมตร 7 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งได้จากการจำลองที่ผ่านมา และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ S_5 เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_5

รูปที่ 3.14 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_5 โดยทำการปรับที่ละ 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 1.5 มิลลิเมตร จากผลการจำลองเมื่อปรับพารามิเตอร์ S_4 จะมีผลต่อการแมทซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่ และมีผลต่อการขยายแบนด์วิดท์กล่าวคือ เมื่อปรับระยะระหว่างขอบล่างของสายท่อนสั้นกับขอบล่างของช่องเปิด (S_5) ให้มากขึ้นจะทำให้การแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูงสุดดีขึ้น พร้อมกับทำให้แบนด์วิดท์กว้างมากขึ้น และเมื่อปรับค่าให้ลดลง จะทำให้การแมทซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่แย่ลง พร้อมกันนั้นก็ทำให้แบนด์วิดท์ลดลง ซึ่งค่าเหมาะสมของพารามิเตอร์ S_5 คือ 1 มิลลิเมตร

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า พอจะกล่าวสรุปได้ดังนี้ การปรับค่าความยาวขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_1) จะมีผลต่อการแมทซ์อิมพีแดนซ์ตลอดทั้งย่านความถี่ การปรับค่าความยาวขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_2) จะมีผลกระทบต่อแบนด์วิดท์และจะมีผลต่อการแมทซ์อิมพีแดนซ์เล็กน้อย การปรับค่าความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง (S_3) จะมีผลกระทบต่อแบนด์วิดท์ และมีผลต่อแบนด์วิดท์ด้วยแต่ไม่มากนัก การปรับค่าความกว้างขอบในของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวนอน (S_4) จะมีผลกระทบบกับการแมทซ์อิมพีแดนซ์ความถี่ด้านสูง และมีผลต่อแบนด์วิดท์เล็กน้อย และผลจากการปรับระยะระหว่างขอบล่างของสายท่อนสั้นกับขอบล่างของช่องเปิด (S_5) จะมีผลกระทบบกับการแมทซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่ และกระทบต่อการความกว้างแบนด์วิดท์เล็กน้อย

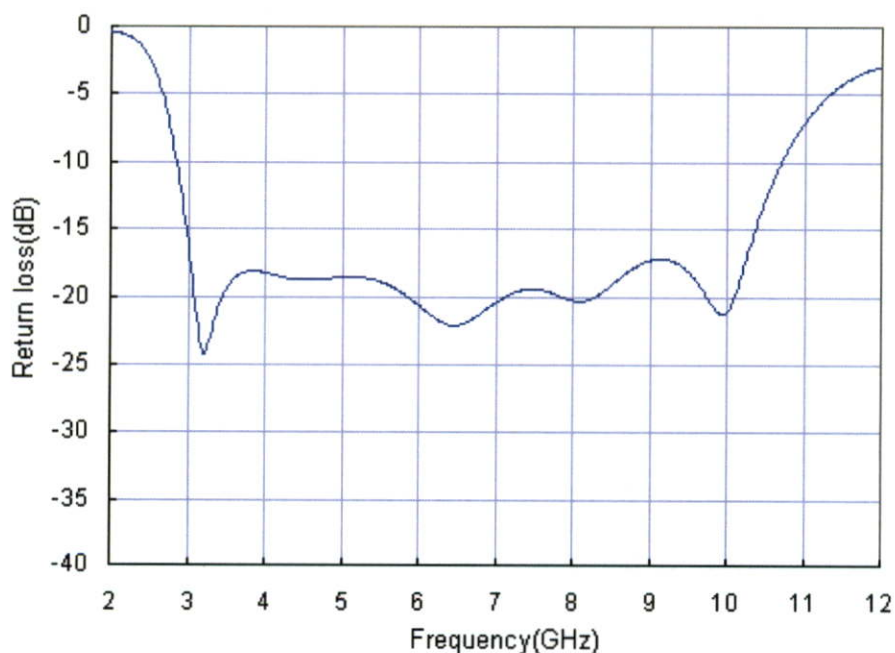
3.6.6 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำคุณลักษณะของพารามิเตอร์แต่ละตัวของตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) มาทำการปรับให้ได้ผลที่ดีที่สุด เพื่อรองรับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) และ

นำผลที่ได้ไปทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบเพื่อที่จะนำไปใช้งานจริง ซึ่งการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) จะต้องต่ำกว่า -15 dB เพื่อรองรับกับผลกระทบจากการสร้างสายอากาศต้นแบบและหัวต่อสาย (Connector) ที่ต่อเข้ากับสายอากาศ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของค่าพารามิเตอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.5 และผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แสดงในรูปที่ 3.15

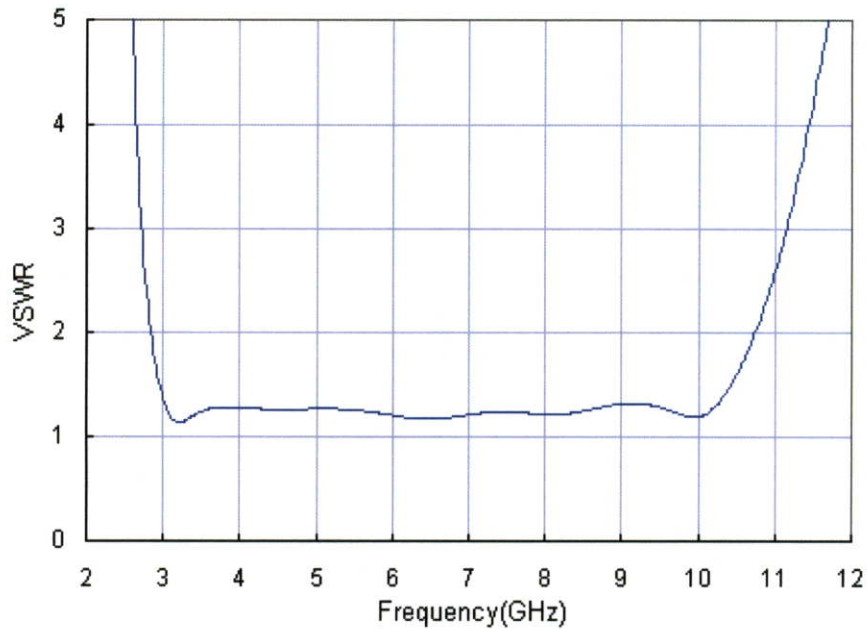
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศแบบช่องเปิด
L	23 มิลลิเมตร
W	14 มิลลิเมตร
S_1	12 มิลลิเมตร
S_2	8 มิลลิเมตร
S_3	7.65 มิลลิเมตร
S_4	5.65 มิลลิเมตร
S_5	0.5 มิลลิเมตร
L_m	5.55 มิลลิเมตร
W_m	1.5 มิลลิเมตร
ϵ_r	4.5
h	0.8 มิลลิเมตร

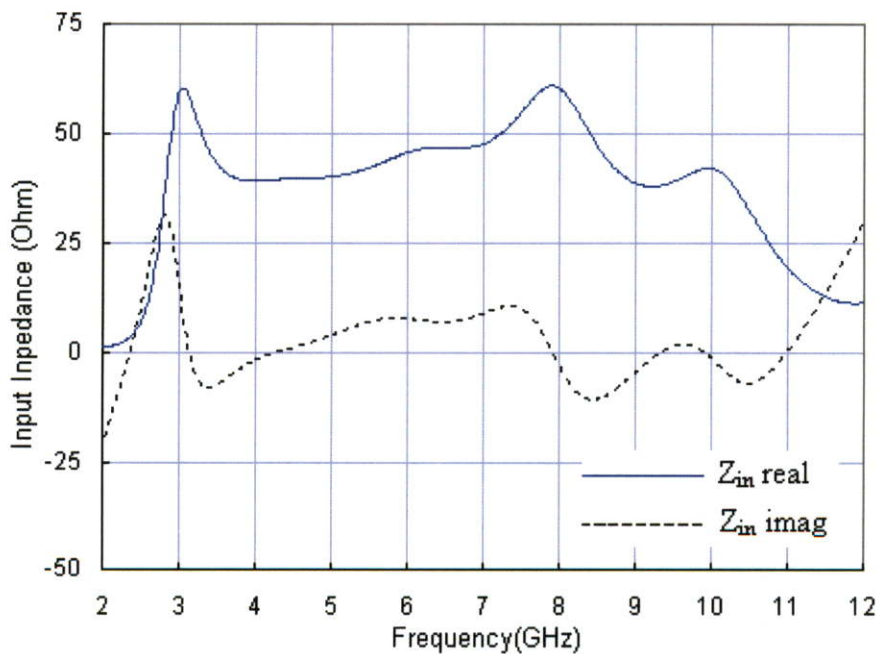


รูปที่ 3.15 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยั้งที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

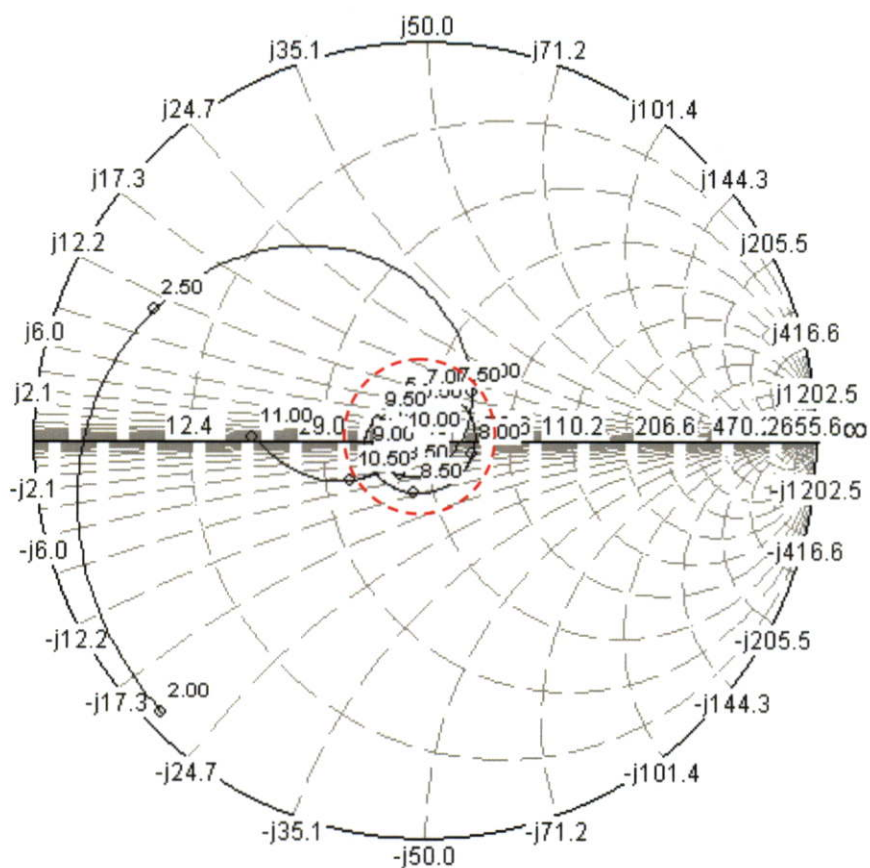
รูปที่ 3.15 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่ามีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.84 GHz ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.86 – 10.70 GHz ทำให้สายอากาศที่นำเสนอมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ดังนั้นสายอากาศนี้สามารถนำไปใช้งานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวดได้



รูปที่ 3.16 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

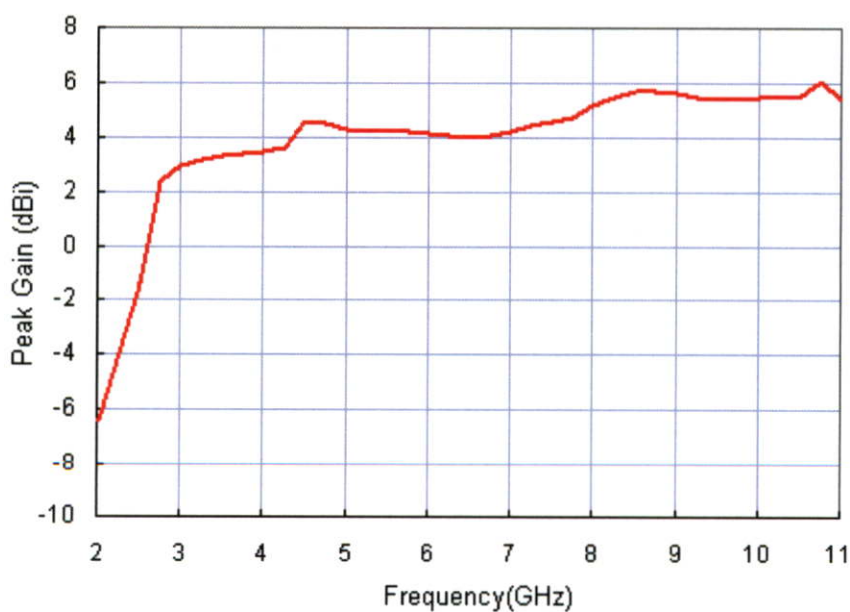


(ก) อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงและจินตภาพ



(ข) อินพุตอิมพีแดนซ์ในรูปแผนภูมิสมิท (Smith chart)

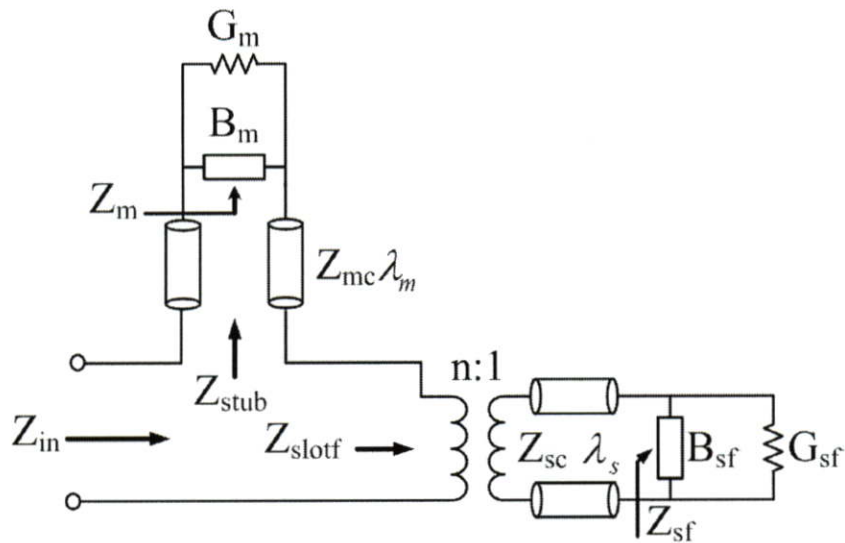
รูปที่ 3.17 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 3.18 อัตราขยายของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 3.16 แสดงอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) จากกราฟจะเห็นว่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.86-10.7 GHz จะมีค่าต่ำกว่า 2 รูปที่ 3.17 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมจริงและจินตภาพ และอินพุตอิมพีแดนซ์ในรูปแผนภูมิสมิท (Smith chart) จากกราฟจะเห็นว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียง 50 โอห์ม และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.84 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.86-10.7 GHz และรูปที่ 3.18 แสดงอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning Stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.5 – 11 GHz ซึ่งผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศจะอยู่ที่ช่วง -1.7-6 dBi และอัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ยอยู่ที่ 4 dBi

3.7 วงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance: Z_{in}) ของสายอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

$$Z_{in} = Z_{stub} + Z_{slotf} \quad (3.3)$$

เมื่อ

Z_{stub} คือ อิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศไมโครสตริปที่ต่อแบบปลายเปิดแสดงดังสมการที่ (3.4)

$$Z_{stub} = Z_{mc} \left\{ \frac{Z_m + jZ_{mc} \tan(\beta\lambda_m)}{Z_{mc} + jZ_m \tan(\beta\lambda_m)} \right\} \quad (3.4)$$

- เมื่อ λ_m คือ ความยาวของสายส่งไมโครสตริป
 Z_{mc} คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป
 Z_m คือ อิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ปลายเปิดของสายส่งไมโครสตริป
 Z_{slot} คือ อิมพีแดนซ์ของช่องเปิดที่ความถี่ที่ออกแบบ (f) แสดงดังสมการที่ (3.5)

$$Z_{slotf} = n^2 Z_s \quad (3.5)$$

โดยที่

$$Z_s = 1/Y_s = 1/(G_s + jB_s) \quad (3.6)$$

และ

$$G_s = \frac{2P}{V_0^2} \quad (3.7)$$

$$B_s = -\frac{2}{Z_{sc}} \cot(k_s L'_s / 2) \quad (3.8)$$

และ

$$n \cong \sqrt{\frac{Z_{mc}}{Z_{sc}}} \quad (3.9)$$

- เมื่อ G_s คือ ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของช่องเปิด (Conductance)
 B_s คือ ค่าซัสเซ็ปแตนซ์ของช่องเปิด (Susceptance)
 n คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Turn ratio)
 P_s คือ กำลังงานที่แพร่กระจายจากช่องเปิด
 k_s คือ ค่าตัวเลขคลื่น (Wave Number)
 L'_s คือ ความยาวสัมพันธ์ของช่องเปิด
 Z_{sc} คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของช่องเปิด

3.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband) ผู้วิจัยได้นำเสนอรายละเอียดขั้นตอนในการออกแบบและผลการจำลองเพื่อศึกษาคูณลักษณะของสายอากาศ โดยเริ่มวิเคราะห์จากสายอากาศช่องเปิดวงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ สายอากาศแบบแพทช์ สายอากาศช่องเปิดกับแบบแพทช์รวมกัน (สายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้นสี่เหลี่ยมผืนผ้า) และสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้กว้างมากๆ รองรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด ซึ่งผลการจำลองของสายอากาศได้แบนด์วิดท์เท่ากับ 7.84 GHz ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.86 GHz ถึง 10.70 GHz รองรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband) และมีอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศเท่ากับ 4 dBi

บทที่ 4

การออกแบบแบนด์นอตช์สำหรับสายอากาศช่องเปิด แบบแถบกว้างยิ่งยวด

4.1 บทนำ

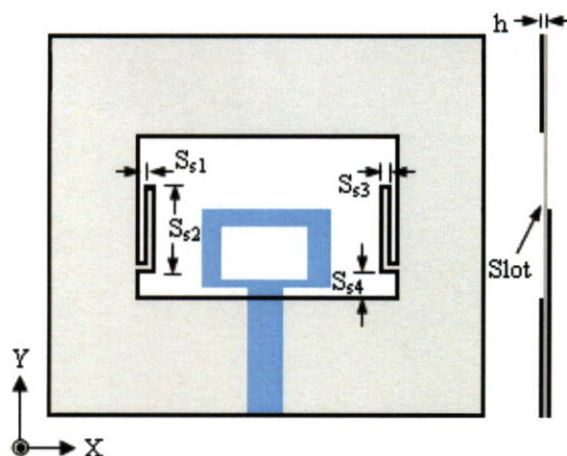
ปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายมีการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g (2.4 -2.4835 GHz), IEEE 802.11j (4.9-5.091 GHz), IEEE 802.11a (5.15-5.35 GHz, 5.725-5.825 GHz) ระบบไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access: WiMAX) ตามมาตรฐาน IEEE 802.16 (2.5-2.7 GHz, 3.4-3.69 GHz, 5.47-5.825 GHz) และการสื่อสารย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ตามมาตรฐานที่กำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสาร (Federal Communications Commission: FCC) แห่งอเมริกา (3.1-10.60 GHz) ซึ่งมีจุดเด่นคือ มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูง และแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่ได้ออกแบบและพัฒนาสายอากาศหลายๆ รูปร่างเพื่อใช้งานในย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) แต่เนื่องจากบางแถบความถี่ตามมาตรฐานของ WLAN และ WiMAX ทับซ้อนกับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบสายอากาศเพื่อลดการสอดแทรกของแถบความถี่ดังกล่าวออกไป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยว (Single band-notched) โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) เพื่อกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ออก ทำให้ลดการสอดแทรกของสัญญาณที่แทรกเข้ามาในย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) และนำเสนอเทคนิคการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์และการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ (Dual band-notched) โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) ร่วมกัน เพื่อกรองแถบความถี่ 3.4-3.7 GHz และ 5-6 GHz ออก ซึ่งเป็นย่านความถี่ใน WLAN และ WiMAX พร้อมทั้งนำเสนอเทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์และการขยายแบนด์วิดท์ของสองแบนด์นอตช์

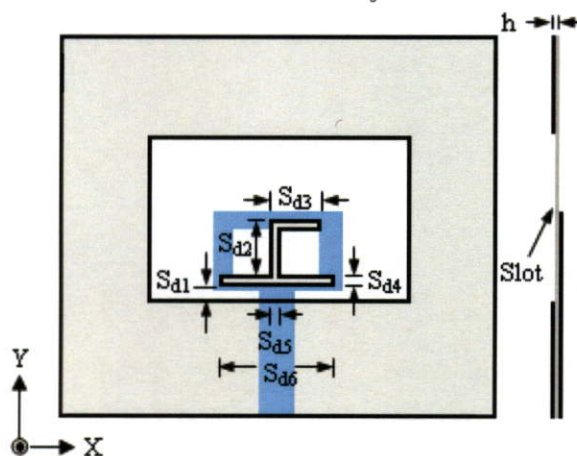
4.2 การออกแบบแบนด์นอตช์เดี่ยวที่มีการกรองแถบความถี่ 5-6 GHz

4.2.1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยว

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์นี้ ผู้วิจัยได้นำสายอากาศสำหรับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 มาใช้ในการพัฒนาต่อ โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ (Parasitic element) แทรกลงในช่องเปิดของสายอากาศ พาราซิติกอิลิเมนต์ที่ใช้มี 2 รูปร่างคือ รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) ทั้งสองพาราซิติกอิลิเมนต์สามารถทำให้เกิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่แถบความถี่ 5-6 GHz ได้เหมือนกัน โครงสร้างของสายอากาศแบนด์นอตช์เดี่ยวแสดงในรูปที่ 4.1



(ก) พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล



(ข) พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ

รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยว

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ 2 รูปแบบคือ รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองแถบความถี่ช่วง 5-6 GHz ออก ซึ่งการออกแบบแต่ละรูปแบบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

เนื่องจากขนาดของสายอากาศซึ่งเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นหรือรับคลื่นจะอ้างอิงกับความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง (λ_g) และครึ่งหนึ่งของความยาวเส้นรอบรูปของสายอากาศแคบ โดยประมาณมักจะอ้างอิงกับ $\lambda_g/2$, $3\lambda_g/2$, $5\lambda_g/2$... โดยปกติจะออกแบบให้สายอากาศสั้นที่สุดคือ $\lambda_g/2$ แต่ถ้าเป็นสายอากาศที่มีความกว้างก็ต้องนำเอาความกว้างมาชดเชยด้วย ในที่นี้พาราซิติกอิลิเมนต์ที่แทรกเข้ามาเป็นเสมือนสายอากาศที่มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่แม่นยำ ๆ ดังนั้นครึ่งหนึ่งของเส้นรอบรูปของพาราซิติกอิลิเมนต์จึงควรอ้างอิงกับ $\lambda_g/4$, $3\lambda_g/4$, $5\lambda_g/4$... ซึ่งในที่นี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการจำลองที่ความถี่ต่าง ๆ ทำให้สามารถนำมาเขียนเป็นสมการหาขนาดของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจและรูปตัวแอลที่ความถี่ 5.5 GHz ได้ โดยมีสมการของเส้นรอบรูปดังสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2 ตามลำดับ

ครึ่งหนึ่งของเส้นรอบรูปตัวแอล (H_{TL}):

$$[(S_{s1}+S_{s3})+S_{s2}+S_{s3}+(S_{s2}-S_{s3})+S_{s1}+S_{s3}]/2 \approx \lambda_g/4 + S_0$$

นั่นคือ
$$S_{s1} + S_{s2} + S_{s3} \approx \lambda_g/4 + S_0 \quad (4.1)$$

ครึ่งหนึ่งของเส้นรอบรูปตัวเจ (H_{TJ}):

$$[S_{d2}+S_{d3}+S_{d4}+(S_{d3}-S_{d5})+(S_{d2}-S_{d4}) \\ +(S_{d6}/2-S_{d5}/2)+S_{d4}+S_{d6}+S_{d4}+(S_{d6}/2-S_{d5}/2)]/2 \approx 3\lambda_g/4 + S_0$$

$$S_{d2}+S_{d3}+S_{d4}-S_{d5}+S_{d6} \approx 3\lambda_g/4 + S_0 \quad (4.2)$$

เมื่อ

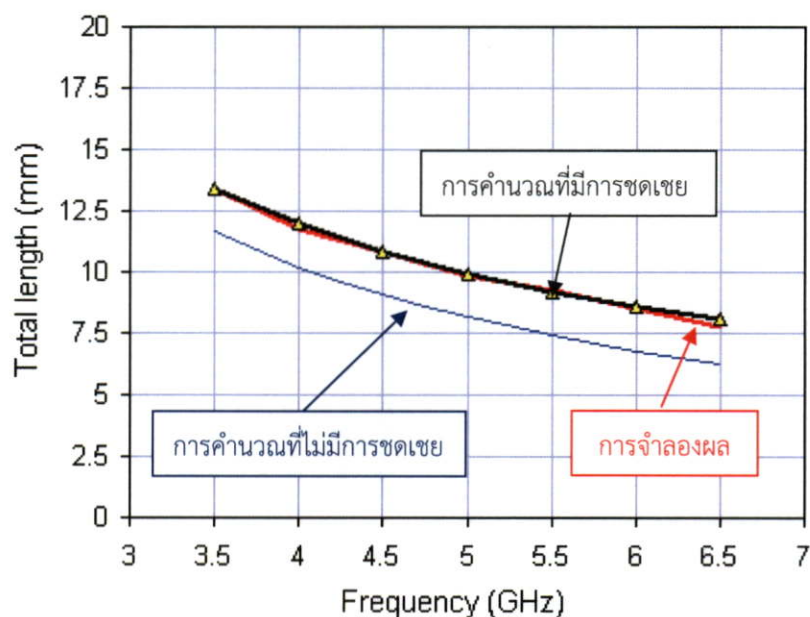
$$\lambda_g = \frac{c}{f_{notch} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.3)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_m} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

- โดยที่ λ_g คือ ความยาวคลื่นสัมพันธ์
- c คือ ความเร็วของแสงในอากาศ ประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที
- f_{notch} คือ ความถี่แบนด์นอตช์
- ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
- ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิภาพผลของวัสดุฐานรอง
- W_m คือ ความกว้างของไมโครสตริปไลน์
- h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง
- S_0 คือ ค่าขีดเขยคงที่ เท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร
- S_{s1} คือ ระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง
- S_{s2} คือ ความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล
- S_{s3} คือ ความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล
- S_{s4} คือ ระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านล่าง
- S_{d1} คือ ระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจกับระนาบกราวด์ด้านล่าง
- S_{d2} คือ ความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง
- S_{d3} คือ ความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านบน
- S_{d4} คือ ความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอน
- S_{d5} คือ ความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง
- S_{d6} คือ ความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านล่าง

เนื่องจากพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลจะต้องถูกนำไปใช้ในการสร้างแบนด์นอตช์ที่ 3.5 GHz ด้วย

ดังนั้นจึงนำสมการที่ 4.1 ไปใช้ในการคำนวณหาความยาวครึ่งรอบรูปของรูปตัวแอลที่ความถี่ต่าง ๆ และนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองผลดังแสดงในกราฟตามรูปที่ 4.2

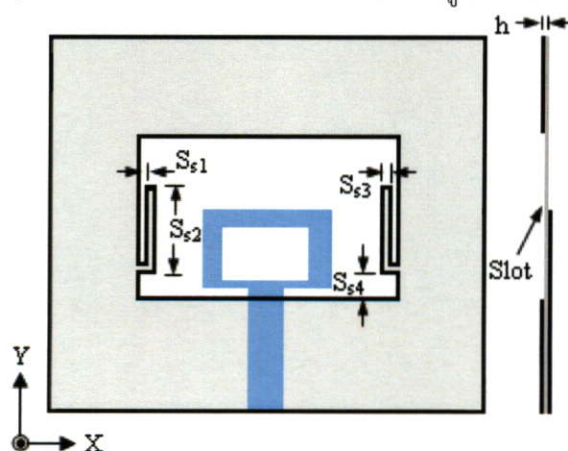


รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่คำนวณและค่าที่ได้จากการจำลองผลของความยาวครึ่งรอบรูปของพาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอิเลเมนต์แต่ละรูปแบบจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวและแบนด์นอตช์คู่หรือสองแบนด์นอตช์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

โครงสร้างของการออกแบบสายอากาศแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยการแทรกพาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) ลงในช่องเปิดของสายอากาศ แสดงในรูปที่ 4.3

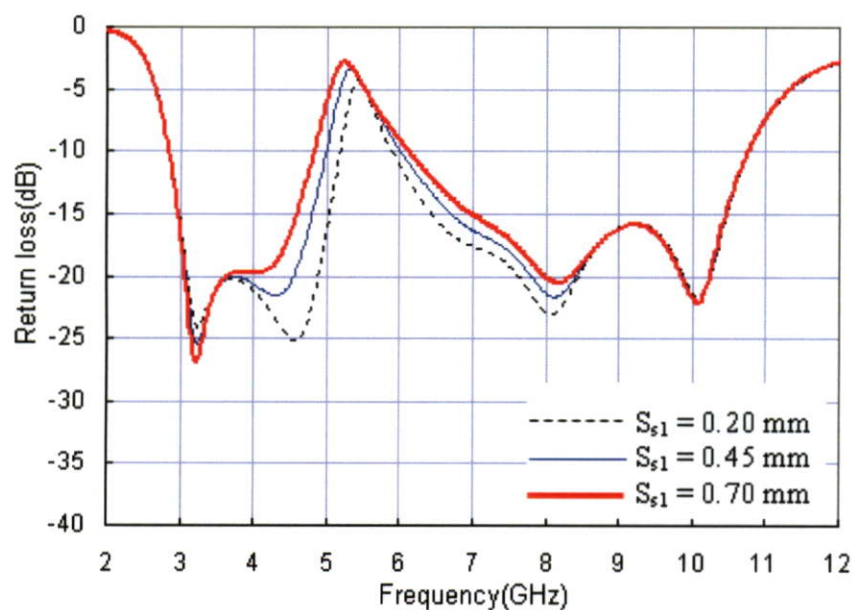


รูปที่ 4.3 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) ขนาดของสายอากาศช่องเปิดจะมีค่าเดียวกันกับที่ถูกกำหนดไว้ในตารางที่ 3.5 และพารามิเตอร์ของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) ที่จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการปรับค่า มีทั้งหมด 4 ตัว คือ S_{s1} S_{s2} S_{s3} และ S_{s4} ซึ่งผลกระทบดังกล่าวจะมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1 ผลกระทบจากระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง (S_{s1})

การศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง (S_{s1}) โดยกำหนดให้ความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s2}) ความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s3}) และระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ (S_{s4}) คงที่เท่ากับ 8.3 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และทำการปรับพารามิเตอร์ S_{s1} เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร 0.45 มิลลิเมตร และ 0.7 มิลลิเมตร ซึ่งผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ S_{s1} แสดงในรูปที่ 4.4

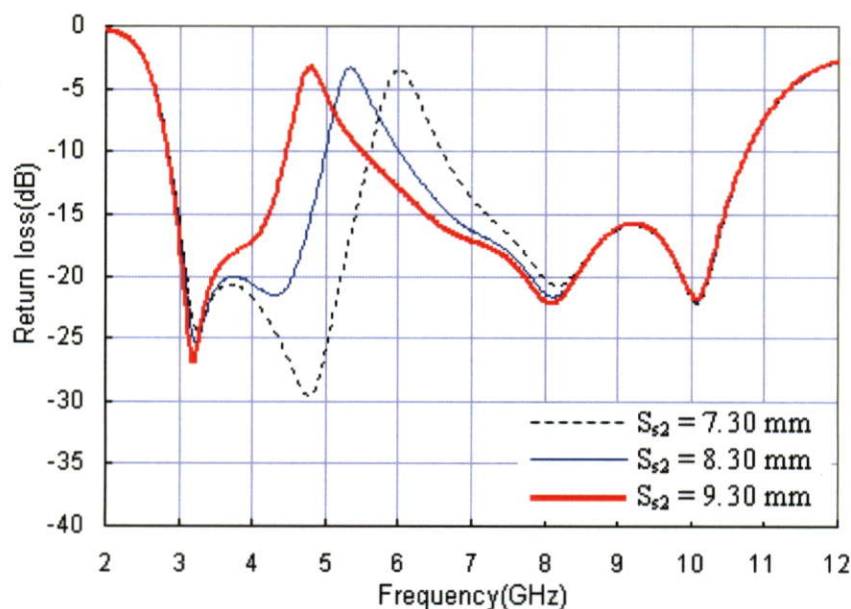


รูปที่ 4.4 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง (S_{s1})

จากรูปที่ 4.4 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{s1} จากผลการจำลองเมื่อปรับพารามิเตอร์ S_{s1} มากขึ้น จะทำให้ความกว้างของนอตซ์ที่ความถี่ด้านต่ำเพิ่มมากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่ง เมื่อปรับพารามิเตอร์ S_{s1} ให้น้อยลง จะทำให้ความกว้างของนอตซ์ลดลงเช่นกัน ดังนั้นการปรับพารามิเตอร์ S_{s1} จะช่วยในการลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ และระยะระหว่างพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง (S_{s1}) ที่ทำให้แบนด์วิดท์ของนอตซ์อยู่ในช่วง 5-6 GHz คือ 0.45 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

4.2.2.2 ผลกระทบจากการปรับความยาวของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s2})

การปรับความยาวของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s2}) โดยนำค่าระยะระหว่างพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง (S_{s1}) เท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นๆ ที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วคงที่ และทำการปรับพารามิเตอร์ S_{s2} เท่ากับ 7.3 มิลลิเมตร 8.3 มิลลิเมตร และ 9.3 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลกระทบ ซึ่งผลการจำลองจะแสดงในรูปที่ 4.5

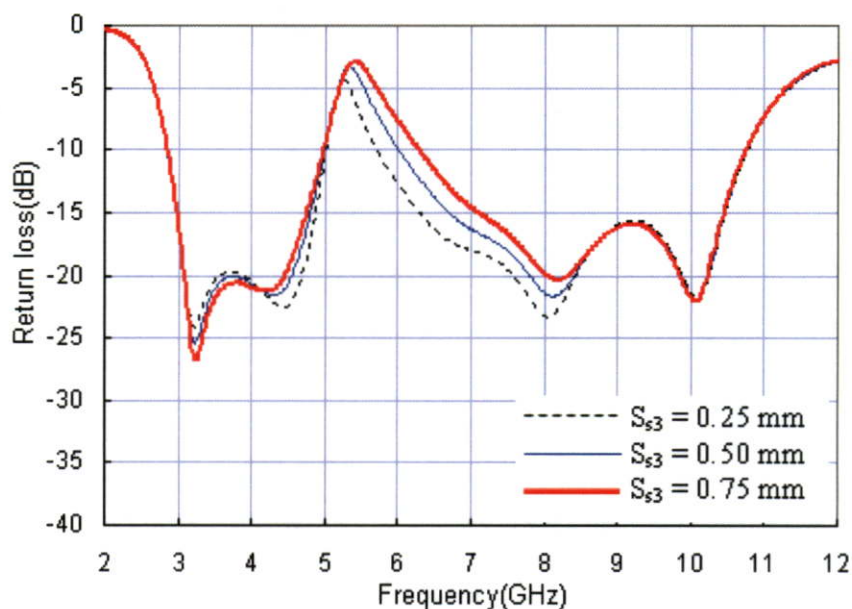


รูปที่ 4.5 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความยาวของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s2})

จากรูปที่ 4.5 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{s2} จากผลการจำลอง เมื่อปรับค่าความยาวของ S_{s2} ให้มากขึ้นแบนด์นอตช์จะถูกเลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับค่า S_{s2} ให้น้อยลงจะทำให้แบนด์นอตช์ถูกเลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้นการปรับค่า S_{s2} จะช่วยในการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ และค่าพารามิเตอร์ของ S_{s2} ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไปคือ 8.3 มิลลิเมตร

4.2.2.3 ผลกระทบจากการปรับความกว้างของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s3})

การศึกษผลกระทบจากการปรับความกว้างของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s3}) โดยนำค่าระยะระหว่างพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านข้าง (S_{s1}) และความยาวของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s2}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร และ 8.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ มาใช้ในการวิเคราะห์ และกำหนดให้ S_{s4} คงที่เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปรับความกว้างของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{s3}) เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.75 มิลลิเมตร เพื่อดูผลกระทบ ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.6

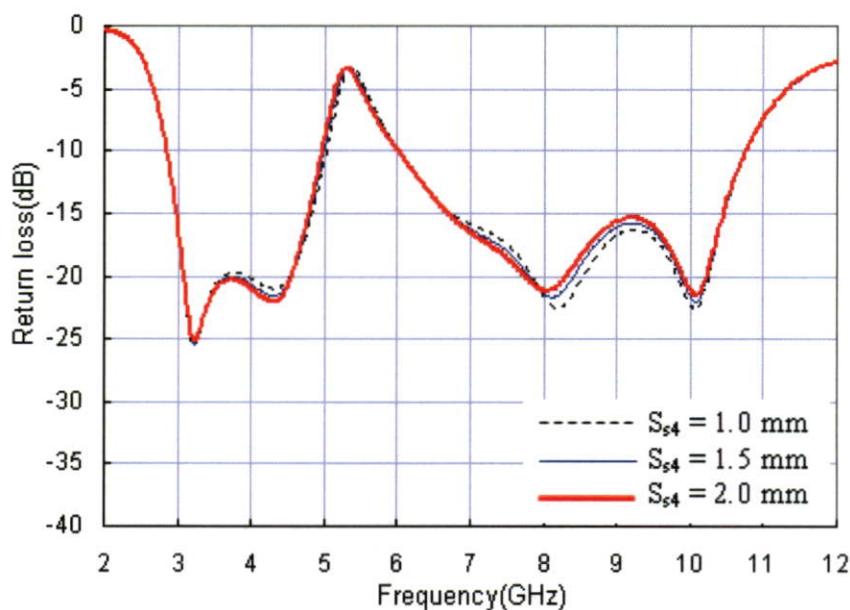


รูปที่ 4.6 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{53})

รูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{53} จากผลการจำลอง เมื่อปรับค่าขนาดของ S_{53} มากขึ้นจะทำให้ความกว้างของนอตช์ด้านความถี่สูงเพิ่มมากขึ้น และเมื่อปรับขนาด S_{53} ให้ลดลง จะทำให้ความกว้างของนอตช์น้อยลง ดังนั้นการปรับความกว้างของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{53}) จะช่วยในการลดและเพิ่มแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ และความกว้างของพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอล (S_{53}) ที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ในหัวข้อถัดไปคือ 0.5 มิลลิเมตร

4.2.2.4 ผลกระทบจากการปรับระยะระหว่างพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{54})

สุดท้ายเป็นการศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะระหว่างพาราซิติกอิเลิเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{54}) โดยนำค่าพารามิเตอร์ $S_{51}=0.45$ มิลลิเมตร $S_{52}=8.3$ มิลลิเมตร และ $S_{53}=0.5$ มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ และกำหนดให้ S_{54} มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลกระทบ โดยผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับระยะระหว่างพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{s4})

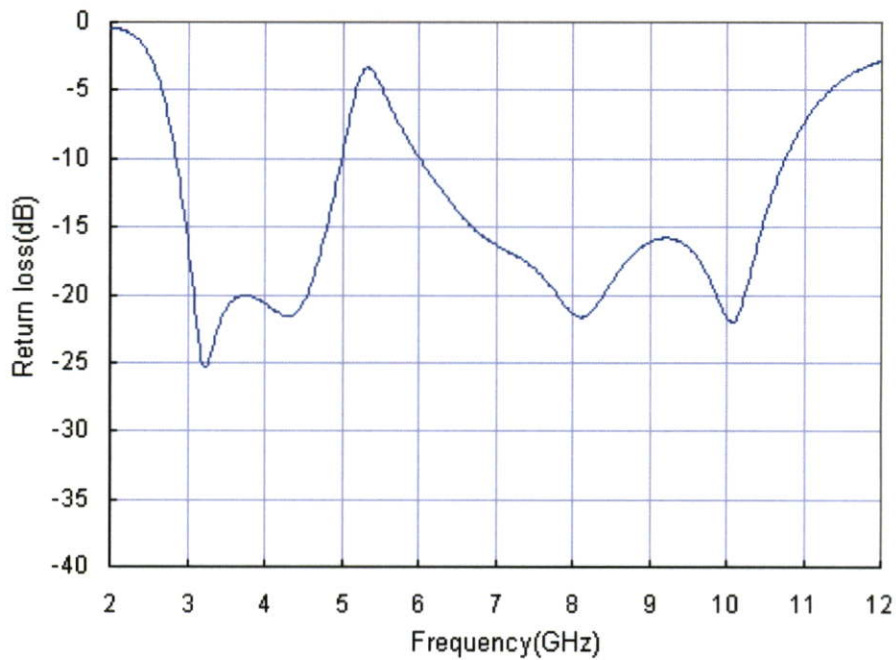
รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{s4} จากผลการจำลอง เมื่อปรับระยะระหว่างของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอลกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{s4}) ให้ลดลงและมากขึ้นจะมีผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์น้อยมาก และไม่มีผลต่อการเลื่อนหรือขยายแบนด์นอตซ์ จากการศึกษาคุณลักษณะของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปแอล (L-Shaped) พอสรุปได้ดังนี้ S_{s1} และ S_{s3} จะมีผลกระทบต่อการลดหรือเพิ่มแบนด์วิทท์ของแบนด์นอตซ์ S_{s2} จะมีผลต่อการเลื่อนแบนด์วิทท์ของแบนด์นอตซ์ และ S_{s4} จะมีผลต่อการแมทซ์อิมพีแดนซ์น้อยมากโดยไม่มีต่อการเลื่อนหรือขยายแบนด์นอตซ์

4.2.2.5 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

การออกแบบแบนด์นอตซ์เดี่ยวของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ดังนั้นจึงต้องมีการปรับพารามิเตอร์ของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) อีกเล็กน้อย เพื่อให้ผลตามต้องการ ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอลจะแสดงในตารางที่ 4.1 และผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) แสดงในรูปที่ 4.8

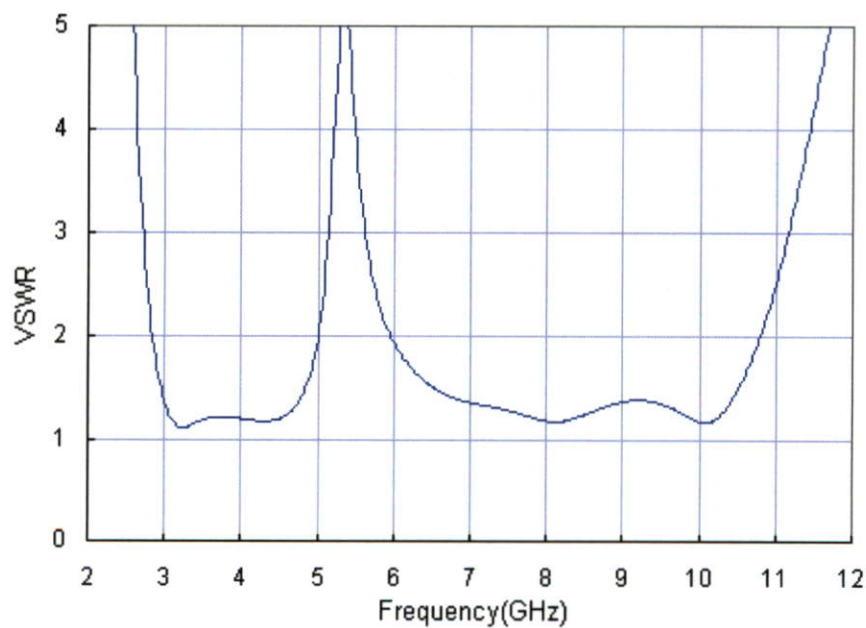
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

พารามิเตอร์	ขนาดพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)
S_{s1}	0.45 มิลลิเมตร
S_{s2}	8.33 มิลลิเมตร
S_{s3}	0.50 มิลลิเมตร
S_{s4}	1.50 มิลลิเมตร

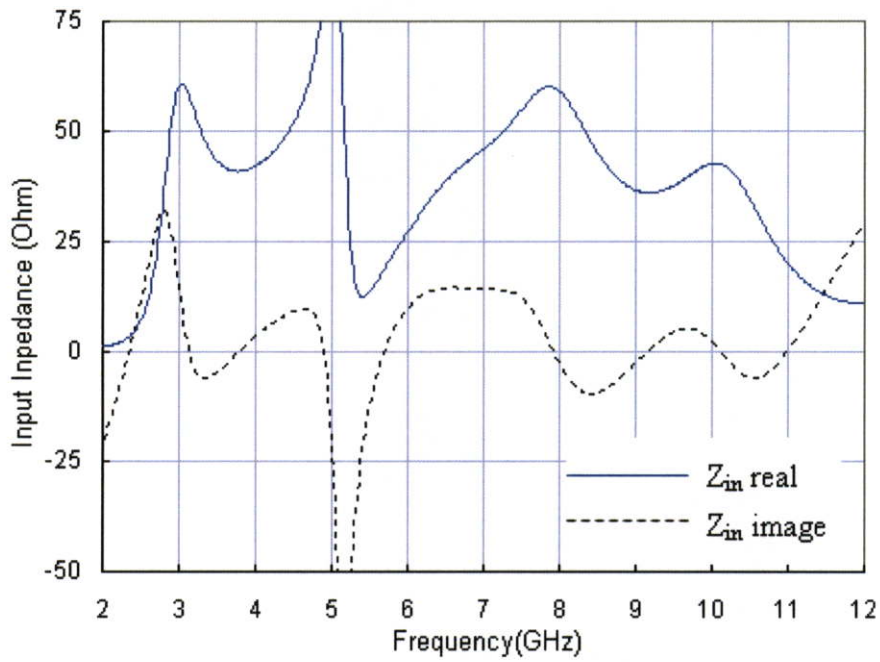


รูปที่ 4.8 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

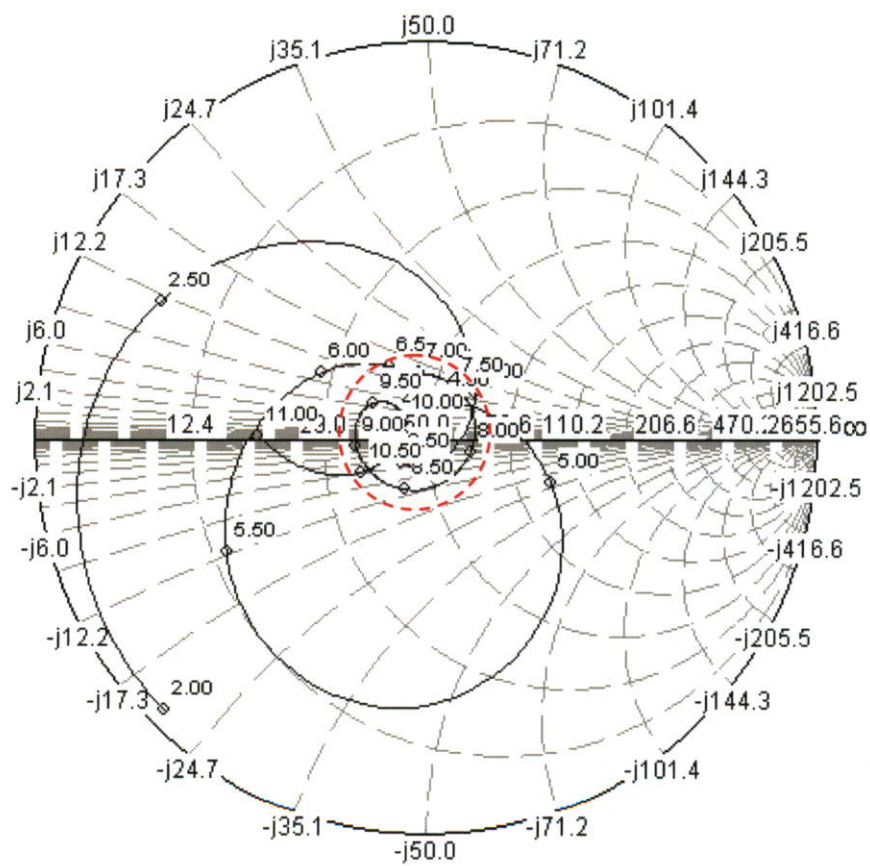
รูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) จากผลการจำลองทำให้สามารถกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ได้ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ในช่วงความถี่ 5-6 GHz ที่ถูกกรองออกไปจะมีค่า VSWR มากกว่า 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

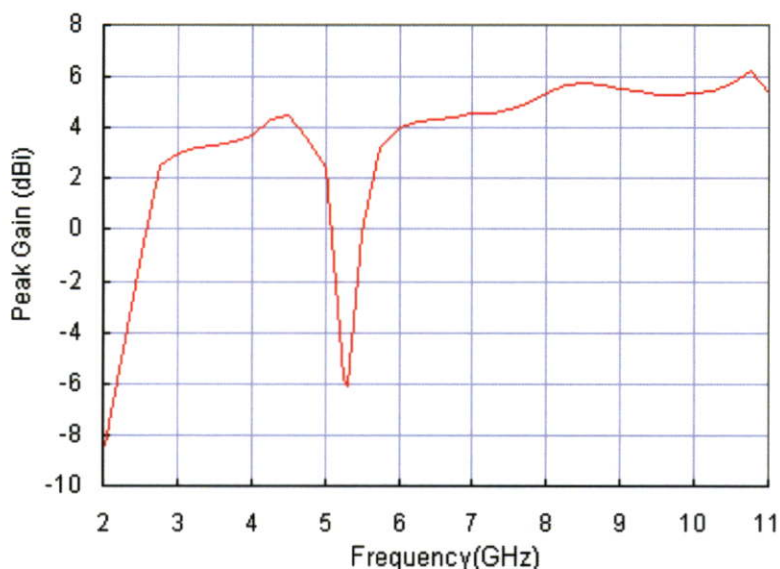


(ก) อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงและจินตภาพ



(ข) อินพุตอิมพีแดนซ์ในรูปแผนภูมิสมิท (Smith chart)

รูปที่ 4.10 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)



รูปที่ 4.11 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

รูปที่ 4.10 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิตของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) จากกราฟในรูปที่ 4.10(ก) จะเห็นว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพที่แถบความถี่ 5-6 GHz ลดลง และจากกราฟแผนภูมิสมิต อิมพีแดนซ์ในเทอม j จะมีค่าติดลบ ส่งผลทำให้ไม่มีการแมทช์อิมพีแดนซ์ แสดงดังรูปที่ 4.10(ข) รูปที่ 4.11 แสดงอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยว จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าอัตราขยายของสายอากาศที่แถบความถี่ 5-6 GHz ลดต่ำกว่าศูนย์ อย่างไรก็ตาม ในอนาคตระบบการสื่อสารไร้สายจะได้รับความนิยมมากขึ้นทำให้มีการกำหนดมาตรฐานใหม่ขึ้นมารองรับ ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำเสนอเทคนิคการควบคุมแบนด์นอตช์ โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดถัดไป

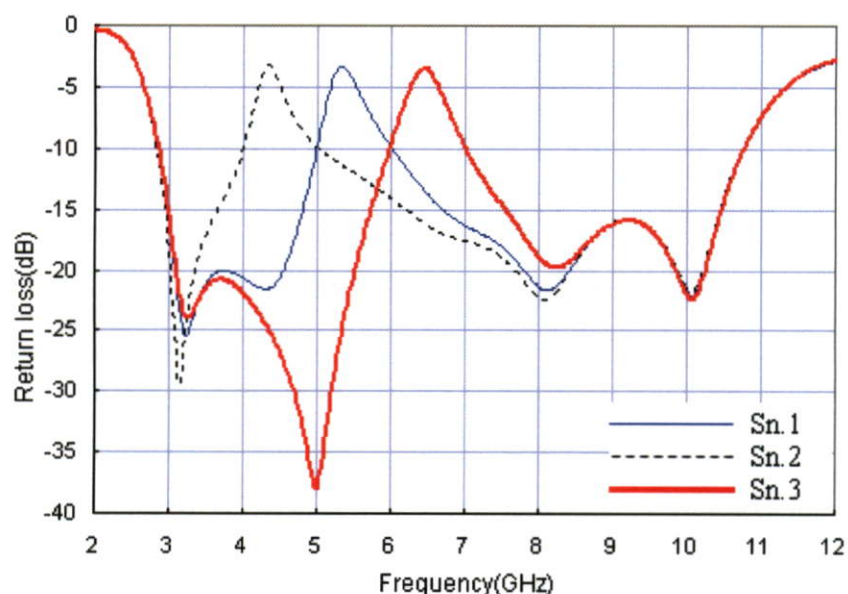
4.2.2.6 เทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

หัวข้อนี้ผู้วิจัยนำเสนอเทคนิคการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์ (Shift band-notched) ที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 GHz ใน 3 กรณีคือ Sn.1 Sn.2 และ Sn.3 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละกรณี ความยาวครึ่งหนึ่งของเส้นรอบรูปตัวแอล (H_L) ความถี่กลางของนอตช์ (f_c) และแบนด์วิดท์ จะถูกนำมาแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) กรณีเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตซ์เท่ากับ 1 GHz

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{s3} = 0.5$ มิลลิเมตร $S_{s4} = 1.5$ มิลลิเมตร และ $S_0 = 1.8$ มิลลิเมตร				
	S_{s1}	S_{s2}	H_{TL}	f_c (GHz)	BW (GHz)
Sn.1	0.45	8.33	7.48(0.252 λ_g)	5.5	1.0
Sn.2	0.47	10.30	9.05(0.250 λ_g)	4.5	1.0
Sn.3	0.50	6.75	5.95(0.237 λ_g)	6.5	1.0

รูปที่ 4.12 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 GHz ใน 3 กรณีคือ Sn.1 Sn.2 และ Sn.3 จากผลการจำลองจะเห็นว่าสามารถเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์จากแถบความถี่ 5-6 GHz ไปยัง 4-5 GHz หรือ 6-7 GHz ได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.12 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 GHz

ในย่านการสื่อสารไร้สายแถบความถี่ที่ถูกกำหนดตามมาตรฐานต่างๆ มีแบนด์วิดท์ที่ไม่เท่ากัน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งให้ผู้วิจัยนำเสนอเทคนิคการขยายแบนด์นอตซ์ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2.2.7 เทคนิคการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

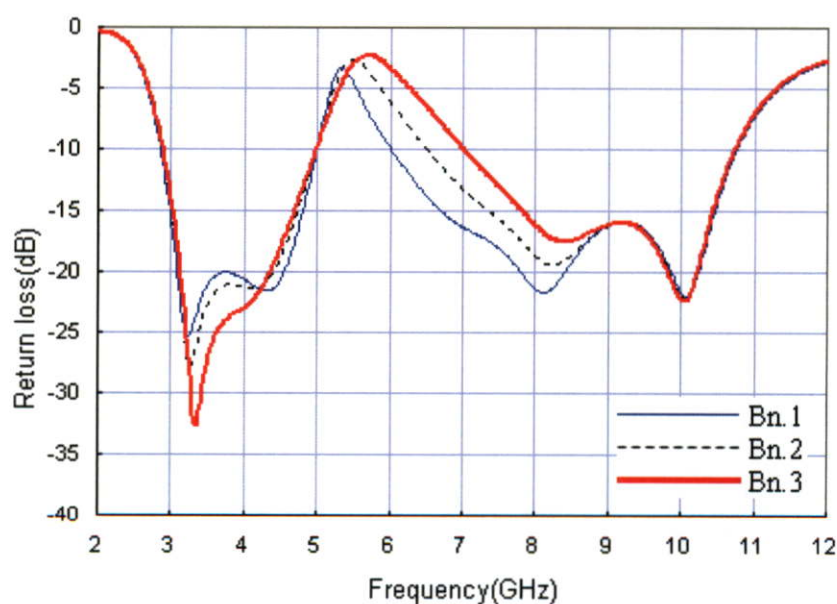
เทคนิคการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ให้กว้างมากกว่ากัน 0.5 GHz โดยใช้พาราซิติกรูปตัวแอล จะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 ขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์โดยกำหนดให้ขอบของแบนด์นอตซ์ที่ความถี่ต่ำคงที่ และ แบบที่ 2 ขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์โดยกำหนดให้ขอบของแบนด์นอตซ์ที่ความถี่สูงคงที่ โดยแต่ละการออกแบบแบ่งออกเป็น 3 กรณี กล่าวคือแบบที่ 1 แบ่งเป็น Bn.1 Bn.2 และ Bn.2 และแบบที่ 2 แบ่งเป็น BL.1 BL.2 และ BL.2

ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้งสองกรณีแสดงในตารางที่ 4.3 และผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.13

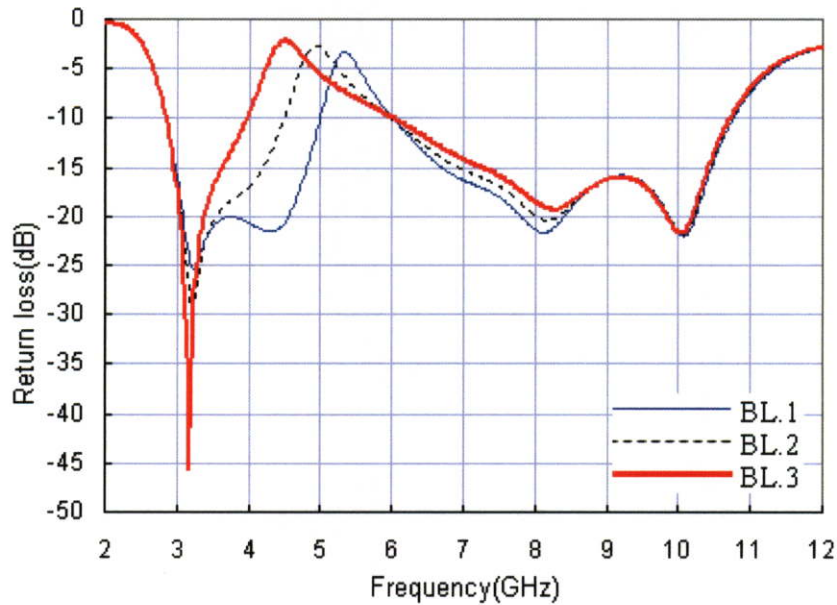
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) กรณีมีการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์

การออกแบบ		พารามิเตอร์ต่าง ๆ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{s4}=1.5$ มิลลิเมตร				
		S_{s1}	S_{s2}	S_{s3}	f_c (GHz)	BW (GHz)
แบบที่ 1	Bn.1	0.45	8.33	0.50	5.5	1.0
	Bn.2	0.50	8.25	0.89	5.75	1.5
	Bn.3	0.50	8.20	1.40	6.0	2.0
แบบที่ 2	BL.1	0.45	8.33	0.50	5.5	1.0
	BL.2	0.49	9.20	0.81	5.25	1.5
	BL.3	0.49	10.3	1.20	5.0	2.0

รูปที่ 4.13(ก) แสดงขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์โดยกำหนดให้ขอบของแบนด์นอตซ์ที่ความถี่ต่ำคงที่ จากผลการจำลองสามารถขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์จากแถบความถี่ 5.0-6.0 GHz ไปเป็น 5.0-6.5 GHz หรือ 5.0-7.0 GHz ได้ตามลำดับ และรูปที่ 4.13(ข) แสดงการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ โดยกำหนดให้ขอบของแบนด์นอตซ์ความถี่สูงคงที่ จากผลการจำลองสามารถขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์จากแถบความถี่ 5.0-6.0 GHz ไปเป็น 4.5-6.0 GHz หรือ 4.0-6.0 GHz ได้ตามลำดับ ดังนั้นการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์สามารถทำได้ง่าย ๆ โดยอาศัยคุณลักษณะของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติคิกรูปตัวแอล



(ก) การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์โดยกำหนดให้ขอบความถี่ต่ำคงที่



(ข) การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์โดยกำหนดให้ขอบความถี่สูงคงที่

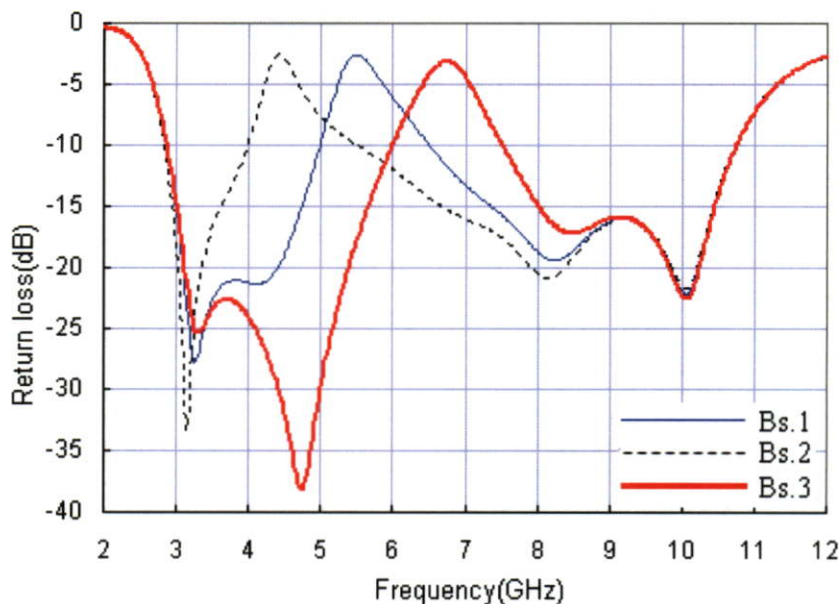
รูปที่ 4.13 การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปแอล (L-Shaped)

4.2.2.8 เทคนิคการเลื่อนตำแหน่งพร้อมกับขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์เดี่ยว โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped)

นอกจากนี้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลยังสามารถถูกปรับขนาดเพื่อให้มีการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ในกรณีแบนด์นอตซ์ถูกขยายให้กว้างเพิ่มขึ้นได้ ผู้วิจัยได้นำเสนอการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.5 GHz ใน 3 กรณีคือ Bs.1, Bs.2, และ Bs.3 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.4 และผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) กรณีเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตซ์ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.5 GHz

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{s4}=1.5$ มิลลิเมตร				
	S_{s1}	S_{s2}	S_{s3}	f_c (GHz)	BW (GHz)
Bs.1	0.50	8.25	0.89	5.75	1.5
Bs.2	0.48	10.28	0.81	4.75	1.5
Bs.3	0.50	6.63	0.95	6.75	1.5

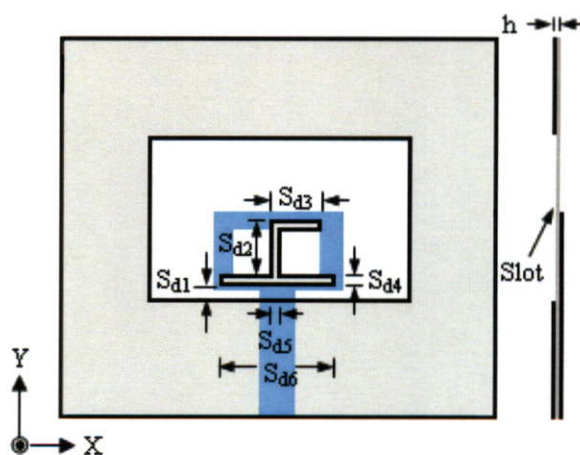


รูปที่ 4.14 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.5 GHz

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.5 GHz ใน 3 กรณีคือ Bs.1 Bs.2 และ Bs.3 จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าสามารถเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์จากแถบความถี่ 5.0-6.5 GHz ไปยัง 4-5.5 GHz หรือ 6-7.5 GHz ได้

4.2.3 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

การออกแบบสายอากาศแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองแถบความถี่ช่วง 5-6 GHz ออก โครงสร้างของสายอากาศแสดงในรูปที่ 4.15

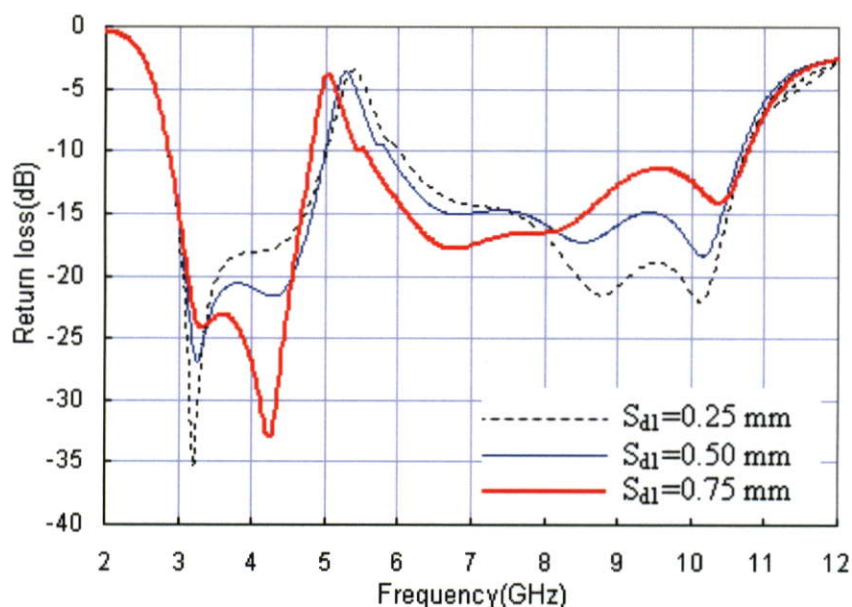


รูปที่ 4.15 โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) และพารามิเตอร์ของพาราซีติกอิลิเมนต์ที่จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการปรับค่ามีทั้งหมด 6 ตัวคือ S_{d1} , S_{d2} , S_{d3} , S_{d4} , S_{d5} , และ S_{d6} ซึ่งผลกระทบดังกล่าวจะมีรายละเอียดดังนี้

4.2.3.1 ผลกระทบจากระยะระหว่างพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{d1})

การศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะระหว่างพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{d1}) โดยกำหนดให้ความกว้างของพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d2}) ความยาวของพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านบน (S_{d3}) ความกว้างของพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอน (S_{d4}) ความกว้างของพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d5}) และความยาวของพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านล่าง (S_{d6}) คงที่เท่ากับ 4.8 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ S_{d1} มีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.75 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองจากการปรับพารามิเตอร์ S_{d1} แสดงในรูปที่ 4.16

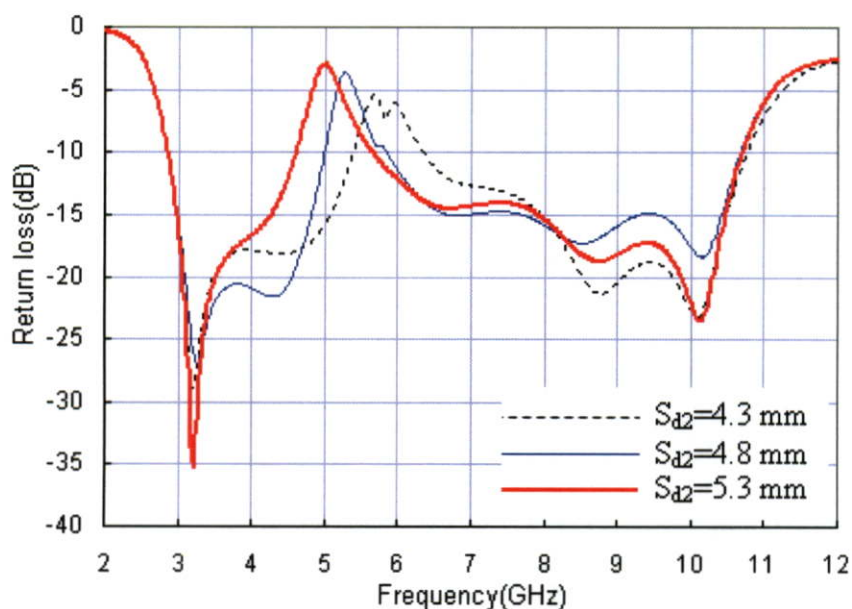


รูปที่ 4.16 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับค่าระยะระหว่างพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{d1})

รูปที่ 4.16 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{d1} จากผลการจำลองเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d1} ให้มากขึ้น จะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูกเลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง ในทำนองเดียวกัน เมื่อปรับค่า S_{d1} ให้ลดลงจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูกเลื่อนไปยังแถบความถี่ความถี่สูงขึ้น และช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์เล็กน้อย และค่าพารามิเตอร์ S_{d1} ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไปคือ 0.25 มิลลิเมตร

4.2.3.2 ผลกระทบจากการปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d2})

การปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d2}) เพื่อดูผลกระทบ ได้นำค่าระยะระหว่างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจกับระนาบกราวด์ด้านล่าง (S_{d1}) เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการจำลองที่ผ่านมา มาใช้ในการวิเคราะห์ และพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงที่ดังที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว โดยทำการปรับพารามิเตอร์ S_{d2} เท่ากับ 4.3 มิลลิเมตร 4.8 มิลลิเมตร และ 5.3 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงในรูป 4.17

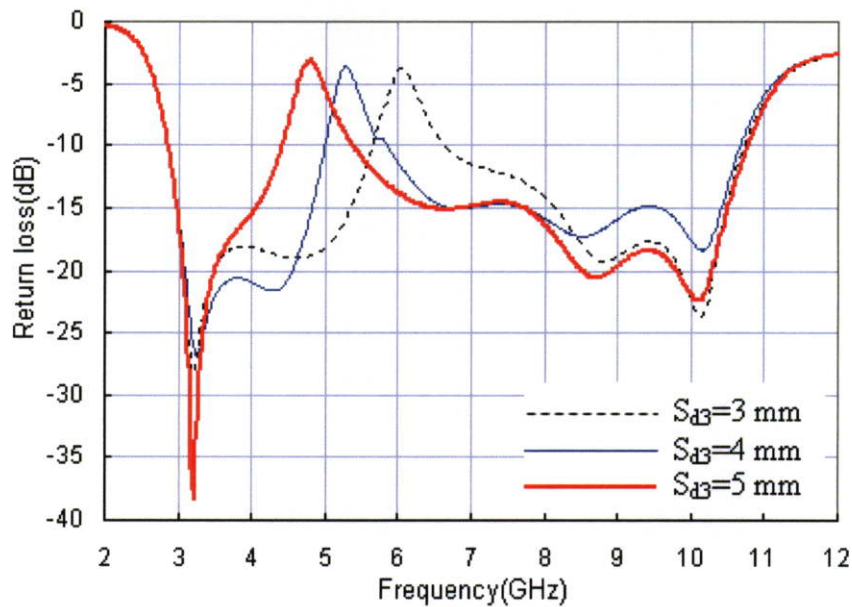


รูปที่ 4.17 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d2})

จากรูปที่ 4.17 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{d2} จากผลการจำลอง เมื่อการปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d2} ให้มากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตชุกเลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับค่า S_{d2} ให้น้อยลงจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตชุกเลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้นการปรับค่า S_{d2} จะช่วยในการเลื่อนตำแหน่งของช่วงแบนด์นอตชุก และค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ S_{d2} ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไปคือ 4.8 มิลลิเมตร

4.2.3.3 ผลกระทบจากการปรับความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวอนด้านบน (S_{d3})

การปรับความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวอนด้านบน (S_{d3}) ผู้วิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ S_{d1} และ S_{d2} เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร และ 4.8 มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ และกำหนดให้ค่าอื่นๆ คงที่ โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d3} เท่ากับ 3 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาคุณลักษณะ ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.18

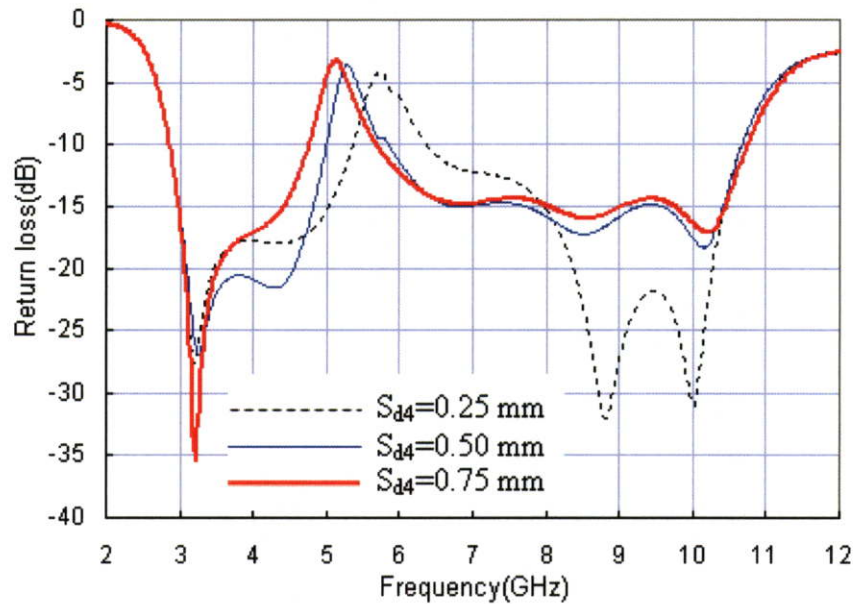


รูปที่ 4.18 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความยาวของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัว เจตามแนวนอนด้านบน (S_{d3})

จากรูปที่ 4.18 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{d3} จากผลการ จำลองจะเห็นได้ว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d3} ให้มากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูกเลื่อน ไปยังความถี่ที่ต่ำลง ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับค่า S_{d3} ให้น้อยลงจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูก เลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้นการปรับพารามิเตอร์ S_{d3} จะช่วยในการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์ นอตซ์ และพารามิเตอร์ S_{d3} ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไปคือ 4 มิลลิเมตร

4.2.3.4 ผลกระทบจากการปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอน (S_{d4})

การศึกษาผลกระทบจากการปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอน (S_{d4}) ได้นำค่าพารามิเตอร์ S_{d1} S_{d2} และ S_{d3} เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 4.8 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการจำลองที่ผ่านมา และกำหนดให้ S_{d5} และ S_{d6} คงที่เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์โดยปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d4} มีค่า เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.75 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองของพารามิเตอร์ S_{d4} แสดงดังรูปที่ 4.19

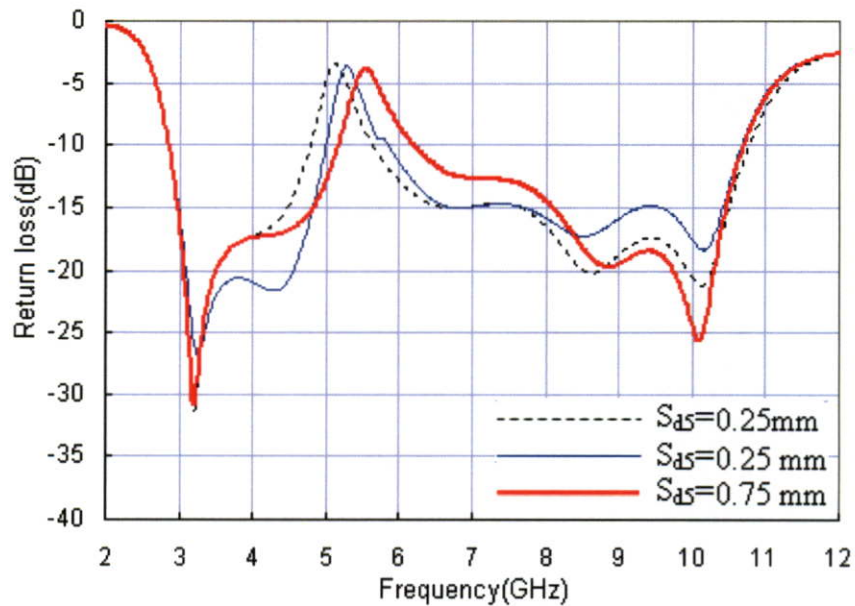


รูปที่ 4.19 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอน (S_{d4})

จากรูปที่ 4.19 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{d4} จากผลการจำลอง เมื่อปรับค่า S_{d4} ให้มากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูกเลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับค่า S_{d4} ให้น้อยลงจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูกเลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้นการปรับพารามิเตอร์ S_{d4} ช่วยในการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตซ์ และค่าพารามิเตอร์ S_{d4} ที่เหมาะสมคือ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

4.2.3.5 ผลกระทบจากการปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d5})

การปรับความกว้างของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d5}) เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ S_{d1} S_{d2} S_{d3} และ S_{d4} เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 4.8 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ และกำหนดให้ S_{d6} คงที่เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์ผลโดยปรับพารามิเตอร์ S_{d5} เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.75 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.20

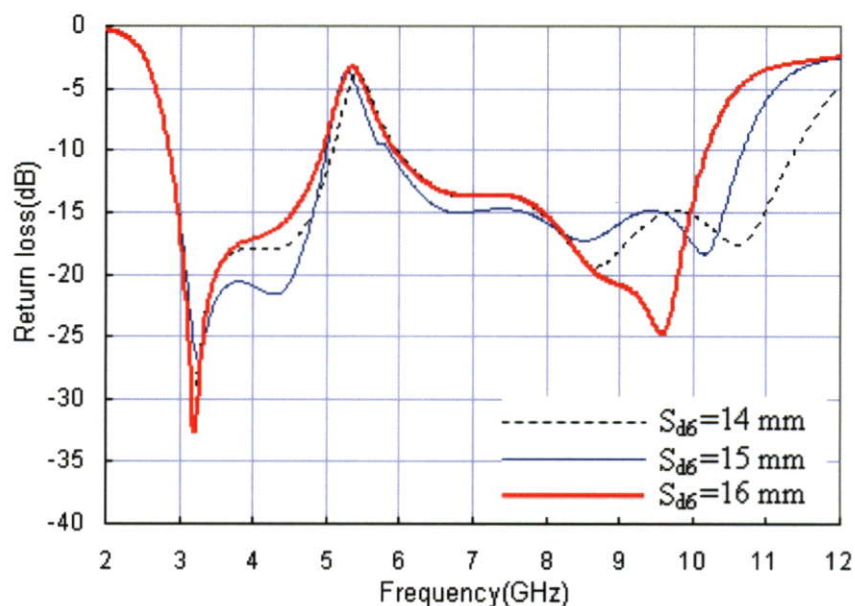


รูปที่ 4.20 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความกว้างของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวตั้ง (S_{d5})

รูปที่ 4.20 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{d5} จากผลการจำลองที่ได้จะเห็นว่าเมื่อการปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d5} ให้มากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูกเลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้นและช่วยขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ให้เพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกัน เมื่อปรับค่า S_{d5} ให้น้อยลง จะทำให้ตำแหน่งแบนด์นอตซ์ถูกเลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำลง ดังนั้นการปรับพารามิเตอร์ S_{d4} จะช่วยในการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตซ์และขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ และค่าพารามิเตอร์ S_{d5} ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไปคือ 0.5 มิลลิเมตร

4.2.3.6 ผลกระทบจากการปรับความยาวของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านล่าง (S_{d6})

ลำดับสุดท้ายเป็นการปรับความยาวของพาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจตามแนวนอนด้านล่าง (S_{d6}) โดยนำค่าที่ได้จากการจำลองที่ผ่านมาของ S_{d1} S_{d2} S_{d3} S_{d4} และ S_{d5} เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 4.8 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ และทำการศึกษาผลกระทบโดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d6} เท่ากับ 14 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองจะแสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 5.21 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับความยาวของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวเจตาม แนวนอนด้านล่าง (S_{d6})

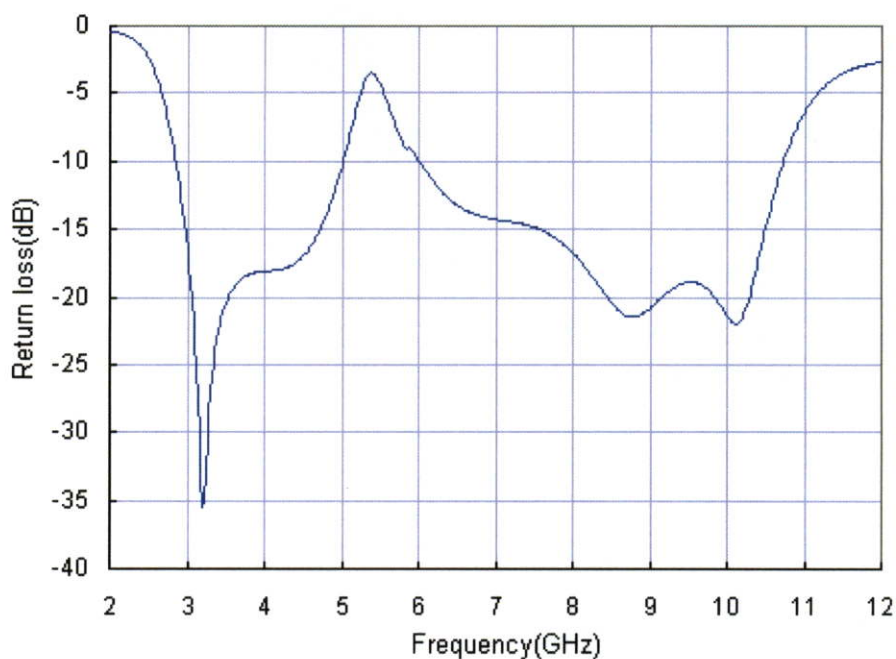
รูปที่ 4.21 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ S_{d6} จากผลการจำลอง จะเห็นได้ว่า เมื่อการปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d6} ให้มากขึ้นจะทำให้แบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์เพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลทำให้แบนด์วิดท์ที่ใช้งานในย่าน UWB ลดลง ในทำนองเดียวกัน เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d6} ให้น้อยลง จะทำให้แบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ลดลง และแบนด์วิดท์ที่ใช้งาน UWB มากขึ้น ดังนั้นการปรับค่าพารามิเตอร์ S_{d6} จะช่วยลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ และแถบความถี่ใช้งาน ซึ่งค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ S_{d6} เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

4.2.3.7 คุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

จากการศึกษาคุณลักษณะของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped) ทำให้ทราบคุณลักษณะของพารามิเตอร์แต่ละตัว ซึ่งการออกแบบสายอากาศแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยใช้พาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped) มีวัตถุประสงค์เพื่อกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ออกเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์อีกเล็กน้อยเพื่อให้ได้ผลตามต้องการ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

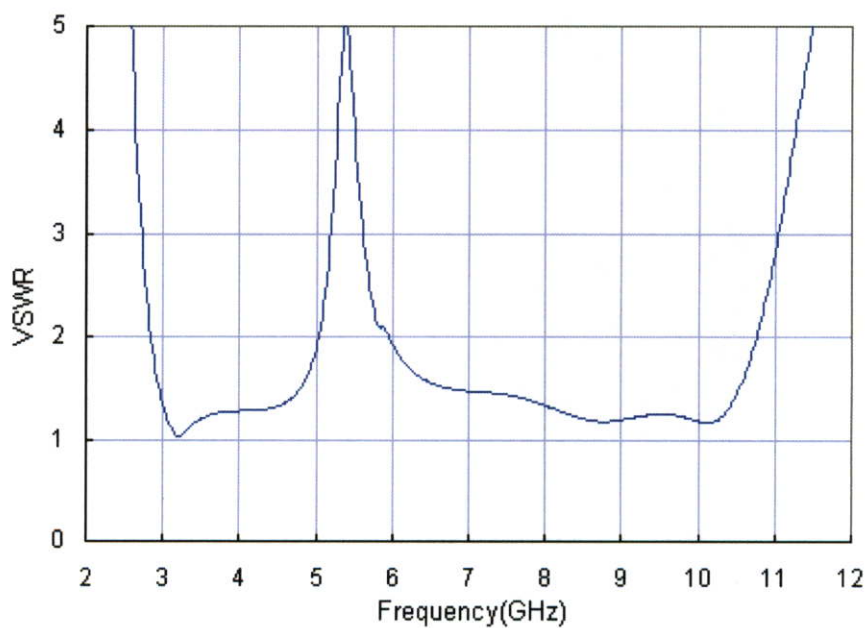
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

พารามิเตอร์	ขนาดพาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)
S_{d1}	0.25 มิลลิเมตร
S_{d2}	4.80 มิลลิเมตร
S_{d3}	4.05 มิลลิเมตร
S_{d4}	0.50 มิลลิเมตร
S_{d5}	0.50 มิลลิเมตร
S_{d6}	15.0 มิลลิเมตร

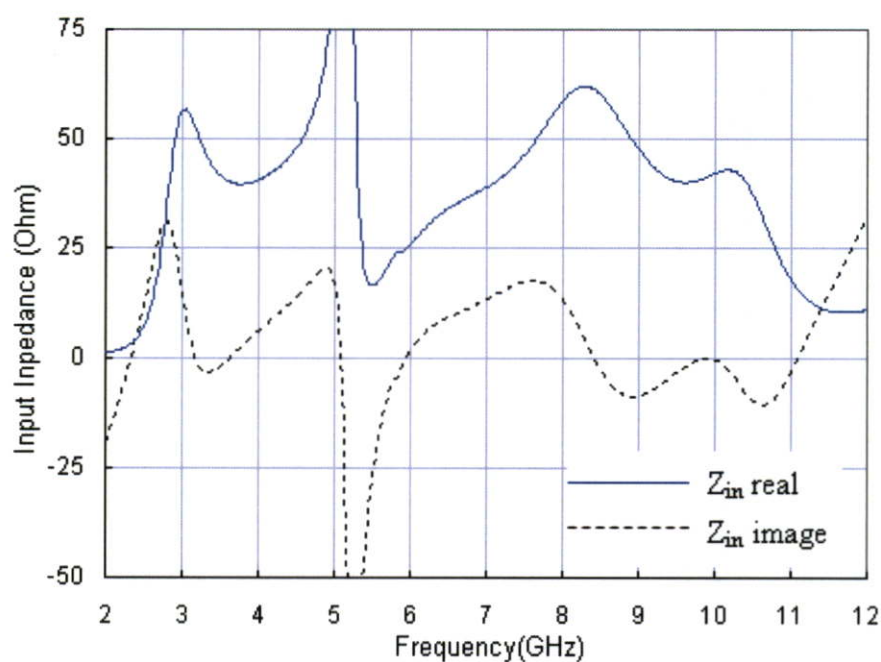


รูปที่ 4.22 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

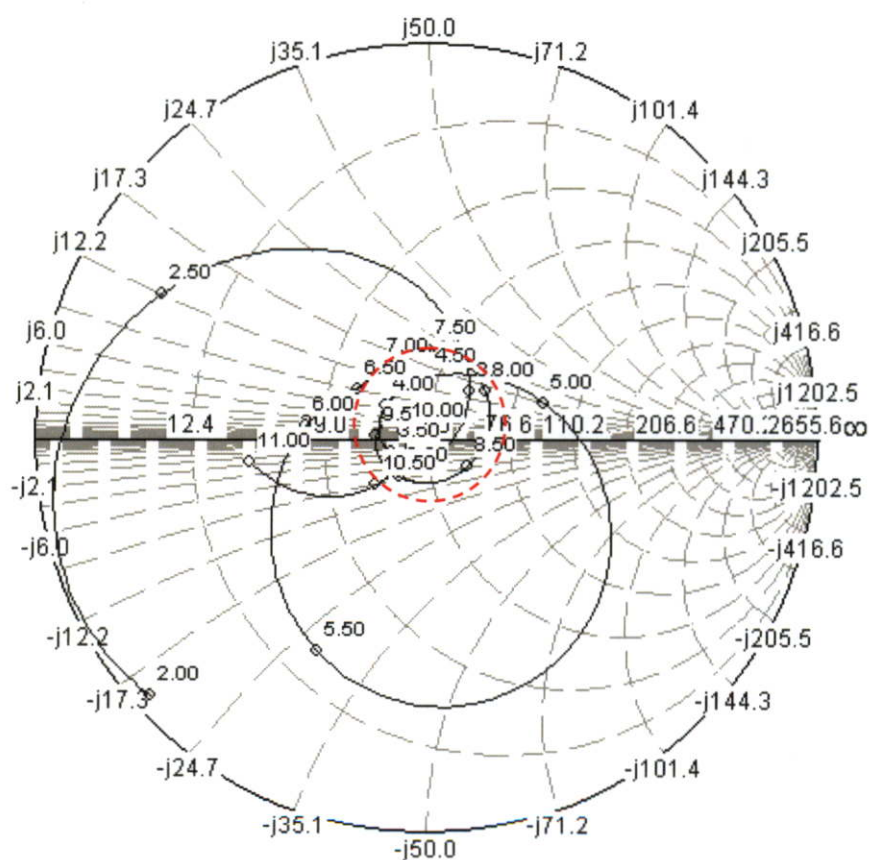
รูปที่ 4.22 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีหนึ่งแบนด์นอตซ์โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า สามารถกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ออกได้ โดยที่ช่วงความถี่อื่นๆ ของแถบความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวดยังสามารถใช้งานได้



รูปที่ 4.23 VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

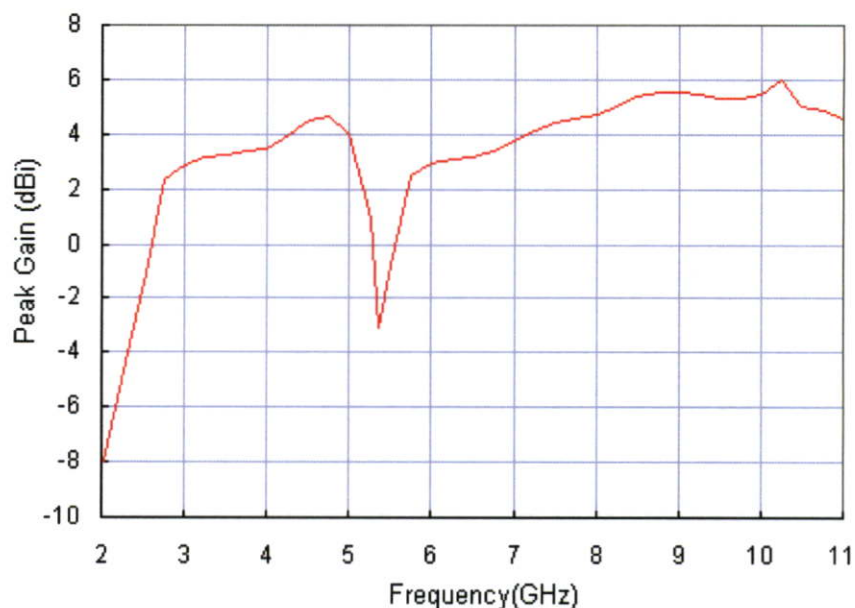


(ก) อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงและจินตภาพ



(ข) อินพุตอิมพีแดนซ์ในรูปแผนภูมิสมิท (Smith chart)

รูปที่ 4.24 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)



รูปที่ 4.25 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

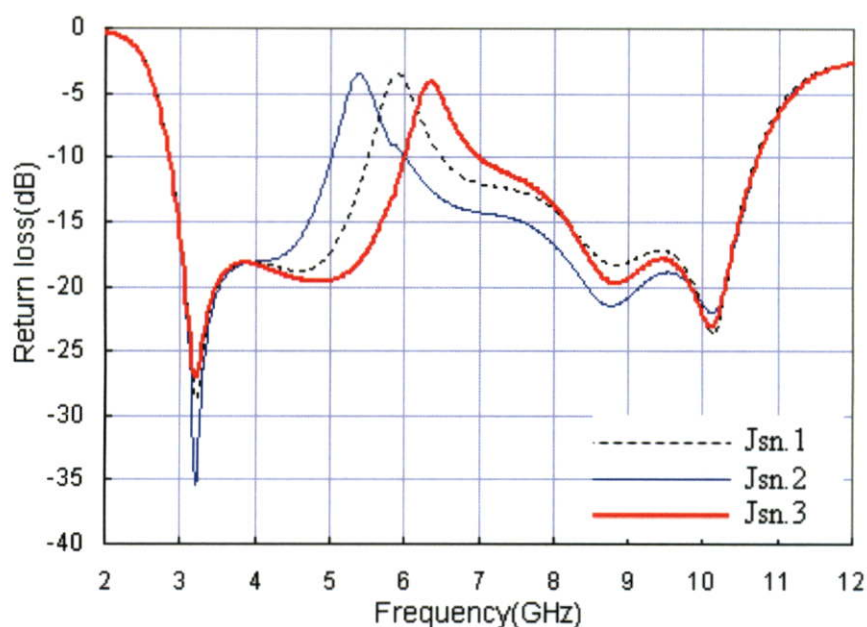
จากผลการจำลองอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ในช่วงความถี่ 5-6 GHz ที่ถูกกรองออกไปค่า VSWR จะมีค่ามากกว่า 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่แถบความถี่ 5-6 GHz ก็จะลดลงเช่นเดียวกันทำให้เกิดการแมทซ์อิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.24(ก) และจากกราฟในรูปที่ 4.24(ข) ของแผนภูมิสมิต จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ในเทอม J จะมีค่าติดลบทำให้อิมพีแดนซ์ลดลงส่งผลทำให้ไม่มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ ทำให้สามารถกรองแถบความถี่ดังกล่าวได้รูปที่ 4.25 แสดงอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยว จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่แถบความถี่ 5-6 GHz อัตราขยายของสายอากาศจะลดต่ำกว่าศูนย์ แสดงให้เห็นได้ว่าแถบความถี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ อย่างไรก็ตาม ในอนาคตระบบโครงข่ายไร้สายจะได้รับความนิยมมากขึ้นทำให้มีมาตรฐานของโครงข่ายไร้สายเพิ่มมากขึ้น ทำให้ผู้วิจัยได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมการเลื่อน และการขยายแบนด์นอตช์โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.2.3.8 เทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

หัวข้อนี้จะนำเสนอเทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 GHz โดยจะทำการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ใน 3 กรณีคือ $J_{sn.1}$ $J_{sn.2}$ และ $J_{sn.3}$ ตามลำดับ โดยที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละกรณี ความยาวครึ่งหนึ่งของเส้นรอบรูปตัวเจ (H_{TJ}) ความถี่กลางของนอตช์ (f_c) และแบนด์วิดท์ จะถูกนำมาแสดงในตารางที่ 4.6 และผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.26

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) กรณีเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{s4} = 0.5$ มิลลิเมตร $S_{s5} = 0.5$ มิลลิเมตร $S_{s6} = 15$ มิลลิเมตร และ $S_0 = 1.8$ มิลลิเมตร					
	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	H_{TJ}	f_c (GHz)	BW (GHz)
Jsn.1	0.30	5.2	2.5	20.90(0.762 λ_g)	5.5	1.0
Jsn.2	0.25	4.8	4.05	22.05(0.745 λ_g)	6.0	1.0
Jsn.3	0.27	4.4	3.09	20.69(0.824 λ_g)	6.5	1.0



รูปที่ 4.26 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

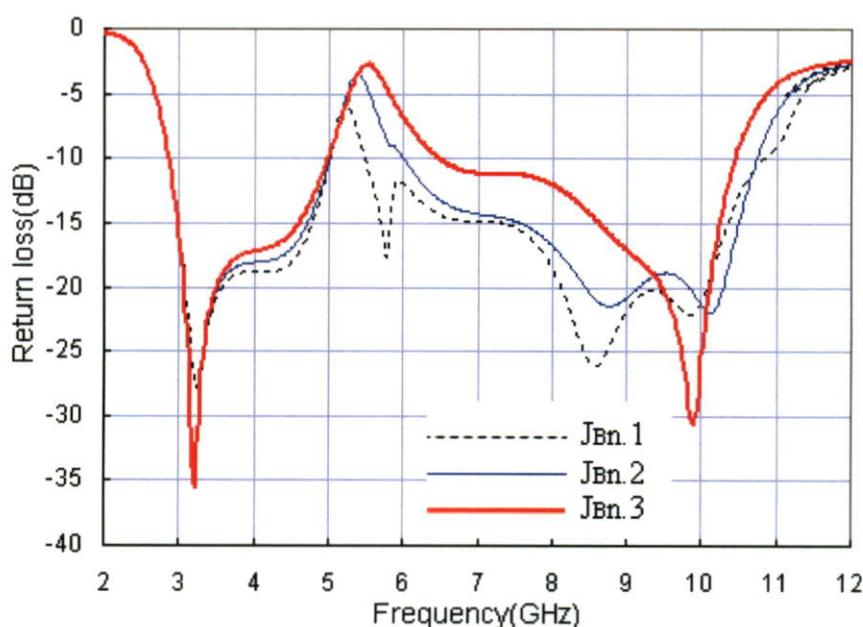
รูปที่ 4.26 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) จากผลการจำลองจะให้ได้ว่าสามารถเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์จากแถบความถี่ 5-6 GHz ไปยัง 5.5-6.5 GHz หรือ 6-7 GHz ได้ตามต้องการ

4.2.3.9 เทคนิคการขยายแบนด์วิธของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

เทคนิคการขยายแบนด์วิธของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) ผู้วิจัยนำเสนอการควบคุมการขยายแบนด์วิธของแบนด์นอตช์ใน 3 กรณีคือ Jbn.1 Jbn.2 และ Jbn.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.7 และผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) กรณีขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{s4} = 0.5$ มิลลิเมตร $S_{s6} = 15$ มิลลิเมตร และ $S_0 = 1.8$ มิลลิเมตร					
	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{s5}	f_c (GHz)	BW (GHz)
JBn.1	0.38	3.2	5.40	0.5	5.5	0.5
JBn.2	0.25	4.8	4.05	0.5	6.0	1.0
JBn.3	0.27	4.4	3.09	2.0	6.5	1.5



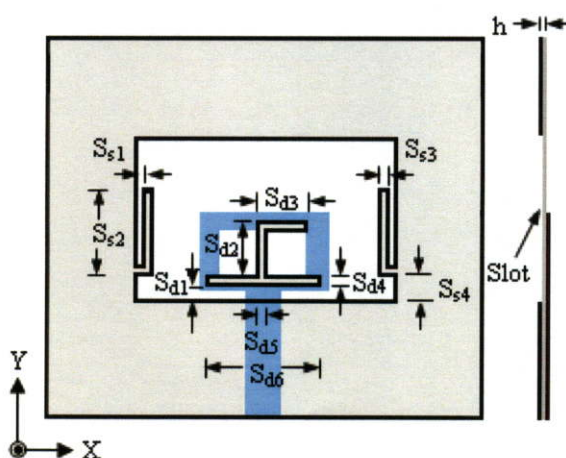
รูปที่ 4.27 การลด-ขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped)

รูปที่ 4.27 แสดงการลด-ขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ของสายอากาศช่องเปิดที่ใช้พาราซีติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าสามารถลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์จากแถบความถี่ 5-6 GHz ไปยัง 5.0-5.5 GHz หรือ 5.0-6.5 GHz ดังนั้นทำให้สามารถควบคุมการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ตั้งแต่ 0.5 GHz ถึง 1.5 GHz ได้ นอกจากการออกแบบสายอากาศที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวเพื่อกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ยังมีย่านความถี่อื่นที่สามารถสอดแทรกกับการสื่อสารย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวดคือ WiMAX 3.5 GHz ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบสายอากาศให้สามารถกรองสองย่านความถี่ที่ 3.5 GHz (WiMAX) และ 5.5 GHz (WLAN) พร้อมกัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.3 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์ที่มีการกรองแถบความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz

4.3.1 คุณสมบัติของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ เพื่อลดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างย่านความถี่ไร้สาย (WLAN) และไวแมกซ์ (WiMAX) กับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ผู้วิจัยได้นำสายอากาศสำหรับย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) และเสาอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิเลเมนต์สองรูปแบบคือ รูปแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว มาใช้ในการพัฒนาต่อเพื่อช่วยกรองสัญญาณย่านความถี่ WiMAX (3.4-3.7 GHz) และ WLAN (5-6 GHz) ออกโดยโครงสร้างของสายอากาศที่มีสองแบนด์นอตซ์แสดงดังรูปที่ 4.28



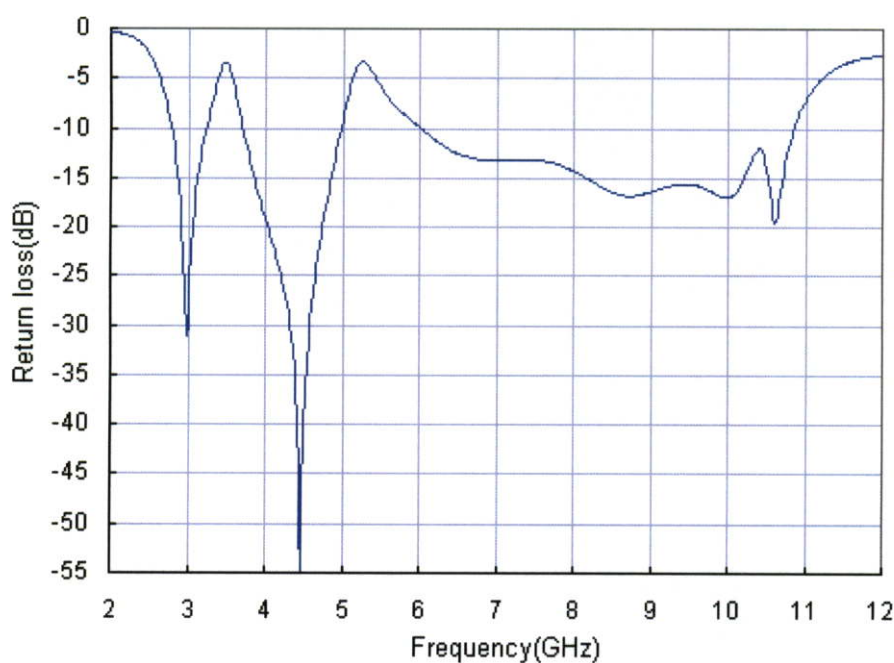
รูปที่ 4.28 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์

รูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ที่ใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) โดยพาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล มีพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ S_{s1} - S_{s4} และรูปตัวเจ (J-Shaped) มีพารามิเตอร์ 6 ตัวคือ S_{d1} - S_{d6} ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อใช้ออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยต้องการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์เพื่อกรองแถบความถี่ 3.4-3.7 GHz และ 5-6 GHz โดยใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) ออกแบบที่ความถี่ 3.5 GHz และใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) ออกแบบที่ความถี่ 5.5 GHz ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของพาราซิติกอิเลเมนต์แสดงในตารางที่ 4.8 และผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศแสดงในรูปที่ 4.29

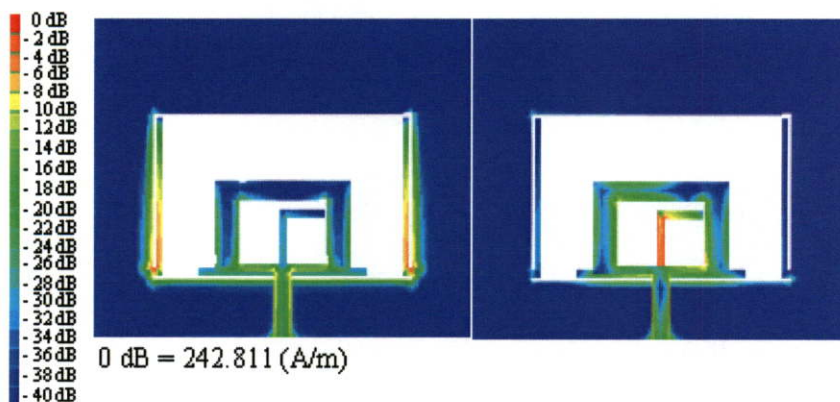
ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped)

พารามิเตอร์	ขนาดของพาราซิติกอิลิเมนต์
S_{s1}	0.25 มิลลิเมตร
S_{s2}	12.9 มิลลิเมตร
S_{s3}	0.30 มิลลิเมตร
S_{s4}	0.40 มิลลิเมตร
S_{d1}	0.40 มิลลิเมตร
S_{d2}	4.90 มิลลิเมตร
S_{d3}	4.05 มิลลิเมตร
S_{d4}	0.50 มิลลิเมตร
S_{d5}	0.50 มิลลิเมตร
S_{d6}	15.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.29 การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์

จากรูปที่ 4.29 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-shaped) จากผลการจำลองที่ได้จะเห็นว่าสายอากาศนี้สามารถกรองแถบความถี่ 3.24-3.70 GHz และช่วงความถี่ 5-6 GHz ได้ตามต้องการ ดังนั้นพาราซิติกอิลิเมนต์ทั้งสองรูปแบบนี้สามารถใช้ในการกรองสองแถบความถี่ที่ไม่ต้องการออกได้ ทำให้ไม่เกิดการสอดแทรกของสัญญาณการสื่อสารไร้สายย่าน WiMAX และ WLAN กับการสื่อสารไร้สายย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB)

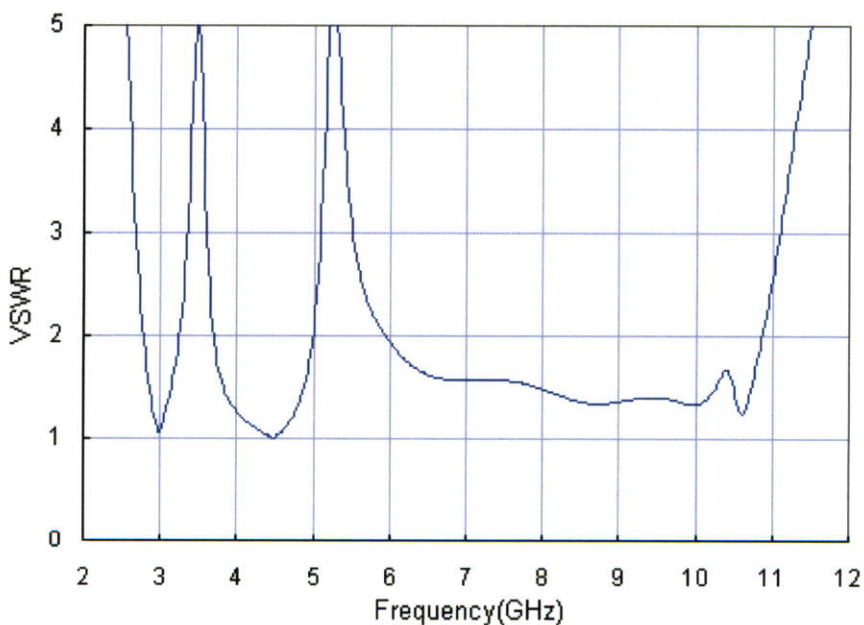


(ก) ความถี่ 3.5 GHz

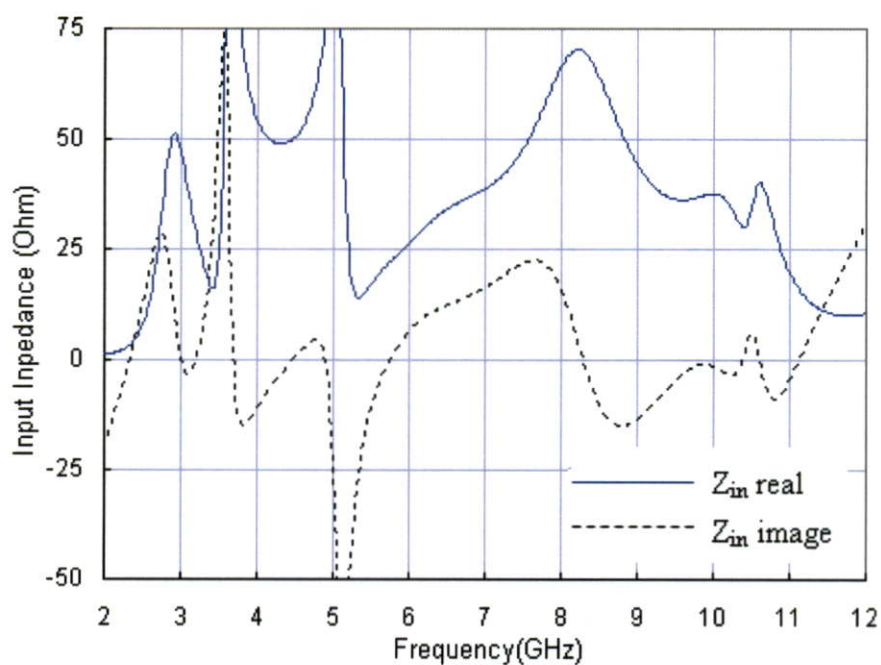
(ข) ความถี่ 5.5 GHz

รูปที่ 4.30 ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์

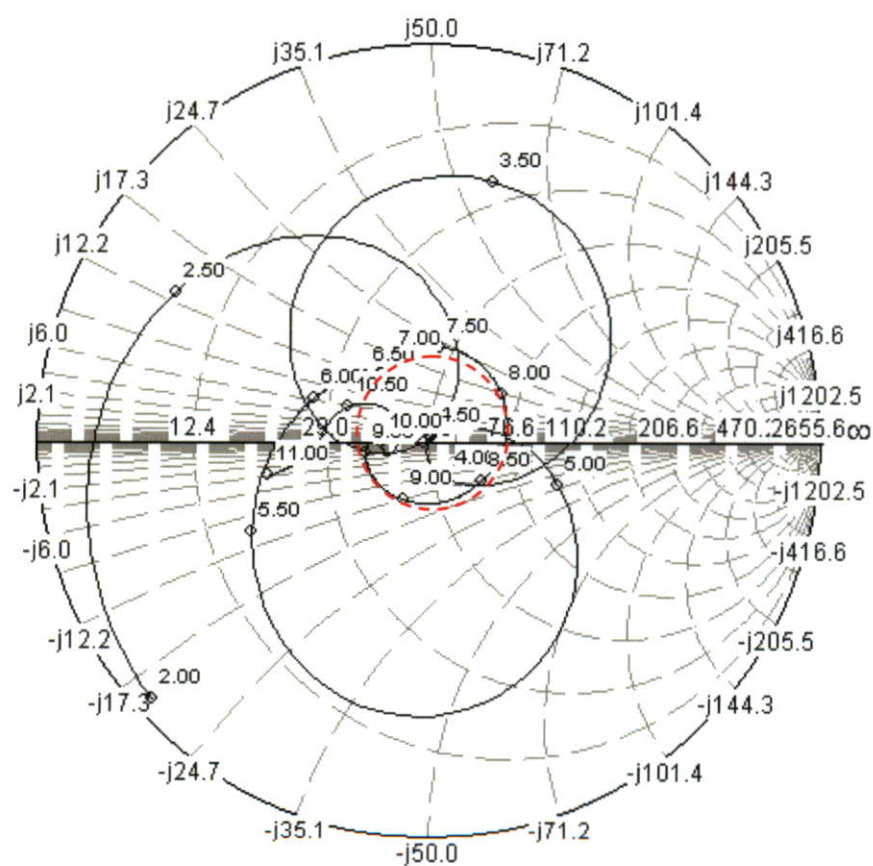
รูปที่ 4.30 แสดงความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz จากผลจำลองจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 3.5 GHz จะมีความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยมากบนพื้นผิวพาราซิติกรุปตัวแอล และไม่มีการแพร่กระจายกระแสเฉลี่ยพื้นผิวของพาราซิติกรุปตัวเจ และในทำนองเดียวกันที่ความถี่ 5.5 GHz จะมีความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยมากบนพื้นผิวพาราซิติกรุปตัวเจ และไม่มีการแพร่กระจายกระแสเฉลี่ยพื้นผิวของพาราซิติกรุปตัวแอล ดังแสดงในรูปที่ 4.30(ก) และรูปที่ 4.30(ข) ตามลำดับ กรณีนี้ทำให้อิมพีแดนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงรุนแรงทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับสูงมากส่งผลทำให้ไม่เกิดแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่แบนด์นอตซ์ ดังนั้นจึงทำให้ที่ความถี่แบนด์นอตซ์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพและอัตราขยายลดลง



รูปที่ 4.31 VSWR ของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์



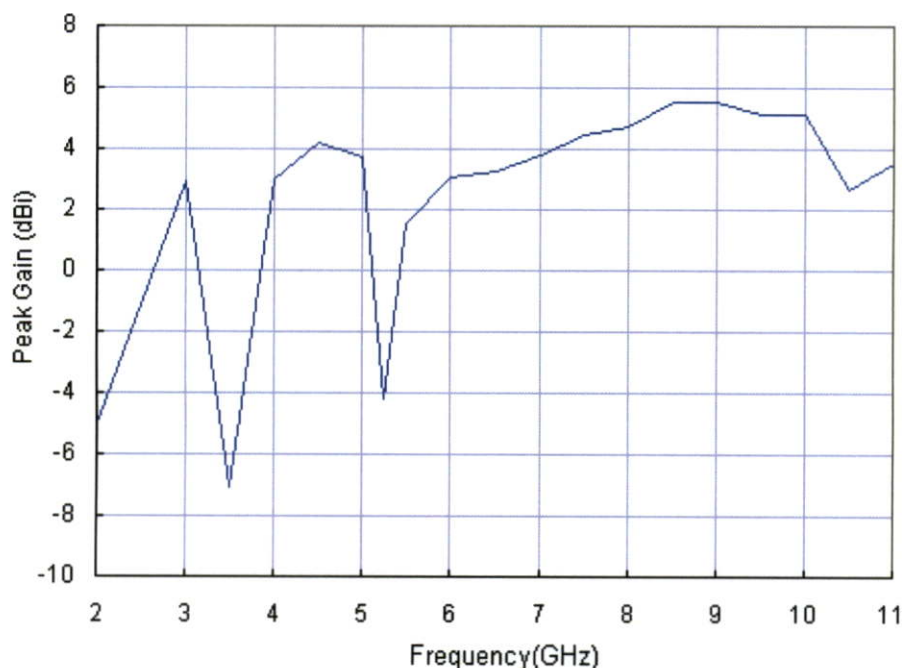
(ก) อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงและจินตภาพ



(ข) อินพุตอิมพีแดนซ์ในรูปแผนภูมิสมิท (Smith chart)

รูปที่ 4.32 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์

จากกราฟอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่แถบความถี่ 3.24-3.7 GHz และ 5-6 GHz ที่ถูกรองออกไปค่า VSWR จะมีค่ามากกว่า 2 และช่วงความถี่อื่น ๆ ตั้งแต่ 2.8-10.84 GHz มีค่าต่ำกว่า 2 แสดงในรูปที่ 4.31 อินพุตอิมพีแดนซ์แถบความถี่ 3.24-3.7 GHz สูงขึ้น และแถบความถี่ 5-6 GHz ลดลง ดังรูปที่ 4.32(ก) และจากกราฟแผนภูมิสมิต จะเห็นว่าที่แถบความถี่ 3.24-3.7 GHz อิมพีแดนซ์ในเทอม J จะมีเป็นบวกทำให้อิมพีแดนซ์สูงขึ้น และแถบความถี่ 5-6 GHz อิมพีแดนซ์ในเทอม J จะมีค่าติดลบทำให้อิมพีแดนซ์ลดลง ส่งผลทำให้สองแถบความถี่ดังกล่าวไม่มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.32(ข)



รูปที่ 4.33 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์

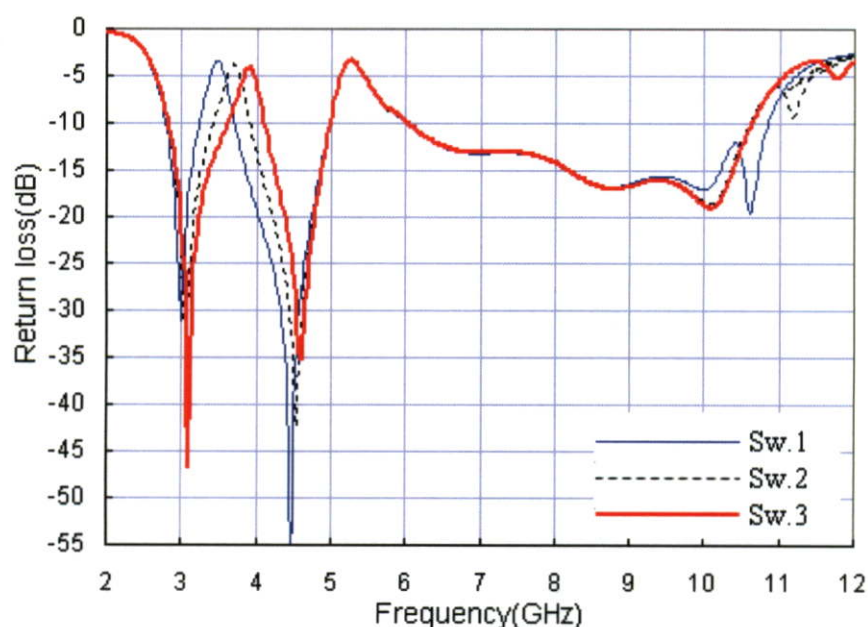
รูปที่ 4.33 แสดงอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ จะเห็นได้ว่าที่แถบความถี่ 3.24-3.7 GHz และ 5-6 GHz อัตราขยายของสายอากาศจะมีค่าต่ำกว่าศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงความถี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ อย่างไรก็ตาม ในอนาคตระบบโครงข่ายไร้สายจะได้รับความนิยมมากขึ้นทำให้มีมาตรฐานของโครงข่ายไร้สายอาจถูกกำหนดออกมาใหม่ทำให้เกิดการทับซ้อนของแถบความถี่ของแต่ละมาตรฐาน ทำให้ต้องมีการออกแบบสายอากาศที่มีเทคนิคการเลื้อนและขยายแบนด์นอตซ์โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-shaped) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดถัดไป

4.3.2 เทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz

หัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz โดยพารามิเตอร์ต่างๆ แต่กรณีแสดงในตารางที่ 4.9 และการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตซ์จะนำเสนอใน 3 กรณีคือ Sw.1 Sw.2 และ Sw.3 แสดงในรูปที่ 4.34

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ กรณีการเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{s1} = 0.25$ มิลลิเมตร $S_{s3} = 0.3$ มิลลิเมตร $S_{s4} = 0.4$ มิลลิเมตร และ $S_0 = 1.8$ มิลลิเมตร		
	S_{s2}	f_c (GHz)	BW (GHz)
Sw.1	12.90	3.47	0.46
Sw.2	12.15	3.67	0.46
Sw.3	11.48	3.87	0.46



รูปที่ 4.34 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz

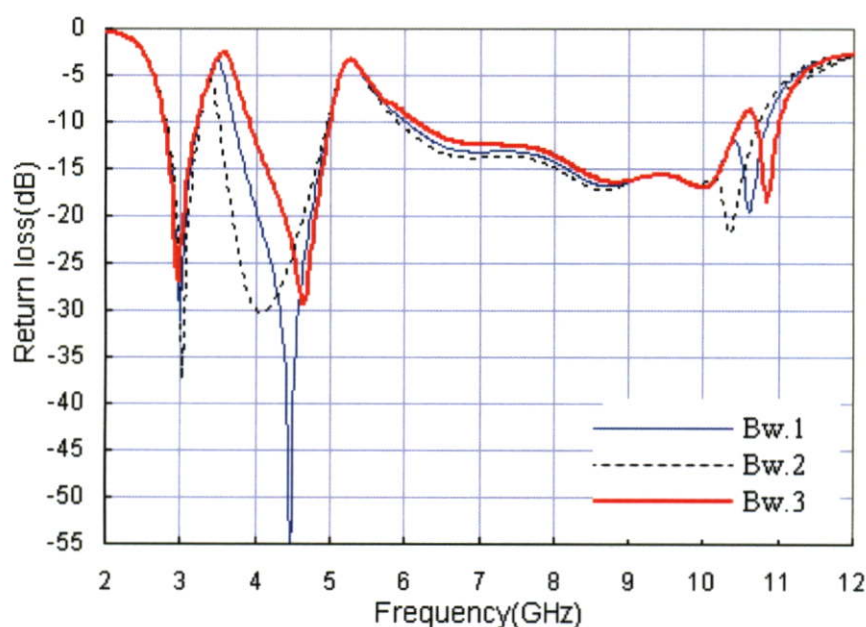
จากรูปที่ 4.34 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ จากผลการจำลองทำให้สามารถเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์จากแถบความถี่ 3.24-3.7 GHz ไปยัง 3.44-3.9 GHz หรือ 3.64-4.1 GHz ได้ตามต้องการ ซึ่งพารามิเตอร์ S_{s2} จะเป็นพารามิเตอร์หลักในการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศสองแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz

4.3.3 เทคนิคการขยายแบนด์วิธของแบนด์นอตซ์ที่ความถี่ย่าน 3.5 GHz

การขยายแบนด์วิธของแบนด์นอตซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz ซึ่งมีจะนำเสนอใน 3 กรณีคือ Bw.1 Bw.2 และ Bw.3 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ กรณีขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{s4}=0.4$ มิลลิเมตร และ $S_0=1.8$ มิลลิเมตร				
	S_{s1}	S_{s2}	S_{s3}	f_c (GHz)	BW (GHz)
Bw.1	0.25	12.90	0.30	3.47	0.46
Bw.2	0.15	13.20	0.17	3.37	0.26
Bw.3	0.25	12.79	0.60	3.57	0.66



รูปที่ 4.35 การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz

รูปที่ 4.35 แสดงการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ โดยเพิ่มขึ้นลำดับละ 0.20 GHz ในแต่ละกรณีคือ Bw.1 Bw.2 และ Bw.3 จากผลการจำลองทำให้สามารถลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์จากแถบความถี่ 3.24-3.7 GHz ไปเป็น 3.24-3.5 GHz หรือ 3.24-3.9 GHz ซึ่งพารามิเตอร์หลักที่ช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz คือ S_{s1} S_{s2} และ S_{s3} ดังนั้นการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz สามารถลดและขยายแบนด์นอตซ์ได้อย่างอิสระโดยไม่ผลกระทบต่อที่ย่านความถี่แบนด์นอตซ์ 5-6 GHz ในทำนองเดียวกันสามารถเลื่อนตำแหน่งและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งจะกล่าวในลำดับถัดไป

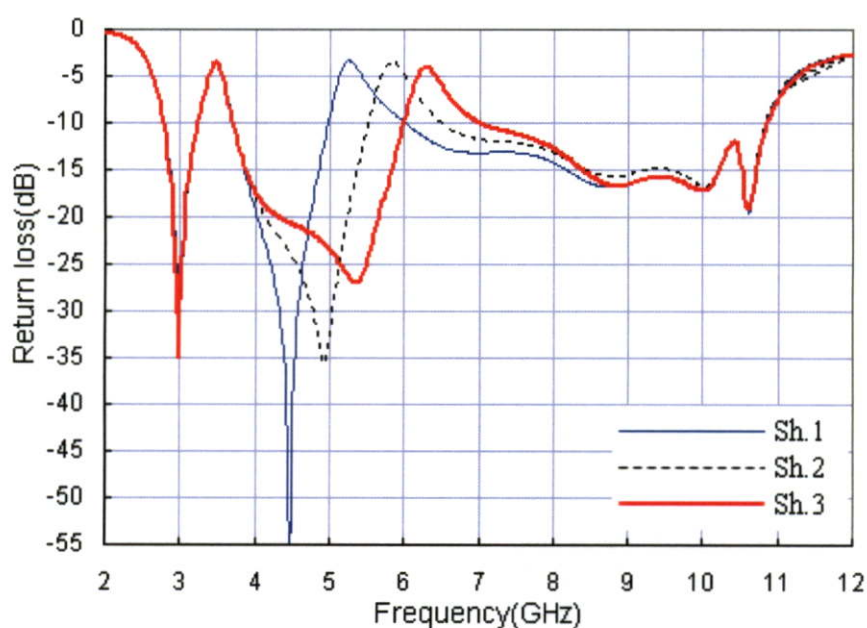
4.3.4 เทคนิคการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz

การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz โดยมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 GHz และทำการเลื่อนตำแหน่งไปที่ละ 0.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และนำเสนอการเลื่อนตำแหน่ง

แบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz ใน 3 กรณีคือ Sh.1 Sh.2 และ Sh.3 แสดงในรูปที่ 4.36 และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ กรณีเลื่อนตำแหน่งแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{d1} = 0.4$ มิลลิเมตร $S_{d4} = 0.5$ มิลลิเมตร $S_{d5} = 0.5$ มิลลิเมตร $S_{d6} = 15$ มิลลิเมตร และ $S_0 = 1.8$ มิลลิเมตร			
	S_{d2}	S_{d3}	f_c (GHz)	BW (GHz)
Sh.1	4.90	4.05	5.49	1.02
Sh.2	5.20	2.50	6.01	0.98
Sh.3	4.40	3.08	6.50	1.0

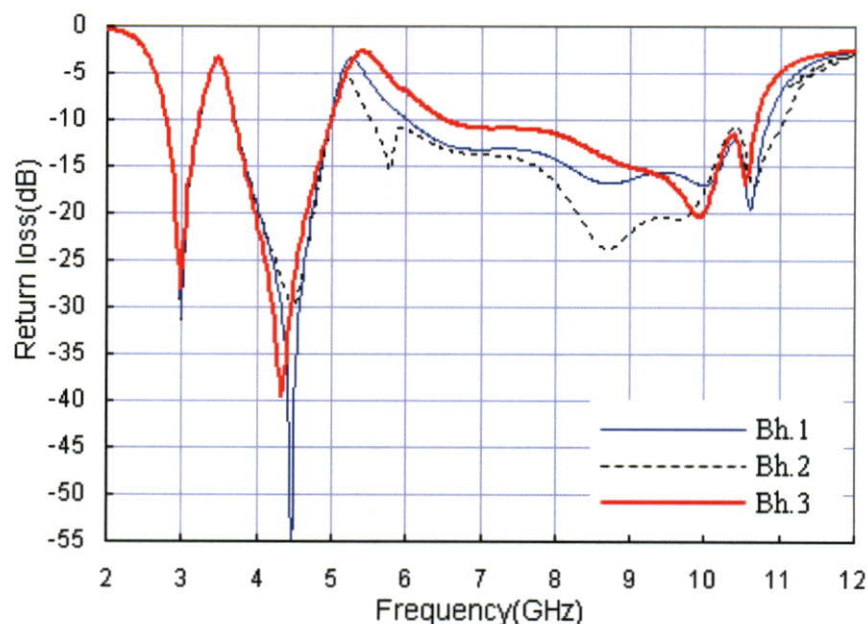


รูปที่ 4.36 การเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ย่านความถี่ 5.5 GHz

รูปที่ 4.36 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าสามารถเลื่อนแถบความถี่จาก 4.98-6 GHz ไปยังแถบความถี่ 5.52-6.5 GHz หรือ 6-7 GHz ทำให้สามารถควบคุมเลื่อนตำแหน่งของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz ได้ตามต้องการ โดยแบนด์นอตช์แรกที่ย่านความถี่ 3.5 GHz ไม่มีผลกระทบแต่อย่างใด

4.3.5 เทคนิคการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz

การขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz จะทำการขยายแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นละ 0.5 GHz โดยทำการขยายแบนด์วิดท์ใน 3 กรณีคือ Bh.1 Bh.2 และ Bh.3 ดังแสดงในรูปที่ 4.37 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละกรณีจะแสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.37 การลด-ขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์ กรณีการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz

การออกแบบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร) โดยกำหนดให้ $S_{d4}=0.5$ มิลลิเมตร $S_{d6}=15$ มิลลิเมตร และ $S_0=1.8$ มิลลิเมตร					
	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d5}	f_c (GHz)	BW (GHz)
Bh.1	0.40	4.9	4.05	0.5	5.49	1.02
Bh.2	0.40	3.2	5.50	0.5	5.26	0.52
Bh.3	0.35	5.4	4.95	2.0	5.76	1.52

รูปที่ 4.37 แสดงการลด-ขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าสามารถขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์จาก 4.98-6 GHz ไปเป็น 5-5.52 GHz หรือ 5-6.52 GHz ทำให้สามารถลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 5.5 GHz ได้ตามต้องการ โดยแบนด์นอตช์ที่ย่านความถี่ 3.5 GHz ไม่มีผลกระทบแต่อย่างใด

4.4 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบแถบความถี่กว้างยิ่งยวดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองช่วงความถี่ 5-6 GHz ออก โดยแสดงการใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped) หลังจากนั้นจะใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped) ซึ่งจะให้ผลเหมือนกัน จากผลการจำลองสามารถกรองย่านความถี่ 5-6 GHz ได้ และแถบความถี่ดังกล่าวส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศลดลง นอกจากนี้ สายอากาศนี้ยังสามารถควบคุมการเลื่อนแบนด์นอตช์และการขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์ได้เช่นเดียวกัน กล่าวคือ สามารถเลื่อนแบนด์วิดท์ของ

แบนด์นอตซ์จากช่วง 5-6 GHz ไปยัง 4-5 GHz 5.5-6.5 GHz 6-7 GHz โดยแบนด์นอตซ์มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.0 GHz และ 4-4.5 GHz 5-6.5 GHz และ 6-7.5 GHz มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.5 GHz และสามารถลดและขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตซ์ได้ตั้งแต่ 0.5 GHz – 2 GHz ได้เช่นเดียวกัน โดยมีอัตราขยายเฉลี่ยอยู่ที่ 4 dBi นอกจากนี้ยังนำเสนอสายอากาศสองแบนด์นอตซ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองช่วงความถี่ที่ไม่ต้องออกไปสองช่วงคือ 3.4-3.7 GHz และ 5-6 GHz ออกไปเพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกแซงของสัญญาณระหว่างการสื่อสารย่าน WiMAX 3.5 GHz และ WLAN ที่ช่วง 5-6 GHz นอกจากนี้ยังสามารถเลื่อนตำแหน่งและการลดและขยายแบนด์วิดท์ของทั้งสองแบนด์นอตซ์ได้อย่างอิสระโดยไม่มีผลกระทบระหว่างสองแบนด์นอตซ์ ซึ่งที่แถบความถี่ของทั้งสองแบนด์นอตซ์ จะไม่มีอัตราขยายเกิดขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าแถบความถี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ ส่วนช่วงความถี่อื่น ๆ ของสายอากาศที่ออกแบบตั้งแต่ 2.8-10.84 GHz ยังคงสามารถใช้งานได้ตามปกติ ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้งานกับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

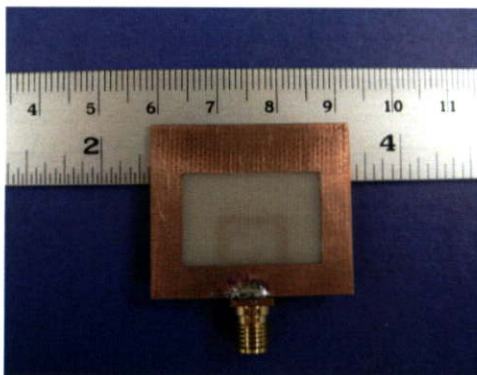
ผลการวัดคุณลักษณะของสายอากาศ

จากการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศในบทที่ 3-4 ผู้วิจัยจึงได้นำสายอากาศที่ออกแบบไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ เพื่อนำไปวัดคุณลักษณะของสายอากาศ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวัดคุณลักษณะของสายอากาศจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันระหว่างผลการวัดกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D โดยนำสายอากาศที่ได้จากการจำลองมาสร้างบนวัสดุฐานรอง FR4 จำนวนสี่รูปแบบคือ สายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้าง ยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยว 2 รูปแบบคือ สายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และพาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-Shaped) และสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์

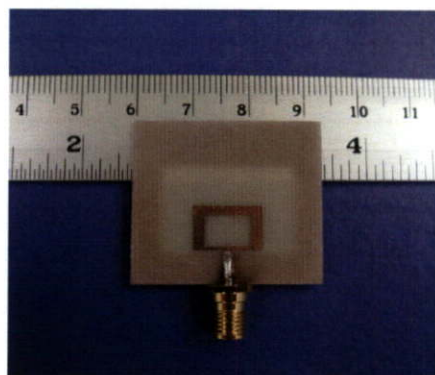
5.1 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ผลการวัดคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการสร้างจริงแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ และ อัตราขยายของสายอากาศ

5.1.1 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า



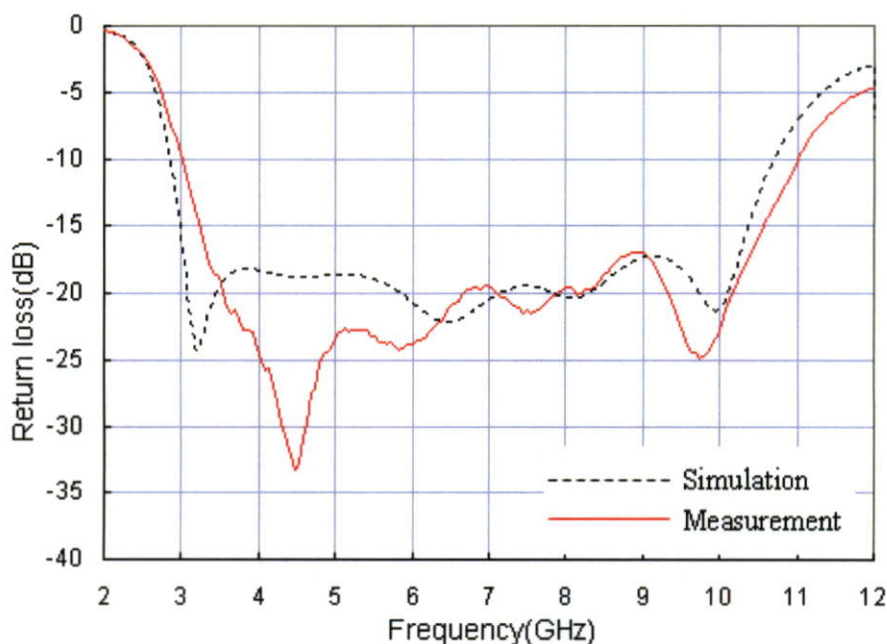
(ก) สายอากาศที่สร้างจริงด้านหน้า



(ข) สายอากาศที่สร้างจริงด้านหลัง

รูปที่ 5.1 ต้นแบบสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศต้นแบบจะใช้เครื่อง Agilent E8363B network analyzer โดยโครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า และสายอากาศที่สร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 แสดงดังรูปที่ 5.1(ก)-(ข) และการเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

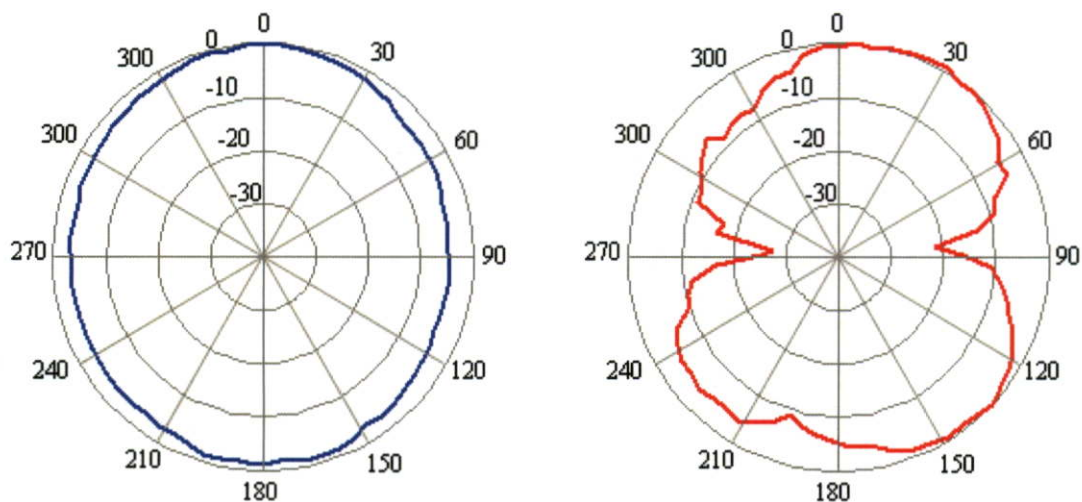
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากผลการจำลองและผลการวัดจริง

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการจำลอง	ผลการวัด
ช่วงความถี่ (GHz)	2.86 – 10.70	3.03 – 11.01
แบนด์วิดท์ (BW)	7.84 GHz	7.98 GHz

เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดจริงของสายอากาศมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องใกล้เคียงกัน ซึ่งผลจากการวัดชิ้นงานจริงจะมีแบนด์วิดท์มากกว่าผลที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย และครอบคลุมย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ซึ่งมีแถบความถี่ตั้งแต่ 3.10-10.60 GHz โดยรายละเอียดของช่วงความถี่และแบนด์วิดท์จะแสดงในตารางที่ 5.1 ดังนั้น สายอากาศที่ออกแบบและสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ สามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ได้

5.1.2 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้าง ที่ยังยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

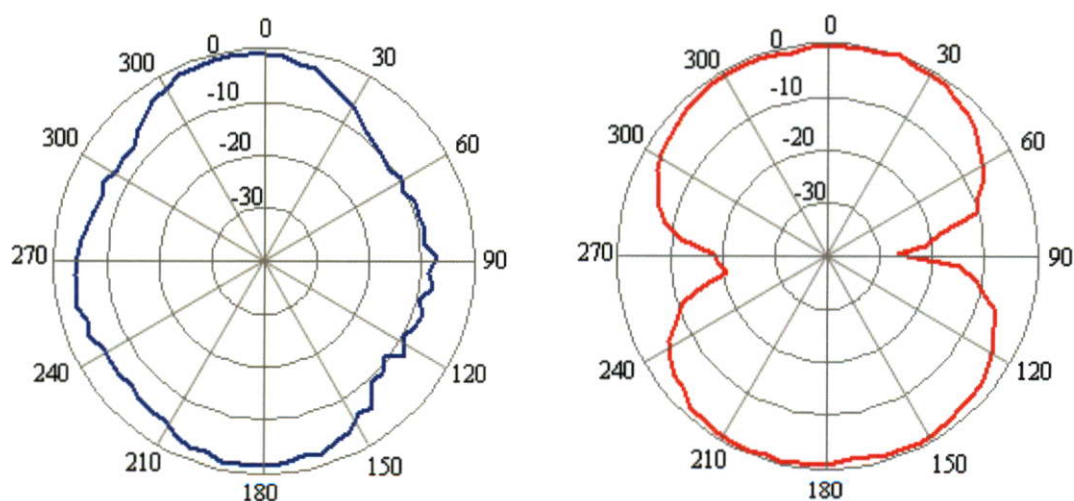
ในการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศจะใช้เครื่อง Agilent E8363B network analyzer ในห้องแชมเบอร์ จากช่วงความถี่ที่ได้จากการวัดผลค่าการสูญเสียย้อนกลับตั้งแต่ 3.03-11.01 GHz นั้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกวัดรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.1 GHz 4.5 GHz และ 7 GHz ในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ YZ) และระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ XZ) โดยผลการวัดแสดงดังรูปที่ 5.3-5.5



(ก) ระนาบ XZ

(ข) ระนาบ YZ

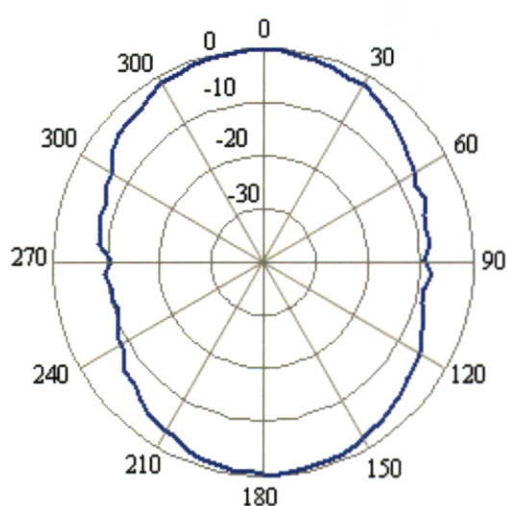
รูปที่ 5.3 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz



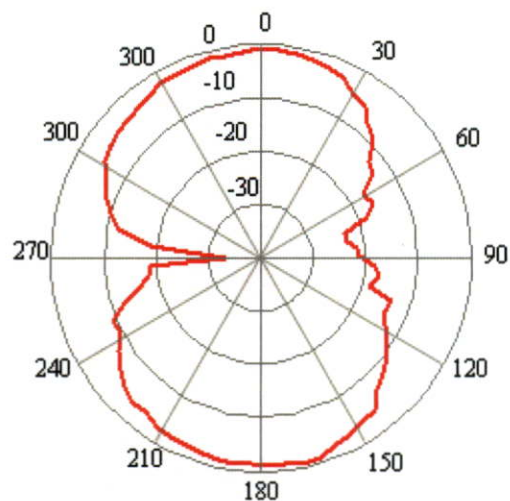
(ก) ระนาบ XZ

(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.4 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz



(ก) ระนาบ XZ



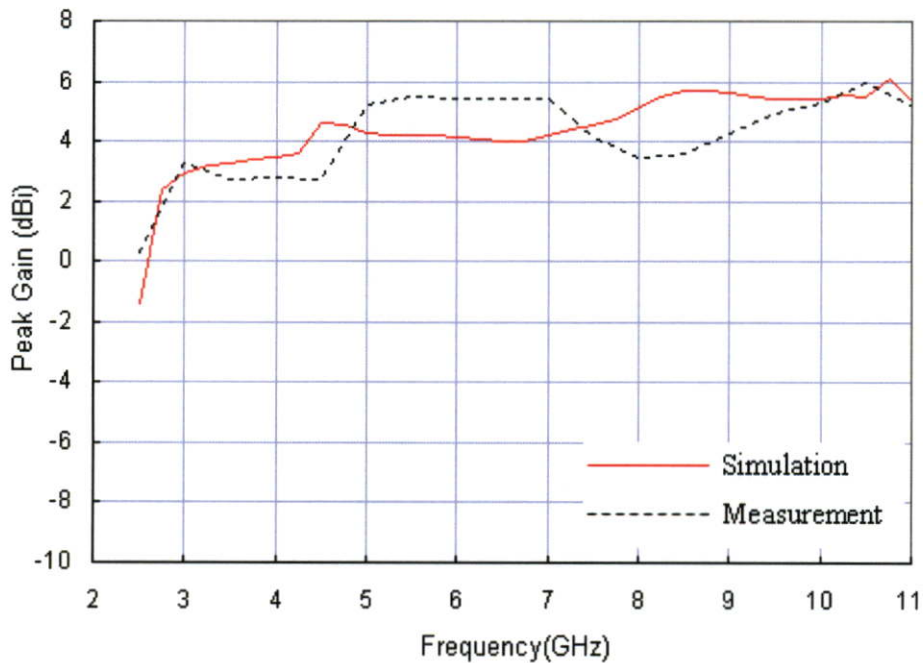
(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.5 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz

จากผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5.3-5.5 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ XZ เป็นแบบรอบทิศทาง (omni-directional) และในระนาบ YZ เป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional)

5.1.3 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบ สายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะใช้เครื่อง Agilent E8363B network analyzer วัดจากช่วงความถี่ 2.5-11 GHz ผู้วิจัยจะทำการวัดอัตราขยายของสายอากาศโดยมีระยะห่างแต่ละความถี่เท่ากับ 0.5 GHz โดยผลการวัดเปรียบเทียบกับผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลวัดจริงของอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูปที่ 5.6 แสดงผลจากการวัดและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากรูปจะเห็นว่าตลอดย่านความถี่ที่ 2.5-11 GHz เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการจำลองแนวโน้มใกล้เคียงกันแต่อาจมีแตกต่างกันบ้างและอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศจะประมาณ 4 dBi

5.2 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่มีการกรองแถบความถี่ 5-6 GHz

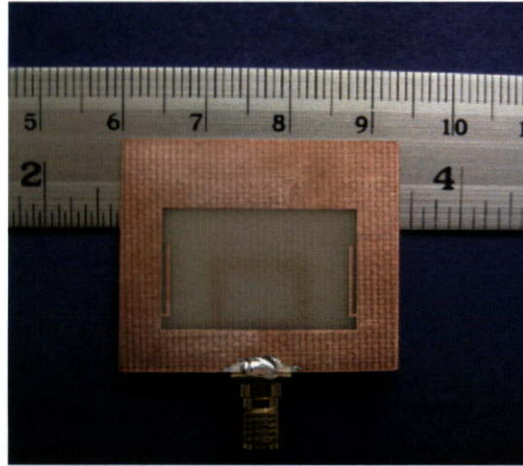
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการวัดสายอากาศช่องเปิดที่มีการกรองย่านความถี่ 5-6 GHz เพื่อลดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ย่านความถี่ 5-6 GHz กับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด ในการออกแบบสายอากาศที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวในหัวข้อนี้จะใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลและรูปตัวเจ ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

5.2.1 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

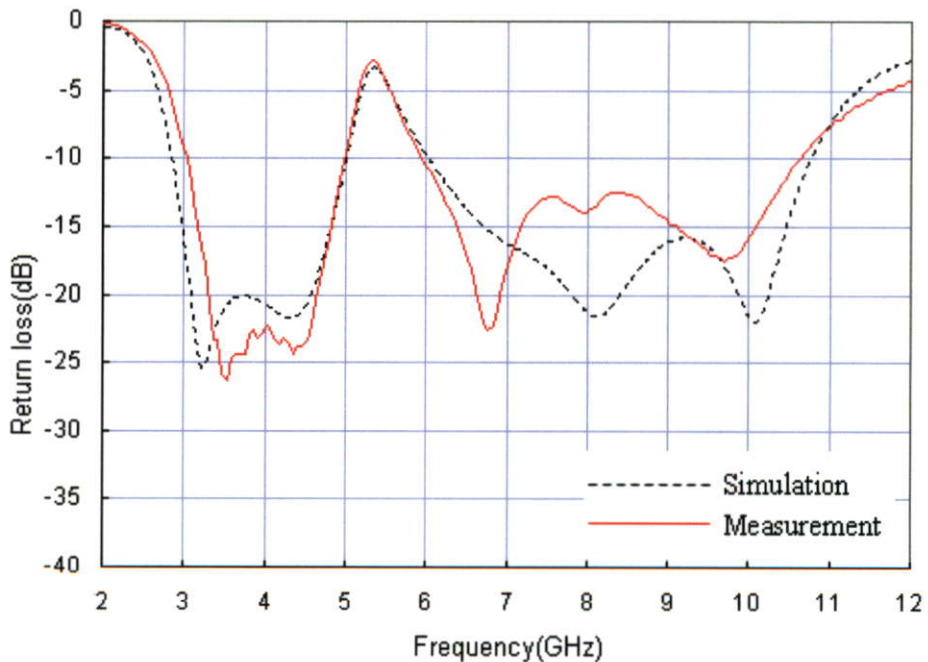
ในหัวข้อนี้จะทำการวัดคุณลักษณะของสายอากาศแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอลจากการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ โดยผู้วิจัยจะนำเสนอ ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ และอัตราขยายของสายอากาศตามลำดับ

5.2.1.1 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซีติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

การวัดสายอากาศในหัวข้อ ผู้วิจัยจะนำโครงสร้างของสายอากาศในหัวข้อ 5.1 มาทำการพัฒนาด้วยการแทรกพาราซีติกอิเลเมนต์รูปตัวแอลลงในช่องเปิดด้านซ้ายและด้านขวาของสายอากาศ โดยมีวัตถุประสงค์กรองช่วงความถี่ 5-6 GHz และนำผลการจำลองที่ได้จากบทที่ 4 ทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ ซึ่งสายอากาศต้นแบบที่สร้างจริงแสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 สายอากาศที่สร้างจริงของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซีติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลวัดจริงการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซีติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

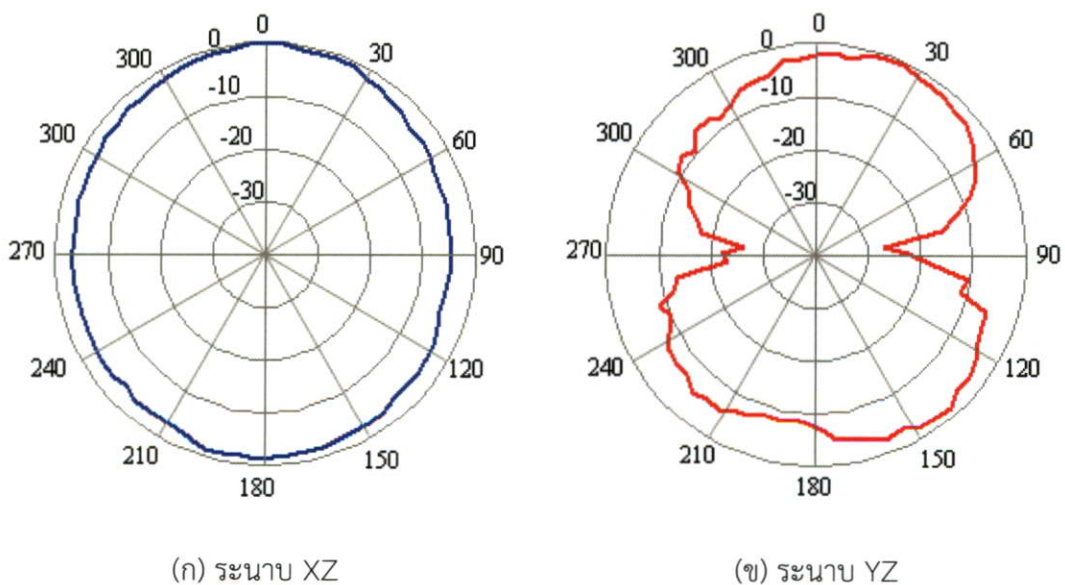
ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองและการผลวัดคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัด
ช่วงความถี่ (GHz)	2.86 – 10.76	3.05 – 10.6
แบนด์วิดท์(BW)	7.90 GHz	7.55 GHz
ช่วงความถี่ที่ถูกกรอง(band-notched)	5.0-6.0 GHz	4.98-5.97 GHz
แบนด์วิดท์(BW)	1.0 GHz	0.90 GHz

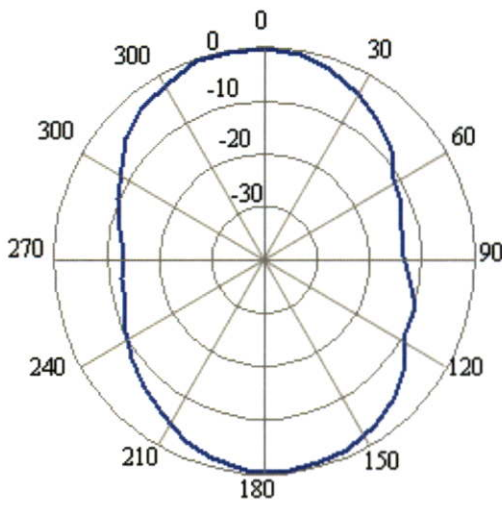
จากรูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับระหว่างสายอากาศที่จำลองด้วยโปรแกรม IE3D และสายอากาศที่สร้างจริง จะเห็นได้ว่าผลการจำลองและการวัดจะได้ผลมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบผลช่วงความถี่ที่ต้องการกรองออกไปคือ 5-6 GHz ซึ่งผลที่ได้จากการวัดจะใกล้เคียงกับผลการจำลอง และรายละเอียดคุณลักษณะของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 5.2 ดังนั้น สายอากาศที่นำเสนอสามารถกรองช่วงความถี่ 5-6 GHz จึงไม่ทำให้เกิดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างเครือข่ายไร้สาย (WLAN) และ เครือข่ายแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ทำให้สายอากาศที่นำเสนอสามารถนำไปใช้สำหรับช่วงความถี่แบบแถบยิ่งยวดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2.1.2 แบบรูปแบบการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

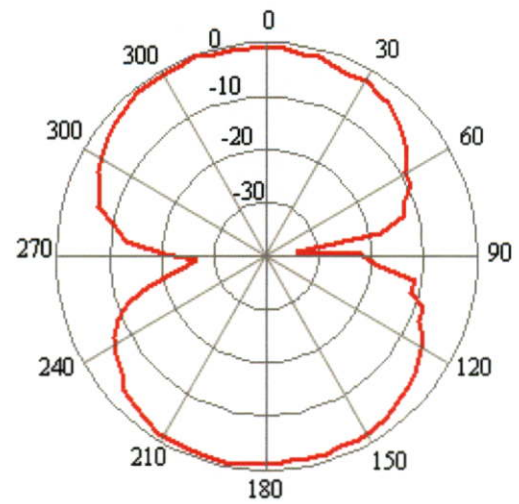
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped) จากช่วงความถี่ที่ได้จากการวัดผลคือ 3.05 – 10.6 GHz นั้น แต่ผู้วิจัยได้เลือกวัดแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.1 GHz 4.5 GHz และ 7 GHz เท่านั้น ซึ่งจะทำให้การวัดในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ YZ) และระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ XZ) โดยผลการวัดแสดงดังรูปที่ 5.9-5.11 ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz

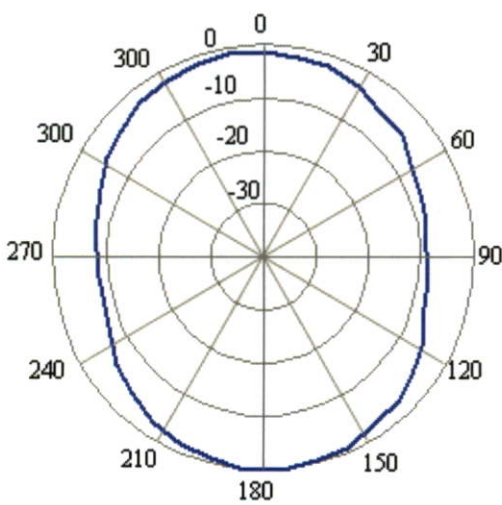


(ก) ระนาบ XZ

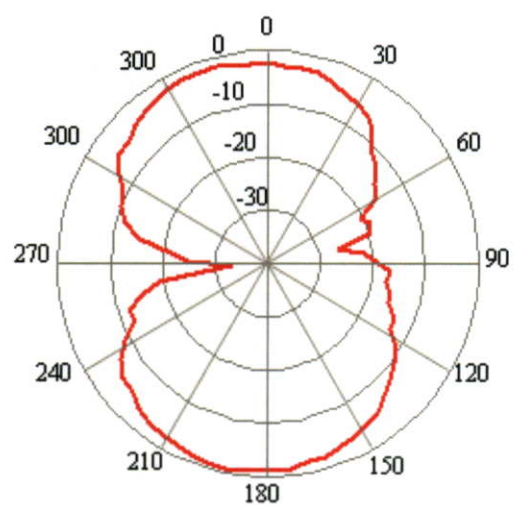


(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.10 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz



(ก) ระนาบ XZ



(ข) ระนาบ YZ

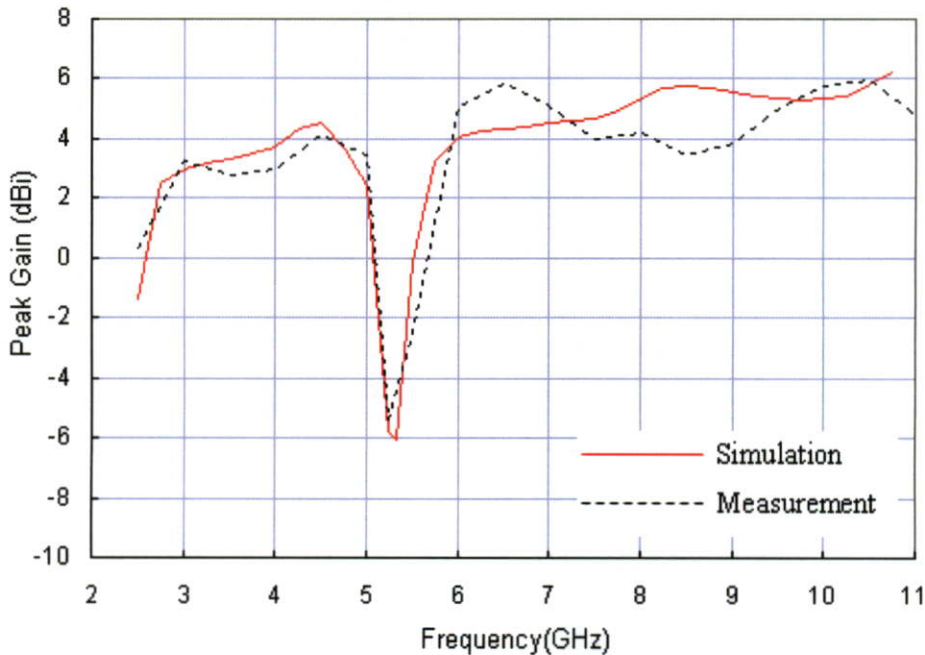
รูปที่ 5.11 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz

จากผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดตั้งที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5.9-5.11 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ YZ เป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional) ส่วนในระนาบ XZ แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง (omni-directional)

5.2.1.3 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

ในการวัดอัตราขยายของสายอากาศจะทำการกำหนดช่วงความถี่ที่วัด คือตั้งแต่ช่วง 2.5-11 GHz และให้ระยะห่างของความถี่ที่วัดห่างกัน 0.5 GHz ผลการวัดเปรียบเทียบกับผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.12

จากรูปที่ 5.12 แสดงผลจากการวัดและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped) จากผลที่ได้จากการวัดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจะเห็นว่าตลอดย่านความถี่ที่ 2.5-11 GHz ผลการวัดในบางความถี่จะมีอัตราขยายที่น้อยกว่าและมากกว่าผลการจำลอง ที่เป็นเช่นนี้อาจมีผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของวัสดุฐานรอง จากผลการวัดอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศจะประมาณ 4 dBi และช่วงความถี่ 5-6 GHz ที่ต้องการกรองไม่ให้ใช้งานนั้น จะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ดังกล่าวอัตราขยายของสายอากาศก็จะลดต่ำกว่าศูนย์ ทำให้ช่วงความถี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ ส่วนช่วงความถี่อื่น ๆ ของสายอากาศนี้ยังคงใช้งานได้ตามปกติ



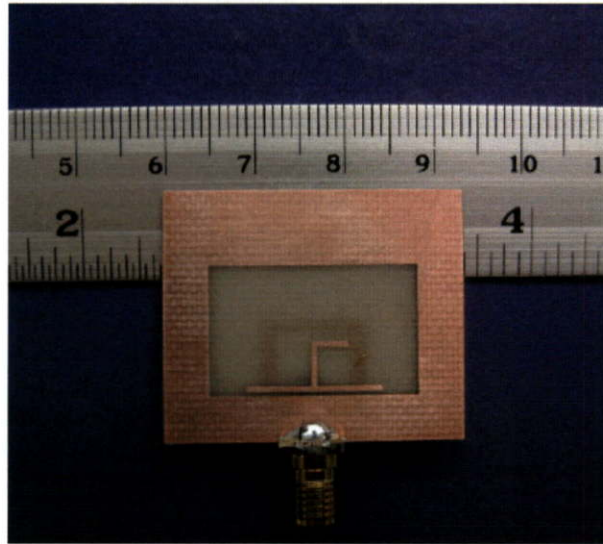
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลการจำลองและการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)

5.2.2 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

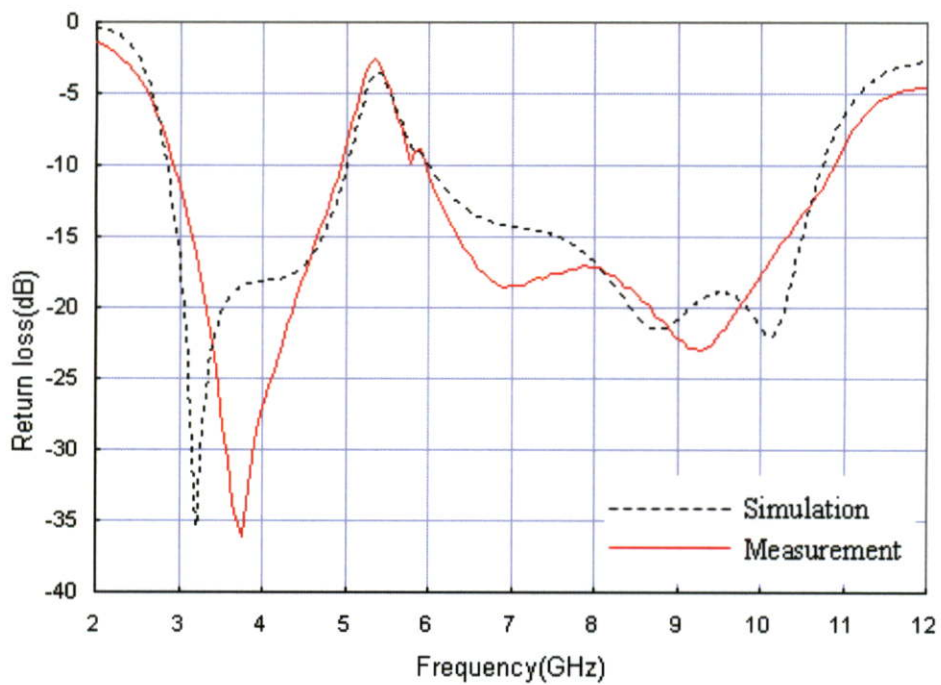
สายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped) เป็นสายอากาศอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าเสนอในหัวข้อนี้เพื่อต้องการกรองย่านความถี่ 5-6 GHz โดยจะทำการจำลองผล และนำผลที่ได้จากการจำลองมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ และอัตราขยายของสายอากาศ

5.2.2.1 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

สายอากาศรูปแบบนี้เป็นการนำโครงสร้างของสายอากาศในหัวข้อที่ 5.1 มาทำการพัฒนาด้วยการแทรกพาราซิติกรุปตัวเจลงในช่องเปิดของสายอากาศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สายอากาศสามารถทำการกรองช่วงความถี่ 5-6 GHz ซึ่งสายอากาศต้นแบบที่สร้างจริงแสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ต้นแบบสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์ที่ใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

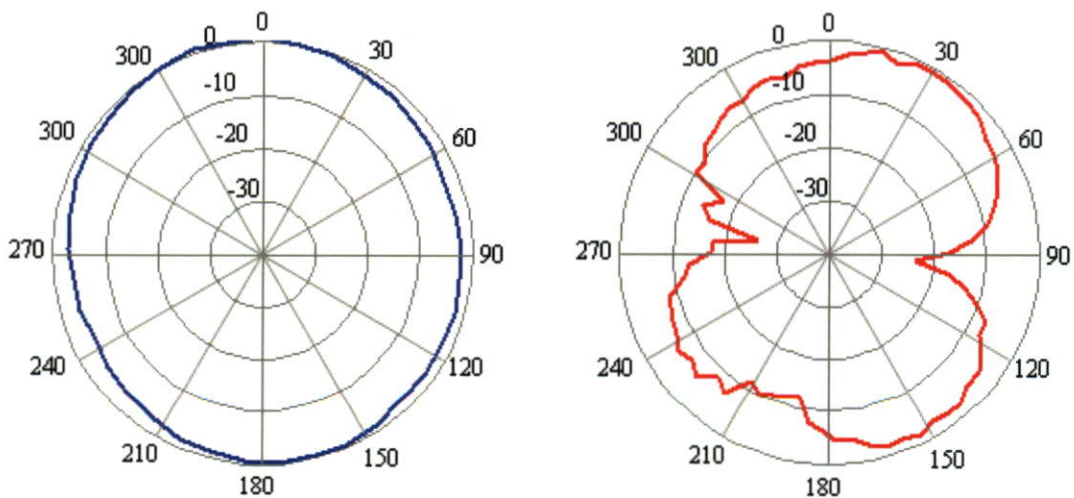
ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศจากการจำลองและวัดจริงของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัด
ช่วงความถี่ (GHz)	2.86 – 10.72	2.98 – 10.85
แบนด์วิดท์ (BW)	7.86 GHz	7.87 GHz
ช่วงความถี่ที่ถูกกรอง (band-notched)	5.02-6.0 GHz	4.93-5.96 GHz
แบนด์วิดท์ (BW)	0.98 GHz	1.03 GHz

จากรูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับระหว่างสายอากาศที่จำลองด้วยโปรแกรม IE3D และสายอากาศที่สร้างจริงของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยว จะเห็นว่าผลที่ได้จากการวัดจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลอง และเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างช่วงความถี่ 5-6 GHz ที่ถูกกรองออกไป ผลที่ได้จากการวัดจะใกล้เคียงกับผลการจำลอง โดยรายละเอียดคุณลักษณะของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 5.3 ดังนั้น สายอากาศที่นำเสนอสามารถกรองช่วงความถี่ 5-6 GHz ได้ ทำให้ไม่เกิดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างเครือข่ายไร้สาย (WLAN) และเครือข่ายแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) จึงส่งผลให้สายอากาศที่นำเสนอสามารถนำไปใช้สำหรับช่วงความถี่แบบแถบยิ่งยวดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่มีการแทรกแซงจากโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

5.2.2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

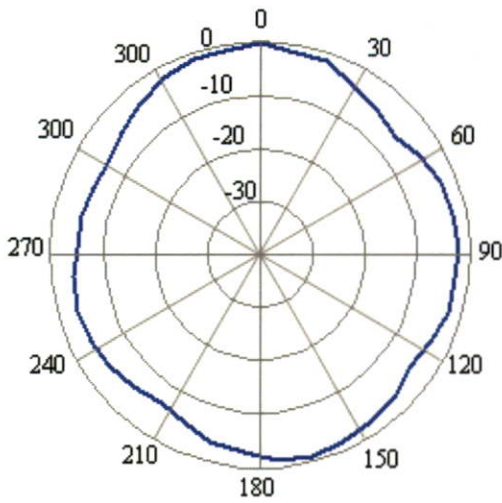
การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped) จากช่วงความถี่ที่ได้จากการวัดผลคือ 2.98 – 10.85 GHz ผู้วิจัยได้เลือกวัดแบบรูปการแผ่พลังงานเฉพาะที่ความถี่ 3.1 GHz 4.5 GHz และ 7 GHz ซึ่งผลการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ YZ) และระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ XZ) แสดงดังรูปที่ 5.15-5.17



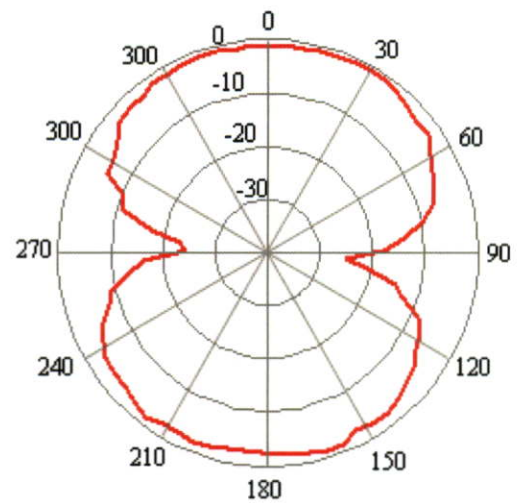
(ก) ระนาบ XZ

(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.15 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz

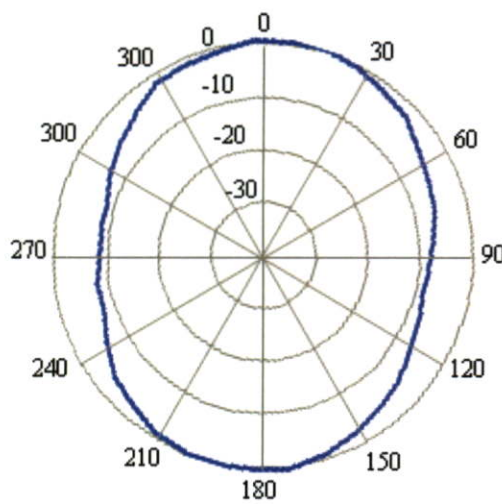


(ก) ระนาบ XZ

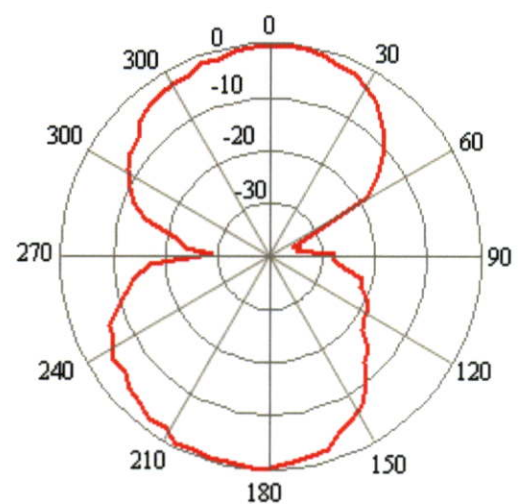


(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.16 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz



(ก) ระนาบ XZ



(ข) ระนาบ YZ

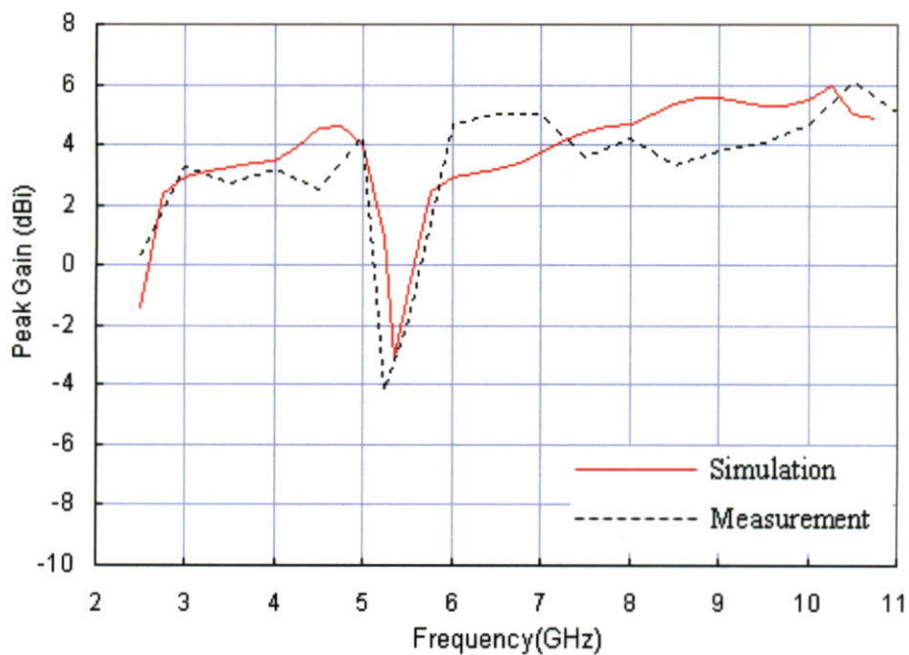
รูปที่ 5.17 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz

ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอลิเมนต์รูปตัวเจแสดงอยู่ในรูปที่ 5.15-5.17 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ XZ เป็นแบบรอบทิศทาง (omni-directional) และระนาบบน YZ เป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional)

5.2.2.3 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

การวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped) จะทำการวัดในช่วงความถี่ตั้งแต่ช่วง 2.5-11 GHz โดยมีระยะห่างของแต่ละความถี่ห่างกัน 0.5 GHz ผลการวัดเปรียบเทียบกับผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.18

จากรูปที่ 5.18 แสดงผลจากการวัดและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped) จากผลวัดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจะเห็นได้ว่าตลอดย่านความถี่ที่ 2.5-11 GHz ผลการวัดจะมีอัตราขยายต่างกันบ้าง อาจมีผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของวัสดุฐานรอง จากผลการวัดอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศจะอยู่ที่ 4 dBi และช่วงความถี่ 5-6 GHz ที่ต้องการกรองไม่ให้ใช้งานนั้น จะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ดังกล่าวอัตราขยายของสายอากาศก็ลดต่ำกว่าศูนย์ ทำให้ช่วงความถี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ ส่วนช่วงความถี่อื่น ๆ ของสายอากาศนี้ยังคงใช้งานได้ปกติ



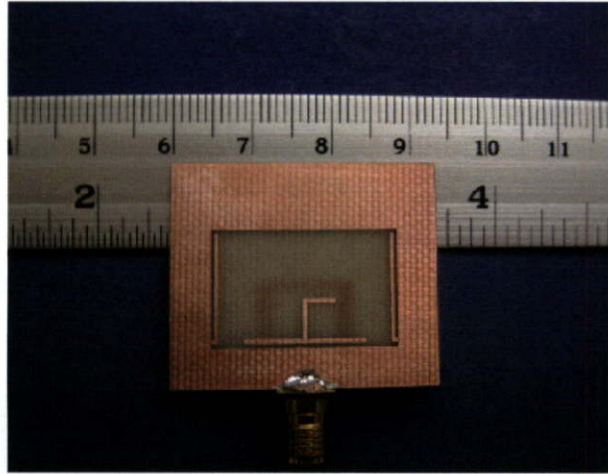
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวเจ (J-shaped)

5.3 ผลการวัดสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์ที่มีการกรองย่านความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz

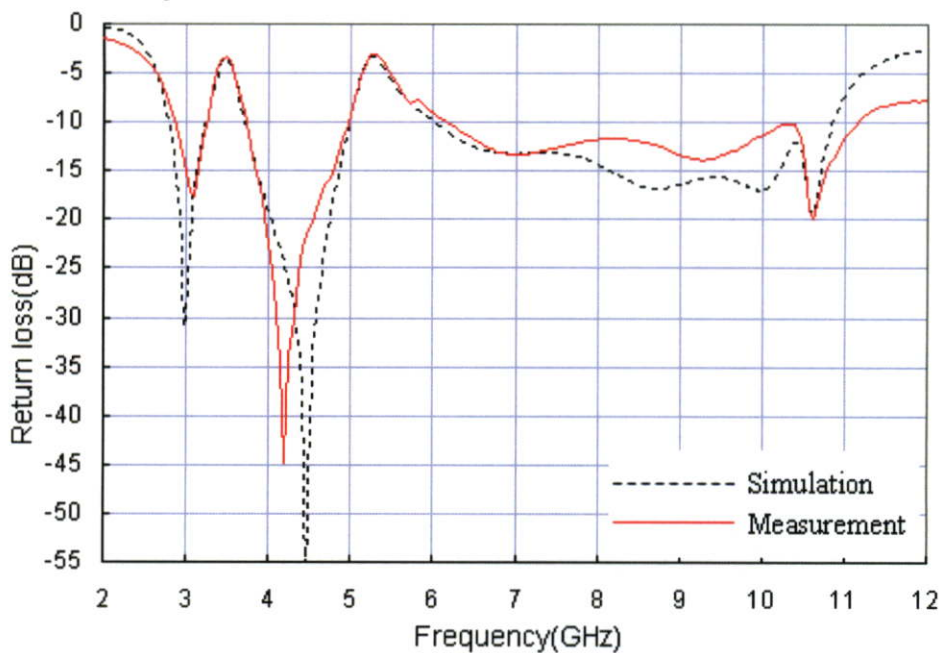
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวัดคุณลักษณะของสายอากาศที่มีสองแบนด์นอตช์ ดังนี้คือ ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ และอัตราขยายของสายอากาศ ตามลำดับ

5.3.1 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์

โครงสร้างของสายอากาศนี้เป็นการนำโครงสร้างของสายอากาศในหัวข้อ 5.1-5.3 มาทำการพัฒนาโดยการแทรกคู่อุปกรณ์รูปตัวแอลในช่องเปิดด้านซ้ายและด้านขวาของสายอากาศ และแทรกรูปตัวเจตรงกลางของช่องเปิดแสดงดังรูปที่ 5.19 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สายอากาศสามารถทำการกรองช่วงความถี่ 3.4-3.69 GHz (WiMAX) และ 5-6 GHz (WLAN) โดยสายอากาศต้นแบบที่ทำการสร้างจริงแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ต้นแบบสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์

ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับจากต้นแบบสายอากาศที่สร้าง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D จะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.20 ซึ่งผลที่ได้จากการวัดจะใกล้เคียงกัน กับผลการจำลอง โดยมีสองแบนด์นอตช์ที่ต้องการกรองออกไปคือช่วง 3.4-3.69 GHz (WiMAX) และช่วง

5-6 GHz (WLAN) ซึ่งผลที่ได้จากการวัดสามารถครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการกรองได้ทั้งสองช่วงความถี่ รายละเอียดของคุณลักษณะของสายอากาศแสดงในตารางที่ 5.4

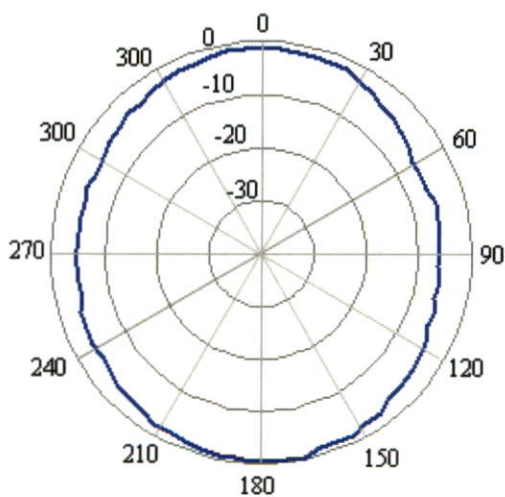
ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัด
ช่วงความถี่ (GHz)	2.8-10.84	2.87-11.12
แบนด์วิดท์(BW)	8.04 GHz	8.25 GHz
ช่วงความถี่แรกที่ถูกกรอง (band-notched)	3.24-3.7 GHz	3.25-3.69 GHz
แบนด์วิดท์ (BW)	0.46 GHz	0.44 GHz
ช่วงความถี่ที่สองที่ถูกกรอง (band-notched)	4.98-6.0 GHz	5.01-6.11 GHz
แบนด์วิดท์ (BW)	1.02 GHz	1.1 GHz

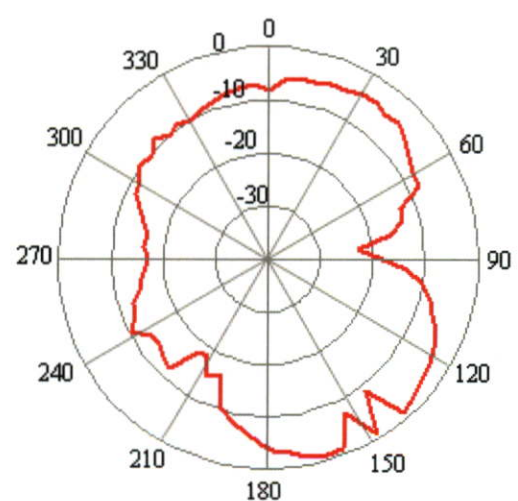
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สายอากาศที่นำเสนอสามารถกรองช่วงความถี่ 3.4-3.69 GHz (WiMAX) และ 5-6 GHz (WLAN) ส่วนช่วงความถี่อื่นๆ ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.87-11.12 GHz ยังคงสามารถใช้งานได้ปกติ ดังนั้นสายอากาศนี้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากไม่มีการสอดแทรกของย่านความถี่ WiMAX 3.5 GHz และ WLAN 5-6 GHz

5.3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์

แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตช์ จากช่วงความถี่ที่ได้จากการวัดผลคือ 2.87 - 11.12 GHz นั้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกวัดรูปการแผ่พลังงานเฉพาะที่ความถี่ 3.1 GHz 4.5 GHz และ 7 GHz ตามลำดับ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลจากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า (ระนาบ YZ) และระนาบสนามแม่เหล็ก (ระนาบ XZ) ซึ่งผลการวัดแสดงดังรูปที่ 5.21-5.23 ตามลำดับ

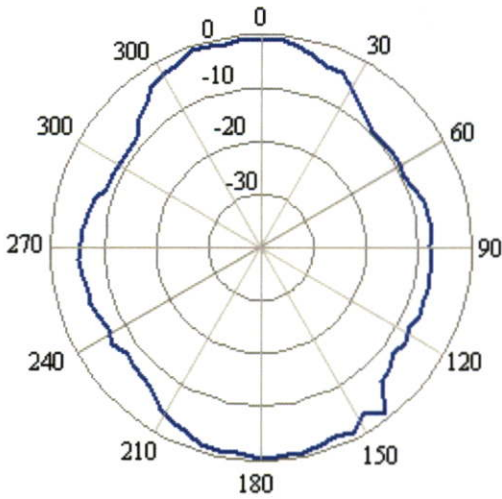


(ก) ระนาบ XZ

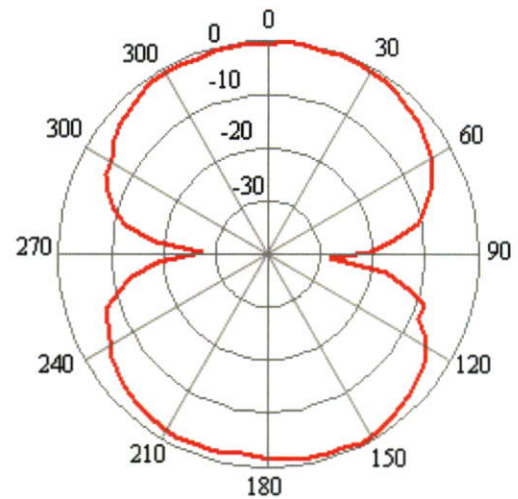


(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.21 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 3.1 GHz

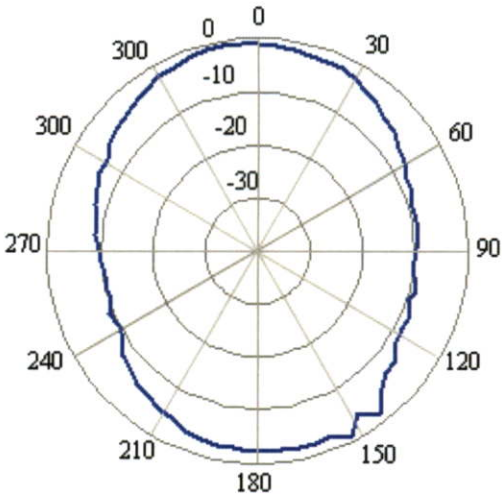


(ก) ระนาบ XZ

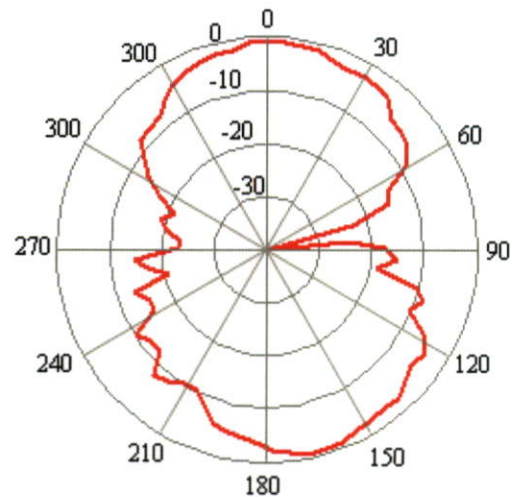


(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.22 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 4.5 GHz



(ก) ระนาบ XZ



(ข) ระนาบ YZ

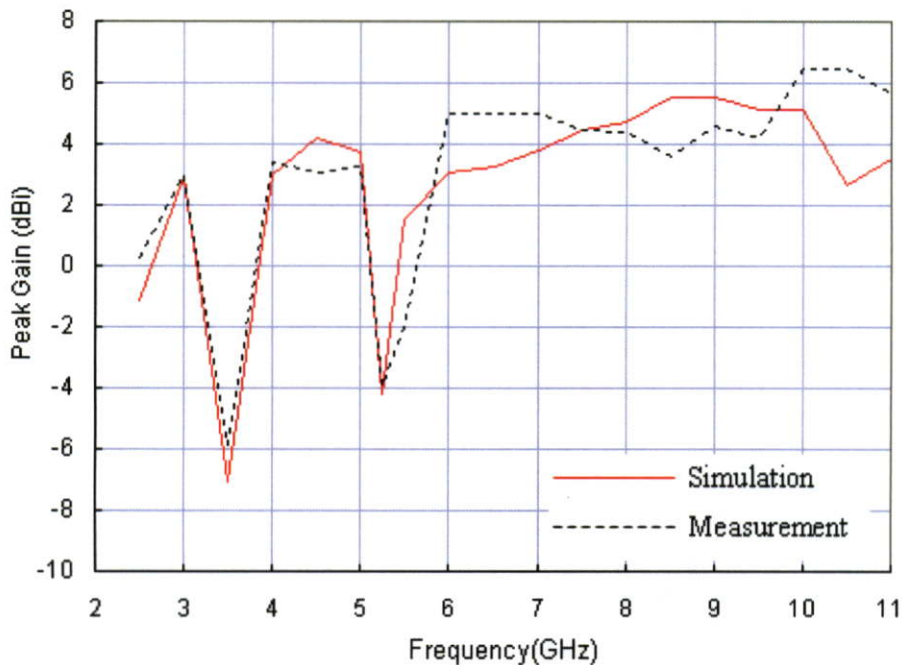
รูปที่ 5.23 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่ความถี่ 7.0 GHz

จากผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5.21-5.23 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ XZ เป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) ส่วนในระนาบ YZ เป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional)

5.3.3 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์

ในการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์ที่ใช้พาราซิติคอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped) และรูปตัวเจ (J-shaped) จะกำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่ช่วง 2.5-11 GHz โดยให้ระยะห่างของแต่ละความถี่ห่างกันเท่ากับ 0.5 GHz และผลที่ได้จากการจำลองและผลการวัดเปรียบเทียบกันแสดงดังรูปที่ 5.24 จากรูปจะเห็นได้ว่าตลอดย่านความถี่ที่ 2.5-11 GHz เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการจำลองแนวโน้มอัตราขยายไม่ค่อยเท่ากันที่ช่วงความถี่สูง อาจเป็น

เพราะวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศต้นแบบมีคุณภาพไม่ดีพอ แต่แนวโน้มก็ยังนำไปใช้งานได้ อัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศประมาณ 4 dBi และ จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงความถี่ 3.24-3.69 และ 5-6 GHz อัตราขยายของสายอากาศก็จะต่ำกว่าศูนย์ ทำให้ช่วงความถี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ ส่วนช่วงความถี่อื่น ๆ ตลอดย่านความถี่ของ UWB ของสายอากาศนี้ยังคงใช้งานได้ดี



รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดสองแบนด์นอตซ์

5.4 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการวัดและการจำลอง ประกอบด้วย สายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซีติกอิลิเมนต์สองรูปแบบ คือ รูปตัวแอล และรูปตัวเจ และสุดท้ายเป็นสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีผลใกล้เคียงกัน และสามารถครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.6 GHz สำหรับความถี่แบบแถบกว้างยิ่ง (UWB) ส่วนสายอากาศช่องเปิดแบนด์นอตซ์เดี่ยวที่ใช้พาราซีติกอิลิเมนต์สองรูปแบบ คือ รูปตัวแอล และรูปตัวเจ ก็มีผลใกล้เคียงกัน โดยสามารถรองรับความถี่ตั้งแต่ 5-6 GHz และผลที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการวัดของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตซ์จะใกล้เคียงกัน โดยสามารถรองรับความถี่ 3.24-3.69 GHz และ 5-6 GHz ได้ ทำให้ครอบคลุมย่านความถี่ WiMAX (3.4-3.69 GHz) และย่านความถี่ WLAN (5-6 GHz) โดยมีแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ YZ เป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional) ส่วนในระนาบ XZ แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง (omni-directional) และมีอัตราขยายเฉลี่ยของสายอากาศประมาณ 4 dBi

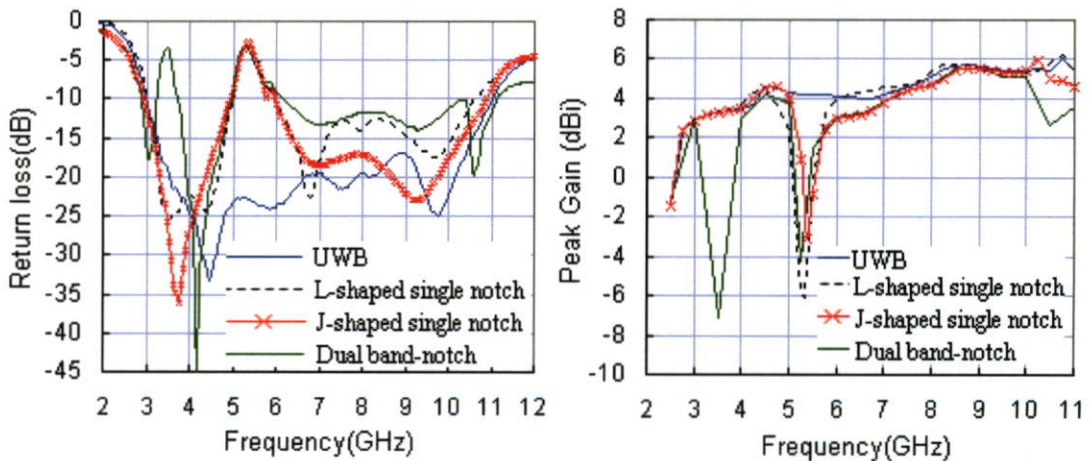
บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดกว้างที่มีการควบคุมคุณลักษณะของแบนด์นอตซ์สำหรับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ซึ่งในการออกแบบจะเริ่มจากสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแบบไมโครสตริปไลน์ และทำการปรับปรุงสายอากาศให้สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น โดยใช้ตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อนำไปใช้งานย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด จากนั้นทำการพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์นอตซ์ เพื่อลดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างกาสื่อสารไร้สาย (WLAN) กับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) โดยใช้พาราซิติกอิเลเมนต์ 2 รูปร่างคือ รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) เพื่อช่วยกรองแถบความถี่ 5-6 GHz และลำดับสุดท้ายเป็นการพัฒนาสายอากาศช่องเปิดให้มีสองแบนด์นอตซ์ (Dual band-notch) โดยใช้พาราซิติกอิเลเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) ร่วมกับรูปตัวเจ (J-Shaped) มาใช้ในการพัฒนา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองความถี่ย่าน WiMAX (3.5 GHz) และการสื่อสารไร้สาย (WLAN) (5-6 GHz) ออก การออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วัสดุฐานรองชนิด FR4 มาทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ เนื่องจากวัสดุฐานรอง FR4 นั้นหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก จากผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด จะเห็นได้ว่ามีผลใกล้เคียงกัน

6.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้งานย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) ผู้วิจัยได้แบ่งการออกแบบและวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบแถบกว้างยิ่งยวดโดยใช้เทคนิคจากตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) ประกอบไปด้วย ตัวปรับแบบสายท่อนสั้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งผลการออกแบบที่ได้สามารถขยาย



(ก) การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

(ข) อัตราขยาย (Gain)

รูปที่ 6.1 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิด

แบนด์วิดท์ให้มากขึ้นแต่ยังคงครอบคลุมแถบความถี่กว้างยิ่ง จากนั้นทำการปรับปรุงตัวปรับแบบสายท่อนสั้นให้เป็นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นรองรับการใช้งานย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งยวด โดยผลที่ได้จากการออกแบบมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.98 GHz (3.03-11.01 GHz) ดังแสดงในรูปที่ 6.1(ก) และอัตราขยายของสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งยวดอยู่ในช่วง 3-6 dBi ดังแสดงในรูปที่ 6.1(ข)

ส่วนที่ 2 เป็นการพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์นอตช์เพื่อลดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างการสื่อสารไร้สาย (WLAN) กับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด (UWB) โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ 2 รูปร่างคือ รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) เพื่อช่วยกรองแถบความถี่ 5-6 GHz ซึ่งจากผลการจำลองสามารถกรองแถบความถี่ดังกล่าวได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1(ก) และยังสามารถนำไปปรับแต่งขนาดเพื่อควบคุมการเลื่อนแบนด์นอตช์เป็นแถบความถี่ 4-5 GHz หรือ 6-7 GHz และสามารถขยายแบนด์วิดท์ของแบนด์นอตช์จาก 1 GHz ขึ้นไปถึง 2 GHz นอกจากนี้มีการพัฒนาสายอากาศช่องเปิดให้มีสองแบนด์นอตช์ (Dual band-notch) โดยใช้พาราซิติกอิลิเมนต์รูปตัวแอล (L-Shaped) และรูปตัวเจ (J-Shaped) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองความถี่ย่าน WiMAX (3.5 GHz) และการสื่อสารไร้สาย (WLAN) (5-6 GHz) ออกพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 6.1(ก) และยังสามารถควบคุมการเลื่อนตำแหน่งและขยายแบนด์วิดท์ของทั้งสองแบนด์นอตช์ได้อีกด้วย อัตราขยายที่แถบความถี่ที่ถูกกรองลดลงดังแสดงในรูปที่ 6.1(ข) และมีแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเป็นแบบสองทิศทาง

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหาที่สำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ส่วนการสร้างสายอากาศต้นแบบ เนื่องจากกระบวนการในการสร้างชิ้นงานของสายอากาศต้นแบบ จะต้องใช้ความเชี่ยวชาญอย่างมาก เพราะในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์จะมีสองระนาบ ถ้าวางตำแหน่งไม่ตรงตามที่ออกแบบไว้ จะทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนไปอย่างมากเมื่อเทียบกับผลการจำลอง การบัดกรีหัวคอนเน็คเตอร์จะมีผลต่อกระทบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์ และที่ขอบของสายอากาศ ถ้าไม่เรียบจะทำให้ผลการวัดไม่ตรงกับผลการจำลอง ดังนั้น จึงต้องใช้ความระมัดระวังในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

ข้อเสนอแนะในการออกแบบแบนด์นอตช์ที่ใช้พาราซิติกอิลิเมนต์ จะต้องคำนึงถึงรูปร่างและตำแหน่งการจัดวางของพาราซิติกอิลิเมนต์ ซึ่งจะมีผลต่อการทำแบนด์นอตช์

บรรณานุกรม

- [1] Federal Communications Commission, "First Report and Order, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems," FCC, 2002.
- [2] C. A. Balanis, Antenna theory analysis and design, third editions, John Wiley & Son, Inc., 2005.
- [3] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl and A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Handbook, Boston: Artech House, 2001.
- [4] I. J. Bahl, and P. Bharita, Microstrip Antenna, Dedham: Artech House, 1980.
- [5] K. F. Lee and W. Chen, Advances in Microstrip and Printed Antennas, New York John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [6] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, J. Nakasuwan, and T. Wakabayashi, "Broadband Slot Antenna Fed by Microstrip Line", *ICEAST 2007*, November 21-23, Thailand, 2007.
- [7] Y. Shih-Huang and W. Kin-Lu, "Dual-band F-shaped monopole antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN Application", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.*, vol. 4, Jun. 2002.
- [8] H. D. Chen, J. S. Chen, and Y. T. Cheng, "Modified Inverted-L Monopole Antenna for 2.4/5.2 GHz Dual-Band Operations," *Electron. Letter*, Vol.39, pp. 1567-1568, 2003.
- [9] C. Horng-Dean, "Slot Antenna Coupled by Microstrip Line for Dual Frequency," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 51, No. 8, pp.1982-1986, August 2003.
- [10] B. Purahong, P. Jearapradikul, T. Archevapanich, N. Anantrasirichai, and O. Sangaroon, "CPW-Fed Slot Antenna with Inset U-Strip Tuning Stub for Wideband", *ICCAS 2008*, Seoul, Korea October 14-17, 2008.
- [11] P. Jearapraditkul, W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, O. Sangaroon and T. Wakabayashi, "Bandwidth Enhancement of CPW-Fed Slot Antenna with Inset Tuning Stub", *ISCIT 2008*, Vientiane, Lao, October 21-23, 2008.
- [12] W. Kueathaweekun, P. Jearapraditkul, N. Anantrasirichai, O. Sangaroon, and T. Wakabayashi, "Wide-band CPW-fed Slot Antenna with Tuning Stub and π -Strip for WLAN/WiMAX Application", *ISPACS 2008*, Bangkok, Thailand, December 8-11, 2008,
- [13] W. Kueathawikun, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert, and T. Wakabayashi, "Microstrip-Fed Slot Antenna with Rectangular-Shaped Tuning Stub for WLAN Application", *ECTI-CON 2008*, Bangkok, Thailand, May 14-17, 2008.

- [14] F. G. Kharakhili, M. Fardis, G. Dadashzadeh, and A. Ahmadi, "Circular Slot with a Novel Circular Microstrip Open Ended Microstrip Feed for UWB Applications," *Progress In Electromagnetic Research, PIER* 68, pp. 161-167, 2007.
- [15] A. Dastranj, A. Imani, and M. NaserMoghaddasi, "Printed Wide-Slot Antenna for Wideband Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 10, Oct. 2008.
- [16] Y. Lee, S. Hong, J. Kim, and J. Choi, "Design of Internal Antenna with Near-Omnidirectional H-Plane Radiation Pattern over Ultra-wide Bandwidth," *ETRI Journal*, vol. 32, no. 1, Feb. 2010.
- [17] A. Dastranj and A. Imani, "Bandwidth Enhancement of Printed E-Shaped Slot Antenna Fed by CPW and Microstrip line," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 4, Apr. 2010.
- [18] M. Gopikrishna, D. D. Krishna, C. K. Anandan, P. Mohanan, and K. Vasudevan, "Design of a Compact Semi-Elliptic Monopole Slot Antenna for UWB Systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 6, June. 2009.
- [19] S. Hong and J. Choi, "Miniaturization of an Ultra-Wideband Antenna with Two Spiral Elements," *ETRI Journal*, vol. 31, no. 1, Feb. 2009.
- [20] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, C. Benjangkaprasert, and T. Wakabayashi, "Compact Slot Antenna with Rectangular-Ring Tuning Stub for Ultra-Wideband Application", *ISPACS 2008*, Bangkok, Thailand, December 8-11, 2008.
- [21] Y. C. Lin and K. J. Hung, "Compact Ultrawideband Rectangular Aperture Antenna and Band-Notched Designs," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 11, pp. 3075-3081, Nov. 2006.
- [22] W. J. Lui, C. H. Cheng, and H. B. Zhu, "Improved Frequency Notched Ultrawideband Slot Antenna Using Square Ring Resonator," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 9, pp. 2445-2450, Sep. 2007.
- [23] X. Qing and Z. N. Chen, "Compact Coplanar Waveguide-fed Ultra-wideband Monopole-like Slot Antenna," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 3, pp. 889-898, 2009.
- [24] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, C. Benjangkaprasert, and T. Wakabayashi, "A Compact UWB Slot Antenna with Band-Notched Design Using Parasitic Stripe", *ISAP 2009*, Bangkok, Thailand, October 20-23, 2009.
- [25] J. Ma, Y. Z. Yin, S. G. Zhou, and L. Y. Zhao, "A New Ultra-Wideband Microstrip-Line Fed Antenna with 3.5/5.5GHz Dual Band-Notch Function," *Progress In Electromagnetic Research Lett.*, vol. 7, pp. 79-85, 2009.
- [26] K. S. Ryu and A. A. Kishk, " UWB Antenna With Single or Dual Band-Notches for Lower WLAN Band and Upper WLAN Band," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 12, pp. 3942-3950, December 2009.

- [27] Y. Zhu, F. S. Zhang, C. Lin, Q. Zhang, and J. X. Huang, "A Novel Dual Band-Notched Monopole Antenna for Ultra-wideband Application," *Progress In Electromagnetic Research Lett.*, vol. 16, pp. 109-117, 2010.
- [28] G.-P. Gao, Z.-L. Mei, and B.-N. Li, "Novel Circular Slot UWB Antenna with Dual Band-notched Characteristic", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 15, 49, 2010.
- [29] Zeland Software, Inc., IE3D, New York.

ภาคผนวก

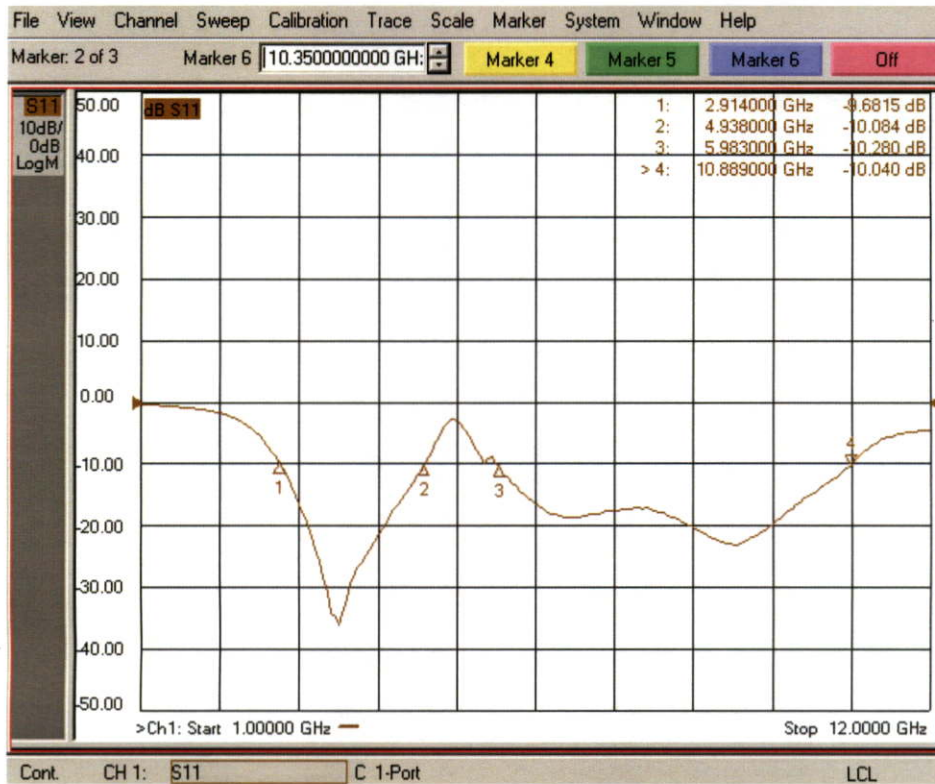
ภาคผนวก ก.
ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิด



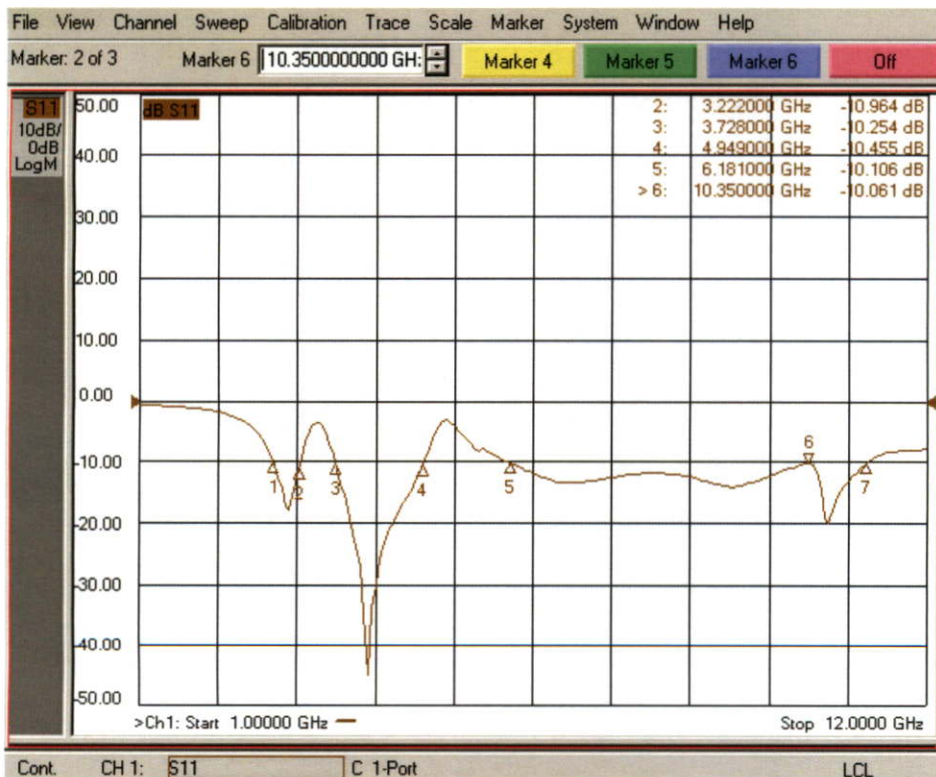
รูปที่ ก.1 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (Tuning stub) วงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ ก.2 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยใช้พาราซิติกอิมเมนต์รูปตัวแอล (L-shaped)



รูปที่ ก.3 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีแบนด์นอตช์เดี่ยวโดยใช้พาราซิติกไกลอเมเน็ตรูปตัวเจ (J-shaped)



รูปที่ ก.4 ผลการวัดการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศช่องเปิดที่มีสองแบนด์นอตช์

ภาคผนวก ข.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert, and T. Wakabayashi, "Compact Slot Antenna with Rectangular-Ring Tuning Stub for Ultra-Wideband Application", *ISPACS 2008*, Bangkok, Thailand, December 8-11, 2008.
- [2] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert, and T. Wakabayashi, "A Compact UWB Slot Antenna with Band-Notched Design Using Parasitic Stripe", *ISAP 2009*, Bangkok, Thailand, October 20-23, 2009.
- [3] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert, J. Nakasuwan, and T. Wakabayashi, "Controllable Band-Notched Slot Antenna for UWB Communication Systems", *ETRI Journal*, vol. 34, no. 5, October 2012.

บทความอื่นๆ ที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, J. Nakasuwan, and T. Wakabayashi, "Broadband Slot Antenna Fed by Microstrip Line", *ICEAST 2007*, November 21-23, Thailand, 2007.
- [2] W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert, and T. Wakabayashi, "Microstrip-Fed Slot Antenna with Rectangular-Shaped Tuning Stub for WLAN Application", *ECTI-CON 2008*, Bangkok, Thailand, May 14-17, 2008.
- [3] P. Jearapraditkul, W. Kueathaweekun, N. Anantrasirichai, O. Sangaroon and T. Wakabayashi, "Bandwidth Enhancement of CPW-Fed Slot Antenna with Inset Tuning Stub", *ISCIT 2008*, Vientiane, Lao, October 21-23, 2008.
- [4] W. Kueathaweekun, S. Puntheeranurak, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert, and T. Wakabayashi, "Microstrip-Fed Slot Antenna with Cross-Shaped Tuning Stub for UWB Application", *ISCIT 2008*, Vientiane, Lao, October 21-23, 2008.
- [5] W. Kueathaweekun, P. Jearapraditkul, N. Anantrasirichai, O. Sangaroon, and T. Wakabayashi, "Wide-band CPW-fed Slot Antenna with Tuning Stub and π -Strip for WLAN/WiMAX Application", *ISPACS 2008*, Bangkok, Thailand, December 8-11, 2008,
- [6] W. Kueathaweekun, S. Puntheeranurak, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, and T. Wakabayashi, "Wide-Band Slot Antenna Fed by Coplanar Waveguide for WLAN Applications", *JSST 2009*, Shiga, Japan, October 7-9, 2009.
- [7] W. Kueathaweekun, B. Purahong, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, and T. Wakabayashi, "Compact CPW-Fed Wide Slot Antenna for Ultra-Wideband Applications", *JSST 2009*, Shiga, Japan, October 7-9, 2009.
- [8] W. Kueathaweekun, C. Benjangkprasert, O. Sangaroon, N. Anantrasirichai, and T. Wakabayashi, "Wide-band and Dual Wide-band Slot Antenna for WLAN Applications", *JICTEE 2010*, Luang Prabang, Lao, December 21- 24, 2010.
- [9] A. Charoenphol, W. Kueathaweekun, C. Benjangkprasert, "Adaptive Forgetting Factor RLS Algorithm Equalizer for DS-CDMA Systems", *JICTEE 2010*, Luang Prabang, Lao, December 21- 24, 2010.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวีรเทพ เกื้อทวีกุล
วัน เดือน ปีเกิด	12 เมษายน 2522 ที่จังหวัดตาก
ที่อยู่	31 หมู่ 4 ต. ศิริราษฎร์ อ. พบพระ จ. ตาก 63160
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2541 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก พ.ศ. 2543 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก พ.ศ. 2545 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2549 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งงานปัจจุบัน	นักวิชาการคอมพิวเตอร์
สถานที่ทำงาน	ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ อาคารเจ้าคุณทหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง