

การพัฒนาสายอากาศภายในอาคารแบบแบนราบสำหรับ
การรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล



ทัศน์พงษ์ บุญเจริญ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟ
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กรกฎาคม 2560

การพัฒนาสายอากาศภายในอาคารแบบแบนราบสำหรับ
การรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล



ทัศน์พงษ์ บุญเจริญ

การค้นคว้าแบบอิสระนี้เสนอต่อมหาวิทยาลัยเชียงใหม่เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ © โดย Chiang Mai University
All rights reserved

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กรกฎาคม 2560

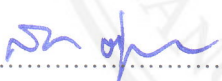
การพัฒนาสายอากาศภายในอาคารแบบแบนราบสำหรับ
การรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล

ทัศน์พงษ์ บุญเจริญ

การค้นคว้าแบบอิสระนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบ

อาจารย์ที่ปรึกษา



ประธานกรรมการ



(ผศ.ดร.ศิริพงษ์ ตู่ประกาย)

(ผศ.ดร.นิภาภรณ์ ศิริพล)



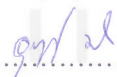
กรรมการ

(ผศ.ดร.นิภาภรณ์ ศิริพล)



กรรมการ

(รศ.ดร.เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์)



กรรมการ

(ผศ.ดร.อุกฤษฏ์ มั่นคง)

7 กรกฎาคม 2560

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าแบบอิสระนี้สำเร็จสำเร็จได้ด้วยความกรุณาและการได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างดี จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิภาภรณ์ ศิริพล และ อาจารย์ ดร.คมศักดิ์ เมฆสมุทร ที่เมตตาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ปรีกษาและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนการค้นคว้าแบบอิสระนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้วิชาการต่างๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการได้รับความรู้ จนทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินการด้านเอกสาร ติดตามความคืบหน้า จนการค้นคว้าแบบอิสระในครั้งนี้ สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องทุกๆ คน ที่คอยให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนในทุกๆ ด้านด้วยดีมาโดยตลอดมา

และที่ขาดไม่ได้ ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่ร่วมชะตากรรมเดียวกัน ที่คอยช่วยเหลือกันให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการค้นคว้าแบบอิสระนี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนผู้ที่สนใจในการศึกษาต่อไป

ทัศนพงษ์ บุญเจริญ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

หัวข้อการค้นคว้าแบบอิสระ การพัฒนาสายอากาศภายในอาคารแบบแบนราบสำหรับการรับ
สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล

ผู้เขียน นายทัศนพงษ์ บุญเจริญ

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิภาภรณ์ ศรีพล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาและพัฒนาสายอากาศภายในอาคารเพื่อรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล
ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และติดตั้งได้สะดวก โดยออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลแบบสล็อต
ไม่สมมาตรกัน ความยาวสายอากาศ 220 mm. และกว้าง 25 mm. แยกออกจากกันด้วย วิธีการ Step-shaped
feed gap และปรับเปลี่ยนขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ ความกว้างสล็อต (Gap) และความยาว
ฟีดสายอากาศ (feed) มีแถบความถี่ที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 495 – 791 MHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย
ย้อนกลับ -18 dB จากการจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สายอากาศชื่อ CST Microwave Studio ทำให้
สายอากาศที่นำเสนอนี้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา โครงสร้างไม่ซับซ้อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Independent Study Title Development of Low-profile Indoor Antenna for Digital
Television Signal Reception

Author Mr.Taspong Boonjareun

Degree Master of Engineering (Electrical Engineering)

Advisor Asst. Prof. Dr.Nipapon Siripon

ABSTRACT

The purpose of this research is to study and develop the indoor antenna to receive terrestrial digital TV signals. It has non-complicate structure and easy to set up/install, and is designed by using asymmetric slot dipole antennas with the dimension of length 220 mm and width 25 mm, which are separated by step-shaped feed gap method and adjusted to left and right arms, gap, and feed for working at frequencies between 495 – 791 MHz and return loss at -18 dB. By using the simulation program named CST Microwave Studio, it can make this proposed antenna compact/small size, light weight, and non-complicate structure.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
ABSTRACT	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 สถานที่ดำเนินการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	4
2.1 โทรทัศน์ระบบดิจิทัล (Digital Television)	4
2.2 ทฤษฎีสายอากาศ	5
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศภายในอาคารแบบแบนราบสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล	29
3.1 การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไดโพลแบบสล็อต	29
บทที่ 4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตร	43
4.1 ผลการวัดสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรเมื่อเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ	43

บทที่ 5	บทสรุป	47
5.1	สรุปการออกแบบและวิเคราะห์	47
5.2	ผลที่ได้รับและปัญหาที่พบ	49
เอกสารอ้างอิง		50
ประวัติผู้เขียน		52



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป
ตารางที่ 2.2	เปรียบเทียบสายอากาศรับ ภายใน และภายนอกอาคาร
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากผลการวัดและจำลองการทำงาน ของสายอากาศ
ตารางที่ 5.1	สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์และประสิทธิภาพของสายอากาศในแต่ละรูปแบบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 สายอากาศไดโพล	6
ภาพที่ 2.2 สายอากาศไมโครสตริป	7
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	7
ภาพที่ 2.4 สายอากาศร่องแคบที่มีความยาว $L_s = \lambda/2$ ในแผ่นระนาบโลหะขนาดอนันต์	12
ภาพที่ 2.5 สายอากาศไดโพลยาว $\lambda/2$	12
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของสถานีสัญญาณไมโครสตริปแบบร่วมระนาบ (CPW)	13
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของสถานีสัญญาณแบบร่วมระนาบชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง	14
ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ [3]	17
ภาพที่ 2.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ	18
ภาพที่ 2.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ	19
ภาพที่ 2.11 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงานในระบบ	20
ภาพที่ 2.12 สายอากาศรับสัญญาณที่วัดจิตตลภาคพื้นดิน ประเภท ภายนอกอาคารแบบ 14E	21
ภาพที่ 2.13 สายอากาศรับสัญญาณที่วัดจิตตลภาคพื้นดิน ประเภท ภายในอาคาร	21
ภาพที่ 2.14 การตั้งค่าก่อนทำการออกแบบสายอากาศ	23
ภาพที่ 2.15 การเลือกชนิดของสายอากาศที่ออกแบบ	23
ภาพที่ 2.16 การตั้งค่าการจำลองการทำงานของสายอากาศ	24
ภาพที่ 2.17 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศ	24
ภาพที่ 2.18 การจำลองการทำงานของสายอากาศ	25
ภาพที่ 2.19 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลสล็อต แบบไม่สมมาตร	25
ภาพที่ 2.20 โครงสร้างของสายอากาศไดโพล แบบ band-notched	26
ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของสถานีสัญญาณ passive patch	27
ภาพที่ 2.22 โครงสร้างของสายอากาศโมนโพลสล็อต	27
ภาพที่ 3.1 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครึ่งความยาวคลื่นโดยใช้โปรแกรม CST	30
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครึ่งความยาวคลื่น	30

ภาพที่ 3.3	การใช้โปรแกรม CST ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ	31
ภาพที่ 3.4	วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสายอากาศแบบไดโพล (L)	31
ภาพที่ 3.5	การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L	32
ภาพที่ 3.6	วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อต (W)	33
ภาพที่ 3.7	การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า W	33
ภาพที่ 3.8	วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างสล็อตของสายอากาศไดโพลแบบสล็อต (g)	34
ภาพที่ 3.9	การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า g	34
ภาพที่ 3.10	การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น	36
ภาพที่ 3.11	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น	36
ภาพที่ 3.12	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ สายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น	37
ภาพที่ 3.13	วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวฟีดของสายอากาศไดโพลแบบสล็อต ไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น (t)	37
ภาพที่ 3.14	การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า t	38
ภาพที่ 3.15	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่นที่เพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือ	39
ภาพที่ 3.16	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ หลังจากการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือ	39
ภาพที่ 3.17	ทิศทางการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสองมิติ	40
ภาพที่ 3.18	การเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือ และขวามือ	40
ภาพที่ 3.19	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ หลังจากการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ	41
ภาพที่ 3.20	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ หลังจากการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ	41
ภาพที่ 3.21	ทิศทางการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสองมิติ	42
ภาพที่ 3.22	ทิศทางการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสามมิติ	42
ภาพที่ 4.1	ภาพจริงของสายอากาศที่ออกแบบ	43
ภาพที่ 4.2	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากการวัดจริง	44
ภาพที่ 4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากการจำลองการทำงาน	44
ภาพที่ 4.4	การเปรียบเทียบ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากการวัดจริงกับการจำลองการทำงาน	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบแอนะล็อกของไทยในปัจจุบันนี้ มีการแพร่ภาพออกอากาศ 6 ช่องรายการ ได้แก่ ช่อง 3, 5, 7, 9, NBT และ ช่องไทยพีบีเอส การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบแอนะล็อก 1 ช่องใช้ความถี่ 8 MHz จะเห็นได้ว่าใช้ช่วงความถี่ที่กว้างมาก แต่ถ้าเป็นเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลนั้น มีการบีบอัดสัญญาณที่เรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Digital Compression ทำให้ใน 1 ช่องความถี่ (8 MHz) ตามแบบแอนะล็อกเดิม ออกอากาศได้ถึง 10-15 ช่องในระบบดิจิทัลในความคมชัดปกติและให้ภาพมีคุณภาพสูงขึ้น จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบแอนะล็อก เป็นดิจิทัล เป็นการ ใช้คลื่นความถี่วิทยุอย่างมีประสิทธิภาพขึ้นมาก ซึ่งก็รู้ว่าคลื่นความถี่เป็นทรัพยากรที่มีคุณค่ามาก อีกทั้งการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ยังให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีขึ้น คมชัด การรบกวนก็เกิดได้น้อย ไม่มีคลื่นแทรก และยังสามารถรับชมได้ชัดเจน แม้อยู่ในพาหนะที่เคลื่อนที่ แต่ข้อเสียของการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล เมื่ออยู่ในจุดอับสัญญาณจะไม่สามารถรับภาพใดๆ ได้เลย ซึ่งแตกต่างจากระบบแอนะล็อกที่จะเกิดภาพทับซ้อนหรือภาพเบลอๆ ในจุดที่สัญญาณอ่อน ด้วยเหตุนี้สำนักงาน คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ [1] จึงให้ความสำคัญเนื่องจากเป็นช่วงเปลี่ยนผ่านจากระบบแอนะล็อกเป็นดิจิทัล โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของภาคส่ง ขยายโครงข่ายให้ครอบคลุมเพียงพอสำหรับการให้บริการ ส่วนของภาครับ สนับสนุนโครงการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลและเครื่องรับดิจิทัล เพื่อให้ประชาชนสามารถรับชมสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับชมสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ให้กับประชาชน โครงการค้นคว้าแบบอิสระนี้ จึงนำเสนอการพัฒนาและออกแบบสายอากาศภายในอาคาร สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล โดยประยุกต์จากผลงานวิจัยต่างๆ ให้ได้สายอากาศที่เป็นไปตามมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล [2]

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษา และพัฒนาสายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิตอลเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน

1.2.2 เพื่อออกแบบ และพัฒนาสายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิตอลเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน

1.3 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สายอากาศไดโพลที่มีแบนกว้างสามารถรับสัญญาณทีวีดิจิตอล ที่ความถี่ 470- 806 MHz โดยใช้วิธีการ step-shaped feed gap ในการออกแบบและปรับจูน ถูกนำเสนอจากการวิจัยของ Yun-Wen Chi, Kin-Lu Wong, and Saou-Wen Su [3] ซึ่งทำให้มีช่วงความถี่ที่ใช้งานกว้างขึ้น 50% ของแบนด์วิดท์ โดยมีค่า VSWR ที่ 2.5:1

Taguchi และคณะ [4] ได้นำเสนอสายอากาศแอกทีฟไดโพล รับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอล มีคุณสมบัติสัญญาณรบกวนต่ำและอัตราขยายสายอากาศที่สูง สายอากาศนี้สร้างบนแผ่นไดอิเล็กทริกบาง ๆ ใช้เทคนิค Photoetching โดยนำสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบ (CPW) ตั้งฉาก กับสายอากาศไดโพล และร่วมกับวงจรขยายสัญญาณ ปรับจูนให้เหมาะสม เพื่อให้ได้อัตราขยายสายอากาศที่สูงกว่า 8 dBd ที่ความถี่ 470-770 MHz สำหรับช่องโทรทัศน์ 13-62 ในประเทศญี่ปุ่น

Gapponi และคณะ [5] ได้อธิบายเทคนิคการสร้างวงจรขยายสัญญาณด้วย CAD โดยเบื้องต้นเริ่มจากความรู้ด้านการป้องกันสัญญาณการรบกวนและค่าพารามิเตอร์ในการสร้างวงจรขยายสัญญาณ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.6.2 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CST Microwave Studio สำหรับการวิเคราะห์ ออกแบบ และจำลองผลสายอากาศ

1.6.3 ออกแบบสายอากาศชนิดภายในอาคาร (Indoor) ที่สามารถรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิตอล ในรูปแบบ DVB-T2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ศึกษาระบบสายอากาศ รับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล
- 1.5.2 ได้สายอากาศที่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถนำไปใช้ได้ง่าย และติดตั้งได้เอง

1.6 สถานที่ดำเนินการศึกษา

- 1.6.1 ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีอุปกรณ์และเครือข่ายในระบบสื่อสารทางแสงแห่งอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- 1.6.2 สำนักงาน กสทช เขต 3 ลำปาง



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

งานค้นคว้าแบบอิสระนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ และพัฒนาสายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และติดตั้งได้เอง โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยการจำลองโครงสร้างของสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST MWS Studio ในการศึกษา และวิเคราะห์ผลมีหลักการและทฤษฎีดังนี้

2.1 โทรทัศน์ระบบดิจิทัล (Digital Television)

โทรทัศน์ระบบดิจิทัล (Digital Television) เป็นการส่งสัญญาณภาพและเสียงด้วยสัญญาณดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพสูง ให้ทั้งความคมชัดของภาพและเสียง หนึ่งช่องสัญญาณ (8 MHz) ส่งข้อมูลได้มากกว่าแบบแอนะล็อกในหนึ่งช่องสัญญาณ เป็นการบีบอัดสัญญาณที่เรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Digital Compression ทำให้ได้คุณภาพของภาพและเสียงที่ดีกว่า เช่น โทรทัศน์ระบบ HDTV การรบกวนเกิดได้ด้วย ไม่มีสัญญาณแทรก สามารถรับชมที่ชัดเจนแม้ขณะอยู่ในพาหนะเคลื่อนที่ก็ตาม ตรงกันข้ามกับโทรทัศน์ระบบแอนะล็อกที่คุณภาพสัญญาณภาพและเสียงที่ไม่คมชัด และใช้ทรัพยากรความถี่ที่มากกว่า

การเปลี่ยนระบบจากแอนะล็อกเป็นระบบดิจิทัล จึงมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนทั่วโลกตามไปด้วย และมีข้อตกลงตามมติที่ประชุมรัฐมนตรีสารสนเทศอาเซียน หรือ AMRI (ASEAN Ministers Responsible for Information) ว่าทุกประเทศต้องแพร่ภาพโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลได้ และต้องยุติการออกอากาศระบบแอนะล็อกในช่วงปี พ.ศ. 2558-2563 ดังนั้น ประเทศไทยก็ต้องเร่งผลักดันให้ทีวีดิจิทัลเกิดขึ้น เพื่อให้สามารถแข่งขันกับประเทศอื่นได้ สำนักงาน กสทช. จึงได้จัดทำแผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล

การทำงานของโทรทัศน์ระบบดิจิทัลเป็นการเข้ารหัสในการรับส่งสัญญาณภาพและเสียงเรียกว่า รหัสดิจิทัล มีค่า “0” กับ “1” เท่านั้น ใช้เทคนิคต่างๆ ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณภาพและเสียงจากระบบแอนะล็อกเป็นดิจิทัล มีการบีบอัดข้อมูล มีการเข้ารหัสข้อมูลก่อนที่จะทำการผสมสัญญาณข้อมูลคลื่นพาห์ออกไป กระบวนการบีบอัดข้อมูลสัญญาณดิจิทัล โดย MPEG-2 หรือ MPEG-4 ทำการถอดรหัส หลังจากนั้นสัญญาณถูกส่งไปยังหน้าจอโทรทัศน์ ทำให้หน่วยที่เล็กที่สุดของภาพที่แสดงบน

จอภาพ ซึ่งในระบบ HDTV นั้นให้ภาพที่มีความละเอียด สูงกว่าโทรทัศน์ทั่วไปมาก ทำให้ภาพที่ออกมา มีความคมชัด ละเอียด

มาตรฐานของโทรทัศน์ระบบดิจิทัล แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล พ.ศ. 2555 [6] ของสำนักงาน กสทช. กำหนดให้ใช้ มาตรฐาน DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial) บนย่าน ความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) กำหนดความถี่วิทยุ 510 – 790 MHz

ปัญหาและอุปสรรคในการเปลี่ยนผ่านการแพร่ภาพโทรทัศน์ภาคพื้นดินจากระบบ แอนะล็อกเป็นระบบดิจิทัล คือการให้บริการครอบคลุมทุกพื้นที่ เนื่องจากการรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล จุดอับสัญญาณไม่สามารถรับภาพใดๆ ได้เลย ซึ่งแตกต่างจากระบบแอนะล็อก ที่เกิดภาพทับซ้อนหรือภาพเบลอๆ ในจุดที่สัญญาณอ่อน จึงทำให้ผู้ประกอบการ ขยายโครงข่ายให้ครอบคลุม เพียงพอสำหรับการให้บริการ ส่วนของประชาชน ต้องมีสายอากาศที่ดี ในการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล เพื่อให้สามารถรับชมสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 ทฤษฎีสายอากาศ [7]

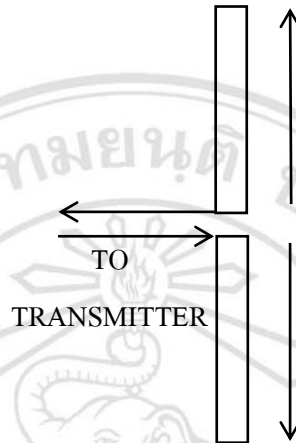
สายอากาศมีการให้คำจำกัดความหลายอย่างเช่น

- เป็นสิ่งที่สามารถส่งหรือรับคลื่น
- เป็นตัวแปลง ระหว่างสายนำสัญญาณหรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าท่อนำคลื่นกับอากาศ หรือในอีกทางหนึ่ง ก็สามารถเป็นตัวแปลงจากอากาศสู่สายนำสัญญาณ ในเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สาย สายอากาศเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ การออกแบบสายอากาศที่ดีนั้นช่วยทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบส่ง-รับดีขึ้น สายอากาศมีหลายรูปแบบ แบ่งตามโครงสร้างที่สนใจได้ดังนี้ 1) สายอากาศไดโพล 2) สายอากาศไมโครสตริป และ 3) สายอากาศแบบร่อง และ 4) สายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบ

2.3.1 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

สายอากาศไดโพล เป็นสายอากาศหนึ่งที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด ประกอบด้วยเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรงต่อกัน ดังภาพที่ 2.1 จุดกึ่งกลางของไดโพลถูกต่อเข้ากับตัวป้อนสัญญาณ ในที่นี้กำหนดให้เป็นเครื่องส่ง โดยใช้สายนำสัญญาณทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งทำการป้อนสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพล และไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพลดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

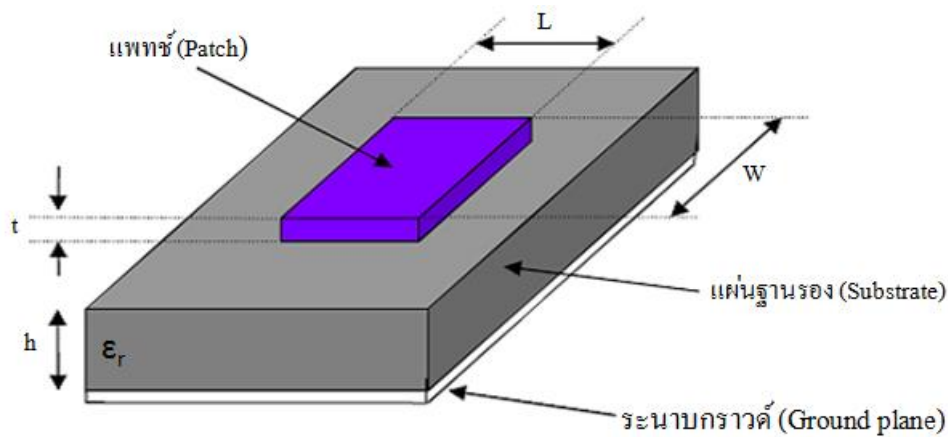
การกระจายตัวของกระแส (Current Distribution) ทำให้เห็นขนาด ของกระแสสัญญาณ กระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดทั้งความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ปลายทั้งสองมีค่า เท่ากันคือมีค่าเท่ากับศูนย์ ทั้งนี้ค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนตัวไดโพล แต่ก็ขึ้นอยู่กับความ ยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



ภาพที่ 2.1 สายอากาศไดโพล

2.3.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antennas)

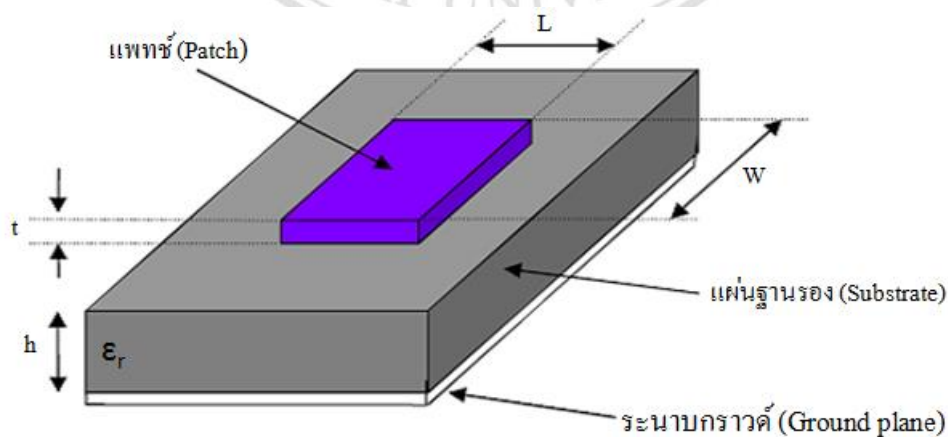
ประกอบด้วยแพทช์ (Patch) เป็นโลหะที่วางบนแผ่นรอง (Substrate) ที่มีกราวด์ ด้านล่าง แพทช์ โลหะอาจมีรูปร่างได้หลายรูปแบบแล้วแต่การออกแบบ แต่ที่นิยมคือสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากมีค่าโพลาไรเซชันแบบไขว้ต่ำ (Low-cross polarization) สายอากาศแบบนี้มีรูปร่างแบนราบ สะดวกในการวาง บนผิวแนวระนาบและไม่ระนาบ ง่ายในการสร้างและออกแบบมีราคาถูก เพราะใช้เทคโนโลยี เดียวกันกับการทำแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit)



ภาพที่ 2.2 สายอากาศไมโครสตริป

รูปแบบพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Microstrip patch antenna) สายอากาศไมโครสตริปแบบไดโพล (Microstrip dipole antenna) และสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Microstrip slot antenna) ในแต่ละชนิดก็มีรูปแบบและสมบัติต่างๆแตกต่างกันออกไป ในการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วย ส่วนที่เป็นแผ่นตัวนำหรือที่เรียกว่า แพทช์ (Patch) และแผ่นระนาบกราวด์ ซึ่งแยกออกจากกันด้วย วัสดุฐานรองหรือที่เรียกกันอีกชื่อว่า ซับสเตรท (Substrate) ที่มีค่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

โดยที่ W คือ ความกว้างของสายอากาศ (Patch)

L คือ ความยาวของสายอากาศ (Patch)

h คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง (Substrate)

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (Substrate)

ตัวอย่าง สายอากาศแบบไมโครสตริปพื้นฐานแสดงได้ดังภาพที่ 2.3 เห็นว่าสายอากาศ แบบไมโครสตริปพื้นฐาน เป็นรูปแบบอย่างง่าย ความยาวคลื่นต้องคิดแบบความยาวคลื่นสัมพัทธ์กับชนิดของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบพื้นฐานนี้คือใช้งานได้กับช่องสัญญาณแคบมาก ประกอบกับมีขนาดใหญ่ และประสิทธิภาพต่ำ จึงมักถูกนำมาเพียงเพื่อเรียนรู้เบื้องต้นของสายอากาศแบบระนาบเท่านั้น แต่ไม่ถูกนำไปใช้งาน

1) การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป [8]

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป สามารถคำนวณความกว้างและความยาวของสายอากาศไมโครสตริป ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$W = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.1)$$

$$L = \frac{1}{2f \sqrt{\epsilon_e} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.2)$$

โดยที่

$$\Delta L = h 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.3)$$

และ

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W_s}} \right) \quad (2.4)$$

โดยที่ W คือ ความกว้างของสายอากาศ

L คือ ความยาวของสายอากาศ

W_s คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป

h คือ ความสูงของวัสดุรองรับ

f คือ ความถี่ที่ใช้งาน

ϵ_c คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

μ_0 คือ ค่าความซึมได้ของอากาศว่าง

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศว่าง

c คือ ความเร็วแสง

2) แผ่นตัวนำสายอากาศ

แผ่นตัวนำสายอากาศ เป็นแผ่นบางๆที่เป็นโลหะ ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน มีลักษณะ คือ ความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี และสามารถยึดติดกับผิวของวัสดุฐานรองได้ดี โดยปกติวัสดุที่นำมาใช้จะพบว่าเป็น ทองคำ ทองแดง หรือ อลูมิเนียม แล้วแต่ว่าจะนำมาใช้งาน แต่วัสดุที่นำมาใช้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และความซับซ้อนในการผลิต ขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำ ของสายอากาศมีผลต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแผ่พลังงานและค่าความสูญเสีย เนื่องจากการย้อนกลับ แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี เป็นต้น แต่ที่นิยมออกแบบ ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยม และวงกลม เนื่องจากการออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน

3) ชั้นวัสดุฐานรอง

ในการออกแบบชั้นวัสดุฐานรองของสายอากาศ สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ คือ ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรอง เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศแบบไมโครสตริป ผลของการแผ่พลังงานของสายอากาศมีค่าลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น ที่ความหนาของวัสดุฐานรองมีค่าเท่าเดิม การแผ่พลังงานของสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น และการแผ่พลังงานนี้มีปริมาณลดลง เมื่อความหนาต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะ และสามารถผลิตเป็นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้

4) ระบายกราวนด์

เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อนำไปเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ ซึ่งส่วนมากทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับสายอากาศ โดยขนาดของระบายกราวนด์ ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระบายกราวนด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์สมบัติ ของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่สมมุติว่าแผ่นระบายกราวนด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ ขนาดที่จำกัดของระบายกราวนด์มีผลต่อลำคลื่นหลัก (Main lobe) น้อยมาก และทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

5) วิธีการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศมีการทำงานเช่นเดียวกับเสาอากาศทั่วไป คือ นำเอาสายอากาศมาเชื่อมเข้ากับแหล่งจ่ายข้อมูลผ่านทางหัวเชื่อมต่อก็สามารถใช้งานได้ โดยส่วนใหญ่แล้วมักไม่มีการปรับแต่งใด ๆ อีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสายอากาศที่มีทิศทางแคบมาก ไม่มีการขยับเขยื้อนใด ๆ หลังจากติดตั้งแล้ว

สายอากาศไมโครสตริปมีทั้งข้อดีและข้อด้อยหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านไมโครเวฟแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริปสามารถกำจัดให้ลดน้อยลงได้ ถ้าออกแบบให้ถูกต้องและเลือกใช้วัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ ซึ่งคาดว่าต่อไปในอนาคตจะมีการนำสายอากาศไมโครสตริปมาใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น เนื่องจาก ความหนาของไมโครสตริปบางมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป

ข้อดี	ข้อด้อย
- ราคาถูก - น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน - ขนาดเล็ก ปริมาณน้อย จึงไม่ฉาดล้ม - สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างทำให้สมดุลได้ - การผลิตง่าย - สามารถป้อนสัญญาณและปรับอิมพีแดนซ์ได้ - พร้อมๆ กับการสร้างสายอากาศ - สามารถสร้างเป็นสายอากาศแถวลำดับได้ง่าย - ต่อเข้ากับวงจรหรือติดตั้งได้ง่ายกว่า - สามารถกำหนดลักษณะการเดินทางของคลื่นได้ทั้งแบบเชิงเส้นและแบบวงกลมโดยการเลื่อนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณและรูปร่างของแผ่นแผ่พลังงานที่ใช้	- มีกำลังงานในการแผ่พลังงานต่ำ - มีแถบความถี่แคบ (Narrow bandwidth) - มีการสูญเสียมากโดยส่วนมากเกิดจากการสูญเสียที่จุดต่อและจุดป้อนสัญญาณจึงส่งผลให้ได้อัตราขยาย (Gain) ต่ำ - สายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่มีการแผ่กระจายคลื่นเพียงครึ่งระนาบ - ต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อรักษาคุณสมบัติของสารที่ใช้ทำสายอากาศ

2.3.3 สายอากาศร่อง (Slot antenna) [9]

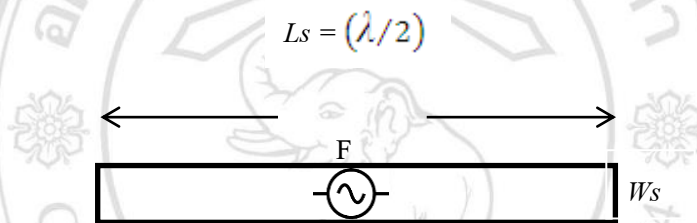
สายอากาศร่อง (Slot antenna) ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ และมีขนาดเล็กโดยสายอากาศร่องแบบต่างๆ นั้นเป็นรูปแบบคู่ประกอบของเส้นลวดหรือสายส่งสัญญาณนั่นเอง

ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศร่องสามารถทำการคำนวณได้จากลักษณะเฉพาะ ของสายอากาศเส้นลวดหรือสายส่งสัญญาณ โดยใช้หลักการของ Binet's Principle โดยร่องที่ใช้ออกแบบสายอากาศมีทั้ง แบบร่องแคบ และร่องกว้าง ซึ่งสายอากาศร่องแคบมีจุดที่น่าสนใจหลักๆ คือมีอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศแมตช์กับสายส่งสัญญาณได้ดี ในขณะที่สายอากาศร่องกว้างมีข้อจำกัด ในเรื่องของอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่แคบและมีค่าโพลาไรซ์เซชันไขว้สูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำสายอากาศร่องกว้างไปใช้งาน นอกจากนี้แล้วผลกระทบของร่องกว้างทำให้เกิดการกระจายเฟสของสนามไฟฟ้าในร่องที่ไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และบีมหลักในระนาบสนามไฟฟ้าเกิดมุมเอียง (Tilt) โดยรายละเอียดของการศึกษาทั้งสายอากาศร่องแคบและร่องกว้างจะกล่าวต่อไปรวมทั้งในตอนท้ายจะได้แนะนำสายอากาศร่องกว้างที่มีการปรับปรุงแบนด์วิดท์จะ โดยใช้ 2

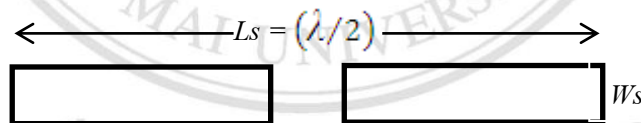
เทคนิคร่วมกันคือ การป้อนใช้สตับจูน (Tuning Stub) และสตริปโหลด (Loading Strip) ในการศึกษาและวิเคราะห์ผลใช้โปรแกรมจำลองการทำงานทางแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D ในการจำลองการทำงานทั้งการสูญเสียย้อนกลับอิมพีแดนซ์และการกระจายของกระแสและสนามต่างๆ และในที่นี้กล่าวถึงลักษณะต่างๆ สายอากาศร่อนบนแผ่นระนาบทั้งบนร่องแคบและร่องกว้างเทคนิคการป้อนแบบต่างๆ ทั้งสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปเพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างระนาบร่วมรวมทั้งเทคนิคการทำให้สายอากาศร่อนมีแบนด์วิดท์กว้าง

1) สายอากาศร่อนแคบ

โครงสร้างสายอากาศร่อนแคบ ประกอบด้วยตัวแผ่พลังงาน (Radiator) ซึ่งเกิดจากการเจาะร่องของแผ่นโลหะขนาดใหญ่แสดงดังภาพที่ 2.4 โดยทั่วไปร่องจะมีความยาวคลื่น $(\lambda/2)$ ณ ความถี่ที่ต้องการและความกว้างของร่องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมากๆ ($W \ll \lambda$)



ภาพที่ 2.4 สายอากาศร่อนแคบที่มีความยาว $L_s =$ ในแผ่นระนาบโลหะขนาดอนันต์

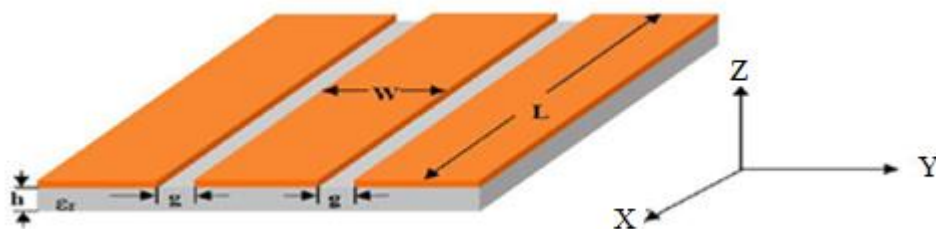


ภาพที่ 2.5 สายอากาศไดโพลยาว

จากภาพที่ 2.4 และ 2.5 เป็นภาพแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่อนแคบบนแผ่นโลหะขนาดอนันต์ มีความยาวคือ $L_s = (\lambda/2)$ ความกว้างคือ W_s ร่องถูกป้อนพลังงานที่จุด F-F โดยการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศร่อนมีลักษณะเหมือนสายอากาศไดโพลสตริปที่มีความยาว $(\lambda/2)$ มีความกว้าง W_s และป้อนสัญญาณที่ตรงตำแหน่ง F-F ดังแสดงดังภาพที่ 2.4 แต่มีสิ่งที่ไม่เหมือนกัน หลักๆ คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) จะสลับกัน โดยในกรณีสายอากาศไดโพล มีเส้นสนามไฟฟ้าตามแนวแกนอนขณะที่จะรอบเส้นสนามแม่เหล็กอยู่ในระนาบแนวตั้ง ส่วนสายอากาศร่อนสนามแม่เหล็กจะอยู่ในแนวแกนอนและสนามไฟฟ้าจะอยู่ในแนวแกนตั้ง โดยเส้นสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอยู่ระหว่างร่องและมีขนาดสูงสุดที่จุดป้อน

2.3.4 สายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบ (Coplanar Waveguide: CPW) [10]

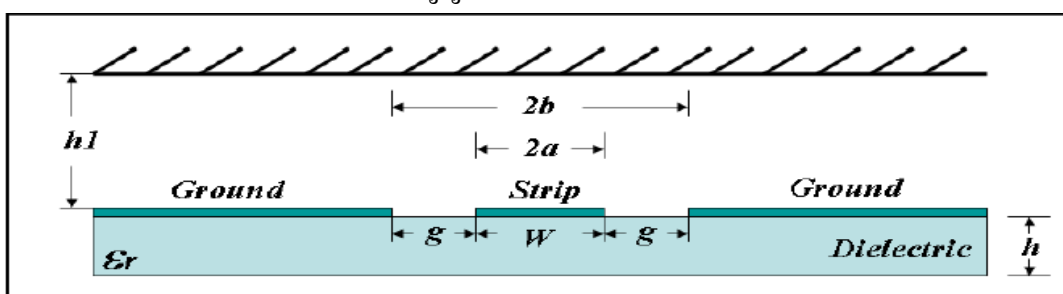
สายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบที่ใช้โดยทั่วไปนั้นมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.6 มีรูปร่างเป็นแถบโลหะตัวนำวางอยู่บนวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก ถูกคั่นด้วยช่องเปิดสองช่อง ลักษณะเฉพาะหลักที่ใช้ในการพิจารณาสายนำสัญญาณ คือ ลักษณะเฉพาะทางอิมพีแดนซ์ และเพื่อให้เกิดความเข้าคู่กันระหว่างอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ต้องพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะทางอิมพีแดนซ์ ซึ่งได้แก่ ความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างของของแผ่นสตริป (W) ความกว้างของช่องเปิด (S) เห็นได้ว่าการเลือกชนิดของวัสดุฐานรองเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาลักษณะเฉพาะทางอิมพีแดนซ์ และสมบัติของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้มีดังนี้ คือ 1) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric constants) 2) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) 3) ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal conductivity) 4) ความขรุขระของผิว จัดว่าเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน มีผลกระทบต่อการส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริป เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่า 5) ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) สำหรับค่านี้บอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าสูงจะดีกว่าค่าต่ำ



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปแบบร่วมระนาบ (CPW)

ในที่นี้กล่าวถึงสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบชนิด สายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบไม่มีกราวด์ด้านล่าง (Coplanar-Waveguide) แสดงไว้ในภาพที่ 2.6 โดยโครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่างซึ่งประกอบไปด้วย สตริป (Strip) อยู่ตรงกลางด้านบนบนของฐานรองไดอิเล็กตริก (Substrate) มีความกว้างของสตริปเป็น W ด้านข้างทั้งสองด้านของสตริปจะมีลักษณะเป็นร่อง (Slot) คั่นกลางและระยะห่างตามลำดับ มีความกว้างของสตริปถึงระยะห่างกราวด์ เป็น g ความหนาของฐานรองไดอิเล็กตริกเป็น h ข้อดีของสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบคือสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องการเจาะรูผ่านฐานรองไดอิเล็กตริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้น และสามารถนำมาต่อรวมในวงจรเดียวกันกับไมโครสตริปได้ง่าย

การหาสมบัติของสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

การวิเคราะห์หาค่าลักษณะเฉพาะของสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบ ให้วิธีแบบ Quasi static ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งคงแบบ (Conformal mapping) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การหาค่าความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณการวิเคราะห์แบบนี้สามารถหาค่าลักษณะเฉพาะพื้นฐานต่างๆ ของสายนำสัญญาณแบบร่วมระนาบได้ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณสามารถหาได้จากผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของครึ่งระนาบด้านบนซึ่งอยู่ในอากาศกับครึ่งระนาบด้านล่างซึ่งอยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric Layer) โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูปเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) และค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic impedance) จะอยู่ในเทอมอัตราส่วนของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก (Complete elliptic integral of the first kind) [5] โดยกำหนดให้

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวสายนำสัญญาณ (F/m)

C' คือ ค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับ C แต่แทนไดอิเล็กตริกทั้งหมดด้วยอากาศจะได้ว่า

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C'} \quad (2.5)$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.6)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.7)$$

$$Z_o = \frac{1}{CV_p} = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon_{re}}C^a} \quad (2.8)$$

เมื่อ

- ϵ_{re} หมายถึง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของฐานรอง
- V_p หมายถึง ความเร็วเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ
- λ_g หมายถึง ความยาวคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ
- c หมายถึง ความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง
- Z_o หมายถึง อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณจะใช้วิธีการสังกนรูป โดยการหาค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสายนำสัญญาณ ค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสายนำสัญญาณ[5] หาได้จากสมการ

$$Z_o = \frac{30\pi K'(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}}K(k_1)} \quad (2.9)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.10)$$

โดยที่

$$q = \frac{1}{2} \left(\frac{K(k_2)K'(k_1)}{K'(k_2)K(k_1)} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ q หมายถึง ตัวประกอบการคูณ

และ

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (2.12)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a / 2h)}{\sinh(\pi b / 2h)} \quad (2.13)$$

$$k_3 = \frac{\tanh(\pi a / 2h_1)}{\tanh(\pi b / 2h_1)} \quad (2.14)$$

$$k_4 = \frac{\tanh(\pi a / 2h)}{\tanh(\pi b / 2h)} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$a = \frac{W}{2} \quad (2.16)$$

$$b = \frac{(2g + W)}{2} \quad (2.17)$$

โดยที่

W หมายถึง ความกว้างของสายนำสัญญาณ

g หมายถึง ความกว้างของร่อง

h หมายถึง ความสูงของฐานไดอิเล็กตริก

h_1 หมายถึง ความสูงที่มีขอบเขตที่ไม่สิ้นสุด หรือส่วนบนเป็นอากาศ

การอินทิเกรตวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกสามารถหาได้โดย

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad (2.18)$$

โดยที่

$$K'(k_1) = K(k_1') \quad (2.19)$$

$$k' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (2.20)$$

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

กรณี $0 \leq k \leq 0.707$

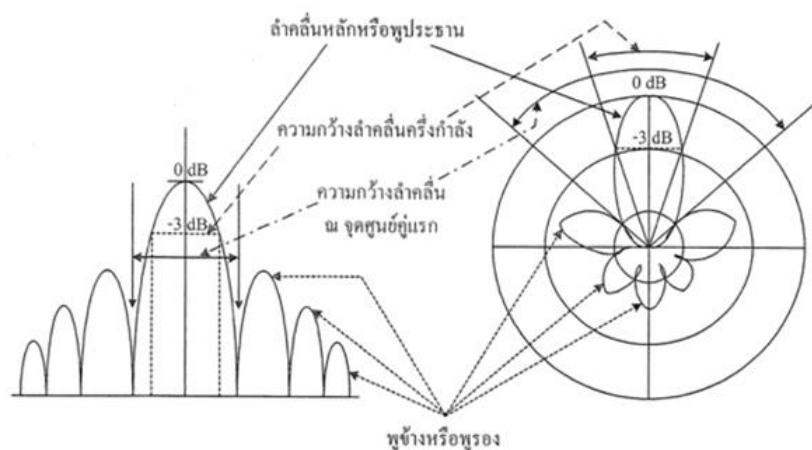
$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln[2(1+\sqrt{k})/(1-\sqrt{k})]} \quad (2.21)$$

2.3.5 ค่าลักษณะเฉพาะและค่าปัจจัยต่างๆของสายอากาศ [3]

สายอากาศชนิดต่างๆ ที่มีใช้งานกันอยู่ทั่วไป มีค่าลักษณะและค่าปัจจัยต่างๆ ที่จำต้องพิจารณาประกอบการประเมินสมรรถนะของสายอากาศเพื่อช่วยการตัดสินใจประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานอยู่มากมาย ในส่วนนี้จะกล่าวเฉพาะที่สำคัญและน่าสนใจดังนี้คือ 1) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern/Antenna Pattern) 2) อัตราขยาย (Gain) 3) ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) และ 4) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss)

1) แบบรูปการแผ่พลังงาน [3]

แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นการนำเสนอ การแผ่พลังงานของสายอากาศออกไปในทิศทางต่าง ๆ หรือรับพลังงานที่ส่งมาจากทิศทางต่าง ๆ โดยการวาดเป็นภาพลายเส้นที่นำเสนอค่าระดับกำลังงานสัมพัทธ์ ณ ตำแหน่งเชิงมุมต่าง ๆ อาจนำเสนอโดยใช้ระบบพิกัดฉากหรือเชิงขั้วก็ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.8



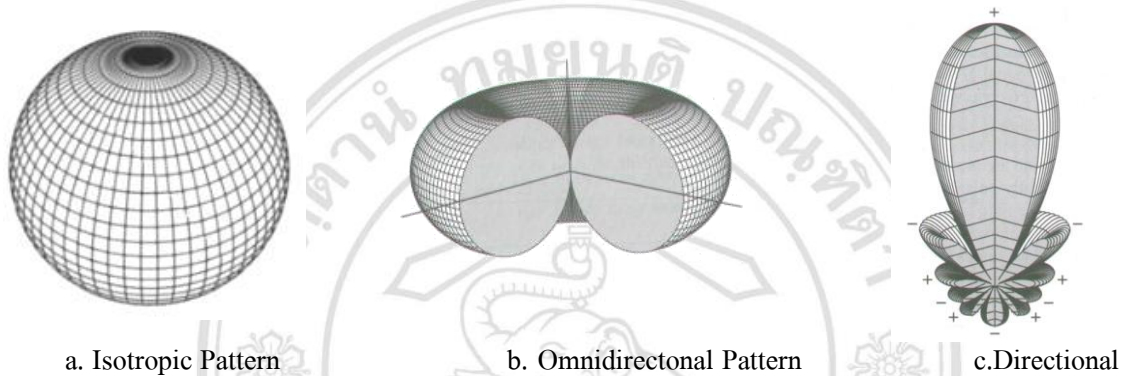
(1) นำเสนอในระบบพิกัดฉาก

(2) นำเสนอในระบบพิกัดเชิงขั้ว

ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ [3]

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศขณะเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีความเหมือนกันทุกประการ ในการวัดจึงสามารถวัดในภาครับหรือภาคส่งก็ได้ แบบรูปการแผ่พลังงานมีหลายลักษณะ เช่น แบบรูปขนาดยอดของสนาม แบบรูปวิถีภาค แบบรูปโพลาริเซชัน และรูปสภาพเจาะจงทิศทาง แบบรูปเหล่านี้เป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบพิจารณาเพื่อประยุกต์ใช้งานสายอากาศในลักษณะงานเฉพาะต่าง ๆ

1.1) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ พื้นฐาน มี 3 ลักษณะ



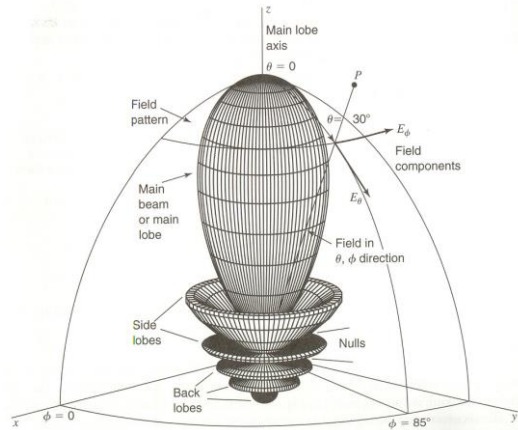
ภาพที่ 2.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ [12]

1.1.1) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบอุดมคติ (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น มีสมบัติ การแผ่พลังงานเท่ากันในทุกทิศทาง เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง

1.1.2) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัว (Omnidirectional Pattern) มีลักษณะ ของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ดีในทิศทางรอบตัว

1.1.3) แบบรูปการแผ่พลังงาน แบบชี้ทิศ (Directional Antenna) มีลักษณะของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ดีในทิศทางที่กำหนด

1.2) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แบบรูปหลักของสายอากาศแบบชี้ทิศทาง



ภาพที่ 2.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ [12]

1.2.1) พุสัณญาณหลัก (Main Lobe) เป็นพุสัณญาณของการแผ่พลังงานในทิศทางที่พลังงานแรงที่สุด

1.2.2) พุสัณญาณย่อย (Major Lobe) เป็นพุสัณญาณย่อยๆ ที่มีขนาดเล็กๆ ไม่เท่าพุสัณญาณหลัก

1.2.3) พุสัณญาณข้าง (Side Lobe) เป็น พุสัณญาณ ย่อยที่อยู่ติดกับพุสัณญาณ หลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมเดียวกับพุสัณญาณหลัก

2) อัตราขยาย [3]

อัตราขยายของสายอากาศมิได้บ่งบอกถึงความสามารถในการขยายสัญญาณเช่นเดียวกับกรณีของวงจรขยาย ในกรณีของสายอากาศนั้นอัตราขยายจะคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแผ่พลังงานโดยเฉลี่ย ในการคำนวณความเข้มของการแผ่พลังงานโดยเฉลี่ย พิจารณากำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้กับสายอากาศได้รับการแผ่ออกไปอย่างเท่าเทียมกันรอบทิศทางไม่มีการสูญเสีย

สูตรสำหรับการคำนวณอัตราขยายเป็นดังต่อไปนี้

$$G = \frac{U(\theta, \phi)}{U_f} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_f} \quad (2.22)$$

โดย G คือ อัตราขยาย (ไม่มีหน่วย)

U_f คือ ความเข้มการแผ่พลังงานเฉลี่ยที่ป้อนให้สายอากาศ

P_f คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศ (W)

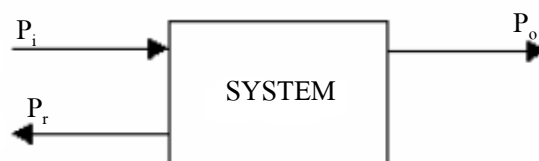
เนื่องจากการคำนวณอัตราขยาย คำนึงถึงผลของการสูญเสียด้วย ดังนั้นค่าสภาพจะจกทิศทางและอัตราขยายจึงมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$G = \eta_p D \quad (2.23)$$

3) ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) คือ ช่วงของความถี่ที่สายอากาศรับได้ และทำงานได้ดี

4) สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) [11]

คือการสูญเสียหรือ Loss ในระบบสื่อสารเมื่อระบบการสื่อสารของเราเริ่มทำงาน ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ เพราะมันทำให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง โดยการสูญเสียในทางโทรคมนาคมที่เรากล่าวถึงในหัวข้อนี้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งการสูญเสียประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อมีการส่งสัญญาณข้อมูลเข้าไปในระบบดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงานในระบบ

จากรูป P_i คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต

P_r คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ

P_o คือ กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต

2.3.6 สายอากาศที่ใช้รับสัญญาณทีวีดิจิตอลภาคพื้นดิน

เป็นสายอากาศย่าน UHF มีทั้งชนิดติดตั้งภายในอาคาร และภายนอกอาคาร โดยจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับสภาพการรับสัญญาณในพื้นที่ต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สายอากาศรับสัญญาณทีวีดิจิตอลภาคพื้นดิน ประเภท ภายนอกอาคาร เป็นสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ เหมาะกับติดตั้งภายนอกอาคาร มีอัตราการขยายที่สูง ส่วนมากเป็นโครงสร้างสายอากาศแบบ ยากิ-อูตะ ซึ่งเหมาะสำหรับรับสัญญาณที่มาจากระยะไกล เพราะมีอัตราการขยายที่ดี ดังแสดงตามรูป



ภาพที่ 2.12 สายอากาศรับสัญญาณทีวีดิจิตอลภาคพื้นดิน ประเภท ภายนอกอาคาร แบบ 14E [13]

2) สายอากาศรับสัญญาณทีวีดิจิตอลภาคพื้นดิน ประเภท ภายในอาคาร เป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก เหมาะกับติดตั้งภายในอาคาร คอนโดสูงๆ หรือหลังโทรทัศน์เป็นต้น มีอัตราการขยายที่ไม่สูงมาก ซึ่งเหมาะสำหรับรับสัญญาณที่มาจากระยะใกล้ๆ ดังแสดงตามภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 สายอากาศรับสัญญาณทีวีดิจิตอลภาคพื้นดิน ประเภท ภายในอาคาร [14]

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสายอากาศรับ ภายใน และภายนอกอาคาร

สายอากาศรับ ภายในอาคาร	สายอากาศรับ ภายนอกอาคาร
มีขนาดเล็ก กะทัดรัด ไม่ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้ง	มีขนาดใหญ่ ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้ง
รับสัญญาณได้ ระยะใกล้ๆ	รับสัญญาณได้ดี ในพื้นที่ห่างไกล
โครงสร้างไม่ซับซ้อน	โครงสร้างซับซ้อน
สามารถติดตั้งเองได้ง่าย	ติดตั้งค่อนข้างลำบาก

งานวิจัยนี้ได้เลือกออกแบบสายอากาศรับสัญญาณทีวีดิจิตอลภาคพื้นดิน ประเภท ภายในอาคาร เพราะมีขนาดเล็ก กะทัดรัด ติดตั้งได้ง่าย และสามารถแก้ปัญหา ผู้ที่อาศัยอยู่ในเมือง พื้นที่จำกัด หรืออาคารสูง พื้นที่แคบๆ เมื่อมีการสร้างอาคารสูงๆ ขึ้นมา จะทำให้บังคับสัญญาณทีวีดิจิตอลภาคพื้นดิน จากปกติก่อนหน้านี้เคยรับได้ แต่ปัจจุบันรับไม่ได้ เป็นต้น

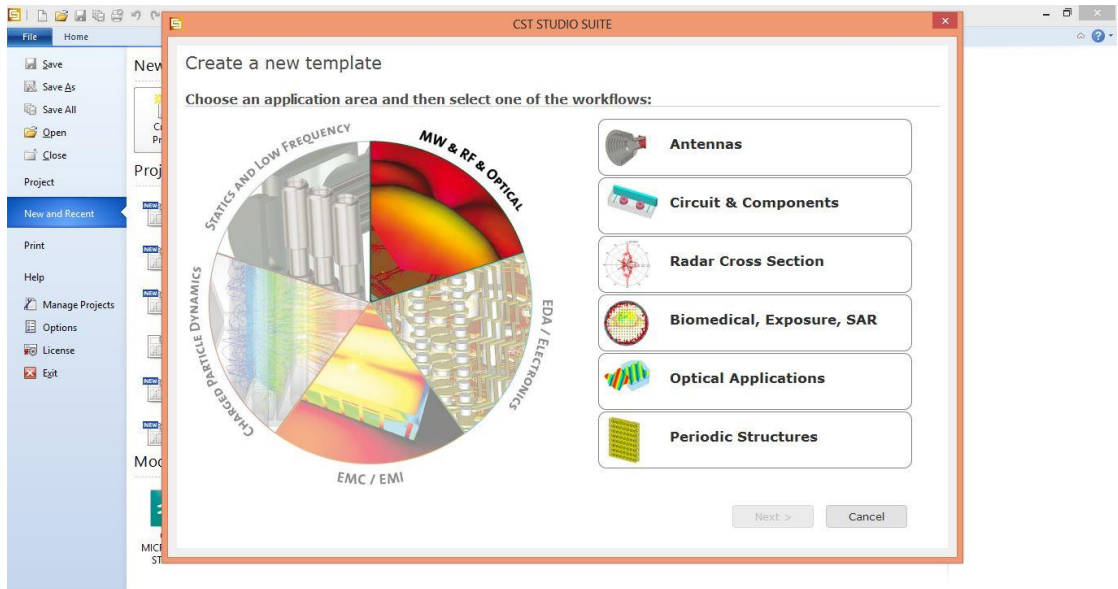
2.3.7 โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO [15]

โปรแกรมจำลองและออกแบบสายอากาศ เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองปัญหา แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ และหาคำตอบด้วยการใช้สมการอินทิกรัลในอากาศ แบบสามมิติ มีความถูกต้องเที่ยงตรงของการจำลองแบบขึ้นอยู่กับขนาดของกริดเซลล์ ถ้าขนาดของกริดเซลล์เล็ก ทำให้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น แต่ต้องใช้หน่วยความจำในการจำลองผลมาก และใช้เวลานานมากขึ้นด้วย จากการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้าง ใช้เทคนิควิธีที่หลากหลายในการออกแบบ ทั้งการเพิ่มความหนาของวัสดุฐานรอง การเจาะร่อง การออกแบบสายอากาศให้มีรูปแบบต่าง ๆ หรือมีการออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเข้าไป มีด้วยกันหลายโปรแกรม เช่น ADS, HFSS, NEC และ CST เป็นต้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้ โปรแกรม CST ซอฟต์แวร์ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัท CST (Computer Simulation Technology, www.cst.com) เป็นซอฟต์แวร์ใช้ด้านแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถจำลองการทำงาน และวิเคราะห์งานที่ใช้ความถี่สูงได้ในรูปแบบสามมิติ นอกจากนี้ยังออกแบบสายอากาศชนิดไดโพลแบบ สล็อตไม่สมมาตร ได้ และวิเคราะห์ผลโดยใช้โดเมนเวลา และโดเมนความถี่ มีเครื่องมือให้มากมาย เหมาะกับการออกแบบสายอากาศ ตอบสนองความต้องการเป็นอย่างดี

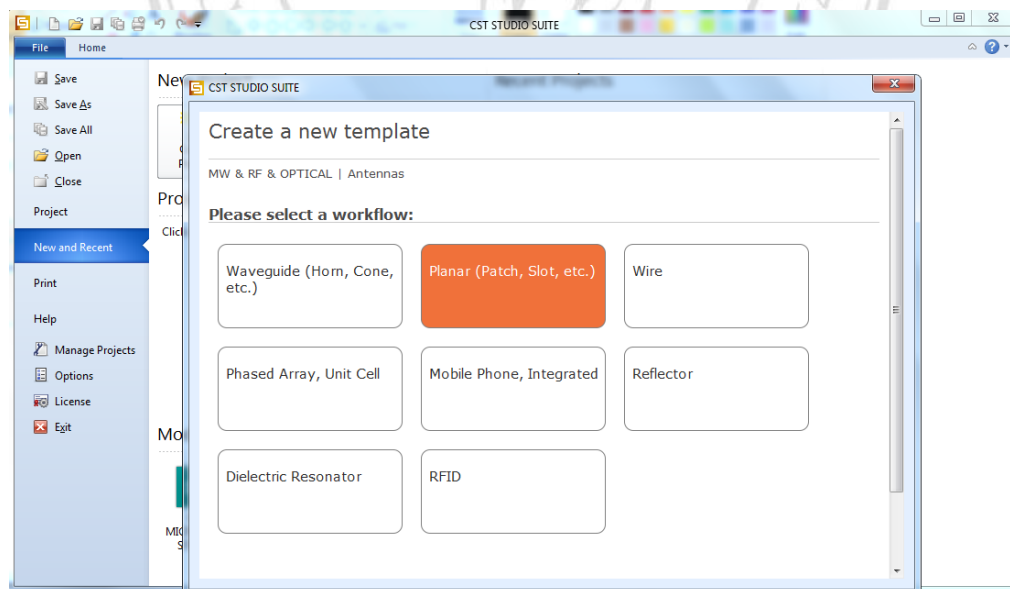
2.3.8 การใช้งานโปรแกรม CST Microwave Studio สำหรับการออกแบบสายอากาศเบื้องต้น

ขั้นตอนที่ 1 การตั้งค่าก่อนทำการออกแบบสายอากาศ ทำได้โดยการ กด New เพื่อเริ่มต้น โปรเจกใหม่ จากนั้นเลือกที่ MW & RF & Optical และเลือกที่ตัวเลือก Antenna



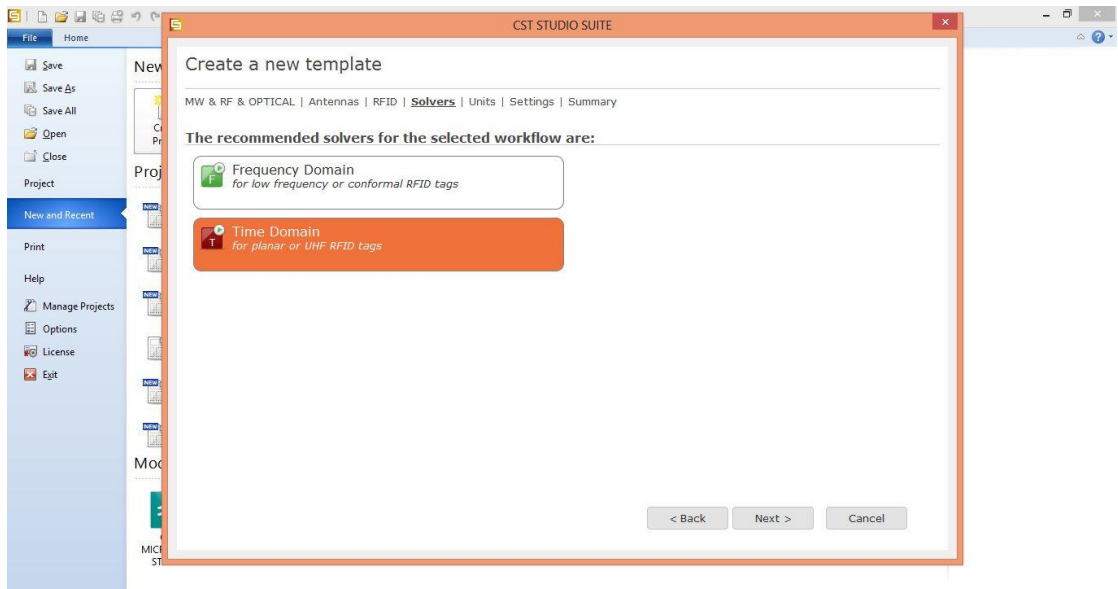
ภาพที่ 2.14 การตั้งค่าก่อนทำการออกแบบสายอากาศ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกที่ตัวเลือก Planar (Patch, Slot, etc.) เพื่อทำการออกแบบสายอากาศแบบ Slot antenna หรือสายอากาศไดโพลสล็อตแบบไม่สมมาตร



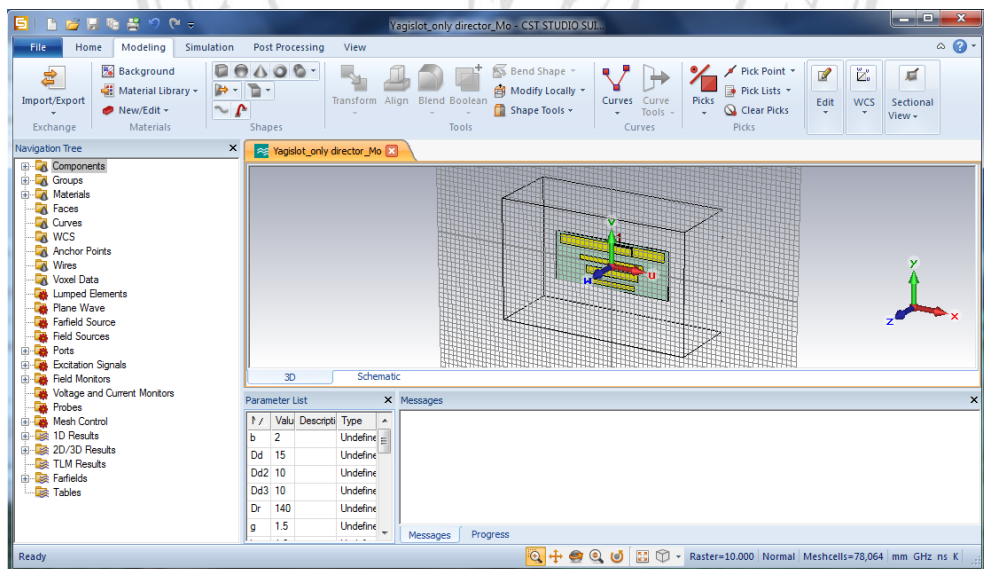
ภาพที่ 2.15 การเลือกชนิดของสายอากาศที่ออกแบบ

ขั้นตอนที่ 3 การตั้งค่าการจำลองการทำงานของสายอากาศ ให้ตั้งค่าที่ Time Domain เพื่อจำลองการทำงานในโดเมนเวลา



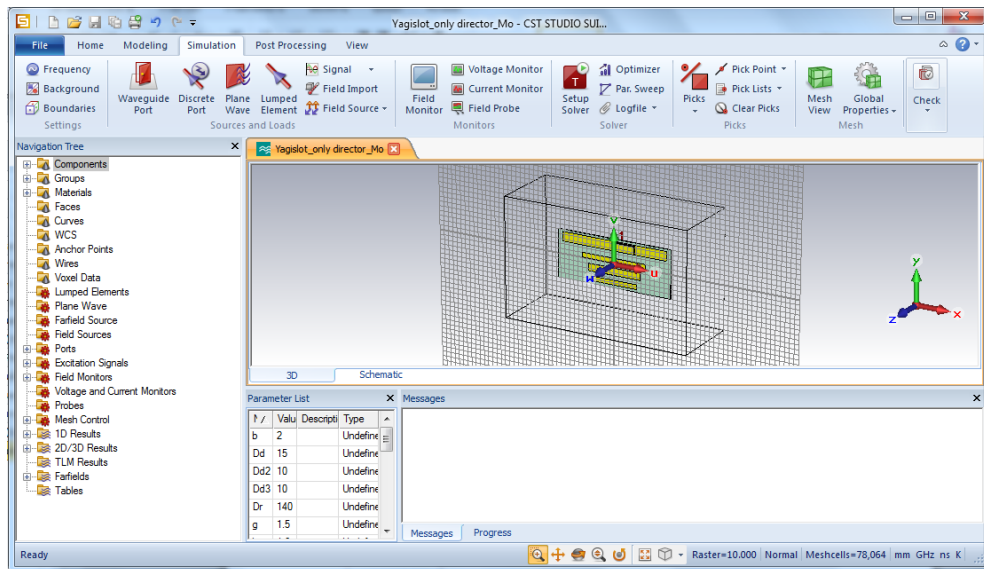
ภาพที่ 2.16 การตั้งค่าการจำลองการทำงานของสายอากาศ

ขั้นตอนที่ 4 การใช้เครื่องมือในการออกแบบโครงสร้างสายอากาศ ทำได้โดยใช้ตัวเลือก Modeling



ภาพที่ 2.17 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศ

ขั้นตอนที่ 5 การจำลองการทำงานของสายอากาศ ทำได้โดยใช้ตัวเลือก Simulation จากนั้นให้รับค่าความถี่ที่ใช้งานและอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ตรงกับการใช้งาน

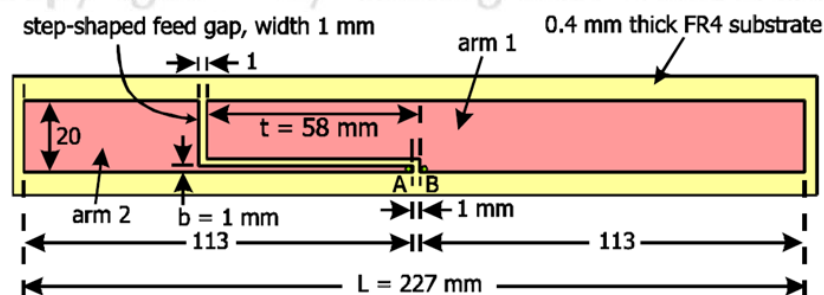


ภาพที่ 2.18 การจำลองการทำงานของสายอากาศ

2.3.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้าเอกสารและบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเห็นได้ว่ามีหลายบทความที่แสดงให้เห็นถึงปัญหาสามารถสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องได้ดังต่อไปนี้

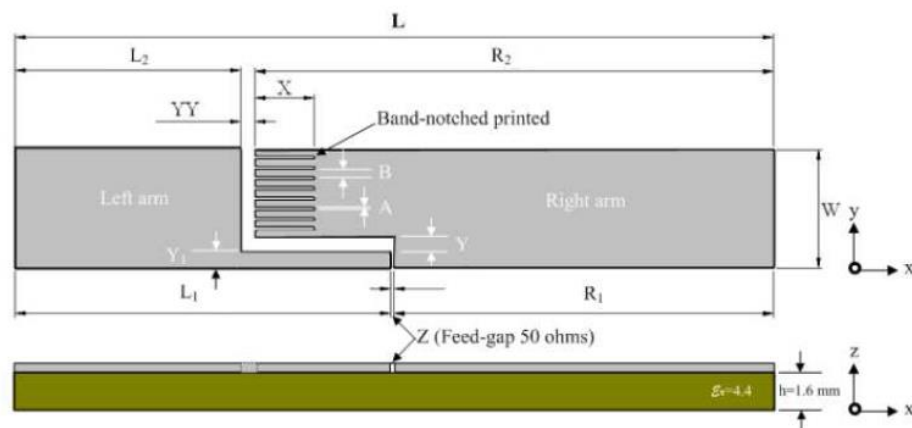
Yun-Wen Chi and Kin-Lu Wong [3] สายอากาศไดโพลที่สามารถสร้างแบนกว้างรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ที่ความถี่ 470 -806 MHz สายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด $20 \times 227 \text{ mm}^2$ และสายอากาศประกอบด้วย แขนสองข้างที่ไม่สมมาตรกัน แยกออกจากกันด้วยช่องว่างที่เรียกว่า step-shaped feed gap ปลายเปิดที่ตรงกลางของสายอากาศด้านแกนยาว และเป็นปลายที่อื่นๆด้วย ที่ระยะห่างออกไป ประมาณ $L/4$ จากตรงกลางที่ตำแหน่งตรงข้ามด้านแกนยาว ด้วยการออกแบบด้วยวิธีการ Step-shaped feed gap ส่งผลให้เกิด 2 จุดที่อยู่ติดกันของสายอากาศ ผลการวิจัยที่น่าสนใจนี้มีแบนด์วิดท์ ที่ใช้งานกว้างขึ้น 50 % VSWR ที่ 2.5:1



A, B: connected to a 50 Ω mini coaxial line

ภาพที่ 2.19 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลสล็อต แบบไม่สมมาตร

Sompop Pimpol [16] งานวิจัยนี้นำเสนอ การออกแบบและทดลองคลื่นความถี่ย่านกว้างโดยใช้สายอากาศไดโพล แบบ band-notched ทำงานในย่านความถี่ของเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอลในช่วง 470 – 862 MHz นอกจากนี้ สายอากาศที่นำเสนอนี้ยังมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และง่ายต่อการประดิษฐ์ สายอากาศนี้มีรูปทรงตั้งฉาก โดยมีความกว้าง 35 mm. ความยาว 223 mm. และประกอบด้วยส่วนที่แผ่กระจายคลื่นแบบไม่สมมาตรกัน 2 ส่วนของแกนซ้าย และแกนขวา ซึ่ง 2 ส่วนนี้จะอยู่แยกออกจากกันด้วย step-shaped feed gap กับส่วนปลายเปิดของมัน ที่ส่วนกลางของสายอากาศ ขอบด้านยาว และส่วนอื่นของปลายเปิด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางของ ขอบด้านยาวด้านตรงข้ามประมาณ $L/4$ ผลของค่าสูญเสียย้อนกลับ (S11) ค่ากำลังขยาย (gain) และรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น (radiation pattern) ของสายอากาศที่นำเสนอนี้ใช้การจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สายอากาศชื่อ CST Microwave Studio จะเห็นได้ว่า สายอากาศที่ได้นำเสนอนี้ มีช่วงความถี่ที่สามารถเข้าถึงได้ที่ระยะ 470 – 900 MHz ประมาณ 62.77 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังขยายสูงสุดที่วัดได้มีค่าประมาณ 2.43 dBi 2.53 dBi และ 3.69 dBi ที่ช่วงความถี่ 514, 650 และ 786 MHz ตามลำดับ ในส่วนท้าย เป็นการนำเสนอและสรุปผลจากการจำลอง และวัดผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ

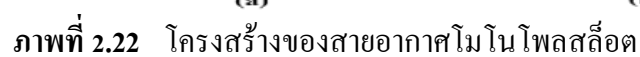


ภาพที่ 2.20 โครงสร้างของสายอากาศไดโพล แบบ band-notched

Li และคณะ [17] ได้นำเสนอสายอากาศบรอดแบนด์แบบแอททิฟ รับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอล ดังแสดงในภาพที่ 2.21 มีคุณสมบัติสัญญาณรบกวนต่ำและอัตราขยายสายอากาศที่สูง สายอากาศแอททิฟนี้เป็นการรวมกันระหว่างบรอดแบนด์แบบพาสซีฟ และวงจรขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ ในย่าน VHF ได้ที่ความถี่ 170-230 MHz มีอัตราขยายสายอากาศที่ 17 dBd. และในย่าน UHF ได้ที่ความถี่ 350-650 MHz มีอัตราขยายสายอากาศที่ 23 dBd. โดยงานวิจัยนี้จะใช้ออกสารนี้เป็นต้นแบบในการออกแบบสายอากาศ



หลักสูตรสำหรับการใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์



บทนี้เป็นการนำเสนอทฤษฎี เรื่องสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน ทฤษฎีสายอากาศพื้นฐานของสายอากาศไดโพล สายอากาศไมโครสริป และสายอากาศแบบร่อง สายอากาศภายใน ภายนอกอาคาร เป็นต้น ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ ได้เลือกทำสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินแบบภายในอาคาร เนื่องจากมีขนาดไม่ใหญ่ โครงสร้างไม่ซับซ้อน เหมาะกับการแก้ปัญหาการรับชมสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินไม่ได้ในอาคารสูง และได้มีการศึกษางานวิจัยต่างๆ ประกอบ เพื่อที่สามารถออกแบบสายอากาศภายในอาคารได้ตามที่ต้องการ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศภายในอาคารแบบแบนราบสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล

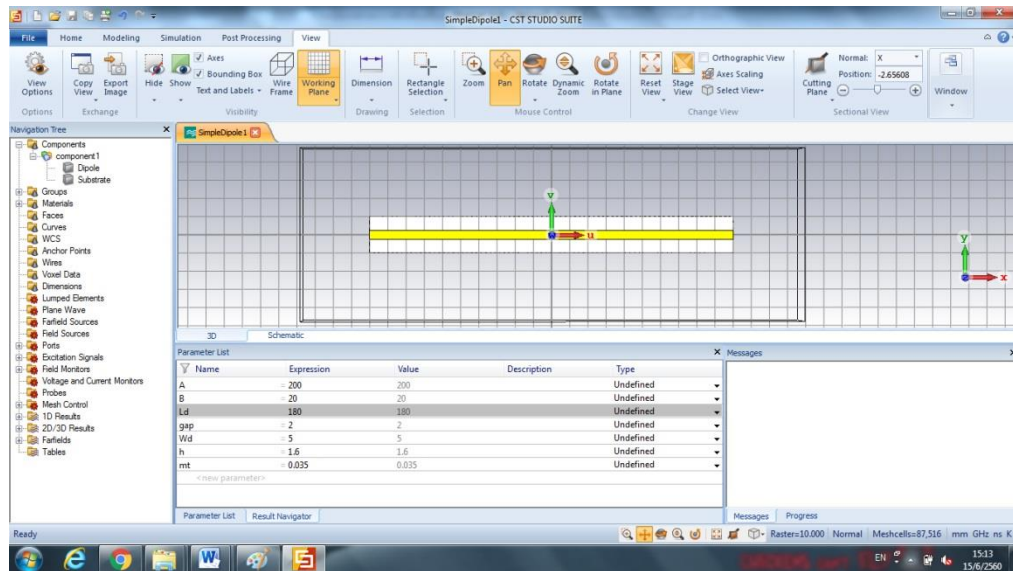
ในโครงงานนี้เป็นออกแบบ สายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ภายในอาคารให้มีแถบความถี่ที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 510 – 790 MHz ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของโทรทัศน์ระบบดิจิทัล แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล พ.ศ. 2555 โดยวัสดุที่ใช้ในการสร้างสายอากาศคือ FR4 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติของดังนี้ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) 4.45 ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) 1.6 mm. ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (σ) $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ความหนาของวัสดุตัวนำ 0.015 mm. และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.02

สำหรับขั้นตอนการศึกษาได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสายอากาศให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล

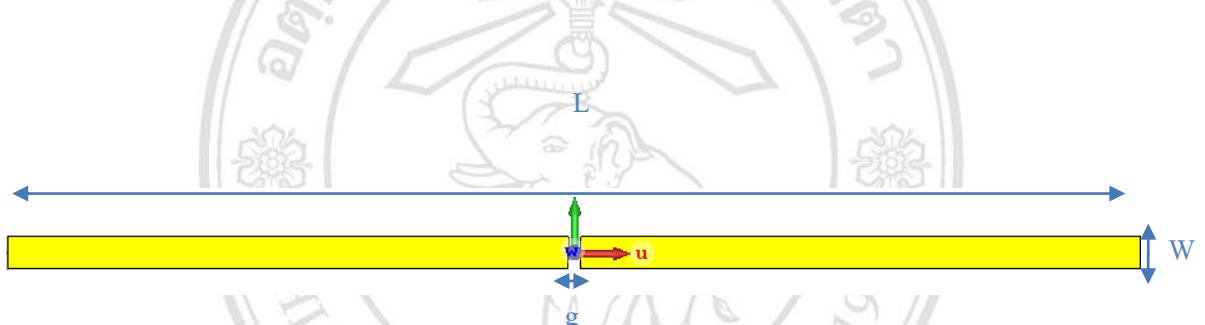
3.1 การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไดโพลแบบสล็อต

3.1.1 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครึ่งความยาวคลื่น

ในการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตใช้ความยาวของสายอากาศประมาณครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda/2$) เมื่อคำนวณจากความถี่ที่ใช้งานได้ความยาวของสายอากาศ 180 mm. โดยใช้โปรแกรม CST MSW Studio เพื่อออกแบบและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครึ่งความยาวคลื่นโดยใช้โปรแกรม CST



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครึ่งความยาวคลื่น

จากภาพที่ 3.2 ลักษณะสายอากาศเป็นเส้นตรง โดยมีจุดป้อนสัญญาณบริเวณ กึ่งกลางของสายอากาศและมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

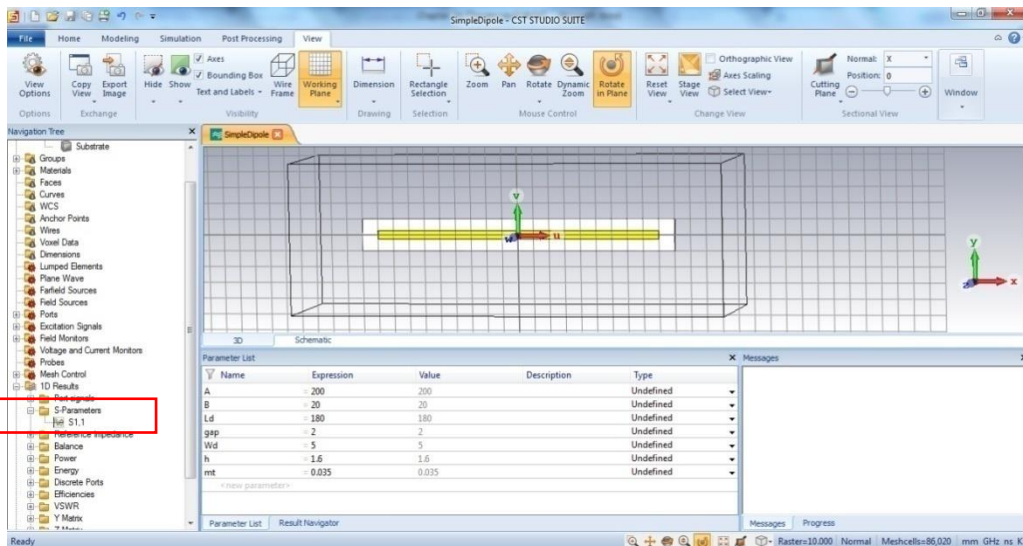
เมื่อ

W คือ ความกว้างของสายอากาศ (mm.)

L คือ ความยาวของสายอากาศ (mm.)

g คือ ความกว้างสล็อต (mm.)

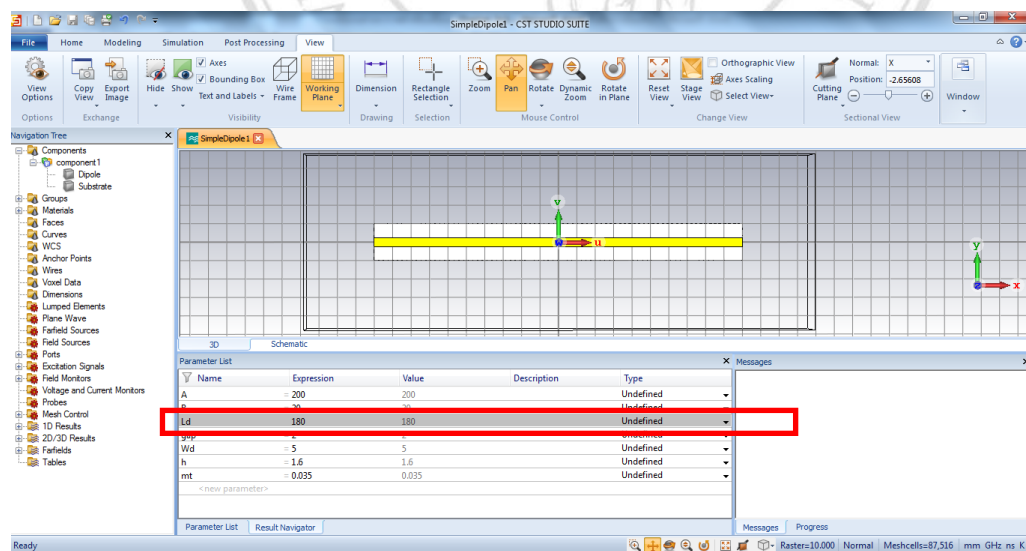
เมื่อออกแบบสายอากาศแล้วขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับซึ่งทำได้โดยใช้ตัวเลือก S-parameter ดังภาพที่ 3.3



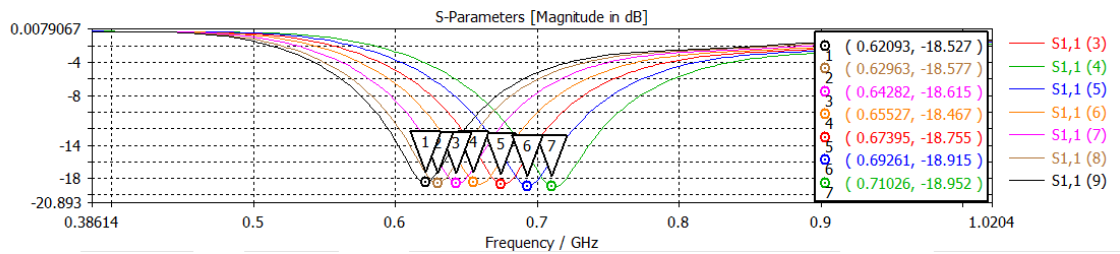
ภาพที่ 3.3 การใช้โปรแกรม CST ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ

3.1.2 การศึกษาความเปลี่ยนแปลงจาก การปรับความยาว (L) ของสายอากาศไดโพลแบบ สล็อตครึ่งความยาวคลื่น

ได้ทำการศึกษาความเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของสายอากาศ (L) โดยมี วิธีการและผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ ดังนี้



ภาพที่ 3.4 วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสายอากาศแบบไดโพล (L)



ภาพที่ 3.5 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L

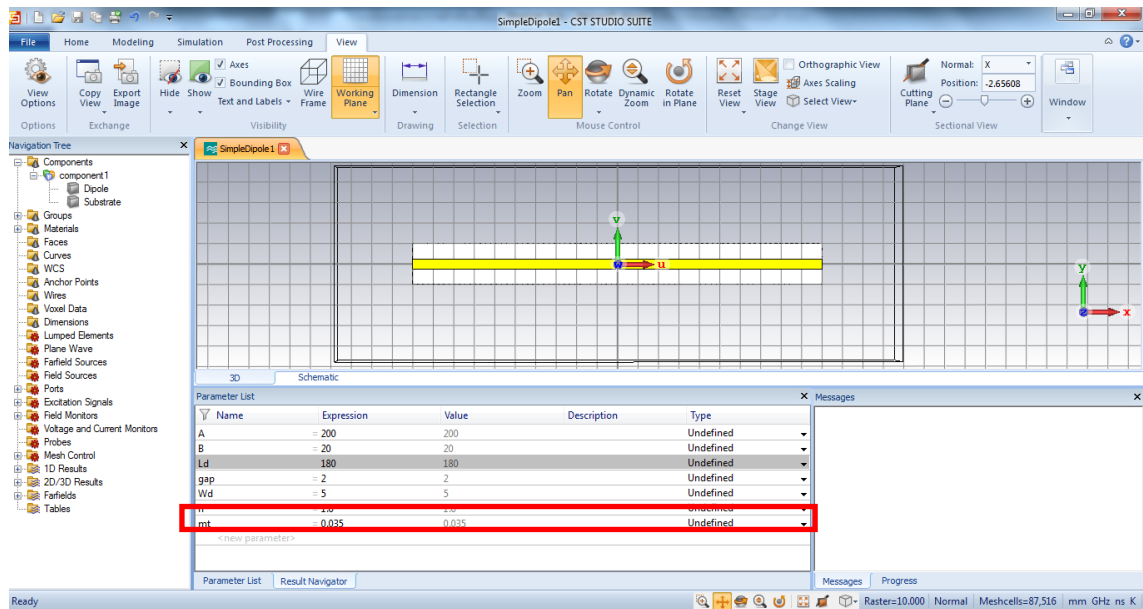
เมื่อ

- (1) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (L) เป็น 180 mm.
- (2) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (L) เป็น 170 mm.
- (3) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (L) เป็น 175 mm.
- (4) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (L) เป็น 185 mm.
- (5) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (L) เป็น 190 mm.
- (6) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (L) เป็น 195 mm.
- (7) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (L) เป็น 200 mm.

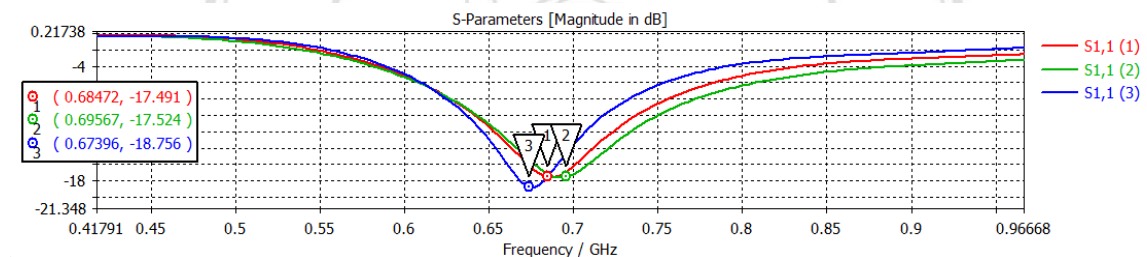
จากการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า L ทั้ง 7 ค่าเปรียบเทียบกัน พบว่าค่า L มีผลต่อการตอบสนองต่อความถี่กลางมากที่สุดโดยจะมีการแปรผกผันกัน เมื่อค่า L มากขึ้น ความถี่กลางลดลง ในทางกลับกัน เมื่อค่า L น้อยลงความถี่กลางมากขึ้น จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า L พบว่าในการออกแบบสายอากาศควรเลือกค่า L ให้เหมาะสมต่อความถี่กลางที่ต้องการก่อนจากนั้นจึงปรับค่าให้แมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สุด

3.1.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากปรับความกว้าง (W) ของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครึ่งความยาวคลื่น

จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงจากการปรับค่าความกว้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อต (W) ค่าความยาวของสายอากาศ (L) เท่ากับ 180 mm. การวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้ดังนี้



ภาพที่ 3.6 วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อต (W)



ภาพที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า W

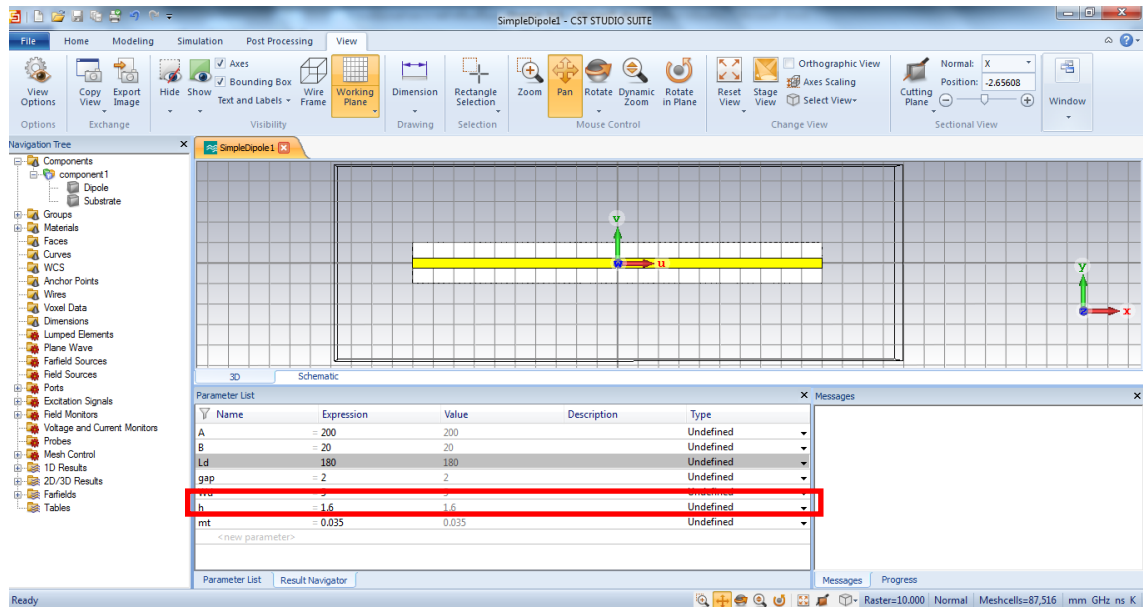
เมื่อ

- (1) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสายอากาศ(W) = 10 mm.
- (2) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสายอากาศ(W) = 15 mm.
- (3) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสายอากาศ(W) = 5 mm.

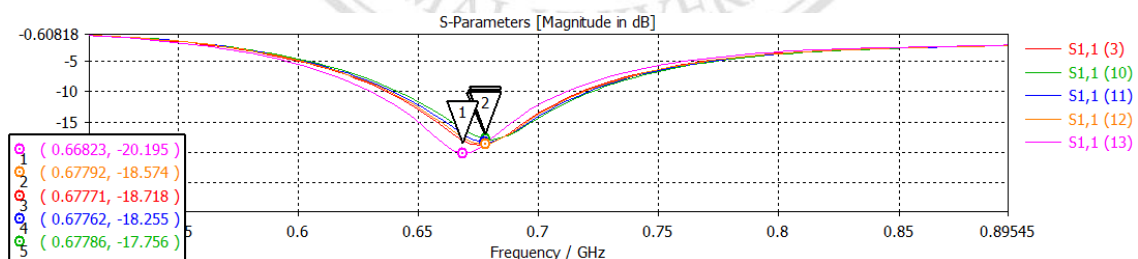
จากการจำลองเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสายอากาศไดโพล (W) ทั้ง 3 ค่าพบว่าค่าความกว้างของสายอากาศมีผลกับความถี่กลาง และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ โดยเมื่อสายอากาศมีความกว้างมากจะมีการตอบสนองที่ความถี่กลางที่สูงขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับลดลงในทางกลับกัน เมื่อสายอากาศมีความกว้างน้อย ความถี่กลางลดลงและมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่มากขึ้น

3.1.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากปรับความกว้างสล็อต (g) ของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครึ่งความยาวคลื่น

จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงจากการปรับค่าความกว้างสล็อตของสายอากาศไดโพลแบบสล็อต (g) ค่าความยาวของสายอากาศ (L) เท่ากับ 180 mm. ค่าความกว้างของสายอากาศ (W) เท่ากับ 5 mm. การวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ ทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้



ภาพที่ 3.8 วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างสล็อตของสายอากาศไดโพลแบบสล็อต (g)



ภาพที่ 3.9 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า g

เมื่อ

- (1) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสล็อต (g) เป็น 2 mm.
- (2) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสล็อต (g) เป็น 0.5 mm.
- (3) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสล็อต (g) เป็น 1 mm.
- (4) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสล็อต (g) เป็น 1.5 mm.
- (5) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความกว้างของสล็อต (g) เป็น 5 mm.

จากการจำลองเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสล็อต (g) พบว่าค่าความกว้างของสล็อตมีผลกับความถี่กลาง และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ โดยเมื่อปรับความกว้างสล็อตมากขึ้น ทำให้การตอบสนองที่ความถี่กลางต่ำลงและมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับต่ำ ในทางกลับกัน เมื่อปรับความกว้างสล็อตให้สั้นลง ค่าความถี่กลางสูงขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

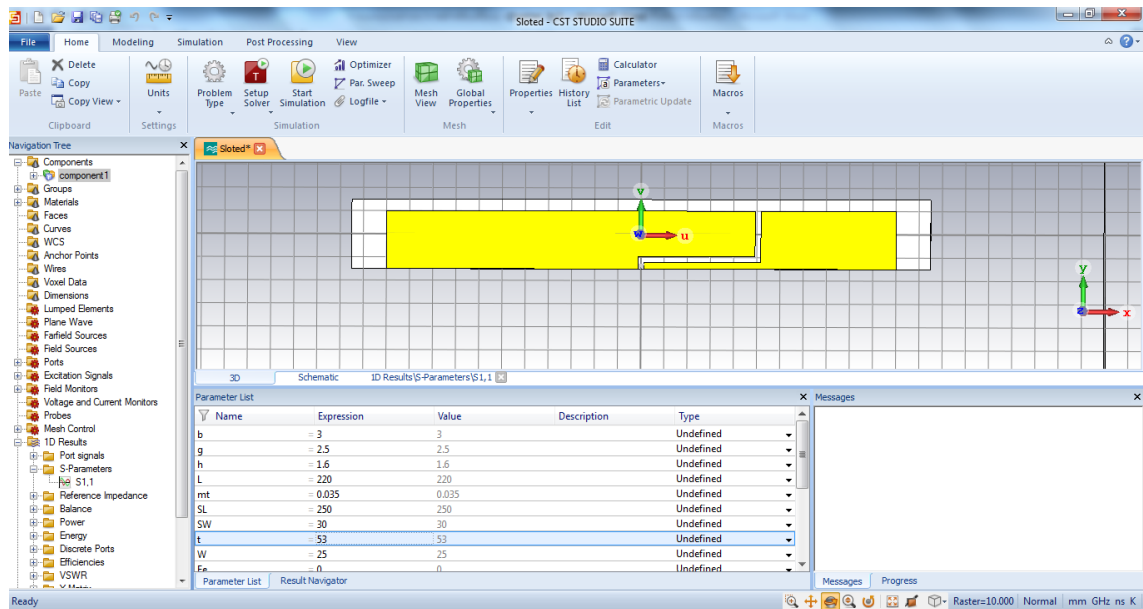
จากขั้นตอนที่ 3.1.1 -3.1.4 เป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของความยาวสายอากาศ ความกว้างของสายอากาศ และความกว้างของสล็อต ค่าความถี่กลางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ มีการปรับเปลี่ยนตามการปรับแต่ง แต่ผลที่ได้ สายอากาศที่ออกแบบ ไม่สามารถรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลได้ทั้งแบนด์เนื่องจาก มีค่าแบนด์วิธที่แคบ ไม่ถึงสเปกสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล

ดังนั้นจึงศึกษางานวิจัยของ Yun-Wen Chi and Kin-Lu Wong [11] ที่ออกแบบสายอากาศแบบใหม่ สายอากาศไดโพลที่สามารถสร้างแบนด์กว้างรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ที่ความถี่ 806- 470MHz สายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด $20 \times 227 \text{ mm}^2$ และสายอากาศประกอบด้วย แขนสองข้างที่ไม่สมมาตรกัน แยกออกจากกันด้วยช่องว่างที่เรียกว่า step-shaped feed gap นำมาประยุกต์ใช้ตามข้อที่ 3.1.5

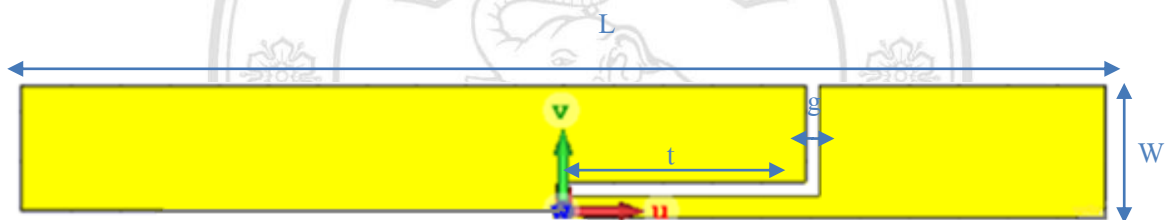
3.1.5 การศึกษาการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น

ในการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรใช้ความยาวของสายอากาศประมาณครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda/2$) เมื่อคำนวณจากความถี่ที่ใช้งาน ได้ความยาวของสายอากาศประมาณ 220 mm. ความกว้างของสายอากาศ 25 mm. ความยาวฟีดสายอากาศ 53 mm. และความกว้างสล็อต 2.5 mm. โดยในการออกแบบสายอากาศได้ใช้โปรแกรม CST MSW Studio เพื่อออกแบบ โครงสร้างและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังภาพที่ 3.10 และมีโครงสร้างสายอากาศดังภาพที่ 3.11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 3.10 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น

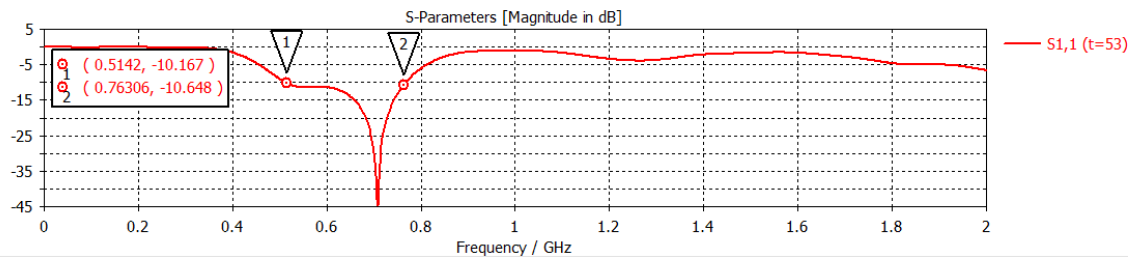


ภาพที่ 3.11 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น

จากภาพที่ 3.11 ลักษณะสายอากาศที่ออกแบบมีลักษณะเป็นรูปเส้นตรงโดยมีจุดป้อนสัญญาณบริเวณ กึ่งกลางด้านบนของสายอากาศและมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ ได้ดังภาพที่ 3.12

เมื่อ

- W คือ ความกว้างของสายอากาศ (mm.)
- L คือ ความยาวของสายอากาศ (mm.)
- t คือ ความยาวฟีด (mm.)
- g คือ ความกว้างสล็อต (Gap) (mm.)

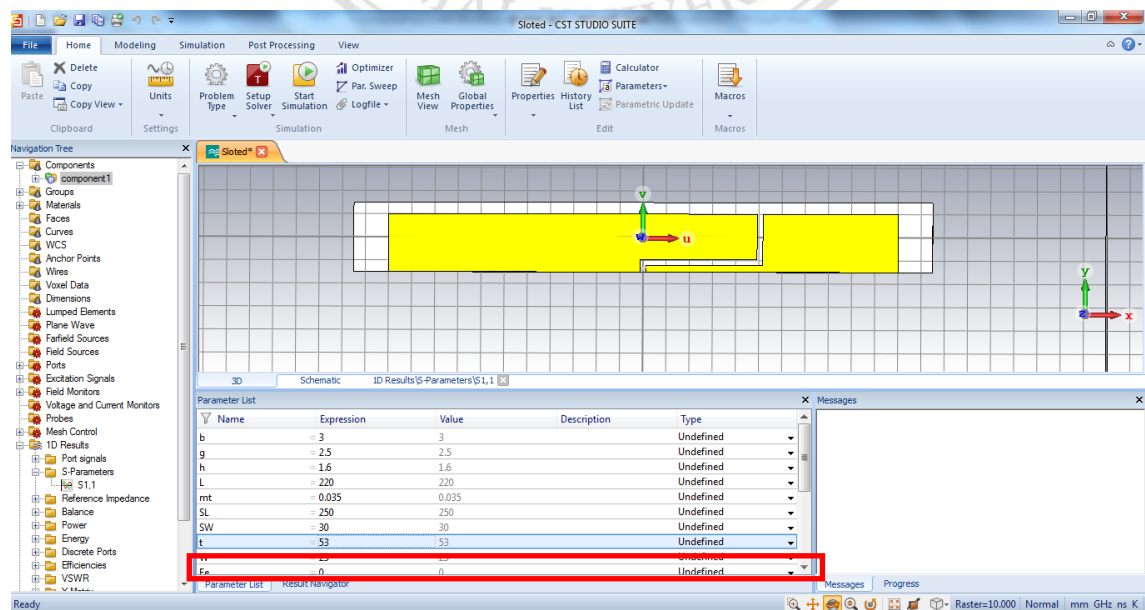


ภาพที่ 3.12 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ สายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น

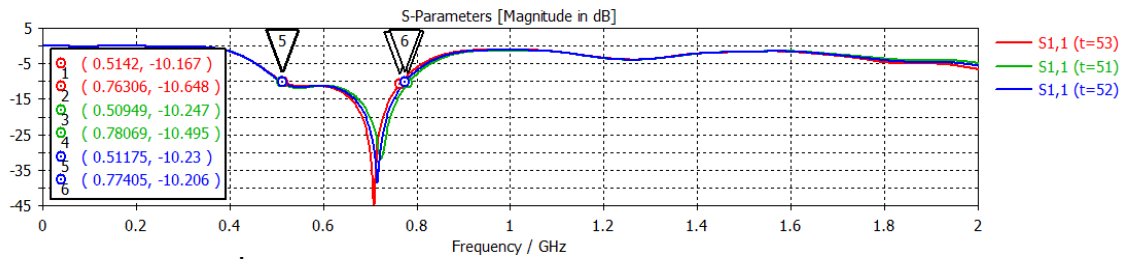
จากภาพที่ 3.12 เมื่อใช้วิธีการ step-shaped feed gap ออกแบบเห็นสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น พบว่าค่าแบนด์วิดท์ที่ได้สูงขึ้น มีค่า เป็น 514 -763 MHz ซึ่ง ไม่สามารถรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ได้ทั้งย่านความถี่ จึงทำการศึกษาปรับเปลี่ยนความยาวฟีดสายอากาศของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น ดังในข้อ 3.1.6

3.1.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากปรับความยาวฟีด (t) ของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น

จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงจากการปรับค่าความยาวฟีดของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น (t) ค่าความยาวของสายอากาศ (L) เท่ากับ 220 mm. ความกว้างของสายอากาศ 25 mm. ความกว้างสล็อต 2.5 mm. ได้ค่าการวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้ดังนี้



ภาพที่ 3.13 วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวฟีดของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น (t)



ภาพที่ 3.14 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า t

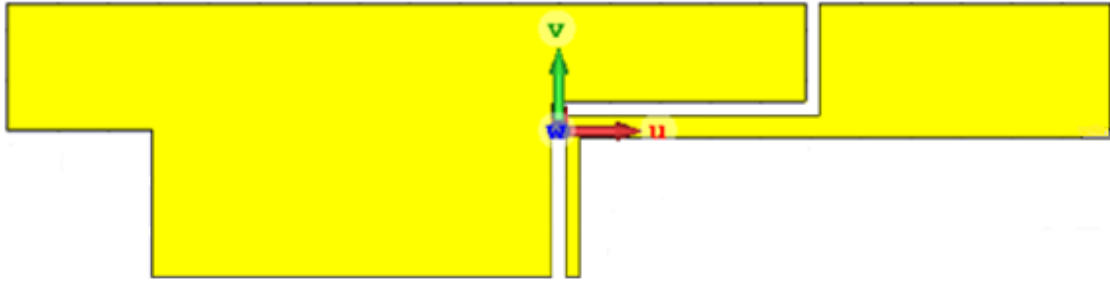
เมื่อ

- (1) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความยาวฟีด (t) เป็น 53 mm.
- (2) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความยาวฟีด (t) เป็น 51 mm.
- (3) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ความยาวฟีด (t) เป็น 52 mm.

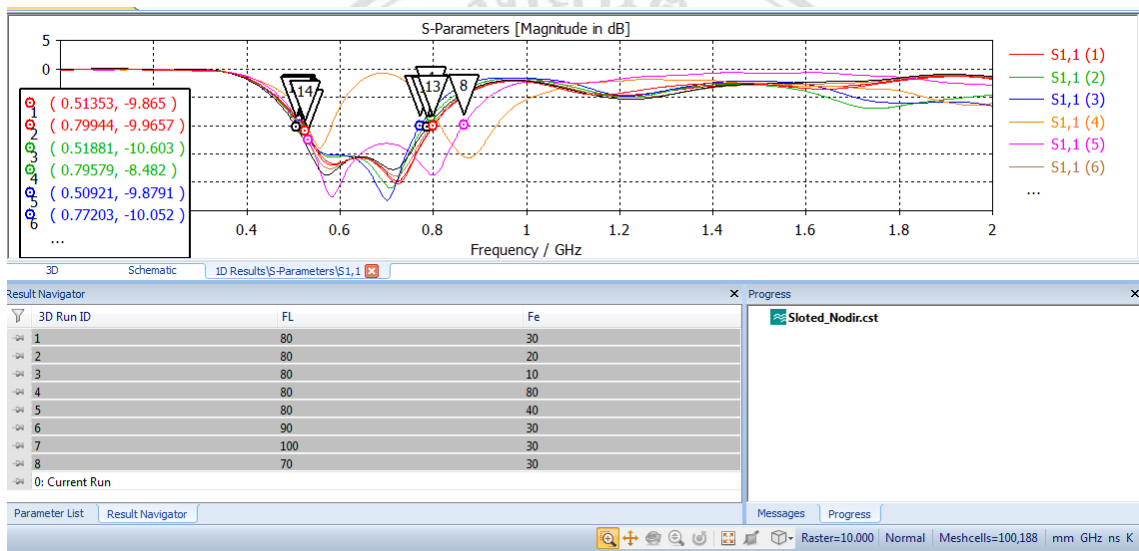
จากการศึกษาเปลี่ยนแปลงค่าความยาวฟีด (t) พบว่าค่าความยาวฟีดของสายอากาศมีผลกับค่าแบนด์วิดท์ และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ โดยเมื่อสายอากาศมีความยาวฟีดมากจะมีแบนด์วิดท์กว้าง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่สูงขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อสายอากาศมีความยาวฟีดน้อยแบนด์วิดท์แคบและมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำลง แต่เห็นได้ว่าค่าแบนด์วิดท์ ที่ได้ไม่สามารถรับสัญญาณ โทรศัพท์มือถือ ได้ทั้งย่านความถี่ จึงทำการศึกษาเพิ่มขนาดของอาร์ม ดังในข้อ 3.1.7

3.1.7 การศึกษาการเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือ โดยมีวิธีการและผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ ดังนี้

ในการศึกษาการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือ ทำได้โดยการออกแบบเพิ่มขนาดของอาร์มทางด้านซ้ายมือให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรับให้เหมาะสมโดยมีความยาวของสายอากาศประมาณ 220 mm. ความกว้างของสายอากาศ 25 mm. ความยาว ฟีดสายอากาศ 53 mm. และความกว้างสล็อต 2.5 mm ออกแบบโครงสร้างและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังภาพที่ 3.15 และมีโครงสร้างสายอากาศดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.15 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่น
ที่เพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือ

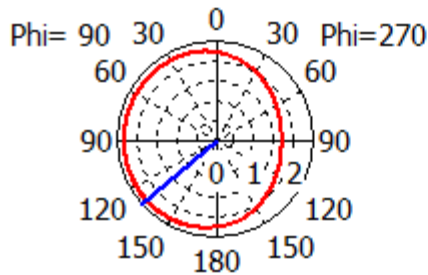


ภาพที่ 3.16 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ หลังจากการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือ

จากภาพที่ 3.16 เมื่อทำการเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับความถี่ให้ดีขึ้น และทำการปรับขนาดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ผลที่ได้ ค่าแบนด์วิดท์ เป็น 518 -799 MHz ไม่สามารถรับสัญญาณ โทรศัพท์มือถือ ได้ทั้งย่านความถี่ จากการศึกษพบว่าเมื่อเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือ ทำให้รับความถี่ครอบคลุมในย่านสูงขึ้น และมีทิศทางในการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสองมิติดังภาพที่ 3.17 แต่ไม่สามารถรับความถี่ในย่านต่ำลงมาได้ จึงทำการศึกษาเพิ่มขนาดของอาร์ม ด้านขวามือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับความถี่ในย่านต่ำ ดังในข้อ 3.1.8

Farfield Directivity Abs (Phi=90)

— farfield (f=0.65) [1]



Frequency = 0.65

Main lobe magnitude = 2.32 dBi

Main lobe direction = 131.0 deg.

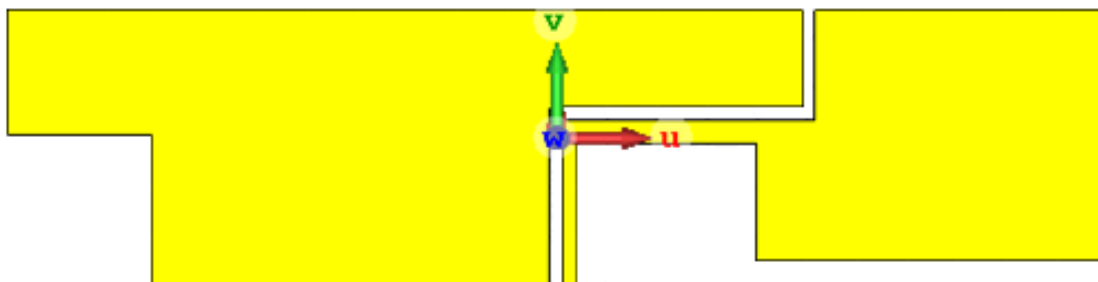
Theta / Degree vs. dBi

ภาพที่ 3.17 ทิศทางในการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสองมิติ

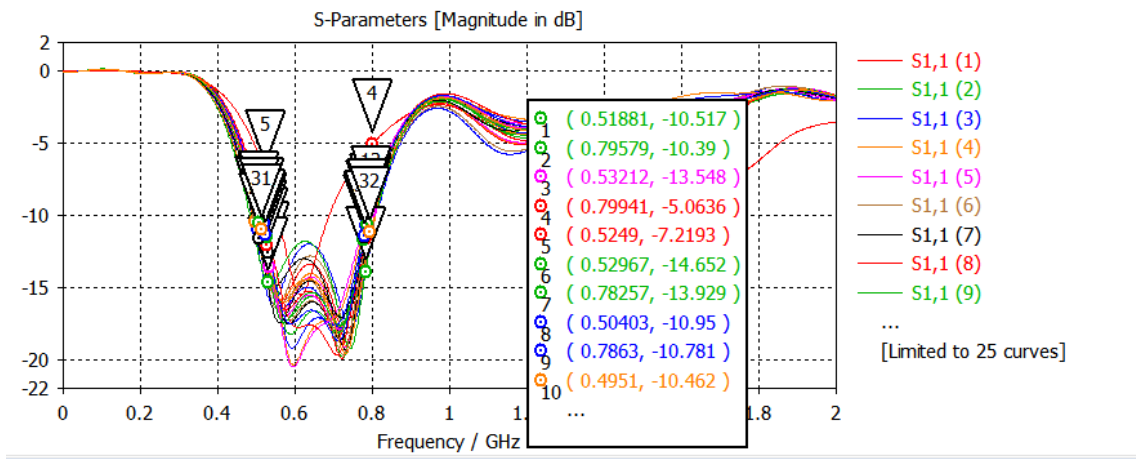
จากภาพที่ 3.17 เป็นรูปแบบในการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบไดโพลในรูปแบบสองมิติ สังเกตได้ว่าลักษณะการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบไดโพลเป็นลักษณะการแพร่คลื่นแบบมีทิศทาง โดยมีทิศทางในการแพร่คลื่นพหุสัญญาณหลักทำมุมที่ 131 องศา

3.1.8 การศึกษาการเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านขวามือต่อจากอาร์มด้านซ้ายมือ

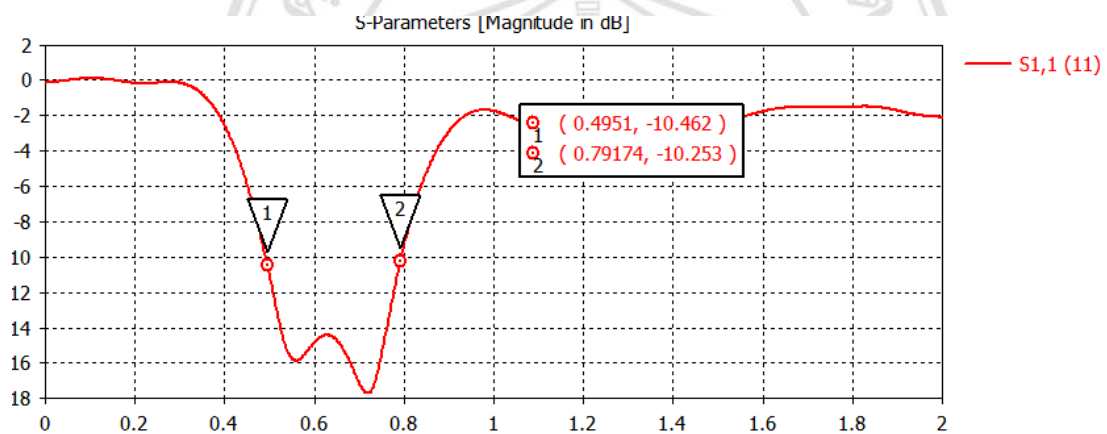
ในการศึกษาการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือ พบว่าเมื่อเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือ ทำให้รับความถี่ครอบคลุมในย่านสูงขึ้น แต่ไม่สามารถรับความถี่ในย่านต่ำลงมาได้ จึงทำการศึกษาเพิ่มขนาดของอาร์ม ด้านขวามือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับความถี่ในย่านต่ำ ทำได้โดยการออกแบบเพิ่มขนาดของอาร์มทางด้านขวามือให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรับให้เหมาะสมโดยมีความยาวของสายอากาศประมาณ 220 mm. ความกว้างของสายอากาศ 25 mm. ความยาว ฟีดสายอากาศ 53 mm. และมีความกว้างสล็อต 2.5 mm. ออกแบบโครงสร้างและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังภาพที่ 3.18 และมีโครงสร้างสายอากาศดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.18 การเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ



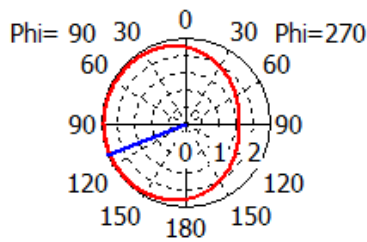
ภาพที่ 3.19 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ หลังจากการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ



ภาพที่ 3.20 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ หลังจากการเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ

จากภาพที่ 3.19 และ 3.20 เมื่อทำการเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ ค่าแบนด์วิทที่ได้เป็น 495 -791 MHz ค่าที่ได้เป็นไปตามที่ต้องการ สเปกของทีวีดิจิตอล 510 – 790 MHz จากขั้นตอน 3.1.7-3.1.8 เป็นการเพิ่มความยาวทางไฟฟ้า(Electrical length) ทำให้มีแบนด์วิทเพิ่มขึ้น ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศจะเป็นการนำช่วงความถี่สองแบนด์มารวมกันโดยส่งผ่านพลังงานกันผ่าน ช่องแผ่ซ้าย (แถบใหญ่) จะเป็นช่วงความถี่สูง แผ่ขวาจะเป็นช่วงความถี่ต่ำ

Farfield Directivity Abs (Phi=90)



Theta / Degree vs. dBi

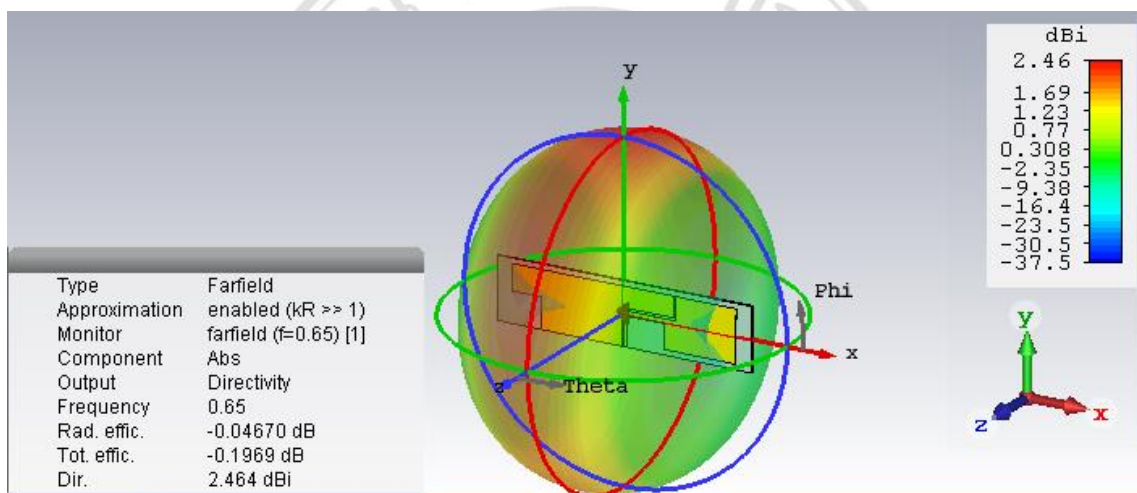
— farfield (f=0.65) [1]

Frequency = 0.65

Main lobe magnitude = 2.4 dBi

Main lobe direction = 112.0 deg.

ภาพที่ 3.21 ทิศทางในการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสองมิติ



ภาพที่ 3.22 ทิศทางในการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสามมิติ

จากภาพที่ 3.21 และภาพที่ 3.22 เป็นรูปแบบในการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบไดโพลในรูปแบบสองมิติและสามมิติตามลำดับ สังเกตได้ว่าลักษณะการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบไดโพลเป็นลักษณะการแพร่คลื่นแบบมีทิศทางโดยมีทิศทางการแพร่คลื่นพหุสัญญาณหลักทำมุมที่ 112 องศา จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มขนาดอาร์มทางด้านขวามือเพิ่มเติมก็ทำให้ทิศทางเปลี่ยนแปลงไปด้วย

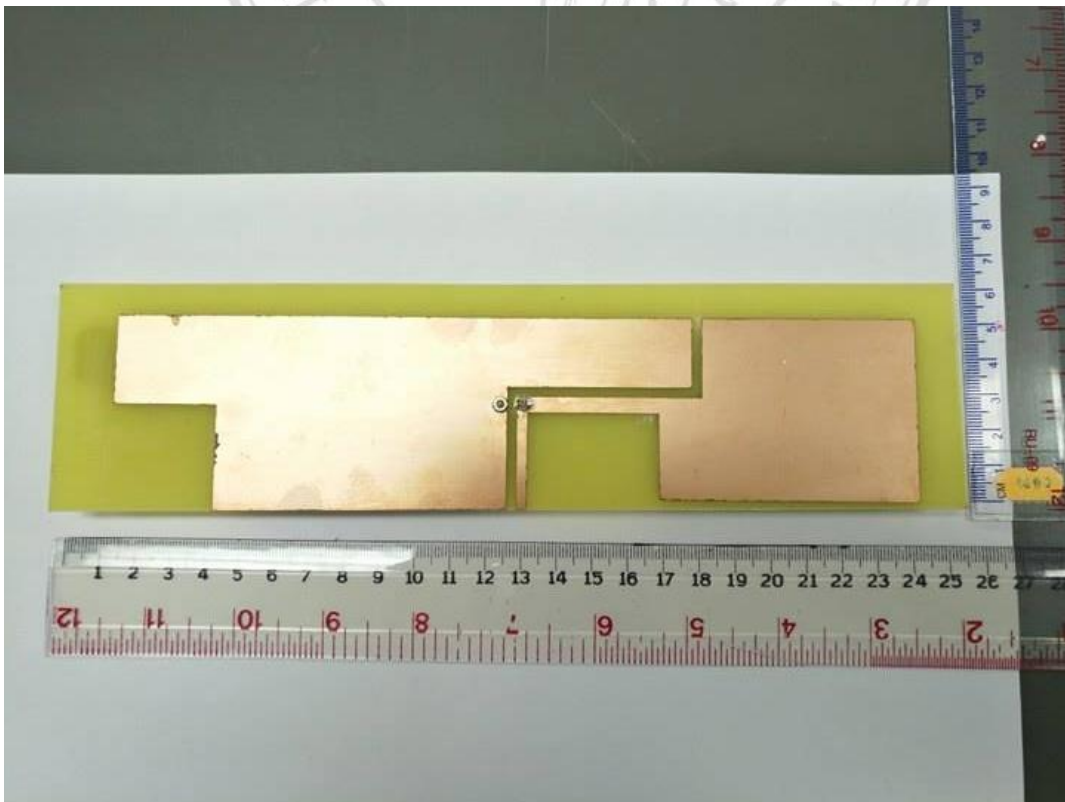
บทที่ 4

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตร

ในบทนี้กล่าวถึงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตร โดยโครงการนี้ใช้โปรแกรม CST MWS Studio สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ ในส่วนของการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ออกแบบใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analysis) ของบริษัท Agilent ซึ่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับได้ผลดังนี้

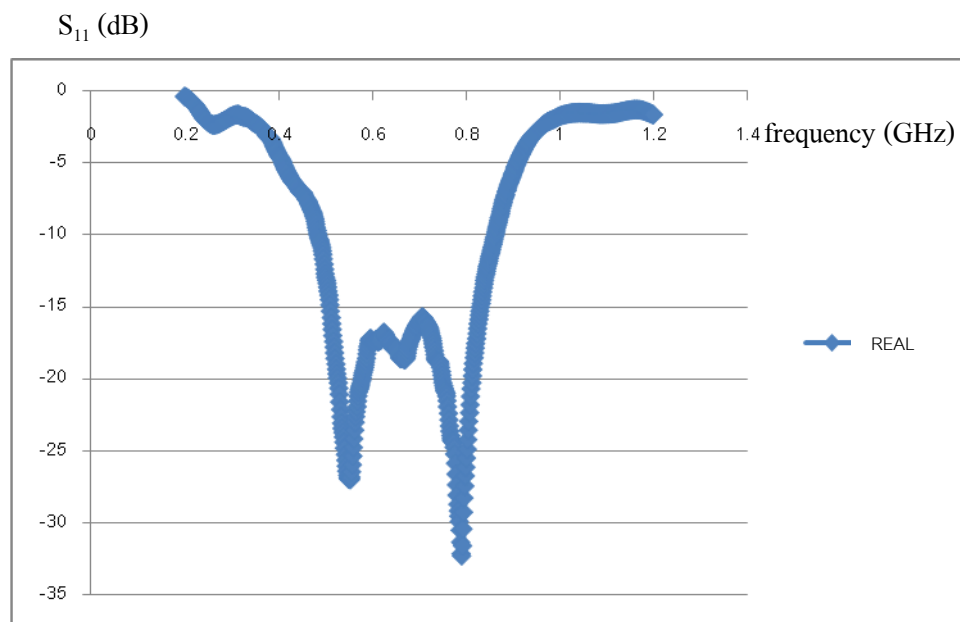
4.1 ผลการวัดสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรเมื่อเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ

สายอากาศไดโพลแบบไม่สมมาตรเมื่อเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือที่ได้ออกแบบ และวิเคราะห์การทำงาน ได้ถูกนำไปสร้างจริงบนวัสดุชนิด FR4 โดยมีขนาดของสายอากาศ 60 x 255 mm² โดยสายอากาศที่สร้างจริงแสดงได้ดังภาพที่ 4.1

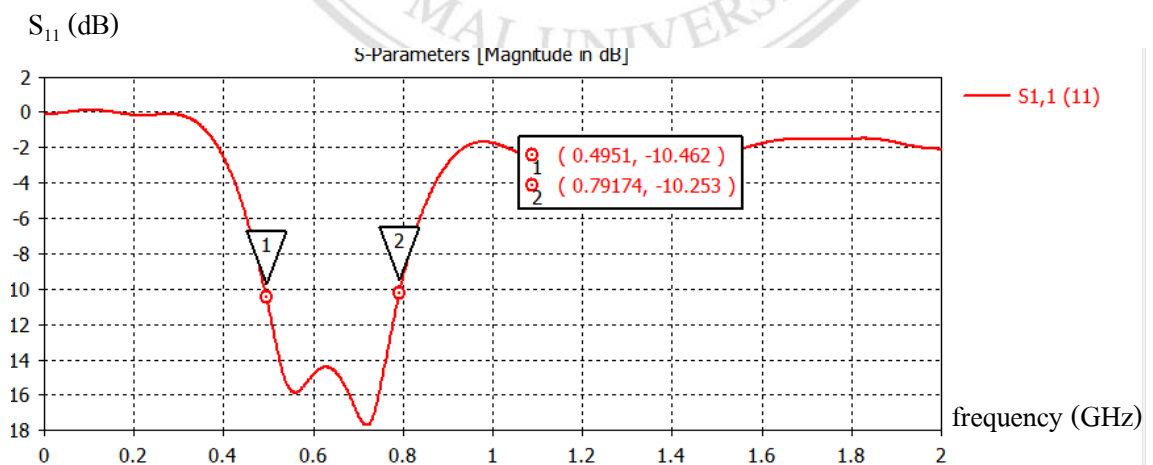


ภาพที่ 4.1 ภาพจริงของสายอากาศที่ออกแบบ

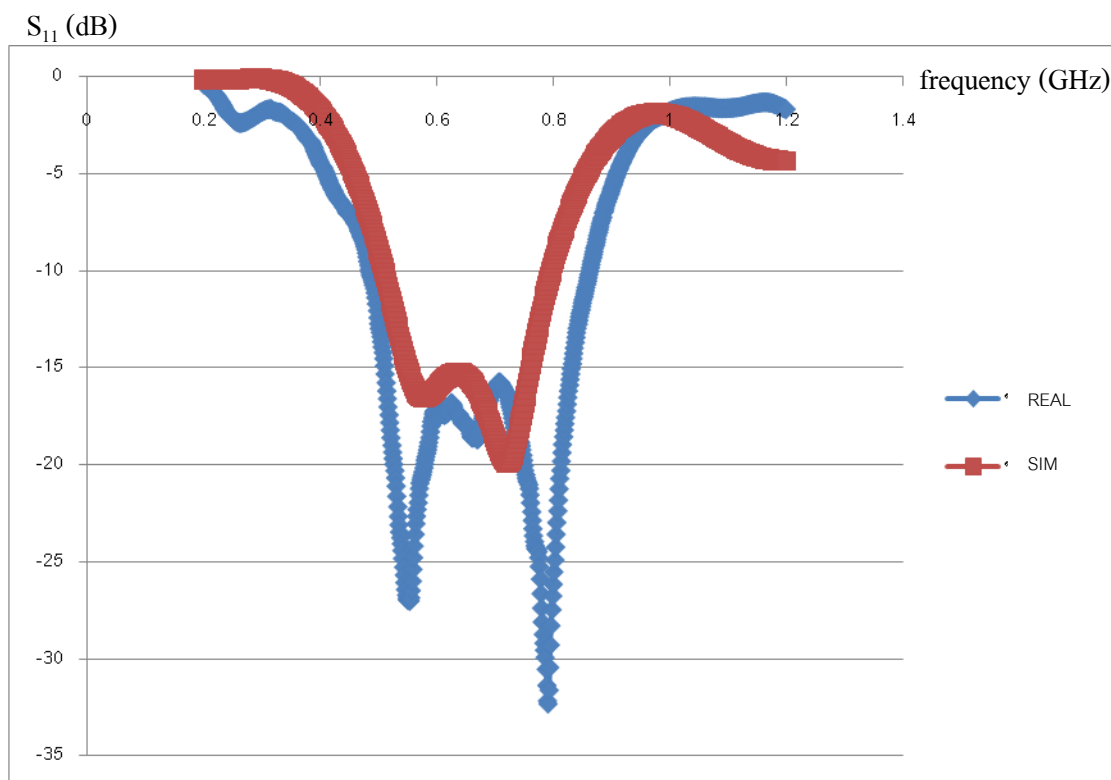
เมื่อสร้างชิ้นงานจริงแล้วจึงนำสายอากาศที่สร้างไปวัดค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analysis) ซึ่งได้วัดค่าในช่วงความถี่ 0.2 – 1.2 GHz และผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับแสดงได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากการวัดจริง



ภาพที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากการจำลองการทำงาน



ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากการวัดจริงกับการจำลอง

พบว่าค่าที่วัดกับค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานมีความแตกต่างกัน โดยที่ช่วงความถี่ของสายอากาศที่ได้จากการวัดจริงมีช่วงความถี่ที่แคบกว่า โดยค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดและจากการจำลองการทำงานเปรียบเทียบได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากผลการวัดและจำลองของสายอากาศ

สมบัติ	ผลที่ได้จากการวัดจริง	ผลที่ได้จากการจำลอง
ความถี่กลาง (MHz)	600	643.42
แบนด์วิดท์ (MHz)	400 – 800	495.10 – 791.74
ค่าว่าสูญเสียย้อนกลับ (dB)	-33	-18

ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับระหว่างผลการวัดและการจำลองการทำงานของสายอากาศพบว่าค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ประเภทสายอากาศมีความไวต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอกมาก ยกตัวอย่างเช่น ในการวัดถ้าวงจรสายอากาศอยู่ใกล้โลหะค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจะเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม และปัญหาความไม่แม่นยำที่เกิดจากการสร้างอุปกรณ์ก็มีผลต่อการวัดค่าจริง โดยในขั้นตอนการสร้างสายอากาศใช้เทคโนโลยีวงจรพิมพ์

ซึ่งเป็นวิธีการสร้างโดยใช้น้ำยากัดโลหะซึ่งอาจจะมีส่วนของโลหะที่เป็นสายอากาศเกิดการสึกกร่อนได้ด้วยปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้นเป็นเหตุให้ค่าที่ได้จากการวัดจริงมีความถี่กลางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับไม่เหมือนค่าที่ได้จากการจำลอง



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 5

บทสรุป

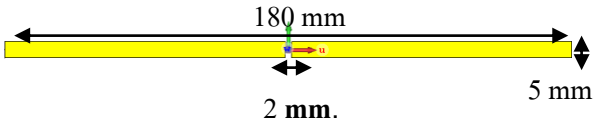
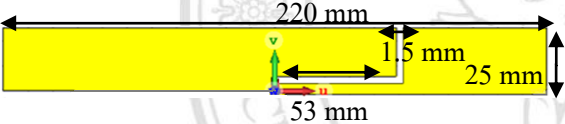
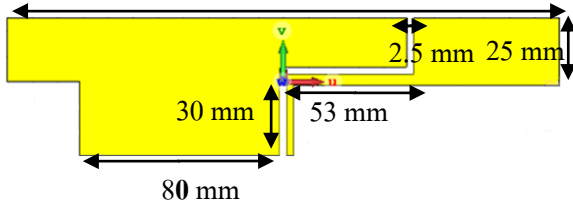
ในบทนี้เป็นการสรุปการทำงานและขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ โดยเริ่มต้นจากสายอากาศไดโพลแบบสล็อตโครงสร้างพื้นฐาน พัฒนาขึ้นจนถึงสายอากาศไดโพลแบบสล็อตที่ได้ทำการสร้างจริง เพื่อให้ได้สายอากาศไดโพลแบบสล็อตที่สามารถรับสัญญาณได้ดี

5.1 สรุปการออกแบบและวิเคราะห์

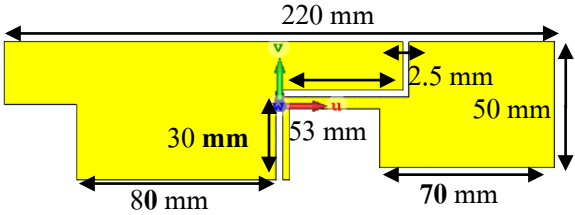
การค้นคว้าอิสระนี้ได้ศึกษาและออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตครั้งความยาวคลื่นในการออกแบบได้เริ่มต้นศึกษาและวิเคราะห์จากโครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบสล็อตพื้นฐานและพัฒนารูปแบบให้ดีขึ้นโดยในการวิเคราะห์มี 4 ขั้นตอนดังนี้

- 1) ออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสมมาตรครั้งความยาวคลื่น ศึกษาการปรับเปลี่ยนขนาดความยาว ความกว้างของสายอากาศ และปรับขนาดความกว้างของสล็อต เพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลง
- 2) ออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครั้งความยาวคลื่น ด้วยวิธี step-shaped feed gap และทำปรับเปลี่ยนขนาดความยาวฟีดของสายอากาศเพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลง
- 3) ออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครั้งความยาวคลื่น เพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือ และทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าให้เหมาะสม
- 4) ออกแบบสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรครั้งความยาวคลื่น เพิ่มขนาด อาร์มทางด้านขวามือต่อจากอาร์มด้านซ้ายมือ พร้อมทั้งทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าให้เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์การทำงานของสายอากาศแต่ละขั้นตอนพร้อมทั้งสรุปประสิทธิภาพของสายอากาศในด้านแบนด์วิดท์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และขนาดของสายอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์และประสิทธิภาพของสายอากาศในแต่ละรูปแบบ

รูปแบบสายอากาศแบบไดโพล	วัตถุประสงค์และประสิทธิภาพ
	ศึกษาโครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบสลีต สมมาตร เป็นโครงสร้างพื้นฐาน ที่พยายามออกแบบให้สามารถรับความถี่สัญญาณ โทรทัศน์ดิจิทัล ในการศึกษานี้ ทำการปรับเปลี่ยนขนาดความยาว ความกว้าง และความกว้างสลีต ของสายอากาศ โดยได้ออกแบบดังนี้ สายอากาศความยาว 180 mm. กว้าง 5 mm. และมีความกว้างสลีต 2 mm ผลที่ได้มีแบนด์วิดท์ที่ 636 – 717 MHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ -18 dB
	ศึกษาโครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบสลีตไม่สมมาตร ที่ออกแบบด้วยวิธี step-shaped feed gap โดยจากการศึกษาพบว่า ช่วยลดความยาวของสายอากาศไดโพลแบบสลีตครึ่งความยาวคลื่น และในการศึกษานี้ ยังได้ทำการปรับเปลี่ยนขนาดความยาวฟีดสายอากาศ เพื่อดู ผลกระทบจากการปรับค่า โดยได้ออกแบบดังนี้ ยาว 220 mm. กว้าง 1.5 mm และมีความกว้างสลีต 2 mm ผลที่ได้มีแบนด์วิดท์ที่ 514– 763 MHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ -10 dB
	ศึกษาโครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสลีตไม่สมมาตรครึ่งความยาวคลื่นเมื่อเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือ ดังนี้ทำการเพิ่มขนาดความยาว 80 mm. ความกว้าง 30 mm. ผลที่ได้มีแบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงมากขึ้น ได้ที่ 518 – 795 MHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ -22 dB

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

รูปแบบสายอากาศแบบไดโพล	วัตถุประสงค์และประสิทธิภาพ
	ศึกษาโครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรซึ่งความยาวคลื่นเมื่อเพิ่มขนาด อาร์มทางด้านซ้ายมือและขวามือ ทำการเพิ่มขนาดความยาว 70 mm. ความกว้าง 50 mm. ผลที่ได้มีแบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำมากขึ้นที่ 495 – 791 MHz ทำให้ครอบคลุม ความถี่โทรทัศน์ดิจิทัล และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ -18 dB จากการจำลอง และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับจากการวัดจริง -33 dB

5.2 ผลที่ได้รับและปัญหาที่พบ

ได้สายอากาศสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล ภายในอาคาร ที่มีแถบความถี่ที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 510 – 790 MHz

ข้อสังเกต สายอากาศที่ทำการออกแบบ ยังคงมีขนาดที่ใหญ่อยู่ ดังนั้นจะนำปัญหาที่ได้รับไปพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, “พระราชบัญญัติ องค์การจัดสรรคลื่นความถี่และกำกับการประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม พ.ศ.2553,” กรุงเทพฯ: ม.ป.พ. 2553.
- [2] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, “มาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเครื่องรับสัญญาณ โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล” กรุงเทพฯ:
- [3] Yun-Wen Chi, and Kin-Lu Wong, “Wideband Printed Dipole Antenna for DTV Signal Reception,” *IEEE* 2007
- [4] M. Taguchi, H. Somiya, T. Fujimoto, “ Phased array active loop antenna for digital television receiver, ” Antennas and Propagation Society, 1999. IEEE International
- [5] G. Gapponi, B. Di Maio, P. Livreri, “ A novel technique for computer-aided design of low noise microwave amplifiers, ” Circuits and Systems, 1990. Proceedings on the 33rd Midwest Symposium, Calgary, Alta, Vol.1, pp. 605-608, October 1991.
- [6] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, “ แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล พ.ศ.2555, ” กรุงเทพฯ:
- [7] ฉัตรไชย ไวยาพัฒนกร, การวิเคราะห์สายอากาศ. กรุงเทพฯ : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [8] กัลยรัตน์ สิมณี, “ การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลาคลิ้น ที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3, ” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555
- [9] นายมนูญ ดิโน, นายอดิศักดิ์ ชีปวย “สายอากาศแถบความถี่กว้างแบบช่องเรียว, ” วิทยานิพนธ์ อดุทธากรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2557
- [10] สามารถ โกลาพานิชย์, “ การปรับจูนสลับและรูปร่างของสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้า สำหรับการสื่อสารย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง, ” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554

- [11] พฤทธิยาพร สิงห์โตทอง, จานุวัฒน์ แก้วสิงห์, “สายอากาศสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Lan) ย่านความถี่ 2.4 – 2.5 GHz บนฐานรอง PCB แบบแถวลำดับไดโพล, ” โครงการงาน วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555
- [12] “ สายอากาศ ” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_computer/wiki/ba1b1/.../530bd/สายอากาศ.ppt (19 มิถุนายน 2560)
- [13] “ สายอากาศภายนอกอาคาร ” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [https:// portal.weloveshoping.com /product/L90943173](https://portal.weloveshoping.com/product/L90943173) (19 มิถุนายน 2560)
- [14] “ สายอากาศภายในอาคาร ” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [https:// www.lazada.co.th/ tpl-tl-ant20-1231896.html](https://www.lazada.co.th/tpl-tl-ant20-1231896.html) (19 มิถุนายน 2560)
- [15] A. Sonsilphong , “ *Concepts & Microstrip Design* ” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://eestaff.kku.ac.th/~nantakan/Microwave/1.%20CST%20%20%20Concepts%20&%20Microstrip%20Design%20-%20MetaSolver%20KKU%20-%20AS.pdf> (6 มิถุนายน 2557)
- [16] Sompop Pimpol, “Bandwidth Improvement of Band-Notched Printed Dipole Antenna for DTV Signal Reception,” 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2013.
- [17] B. Li, L. Xu, Y. W. M Chia, J. Sun and Z. N. Chen, “ Active patch antenna for digital TV receiver, ” Microwave Conference, Paris, France, October 2000.
- [18] Chih-Yu Tsai and Oscar T.-C. Chen, “Compact Broadband Monopole Slot Antenna for Digital TV Applications”, Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Singapore ,2012. . IEEE International, August 27-29, 2012.

สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล

นายทัศนพงษ์ บุญเจริญ

วัน เดือน ปีเกิด

11 มีนาคม พ.ศ. 2529

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2552 – 2558

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม
แห่งชาติ เขต 3 ลำปาง

พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม
แห่งชาติ ภาค 3



มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
rights reserved