



รายงานการวิจัย

การออกแบบสายอากาศที่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดสำหรับเครื่องโทรศัพท์มือถือ

**Antenna Design Capable of Interference Suppressing for Mobile Handset**

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว





รายงานการวิจัย

การออกแบบสายอากาศที่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดสำหรับเครื่องโทรศัพท์มือถือ

Antenna Design Capable of Interference Suppressing for Mobile Handset

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2557



## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับ  
โครงการวิจัยนี้



ผู้วิจัย

กันยายน 2557



## บทคัดย่อ

เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 (Third Generation Mobile Network: 3G) มีระบบที่สำคัญคือ ระบบยูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunication System: UMTS) ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ 1.92 - 2.17 GHz และได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากตอบสนองความต้องการการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายส่วนบุคคลในลักษณะไร้พรมแดน ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคนี้มีความต้องการในการใช้งานด้านการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น โดยจะมีการรองรับการสื่อสารด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารบนเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 จึงได้มีแนวคิดที่จะนำระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) มาใช้ เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศเก่งทำให้เราสามารถกำหนดทิศทางของลำคลื่นสำหรับการรับส่งสัญญาณระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐานได้ ระบบสายอากาศเก่งชนิดหนึ่งที่ได้รับการนิยมนั้นเนื่องจากมีกระบวนการการทำงานไม่ซับซ้อน นั่นคือระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะสร้างสายอากาศสำหรับระบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อนำไปใช้กับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 ซึ่งในการออกแบบสายอากาศนั้นจะหลีกเลี่ยงการใช้สายอากาศแบบแถวลำดับ เนื่องจากจะทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ โดยจะออกแบบสายอากาศที่สามารถก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้ 4 ทิศทาง เพื่อให้สามารถรับสัญญาณในทิศทางที่ต้องการได้มากขึ้นและเพื่อลดการเกิดสัญญาณแทรกสอดในทิศทางที่ไม่ต้องการ และขนาดของสายอากาศต้นแบบมีขนาดกว้างและยาวประมาณขนาดของโทรศัพท์เคลื่อนที่ไอโฟน อีกทั้งสายอากาศที่ออกแบบมีรูปแบบไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนในการผลิตต่ำเพราะใช้แผงวงจรพิมพ์เพียงชั้นเดียว ความสำเร็จของการออกแบบจะทดสอบผ่านการจำลองผลในคอมพิวเตอร์ และการทดสอบจริง ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้การเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้งานในเครือข่ายโทรศัพท์ในยุคที่ 3

## Abstract

Universal Mobile Telecommunication Systems (UMTS) being one part of Third Generation Mobile Networks (3G) have gained lots of attention nowadays as they are able to support unbounded wireless communications. As these systems need high speed data transmission, smart antenna systems has been envisaged to be employed for 3G communications. This is because smart antennas can form main beam to the desired direction while steering nulls or sidelobes to directions of interference signal. So far, switched beam antennas as one typical type of smart antenna systems have been popular for wireless communications as they are not complex and low of cost. These systems consist of an antenna array and beamforming network. Therefore, this thesis adopts concept of switched beam system to be employed at mobile terminal for 3G mobile communications. However, installing an antenna array on mobile terminal is not practical as its size limitation. Thus, this thesis proposes the concept to form beam in 4 directions employing small-sized printed antenna suitable for mobile terminal. According to this, we can improve the signal quality compared with utilizing omni-directional antenna. Also, its manufacturer is relatively low as the proposed structure is not complex. The simulation and experimental results are shown to confirm the characteristic of the proposed antenna.



## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ค
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	5
1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	5
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	5
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	6
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 ส่วนประกอบของงานวิจัย.....	7
2 ปรัชญาบรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 กล่าวนำ.....	9
2.2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.3 ทฤษฎีระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3.....	13

## สารบัญ

## หน้า

2.3.1 การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่.....	14
2.3.2 มาตรฐานของระบบยูเอ็มทีเอส.....	17
2.3.3 จุดเด่นของเทคโนโลยีแบบวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ.....	18
2.3.4 คุณสมบัติของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 .....	20
2.4 ระบบสายอากาศเก่ง.....	21
2.4.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น .....	25
2.4.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น.....	26
2.5 สายอากาศไมโครสตริป .....	28
2.5.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป .....	30
2.5.2 แผ่นตัวนำสายอากาศ .....	31
2.5.3 ชั้นวัสดุฐานรอง.....	31
2.5.4 ระบายกราวด์ .....	32
2.5.5 ประเภทของสายอากาศไมโครสตริป.....	32
2.5.6 ส่วนประกอบของสายอากาศไมโครสตริป.....	32
2.5.7 วิธีการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป .....	33
2.6 รูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป .....	34
2.6.1 สายโคแอกเซียลโพรบ .....	34
2.6.2 การป้อนแบบประกบ.....	34
2.6.3 การป้อนแบบช่องเปิด.....	35
2.6.4 สายไมโครสตริป .....	36
2.7 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด.....	39
2.7.1 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด.....	39
2.7.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณ ด้วยสายไมโครสตริป .....	39
2.8 โพลาริเซชัน.....	40
2.9 กล่าวสรุป .....	45

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ค่าคลื่นที่ใช้สำหรับโทรเคลื่อนที่ในยุคที่ 3.....	47
3.1 กล่าวนำ .....	47
3.2 การออกแบบสายอากาศ .....	47
3.2.1 แผ่นวงจรพิมพ์.....	47
3.2.2 การคำนวณหาขนาดของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	48
3.2.3 การคำนวณหาขนาดของสายอากาศไมโครสตริป .....	51
3.3 แนวคิดการออกแบบสายอากาศ .....	53
3.4 การจำลองแบบจากโปรแกรม CST Microwave Studio.....	77
3.4.1 กรณีที่ .....	177
3.4.2 กรณีที่ .....	280
3.4.3 กรณีที่ .....	383
3.5 การ์ดรับสัญญาณ 3 จี.....	87
3.6 กล่าวสรุป .....	88
4 การทดสอบสายอากาศต้นแบบและวิเคราะห์ผล .....	89
4.1 กล่าวนำ .....	89
4.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	89
4.2.1 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบ .....	90
4.2.2 ผลการทดสอบความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของ สายอากาศต้นแบบ.....	95
4.2.3 ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ .....	98
4.2.4 ผลการทดสอบโพลาไรเซชันของสายอากาศต้นแบบ .....	101
4.3 การทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริง.....	105
4.3.1 ข้อสังเกต .....	125
4.4 กล่าวสรุป .....	126
5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	127
5.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย.....	127

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	128
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	128
รายการอ้างอิง .....	129
ภาคผนวก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	133



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบสายอากาศแก่ง.....	21
2.2 การตกกระทบของสัญญาณบนสายอากาศของระบบสายอากาศแก่ง .....	22
2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้น .....	26
2.4 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลาค์ลิ้น .....	28
2.5 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป.....	29
2.6 การป้อนแบบสายโคแอกเซียล โพรบ .....	34
2.7 การป้อนแบบประกบ .....	35
2.8 การป้อนแบบช่องเปิด .....	35
2.9 การป้อนแบบสายไมโครสตริป .....	36
2.10 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์ .....	36
2.11 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายแบบไมโครสตริปข.....	40
2.12 การโพลาไรเซชันของคลื่น .....	40
2.13 ลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า .....	41
2.14 โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น แบบวงรี และแบบวงกลม .....	42
3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	54
3.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ (จำลองแบบ).....	54
3.3 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 1 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	55
3.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 1 (จำลองแบบ.....)	56
3.5 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 (จำลองแบบ).....	56
3.6 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 2 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	57
3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 2 (จำลองแบบ) .....	58
3.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 (จำลองแบบ).....	58
3.9 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 3 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	59
3.10 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 3 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	60
3.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1(จำลองแบบ) .....	60

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	61
3.13 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ).....	61
3.14 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	62
3.15 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 4 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	63
3.16 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 4 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	64
3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 4 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ).....	64
3.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 4 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	65
3.19..... ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 4 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ).....	65
3.20...ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 4 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	66
3.21 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 5 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	67
3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 5 (จำลองแบบ).....	68
3.23 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 5 (จำลองแบบ).....	68
3.24 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 6 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	69
3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ).....	70
3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	70
3.27 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ).....	70

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อ ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ).....	71
3.29 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อ ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	71
3.30 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อ ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ).....	72
3.31 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลาค์ลิ้น (ด้านหน้า).....	73
3.32 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลาค์ลิ้น (ด้านหลัง).....	73
3.33 ขนาดของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลาค์ลิ้น (ด้านหน้า).....	75
3.34 ขนาดของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลาค์ลิ้น (ด้านหลัง).....	75
3.35 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่มีการป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่.....	177
3.36 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ).....	78
3.37 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 บนระนาบ $\phi = 165^\circ$ (จำลองแบบ).....	78
3.38 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 บนระนาบ $\theta = 90^\circ$ (จำลองแบบ).....	79
3.39 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่ พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ).....	79
3.40 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่มีการป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2.....	80
3.41 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	81
3.42 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 บนระนาบ $\phi = 15^\circ$ (จำลองแบบ).....	81
3.43 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 บนระนาบ $\theta = 90^\circ$ (จำลองแบบ).....	82

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.44 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ).....	82
3.45 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่มีการป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ .....	383
3.46 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ).....	84
3.47 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 บนระนาบ $\phi = 165^\circ$ (จำลองแบบ) .....	84
3.48 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 บนระนาบ $\theta = 90^\circ$ (จำลองแบบ) .....	85
3.49 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ).....	85
3.50 การ์ดรับสัญญาณ 3 จี Sierra Wireless .....	85
4.1 สายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ค่าคลื่นต้นแบบ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง .....	89
4.2 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบ.....	91
4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 บนระนาบ $\phi = 165^\circ$ (ห้องปฏิบัติการ) .....	92
4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 บนระนาบ $\phi = 15^\circ$ (ห้องปฏิบัติการ).....	92
4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 บนระนาบ $\phi = 165^\circ$ (ห้องปฏิบัติการ).....	93
4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 บนระนาบ $\theta = 90^\circ$ (ห้องปฏิบัติการ).....	93
4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 บนระนาบ $\theta = 90^\circ$ (ห้องปฏิบัติการ).....	94



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบในเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 บนระนาบ $\theta = 90^\circ$ (ห้องปฏิบัติการ).....	94
4.9 ภาพแสดงการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ.....	95
4.10 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อน สัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (ห้องปฏิบัติการ).....	96
4.11 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อน สัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (ห้องปฏิบัติการ).....	97
4.12 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อน สัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (ห้องปฏิบัติการ).....	97
4.13 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดทดสอบอัตราขยายของ สายอากาศต้นแบบ.....	98
4.14 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดทดสอบโพลาไรเซชันของ สายอากาศต้นแบบ.....	102
4.15 ผลการทดสอบแบบรูปโพลาไรเซชันของสายอากาศต้นแบบเมื่อ ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (ห้องปฏิบัติการ).....	102
4.16 ผลการทดสอบแบบรูปโพลาไรเซชันของสายอากาศต้นแบบเมื่อ ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (ห้องปฏิบัติการ).....	103
4.17 ผลการทดสอบแบบรูปโพลาไรเซชันของสายอากาศต้นแบบเมื่อ ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (ห้องปฏิบัติการ).....	103
4.18 ตำแหน่งสถานีฐานและจุดที่วัดทดสอบ.....	106
4.19 ตำแหน่งสถานีฐานและจุดที่วัดทดสอบ (ต่อ).....	106
4.20 ภาพขณะวัดสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง.....	108
4.21 ภาพขณะวัดสัญญาณ โดยใช้สายอากาศต้นแบบที่ใช้ พอร์ตที่ 1 ในการรับสัญญาณ.....	109
4.22 ภาพขณะวัดสัญญาณ โดยใช้สายอากาศต้นแบบที่ใช้ พอร์ตที่ 2 ในการรับสัญญาณ.....	109

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ภาพขณะวัดสัญญาณ โดยใช้สายอากาศต้นแบบที่ใช้ พอร์ตที่ 3 ในการรับสัญญาณ.....	109
4.24 ค่าความแรงของสัญญาณของสายอากาศแบบรอบทิศทางและ สายอากาศต้นแบบ.....	123
4.25 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศต้นแบบ .....	124



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป .....	33
3.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิด FR4 .....	48
3.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ .....	53
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 1 .....	55
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 2 .....	57
3.5 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 3 .....	59
3.6 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 4 .....	63
3.7 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 5 .....	67
3.8 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ .....	74
3.9 สรุปทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบ .....	86
4.1 ตารางเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศ .....	100
4.2 ค่าอัตราส่วนแกน .....	104
4.3 ช่วงของค่าอัตราส่วนแกนที่จะแสดงชนิดของโพลาริเซชัน .....	104
4.4 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานในรูปที่ 4.18 .....	107
4.5 จุดที่วัดทดสอบในรูปที่ 4.18 .....	107
4.6 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานในรูปที่ 4.19 .....	108
4.7 จุดที่วัดทดสอบในรูปที่ 4.19 .....	108
4.8 รูปสถานที่ วันและเวลาในการวัดทดสอบ ณ จุดต่างๆ .....	110
4.9 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานถึงจุดที่วัดทดสอบในรูปที่ 4.18 .....	116
4.10 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานถึงจุดที่วัดทดสอบในรูปที่ 4.19 .....	117
4.11 ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของแต่ละพอร์ต ที่ใช้รับสัญญาณจริง .....	118
4.12 ค่าเฉลี่ยของค่าวัดทดสอบ .....	125



# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของงานวิจัย

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 หรือ 3 จี (Third Generation Mobile Network: 3G) เป็นเทคโนโลยียุคถัดมาจากการเปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 หรือ 2 จี (Second Generation Mobile Network: 2G) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานด้านการรับส่งข้อมูล ที่มากขึ้นของลูกค้า และการใช้ระบบสื่อสารไร้สายส่วนบุคคลในลักษณะไร้พรมแดน โดยที่ ผู้ใช้บริการสามารถนำเครื่องลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปใช้งานในที่ใดๆ ได้ทั่วโลกที่มีการ ให้บริการ ดังนั้นองค์กรสากล 3 จีพีพี (Third Generation Partnership Project: 3GPP) จึงได้กำหนด ระบบยูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunication System: UMTS) ขึ้นมา ซึ่งในปัจจุบัน มีเทคโนโลยีหลักที่ได้รับยอมรับการใช้งานทั่วโลกคือเทคโนโลยีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส แถบกว้าง (Wideband Code Division Multiple Access: W-CDMA) เทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนา เพื่อเพิ่มความคล่องตัวในการให้บริการด้านระบบเสียงที่ดีขึ้น มีช่องสัญญาณความถี่และความจุ ในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลแอฟพลิเคชันและรองรับ การสื่อสารข้อมูลที่เร็วขึ้น พร้อมทั้งสามารถให้บริการมัลติมีเดียได้เต็มที่และสมบูรณ์แบบ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดบริการรูปแบบใหม่ๆ ที่เห็นได้ชัดก็คือบริการโทรศัพท์แบบวิดีโอ (video telephony) และการประชุมผ่านระบบวิดีโอ (video conference) ซึ่งเป็นการสื่อสารกันแบบเห็นหน้า โดยจะถ่ายทอดสดทั้งภาพและเสียงระหว่างคู่สนทนา จึงทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ได้รับความนิยมนอย่างมากในปัจจุบัน ตั้งแต่อดีตมีการให้บริการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในหลายๆ ความถี่ เช่น พีซีเอส (1.85 - 1.99 GHz) จีเอสเอ็ม (1.7 - 1.9 GHz) และยูเอ็มทีเอส (1.92 - 2.17 GHz) ระบบ ดังกล่าวได้ถูกพัฒนาจนสามารถส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและสะดวกสบาย แต่ระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่ยังมีปัญหา เช่น สัญญาณคลื่นหลายวิถี (multipath signal) การจางหายของ สัญญาณ (fading signal) สัญญาณแทรกสอด (interference signal) และความสามารถในการรองรับ

จำนวนผู้ใช้ เพราะฉะนั้นจึงได้มีการคิดค้นระบบที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวนั้นคือระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ซึ่งสามารถกำหนดทิศทางของลำคลื่นสำหรับการรับส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ สายอากาศเก่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) สายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและหันจุดศูนย์ (nulls) หรือพูข้าง (side lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณรบกวนได้ในเวลาเดียวกัน กระบวนการดังกล่าวถูกเรียกว่าการก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ปัจจุบันระบบสายอากาศเก่งได้ถูกนำมาใช้ในเครือข่ายไร้สายอย่างแพร่หลาย เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งสามารถลดสัญญาณแทรกสอด ส่งผลให้ใช้งานได้ดีขึ้นและเพิ่มจำนวนผู้ใช้ในระบบ

โดยทั่วไประบบสายอากาศเก่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น (adaptive antennas) และสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น (switched-beam antennas) องค์ประกอบหลักของสองระบบดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับและส่วนประมวลผลสัญญาณ แต่ส่วนที่ต่างกันก็คือรายละเอียดของส่วนประมวลผลสัญญาณ ซึ่งส่วนประมวลผลสัญญาณของสายอากาศแบบปรับตัวจะต้องใช้ระบบประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลที่มีความสามารถในการประมวลผลขั้นสูง และยังคงมีความเร็วสูงอีกด้วย ซึ่งต่างจากส่วนประมวลผลสัญญาณของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่อาศัยเพียงการคัดแวงวงจรพืพอย่างง่าย เพื่อนำมาสร้างเป็นเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) ในทิศทางที่กำหนดไว้ก่อน จากนั้นลำคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุดจะถูกเลือกโดยตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ที่ไม่ต้องมีความเร็วสูงมากนัก เนื่องจากใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำและไม่ซับซ้อน ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นจึงได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะนำสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นไปใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อจะรองรับการใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ที่ได้รับความนิยมดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว อีกทั้งระบบสายอากาศเก่งยังช่วยลดสัญญาณแทรกสอดจึงน่าจะทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้งานได้ดียิ่งขึ้น และจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าในปัจจุบันได้มีผู้ออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่มากมายดังเช่น งานวิจัยของ Gokce, B., Karakus, C., and Akleman, F. (2009) และ Ghoudane, N., and Essaaidi, M. (2009) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางเนื่องจากไม่ได้มีระบบสายอากาศเก่งมาใช้ ดังนั้นจึงเกิดสัญญาณแทรกสอดในทิศทางที่ไม่ต้องการ ทำให้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่วนใหญ่ระบบสายอากาศเก่งที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะติดตั้งที่สถานีฐาน ดังเช่นงานวิจัยของ Garg, V.K., Laxpati, S.R., and Wang, D. (2004) ซึ่งได้นำเอาระบบสายอากาศเก่งไปใช้กับระบบยูเอ็มทีเอส

โดยนำไปติดตั้งที่ตัวสถานีฐาน แต่เนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้มีความซับซ้อนอีกทั้งยังต้องใช้สายอากาศหลายต้น จึงไม่นิยมนำระบบสายอากาศเก่งไปติดตั้งที่โทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงวิธีการเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสายอากาศเก่งในโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ ซึ่งใช้สายอากาศแบบปรับลำคลื่น ดังเช่นงานวิจัยของ Koyanagi, Y., Yamamoto, A., and Ogawa, K. (2005) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับแบบปรับลำคลื่นบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ในสถานการณ์ที่มีผู้ใช้งาน โดยใช้สายอากาศเก่งแถวลำดับแบบปรับลำคลื่นประกอบไปด้วยสายอากาศ 2 ต้น ได้แก่สายอากาศแบบโมโนโพล (monopole antenna) และสายอากาศแบบระนาบอินเวอร์สเอฟ (planar inverted-F antenna) เนื่องจากใช้สายอากาศแบบโมโนโพล จึงต้องวางสายอากาศอยู่ข้างนอกโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการใช้งานและงานวิจัยของ Yuan, Q., Suguro, T., Chen, Q., Sawaya, K., Kudoh, E., and Adachi, F. (2006) และ Ogawa, K., Yamamoto, A., and Takada, J. (2005) ได้ศึกษาสมรรถนะของสายอากาศแถวลำดับแบบปรับลำคลื่นที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ว่าสามารถลดสัญญาณหลายวิถีและลดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (co-channel interference) ได้หรือไม่ แต่ระบบที่ใช้มีความซับซ้อนอีกทั้งยังมีความสิ้นเปลืองในการสร้างอีกด้วยเนื่องจากใช้สายอากาศ 4 ต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาสมรรถนะของระบบสายอากาศเก่งสำหรับการใช้งานในโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้สายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นเช่น งานวิจัยของ Braun, C., Nilsson, M., and Murch R.D. (2009) มีการใช้หลักการสวิตซ์ลำคลื่นโดยใช้การรวมกันแบบไดเวอร์ซิตี (diversity combining) และได้ออกแบบสายอากาศที่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้สายอากาศ 2 ต้น ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแผ่นระนาบ และสายอากาศโมโนโพลที่มีความยาวประมาณ 4 เซนติเมตร จึงทำให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งานเนื่องจากสายอากาศต้องสร้างบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ และในงานวิจัยของ Shin, S.H., Johnson, K., Axness, T., and Berkowitz, J.S. (2005) เป็นการออกแบบอัลกอริทึมที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่ใช้หลักการการเลือกลำคลื่นที่ดีที่สุดโดยดูจากอัตราส่วนของพลังงานต่อพลังงานแทรกสอด ซึ่งได้ใช้สายอากาศแบบแถวลำดับในการก่อรูปลำคลื่น ทำให้ไม่สามารถนำไปติดตั้งจริงได้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่ใช้การติดตั้งสายอากาศไว้นอกโทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังนั้นจึงไม่สะดวกเวลาใช้งานโทรศัพท์

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดที่จะออกแบบสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานได้ 4 ทิศทางเพื่อจะนำไปใช้กับระบบสวิตซ์ลำคลื่นบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้งานภายใต้ระบบยูเอ็มทีเอส (1.92 - 2.17 GHz) จากการออกแบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นนี้ทำให้ไม่ต้องใช้สายอากาศแถวลำดับ จึงสามารถนำสายอากาศเก่งไปใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ง่าย สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ทำการออกแบบนี้มีต้นทุนในการผลิตต่ำเพราะใช้แผงวงจรพิมพ์เพียงชั้นเดียว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการแผ่พลังงานได้ 4 ทิศทาง เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้กับระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นและนำสายอากาศที่ออกแบบไปใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ได้ โดยใช้วิธีการออกแบบที่ง่ายและมีต้นทุนต่ำ เพื่อให้โทรศัพท์เคลื่อนที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดียิ่งขึ้น

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นสามารถกำหนดทิศทางของการแผ่พลังงานให้หันไปในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้

1.3.2 สามารถสร้างสายอากาศต้นแบบที่ง่ายและมีการแผ่พลังงานไปในทิศทางที่ต้องการได้

1.3.3 สามารถแผ่พลังงานไปในทิศทางที่ต้องการโดยไม่ต้องใช้สายอากาศแบบแถวลำดับ

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองแบบสายอากาศซึ่งมีลำคลื่น 3 ทิศทางเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตต่างกัน

1.4.2 สร้างสายอากาศตามแบบจำลอง วัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) วัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) เปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบและวัดโพลาไรเซชัน (polarization)

1.4.3 ทดสอบการรับสัญญาณของสายอากาศที่สร้างขึ้นในพื้นที่ใช้งานจริง

## 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

1.5.2 ออกแบบและจำลองผลสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่น โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อศึกษาทิศทางการแผ่พลังงานของสายอากาศ

1.5.3 สร้างสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่นตามแบบจำลอง และวัดค่าคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญของสายอากาศต้นแบบเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ

1.5.4 ทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริงภายใต้เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งสายอากาศต้นแบบ และสายอากาศแบบรอบทิศทาง

1.5.5 วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริงของสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง



## 1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

### 1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบสายอากาศแก่ง
- 3) ศึกษาระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3
- 4) ศึกษาสายอากาศที่มีขนาดเหมาะที่จะใช้ในโทรศัพท์มือถือ
- 5) ศึกษาชนิดของโพลาริเซชันของสายอากาศ
- 6) สร้างแบบจำลองของสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
- 7) สร้างสายอากาศตามแบบจำลอง วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ และวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ แล้วเปรียบเทียบผลที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการกับผลการจำลองแบบ รวมถึงวัดโพลาริเซชันของสายอากาศ
- 8) ทดสอบการรับสัญญาณของสายอากาศในพื้นที่ใช้งานจริงภายใต้เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งสายอากาศต้นแบบและสายอากาศแบบรอบทิศทาง
- 9) วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริงของสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง

### 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2) ออกแบบสายอากาศที่ใช้งานในช่วงความถี่ยูเอมทีเอสและสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
- 3) สร้างสายอากาศตามแบบจำลอง วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ และวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ แล้วเปรียบเทียบผลที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการกับผลการจำลองแบบ รวมถึงวัดโพลาริเซชันของสายอากาศ
- 4) ทดสอบระบบในพื้นที่ใช้งานจริงภายใต้เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3
- 5) วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบผลของสายอากาศต้นแบบกับผลของสายอากาศแบบรอบทิศทาง

### 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

#### 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) โปรแกรม CST Microwave Studio
- 2) โปรแกรมแมทแลบ (matlab)
- 3) เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย (network analyzer)

#### 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลของสายอากาศที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่นจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บผลที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio
- 3) เก็บผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ผลการวัดความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ผลการวัดอัตราขยายและผลการวัดโพลาไรเซชัน
- 4) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบและสายอากาศแบบรอบทิศทางในพื้นที่ใช้งานจริงภายใต้เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

#### 1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลที่ได้จากการจำลองแบบจะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริงในห้องปฏิบัติการโดยแสดงในรูปแบบของกราฟ และผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทางในพื้นที่ใช้งานจริงจะนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย โดยแสดงผลเปรียบเทียบกันในรูปแบบของกราฟเช่นกัน

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้สายอากาศสำหรับระบบสวิตซ์ลำคลื่นต้นแบบที่มีการแผ่พลังงานได้ 4 ทิศทางและออกแบบเพื่อนำไปใช้ในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ภายใต้ระบบยูเอ็มทีเอส

1.7.2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

### 1.8 ส่วนประกอบของรายงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ทฤษฎีระบบสายอากาศแก่ง สายอากาศไมโครสตริปและวิธีการป้อนสัญญาณ รวมทั้งวิธีการหาโพลาริเซชันของสายอากาศ

**บทที่ 3** กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้สำหรับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และผลการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio

**บทที่ 4** กล่าวถึงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงาน ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราขยาย โพลาริเซชัน และผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบในพื้นที่ใช้งานจริง

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผล ข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต





## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนั้นได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความต้องการในด้านต่างๆ เพิ่มมากขึ้น เช่นความต้องการลดสัญญาณแทรกสอด และเพิ่มความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาและออกแบบสายอากาศเพื่อให้สามารถใช้งานได้กับเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่กำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้คือต้องการคิดค้นและพัฒนาสายอากาศแบบสวิตซ์ลาค์ลิ้นอย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของลำคลื่น ไปยังทิศทางที่ต้องการ รวมทั้งสามารถนำไปใช้กับเทคโนโลยีในยุคที่ 3 ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่เคยถูกนำมาใช้ ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่นๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่างๆ และการสืบค้นจากอินเทอร์เน็ต ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของสายอากาศแบบต่างๆ ที่ใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ และยังศึกษาในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ซึ่งจะได้ออกถึงหลักการดำเนินงานพื้นฐานของระบบ มาตรฐานของระบบและความถี่ที่ระบบรองรับ รวมถึงได้ศึกษาเรื่องระบบสายอากาศเก่งซึ่งประกอบด้วยระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลาค์ลิ้นและระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลาค์ลิ้น และยังเสนอคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริปและรูปแบบการป้อนสัญญาณแบบต่างๆ ที่ใช้กับสายอากาศไมโครสตริป รวมถึงวิธีการออกแบบสายป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริป และศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดโพลาริเซชันของสายอากาศและสุดท้ายเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทนี้

## 2.2 ปรัชญาวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วในหัวข้อ 1.1 ซึ่งระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นได้รับความนิยมอย่างมากมาตั้งแต่อดีต โดยมีการเปิดให้บริการอยู่ในหลายความถี่ ระบบดังกล่าวได้ถูกพัฒนาจนสามารถส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและสะดวกสบาย และพัฒนามาเรื่อยๆ จนเป็นเทคโนโลยียุคที่ 3 หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเทคโนโลยี 3 จี เพื่อที่จะรองรับการใช้งานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันที่มีความต้องการในด้านต่างๆ มากขึ้น แต่ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยังมีปัญหา เช่น สัญญาณคลื่นหลายวิถี การจางหายของสัญญาณ สัญญาณแทรกสอด และความสามารถในการรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่มีจำกัด จึงได้มีการคิดค้นระบบที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวนั้นคือระบบสายอากาศเก่ง ซึ่งสามารถกำหนดทิศทางของลำคลื่นสำหรับการรับส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปัจจุบันระบบสายอากาศเก่งได้ถูกนำมาใช้ในเครือข่ายไร้สายอย่างแพร่หลาย ระบบสายอากาศเก่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น และสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น ดังจะได้อธิบายต่อไปในหัวข้อ 2.4

ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะนำสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นไปใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อที่จะได้รองรับการใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 อีกทั้งระบบสายอากาศเก่งยังสามารถช่วยลดสัญญาณแทรกสอด จึงน่าจะทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้งานได้ดียิ่งขึ้น และจากการศึกษาปรัชญาวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในปัจจุบันได้มีผู้ออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่มากมาย และพบว่าระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Gokce, B., Karakus, C., and Akleman, F. (2009) และ Ghoudane, N., and Essaaidi, M. (2009) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางเนื่องจากไม่ได้นำระบบสายอากาศเก่งมาใช้ ดังนั้นจึงเกิดสัญญาณแทรกสอดในทิศทางที่ไม่ต้องการทำให้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่วนใหญ่ระบบสายอากาศเก่งที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำการติดตั้งที่สถานีฐาน (base station) ดังเช่น งานวิจัยของ Garg, V.K., Laxpati, S.R., and Wang, D. (2004) ซึ่งได้นำเอาระบบสายอากาศเก่งไปใช้กับระบบยูเอเอ็มทีเอส โดยได้นำไปติดตั้งที่ตัวสถานีฐานเนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้มีความซับซ้อน อีกทั้งยังต้องใช้สายอากาศหลายต้น จึงไม่ค่อยนิยมนำระบบสายอากาศเก่งมาติดตั้ง ที่โทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงวิธีการเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสายอากาศเก่งในโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ ซึ่งเป็นการใช้สายอากาศแบบปรับลำคลื่น ดังเช่นงานวิจัยของ Koyanagi, Y. Yamamoto, A., and Ogawa, K. (2005) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของสายอากาศบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ในสถานการณ์ที่มีผู้ใช้งานอยู่ โดยใช้สายอากาศเก่งแถวลำดับแบบปรับลำคลื่น ประกอบไปด้วยสายอากาศ 2 ต้น ได้แก่สายอากาศ

แบบโมโนโพล (monopole antenna) และสายอากาศแบบระนาบอินเวอร์สเอฟ (planar inverted-F antenna) เนื่องจากใช้สายอากาศแบบ โมโนโพล จึงต้องจัดวางสายอากาศอยู่นอกโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งอาจทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน และงานวิจัยของ Yuan, Q., Suguro, T., Chen, Q., Sawaya, K., Kudoh, E., and Adachi, F. (2006) และ Ogawa, K., Yamamoto, A., and Takada, J. (2005) ได้ศึกษาสมรรถนะของสายอากาศแถวลำดับแบบปรับลำดับคลื่นที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ว่าสามารถลดสัญญาณหลายวิธีและลดการแทรกสอดช่องสัญญาณรวมได้ดีหรือไม่ แต่ระบบที่ใช้มีความซับซ้อน อีกทั้งยังมีความสิ้นเปลืองในการสร้างอีกด้วยเนื่องจากใช้สายอากาศ 4 ต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาสมรรถนะของระบบสายอากาศเก่งสำหรับการใช้งานในโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้สายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำดับคลื่นเช่น งานวิจัยของ Braun, C., Nilsson, M., and Murch R.D. (2009) มีการใช้หลักการสวิตช์ลำดับคลื่นโดยใช้การรวมกันแบบไดเวอร์ซีตี และได้ออกแบบสายอากาศสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้สายอากาศ 2 ต้นซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแผ่นระนาบ และสายอากาศโมโนโพลที่มีความยาวประมาณ 4 เซนติเมตร จึงเกิดความไม่สะดวกในการใช้งานเนื่องจากสายอากาศต้องสร้างอยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ และในงานวิจัยของ Shin, S. H., Johnson, K., Axness, T., and Berkowitz, J.S. (2005) ได้ออกแบบอัลกอริทึมที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้หลักการการเลือกลำดับคลื่นที่ดีที่สุดโดยดูจากอัตราส่วนของพลังงานต่อพลังงานแทรกสอด ซึ่งได้ใช้สายอากาศแบบแถวลำดับในการก่อรูปลำดับคลื่น ทำให้ไม่สามารถนำไปติดตั้งจริงได้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่ใช้การติดตั้งสายอากาศไว้บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังนั้นจึงไม่สะดวกเวลาใช้งานโทรศัพท์

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวคิดที่จะออกแบบสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานได้ 4 ทิศทางเพื่อจะนำไปใช้กับระบบสวิตช์ลำดับคลื่นบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้งานภายใต้ระบบยูเอ็มทีเอสจากการออกแบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำดับคลื่นนี้ทำให้ไม่ต้องใช้สายอากาศแถวลำดับ จึงสามารถนำสายอากาศเก่งไปใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สายอากาศที่นิยมนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่นั่นก็คือสายอากาศไมโครสตริปซึ่งมีข้อดีหลายอย่างดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.5 จากนั้นได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศไมโครสตริปพบว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดด้านข้างนั้นสามารถก่อรูปลำดับคลื่นไปทางด้านข้างของตัวสายอากาศได้ ดังเช่นงานวิจัยของ Jin, D., Xiao, S., Gao, S., Tang, M., and Wang, B. (2010) และ Jun, L., Donglin, S., Yazhou, W. (2009) ซึ่งเป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดเส้นตรง (linear tapered slot antenna) จากการศึกษาพบว่าสายอากาศชนิดนี้สามารถก่อรูปลำดับคลื่นไปทางด้านข้างได้จึงได้สนใจ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการออกแบบที่ความถี่สูงมากๆ จึงไม่สามารถนำมาใช้กับความถี่ที่ใช้สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ จึงต้องนำมาออกแบบใหม่เพื่อให้

สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ รวมถึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศช่องเปิดชนิดอื่นๆ อีกด้วยดังเช่นงานวิจัยของ Sung, Y.J. (2011) ซึ่งเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดเป็นวงแหวนรูปที่เหลี่ยมจัตุรัสและงานวิจัยของ Qu, S.W., Li, J.L., Chen, J.X., and Quan, X. (2007) ซึ่งเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปวงกลม และงานวิจัยของ Jan, J.Y., and Su, J.W. (2005) ซึ่งเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปที่เหลี่ยมจัตุรัส ทั้งสามงานวิจัยนี้มีการป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริปและยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปทางด้านหน้าและด้านหลังของตัวสายอากาศ ดังนั้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยจึงคิดว่าถ้านำสายอากาศรูปแบบต่างๆ ที่มีการก่อรูปลวดลายดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น มาสร้างรวมกันก็จะได้สายอากาศที่มีการก่อรูปลวดลายไปได้ 4 ทิศทาง

จากนั้นได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดโพลาไรเซชันของสายอากาศว่าสายอากาศที่ออกแบบมีโพลาไรเซชันแบบไหน ต้องมีหลักเกณฑ์อย่างไรบ้างในการแยกโพลาไรเซชันและมีพารามิเตอร์ใดบ้างที่ต้องคำนึงถึง ดังเช่น งานวิจัยของ Zervos, T., Alexandridis, A.A., Lazarakis, F., Stamopoulos, D., Pissas, M., Dangakis, K. (2010) และงานวิจัยของ Zervos, T., Alexandridis, A.A., Lazarakis, F., Dangakis, K., (2009) โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนโพลาไรเซชันจากโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นเป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี ซึ่งจะดูได้จากค่าอัตราส่วนแกน (จะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.8) และยังมีงานวิจัยของ Steven Yang, S.L., Kishk, A.A. and Lee, K.F. (2008) และ Yahya, M., Awang, Z. (2010) ได้แสดงการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลม และงานวิจัยของ Yeung, S.H., Man, K.F., and Chan, W.S. (2011) ได้แสดงการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ป้อนสัญญาณด้วยสายไมโครสตริปและเมื่อเปลี่ยนลักษณะของช่องเปิดและเปลี่ยนมุมในการป้อนสัญญาณจะสามารถเปลี่ยนโพลาไรเซชันได้

นอกจากนี้ยังมีหนังสือที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งประเภทของโพลาไรเซชัน ได้แก่ “Antenna Theory Analysis and Design” เขียนโดย Balanis, C.A. ได้กล่าวถึง ลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบต่างๆ ว่าลักษณะใดจะเป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น แบบวงรี หรือแบบวงกลม เล่มต่อมาเขียนโดย ไมโนย ไกรฤกษ์ หนังสือชื่อ “ทฤษฎีสายอากาศ” โดยมีเนื้อหาเกี่ยวกับการแยกประเภทของโพลาไรเซชันของสายอากาศ วิธีการหาค่าอัตราส่วนแกน เป็นต้น อีกทั้งยังได้มีข้อมูลจากอินเทอร์เน็ตที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่อธิบายถึงขอบเขตของค่าอัตราส่วนแกนเพื่อใช้แยกแยะโพลาไรเซชันอีกด้วย



## 2.3 ทฤษฎีระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3

เมื่อปี ค.ศ. 1999 ไอทียู (The International Telecommunication Union: ITU) ซึ่งเป็นองค์กรกลางของสหประชาชาติ (United Nation: UN) ได้ทำการรับรองมาตรฐานของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 หรือ 3 จี (Third Generation Mobile Network: 3G) ไว้เป็นมาตรฐานของสัญญาณการออกอากาศเรียกว่า ไอเอ็มที 2000 (International Mobile Telecommunication 2000: IMT-2000) เพื่ออำนวยความสะดวกของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เพิ่มแถบความถี่และความถี่และสนับสนุนโปรแกรมประยุกต์ที่หลากหลาย ซึ่งได้มีข้อตกลงทั้งหมด 5 ประเภท 3 ใน 5 ประเภท มีพื้นฐานและการพัฒนามาจากซีดีเอ็มเอแต่มีความแตกต่างกันและมีชื่อเรียกต่างกันไปคือ ซีดีเอ็มเอ 2000 วายแบนด์ซีดีเอ็มเอ และทีดีเอสดีเอ็มเอ ในมาตรฐานของไอเอ็มที 2000 นี้ ระบบซีดีเอ็มเอ 2000 และวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ เป็นเทคโนโลยีที่มีความโดดเด่นและมีการตกลงร่วมกันของบริษัทโทรคมนาคม ที่จะใช้ทั้ง 2 ระบบนี้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ในช่วงยกระดับจากยุคที่ 2 เป็นยุคที่ 3 ผู้ให้บริการโทรศัพท์ได้ปฏิรูปเครือข่าย พร้อมกับแผน “ปฏิวัติ” เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ใหม่ ซึ่งได้นำไปสู่การก่อตั้งองค์กร 3 จีพีพี (Third Generation Partnership Project: 3GPP) เพื่อพัฒนาเครือข่ายเคลื่อนที่ในยุคที่ 3 ซึ่งเทคโนโลยีที่พัฒนาคือ

- จีพีอาร์เอส (General Packet Radio Service: GPRS)

เสนอความเร็วสูงถึง 114 Kbps

- เอดจ์ (Enhanced Data Rates for GSM Evolution: EDGE)

เสนอความเร็วสูงถึง 384 Kbps

- ยูเอ็มทีเอส หรือ วายแบนด์ซีดีเอ็มเอ (Wideband CDMA)

เสนอความเร็วรับข้อมูลสูงถึง 1.92 Mbps

- เอชเอสดีพีเอ (High Speed Downlink Packet Access: HSDPA)

เพิ่มความเร็วรับข้อมูลสูงถึง 14 Mbps

ในประเทศแถบยุโรปผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่วนใหญ่ที่ใช้ระบบจีเอสเอ็มตกลงจะใช้ระบบวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ ซึ่งมีการสร้างระบบร่วมกันคือยูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunication System: UMTS) โดยมีข้อกำหนดที่สำคัญคือการใช้ความถี่ โดยทุกประเทศที่ใช้ระบบยูเอ็มทีเอสจะใช้ความถี่ที่ 5 MHz ต่อช่องสัญญาณ ในบางครั้งจะเรียกยูเอ็มทีเอสว่า 3 จีเอสเอ็มเพื่อบ่งบอกว่าเป็นเทคโนโลยีของยุคที่ 3 และพัฒนามาจากระบบจีเอสเอ็ม

โดยเทคโนโลยียุคที่ 3 จะเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่จะเน้นการรวมเอาเทคโนโลยีหลายๆ ด้านมาไว้ด้วยกัน อย่างเช่น โทรศัพท์มือถือก็จะเป็นในแง่การรวมเอาเทคโนโลยีเสียงมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีด้านการส่งและนำเสนอข้อมูลแล้วนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนในด้าน

ระบบนั้นเน้นการใช้ระบบบายแบนด์ซีดีเอ็มเอ (Wideband Code Division Multiple Access: WCDMA) และระบบอื่นๆ ที่กำลังปรับเปลี่ยนเข้าสู่มาตรฐานไอเอ็มที 2000 ซึ่งในยุคที่ 3 นี้เป็นการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดจากเทคโนโลยีปัจจุบัน ส่งผ่านข้อมูลในระบบไร้สายด้วยอัตราความเร็วที่สูงขึ้น ส่วนอุปกรณ์การสื่อสารในยุคที่ 3 นั้นจะเป็นอุปกรณ์ที่ผสมผสานการนำเสนอข้อมูลและเทคโนโลยีในปัจจุบันเข้าด้วยกัน เช่น อุปกรณ์ไร้สายประเภทพีดีเอ (Personal Digital Assistant: PDA) และ โทรศัพท์เคลื่อนที่อัจฉริยะ (smart phone) กล้องถ่ายรูป และอินเทอร์เน็ต เทคโนโลยียุคที่ 3 เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาต่อเนื่องจากยุคที่ 2 และ 2.5 ซึ่งเป็นยุคที่มีการให้บริการระบบเสียงและการส่งข้อมูลในขั้นต้น ทั้งนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่มาก การพัฒนาของยุคที่ 3 ทำให้เกิดการให้บริการมัลติมีเดีย และส่งผ่านข้อมูลในระบบไร้สายด้วยอัตราความเร็วที่สูงขึ้นและช่วยให้ผู้ใช้สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตรวมถึงรับและส่งภาพได้ทุกที่ ทุกเวลา

โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 นั้นนิยามสั้นๆ เพื่อให้เข้าใจตรงกันคือ

1. ต้องมีพื้นฐาน (platform) สำหรับการหลอมรวมของบริการต่างๆ เช่น การให้บริการประจำที่ (fixed service) การให้บริการเคลื่อนที่ (mobile service) บริการสื่อสารเสียง ข้อมูลอินเทอร์เน็ต และมัลติมีเดีย (multimedia) เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ สามารถถ่ายเท ส่งต่อข้อมูลดิจิทัลไปยังอุปกรณ์โทรคมนาคมประเภทต่างๆ ให้สามารถรับส่งข้อมูลได้

2. ความสามารถในการใช้โครงข่ายทั่วโลก (global roaming) คือ ผู้บริโภคสามารถถืออุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ไปใช้ได้ทั่วโลกโดยไม่ต้องเปลี่ยนเครื่อง

3. บริการที่ไม่ขาดตอน (seamless delivery service) คือ การใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยไม่รู้สึกรถึงการเปลี่ยนเซลล์ไซต์ (cell site)

4. อัตราความเร็วในการส่งข้อมูล (transmission rate) ในมาตรฐานไอเอ็มที 2000 นั้นกำหนดไว้ว่าต้องมีอัตราความเร็ว

- มากกว่า 144 Kbps ในทุกสภาวะ
- ถึง 2 Mbps ในสภาวะกึ่งเคลื่อนที่
- สูงถึง 384 Kbps ในสภาวะเคลื่อนที่

### 2.3.1 การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 นี้ เป็นเครือข่ายที่พัฒนามาจากเครือข่ายยุคที่ 2.5 (2.5G) อย่างเครือข่ายจีพีอาร์เอส (General Packet Radio Service: GPRS) และเครือข่ายในยุคที่ 2.75 (2.75G) อย่างเครือข่ายเอดจ์ (Enhanced Data Rate for GSM Evolution: EDGE) นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถที่จะพิจารณาพัฒนาการของแต่ละยุคได้ดังนี้

- ยุคที่ 1 (1<sup>st</sup> Generation: 1G)

เป็นยุคเริ่มแรกของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ใช้เทคโนโลยีระบบแอนะล็อก ระบบที่ได้นำเข้ามาใช้ในบ้านเราได้แก่ ระบบแอมป์ (Advanced Mobile Phone System: AMPS) ระบบเอ็นเอ็มที 470 (Nordic Mobile Telephone: NMT470) และระบบเอ็นเอ็มที 900 ใช้สัญญาณวิทยุในการส่งคลื่นเสียง การรับส่งสัญญาณนั้นใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณแอนะล็อกเข้าช่องสื่อสาร ซึ่งจะไม่รองรับการส่งผ่านข้อมูลใดๆ ทั้งสิ้น หมายความว่าสามารถโทรเข้าและออกได้เพียงอย่างเดียว ไม่รองรับแม้กระทั่งการบริการส่งข้อความสั้น (Short Message Service: SMS)

- ยุคที่ 2 (2<sup>nd</sup> Generation: 2G)

ยุคที่ 2 เป็นยุคที่มีการพัฒนาต่อมาจากยุคแรกโดยใช้เทคโนโลยีระบบดิจิทัล ด้วยการเข้ารหัสสัญญาณเสียงและบีบอัดสัญญาณเสียงในรูปแบบดิจิทัลให้มีขนาดข้อมูลที่น้อยลงเหลือเพียง 9 Kbps ต่อช่องสัญญาณ ซึ่งการติดต่อระหว่างเครื่องโทรศัพท์ของผู้ใช้กับสถานีฐานนั้นจะใช้วิธีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA) คือการนำความถี่ที่ได้จากวิธีการเอฟดีเอ็มเอ มาแบ่งเป็นช่องสัญญาณตามแต่ละช่วงเวลาและแบ่งกันใช้ ซึ่งระบบที่ใช้วิธีนี้คือระบบจีเอสเอ็ม (Global System for Mobile Communication: GSM) คือจีเอสเอ็ม 900 และระบบพีซีเอ็น 1800 (ซึ่งก็คือระบบจีเอสเอ็ม 1800) และระบบซีดีเอ็มเอ ซึ่งเป็นการแบ่งการเข้าถึงตามการเข้ารหัสและการถอดรหัสโดยมีการใส่ที่อยู่เหมือนไอพี (Internet Protocol: IP)

ข้อดีของระบบในยุคที่ 2 ที่เหนือกว่ายุคที่ 1 ได้แก่ รองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากกว่า และสามารถให้บริการรับส่งข้อมูลความเร็วต่ำได้ ทำให้สามารถนำไปใช้งานอินเทอร์เน็ตและบริการด้านพาณิชย์เคลื่อนที่ (mobile commerce) เช่น ระบบไอ โหมด (i-mode) ของญี่ปุ่น ปัจจุบันมีผู้ใช้บริการในญี่ปุ่นมากกว่า 30 ล้านคน ซึ่งนับว่าเป็นความสำเร็จอย่างสูง และสามารถให้บริการในด้านต่างๆ มากมายเช่น

- ถ้ามียอดเงินในบัญชีธนาคาร การโอนเงิน (telebanking)
- สอบถามข้อมูลตลาดหุ้น ตารางเที่ยวบินของสายการบินต่างๆ (information online)
- จองบัตรชมภาพยนตร์ จองตั๋วเครื่องบิน (ticket booking)
- เล่นเกมและฟังเพลงออนไลน์ (video games and music online)

ยุคที่ 2.5 เป็นยุคที่มีการเน้นเรื่องของการรับและส่งข้อมูลผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องจากกว่าระบบในยุคที่ 2 นั้น ไม่สามารถให้บริการในเรื่องการรับและส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะว่าระบบไม่ได้ถูกออกแบบมาให้สนับสนุนในเรื่องดังกล่าว ดังนั้น เครือข่ายในยุคที่ 2.5 จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับและส่งข้อมูล

ของลูกค้า โดยมีการพัฒนาจากเครือข่ายในยุคที่ 2 ซึ่งเครือข่ายในยุคที่ 2.5 นี้ก็คือเครือข่ายซีดีเอ็มเอ 2000 1X และเครือข่ายจีพีอาร์เอส ในระบบจีพีอาร์เอสนั้นผู้ใช้บริการจะถูกเชื่อมต่อกับโครงข่ายตลอดเวลา ทำให้สามารถรับและส่งข้อมูลได้ตลอดเวลาที่ต้องการ โดยไม่ต้องเชื่อมต่อทุกครั้งเพราะการคิดค่าบริการในระบบจีพีอาร์เอสนั้นจะคิดตามปริมาณข้อมูลที่รับและส่ง โดยไม่คิดตามเวลาในการใช้งานเหมือนอย่างเช่นทั่วไป เทคโนโลยีระบบจีพีอาร์เอสนั้นจัดอยู่ในระหว่างเทคโนโลยีของยุคที่ 2 และยุคที่ 3 จึงมีชื่อเรียกว่ายุคที่ 2.5 และพัฒนาเพิ่มเติมกลายเป็นเครือข่ายเอ็ดจ์ ซึ่งเป็นเครือข่ายในยุคที่ 2.75

- ยุคที่ 3 (3<sup>rd</sup> Generation: 3G)

ยุคที่ 3 จะเน้นในเรื่องของการให้บริการด้านมัลติมีเดีย เป็นยุคแห่งอนาคตอันใกล้ โดยสร้างระบบใหม่ให้รองรับระบบเก่าเรียกว่ายูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunication System: UMTS) ซึ่งเป็นเครือข่ายในยุคที่ 3 ที่มีพัฒนาการมาจากเครือข่ายจีเอสเอ็ม จีพีอาร์เอสและเอ็ดจ์ ซึ่งการเข้าถึงเครือข่ายแบบไร้สายสามารถกระทำได้ด้วยอุปกรณ์หลากหลาย เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ ระบบยังคงใช้การเข้ารหัสสัญญาณเป็นแบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) ซึ่งสามารถบรรจุช่องสัญญาณได้มากกว่าแต่ใช้แบบแถบกว้าง ระบบนี้จึงมีอีกชื่อหนึ่งว่าการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสแถบกว้าง (Wideband Code Division Multiple Access: WCDMA) มีจุดมุ่งหมายเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานด้านการรับและส่งข้อมูลที่มากขึ้นของลูกค้า มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงถึง 2 Mbps ซึ่งมีความเร็วในการรับและส่งข้อมูลที่มากกว่าเครือข่ายเอ็ดจ์ที่ใช้บริการในปัจจุบันถึง 4 เท่า

เนื่องจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 มีมากมายหลายแบบ แต่ละประเทศต่างใช้ระบบที่ต่างกัน จึงทำให้องค์กรที่กำหนดมาตรฐานสากลของระบบโทรคมนาคมระหว่างประเทศที่มีชื่อว่าไอทียู (International Telecommunication Union: ITU) มีความต้องการที่จะให้มีระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เพียงระบบเดียวทั่วโลก และสามารถให้บริการรับและส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่สูงกว่ายุคที่ 2 องค์กรไอทียูจึงได้กำหนดมาตรฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ขึ้นมาใหม่คือไอเอ็มที 2000 ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.3

เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 นั้นเป็นเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้นของลูกค้า ซึ่งถึงแม้ว่าเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2.5 จะสามารถให้บริการแก่ลูกค้าในเรื่องของรับส่งข้อมูลได้ดีขึ้นแล้วนั้น แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูล ดังนั้นระบบเครือข่ายสำหรับยุคที่ 3 จึงถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าในเรื่องการรับและส่งข้อมูลที่หลากหลายและรวดเร็วขึ้น ด้วยความสามารถของเครือข่ายในยุคที่ 3 นี้เอง ทำให้การใช้บริการ

ด้านเสียง (voice call) นั้นสามารถใช้งานได้บนเครือข่ายของการรับส่งข้อมูล (data call) ซึ่งเรียกการทำงานลักษณะดังกล่าวว่าวีโอพี (Voice Over Packet: VOP) อีกทั้งยังสามารถให้บริการรับและส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงถึง 2 Mbps เมื่อผู้ใช้งานอยู่ภายในสำนักงาน (ในจีเอสเอ็มสามารถส่งได้แค่ 9.6 Kbps) เนื่องจากความสามารถในการให้บริการรับและส่งข้อมูลมีความเร็วสูงขึ้นจึงทำให้เกิดบริการใหม่ๆ เพิ่มขึ้นจากบริการในยุคที่ 2 เช่น การรับชมภาพวิดีโอหรือภาพยนตร์ (streaming video) บริการมัลติมีเดียต่างๆ นอกจากนี้ยังทำให้ดึงข้อมูลเพลง 1 เพลง ที่อยู่ในรูปของเอ็มพี 3 ได้เร็วขึ้น (ปกติ 1 เพลง มีขนาดประมาณ 3 - 5 MB) ในระบบจีเอสเอ็มใช้เวลาถึง 42 นาที แต่ในระบบยูเอ็มทีเอส จะใช้เวลาเพียง 12 วินาทีเท่านั้น

อย่างไรก็ตามความฝันของไอทียูที่ต้องการให้ทั่วโลกมีระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 เพียงระบบเดียวนั้นไม่อาจเป็นจริงได้ เพราะในที่สุดแล้วได้เกิดระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ขึ้นมา 3 ระบบได้แก่

- ระบบซีดีเอ็มเอ 2000\* ของสหรัฐอเมริกา
- ระบบวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ\*\* ของยุโรป และญี่ปุ่น
- ระบบทีดีเอสซีเอ็มเอ\*\*\* ของประเทศจีน

\* CDMA = Code Division Multiple Access

\*\* WCDMA = Wideband Code Division Multiple Access

\*\*\* TD-SCDMA = Time Division Synchronous Code Division Multiple Access

### 2.3.2 มาตรฐานของระบบยูเอ็มทีเอส

มาตรฐานของระบบยูเอ็มทีเอสในปัจจุบันนั้นมีการเผยแพร่ออกมาแล้ว 4 มาตรฐานด้วยกัน โดยหน่วยงาน 3 จีพีพี (Third Generation Partnership Project: 3GPP) รับหน้าที่ในการออกแบบมาตรฐานต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย

1. ข้อกำหนดที่ 99 เป็นมาตรฐานใช้งานที่เพิ่มเติมจากเครือข่ายจีพีอาร์เอสและเอ็ดจ์โดยจะมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์ในส่วนของระบบรองของสถานีฐาน (Base Station Subsystem: BSS) ซึ่งเป็นส่วนที่ดูแลการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ใช้บริการกับเครือข่ายของผู้ให้บริการ โดยกลุ่มของอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมขึ้นมานั้นมีชื่อเรียกว่ายูทีอาร์เอเอ็น (UMTS Terrestrial Radio Access Network: UTRAN)

2. ข้อกำหนดที่ 4 เป็นมาตรฐานที่เพิ่มในส่วนของเครือข่าย โดยจะนำเครือข่ายแบบเอทีเอ็ม (Asynchronous Transfer Mode: ATM) และไอพี (Internet Protocol: IP) ซึ่งเป็นการรับส่งข้อมูลแบบเป็นแพกเกตเข้ามาใช้งานแทนเครือข่ายแบบเซอร์กิตสวิตซ์ ที่ใช้งานอยู่ในเครือข่ายจีเอสเอ็ม

3. ข้อกำหนดที่ 5 เป็นมาตรฐานที่เพิ่มเติมในส่วนของไอเอ็มเอส (IP Multimedia Service: IMS) โดยการทำงานของไอเอ็มเอส จะช่วยให้การใช้งานแบบมัลติมีเดีย ในลักษณะของผู้ใช้ถึงผู้ใช้ มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

4. ข้อกำหนดที่ 6 เป็นมาตรฐานที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงระบบมากนัก เพียงแต่เพิ่มความสามารถในการทำงานของการจดจำคำพูด (speech recognition) การสื่อสารระหว่างเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) กับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมีอยู่ 4 ความถี่ ดังนี้

- ความถี่ย่าน 2100 MHz เป็นความถี่มาตรฐานที่นิยมใช้แพร่หลาย โดยใช้กันในทวีปยุโรป เอเชีย แอฟริกา
- ย่าน 1900 MHz เป็นความถี่มาตรฐานที่นิยมใช้กันในทวีปอเมริกาเหนือและใต้
- ความถี่ย่าน 850 MHz เป็นความถี่มาตรฐานที่นิยมใช้กันในทวีปอเมริกาเหนือและใต้ รวมถึงออสเตรเลีย
- ความถี่ย่าน 900 MHz เป็นความถี่มาตรฐานย่านเดียวกับ GSM 900 MHz และนิยมใช้กันในทวีปยุโรปและเอเชีย

### 2.3.3 จุดเด่นของเทคโนโลยีแบบวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ

จุดเด่นของเทคโนโลยีแบบนี้ คือ ความเร็วในการเชื่อมต่อการติดต่อและส่งข้อมูล ซึ่งเน้นการเชื่อมต่อแบบไร้สายด้วยความเร็วสูง นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลให้เร็วขึ้น เน้นการติดต่ออย่างสมบูรณ์แบบ เช่น การประชุมทางไกล การดาวน์โหลดไฟล์ภาพ และเสียง วิดีโอและภาพยนตร์ รวมถึงการติดต่อธนาคารทางโทรศัพท์ การโอนเงิน เช็คยอดเงิน หาพิกัด ตรวจสอบเส้นทาง ซึ่งจะทำให้ชีวิตสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น เทคโนโลยียุคที่ 3 ทำให้สามารถติดต่อกันได้อย่างรวดเร็ว เพิ่มความสะดวกสบายให้กับการดำเนินชีวิตซึ่งถือว่าเป็นหัวใจหลักของเทคโนโลยี อีกทั้งยังรวมถึงความสมจริง เปรียบเหมือนเป็นการใส่ความรู้สึกเข้าไป เช่น ไฟล์เสียงสมจริง การแสดงภาพแบบ 3 มิติ หรือการติดต่อเชื่อมโยงต่างๆ และหัวใจหลักคือการเชื่อมต่อกับระบบอยู่ตลอดเวลา ทำให้เราไม่พลาดการติดต่ออีกต่อไป ซึ่งจะได้กล่าวถึงจุดเด่นของเทคโนโลยีแบบวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ ดังต่อไปนี้

1. เครือข่ายวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ รับประกันคุณภาพในการรองรับเสียงและข้อมูล ในแง่ของผู้ใช้บริการจะรับรู้ได้ว่าคุณภาพเสียงจากการใช้งานเครือข่ายยุคที่ 3 ชัดเจนกว่าหรืออย่างน้อยเทียบเท่าการสนทนาผ่านเครือข่ายยุคที่ 2 ส่วนการรับส่งข้อมูลแบบอื่นๆ จะรับรู้ถึงอัตราเร็วในการสื่อสารที่สูงกว่าการใช้งานผ่านเครือข่ายยุคที่ 2.5 และ 2.75 มาก อันเป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีเครือข่ายและใช้ย่านความถี่ที่สูงขึ้น

2. วายแบนด์ซีดีเอ็มเอเป็นมาตรฐานเปิด ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยกลุ่ม 3 จีพีพี ซึ่งเป็นกลุ่มเดียวกับผู้พัฒนาระบบจีเอสเอ็ม ทำให้ผู้ให้บริการในเครือข่ายยุคที่ 3 สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายหากันได้ ถึงขั้นอนุญาตให้มีการใช้งานข้ามเครือข่าย เช่นเดียวกับที่เป็นอยู่ในเครือข่ายยุคที่ 2 นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อเพื่อการใช้งานข้ามเครือข่ายกับเทคโนโลยียุคที่ 2 /2.5 /2.75 ได้ในทันที โดยผู้ให้บริการเพียงมีอุปกรณ์สื่อสารแบบโหมคคู่เท่านั้น จึงมีผู้ทางเพื่อเปิดให้ผู้ประกอบการเครือข่ายรายอื่นได้ร่วมเข้าใช้บริการ (Mobile Virtual Network Operator: MVNO)

3. มาตรฐานวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ เป็นมาตรฐานโลก ที่จะเข้ามาแทนที่เครือข่ายในตระกูลจีเอสเอ็มเช่นเดียวกับเหตุการณ์ที่เครือข่ายจีเอสเอ็มเข้ามาแทนที่เครือข่ายในยุคที่ 1 เมื่อ 10 กว่าปีที่แล้ว จึงเป็นการรับประกันถึงพัฒนาการที่มีอย่างต่อเนื่องในด้านต่างๆ

4. พิจารณาเฉพาะการให้บริการแบบเสียงจะเห็นว่าการลงทุนสร้างเครือข่ายวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ มีต้นทุนที่ต่ำกว่าการสร้างเครือข่ายจีเอสเอ็ม เนื่องจากมาตรฐานวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ มีความยืดหยุ่นและคล่องตัว ทำให้ผู้ประกอบการสามารถปรับเปลี่ยนทรัพยากรความถี่เพื่อรองรับเสียงและข้อมูลได้อย่างผสมผสาน ต่างจากการกำหนดทรัพยากรตายตัวในเทคโนโลยีจีเอสเอ็ม

5. วายแบนด์ซีดีเอ็มเอเป็นมาตรฐานสื่อสารไร้สายชนิดเดียวที่มีรูปแบบการทำงานแบบแถบความถี่กว้าง (wideband) อันนำมาซึ่งประสิทธิภาพในการสร้างพื้นที่ให้บริการที่กว้างใหญ่ไปพร้อมๆ กับความสะดวกในการเพิ่มขยายขีดความสามารถในการรองรับข้อมูลข่าวสาร ต่างจากเครือข่ายในยุคที่ 2 โดยทั่วไปที่ปัจจุบันเริ่มประสบกับปัญหาการจัดสรรความถี่ที่ไม่เพียงพอต่อการขยายเครือข่าย เนื่องจากเป็นระบบแบบแถบความถี่แคบ (narrow band)

6. กลไกการทำงานภายในเครือข่ายวายแบนด์ซีดีเอ็มเอ เป็นไปตามมาตรฐานสากล โดยเฉพาะมาตรฐานไออีทีเอฟ (Internet Engineering Task Force: IETF) ทำให้ผู้ประกอบการสามารถเปิดโอกาสให้พันธมิตรทางธุรกิจซึ่งมีความเชี่ยวชาญในการพัฒนาโปรแกรมหรือบริการพิเศษต่างๆ บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ได้ทำการพัฒนาสร้างบริการผ่านอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย โดยใช้ทักษะความสามารถและความชำนาญที่มีอยู่ เป็นการกระตุ้นให้เกิดบริการประเภทข้อมูลที่ไม่ใช่เสียงได้สารพัดรูปแบบ

7. มีการพัฒนาขีดความสามารถในการรองรับการสื่อสารข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาสู่มาตรฐานเอชเอสดีพีเอ (High Speed Downlink Packet Access: HSDPA) ที่รองรับการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงมากถึง 14 Mbps ในขณะที่มาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็มไม่สามารถพัฒนาให้รองรับการสื่อสารข้อมูลได้มากกว่าเทคโนโลยีเอชดีพีเอในปัจจุบัน ซึ่งรองรับข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็ว 384 Kbps และในความเป็นจริงก็ไม่สามารถเปิดให้บริการด้วยอัตราเร็วถึงระดับดังกล่าวได้ เนื่องจากจะไม่สามารถรองรับบริการเสียงได้อีกต่อไป

8. ในอนาคตมาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 จะมีทิศทางการพัฒนาที่ชัดเจนขึ้น ในด้านการรวมตัวกับมาตรฐานสื่อสารไร้สายชนิดอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นมาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) และ ไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access: WiMAX) ทำให้ผู้ใช้บริการเครือข่ายไร้สายสามารถเคลื่อนย้ายไปใช้งานในเครือข่ายใดๆ ก็ได้ โดยยังคงได้รับการดูแลโดยผู้ให้บริการเครือข่ายในยุคที่ 3

ความสำคัญต่างๆ เหล่านี้ เป็นแรงผลักดันให้ผู้ประกอบการโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็มจำนวนมากทั่วโลก ให้ความสำคัญในการเปิดให้บริการเครือข่ายในยุคที่ 3 โดยเฉพาะยักษ์ใหญ่ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่อันดับต้นๆ ของโลก 8 ราย ได้ตัดสินใจเลือกเทคโนโลยีแบบวายแบนด์ ซีดีเอ็มเอเป็นเทคโนโลยีหลักของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3

### 2.3.4 คุณสมบัติของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3

เมื่อเปรียบเทียบเทคโนโลยียุคที่ 2 กับยุคที่ 3 แล้วเทคโนโลยียุคที่ 3 มีช่องสัญญาณความถี่และความจุในการรับส่งข้อมูลที่มากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูล รวมทั้งบริการระบบเสียงดีขึ้น พร้อมทั้งสามารถให้บริการมัลติมีเดียได้เต็มที่และสมบูรณ์แบบขึ้นเช่น บริการส่งแฟกซ์ โทรศัพท์ต่างประเทศ รับและส่งข้อความที่มีขนาดใหญ่ ประชุมทางไกลผ่านหน้าจออุปกรณ์สื่อสาร ดาวน์โหลดเพลง รวมถึงการชมภาพยนตร์แบบสั้นๆ ในการใช้บริการจะมีการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ตลอดเวลาที่เราเปิดเครื่องโทรศัพท์ นั่นคือไม่จำเป็นต้องต่อโทรศัพท์เข้าเครือข่ายทุกครั้งที่ใช้บริการรับส่งข้อมูล ซึ่งการเสียค่าบริการแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเรียกใช้ข้อมูลผ่านเครือข่ายเท่านั้น โดยจะแตกต่างจากระบบทั่วไปที่จะเสียค่าบริการตั้งแต่เราเข้าระบบ และอุปกรณ์สื่อสารไม่ได้จำกัดอยู่เพียงแค่โทรศัพท์เท่านั้น แต่ยังอยู่ในรูปแบบของอุปกรณ์สื่อสารอื่น เช่น พีดีเอ (Personal Digital Assistant: PDA) เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (laptop) และเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (personal computer)

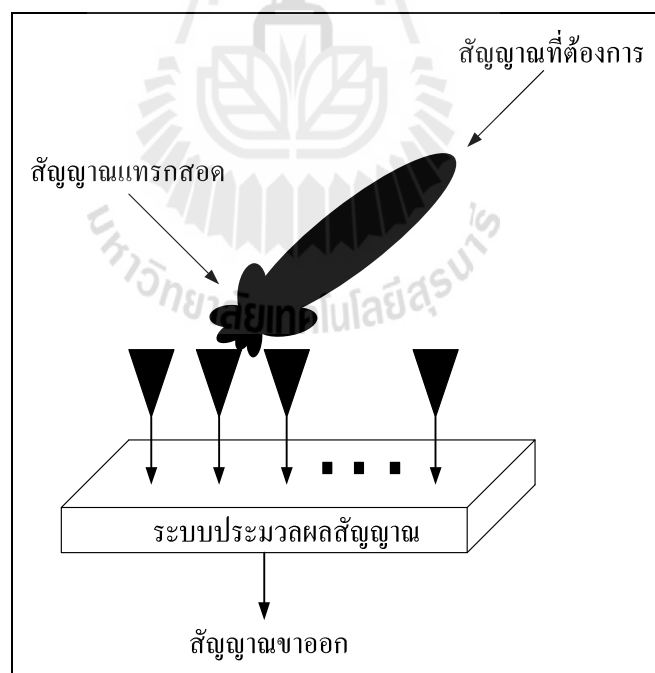
จากการที่เทคโนโลยีในยุคที่ 3 สามารถรับส่งข้อมูลในความเร็วสูง ทำให้การติดต่อสื่อสารเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และมีรูปแบบใหม่ๆ มากขึ้น ประกอบกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในยุคที่ 3 สามารถให้บริการระบบเสียงและแอปพลิเคชันรูปแบบใหม่ เช่น จอแสดงภาพสี เครื่องเล่นเอ็มพี 3 เครื่องเล่นวีดีโอ การดาวน์โหลดเกม แสดงรูปภาพ และการแสดงแผนที่ ทำให้การสื่อสารนั้นสมจริงมากขึ้น เทคโนโลยีในยุคที่ 3 ช่วยให้มีชีวิตประจำวันสะดวกสบายขึ้น โดยโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่จะเปรียบเสมือนคอมพิวเตอร์แบบพกพา วิทยุส่วนตัว กล้องถ่ายรูป และผู้ใช้ยังสามารถตรวจสอบข้อมูลในบัญชีผู้ใช้ส่วนตัว เพื่อใช้บริการต่างๆ ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น ตรวจสอบค่าบริการ (self-care) แก้ไขข้อมูลส่วนตัว และใช้บริการข้อมูลต่างๆ เช่น ดูข่าวเกาะติดสถานการณ์ ข่าวบันเทิง ข้อมูลด้านการเงิน ข้อมูลการท่องเที่ยว และตารางนัดหมายส่วนตัว เป็นต้น



## 2.4 ระบบสายอากาศแก่ง

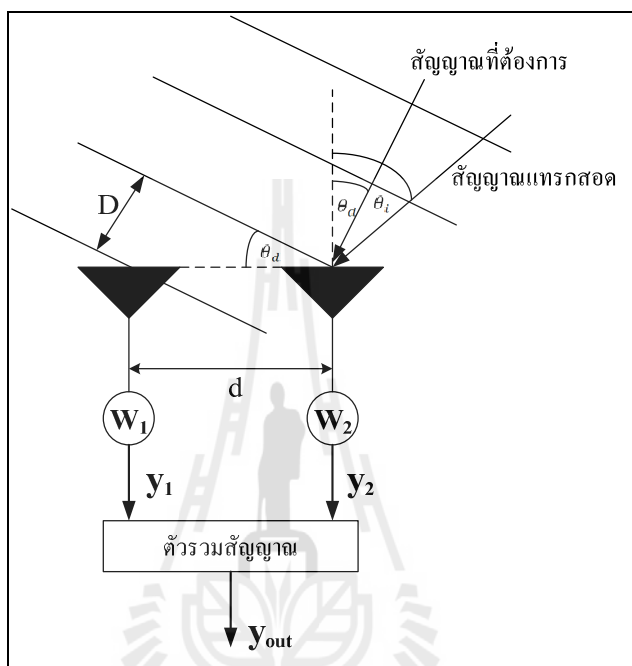
ระบบสายอากาศแก่งได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในช่วงปี พ.ศ. 2473 โดยได้พัฒนามาจากเทคโนโลยีของสายอากาศแถวลำดับที่มีการปรับเฟส (phased array) ร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งเริ่มแรกมีจุดประสงค์ที่จะนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ แต่ในปัจจุบันระบบสายอากาศแก่งได้ถูกนำมาใช้ในระบบสื่อสารไร้สายอย่างแพร่หลาย เนื่องจากระบบสายอากาศแก่งสามารถลดสัญญาณแทรกสอดและสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่มีมากได้

ระบบสายอากาศแก่งประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ คือ สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) ที่ถูกใช้ในการบ่งชี้ทิศทางการมาถึง (Direction of Arrival: DoA) ของสัญญาณ ซึ่งข้อมูลที่ได้มานั้นจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณต่อไปเพื่อทำการก่อรูปลำคลื่น โดยจะหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และหันจุดศูนย์หรือพ่วงไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดหรือสัญญาณที่ไม่ต้องการ ดังรูปที่ 2.1 ระบบสายอากาศแก่งมีกระบวนการทำงานอยู่ 2 กระบวนการหลักๆ คือการหาทิศทางของสัญญาณและการก่อรูปลำคลื่น



รูปที่ 2.1 ระบบสายอากาศแก่ง

หลังจากที่ได้ข้อมูลของทิศทางของสัญญาณแล้วขั้นตอนต่อไปคือการก่อรูปลำคลื่นซึ่งเป็นวิธีการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) จากสายอากาศ โดยมีลำคลื่นหลักชี้ไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็หันจุดศูนย์หรือพูข้างไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เองที่ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณในระบบนั้นดีขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงการตกกระทบของสัญญาณบนสายอากาศของระบบสายอากาศเก่ง

ในส่วนของการหั่นลำคลื่น ระบบสายอากาศเก่งสามารถหั่นลำคลื่นหลักและจุดศูนย์ได้โดยการปรับเฟสหรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับมายังสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้น เพื่อหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งการเฟสหรือแอมพลิจูดนั้นเรียกว่า การถ่วงน้ำหนัก สายอากาศแต่ละต้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไปตามมุมเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศต้นนั้นๆ โดยหลักการเบื้องต้นของการหั่นลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 จากรูป  $D$  คือ ความต่างเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น  $d$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ  $W_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weight coefficients) ของสัญญาณที่สายอากาศต้นที่  $n$  ส่วน  $y_n$  คือสัญญาณขาออกของสายอากาศต้นที่  $n$  มุม  $\theta_d$  และ  $\theta_i$  คือมุมตกกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับจากรูปสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.1)$$

โดยที่สัญญาณขาออกของสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศชั้นที่ 1 คือ  $y_1$  และสัญญาณขาออกสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศชั้นที่ 2 คือ  $y_2$  และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละชั้นมีค่าดังนี้

$$y_{2d} = A_d \quad (2.2)$$

$$y_{2i} = A_i \quad (2.3)$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.4)$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $A_d$  คือ ค่าของสัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศ และ  $A_i$  คือค่าของสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศ ส่วน  $y_{nd}$  และ  $y_{ni}$  คือ สัญญาณขาออกของสัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศชั้นที่  $n$  และสัญญาณขาออกของสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศชั้นที่  $n$  ตามลำดับ ส่วน  $\theta_d$  และ  $\theta_i$  คือมุมที่ตกกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับและสัญญาณขาออกเมื่อผ่านตัวถ่วงน้ำหนักแล้วจะได้

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2(A_d + A_i) \quad (2.6)$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1(A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \quad (2.7)$$

แทนค่าสมการที่ (2.6) และ (2.7) ลงในสมการที่ (2.1) จะได้

$$y_{out} = A_i(w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) + A_d(w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) \quad (2.8)$$

โดยที่  $w_1$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศชั้นที่ 1 และ  $w_2$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศชั้นที่ 2

เราต้องการให้พจน์แรกในสมการที่ (2.8) ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณแทรกสอด ( $A_1$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดออกไป และทำให้พจน์ที่สองของสมการซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณที่ต้องการ ( $A_d$ ) มีค่าสูงสุด ดังนั้น

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_1} = 0 \quad (2.9)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศทั้งสองดังนี้

$$w_1 = \frac{1}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_1}} \quad (2.11)$$

$$w_2 = \frac{-e^{j\theta_1}}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_1}} \quad (2.12)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (2.11) และ (2.12) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \quad (2.13)$$

ซึ่งหมายความว่าสัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับค่าของสัญญาณที่ต้องการ โดยไม่มีสัญญาณแทรกสอดปนอยู่เลย ขบวนการข้างต้นเป็นตัวอย่างง่ายๆ ในการถ่วงน้ำหนักของระบบสายอากาศแ่ง เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอด สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของระบบสายอากาศแ่งได้ดังนี้

ข้อดีของระบบสายอากาศแ่ง

1) เพิ่มพื้นที่ให้บริการ เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงขึ้นจากการใช้สายอากาศแ่งลำดับ ส่งผลให้กำลังส่งของสัญญาณโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น สามารถส่งสัญญาณได้ไกลขึ้น มีพื้นที่ครอบคลุมมากขึ้นและทำให้ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น

2) ประหยัดพลังงาน เนื่องจากระบบสายอากาศแ่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้ได้โดยตรง โดยไม่ส่งสัญญาณไปยังทิศทางที่ไม่มีผู้ใช้งาน จึงไม่สูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็น

3) ลดสัญญาณแทรกสอด เนื่องจากระบบสายอากาศแ่งสามารถหันลำคลื่นรองไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้

ข้อเสียของระบบสายอากาศแก่ง

- 1) ระบบสายอากาศแก่งมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง
- 2) สำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการติดตั้งสายอากาศ ระบบสายอากาศแก่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched-beam antennas) และระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น (adaptive array antennas) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

#### 2.4.1 ระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

สายอากาศประเภทนี้จะมีจำนวนแบบรูปลำคลื่นจำกัด และจะหันลำคลื่นไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้โดยใช้เพียงโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักไว้แล้ว สายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นประกอบไปด้วยสายอากาศแฉกลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้คือ

- 1) สวิตช์ลำคลื่นเพื่อตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ
- 2) ตัวเลือกลำคลื่นจะทำการเลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด
- 3) จะใช้ลำคลื่นที่เลือกไว้เมื่อผู้ใช้งานไม่มีการเคลื่อนที่
- 4) เปลี่ยนลำคลื่นเดิมไปยังลำคลื่นใหม่ที่มีความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าเมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น

ข้อดีของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

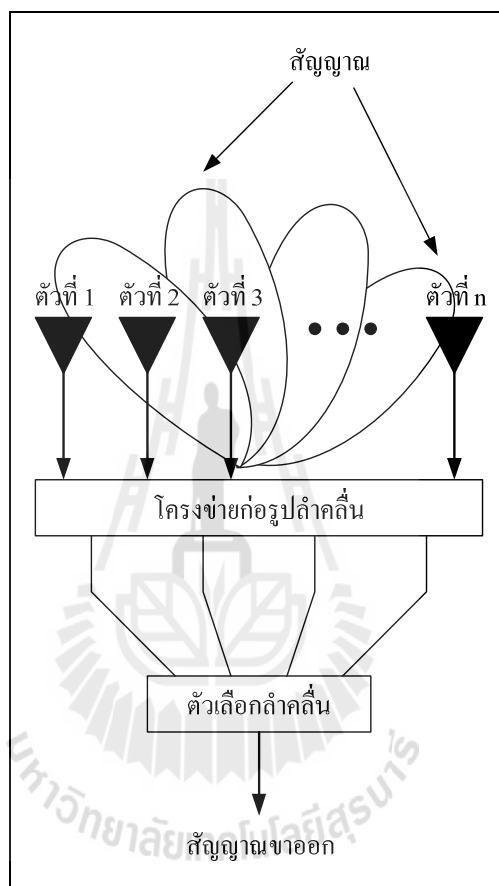
- 1) มีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น
- 2) ประหยัดเรื่องค่าใช้จ่าย เนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยในกรณีที่ใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก

3) ในกรณีที่ระบบนั้นใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น

ข้อเสียของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

- 1) มีอัตราการขยายของสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น
- 2) การลดจำนวนสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด
- 3) กรณีที่สัญญาณไม่ชัดเจน มีการบดบังสัญญาณ มีการแทรกสอดของสัญญาณ หรือมีสัญญาณมาถึงจากหลายๆ ทิศทาง อาจเกิดความผิดพลาดในการเลือกสัญญาณได้
- 4) ไม่สามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ จะเห็นว่าเมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สายอากาศแต่ละต้นจะส่งค่าไปยังโครงข่ายก่อนรูปลาค่ลินเพื่อทำการถ่วงน้ำหนักและสร้างลาค่ลินไปยังทิศทางที่กำหนดไว้ โดยตัวเลือกลาค่ลินทำหน้าที่เลือกลาค่ลินที่ให้สัญญาณแรงที่สุด ทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้ ทำให้สัญญาณที่รับได้มีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลาค่ลิน

#### 2.4.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลาค่ลิน

สายอากาศประเภทนี้มีจำนวนแบบรูปลาค่ลินไม่จำกัด และสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลาค่ลินหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ตลอดเวลา หลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สัญญาณจะถูกส่งมาที่ส่วนอัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive algorithm) เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณแล้วส่งค่ากลับไปให้ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ โดยระบบจะทำงานแบบนี้วนซ้ำไปเรื่อยๆ จนสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้

สำหรับอัลกอริทึมแบบปรับตัว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่อัลกอริทึมปรับตัวแบบมองไม่เห็น (blind adaptive algorithm) และมอดูลัสคงที่กำลังสองที่น้อยที่สุด (least squares constant modulus)

ข้อดีของระบบสายอากาศแบบปรับลำคลื่น

- 1) มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Noise Ratio: SNR) ที่ดี
- 2) มีประสิทธิภาพดีแม้แต่ในกรณีที่จำนวนสัญญาณมากกว่าจำนวนสายอากาศ
- 3) สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาได้ดีกว่าระบบสายอากาศแบบ

สวิตซ์ลำคลื่น

ข้อเสียของระบบสายอากาศแบบปรับลำคลื่น

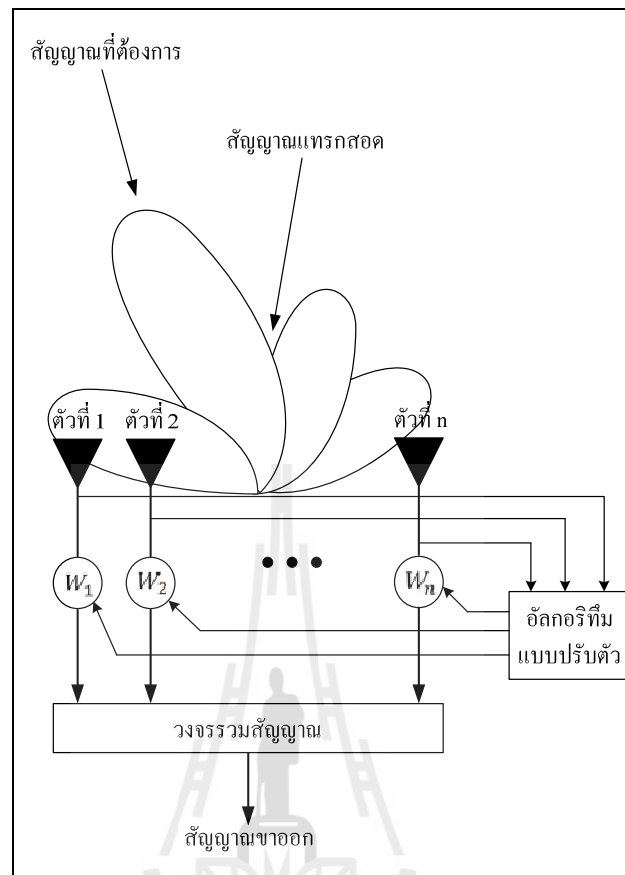
- 1) มีความซับซ้อนสูงเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น
- 2) ต้องการสัญญาณอ้างอิงที่ดี เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในการหันทำคลื่น

หลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ

- 3) ต้องการหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง
- 4) มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากมีความซับซ้อนมาก

ในหัวข้อ 2.4.1 และ 2.4.2 ได้อธิบายหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศทั้งแบบสวิตซ์ลำคลื่นและแบบปรับลำคลื่นไปแล้ว จาก 2 หัวข้อดังกล่าวจะเห็นว่าสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับลำคลื่น นอกจากนี้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหันทำคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้งสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับลำคลื่น ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นจึงเป็นสายอากาศที่น่าสนใจและในหัวข้อต่อไปจะอธิบายถึงประเภทของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบในงานวิจัยนี้

รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นจะถูกนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก จากนั้นก็จะถูกส่งไปยังตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อนำค่าที่ได้ไปคูณกับสัญญาณที่เข้ามา ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนได้ค่าที่ดีที่สุดแล้วจึงสร้างลำคลื่น ไปยังทิศทางที่ต้องการและหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด



รูปที่ 2.4 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับค่าคลื่น

## 2.5 สายอากาศไมโครสตริป

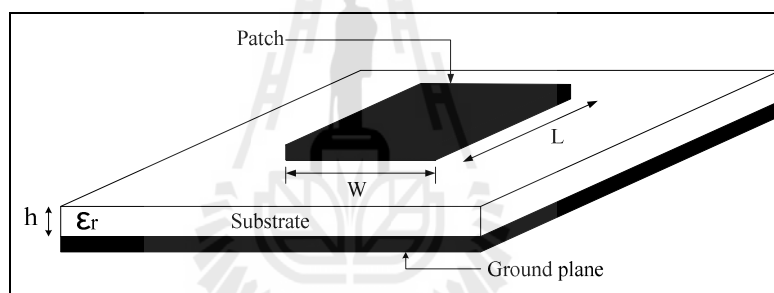
ในส่วนนี้จะศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และรูปแบบการป้อนสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศแบบไมโครสตริปหรือสายอากาศแบบระนาบได้เริ่มถูกใช้งานครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2513 แม้ว่าแนวความคิดครั้งแรกจะเกิดขึ้นโดย G.A. Deschamps ตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ. 2496 และถูกจดสิทธิบัตรไปตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2498 สาเหตุที่ในช่วงแรกไม่มีการพัฒนาไปใช้งานเนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำแต่มีข้อดีตรงที่ขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะกับงานด้านความถี่สูง เช่น ความถี่ยูเอชเอฟ (UHF) ขึ้นไป กล่าวได้ว่าสายอากาศชนิดนี้เป็นการพัฒนารูปแบบหนึ่งของสายอากาศเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็กเช่น โทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์จึงมีลักษณะแบนคล้ายกับแผ่นทองแดงทั่วไป และเนื่องจากถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับความถี่ใดความถี่หนึ่งโดยเฉพาะรูปร่างจึงแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของความถี่ใช้งานเป็นหลัก เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้ออกแบบได้ง่ายที่สุด จึงมีนักวิจัยให้ความสนใจออกแบบเป็นอย่างมาก



รูปแบบพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (microstrip patch antenna) สายอากาศไมโครสตริปแบบไดโพล (microstrip dipole antenna) และ สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (microstrip slot antenna) ในแต่ละชนิดจะมีรูปแบบและคุณสมบัติแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ซึ่งสายอากาศแบบช่องเปิดนั้นเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเนื่องจากเป็นสายอากาศ ที่ออกแบบได้ง่าย แบบรูปการแผ่สนามระยะไกลสามารถกำหนดได้ทั้งแบบทิศทางเดียว (uni-direction) และแบบสองทิศทาง (bi-direction) ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน และสายอากาศช่องเปิดนั้นสามารถใช้รูปแบบการป้อนสัญญาณได้หลายรูปแบบ

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบพื้นฐานคือ ส่วนที่เป็นแผ่นตัวนำหรือที่เรียกว่า แพทช์ (patch) และแผ่นระนาบกราวด์ ซึ่งแยกออกจากกันด้วยวัสดุฐานรองหรือที่เรียกว่า ซับสเตรท (substrate) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

- โดยที่
- $W$  คือ ความกว้างของสายอากาศ (Patch)
  - $L$  คือ ความยาวของสายอากาศ (Patch)
  - $h$  คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง (Substrate)
  - $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (Substrate)

ตัวอย่าง สายอากาศแบบไมโครสตริปพื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า สายอากาศแบบไมโครสตริปพื้นฐาน เป็นรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายคือนำแผ่นทองแดงมาเจาะทองแดงรอบนอกออกให้เหลือทองแดงเป็นสี่เหลี่ยม กว้างยาวประมาณ  $1/2$  ของความยาวคลื่นที่ต้องการ ก็สามารถนำไปใช้งานได้แล้ว แต่ความยาวคลื่นต้องคิดแบบความยาวคลื่นสัมพัทธ์กับชนิดของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบพื้นฐานนี้คือใช้งานได้กับช่องสัญญาณแคบมาก ประกอบกับมีขนาดใหญ่และประสิทธิภาพต่ำจึงมักถูกนำมาเพียงเพื่อเรียนรู้เบื้องต้นของสายอากาศแบบระนาบเท่านั้น แต่ไม่ถูกนำไปใช้งาน

### 2.5.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปจะสามารถคำนวณความกว้างและความยาวของสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$W = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.14)$$

$$L = \frac{1}{2f \sqrt{\epsilon_e} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.15)$$

โดยที่

$$\Delta L = h 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.16)$$

และ

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W_s}} \right) \quad (2.17)$$

- โดยที่
- $W$  คือ ความกว้างของสายอากาศ
  - $L$  คือ ความยาวของสายอากาศ
  - $W_s$  คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป
  - $h$  คือ ความสูงของวัสดุรองรับ
  - $f$  คือ ความถี่ที่ใช้งาน
  - $\epsilon_e$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล
  - $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง
  - $\mu_0$  คือ ค่าความซาบซึ่มได้ของอวกาศว่าง
  - $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอวกาศว่าง

### 2.5.2 แผ่นตัวนำสายอากาศ

แผ่นตัวนำสายอากาศ เป็นแผ่นโลหะแบบบาง ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงานและมีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อม สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดีโดยทั่วไปทำจากทองแดง ทองคำ หรือ อลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่างต่างๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และความซับซ้อนในการผลิต นอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำของสายอากาศยังเป็นปัจจัยต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแผ่พลังงานและค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ปัจจุบันแผ่นตัวนำสายอากาศที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม เนื่องจากการออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย

### 2.5.3 ชั้นวัสดุฐานรอง

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศและยังเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศแบบไมโครสตริป การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นและการแผ่พลังงานนี้จะมีปริมาณลดลง เมื่อความหนาคือความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะและสามารถผลิตเป็นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้ นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงดังต่อไปนี้

- ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (dielectric constants :  $\epsilon$ ) วัสดุที่ใช้ควรเป็นวัสดุเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริก โดยเทียบกับอากาศว่าง ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ควรมีค่าต่ำ เนื่องจากจะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดี และทำให้การผลิตมีความผิดพลาดน้อย

- ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (loss tangent) คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสการกระจัด เมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยค่านี้ควรมีค่าที่ต่ำ เพื่อจะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

- ค่าคงตัวของการนำความร้อน (thermal conductivity) แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่านี้ยิ่งสูงยิ่งดี

#### 2.5.4 ระบายกราวด์

เป็นแผ่น โลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ทำจาก โลหะชนิดเดียวกันกับสายอากาศ โดยขนาดของระบายกราวด์จะส่งผลกระทบต่อแบบรูป การแผ่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระบายกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อ การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่สมมุติว่า แผ่นระบายกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ ขนาดที่จำกัดของระบายกราวด์จะมีผลต่อลำคลื่นหลัก (main lobe) น้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่น ด้านหลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

#### 2.5.5 ประเภทของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปมีหลายประเภท แต่แบ่งตามการใช้งานได้ 3 ประเภทดังนี้

1. สายอากาศแบบแผ่กระจายคลื่นตามแนวกว้าง เพื่อการสื่อสารตามแนวกว้าง ของแผ่นทองแดงสายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตั้งฉากกับแผ่นทองแดง
2. สายอากาศที่แผ่กระจายคลื่นตามแนวยาว เพื่อการสื่อสารในทิศทางตัดขวาง ของแผ่นทองแดงสายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตามแนวเดียวกับแผ่นทองแดง
3. สายอากาศอื่นๆ เป็นสายอากาศที่ออกแบบมาเฉพาะการใช้งานชนิดใดชนิดหนึ่ง อาจมีมากกว่าสองทิศทางหรืออาจปรับเปลี่ยนทิศทางได้ตามความถี่ที่ใช้งาน

#### 2.5.6 ส่วนประกอบของสายอากาศไมโครสตริป

1. หัวเชื่อมต่อ คืออุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมระหว่างสายอากาศกับอุปกรณ์ส่งข้อมูล ซึ่งโดย ปกติจะใช้ตามมาตรฐานเอสเอ็มเอ (SMA) ซึ่งเป็นมาตรฐานสากล แต่มาตรฐานเอสเอ็มเอนี้สามารถ แบ่งย่อยได้อีกกว่าสิบชนิด เพื่อให้ตรงกับการใช้งานมากที่สุดถ้าใช้ผิดประเภทแล้วจะไม่สามารถ ต่อกันได้หรือถ้าได้ก็จะลดประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณลดลง
2. แผ่นทองแดง เป็นฐานของทองแดงซึ่ง ทองแดงนี้คือสายอากาศขนาดเล็กนั่นเอง เมื่อความถี่สูงขึ้น จึงมีขนาดเล็กจนไม่สามารถคงรูปเดิมได้ จึงต้องมีแผ่นทองแดงมายึด โครงสร้าง ของสายอากาศเอาไว้ แผ่นทองแดงนี้มีหลายชนิด ซึ่งแผ่นทองแดงชนิดีพอกซ์ FR4 หรือแผ่นที่หนา 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.8 มีใช้อย่างแพร่หลายที่สุดเพราะราคาถูกและสามารถหาได้ง่าย แบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบด้านเดียวและแบบสองด้านตามการใช้งาน สามารถหาได้ตามแหล่ง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป แต่แผ่นทองแดงชนิดีพอกซ์มีข้อเสียคือการส่งสัญญาณที่ไม่ดีนัก โดยปกติแล้วสายอากาศจะอิงตามความยาว  $1/2$  หรือ  $1/4$  ของความยาวคลื่น เมื่อเปลี่ยนรูปแบบมาเป็น สายอากาศแบบไมโครสตริปแล้วก็ยังคงใช้วิธีการเดิมอยู่แต่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากชนิดของ แผ่นทองแดงด้วย

### 2.5.7 วิธีการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศมีการทำงานเช่นเดียวกับเสาอากาศทั่วไป คือ นำเอาสายอากาศมาเชื่อมเข้ากับแหล่งจ่ายข้อมูลผ่านทางหัวเชื่อมต่อก็สามารถใช้งานได้ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะไม่มี การปรับแต่งใดๆ อีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสายอากาศที่มีทิศทางแคบมาก จะไม่มีการขยับเขยื้อนใดๆ หลังจากติดตั้งแล้ว

สายอากาศไมโครสตริปมีทั้งข้อดีและข้อด้อยหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านไมโครเวฟแบบอื่นๆ สามารถสรุปได้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริปสามารถจะกำจัดให้ลดน้อยลงได้ ถ้าออกแบบให้ถูกต้องและเลือกใช้วัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ ซึ่งคาดว่าต่อไปในอนาคตจะมีการนำสายอากาศไมโครสตริปมาใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น เนื่องจากความหนาของไมโครสตริปบางมาก

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป

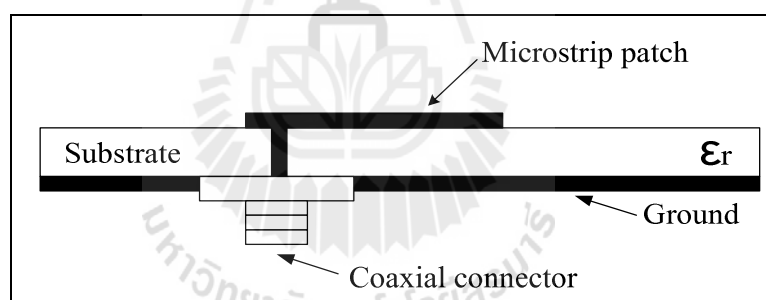
ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาถูก</li> <li>- น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน</li> <li>- ขนาดเล็ก ปริมาณน้อย จึงไม่ต้านลม</li> <li>- สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างให้สมดุลได้</li> <li>- การผลิตง่าย</li> <li>- สามารถป้องกันสัญญาณและปรับอิมพีแดนซ์ได้พร้อมๆ กับการสร้างสายอากาศ</li> <li>- สามารถสร้างเป็นสายอากาศแถวลำดับได้ง่าย</li> <li>- ต่อเข้ากับวงจรหรือติดตั้งได้ง่ายกว่า</li> <li>- สามารถกำหนดลักษณะการเดินทางของคลื่นได้ทั้งแบบลิเนียร์และแบบวงกลม โดยการเลื่อนตำแหน่งที่ป้องกันสัญญาณและรูปร่างของแผ่นแผ่พลังงานที่ใช้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีกำลังงานในการแผ่พลังงานต่ำ</li> <li>- มีแถบความถี่แคบ (narrow bandwidth)</li> <li>- มีการสูญเสียมากโดยส่วนมากจะเกิดจากการสูญเสียที่จุดต่อและจุดป้อนสัญญาณจึงส่งผลให้ได้อัตราขยาย (gain) ต่ำ</li> <li>- สายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายคลื่นเพียงครึ่งระนาบ</li> <li>- ต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อรักษาคุณสมบัติของสารที่ใช้ทำสายอากาศ</li> </ul>

## 2.6 รูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป

สายนำสัญญาณทำหน้าที่จ่ายกำลังงานให้แก่สายอากาศไมโครสตริป สายนำสัญญาณเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศ รูปแบบการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปมี 4 ชนิดคือ สายโคแอกเซียลโพรบ (coaxial probe) การป้อนแบบประกบ (proximity coupling) การป้อนแบบช่องเปิด (aperture coupling) และสายไมโครสตริป (microstrip line) ในงานวิจัยนี้ได้ที่ใช้การป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริป เนื่องจากออกแบบง่ายและสะดวกในการสร้าง

### 2.6.1 สายโคแอกเซียลโพรบ

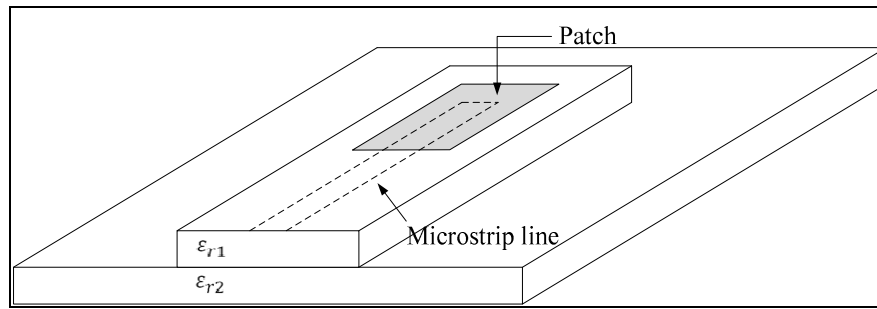
การป้อนด้วยสายโพรบ ดังรูปที่ 2.6 จะทำให้ตัวนำด้านในของสายเชื่อมต่อกับแพทช์และตัวนำด้านนอกต่อกับระนาบกราวด์ การป้อนแบบนี้เป็นวิธีที่ง่ายทั้งการสร้างและการทำแมทซ์ซึ่งและมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมน้อย แต่อย่างไรก็ตามมันจะให้แถบความถี่ที่แคบขึ้นเมื่อมีฐานรองที่หนาขึ้น



รูปที่ 2.6 การป้อนแบบสายโคแอกเซียลโพรบ

### 2.6.2 การป้อนแบบประกบ

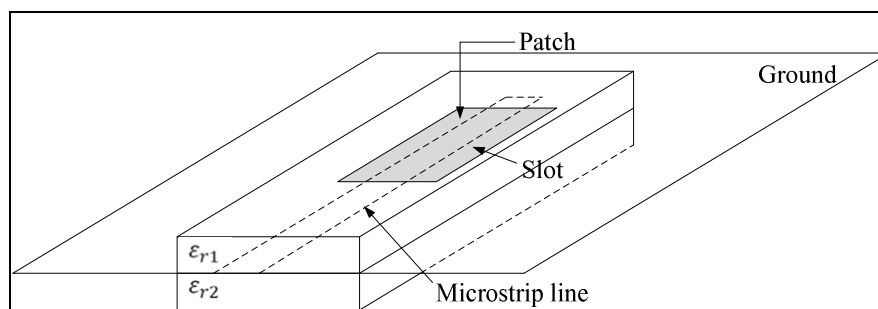
การป้อนแบบประกบ ดังรูปที่ 2.7 การป้อนแบบนี้จะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด (มากกว่า 13%) รูปแบบจำลองบางอย่างไม่ซับซ้อนและมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมต่ำ แต่การสร้างจะมีความยุ่งยาก การควบคุม การทำแมทซ์ซึ่ง ทำได้โดยการควบคุมความยาวของสตัปและอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแพทช์



รูปที่ 2.7 การป้อนแบบประกบ

### 2.6.3 การป้อนแบบช่องเปิด

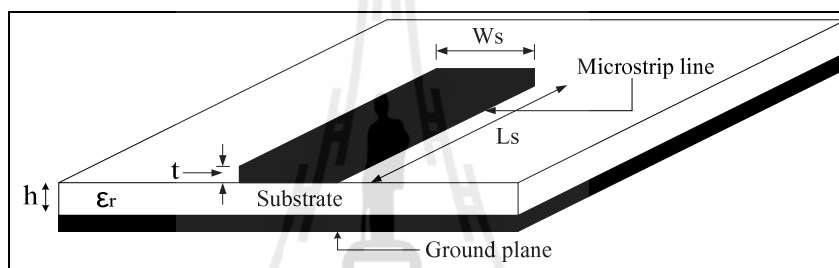
การป้อนแบบอื่นมีคุณลักษณะที่ไม่สมมาตรจึงก่อให้เกิดโหมดที่สูงขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้การป้อนที่ไม่สัมผัสกับแพทช์ นั่นคือการใช้การป้อนแบบช่องเปิดดังรูปที่ 2.8 การป้อนแบบนี้จะสร้างขาคีที่สุดและมีแบนด์วิดท์แคบ แต่ไม่ยากในการจำลองแบบ การป้อนนี้ประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้นที่คั่นกลางด้วยแผ่นตัวนำกราวด์ ที่ผิวด้านล่างของแผ่นวัสดุฐานรองอันล่างจะเป็นสายส่งไมโครสตริปที่ใช้สำหรับส่งผ่านพลังงานไปยังแพทช์ผ่านช่องเปิดบนระนาบกราวด์ ลักษณะนี้จะทำให้การปรับแต่งเป็นไปอย่างอิสระต่อกันทั้งสายส่งและแพทช์ โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองอันล่างจะกำหนดให้มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกฐานรองที่สูง ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองของแพทช์จะต่ำกว่าและมีความหนาที่มากกว่า การที่มีระนาบกราวด์คั่นตรงกลางทำให้ผลของการรบกวนที่เกิดจากการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมมีน้อยลงอีกทั้งยังไม่รบกวนต่อโพลาริเซชันด้วย



รูปที่ 2.8 การป้อนแบบช่องเปิด

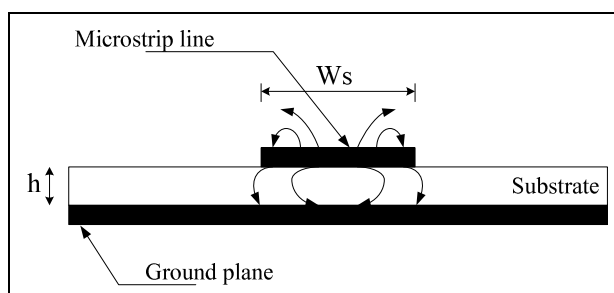
## 2.6.4 สายไมโครสตริป

สายป้อนแบบไมโครสตริปหรือที่เรียกว่าไมโครสตริปไลน์ ได้รับความนิยมนเพราะมีข้อดีคือง่ายต่อการเชื่อมต่อและมีขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งโดยทั่วไปสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นวางอยู่บนวัสดุรองฐาน ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกและด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ที่มีสายอากาศช่องเปิดวางอยู่บนระนาบกราวด์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งออกจากสายไมโครสตริปผ่านวัสดุรองฐานที่อยู่ระหว่างกลางไปสู่ระนาบกราวด์ ค่าความต้านทานคุณสมบัติ (characteristic impedance) จะขึ้นอยู่กับความกว้างของสายไมโครสตริปและความหนาของวัสดุฐานรอง โดยคุณสมบัติของฐานรองจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัวเช่น ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ค่าการสูญเสียที่ผิวสัมผัส การนำความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 2.9 การป้อนแบบสายไมโครสตริป

ในการออกแบบสายส่งสัญญาณนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ( $W_s$ ) ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ( $L_s$ ) ความสูงของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น ( $t$ ) และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ ) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้ฐานรองที่หนาขึ้น ทำให้คลื่นที่ผิวและการแพร่กระจายคลื่นจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติการออกแบบจะมีแถบความถี่ที่จำกัด (ปกติที่ 2 - 5 %)



รูปที่ 2.10 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์



สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.9 ไม่ได้บรรจุอยู่ในชั้นฐานรองรับ แต่การแผ่กระจายจะแผ่ออกไปข้างนอกของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นการแผ่กระจายในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะไม่ใช้โหมด TEM แต่จะเป็น Quasi-TEM ความเร็วเฟส (phase velocity) และค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (propagation constant) ของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.18)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (2.19)$$

โดยที่  $c$  คือ ความเร็วแสงในอากาศมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$\epsilon_e$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

และ  $k_0$  สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (2.20)$$

โดยที่  $k_0$  คือ ค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นในอากาศ

$f$  คือ ความถี่

สมการหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.21 และหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance:  $Z_0$ ) ได้จากสมการที่ 2.22

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W_s}} \right) \quad (2.21)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\epsilon_e} \ln \left( \frac{8h}{W_s} + \frac{W_s}{4h} \right) & ; \frac{W_s}{h} < 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_e} \left( \frac{W_s}{h} + 1.393 \right) + 0.667 \ln \left( \frac{W_s}{h} + 1.444 \right)} & ; \frac{W_s}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (2.22)$$

โดยที่  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

$W_s$  คือ ความกว้างของส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

$h$  คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง

จากนั้นจะมาคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.23

$$\frac{W_s}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & ; \frac{W_s}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & ; \frac{W_s}{h} \geq 2 \end{cases} \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.24)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.25)$$

ซึ่งจะใช้ค่า A ก็ต่อเมื่อนำค่า A ที่หาได้จากสมการที่ 2.24 ไปแทนในเงื่อนไขแรกของสมการที่ 2.23 แล้ว  $\frac{W_s}{h} < 2$  จะสามารถใช้ค่า A ได้เลยแต่ถ้าในกรณีที่  $\frac{W_s}{h} \geq 2$  ต้องหาค่า B ดังสมการที่ 2.25 และสามารถคำนวณหาความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้ดังนี้

$$L_s = \frac{90^\circ \left( \frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\sqrt{\epsilon_e} k_0} \quad (2.26)$$

โดยที่  $\epsilon_e$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพ

$k_0$  คือ ค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นในอากาศ

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ยังมีการป้อนด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสายป้อนแบบไมโครสตริป แต่ระนาบกราวด์จะอยู่ด้านเดียวกับสายนำสัญญาณ

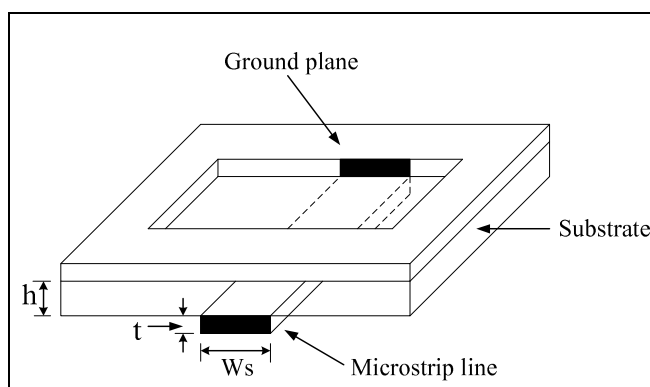
## 2.7 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด

### 2.7.1 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด

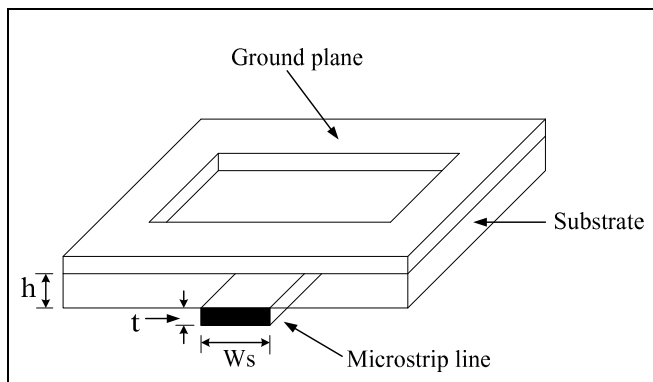
การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบช่องเปิดแคบๆ โดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศตั้งฉากกับแนวของช่องเปิดที่ตรงช่องเปิดจะมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงมากเกิดขึ้น ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกไปยังบริเวณที่อยู่อีกด้านหนึ่ง ในกรณีที่ช่องเปิดแคบมากๆ กระแสไฟฟ้าสมมูลคือ  $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}^i$  จะมีขนาดจำกัด และเมื่อคิดว่าความกว้างของช่องเปิดซึ่งอ้างอิงจากรูปคือ  $S$  เข้าหาศูนย์ กระแสไฟฟ้าสมมูลส่วนนี้จะตัดทิ้งได้เพราะมีขนาดเล็ก แต่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูลคือ  $\vec{M} = \vec{E}^i \times \vec{n}$  นั้นไม่สามารถตัดทิ้งได้เพราะเมื่อ  $S$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สนามแม่เหล็กที่ช่องเปิดจะเข้าหาอนันต์ จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

### 2.7.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปประกอบไปด้วย สายไมโครสตริป และสายอากาศแบบช่องเปิด ที่อยู่บนแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ซึ่งจะอยู่บนระนาบตรงกันข้าม สำหรับลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณมีหลักการรูปแบบพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบ คือ การต่อแบบปิดวงจร (microstrip terminated short circuit) ซึ่งการต่อแบบปิดวงจรนี้ไม่นิยมนำมาออกแบบเนื่องจากมีรูปแบบที่ยากในการนำไปสร้างในแผ่นวงจรพิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.11 (ก) และการต่อแบบเปิดวงจร (microstrip terminated open circuit) แสดงดังรูปที่ 2.11 (ข) ซึ่งความยาวที่เหมาะสมของสายไมโครสตริป ในกรณีนี้มีความยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น



(ก) กรณีต่อแบบปิดวงจร



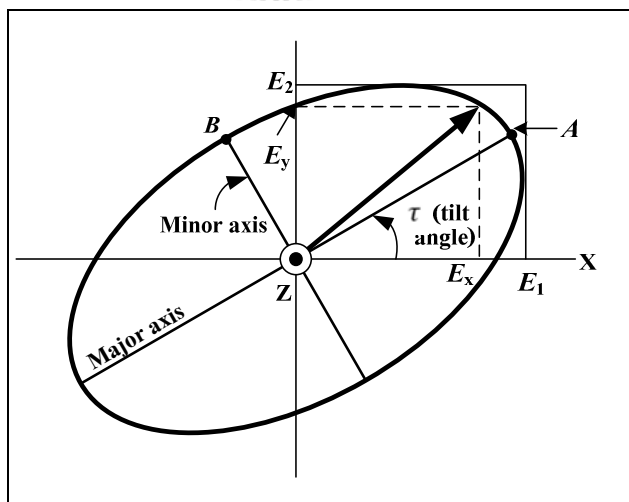
(จ) กรณีต่อแบบเปิดวงจร

รูปที่ 2.11 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายแบบไมโครสตริป

## 2.8 โพลาริเซชัน

ก่อนที่จะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชัน (polarization) ของสายอากาศจะกล่าวถึงความหมายของโพลาริเซชันของคลื่นเสียก่อน

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไปดังภาพที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการโพลาริเซชันของคลื่น

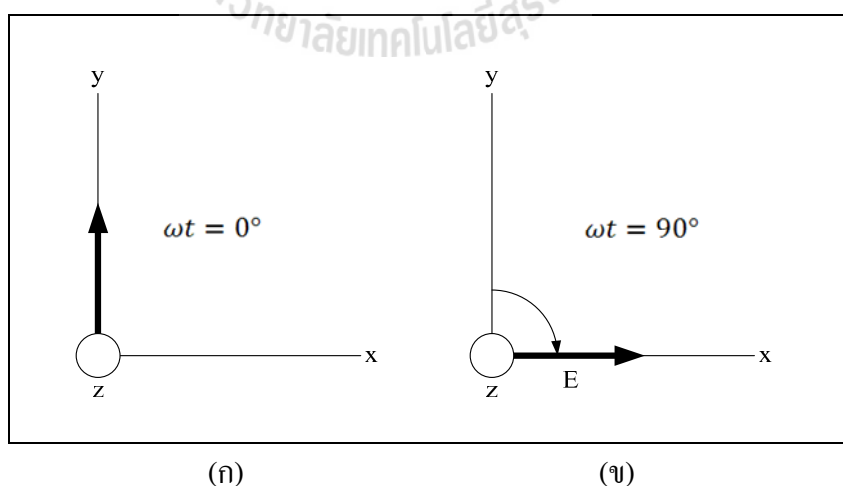
สำหรับโพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทิศทางใด จะเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดของโพลาไรเซชัน แบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (linearly polarization)
2. โพลาไรเซชันแบบวงกลม (circularly polarization)
3. โพลาไรเซชันแบบวงรี (elliptically polarization)

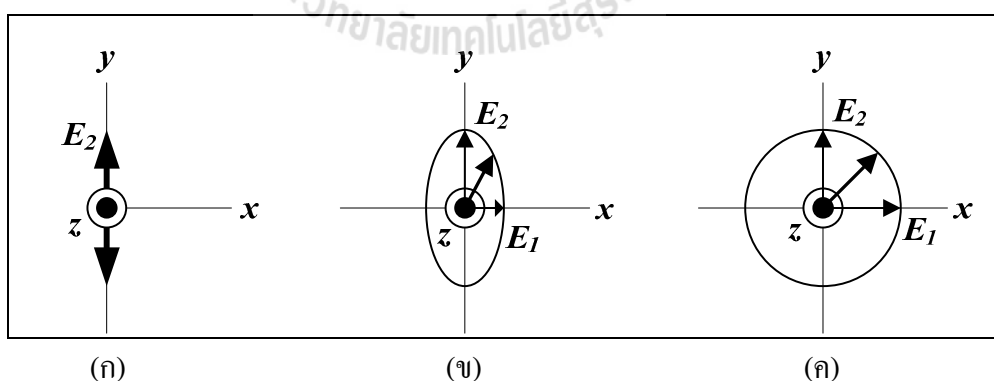
ขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) และ 2.13 (ข) ถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดในอวกาศว่างเป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่า เป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นหรือลิเนียร์โพลาไรเซชัน แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนเป็นรูปวงรีจะเรียกสนามแบบนี้ว่าเป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนเป็นรูปวงกลมจะเรียกสนามแบบนี้ว่าเป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลม ทั้งโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นและโพลาไรเซชันแบบวงกลมต่างก็เป็นกรณีพิเศษของโพลาไรเซชันแบบวงรี

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่าเป็นโพลาไรเซชันมือขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะเป็นโพลาไรเซชันมือซ้าย)



รูปที่ 2.13 ลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า

โพลาริเซชันของสายอากาศจะอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในสนามระยะไกลจริงๆ แล้วก็ใช้ในการอธิบายทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุด สายอากาศส่วนใหญ่จะมีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น นั่นคือในหนึ่งรอบการขั้วของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ในอากาศว่างสายอากาศดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น โพลาริเซชันแนวตั้ง (vertical polarization) และโพลาริเซชันแนวนอน (horizontal polarization) บ่อยครั้งที่โพลาริเซชันของสายอากาศจะอ้างอิงจากรูปทรงของตัวมันเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะประกอบด้วยองค์ประกอบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัววางขนานกัน (เช่นสายอากาศไดโพลและยาگی) เราสามารถสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นให้ขนานไปกับองค์ประกอบของตัวสายอากาศ ซึ่งสายอากาศบางชนิดมีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของมันมาทำนายโพลาริเซชันได้ ได้แก่ สายอากาศปากแตร (horn) สายอากาศแบบบ่วง (loop) และสายอากาศแบบร่อง (slot) เป็นต้น เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีโพลาริเซชันแบบเดียวกันกับสัญญาณที่ส่งมาและเมื่อเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางโพลาริเซชันไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นโพลาริเซชันแนวตั้ง แต่สายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณมีโพลาริเซชันแนวนอน) เราจะเรียกว่า การแยกการโพลาริเซชันไขว้ (cross-polarization isolation) โดยทั่วไปหากสายอากาศอยู่ในโพลาริเซชันแบบใดแบบหนึ่งจะมีสัญญาณที่อยู่ในรูปโพลาริเซชันอีกชนิดหนึ่งออกมาด้วย แต่มีกำลังต่ำกว่าสัญญาณแบบแรกประมาณ 30 ถึง 40 dB



รูปที่ 2.14 โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น แบบวงรี และแบบวงกลม

จากรูปที่ 2.14 (ก) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางอยู่ในแกน  $y$  เพียงอย่างเดียว เราเรียกคลื่นอย่างนี้ว่าโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (ในทิศทางของ  $y$ ) ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะแสดงได้จาก

$$E_y = E_2 \sin(\omega t - \beta z) \quad (2.27)$$

โดยทั่วไป สนามไฟฟ้าจะเดินทางในทิศทางแกน  $z$  และอาจมีส่วนประกอบอยู่ในทั้งแกน  $y$  และ  $x$  ในรูปที่ 2.14 (ข) ก็เป็นอีกหนึ่งตัวอย่างที่เกิดจากการที่ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน  $y$  และ  $x$  มีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\delta$  ซึ่งเราเรียกคลื่นอย่างนี้ว่าเป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี

เมื่อให้ค่า  $z$  คงที่แล้วทำการหมุนเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  $E$  ในฟังก์ชันของเวลา ก็จะได้รูปซึ่งมีลักษณะวงรีซึ่งเกิดจากเวกเตอร์นี้ เราจึงเรียกว่า โพลาไรเซชันวงรี อัตราส่วนระหว่างแกนหลัก (major) และแกนรอง (minor) ของโพลาไรเซชันวงรีนั้น เราจะเรียกว่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio: AR) ดังนั้นในรูปที่ 2.14 (ก) ซึ่งเป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นจะได้ค่า  $E_1 = 0$  และ  $AR = \infty$  และ ในรูปที่ 2.14 (ข) ค่า  $AR = E_2/E_1$  และในรูปที่ 2.14 (ค) จะแสดงให้เห็นโพลาไรเซชันแบบวงกลม ซึ่งสำหรับโพลาไรเซชันแบบนี้เกิดจากค่าของ  $E_1 = E_2$  และมีค่า  $AR = 1$  ในกรณีส่วนใหญ่ของโพลาไรเซชันแบบวงรี คลื่นโพลาไรเซชันแบบวงรีอาจจะแสดงได้ในเทอมของส่วนประกอบที่เป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นสองตัว ซึ่งอยู่ในแกน  $x$  เทอมหนึ่งและแกน  $y$  อีกเทอมหนึ่ง ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางแกน  $z$  (พุ่งออกจากหน้ากระดาษ) ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าจะเกิดในทิศทาง  $x$  และ  $y$

$$E_x = E_1 \sin(\omega t - \beta z) \quad (2.28)$$

$$E_y = E_2 \sin(\omega t - \beta z + \delta) \quad (2.29)$$

เมื่อ	$E_x$	คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน $x$
	$E_y$	คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน $y$
	$E_1$	คือ ขนาดของคลื่นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นในทิศทาง $x$
	$E_2$	คือ ขนาดของคลื่นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นในทิศทาง $y$
	$\delta$	คือ มุมของเฟสที่ $E_y$ นำหน้า $E_x$

รวมสมการที่ (2.24) และ (2.25) เข้าด้วยกันเป็นสมการชั่วขณะของเวกเตอร์สนาม  $E$  ดังแสดงในสมการที่ (2.26)

$$E = \hat{x} E_1 \sin(\omega t - \beta z) + \hat{y} E_2 \sin(\omega t - \beta z + \delta) \quad (2.30)$$

ที่  $Z=0$   $E_x = E_1 \sin(\omega t - \beta z)$  และ  $E_y = E_2 \sin(\omega t + \delta)$  ซึ่งแยกเวกเตอร์  $E_y$  ได้เป็น

$$E_y = E_2 (\sin \omega t \cos \delta + \cos \omega t \sin \delta) \quad (2.31)$$

จากสมการของ  $E_x$  เราจะได้ค่า  $\sin \omega t = E_x/E_1$  ที่ และ  $\cos \omega t = \sqrt{1 - (E_x/E_1)^2}$  ในสมการที่ 2.27 เมื่อทำการตัดค่าของ  $\omega t$  ออกเราจะได้ว่า

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} - \frac{2E_x E_y \cos \delta}{E_1 E_2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = \sin^2 \delta \quad (2.32)$$

หรือ

$$aE_x^2 - bE_x E_y + cE_y^2 = 1 \quad (2.33)$$

เมื่อ

$$a = \frac{1}{E_1^2 \sin^2 \delta} \quad b = \frac{2 \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} \quad c = \frac{1}{E_2^2 \sin^2 \delta}$$

สมการที่ (2.29) อธิบายรูปวงรีในรูปที่ 2.12 เส้นตรง  $OA$  เป็นครึ่งหนึ่งของแกนหลัก (major) และเส้น  $OB$  เป็นครึ่งหนึ่งของแกนรอง (minor) มุมเอียง (tilt angle) ของวงรีคือ  $\tau$  ซึ่งค่าของ อัตราส่วนแกน (Axial Ratio: AR) คือ

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.34)$$



ถ้าค่าของ  $E_1 = 0$  คลื่นก็จะเป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นในทิศทางของ  $y$  และถ้า  $E_2 = 0$  คลื่นก็จะเป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นในทิศทางของ  $x$  ถ้า  $\delta = 0$  และ  $E_1 = E_2$  คลื่นนี้ก็จะ เป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นเหมือนกันแต่จะทำมุม  $45^\circ$  กับแกน  $x$  ( $\tau = 45^\circ$ )

ถ้า  $E_1 = E_2$  และ  $\delta = \pm 90^\circ$  คลื่นนี้ก็จะ เป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลม ซึ่งเมื่อ  $\delta = +90^\circ$  คลื่นนี้ก็จะ เป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนซ้าย (Left Hand Circularly Polarization: LHCP) และเมื่อ  $\delta = -90^\circ$  คลื่นนี้ก็จะ เป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวา (Right Hand Circularly Polarization: RHCP) สำหรับกรณี  $\delta = +90^\circ$  และค่า  $z = 0$  และ  $t = 0$  จากสมการที่ (2.28) และ (2.29) จะได้  $E = \hat{y}E_2$  แสดงในรูปที่ 2.13 (ก) ส่วนที่  $\omega t = 90^\circ$  และ  $E = \hat{x}E_1$  แสดงในรูปที่ 2.13 (ข)

เทคนิคการทำให้เกิดโพลาไรเซชันแบบวงกลมบนโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป มี 2 แบบ แบบแรกเป็นการป้อนแบบแหล่งจ่ายคู่ (dual feed) เป็นการป้อนให้กับตัวสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้ตัวป้อนสองตัวขึ้นไปกำหนดให้แหล่งจ่ายหรือตัวป้อนตั้งสองตั้งฉาก และแหล่งจ่ายทั้งสองมีขนาดแรงดันเท่ากันแต่เฟสต่างกัน  $90$  องศา เพื่อกำหนดโพลาไรเซชันให้เป็นแบบแอลเอชซีพี (Left Hand Circularly Polarization: LHCP) หรือ อาร์เอชซีพี (Right Hand Circularly Polarization: RHCP) ซึ่งต้องออกแบบแหล่งจ่ายผ่านตัวแบ่งกำลังไฟฟ้า (power divider) ก่อนจ่ายให้กับสายอากาศ แบบที่สองคือการป้อนเดี่ยว (single feed) สามารถแทนการป้อนแบบคู่ด้วยการป้อนแหล่งจ่ายเดี่ยวได้ โดยการป้อนในแนวเส้นทแยงมุมของแพทช์

## 2.9 กล่าวสรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาในบทนี้จะเห็นว่า สายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นมีความซับซ้อนในการสร้างลาคลิ้นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นยังต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัวอีกด้วย ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นจึงเป็นสายอากาศที่ได้รับความสนใจ และจากปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า การจะนำเอาระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นมาใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นสายอากาศที่ใช้ต้องมีขนาดเล็ก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถนำเอาสายอากาศแบบแถวลำดับมาใช้ได้ และสายอากาศที่นิยมนำมาใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นคือสายอากาศไมโครสตริป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะออกแบบและสร้างสายอากาศที่มีขนาดเล็กเพื่อทำให้ระบบมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ต่ำกว่าด้วย โดยสายอากาศที่สร้างจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปได้ 4 ทิศทาง เพื่อนำไปใช้กับระบบสวิตช์ลาคลิ้นที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 ซึ่งจะออกแบบสายอากาศโดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่มีการป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริป



### บทที่ 3

## การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่น ที่ใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3

### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 โดยจะออกแบบในช่วงความถี่ 1.92 - 2.17 GHz (ระบบยูเอ็มทีเอส) ซึ่งสายอากาศที่ออกแบบนั้นเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่มีการป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริป (microstrip line) และสายอากาศที่ออกแบบแล้วจะถูกนำไปจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงาน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

### 3.2 การออกแบบสายอากาศ

จากที่กล่าวในบทที่ 2 สายอากาศแ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและการหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแ่งแบบปรับลำคลื่น ดังนั้นจึงนิยมนำระบบแบบสวิตช์ลำคลื่นมาใช้งาน ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่พบว่าสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือขนาดของสายอากาศ โดยทั่วไปในระบบสายอากาศแ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจะใช้สายอากาศแบบแถวลำดับ จึงทำให้ไม่สามารถนำเอาระบบสวิตช์ลำคลื่นมาใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ เพราะฉะนั้นสายอากาศที่ใช้ควรจะต้องมีขนาดเล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะออกแบบและสร้างสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่น โดยจะออกแบบสายอากาศให้มีขนาดเล็กแต่สามารถก่อรูปลำคลื่นไปได้ 4 ทิศทาง เพราะทำให้ระบบจะมีขนาดเล็กกว่าการใช้สายอากาศแบบแถวลำดับ อีกทั้งสายอากาศที่ออกแบบมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ

#### 3.2.1 แผ่นวงจรพิมพ์

วัสดุสำคัญในการสร้างสายอากาศคือแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งเป็นแผ่นที่มีทองแดงอยู่ด้านบนและด้านล่าง ชั้นกลางด้วยวัสดุที่เป็น ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาและมีค่าความนำไฟฟ้าที่ต่างกันขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งเราสามารถออกแบบลายวงจรเพื่อนำไปใช้เป็นสายอากาศ

ที่มีทิศทางของลำคลื่นได้ 4 ทิศทางได้ ในงานวิจัยชิ้นนี้เราเลือกใช้งานแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed-Circuit Board: PCB) ชนิดอีพอกซี FR4 (Epoxy FR4) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร โดยป้อนสัญญาณผ่านหัวต่อแบบ เอสเอ็มเอ

### 3.2.2 การคำนวณหาขนาดของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดเพื่อใช้งานในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 โดยใช้วัสดุรองฐานแบบอีพอกซี FR4 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำคุณสมบัติของวัสดุฐานรองแบบอีพอกซี FR4 มาแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิด FR4

ชนิดวัสดุฐานรอง	$\epsilon_r$	$h$ (mm)	$\sigma$ (s/m)	$t$ (mm)	$\tan\delta$
FR4	4.8	1.6	$5.8 \times 10^{-7}$	0.035	0.02

โดยที่  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

$h$  คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง

$\sigma$  คือ ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง)

$t$  คือ ค่าความหนาของวัสดุตัวนำ

$\tan\delta$  คือ ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (loss tangent)

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการส่งผ่านสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ที่ถูกต่อแบบเปิดวงจร (open-circuit) โดยมีส่วนที่สำคัญคือต้องออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปให้มีอิมพีแดนซ์แมตช์กับอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกเซียล 50 โอห์ม ( $Z_0$ ) สำหรับความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ( $W_s$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการในบทที่ 2 ซึ่งได้นำมาแสดงอีกครั้งดังสมการที่ 3.1

$$\frac{W_s}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & ; \frac{W_s}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & ; \frac{W_s}{h} \geq 2 \end{cases} \quad (3.1)$$

ซึ่งสามารถหา A ได้จาก

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.2)$$

โดยนำค่า  $\epsilon_r$  ดังตารางที่ 3.1 มาแทนลงในสมการที่ 3.2 ซึ่งความถี่ที่ใช้งานใช้งาน ( $f$ ) คือ 2.1 GHz และออกแบบที่  $Z_0 = 50$  โอห์ม จะได้

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.8 + 1}{2}} + \frac{4.8 - 1}{4.8 + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{4.8} \right) \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$A = 1.58 \quad (3.4)$$

นำสมการที่ 3.4 แทนลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$\frac{W_s}{h} = \frac{8e^{1.58}}{e^{2(1.58)} - 2} \quad (3.5)$$

จะได้

$$\frac{W_s}{h} = 1.8 \quad (3.6)$$

ซึ่งตรงกับเงื่อนไขที่ 1 ในสมการที่ 3.1 คือ  $\frac{W}{h} < 2$  จึงสามารถใช้ค่า A ที่หามาได้เลย ดังนั้นเมื่อแทนค่าความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) ความกว้างของสายไมโครสตริปสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{W_s}{1.67 \times 10^{-3}} = 1.8 \quad (3.7)$$

$$W_s = 3 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นจะได้ความกว้างของสายไมโครสตริปคือ 3 มิลลิเมตร จากนั้นหาความยาวของสายไมโครสตริปจาก

$$L_s = \frac{90^\circ \left( \frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\sqrt{\epsilon_e k_0}} \quad (3.8)$$

โดยที่  $\epsilon_e$  และ  $k_0$  หาได้จาก

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W_s}} \right) \quad (3.9)$$

$$\epsilon_e = \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(1.6 \times 10^{-3})}{1.8(1.6 \times 10^{-3})}}} \right) \quad (3.10)$$

จะได้  $\epsilon_e = 3.58$  (3.11)

และ

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (3.12)$$

$$k_0 = \frac{2\pi(2.1 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \quad (3.13)$$

จะได้  $k_0 = 4398$  นำ  $\epsilon_e$  และ  $k_0$  แทนลงในสมการที่ 3.8 จะได้

$$L_s = \frac{90^\circ \left( \frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\sqrt{3.58(43.98)}} \quad (3.14)$$

จะได้  $L_s = 18.8$  มิลลิเมตร

ดังนั้นจะได้ความยาวของสายไมโครสตริปคือ 18.8 มิลลิเมตร

### 3.2.3 การคำนวณหาขนาดของสายอากาศไมโครสตริป

สามารถคำนวณความกว้างและความยาวของสายอากาศไมโครสตริปจากสมการในบทที่ 2 ซึ่งได้นำมาแสดงอีกครั้งดังนี้

$$W = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.15)$$

โดยที่  $W$  คือ ความกว้างของสายอากาศ

$c$  คือ ความเร็วแสงในอากาศมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$f$  คือ ความถี่ที่ใช้งาน

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองมีค่า 4.8

จะได้

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2(2.1 \times 10^9) \sqrt{\frac{4.8 + 1}{2}}} \quad (3.16)$$

$W = 41.9$  มิลลิเมตร

และความยาวของสายอากาศไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.17

$$L = \frac{1}{2f \sqrt{\epsilon_e} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.17)$$

เนื่องจาก

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (3.18)$$

ดังนั้นนำสมการที่ 3.18 แทนค่าในสมการที่ 3.17 จะได้

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (3.19)$$

โดยที่  $L$  คือ ความยาวของสายอากาศ

$W_s$  คือ ความกว้างของสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

$h$  คือ ความสูงของวัสดุรองรับ

$f$  คือ ความถี่ที่ใช้งาน

$\epsilon_e$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

$\mu_0$  คือ ค่าความซึมได้ของอวกาศว่าง

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอวกาศว่าง

จาก

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.18)$$

และนำสมการที่ 3.7 และสมการที่ 3.11 มาแทนในสมการที่ 3.18 จะได้

$$\Delta L = 0.412 \times 1.67 \times 10^{-3} \frac{(3.58 + 0.3) \left( \frac{0.0419 \times 10^{-3}}{1.67 \times 10^{-3}} + 0.264 \right)}{(3.58 - 0.258) \left( \frac{0.0419 \times 10^{-3}}{1.67 \times 10^{-3}} + 0.8 \right)} \quad (3.19)$$

$$\Delta L = 0.27 \text{ มิลลิเมตร} \quad (3.20)$$

และนำสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.20 แทนลงในสมการที่ 3.17 และแทนค่า  $\mu_0 = 8.84 \times 10^{-12}$  F/m และ  $\epsilon_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m จะได้

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2(2.1 \times 10^9)(3.58)} - 2(0.27 \times 10^{-3}) \quad (3.21)$$

จะได้

$$L = 36.4 \text{ มิลลิเมตร}$$



ดังนั้นจะได้ความกว้างและความยาวของสายอากาศเป็น 41.9 มิลลิเมตรและ 36.4 มิลลิเมตรตามลำดับ

ในหัวข้อถัดไปจะเป็นแนวคิดการออกแบบสายอากาศโดยจะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบเพื่อให้ได้สายอากาศที่ต้องการ โดยจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของทั้ง 3 พอร์ตที่ป้อนสัญญาณ

### 3.3 แนวคิดการออกแบบสายอากาศ

งานวิจัยฉบับนี้มีแนวคิดที่จะออกแบบสายอากาศที่มีทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ เพื่อลดปัญหาการเกิดสัญญาณแทรกสอด โดยได้ออกแบบสายอากาศที่สามารถกำหนดทิศทางของลำคลื่นได้ 4 ทิศทาง เพื่อจะนำไปใช้สำหรับระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นต่อไปจะเป็นการอธิบายการออกแบบสายอากาศ

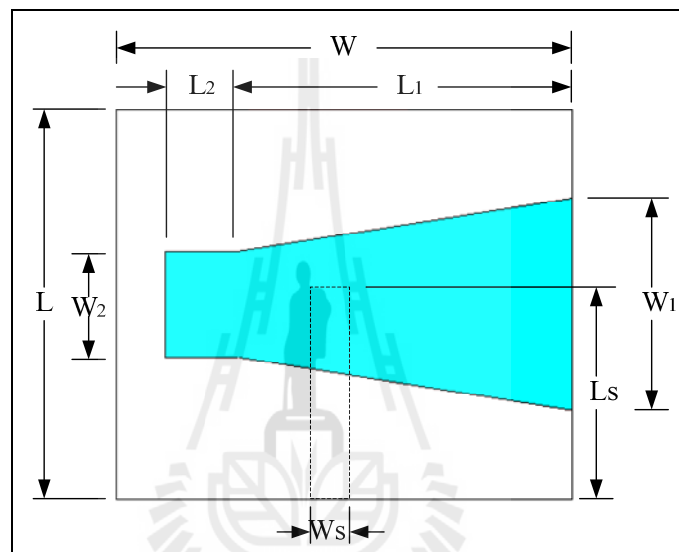
จากที่ได้คำนวณความกว้างและความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปและสายอากาศไมโครสตริปในหัวข้อที่ 3.2.2 และหัวข้อ 3.2.3 และจากงานวิจัยของ Jun, L., Donglin, S., Yazhou, W. (2009) พบว่าสายอากาศแบบช่องเปิดด้านข้างมีการก่อรูปลำคลื่นไปทางด้านข้างของตัวสายอากาศ โดยในงานวิจัยนี้มีค่าความกว้างของช่องเปิดด้านนอกเท่ากับ 7 มิลลิเมตร และความยาวของช่องเปิดด้านนอกมีค่า 35 มิลลิเมตร และความกว้างของช่องเปิดด้านในเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากสายอากาศในงานวิจัยนี้ออกแบบที่ความถี่สูง จึงไม่สามารถนำมาใช้กับความถี่ที่ใช้สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงนำมาออกแบบใหม่ โดยออกแบบที่ความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) โดยจะได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ

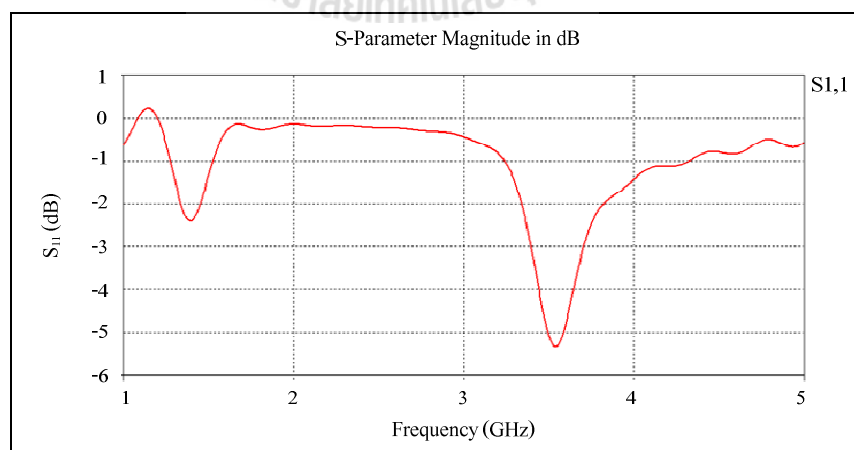
พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$W$ : ความกว้างของสายอากาศ	41.9
$L$ : ความยาวของสายอากาศ	36.4
$W_s$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	3
$L_s$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	18.8
$W_1$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านนอก	7
$L_1$ : ความยาวของช่องเปิดด้านนอก	35

$W_2$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านใน	0.6
$L_2$ : ความยาวของช่องเปิดด้านใน	5

ซึ่งค่าในตารางที่ 3.2 จะเป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบสายอากาศและได้แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศในรูปที่ 3.1 และเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางจำลองแบบใน โปรแกรม จะได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

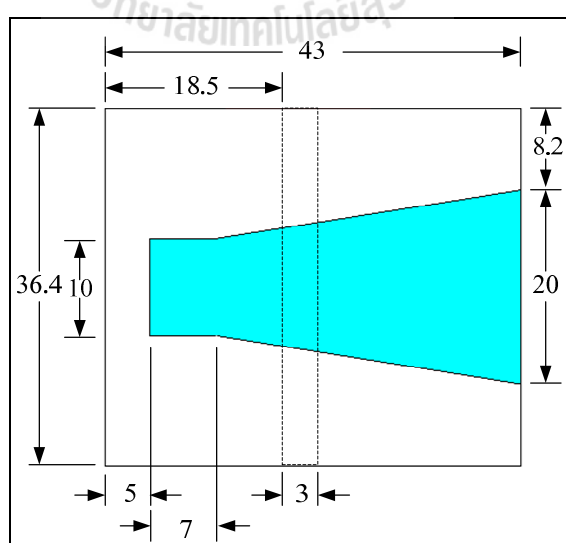


รูปที่ 3.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ (จำลองแบบ)

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับยังไม่มีช่วงที่ต่ำกว่า  $-10$  dB ดังนั้นจึงได้ปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้สายอากาศแบบที่ 1 สามารถทำงานที่ความถี่ที่ต้องการได้ โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับค่าที่เหมาะสม ได้แก่ ความกว้างของสายอากาศ ( $W$ ) ความยาวของสายอากาศ ( $L$ ) ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป ( $W_s$ ) ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป ( $L_s$ ) ความกว้างของช่องเปิดด้านนอก ( $W_1$ ) ความยาวของช่องเปิดด้านนอก ( $L_1$ ) ความกว้างของช่องเปิดด้านใน ( $W_2$ ) ความยาวของช่องเปิดด้านใน ( $L_2$ ) ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และจะได้ขนาดของสายอากาศแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.3

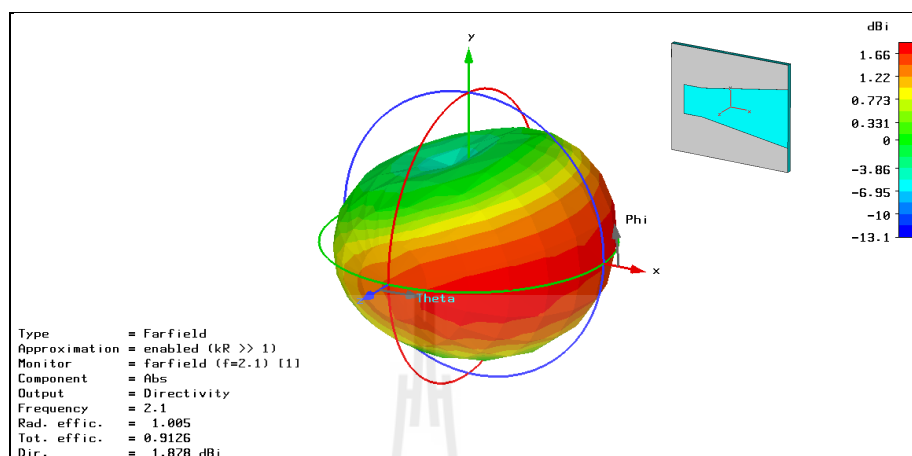
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 1

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$W$ : ความกว้างของสายอากาศ	43
$L$ : ความยาวของสายอากาศ	36.4
$W_s$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	3
$L_s$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	36.4
$W_1$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านนอก	20
$L_1$ : ความยาวของช่องเปิดด้านนอก	31
$W_2$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านใน	10
$L_2$ : ความยาวของช่องเปิดด้านใน	7

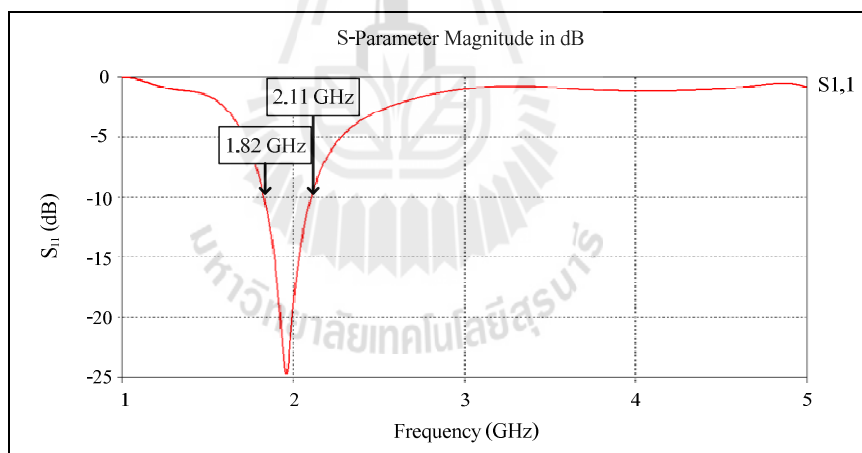


รูปที่ 3.3 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 1 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ดังนั้นจะได้แบบรูปการแผ่พลังงานและค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 1 (จำลองแบบ)

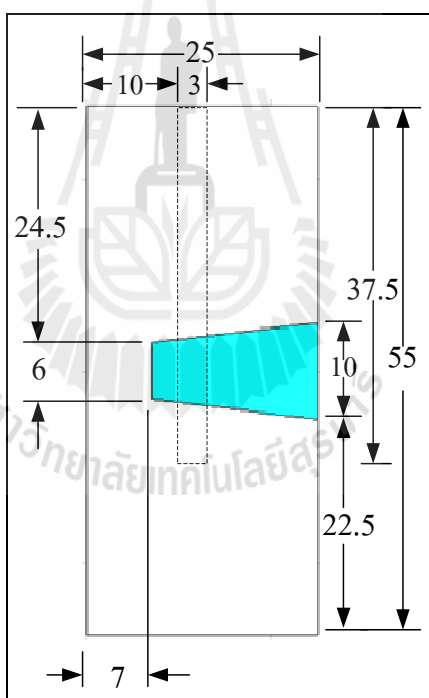


รูปที่ 3.5 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 (จำลองแบบ)

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นว่าสายอากาศที่ออกแบบมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปยังทิศทางที่ต้องการคือแผ่พลังงานออกไปตามทิศทางของช่องเปิด และมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 1.82 - 2.11 GHz แต่สายอากาศที่ออกแบบยังมีขนาดใหญ่ จึงต้องลดขนาดของสายอากาศ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ 3.4 ทำให้ได้สายอากาศแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็กลงประมาณครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบที่ 1

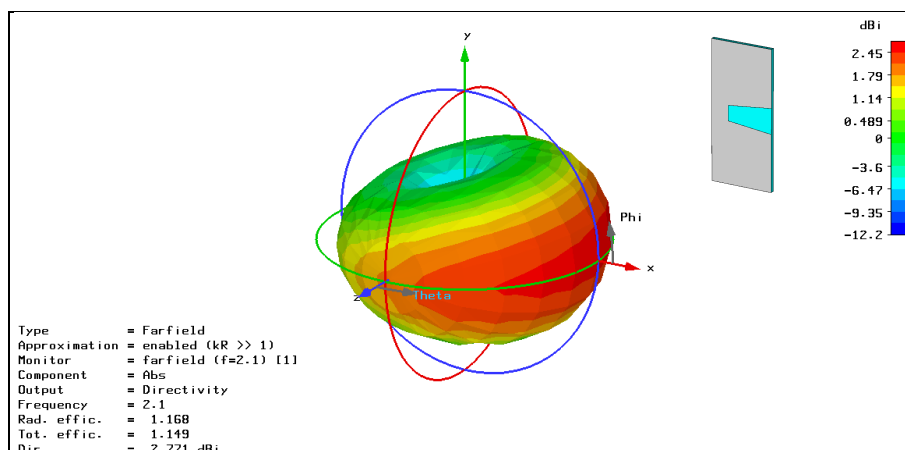
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 2

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$W$ : ความกว้างของสายอากาศ	25
$L$ : ความยาวของสายอากาศ	55
$W_s$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	3
$L_s$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	37.5
$W_1$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านนอก	10
$L_1$ : ความยาวของช่องเปิดด้านนอก	18
$W_2$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านใน	6
$L_2$ : ความยาวของช่องเปิดด้านใน	0

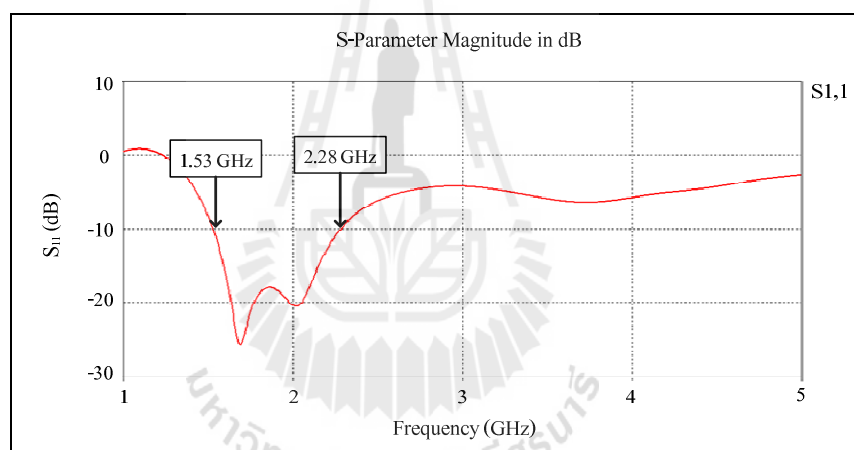


รูปที่ 3.6 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 2 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

จากรูปที่ 3.6 สายอากาศแบบที่ 2 มีแบบรูปการแผ่พลังงานไปตามทิศทางของช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) ดังแสดงในรูปที่ 3.8

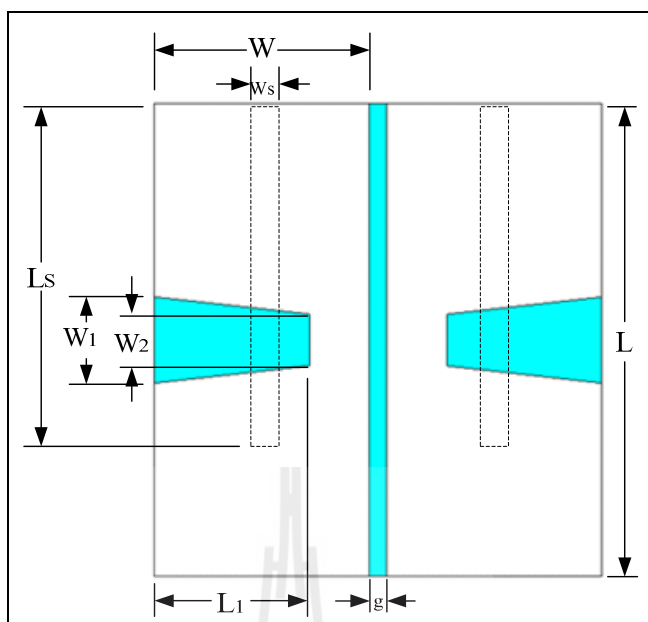


รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 2 (จำลองแบบ)



รูปที่ 3.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 (จำลองแบบ)

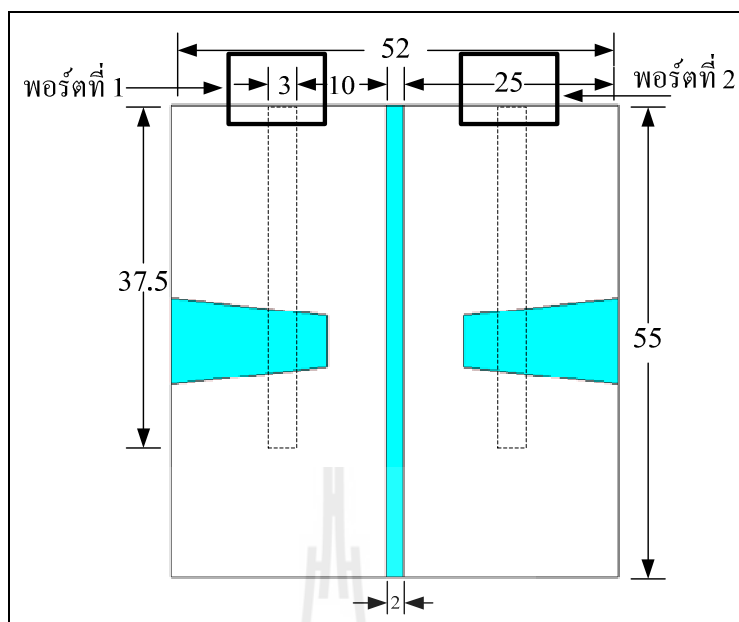
จากรูปที่ 3.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 1.53 - 2.28 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) แต่เนื่องจากต้องการออกแบบให้สายอากาศมีการก่อรูปลำคลื่นไปทางด้านซ้ายและด้านขวาดังนั้น จึงได้นำเอาสายอากาศแบบที่ 2 มา 2 ต้น โดยต้นแรกวางในลักษณะเดิมส่วนต้นที่ 2 พลิกกลับด้านขวาเป็นซ้าย โดยที่ไม่ได้เปลี่ยนขนาดใดๆ แล้วนำมาวางข้างกันเพื่อให้มีการก่อรูปลำคลื่นได้ 2 ทิศทาง ซึ่งได้แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศในรูปที่ 3.9 และมีค่าของพารามิเตอร์ที่สนใจ จะแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งจะแสดงขนาดสายอากาศแบบที่ 3 จะแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 3 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

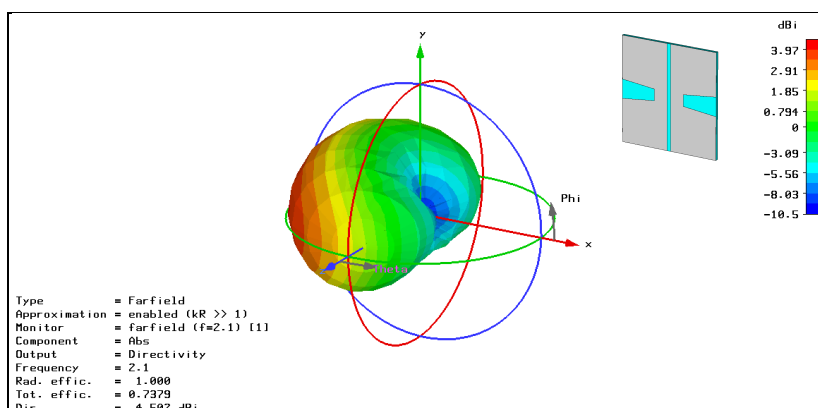
ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 3

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$W$ : ความกว้างของสายอากาศ	25
$L$ : ความยาวของสายอากาศ	55
$W_s$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	3
$L_s$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	37.5
$W_1$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านนอก	10
$L_1$ : ความยาวของช่องเปิดด้านนอก	18
$W_2$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านใน	6
$L_2$ : ความยาวของช่องเปิดด้านใน	0
$g$ : ช่องว่างระหว่างสายอากาศ	2



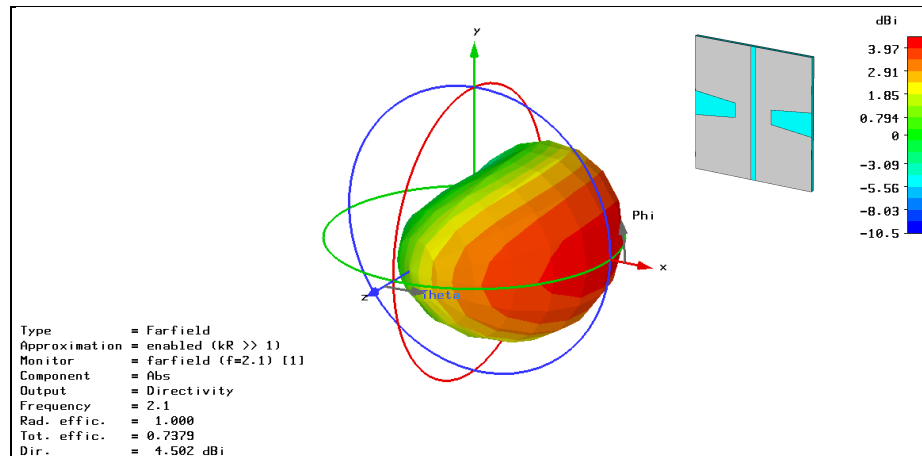
รูปที่ 3.10 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 3 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

หลังจากที่ได้สายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 พบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปยัง 2 ทิศทางดังแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 แต่เมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 โดยป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 และ 2 พบว่ามีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 1.6 - 1.79 GHz ซึ่งยังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

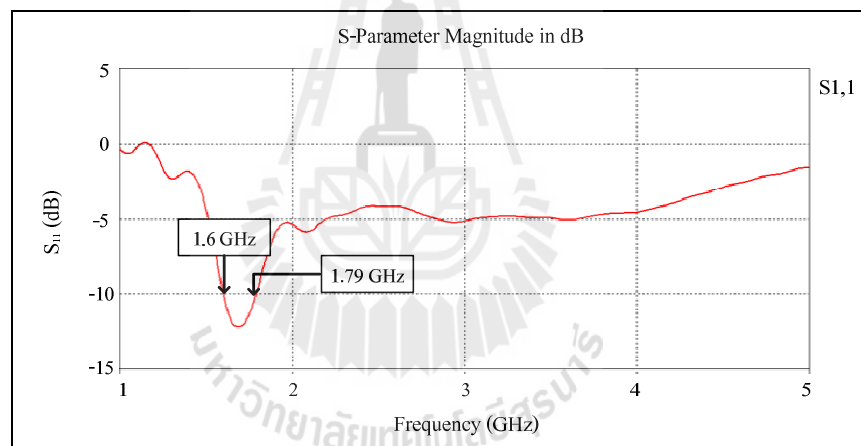


รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)

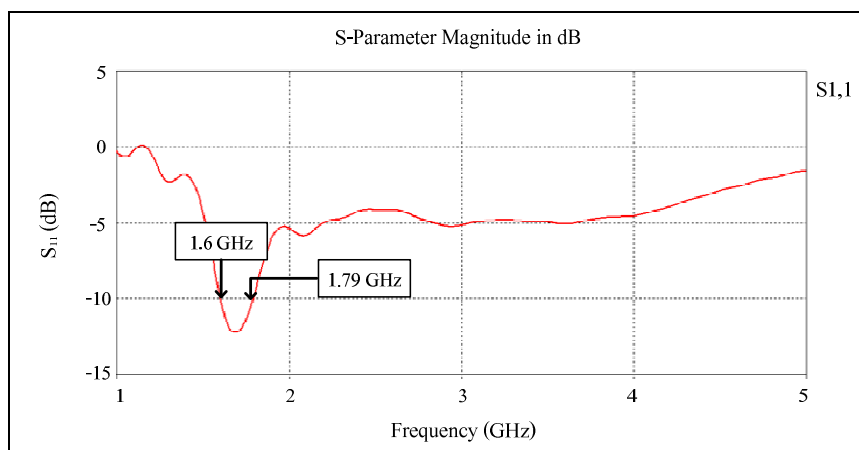




รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)

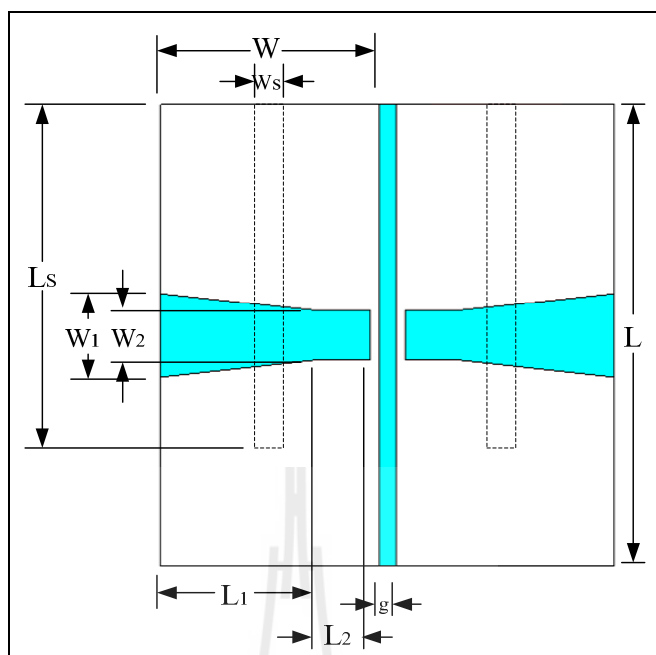


รูปที่ 3.13 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)



รูปที่ 3.14 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)

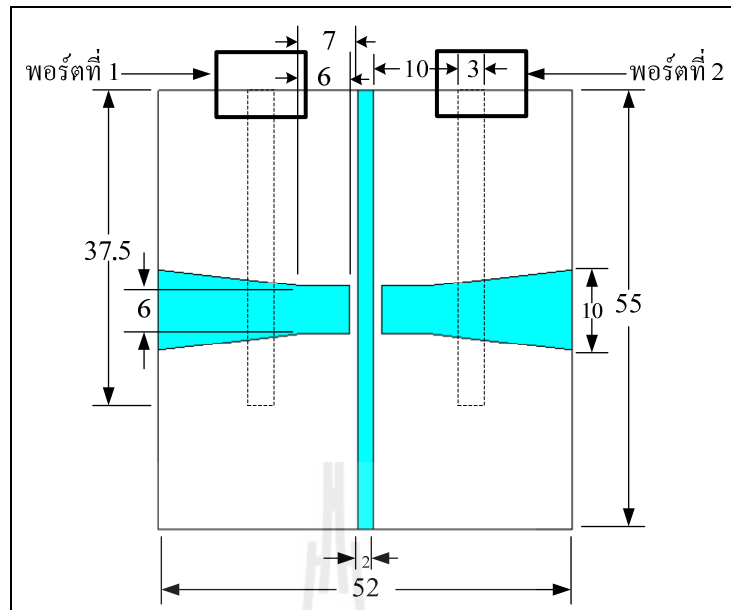
เนื่องจากสายอากาศแบบที่ 3 ยังมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับสูงกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14 สายอากาศแบบที่ 3 นั้นเกิดจากการนำสายอากาศแบบที่ 2 มาวางข้างกัน ซึ่งสายอากาศแบบที่ 2 นั้น มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับอยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานแล้ว แต่เมื่อนำสายอากาศมาวางข้างกันจึงทำให้มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ซึ่งมีผลมาจากการเชื่อมต่อร่วม (mutual coupling) ระหว่างสายอากาศแต่ละต้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของสายอากาศแบบที่ 3 เพื่อให้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) จึงได้ปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 3 เป็นสายอากาศแบบที่ 4 ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และค่าของพารามิเตอร์จะแสดงในตารางที่ 3.6 โดยจะเพิ่มค่าความยาวของช่องเปิดด้านใน ( $L_2$ ) และขนาดของสายอากาศแบบที่ 4 จะแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 4 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

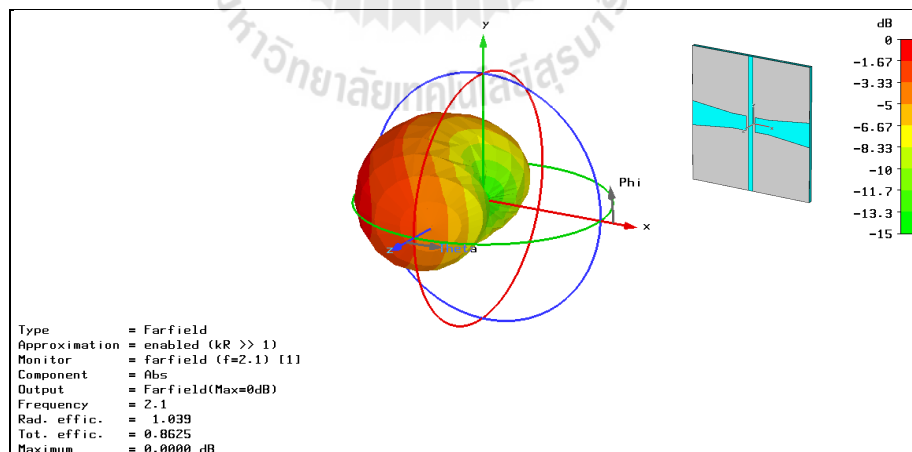
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 4

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$W$ : ความกว้างของสายอากาศ	25
$L$ : ความยาวของสายอากาศ	55
$w_s$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	3
$L_s$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป	37.5
$W_1$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านนอก	10
$L_1$ : ความยาวของช่องเปิดด้านนอก	18
$W_2$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านใน	6
$L_2$ : ความยาวของช่องเปิดด้านใน	6
$g$ : ช่องว่างระหว่างสายอากาศ	2

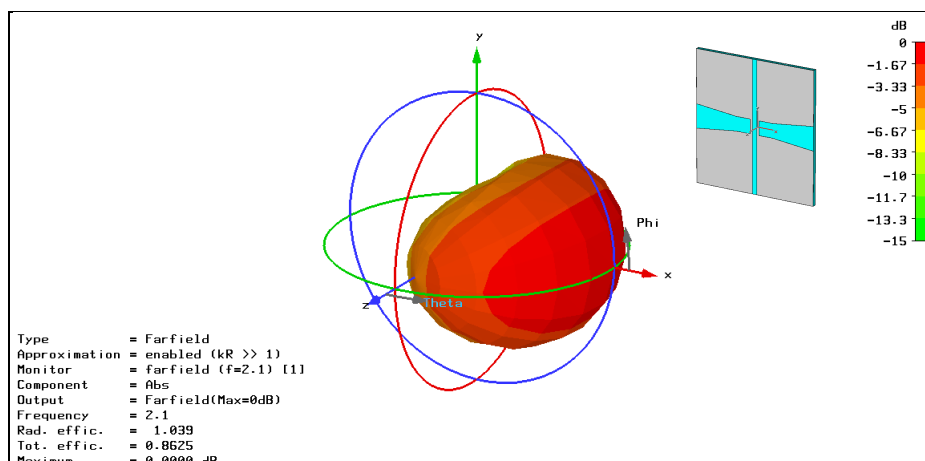


รูปที่ 3.16 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 4 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

เมื่อป้อนสัญญาณให้สายอากาศแบบที่ 4 ที่พอร์ตที่ 1 และ 2 ตามรูปที่ 3.16 จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 และ 3.18 ซึ่งจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปทางด้านขวาและด้านซ้ายของสายอากาศ

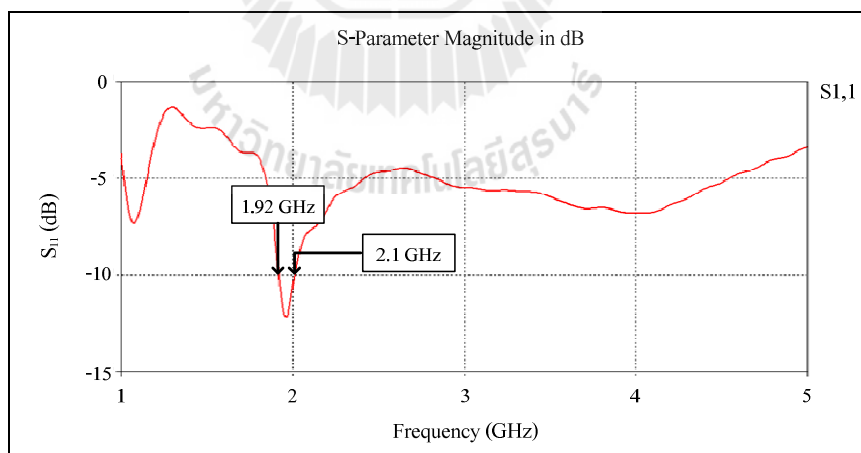


รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 4 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)

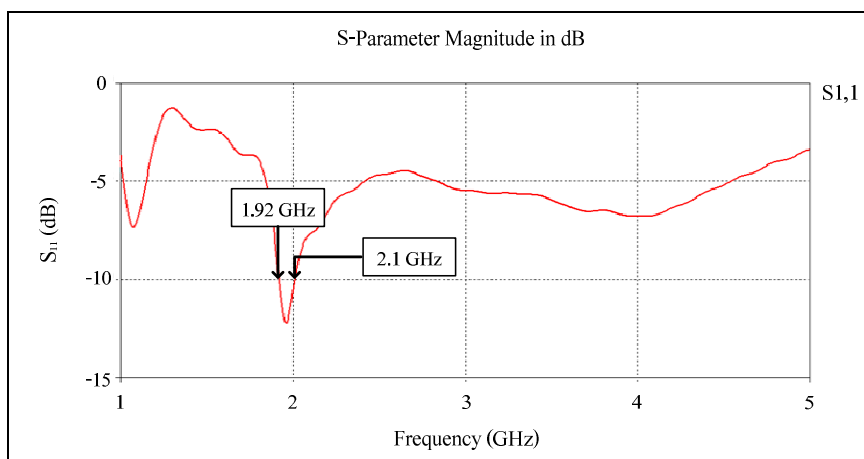


รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 4 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)

และเมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 4 พบว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 1.92 - 2.1 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และ 3.20 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



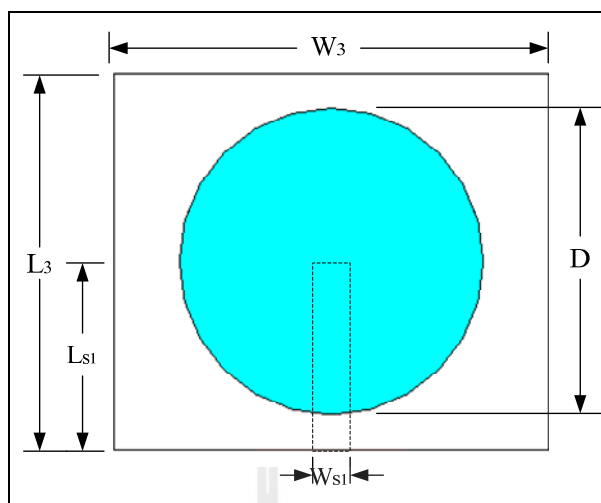
รูปที่ 3.19 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 4 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)



รูปที่ 3.20 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 4  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)

หลังจากที่ได้สายอากาศที่มีการแผ่พลังงานไปทางด้านขวาและด้านซ้ายของตัวสายอากาศ และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) มีค่าต่ำกว่า -10 dB แล้ว จากนั้นจะออกแบบสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานไปทางด้านหน้าและขณะเดียวกันก็มีการแผ่พลังงานไปทางด้านหลังของสายอากาศ ซึ่งจะออกแบบโดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปวงกลมที่มีการป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริป

จากที่ได้คำนวณความกว้างและความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปและสายอากาศไมโครสตริปในหัวข้อที่ 3.2.2 และหัวข้อ 3.2.3 และจากงานวิจัยของ Qu, S.W., Li, J.L., Chen, J.X., and Quan, X. (2007) จะมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับค่าที่เหมาะสม ได้แก่ ความกว้างของสายอากาศ ( $W$ ) ความยาวของสายอากาศ ( $L$ ) ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป ( $W_s$ ) ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริป ( $L_s$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด ( $D$ ) เมื่อปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 3.21 จะได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 5 ดังแสดงในตารางที่ 3.7

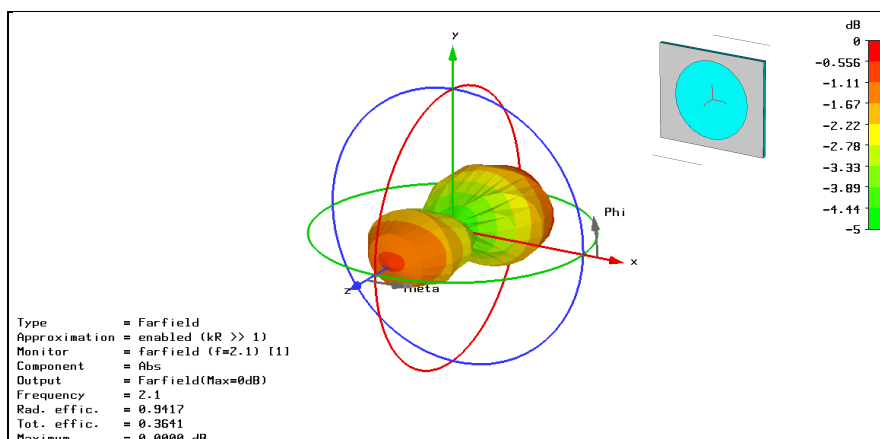


รูปที่ 3.21 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 5 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

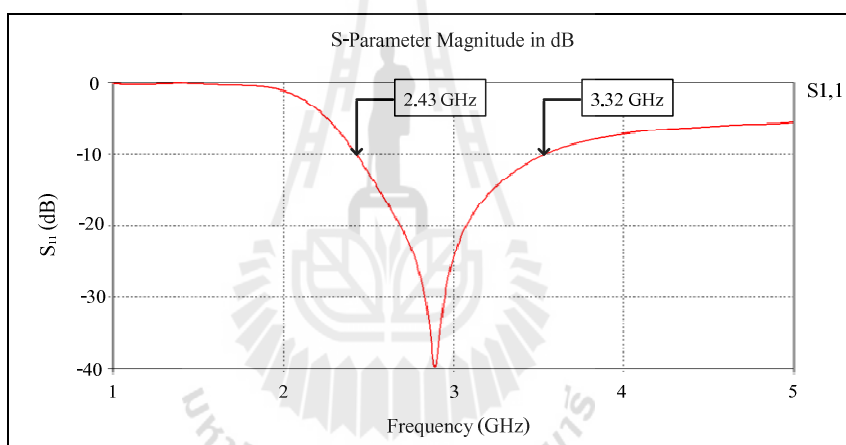
ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบที่ 5

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$W_3$ : ความกว้างของสายอากาศแบบที่ 5	43
$L_3$ : ความยาวของสายอากาศแบบที่ 5	36.7
$W_{s1}$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศแบบที่ 5	3
$L_{s1}$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศแบบที่ 5	18.35
$D$ : เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด	15

จากสายอากาศแบบที่ 5 จะได้แบบรูปการแผ่พลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.22 โดยจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปทางด้านหน้าขณะเดียวกันก็แผ่พลังงานไปทางด้านหลังของตัวสายอากาศ แต่ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.42 - 3.66 GHz ซึ่งยังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 5 (จำลองแบบ)

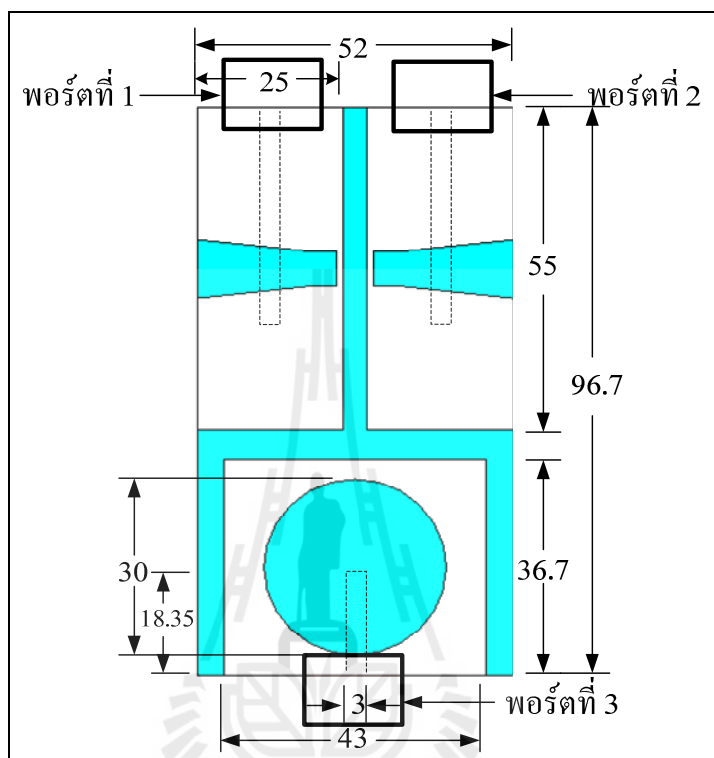


รูปที่ 3.23 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 5 (จำลองแบบ)

เนื่องจากค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 3.23 นั้นยังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) จึงทำให้ต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบของสายอากาศโดยรวมอีกครั้ง และเนื่องจากผู้วิจัยต้องการจะนำสายอากาศที่ออกแบบมารวมอยู่ในแผงวงจรพิมพ์แผ่นเดียวกัน จึงได้นำสายอากาศแบบที่ 4 และสายอากาศแบบที่ 5 ดังที่กล่าวไปแล้วมารวมกันก่อนที่จะปรับสายอากาศแบบที่ 5 โดยนำสายอากาศแบบที่ 4 วางไว้ด้านบนและนำสายอากาศแบบที่ 5 วางด้านล่าง ให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้ง 2 ด้าน มีค่า 2 มิลลิเมตร และไม่ได้เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

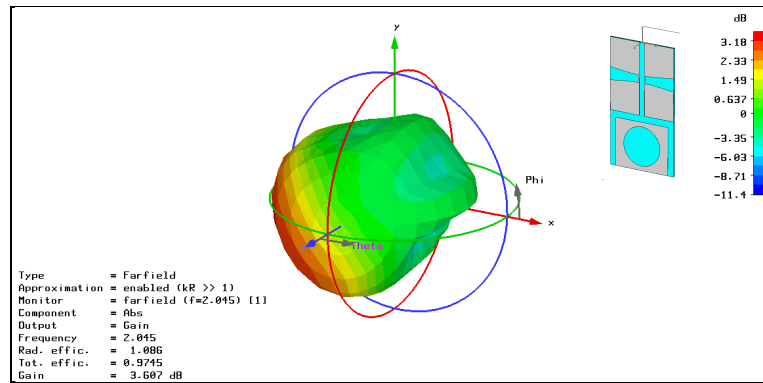


ใดๆ ของสายอากาศ ทำให้ได้สายอากาศแบบที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 3.24 แล้วจึงปรับเปลี่ยนรูปแบบของสายอากาศอีกครั้ง

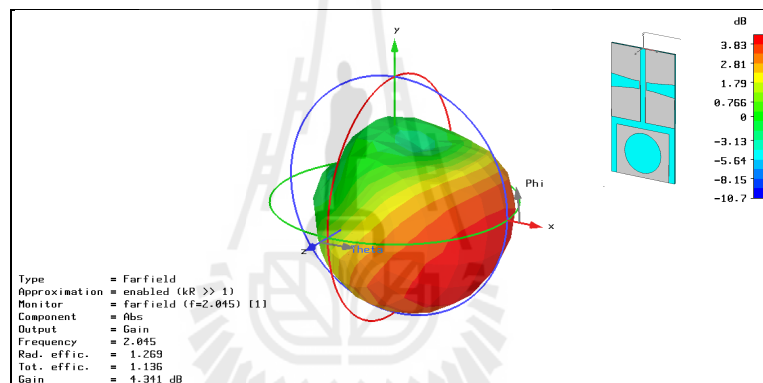


รูปที่ 3.24 ขนาดของสายอากาศแบบที่ 6 (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

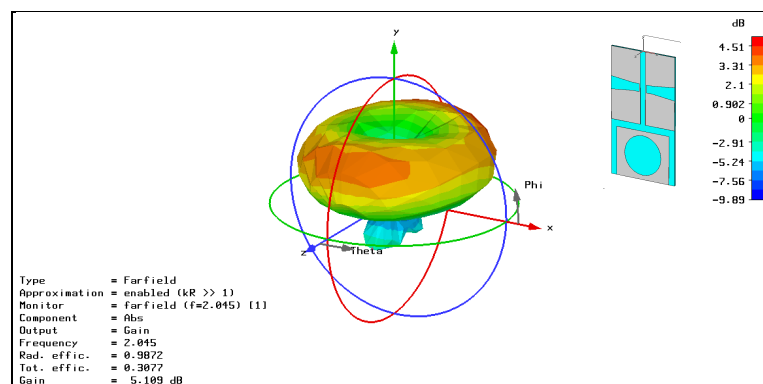
จากสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 ที่ 2 และที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.24 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ถึง 3.27 ตามลำดับ ซึ่งในรูปที่ 3.25 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปทางด้านขวาของสายอากาศ และรูปที่ 3.26 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปทางด้านซ้ายของสายอากาศ และรูปที่ 3.27 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปทางด้านหน้าของสายอากาศขณะเดียวกันก็มีการแผ่พลังงานไปทางด้านหลังของสายอากาศด้วย



รูปที่ 3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)

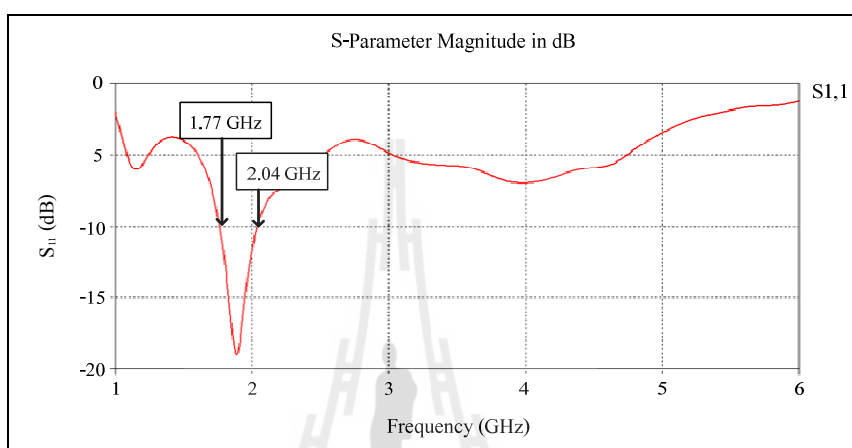


รูปที่ 3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)

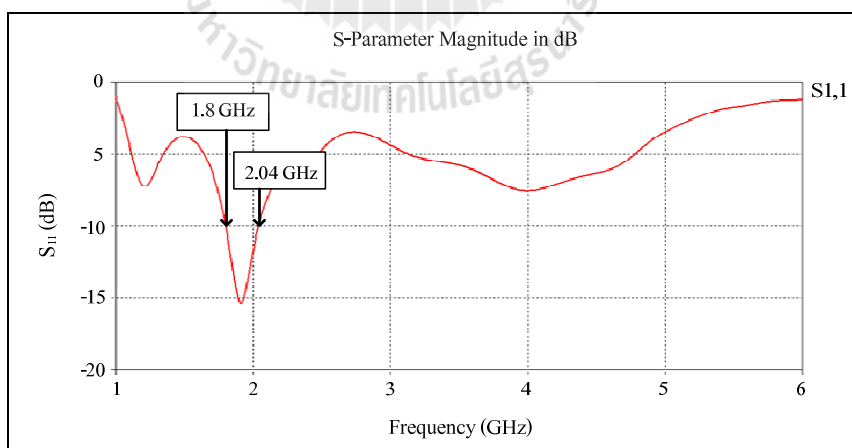


รูปที่ 3.27 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ)

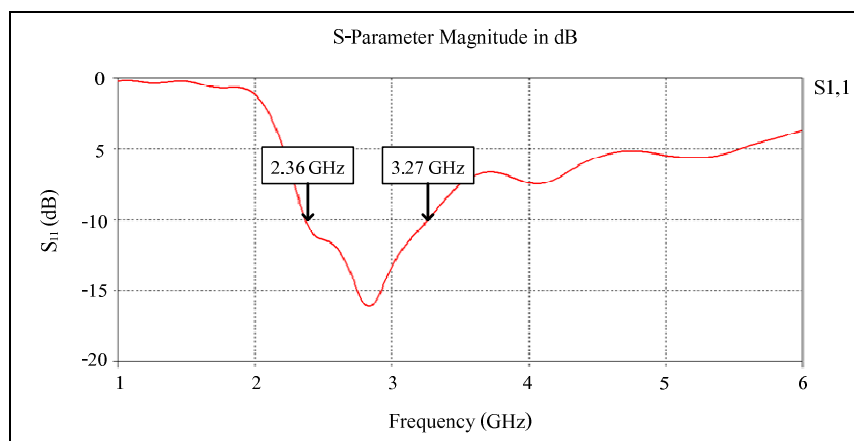
และจากรูปที่ 3.24 เมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 6 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 1.77 - 2.04 GHz และ 1.8 - 2.04 GHz และ 2.36 - 3.27 GHz เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 ที่ 2 และที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.28 ถึง 3.30 ตามลำดับ ซึ่งยังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz)



รูปที่ 3.28 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)

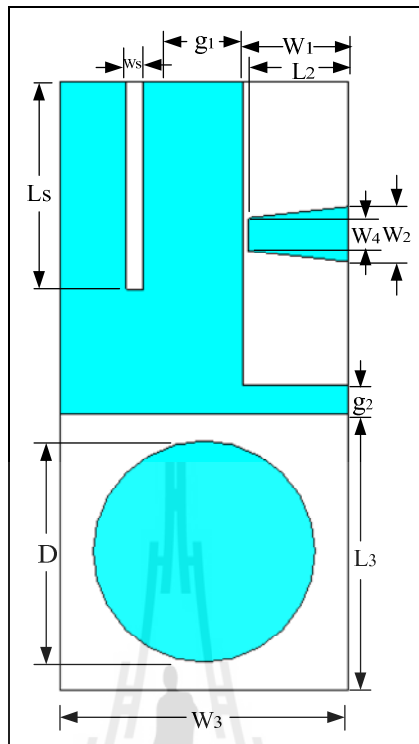


รูปที่ 3.29 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 6 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)

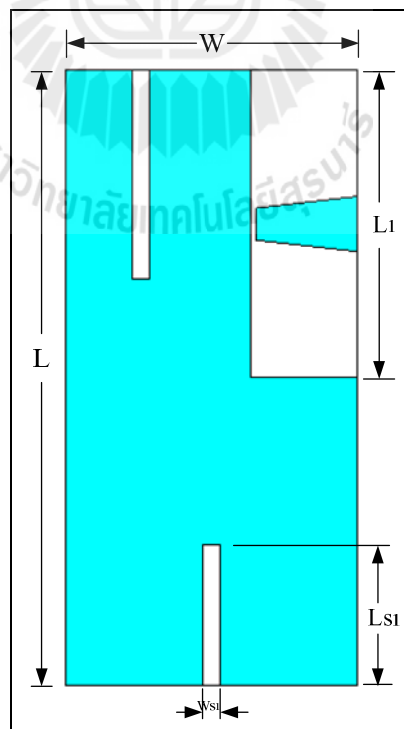


รูปที่ 3.30 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 6  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ)

จากรูปที่ 3.28 ถึง 3.30 สายอากาศแบบที่ 6 ยังมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) ดังนั้นจึงต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบของสายอากาศแบบที่ 6 โดยสายอากาศแบบที่ 7 นั้น จะนำสายอากาศแบบที่ 6 มาปรับขนาดและรูปแบบของสายอากาศ โดยสายอากาศที่ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 จะสลับเอาด้านสายไมโครสตริปมาเป็นด้านหน้าของสายอากาศ และสายอากาศที่มีการป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 จะเพิ่มขนาดของแผ่นทองแดงทั้งด้านกว้างและยาว โดยปรับพารามิเตอร์ตามที่แสดงในรูปที่ 3.31 และ 3.32 และค่าของพารามิเตอร์จะแสดงในตารางที่ 3.8 ทำให้ได้สายอากาศแบบที่ 7 ดังแสดงขนาดในรูปที่ 3.33 และ 3.34 ซึ่งเป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ล่าคลื่นที่จะนำไปจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานและค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของทั้ง 3 พอร์ตที่ป้อนสัญญาณดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.4



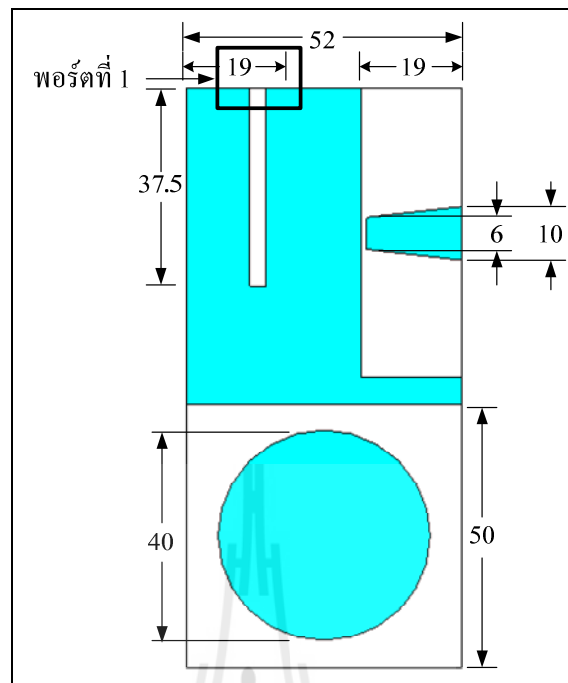
รูปที่ 3.31 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่น (ด้านหน้า)



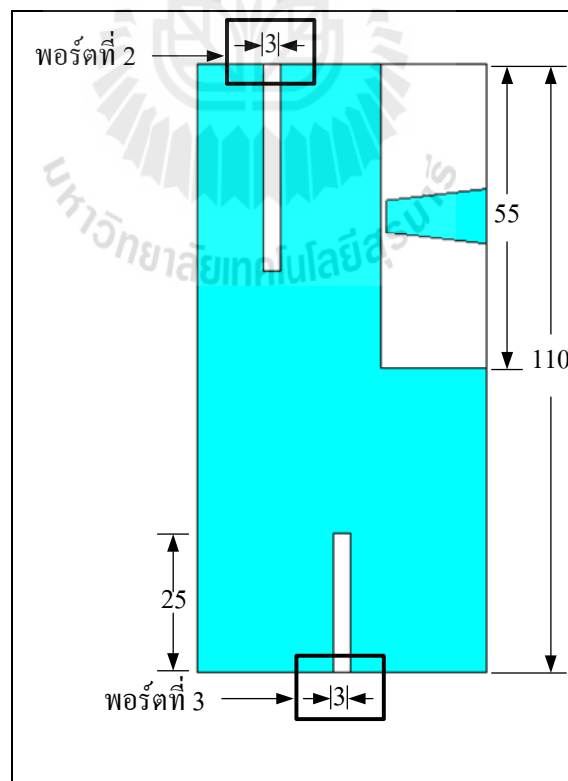
รูปที่ 3.32 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่น (ด้านหลัง)

ตารางที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$W$ : ความกว้างของสายอากาศรวมทั้งหมด	52
$L$ : ความยาวของสายอากาศรวมทั้งหมด	110
$W_s$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศด้านบน	3
$L_s$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศด้านบน	37.5
$W_{s1}$ : ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศด้านล่าง	3
$L_{s1}$ : ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศด้านล่าง	25
$W_1$ : ความกว้างของสายอากาศด้านบน	19
$L_1$ : ความยาวของสายอากาศด้านบน	55
$W_2$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านบนนอก	10
$L_2$ : ความยาวของช่องเปิดด้านบนนอก	18
$W_3$ : ความกว้างของสายอากาศด้านล่าง	52
$L_3$ : ความยาวของสายอากาศด้านล่าง	50
$W_4$ : ความกว้างของช่องเปิดด้านใน	6
$D$ : เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด	40
$g_1$ : ช่องว่างระหว่างสายอากาศด้านบน	14
$g_2$ : ช่องว่างระหว่างสายอากาศด้านบนกับด้านล่าง	5



รูปที่ 3.33 ขนาดของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลากลื่น (ด้านหน้า)



รูปที่ 3.34 ขนาดของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบสวิตช์ลากลื่น (ด้านหลัง)

รูปที่ 3.33 และ รูปที่ 3.34 จะแสดงขนาดรวมทั้งหมดของสายอากาศต้นแบบสำหรับระบบ สวิตช์ลำคลื่นที่ออกแบบทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ ซึ่งมีขนาดกว้าง 52 มิลลิเมตร และยาว 110 มิลลิเมตร พร้อมทั้งยังแสดงตำแหน่งของพอร์ตทั้ง 3 พอร์ตไว้ด้วย โดยทั้ง 3 พอร์ตนี้จะเป็น ตำแหน่งที่จะใช้ป้อนสัญญาณเมื่อจำลองผลด้วยโปรแกรมซึ่งจะแสดงให้หัวข้อที่ 3.4

จากนั้นจะได้วิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวของสายอากาศต้นแบบที่มีผลต่อ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยจะศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบคือ ความยาวของสายส่งสัญญาณ แบบสายไมโครสตริปของสายอากาศด้านบน ( $L_s$ ) ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโคร สตริปของสายอากาศด้านล่าง ( $L_{s1}$ ) ความกว้างของช่องเปิดด้านบน ( $W_2$ ) ความยาวของช่องเปิด ด้านนอก ( $L_2$ ) ความกว้างของช่องเปิดด้านใน ( $W_4$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด ( $D$ ) ช่องว่าง ระหว่างสายอากาศด้านบน ( $g_1$ ) ช่องว่างระหว่างสายอากาศด้านบนกับด้านล่าง ( $g_2$ )

ในการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์นั้น จะศึกษาโดยการลดค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวของ สายอากาศต้นแบบแล้วดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ว่ามีแนวโน้ม เป็นอย่างไร โดยจะดูว่าช่วงความถี่ที่ทำให้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้ต่ำกว่า -10 dB นั้น ช่วงความถี่ที่ได้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงจากเดิมอย่างไร

ต่อไปจะมาสังเกตผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัว พารามิเตอร์ตัวแรกที่สังเกตคือ ความ ยาวของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศด้านบน ( $L_s$ ) เมื่อค่าลดลงจะ ทำให้ช่วงความถี่ที่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีค่าขยับไปทางด้าน ความถี่ที่สูงขึ้นกว่าช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) พารามิเตอร์ตัวที่ 2 คือ ความยาว ของสายส่งสัญญาณแบบสายไมโครสตริปของสายอากาศด้านล่าง ( $L_{s1}$ ) เมื่อค่าลดลงจะทำให้ช่วง ความถี่ที่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีค่าขยับไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้น กว่าช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน พารามิเตอร์ตัวที่ 3 คือ ความกว้างของช่องเปิดด้านบน ( $W_2$ ) เมื่อค่า ลดลงจะทำให้ช่วงความถี่ที่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีความกว้าง แลบลดลง พารามิเตอร์ตัวที่ 4 คือ ความยาวของช่องเปิดด้านบน ( $L_2$ ) เมื่อค่าลดลงจะทำให้ไม่มี ช่วงความถี่ใดจะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB พารามิเตอร์ตัวที่ 5 คือ ความกว้างของช่องเปิดด้านใน ( $W_4$ ) เมื่อค่าลดลงจะทำให้ช่วงความถี่ที่มีค่าความสูญเสียเนื่อง จาก การย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีค่าขยับไปทางด้านความถี่ที่ต่ำกว่าช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน พารามิเตอร์ตัวที่ 6 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด ( $D$ ) เมื่อค่าลดลงจะทำให้ช่วงความถี่ที่มี ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีค่าขยับไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นกว่าช่วง ความถี่ที่ต้องการใช้งาน พารามิเตอร์ตัวที่ 7 คือ ช่องว่างระหว่างสายอากาศด้านบน ( $g_1$ ) เมื่อค่าลดลง



จะทำให้ช่วงความถี่ที่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีค่าขยับไปทางด้านความถี่ที่ต่ำกว่าช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน และพารามิเตอร์ตัวสุดท้ายที่สังเกตคือ ช่องว่างระหว่างสายอากาศด้านบนกับด้านล่าง ( $g_2$ ) เมื่อค่าลดลงจะทำให้ช่วงความถี่ที่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีความกว้างแถบลดลง

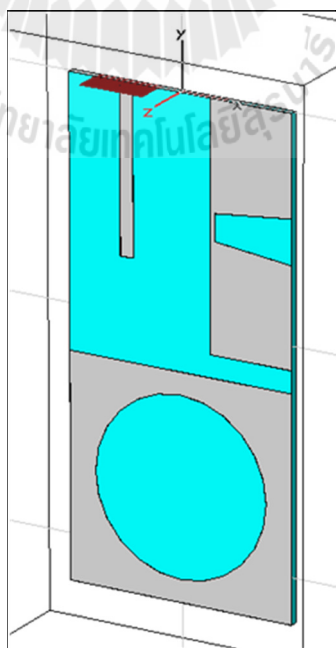
เมื่อได้ขนาดของสายอากาศต้นแบบเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงได้นำสายอากาศที่ออกแบบไปจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio 5 โดยจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานและค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อป้อนสัญญาณที่ทั้ง 3 พอร์ต ของสายอากาศที่ออกแบบ ซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 3.4

### 3.4 การจำลองแบบจากโปรแกรม CST Microwave Studio

สายอากาศถูกนำไปจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยจะป้อนสัญญาณในตำแหน่งที่ต่างกันเป็นกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 ดังนี้

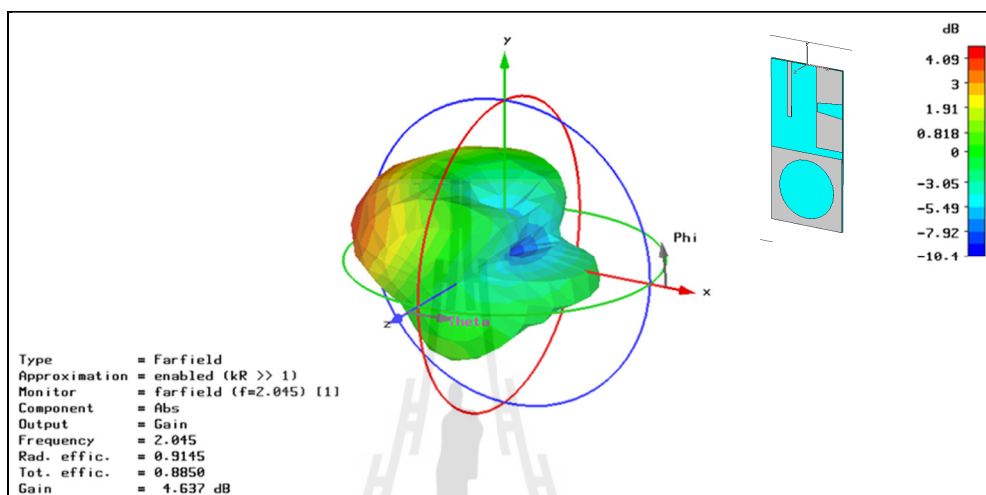
#### 3.4.1 กรณีที่ 1

กรณีที่ 1 ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.35 และพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 3.36 ถึง 3.38 และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.39

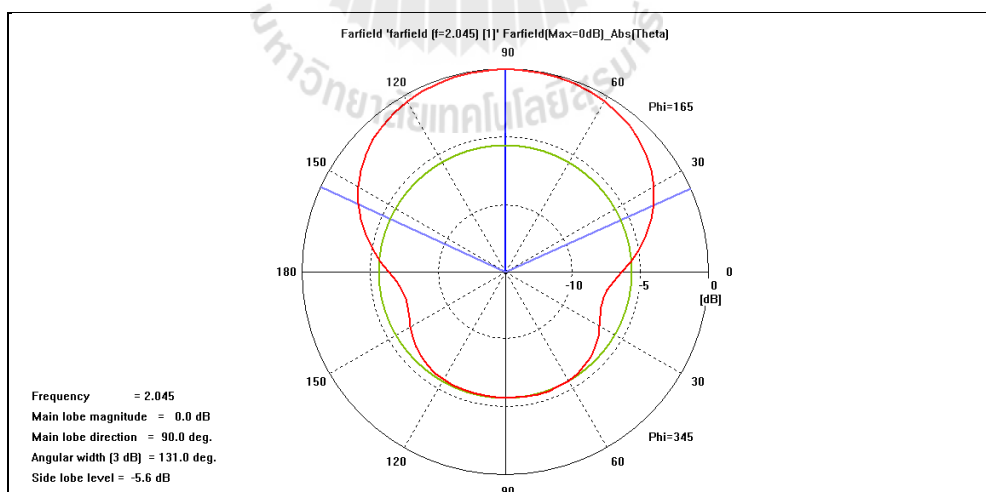


รูปที่ 3.35 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่มีการป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1

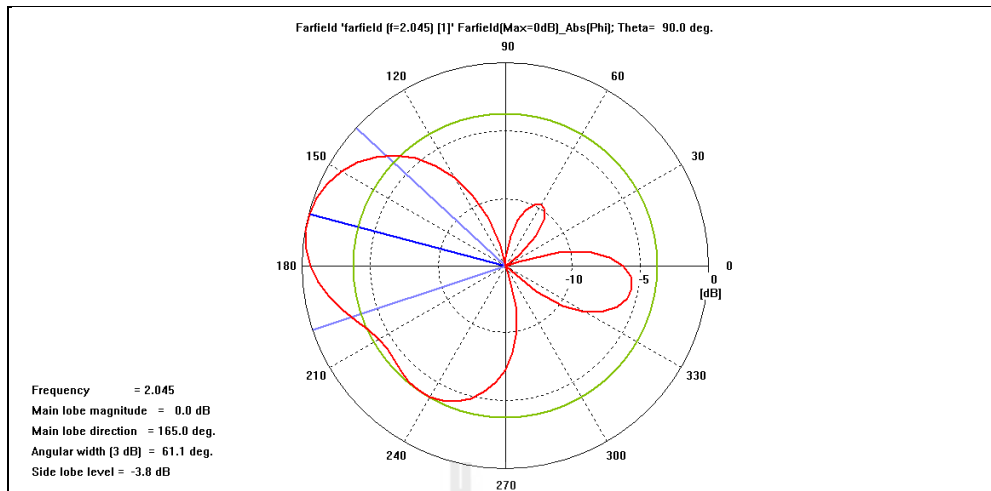
รูปที่ 3.36 ถึง 3.38 แสดงผลจากการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 ซึ่งได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศมีทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $270^\circ$  ซึ่งหันไปทางด้านซ้ายของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.36 ส่วนในรูปที่ 3.37 และ 3.38 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่ออยู่บนระนาบ  $\phi = 165^\circ$  และระนาบ  $\theta = 90^\circ$  ตามลำดับ



รูปที่ 3.36 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)

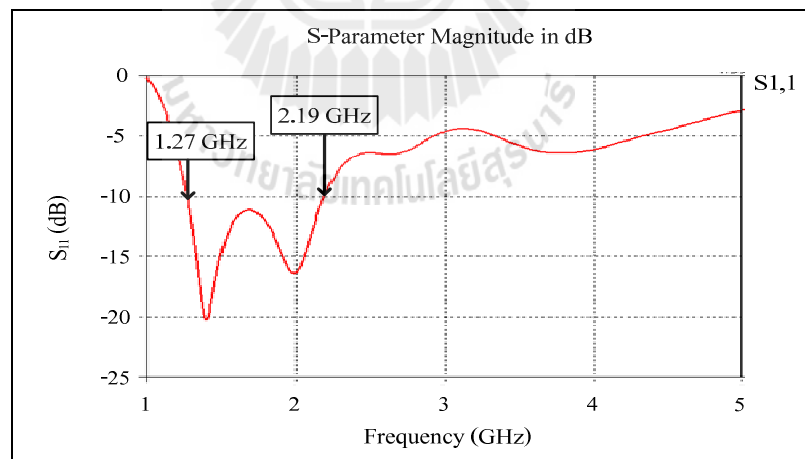


รูปที่ 3.37 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 บนระนาบ  $\phi = 165^\circ$  (จำลองแบบ)



รูปที่ 3.38 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1  
 บนระนาบ  $\theta = 90^\circ$  (จำลองแบบ)

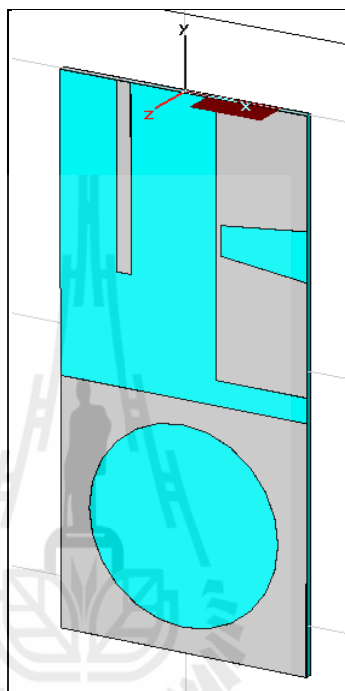
รูปที่ 3.39 จะแสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยอยู่ในช่วงความถี่ 1.27 - 2.19 GHz  
 ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz)



รูปที่ 3.39 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ  
 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (จำลองแบบ)

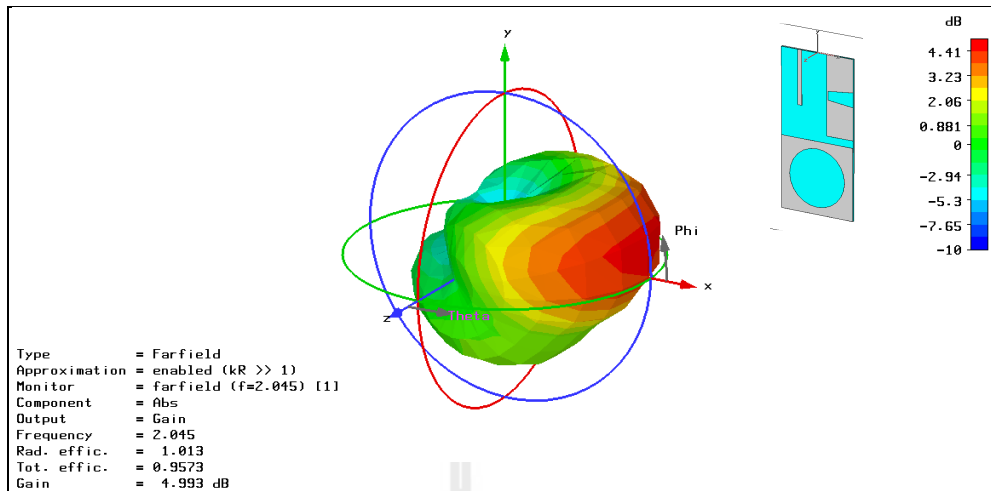
### 3.4.2 กรณีที่ 2

กรณีที่ 2 ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.40 และพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 3.41 ถึง 3.43 และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.44

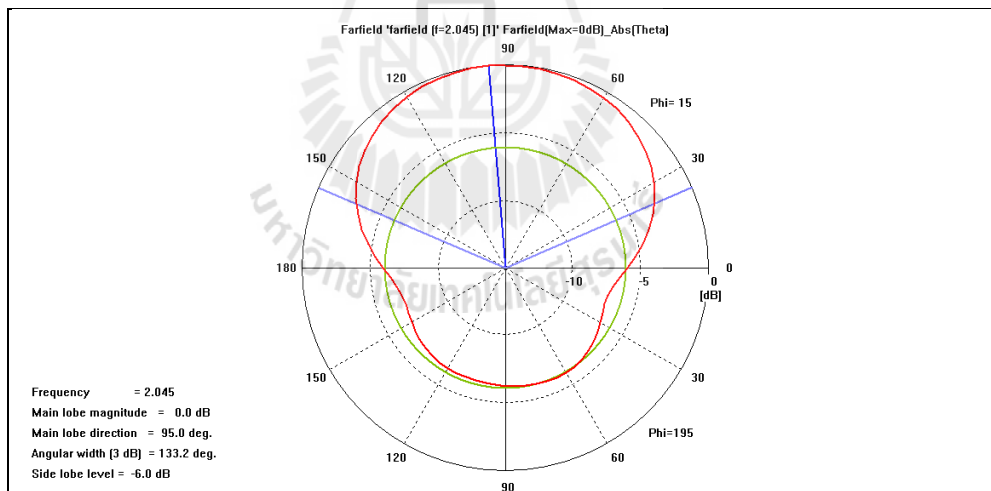


รูปที่ 3.40 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่มีการป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2

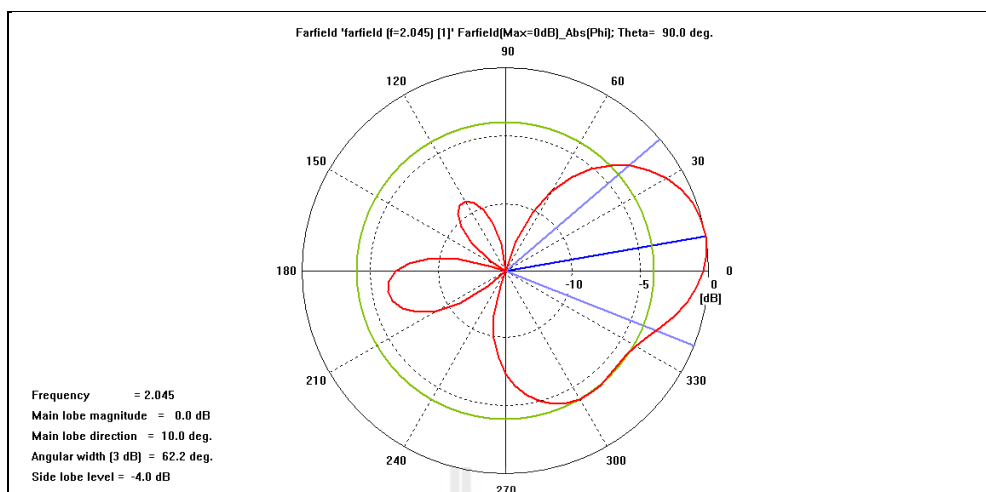
รูปที่ 3.41 ถึง 3.43 แสดงผลจากการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 ซึ่งได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศมีทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $90^\circ$  ซึ่งหันไปทางด้านขวาของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.41 ส่วนในรูปที่ 3.42 และ 3.43 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่ออยู่บนระนาบ  $\phi = 15^\circ$  และบนระนาบ  $\theta = 90^\circ$  ตามลำดับ



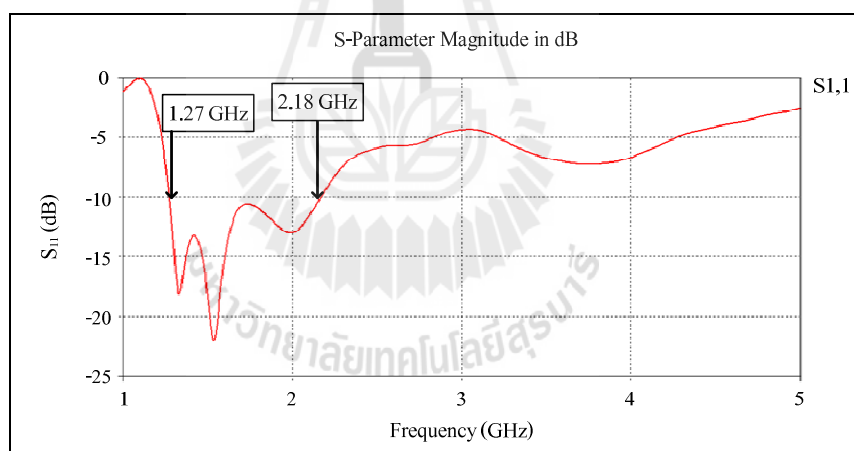
รูปที่ 3.41 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)



รูปที่ 3.42 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 บนระนาบ  $\phi = 15^\circ$  (จำลองแบบ)



รูปที่ 3.43 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2  
 บนระนาบ  $\theta = 90^\circ$  (จำลองแบบ)

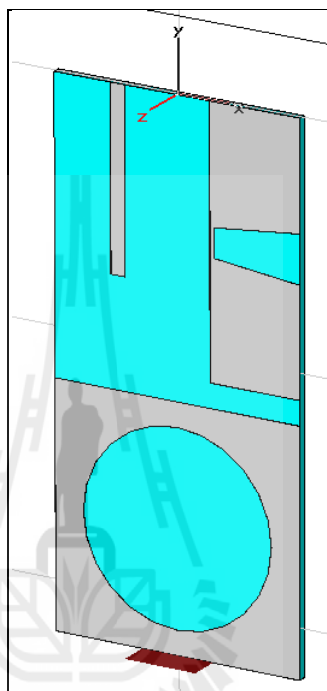


รูปที่ 3.44 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ  
 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (จำลองแบบ)

รูปที่ 3.44 จะแสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยอยู่ในช่วงความถี่ 1.27 - 2.18 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz)

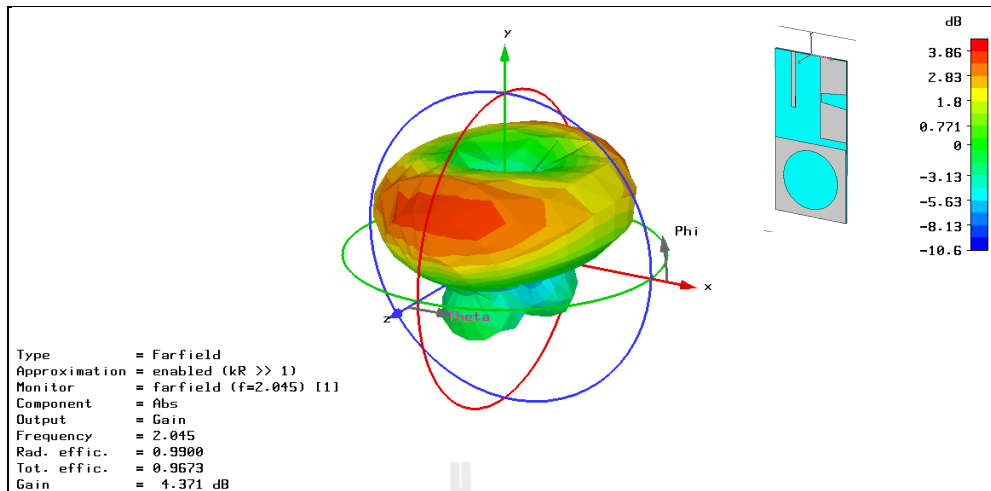
### 3.4.3 กรณีที่ 3

กรณีที่ 3 ป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.45 และพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 3.46 ถึง 3.48 และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.49

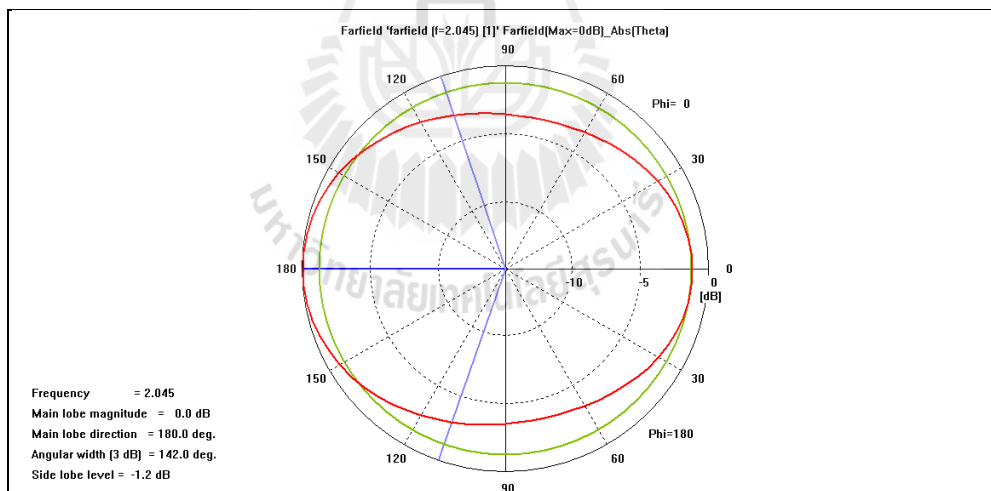


รูปที่ 3.45 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบที่มีการป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3

รูปที่ 3.46 ถึง 3.48 แสดงผลจากการจำลองแบบของสายอากาศเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 ซึ่งได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศมีทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $0^\circ$  ซึ่งหันไปทางด้านหน้าในขณะที่เดียวกันก็มีลำคลื่นหันไปทางด้านหลังด้วยคือมุม  $180^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.46 ส่วนในรูปที่ 3.47 และ 3.48 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่ออยู่บนระนาบ  $\phi = 165^\circ$  และระนาบ  $\theta = 90^\circ$  ตามลำดับ

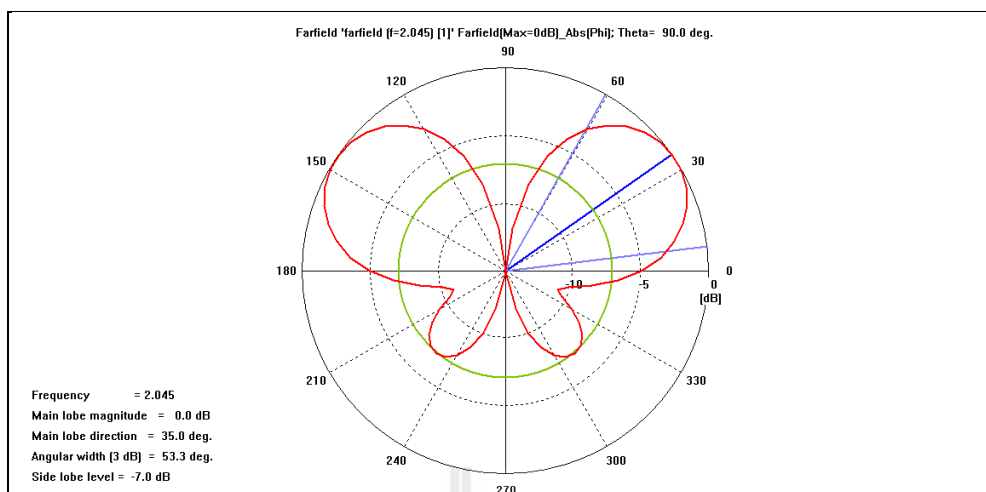


รูปที่ 3.46 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ)

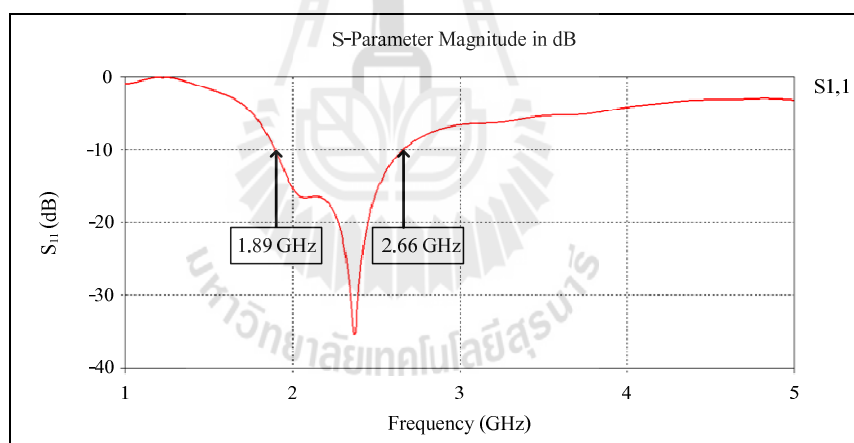


รูปที่ 3.47 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 บนระนาบ  $\phi = 165^\circ$  (จำลองแบบ)





รูปที่ 3.48 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3  
 บนระนาบ  $\theta = 90^\circ$  (จำลองแบบ)



รูปที่ 3.49 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ  
 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (จำลองแบบ)

รูปที่ 3.49 จะแสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยอยู่ในช่วงความถี่ 1.89 - 2.66 GHz  
 ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz)

จากผลการจำลองแบบของสายอากาศต้นแบบทั้ง 3 กรณี สามารถสรุปทิศทางการก่อรูปลำคลื่น ได้ดังนี้ กรณีที่ 1 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 จะมีทิศทางการก่อรูปลำคลื่นไปทางมุม  $90^\circ$  ซึ่งอยู่ทางด้านขวาของสายอากาศต้นแบบและกรณีที่ 2 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 จะมีทิศทางการก่อรูปลำคลื่นไปทางมุม  $270^\circ$  ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายของสายอากาศต้นแบบและกรณีที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 จะมีทิศทางการก่อรูปลำคลื่นไปทางมุม  $0^\circ$  และ  $180^\circ$  ซึ่งอยู่ทางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศต้นแบบ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 สรุปทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบ

กรณี	1	2	3
ทิศทางของลำคลื่น	$90^\circ$	$270^\circ$	$0^\circ$ และ $180^\circ$

จากการจำลองแบบของสายอากาศที่ใช้สำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่นที่ได้ทำการป้อนสัญญาณทั้ง 3 กรณีพบว่า สายอากาศดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดลำคลื่นไปใน 4 ทิศทางได้จริง และพบว่าในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (1.92 - 2.17 GHz) มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้คือมีค่าสะท้อนกลับของสัญญาณเท่ากับ 31.62% โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ หาได้จากสมการที่ 3.16

$$\text{Return loss} = 20 \log \frac{P_r}{P_i} \quad (3.16)$$

โดยที่ Return loss คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

$P_i$  คือ กำลังงานที่ป้อนเข้าไป

$P_r$  คือ กำลังงานที่สะท้อนกลับ

โดยเมื่อป้อนกำลังงานเข้าไป 100% จะทำให้เกิดกำลังงานที่สะท้อนกลับดังนี้

$$-10 = 20 \log \frac{P_r}{100} \quad (3.17)$$

$$P_r = 31.62\%$$

เมื่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าน้อยลงจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อยลงไปด้วย

### 3.5 การ์ดรับสัญญาณ 3 จี

ในการทดลองใช้งานจริงในระบบนอกจากจะมีสายอากาศต้นแบบที่ได้แสดงวิธีการออกแบบดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.1 เป็นส่วนประกอบสำคัญ ยังต้องอาศัยการ์ดรับสัญญาณ 3 จี เพื่อที่จะได้ผลการทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริงได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในส่วนนี้เราจึงจะกล่าวถึง การ์ดรับสัญญาณ 3 จี



รูปที่ 3.50 การ์ดรับสัญญาณ 3 จี Sierra Wireless 850

การรับสัญญาณ 3 จีในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้การ์ดรับสัญญาณ 3 จี รุ่น 850 ของบริษัท Sierra Wireless ตามที่แสดงในรูปที่ 3.50 ซึ่งมีคุณสมบัติสำคัญดังนี้

1. เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ผ่านช่องพีซีเอ็มไอเอ (Personal Computer Manufacturer Interface Adaptor: PCMIA)
2. สามารถใช้ติดตั้งเพื่อใช้งานกับคอมพิวเตอร์แบบพกพาและคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
3. เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตถ้าใช้ระบบยูเอเอ็มทีเอส จะมีความเร็ว 400 - 700 kbps (สูงสุด 1.8 Mbps)
4. รองรับวิดีโอที่เป็นระบบ 3 จี
5. รองรับการใช้งานได้ทั้งหลายความถี่ เช่น 850 900 1800 1900 และ 2100
6. ช่วงอุณหภูมิใช้งาน คือ  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+60^{\circ}\text{C}$
7. เป็นไปตามข้อกำหนดที่ 5 และ ข้อกำหนดที่ 99 ของ 3 จีพีพี

### 3.6 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบสายอากาศและโครงสร้างของสายอากาศที่ใช้สำหรับระบบสวิตช์ค่าคลื่นและยังได้กล่าวถึงการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งผลที่ได้ประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานในแบบ 3 มิติ รวมทั้งแสดงในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงแสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ ซึ่งผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบที่ออกแบบโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุรองฐานแบบอีพอกซี ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.8 และสายอากาศมีขนาด  $55 \times 110 \times 1.67$  มิลลิเมตร จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปได้ 4 ทิศทาง ทิศทางแรกคือทางด้านขวาของสายอากาศ ทิศทางที่สองคือทางด้านซ้ายของสายอากาศ ทิศทางที่สามคือทางด้านหน้าและทิศทางที่สี่คือทางด้านหลังของสายอากาศ ซึ่งแต่ละทิศทางจะเปลี่ยนตามตำแหน่งของพอร์ตที่ป้อนสัญญาณ

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศต้นแบบที่สร้างจริง โดยจะทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ วัดอัตราขยายและวัดโพลาริเซชันของสายอากาศอีกด้วย นอกจากนี้สายอากาศที่สร้างขึ้นจริงนี้จะถูกนำไปทดสอบการรับสัญญาณในพื้นที่ที่มีการใช้งานเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่ใช้งานในช่วงความถี่ 1.92 - 2.17 GHz โดยจะทดสอบเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบของตารางและกราฟ

## บทที่ 4

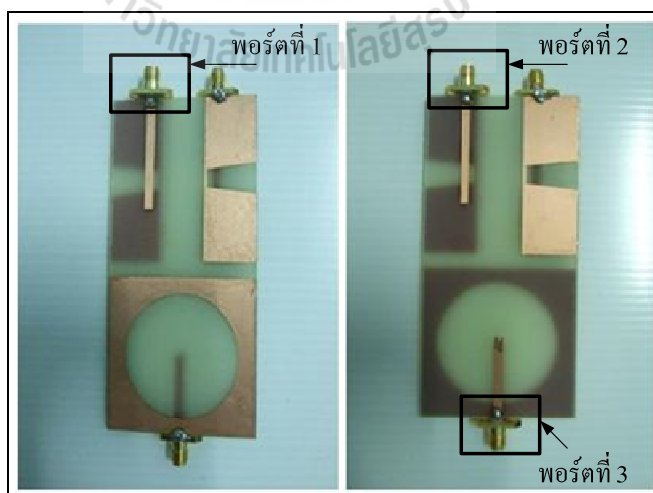
### การทดสอบสายอากาศต้นแบบและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา มาช่วยสร้างสายอากาศต้นแบบ จากนั้นจะวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญของสายอากาศต้นแบบ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ วัดอัตราขยายและวัดโพลาไรเซชัน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8722D เพื่อวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้น รวมทั้งยังแสดงผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบในพื้นที่ใช้งานจริง

#### 4.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2005 จึงได้สร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงรูปของสายอากาศต้นแบบ ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ ที่สร้างขึ้นโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุรองฐานแบบอีพอกซี FR4 และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.8 และหนา 1.6 มิลลิเมตร



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 สายอากาศสำหรับระบบสวิตซ์ลาคลิ้นต้นแบบ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

#### 4.2.1 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบ

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศคือ รูปที่ใช้บ่งบอกลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง สายอากาศต้นแบบจะถูกวัดแบบรูปการแผ่พลังงานภายในห้องที่ไม่มีการสะท้อนของคลื่น (anechoic chamber) โดยมีสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omni-direction antenna) เป็นสายอากาศภาคส่ง ในการวัดทดสอบจะวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (far-field region) นั่นคือระยะห่างระหว่างสายอากาศอ้างอิงและสายอากาศทดสอบ ที่สนามระยะไกล การเปลี่ยนแปลงของสนามจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

เมื่อ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศอ้างอิงและสายอากาศทดสอบ  
 D คือ ส่วนที่ยาวที่สุดของสายอากาศอ้างอิง (หน่วยเป็นเมตร)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

โดยการทดสอบนี้กำหนดให้ความถี่ 2.1 GHz และส่วนที่ยาวที่สุดของสายอากาศอ้างอิงมีค่า 0.36 เมตร จาก

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (4.2)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.1 \times 10^9} \quad (4.3)$$

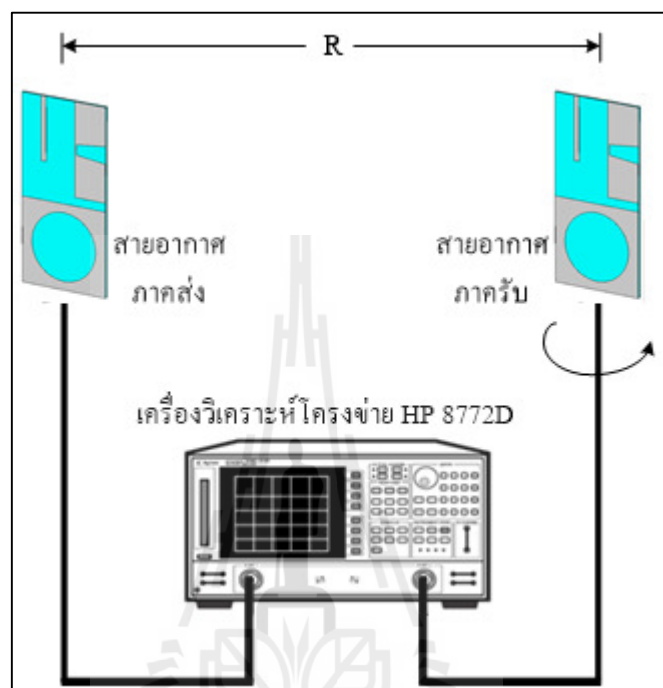
$$\lambda = 0.142 \text{ เมตร}$$

นำค่า  $\lambda$  แทนลงในสมการที่ 4.1 จะสามารถหา R ได้ดังนี้

$$R > \frac{2(0.36)^2}{0.142} \quad (4.4)$$

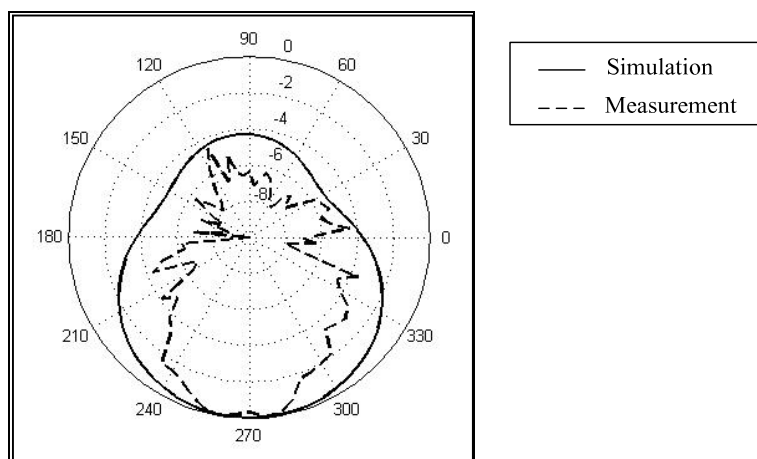
ดังนั้นจะได้  $R > 1.83$  เมตร

ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศโมโนโพล ที่มีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 1.71 - 2.17 GHz มาเป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับคือสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่นต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 4.2

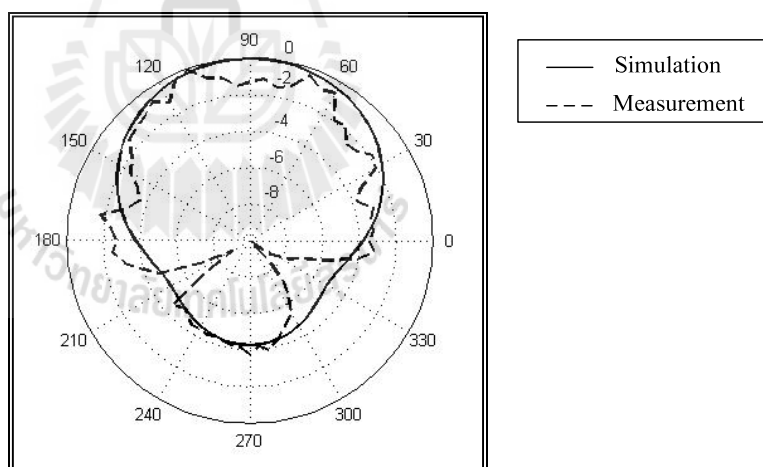


รูปที่ 4.2 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบ

สายอากาศที่นำมาทดสอบนี้จะมีการหมุนรับคลื่นจาก 0 องศาจนถึงมุม 360 องศาในแนวระนาบ เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 ที่ 2 และที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าในดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 และแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 ซึ่งได้แสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองแบบด้วย โปรแกรม CST Microwave Studio 2005 (เส้นทึบ) และผลที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ (เส้นปะ)

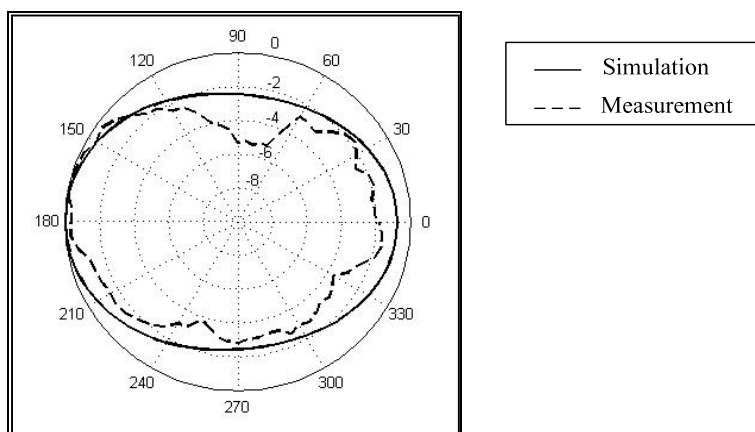


รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1  
บนระนาบ  $\phi = 165^\circ$  (ห้องปฏิบัติการ)

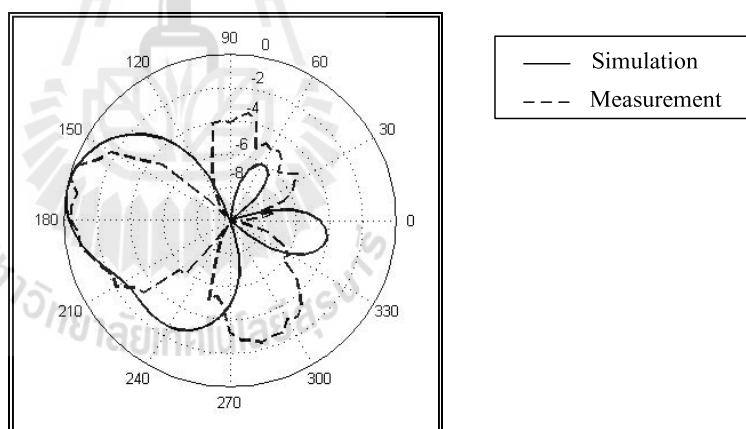


รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2  
บนระนาบ  $\phi = 15^\circ$  (ห้องปฏิบัติการ)

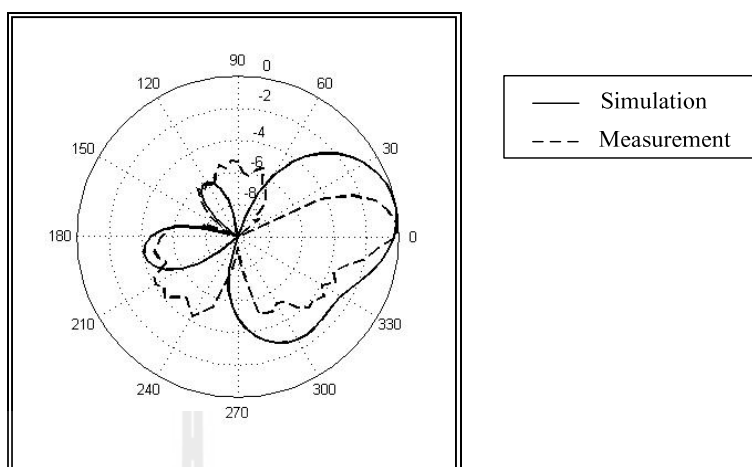




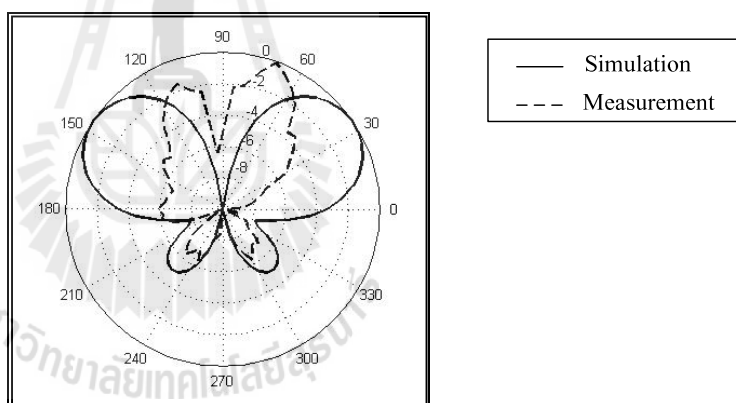
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3  
บนระนาบ  $\phi = 165^\circ$  (ห้องปฏิบัติการ)



รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1  
บนระนาบ  $\theta = 90^\circ$  (ห้องปฏิบัติการ)



รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2  
บนระนาบ  $\theta = 90^\circ$  (ห้องปฏิบัติการ)



รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3  
บนระนาบ  $\theta = 90^\circ$  (ห้องปฏิบัติการ)

จากผลการวัดข้างต้นจะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบทั้งที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลที่ได้จากการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio 2005 ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 นั้นมีความสอดคล้องกัน ซึ่งสายอากาศต้นแบบมีการก่อรูปลำคลื่นไปได้ 4 ทิศทาง ทิศทางแรกคือทางด้านขวาของสายอากาศ ทิศทางที่สองคือทางด้านซ้ายของสายอากาศ ทิศทางที่สามคือทางด้านหน้าและทิศทางที่สี่คือทางด้านหลังของสายอากาศ ซึ่งแต่ละทิศทางจะเปลี่ยนตามตำแหน่งในการป้อนสัญญาณที่แตกต่างกัน

#### 4.2.2 ผลการทดสอบความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตซ์อินพุตอิมพีแดนซ์คือ SWR (Standing Wave Ratio) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งค่าของ SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่สมบูรณ์หมายความว่า กำลังไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่า SWR เท่ากับอนันต์หมายความว่า สายอากาศนั้นเกิดการไม่แมตซ์ทำให้ กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปการสะท้อนกลับมาทั้งหมดทำให้เครื่องส่งเสียหายได้ ดังนั้นในการทดสอบ จะมีการพิจารณาพารามิเตอร์  $S_{11}$  ซึ่งหมายถึงการสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าจากทางเข้า (พอร์ต 1) ของสายอากาศ ซึ่งขนาดของ  $S_{11}$  สามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึงลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมตซ์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์แสดงว่ามีการแมตซ์ที่ สมบูรณ์ดีที่สุด (ริงสรรค์ และ ชวงค์, ม.ป.ป) ดังนั้นในงานประยุกต์ต่างๆ ค่าของ  $S_{11}$  จะยอมรับได้ ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการ แมตซ์ที่ดี

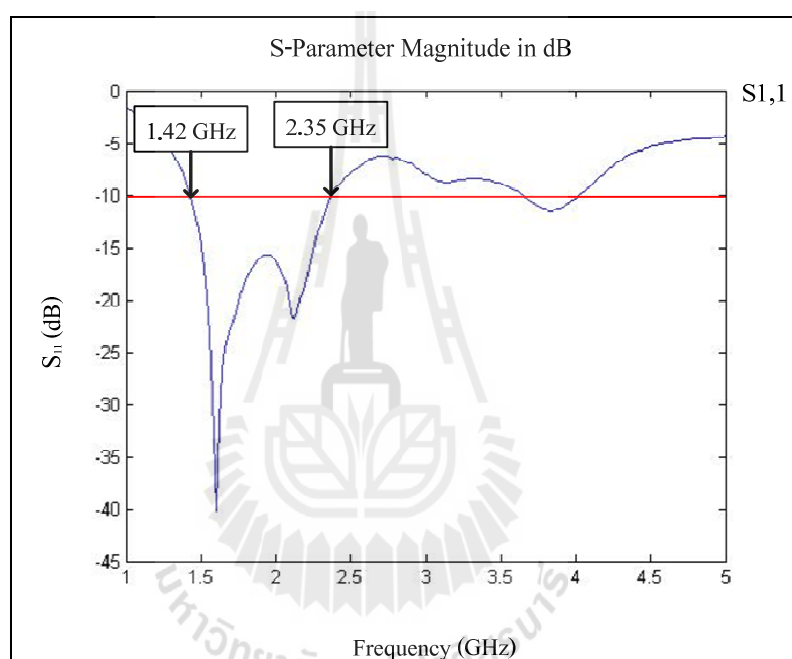
ภาพการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบจะแสดง

ดังรูปที่ 4.9

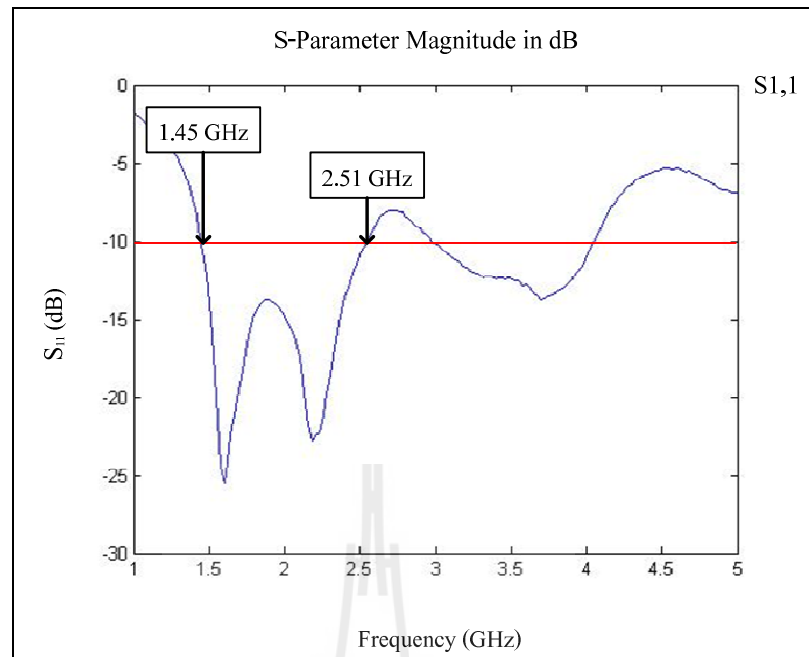


รูปที่ 4.9 ภาพแสดงการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ

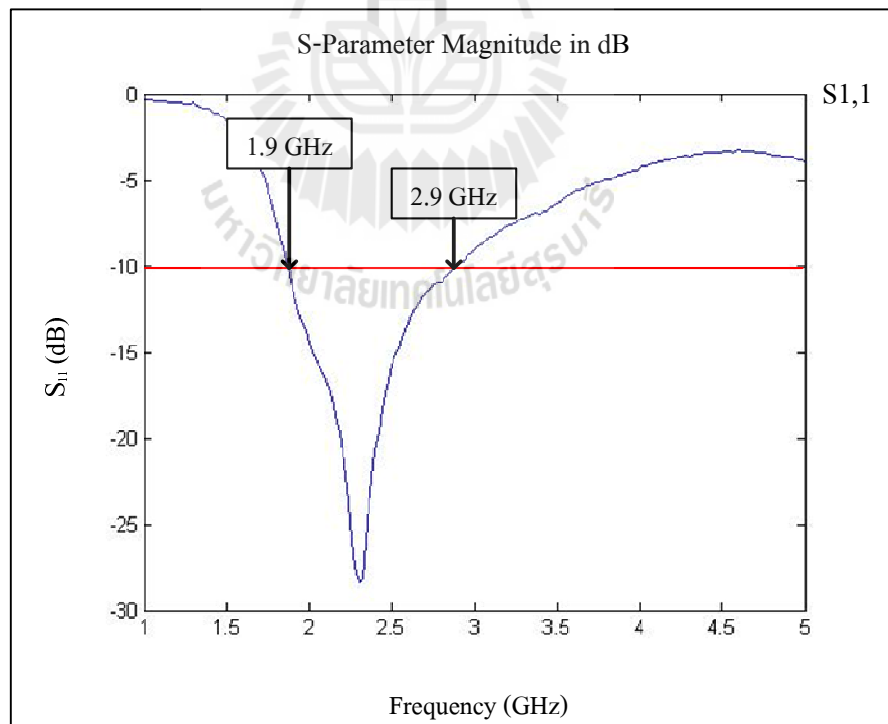
จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อทำการป้อนสัญญาณที่พอร์ตต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 ในรูปที่ 3.27 พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ในรูปที่ 3.28 สายอากาศต้นแบบจะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า  $-10$  dB ในช่วงความถี่  $1.42 - 2.35$  GHz และ  $1.45 - 2.51$  GHz และ  $1.9 - 2.9$  GHz ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน ( $1.92 - 2.17$  GHz)



รูปที่ 4.10 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (ห้องปฏิบัติการ)



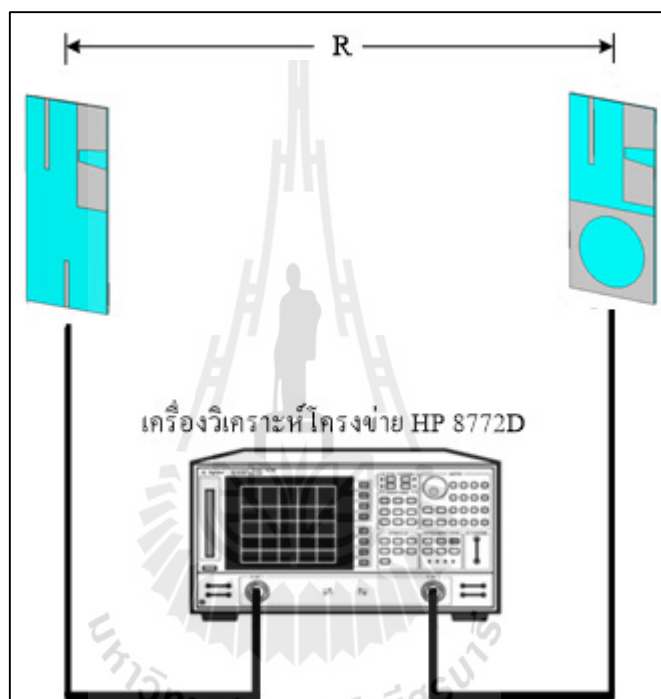
รูปที่ 4.11 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (ห้องปฏิบัติการ)



รูปที่ 4.12 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (ห้องปฏิบัติการ)

### 4.2.3 ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ ได้ทำการวัดทดสอบอัตราขยายของแต่ละพอร์ต ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันมาใช้สำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และอีกตัวหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ ขณะทำการวัดจะหันด้านที่เป็นพอร์ตเดียวกันเข้าหากัน



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

จากนั้นใช้สมการ การส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้คือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.5)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + Loss}{2} \right) \quad (4.6)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)}{2} \right) \quad (4.7)$$

$$2G_{dB} = P_r - P_t + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.8)$$

โดยที่	$P_t$	คือ	กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศส่ง
	$P_r$	คือ	กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศรับ
	$G_{dB}$	คือ	อัตราขยายรวมของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เมื่อสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน
	$G_t$	คือ	อัตราขยายของสายอากาศส่ง
	$G_r$	คือ	อัตราขยายของสายอากาศรับ
	$R$	คือ	ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ
เมื่อ	$P_r - P_t$	คือ	ค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

และในขั้นตอนต่อมาได้ทำการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบโดยกำหนดระยะระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 30 เซนติเมตร มีกำลังด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศส่งเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะได้แสดงผลวัดทดสอบของสายอากาศต้นแบบต่อไปนี้

จากสมการที่ 4.8 สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่พอร์ตที่ 1 ได้ดังนี้

$$2G = (-20.14) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times 0.3}{3 \times 10^8 / 2.1 \times 10^9} \right)$$

ดังนั้น

$$G_r = G_t = 4.17 \text{ dB}$$

จากสมการที่ 4.8 สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่พอร์ตที่ 2 ได้ดังนี้

$$2G = (-19.04) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times 0.3}{3 \times 10^8 / 2.1 \times 10^9} \right)$$

ดังนั้น

$$G_r = G_t = 4.72 \text{ dB}$$

จากสมการที่ 4.8 สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่พอร์ตที่ 3 ได้ดังนี้

$$2G = (-26.48) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times 0.3}{3 \times 10^8 / 2.1 \times 10^9} \right)$$

ดังนั้น

$$G_r = G_t = 1 \text{ dB}$$

ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายที่ได้จากผลการจำลองแบบจะเห็นว่า พอร์ตที่ 1 ที่ 2 และที่ 3 นั้น ค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการจำลองแบบและที่ได้จากการวัดจริงในห้องปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศ

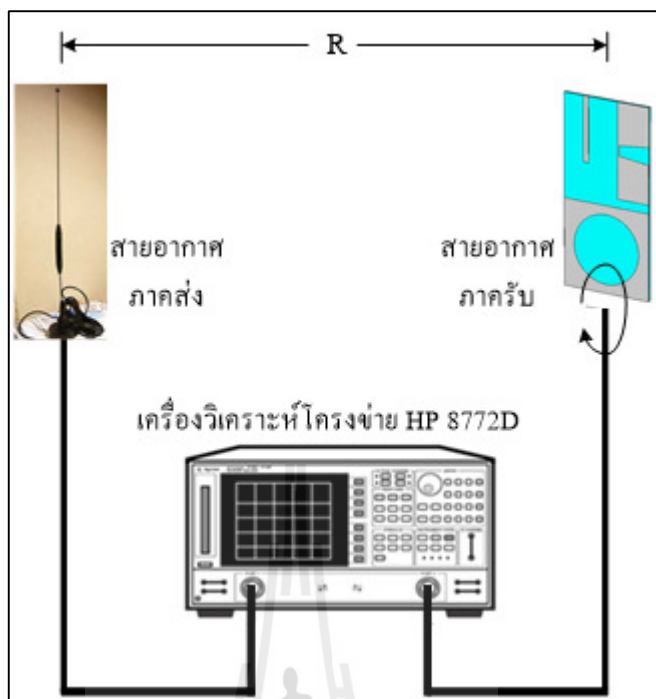
พอร์ตที่	ผลการจำลองแบบ	ผลการวัดจริงในห้องปฏิบัติการ
1	4.86 dB	4.17 dB
2	4.98 dB	4.72 dB
3	1 dB	1 dB



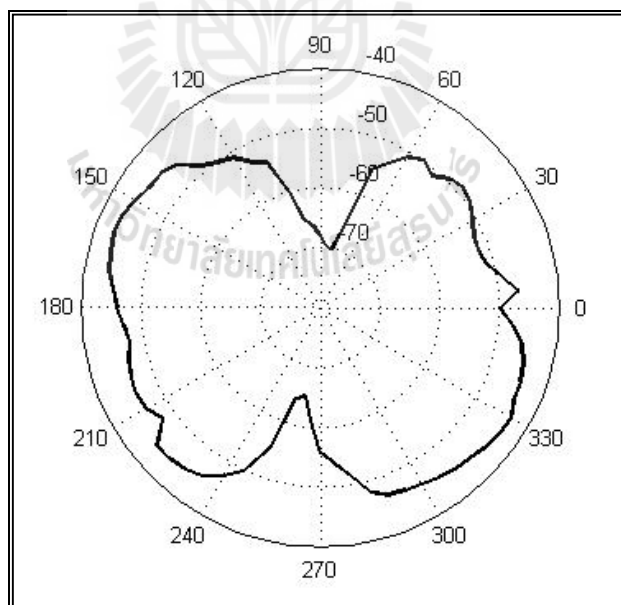
#### 4.2.4 ผลการทดสอบโพลาริเซชันของสายอากาศต้นแบบ

โพลาริเซชันของสายอากาศจะแสดงถึงคุณสมบัติของคลื่นที่แม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปและขนาดของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตคลงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป สำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจะเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้นเมื่อเป็นสายอากาศภาคส่งหรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดและมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าหากไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาริเซชันอาจแบ่งเป็นแบบโพลาริเซชันเชิงเส้น (linear polarization) โพลาริเซชันเชิงวงกลม (circular polarization) และโพลาริเซชันเชิงวงรี (elliptical polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าถ้าแอมพลิจูดที่แสดงสนามไฟฟ้าแปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศว่าง ถ้าชี้เป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนเป็นรูปวงรี จะเรียกสนามแบบนี้ว่าเป็นโพลาริเซชันเชิงวงรี ทั้งโพลาริเซชันเชิงเส้นและโพลาริเซชันเชิงวงกลมต่างก็เป็นกรณีพิเศษของโพลาริเซชันเชิงวงรี ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาคือ เมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันมือขวาในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาริเซชันมือซ้าย

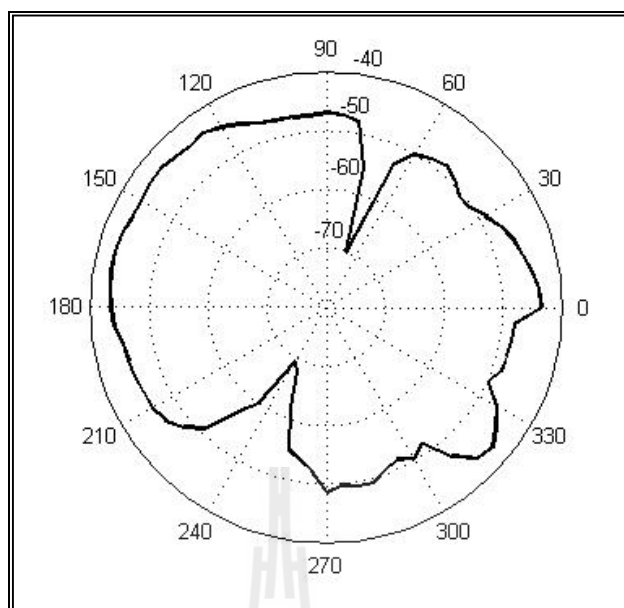
จากรูปที่ 4.14 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดทดสอบโพลาริเซชันของสายอากาศต้นแบบซึ่งการวัดทดสอบนี้ จะมีวิธีการวัดเช่นเดียวกับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยได้ทดสอบในระยะสนามระยะไกล ในระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบทั้งสองมีค่าเท่ากับ 2 เมตร มีสายอากาศทดสอบคือ สายอากาศต้นแบบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ และสายอากาศโมโนโพลที่มีความถี่ใช้งานในช่วง 1.71 - 2.17 GHz ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง มีตำแหน่งการเอียงตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา ในการเอียงมุมแต่ละครั้งจะบันทึกระดับสัญญาณที่ได้รับได้จากเครื่องวิเคราะห์โคจรข่าย ดังนั้นแบบรูปโพลาริเซชันทั้ง 3 กรณีจะถูกนำมาแสดงในรูปของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.17



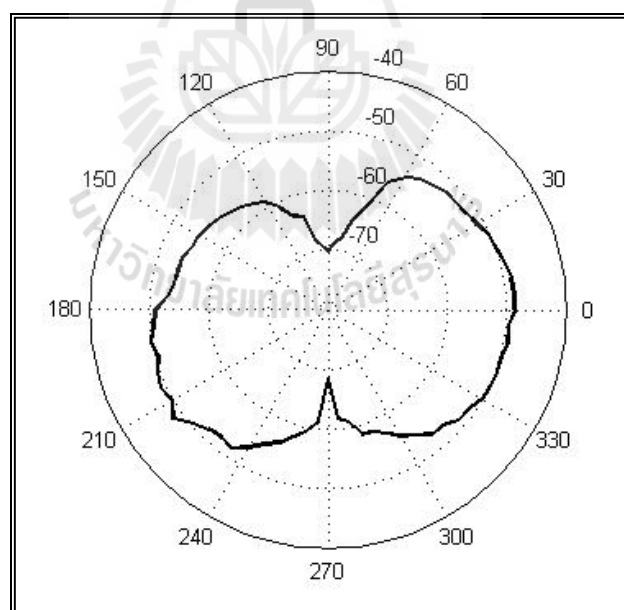
รูปที่ 4.14 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดทดสอบโพลาไรเซชันของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบแบบรูปโพลาไรเซชันของสายอากาศต้นแบบ  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 (ห้องปฏิบัติการ)



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบแบบรูปโพลาริเซชันของสายอากาศต้นแบบ  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 2 (ห้องปฏิบัติการ)



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบแบบรูปโพลาริเซชันของสายอากาศต้นแบบ  
เมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 3 (ห้องปฏิบัติการ)

และเมื่อพิจารณาขนาดของอัตราส่วนแกน (Axial Ratio: AR) หรืออัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรอง สามารถคำนวณอัตราส่วนแกนจากสมการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือ

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad (4.9)$$

เมื่อ  $OA$  คือเส้นตรงที่เป็นครึ่งหนึ่งของแนวแกนหลักและ  $OB$  คือเส้นตรงที่เป็นครึ่งหนึ่งของแนวแกนรอง สามารถมีค่าได้จาก 0 dB ไปจนถึงค่าที่เป็นบวกอนันต์ ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB หมายความว่า เป็นโพลาริเซชันแบบวงกลมที่สมบูรณ์ และถ้ามีค่าเท่ากับบวกอนันต์ หมายความว่า เป็นโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น และจากผลการวัดทดสอบในรูปแบบที่ 4.15 เมื่อพิจารณาจากแกนหลักและแกนรองเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตต่างๆ ของสายอากาศ ได้ค่าอัตราส่วนแกนคือ

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนแกน

พอร์ตที่	อัตราส่วนแกน (dB)
1	21.35
2	20.25
3	22.4

จากงานวิจัยของ Zervos, T., Alexandridis, A.A., Lazarakis, F., and Stamopoulos, D. (2009) และงานวิจัยของ Mazlaimi, Y., Zaiki, A. (2010) และหนังสือชื่อ ทฤษฎีสายอากาศ ได้แสดงวิธีการดูค่าอัตราส่วนแกนดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 จากการทดสอบเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ตที่ 1 มีค่าอัตราส่วนแกนคือ 21.35 dB พอร์ตที่ 2 มีค่าอัตราส่วนแกนคือ 20.25 dB และพอร์ตที่ 3 มีค่าอัตราส่วนแกนคือ 22.4 dB จากการศึกษางานวิจัยจะได้สรุปช่วงของอัตราส่วนแกนที่จะแสดงว่าสายอากาศมีโพลาริเซชันชนิดใดดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ช่วงของค่าอัตราส่วนแกนที่จะแสดงชนิดของโพลาริเซชัน

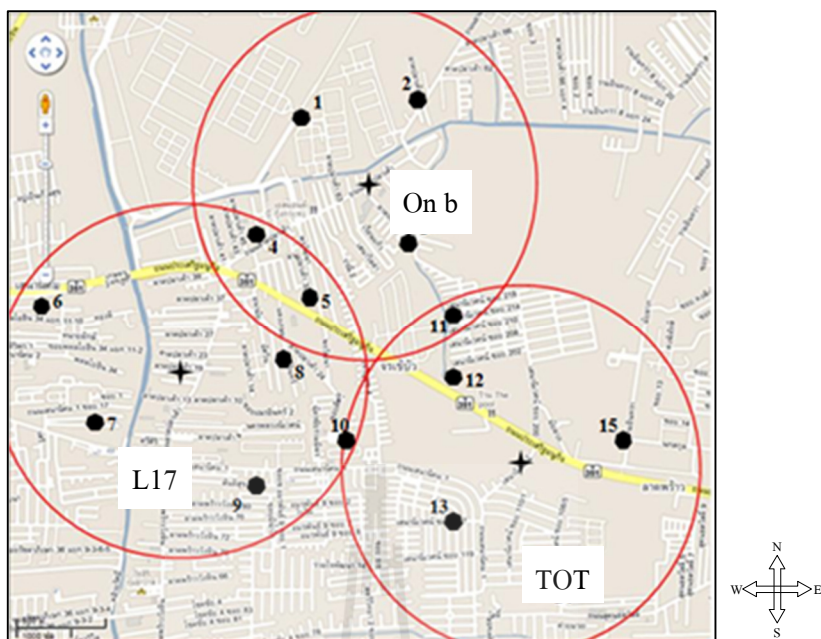
อัตราส่วนแกน (dB)	ชนิดของโพลาริเซชัน
$0 \leq AR < 3$	โพลาริเซชันแบบวงกลม
$3 \leq AR < 14$	โพลาริเซชันแบบวงรี
$18.2 \leq AR < \infty$	โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น

จากตารางที่ 4.3 สายอากาศที่มีค่าอัตราส่วนแกนอยู่ในช่วง  $0 \text{ dB} \leq \text{AR} < 3 \text{ dB}$  จะมีโพลาริเซชันแบบวงกลม สายอากาศที่มีค่าอัตราส่วนแกนอยู่ในช่วง  $3 \text{ dB} \leq \text{AR} < 14 \text{ dB}$  จะมีโพลาริเซชันแบบวงรี และสายอากาศที่มีค่าอัตราส่วนแกนอยู่ในช่วง  $18.2 \text{ dB} \leq \text{AR} < \infty$  จะมีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น เมื่อดูจากค่าอัตราส่วนแกนที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 ทั้ง 3 พอร์ตของสายอากาศต้นแบบมีค่าอัตราส่วนแกนมากกว่า 18.2 dB จึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลัดสั้นต้นแบบนั้น มีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นในทั้ง 3 พอร์ต

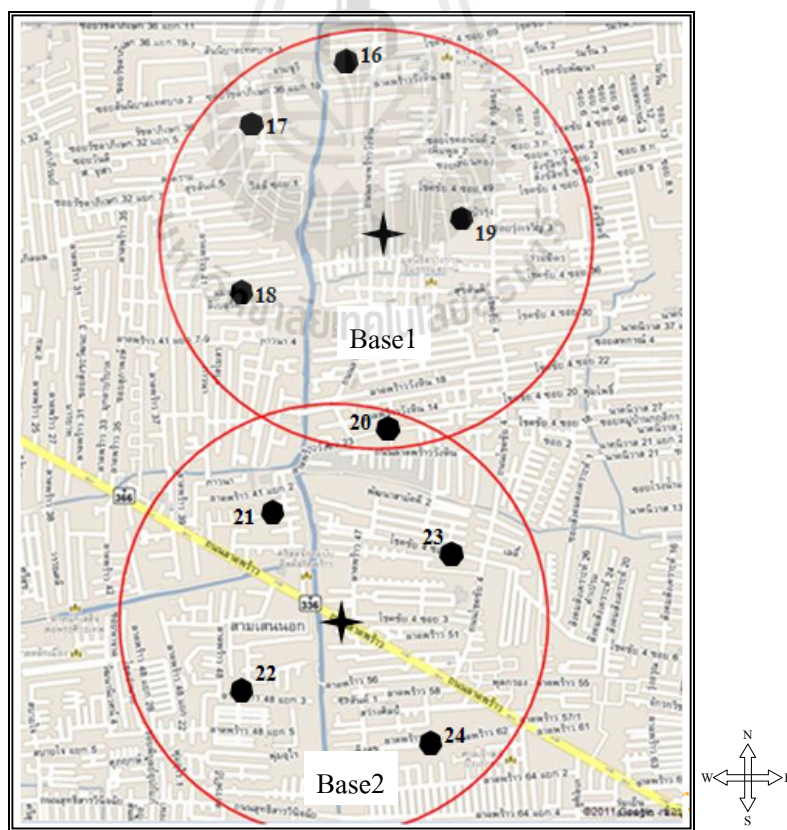
ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบในพื้นที่ใช้งานจริง โดยสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปวัดสัญญาณในพื้นที่ใช้งานที่มีการใช้งานเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่ใช้งานในช่วงความถี่ของยูเอ็มทีเอส (1.92 - 2.17 GHz) และจะแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

#### 4.3 การทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริง

สายอากาศต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นและสายอากาศแบบรอบทิศทางจะถูกนำไปทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริง โดยจะวัดค่าความแรงของสัญญาณและวัดค่าวิสัยสามารถ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพื้นที่ที่ทำการทดสอบคือ เขตลาดพร้าว เขตโชคชัย 4 และเขตลาดปลาเค้า กรุงเทพมหานคร โดยใช้การ์ดรับสัญญาณ 3 จี รุ่น 850 ของบริษัท Sierra Wireless ซึ่งได้กล่าวถึงคุณสมบัติของการ์ดรับสัญญาณรุ่นนี้ไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.4 แล้ว และใช้ซิมการ์ดของ บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) เพื่อใช้งานเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งจะใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz โดยพื้นที่ที่ทำการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 จากรูปตำแหน่งดาวสี่แฉกคือที่ตั้งของสถานีฐานทั้งหมด 5 สถานีฐาน ที่กำหนดให้เป็นตัวส่งสัญญาณในเซลล์ และกำหนดจุดที่วัดทดสอบทั้งหมด 24 จุด บริเวณรอบๆ สถานีฐาน วัดทดสอบจุดละ 3 ครั้ง ตามตำแหน่งจุดสี่แฉกแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 โดยขอเขตการส่งสัญญาณ (เส้นวงกลม) ได้อ้างอิงจาก [www.i-mobile3gx.com](http://www.i-mobile3gx.com) ซึ่งได้แสดงถึงพื้นที่การให้บริการเสาสัญญาณของ ทีโอที 3 จี



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งสถานีฐานและจุดที่วัดทดสอบ



รูปที่ 4.19 ตำแหน่งสถานีฐานและจุดที่วัดทดสอบ (ต่อ)

จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 จะแสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและจุดที่วัดทดสอบสามารถสรุปเป็นตารางบอกตำแหน่งที่ตั้งได้ดังนี้ รูปที่ 4.18 สามารถสรุปตำแหน่งของสถานีฐานและจุดที่วัดทดสอบได้ดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ และ รูปที่ 4.19 สามารถสรุปตำแหน่งของสถานีฐานและจุดที่วัดทดสอบได้ดังตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานในรูปที่ 4.18

ชื่อสถานีฐาน	พิกัด	หมายเหตุ
TOT	13.8313, 100.6101	อยู่บน ถ.เสนานิเวศน์
L17	13.8364, 100.5928	ลาดปลาเค้า 17
On b	13.8463, 100.6027	41/35 อยู่บนตึกข้างร้านศิริชีพุด

ตารางที่ 4.5 แสดงจุดที่วัดทดสอบในรูปที่ 4.18

จุดที่	พิกัด	หมายเหตุ
1	13.849408, 100.599353	กองพันทหารช่างที่ 1 รักษาพระองค์ (ลาดปลาเค้า 63)
2	13.8499, 100.6051	ประมาณลาดปลาเค้า 75
3	13.843328, 100.604600	หน้าโรงเรียนปิยะพงษ์วิทยา (ลาดปลาเค้า 62)
4	13.8434, 100.5968	ลาดปลาเค้า 47 (ในปั๊ม ESSO)
5	13.839830, 100.599532	ในปั๊มปตท.ติด ถ.ประเสริฐมณูญกิจ
6	13.839705, 100.583911	ซอยถัดจาก พหลโยธิน 34
7	13.8339, 100.5876	เสนานิคม 1 ซอย 17
8	13.8379, 100.5981	ลาดปลาเค้า 24 (ช.ศรีอินทร์)
9	13.8308, 100.5962	ลาดพร้าววังหิน 82
10	13.832413, 100.601163	เสนานิเวศน์ ซ.102
11	13.839033, 100.607375	เสนานิเวศน์ ซ.212 (ท้ายซอย)
12	13.8371, 100.6036	ถ.ประเสริฐมณูญกิจ
13	13.8293, 100.6067	หมู่บ้านเสนานิเวศน์ 117/4
14	13.825825, 100.612033	เสนานิเวศน์ ซ.118
15	13.8324, 100.616	ข้างๆ ร้านอาหารทุ่งหลวง (ช.รามอินทรา)

ตารางที่ 4.6 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานในรูปแบบที่ 4.19

ชื่อสถานีฐาน	พิกัด	หมายเหตุ
Base 1	13.812667, 100.591281	ลาดพร้าววังหิน 32 แยก 1
Base 2	13.795142, 100.593053	อยู่ระหว่าง ซ.ลาดพร้าว 48-50

ตารางที่ 4.7 แสดงจุดที่วัดทดสอบในรูปแบบที่ 4.19

จุดที่	พิกัด	หมายเหตุ
16	13.819294, 100.590158	ลาดพร้าววังหิน 65
17	13.816650, 100.586072	ซ.รัชดาภิเษก
18	13.810103, 100.585481	แม่แจ่ม ลาดพร้าว 41 แยก 14
19	13.813294, 100.594836	โชคชัย 4 ซ.45 (บัวรุ่ง)
20	13.804481, 100.592067	ลาดพร้าววังหิน 10
21	13.800953, 100.587992	ลาดพร้าว 43 แยก 2-1-3
22	13.793769, 100.586019	ลาดพร้าว 48 แยก 3-2 กับ 3-3
23	13.799536, 100.594644	โชคชัย 4 ซ.9
24	13.791758, 100.593478	ลาดพร้าว 62

รูปที่ 4.20 ถึง 4.23 จะแสดงภาพขณะวัดสัญญาณในพื้นที่ใช้งานจริงโดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศต้นแบบที่ใช้พอร์ตที่ 1 ที่ 2 และที่ 3 ในการรับสัญญาณตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ภาพขณะวัดสัญญาณโดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง





รูปที่ 4.21 ภาพขณะวัดสัญญาณ โดยใช้สายอากาศต้นแบบที่ใช้พอร์ตที่ 1 ในการรับสัญญาณ







รูปที่ 4.22 ภาพขณะวัดสัญญาณ โดยใช้สายอากาศต้นแบบที่ใช้พอร์ตที่ 2 ในการรับสัญญาณ







รูปที่ 4.23 ภาพขณะวัดสัญญาณ โดยใช้สายอากาศต้นแบบที่ใช้พอร์ตที่ 3 ในการรับสัญญาณ

นอกจากนี้ยังสามารถทำตารางสรุปลักษณะโดยรอบของแต่ละจุดที่วัดทดสอบ วันที่และเวลาในการวัดทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 รูปสถานที่ วันและเวลาในการวัดทดสอบ ณ จุดต่างๆ





จุดที่	สถานที่	วันที่	เวลา
1		25/9/54 (อาทิตย์)	9.45 - 10.05 น.
2		25/9/54 (อาทิตย์)	10.10 - 10.40 น.
3		25/9/54 (อาทิตย์)	10.55 - 11.20 น.
4		25/9/54 (อาทิตย์)	9.20 - 9.40 น.

ตารางที่ 4.8 รูปตำแหน่ง วันและเวลาในการวัดทดสอบ ณ จุดต่างๆ (ต่อ)





จุดที่	สถานที่	วันที่	เวลา
5		25/9/54 (อาทิตย์)	13.10 - 13.22 น.
6		24/9/54 (เสาร์)	9.20 - 9.55 น.
7		24/9/54 (เสาร์)	10.55 - 11.20 น.
8		25/9/54 (อาทิตย์)	15.05 - 15.25 น.







ตารางที่ 4.8 รูปตำแหน่ง วันและเวลาในการวัดทดสอบ ณ จุดต่างๆ (ต่อ)

จุดที่	สถานที่	วันที่	เวลา
9		25/9/54 (อาทิตย์)	16.40 - 16.55 น.
10		25/9/54 (อาทิตย์)	17.05 - 17.20 น.
11		25/9/54 (อาทิตย์)	13.45 - 14.05 น.
12		25/9/54 (อาทิตย์)	14.40 - 14.55 น.

ตารางที่ 4.8 รูปตำแหน่ง วันและเวลาในการวัดทดสอบ ณ จุดต่างๆ (ต่อ)





จุดที่	สถานที่	วันที่	เวลา
13		25/9/54 (อาทิตย์)	16.05 - 16.25 น.
14		25/9/54 (อาทิตย์)	15.40 - 16.00 น.
15		25/9/54 (อาทิตย์)	14.10 - 14.30 น.
16		23/9/54 (ศุกร์)	16.40 - 17.10 น.

ตารางที่ 4.8 รูปตำแหน่ง วันและเวลาในการวัดทดสอบ ณ จุดต่างๆ (ต่อ)

จุดที่	สถานที่	วันที่	เวลา
17		24/9/54 (เสาร์)	14.05 - 14.20 น.
18		24/9/54 (เสาร์)	16.30 - 17.00 น.
19		23/9/54 (ศุกร์)	17.25 - 17.45 น.
20		25/9/54 (อาทิตย์)	18.15 - 18.30 น.



ตารางที่ 4.8 รูปตำแหน่ง วันและเวลาในการวัดทดสอบ ณ จุดต่างๆ (ต่อ)

จุดที่	สถานที่	วันที่	เวลา
21		24/9/54 (เสาร์)	17.10 - 17.35 น.
22		25/9/54 (อาทิตย์)	17.45 - 18.00 น.
23		24/9/54 (เสาร์)	17.55 - 18.15 น.
24		24/9/54 (เสาร์)	18.45 - 19.05 น.

นอกจากนี้ยังได้วัดระยะห่างระหว่างสถานีฐานถึงจุดที่วัดทดสอบโดยระยะห่าง  
 ในรูปที่ 4.18 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 และระยะห่างในรูปที่ 4.19 สามารถแสดงได้ดังตาราง  
 ที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานถึงจุดที่วัดทดสอบในรูปที่ 4.18

สถานีฐาน	จุดที่	ระยะห่าง (เมตร)
Onb	1	572
	2	576
	3	342
	4	729
	5	790
	11	971
L17	4	909
	5	817
	6	1,105
	7	635
	8	574
	9	806
TOT	10	912
	10	1,042
	11	910
	12	940
	13	416
	14	646
	15	668



ตารางที่ 4.10 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานถึงจุดที่วัดทดสอบในรูปแบบที่ 4.19

สถานีฐาน	จุดที่	ระยะห่าง (เมตร)
Base1	16	771
	17	724
	18	685
	19	382
	20	916
Base2	20	1,026
	21	848
	22	769
	23	522
	24	337

ซึ่งขณะวัดทดสอบจะวางสายอากาศต้นแบบโดยให้พอร์ตที่ 1 ของสายอากาศต้นแบบหันไปทางทิศตะวันตกในทุกๆ จุดที่ทดสอบ และใช้พอร์ตที่ 1 ของสายอากาศต้นแบบเป็นพอร์ตที่รับสัญญาณ แล้ววัดค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถ จากนั้นบันทึกค่าไว้และทำเช่นเดิมแต่เปลี่ยนพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณเป็นพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ตามลำดับ พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณของสายอากาศต้นแบบจะแสดงในรูปแบบที่ 4.1 สุดท้ายนำค่าที่วัดได้จากจุดที่ 1 - 24 มาเปรียบเทียบกันว่าพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณพอร์ตที่ 1 - 3 พอร์ตไหนมีค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถมากที่สุด ซึ่งพอร์ตที่ทำให้ได้ค่าที่มากที่สุดจะหันไปทางสถานีฐานที่ใกล้ที่สุด โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของแต่ละพอร์ต  
ที่ใช้รับสัญญาณจริง

จุดที่ทดสอบ	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณ	ค่าความแรงของสัญญาณ (dBm)	ค่าวิสัยสามารถ (kbps)	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด
1	1	-80.67	735.03	พอร์ตที่ 2
	2	-77	826.73	
	3	-80	779.53	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-81.33	704.93	-
2	1	-90	597.7	พอร์ตที่ 3
	2	-95	362.4	
	3	-89.83	719	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-90.33	653.8	-
3	1	-93	380.03	พอร์ตที่ 3
	2	-91	471.06	
	3	-90	545.7	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-93	395.07	-
4	1	-92.67	428.97	พอร์ตที่ 3
	2	-90	565.27	
	3	-88	629.3	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-90	453.93	-
5	1	-85	540.2	พอร์ตที่ 3
	2	-86	492.5	
	3	-80	582.7	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-86	513	-

ตารางที่ 4.11 ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของแต่ละพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณจริง (ต่อ)

จุดที่ทดสอบ	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณ	ค่าความแรงของสัญญาณ (dBm)	ค่าวิสัยสามารถ (kbps)	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด
6	1	-88.67	550.9	พอร์ตที่ 2
	2	-80.5	592.68	
	3	-82	587.67	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-83	499.73	-
7	1	-88	234.525	พอร์ตที่ 3
	2	-86	307.65	
	3	-83.75	452.4	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-84.75	420.33	-
8	1	-82.33	490.23	พอร์ตที่ 1
	2	-83	419.96	
	3	-88	413.23	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-86	450.22	-
9	1	-89	455.25	พอร์ตที่ 1
	2	-92	322.55	
	3	-90	398.95	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-90	376.575	-
10	1	-98.33	103.42	พอร์ตที่ 2
	2	-95	128.38	
	3	-98	105.64	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-97	108.5	-

ตารางที่ 4.11 ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของแต่ละพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณจริง  
(ต่อ)

จุดที่ทดสอบ	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณ	ค่าความแรงของสัญญาณ (dBm)	ค่าวิสัยสามารถ (kbps)	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด
11	1	-85	532.87	พอร์ตที่ 3
	2	-92	522.2	
	3	-83	639.47	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-85	563	-
12	1	-77	650.13	พอร์ตที่ 3
	2	-77	681.7	
	3	-74	840.3	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-75	734.03	-
13	1	-85	563.97	พอร์ตที่ 2
	2	-83	737.17	
	3	-83	643.7	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-85	642.37	-
14	1	-91	322.87	พอร์ตที่ 3
	2	-93	203.4	
	3	-89.67	339.87	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-91.67	235.83	-
15	1	-80	564.43	พอร์ตที่ 1
	2	-83	404.37	
	3	-80	535.27	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-83.88	551.9	-

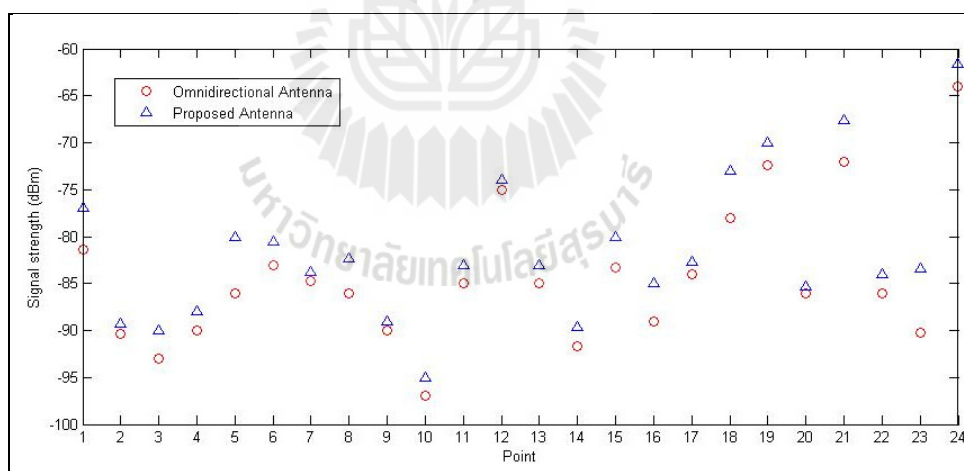
ตารางที่ 4.11 ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของแต่ละพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณจริง  
(ต่อ)

จุดที่ทดสอบ	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณ	ค่าความแรงของสัญญาณ (dBm)	ค่าวิสัยสามารถ (kbps)	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด
16	1	-89	300	พอร์ตที่ 3
	2	-87	323.7	
	3	-85	368.53	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-89	354.7	-
17	1	-83.67	432.13	พอร์ตที่ 3
	2	-84	418.47	
	3	-82.67	444.9	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-84	415.63	-
18	1	-75	462.3	พอร์ตที่ 2
	2	-73	480.3	
	3	-76	460.07	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-78	450.72	-
19	1	-70	516.47	พอร์ตที่ 1
	2	-73.75	472.28	
	3	-70.75	500.4	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-72.4	494.07	-
20	1	-86	229.46	พอร์ตที่ 3
	2	-86	233.53	
	3	-85.33	236.03	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-86	232.2	-

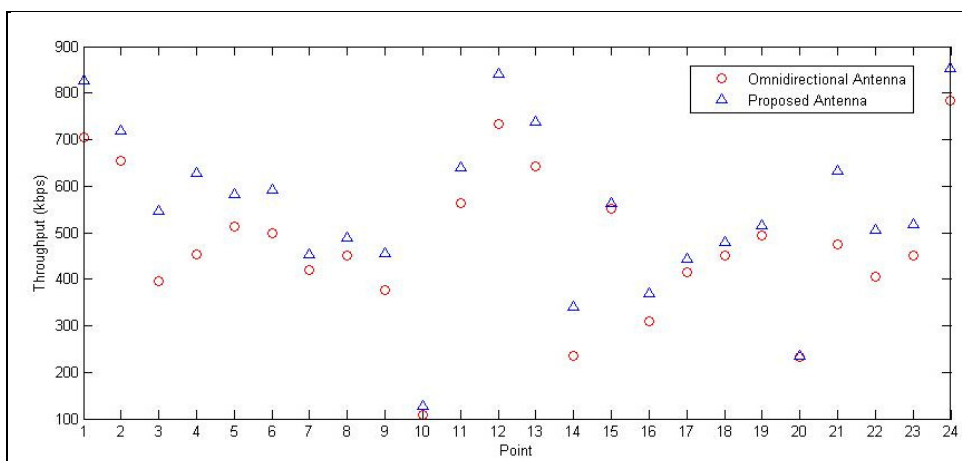
ตารางที่ 4.11 ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของแต่ละพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณจริง (ต่อ)

จุดที่ทดสอบ	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณ	ค่าความแรงของสัญญาณ (dBm)	ค่าวิสัยสามารถ (kbps)	พอร์ตที่ใช้รับสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด
21	1	-73.2	343.32	พอร์ตที่ 3
	2	-74	338.8	
	3	-67.6	633.46	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-72	475.74	-
22	1	-86.33	390.27	พอร์ตที่ 3
	2	-85	481.47	
	3	-84	504.8	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-86	405.57	-
23	1	-85	503.9	พอร์ตที่ 3
	2	-88	453.8	
	3	-83.4	518.6	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-90.2	450.9	-
24	1	-66	631.13	พอร์ตที่ 3
	2	-68	541.17	
	3	-61.67	852.2	
	สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-64	783.77	-

ในการวัดทดสอบได้มีการวัดค่าทั้งหมด 2 ค่า ค่าแรกคือค่าความแรงของสัญญาณ (signal strength) ซึ่งสามารถวัดได้จากโปรแกรมที่ได้จากผู้ผลิตการ์ดรับสัญญาณ 3จี ชื่อโปรแกรม Watcher และค่าที่สองที่วัดทดสอบคือค่าวิสัยสามารถ (throughput) ซึ่งสามารถวัดได้จากเว็บไซต์ <http://www.markab.it/meter/> จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดที่ทดสอบจะเปลี่ยนพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณทั้ง 3 พอร์ตของสายอากาศต้นแบบ เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าพอร์ตไหนจะมีค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถที่มากที่สุด และดูว่าสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมโดยรอบหรือไม่ รวมถึงวันและเวลาในการวัดทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 หรือไม่ อีกทั้งยังดูว่าสอดคล้องกับระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับจุดที่ทดสอบหรือไม่ ซึ่งค่าที่แสดงในตารางที่ 4.1 นั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแผนที่อยู่ในรูปที่ 4.18 และ 4.19 รวมทั้งดูระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับจุดที่ทดสอบ ดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ตามลำดับ พบว่าพอร์ตที่ใช้รับสัญญาณที่ทำให้ได้ค่าความแรงของสัญญาณที่มากที่สุด พอร์ตดังกล่าวจะหันไปทางสถานีฐานที่อยู่ใกล้ที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าที่มากที่สุดจากพอร์ตที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง และในจุดที่มีค่าความแรงของสัญญาณมากที่สุดจะมีค่าวิสัยสามารถที่มีความสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบค่าความแรงของสัญญาณจะแสดงดังรูปที่ 4.24 และค่าวิสัยสามารถจะแสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ค่าความแรงของสัญญาณของสายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 4.25 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 แสดงค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของ ทั้ง 24 จุด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง จาก รูปทั้ง 2 จะเห็นได้ว่า ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของสายอากาศต้นแบบมีค่า มากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางทุกๆ จุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าแต่ละจุดที่ทดสอบมีค่าความแรงของ สัญญาณและค่าวิสัยสามารถแตกต่างกัน เนื่องมาจากสาเหตุหลายประการเช่น สภาพแวดล้อมใน บริเวณที่วัดสัญญาณ ซึ่งบริเวณรอบๆ อาจมีตึก ต้นไม้หรืออาจมีลักษณะเป็นลานกว้าง สามารถดู ภาพโดยรวมได้ในรูปที่ 4.18 และ 4.19 และดูภาพรอบๆ บริเวณที่วัดทดสอบรวมถึงวันและเวลาซึ่ง แสดงในตารางที่ 4.7 ก็มีผลทำให้ค่าที่วัดทดสอบได้มีค่าต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ในช่วงเย็นเมื่อวัด ทดสอบพบว่าค่าที่สายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทางรับได้นั้นมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบ กับการวัดทดสอบในตอนเช้า และอีกปัจจัยที่สำคัญคือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและจุดที่ ทดสอบก็มีผลทำให้ค่าที่วัดทดสอบแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากสถานีฐานแต่ละจุดมีขอบเขต ในการส่งสัญญาณ ดังนั้นถ้าจุดที่ทดสอบอยู่ห่างจากสถานีฐานมากก็จะรับสัญญาณได้น้อยลงด้วย

จากการวัดค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของสายอากาศต้นแบบ และสายอากาศแบบรอบทิศทางดังที่ได้แสดงไปแล้วในรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 จากนั้นจึงได้นำมา หาค่าเฉลี่ยของค่าทั้งสองที่วัดทดสอบซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.12



ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของค่าวัดทดสอบ

ค่าที่วัดทดสอบ	ค่าความแรงของสัญญาณ (dB)	ค่าวิสัยสามารถ (kbps)
ชนิดของสายอากาศ		
สายอากาศต้นแบบ	-81.55	545.79
สายอากาศแบบรอบทิศทาง	-84.29	473.61

จากตารางที่ 4.12 สรุปได้ว่าสายอากาศต้นแบบมีค่าความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง  $-2.74$  dB และมีค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยมากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง  $72.18$  kbps ซึ่งเป็นผลมาจากสายอากาศต้นแบบมีการแผ่พลังงานได้ 4 ทิศทางแต่สายอากาศแบบรอบทิศทางมีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางจึงทำให้เกิดสูญเสียพลังงานในทิศทางที่ไม่จำเป็น จึงทำให้ค่าที่วัดทดสอบของสายอากาศต้นแบบมีค่ามากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง

#### 4.3.1 ข้อสังเกต

ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างจุดทดสอบที่มีค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถที่สูงหรือต่ำมากๆ หรือจุดที่ค่าที่วัดทดสอบทั้งสองของทั้งสายอากาศต้นแบบและสายอากาศแบบรอบทิศทางมีค่าที่ต่างกันน้อยมาก โดยจะวิเคราะห์ปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดทดสอบ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ซึ่งได้ยกตัวอย่างจุดที่วัดทดสอบมา 4 จุดเพื่อมาวิเคราะห์ในกรณีต่างๆ ที่ได้กล่าวไปข้างต้น

- จุดที่ 10 สำหรับจุดที่ 10 นี้ ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถมีค่าต่ำที่สุดซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อดูจากแผนที่ในรูปที่ 4.18 จุดที่ 10 จะอยู่ระหว่างสถานีฐาน L17 และ TOT ซึ่งจะอยู่บริเวณขอบของขอบเขตในการส่งสัญญาณ ทำให้ทั้งสายอากาศต้นแบบและสายอากาศแบบรอบทิศทางรับสัญญาณได้น้อยมาก ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณคือ  $-95$  dBm และ  $-97$  dBm ตามลำดับ นอกจากนี้เวลาที่วัดทดสอบที่จุดนี้คือช่วงเย็นดังนั้นจึงน่าจะมีการใช้งานเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่มากจึงยิ่งส่งผลให้สัญญาณที่รับได้มีค่าน้อยมากๆ

- จุดที่ 12 สำหรับจุดที่ 12 นี้ ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถมีค่าสูงซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อดูจากแผนที่ในรูปที่ 4.18 ระยะทางระหว่างจุดที่ 12 ถึงสถานีฐาน TOT เป็นลานกว้างที่ไม่มีตึก ซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนของสัญญาณ ดังนั้นในจุดนี้พอร์ตที่ 3 จึงสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด และเวลาที่วัดทดสอบคือช่วงบ่ายบริเวณที่ทดสอบไม่ค่อยมีผู้คนมากเมื่อเทียบกับตอนเย็น จึงเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลให้จุดนี้รับสัญญาณได้มาก

- จุดที่ 20 สำหรับจุดที่ 20 นี้ ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถมีค่าต่ำ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อดูจากแผนที่ในรูปที่ 4.19 จุดที่ 20 จะอยู่ระหว่างสถานีฐาน Base1 และ Base2 ซึ่งจะอยู่บริเวณขอบของขอบเขตในการส่งสัญญาณ ทำให้ทั้งสายอากาศต้นแบบและสายอากาศแบบรอบทิศทางรับสัญญาณได้น้อยมาก ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณคือ -85.33 dBm และ -86 dBm ตามลำดับ อีกทั้งพื้นที่ระหว่างจุดที่ 20 ถึงสถานีฐาน Base1 มีที่อยู่อาศัยอยู่มากจึงอาจทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณด้วยจึงทำให้จุดนี้รับสัญญาณได้น้อย

- จุดที่ 24 สำหรับจุดที่ 24 นี้ ค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถมีค่ามากที่สุด ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อดูจากแผนที่ในรูปที่ 4.19 ระยะห่างระหว่างจุดที่ 24 กับสถานีฐาน Base2 นั้นมีระยะแค่ 337 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างสถานีฐานและจุดทดสอบที่น้อยที่สุด ดังนั้น ที่จุด 24 นี้ สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศต้นแบบต่างก็มีค่าความแรงของสัญญาณที่มากกว่าในจุดอื่นๆ คือ -64 dBm และ -61.67 dBm ตามลำดับ และมีค่าวิสัยสามารถคือ 783.97 kbps และ 852.2 kbps ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบมีค่าความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถมากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง

#### 4.4 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ วัดอัตราขยาย วัดโพลาไรเซชันของสายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจริงทั้ง 3 กรณี และยังได้แสดงผลการวัดจริงในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริง ซึ่งจะแสดงผลการวัดความแรงของสัญญาณและผลการวัดค่าวิสัยสามารถโดยจะเปรียบเทียบสายอากาศสำหรับระบบสวิตช์ลำคลื่นต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง ผลการวัดทดสอบทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบสามารถก่อรูปลำคลื่นได้ 4 ทิศทางตามที่ต้องการ ทิศทางแรกคือทางด้านขวาของสายอากาศ ทิศทางที่สองคือทางด้านซ้ายของสายอากาศ ทิศทางที่สามคือทางด้านหน้าและทิศทางที่สี่คือด้านหลังของสายอากาศ ซึ่งแต่ละทิศทางจะเปลี่ยนตามพอร์ตที่รับสัญญาณ และสามารถนำสายอากาศต้นแบบไปใช้งานในบริเวณที่มีการใช้งานเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้

## บทที่ 5

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย

เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทำให้มีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ระบบจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงเพื่อตอบสนองความต้องการในด้านต่างๆ เช่น ความต้องการลดสัญญาณแทรกสอด การเพิ่มความแรงของสัญญาณ เทคนิคหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบได้คือการใช้ระบบสายอากาศก่่ง จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่พบว่า ส่วนใหญ่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้สายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางทำให้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และยังมีผู้พัฒนาเอาระบบสายอากาศก่่งแบบปรับลำคลื่นไปใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่แต่อัลกอริทึมที่ใช้มีความซับซ้อน อีกทั้งยังใช้สายอากาศแบบแถวลำดับจึงทำให้ต้องติดตั้งสายอากาศไว้นอกตัวโทรศัพท์เคลื่อนที่ จึงทำให้ไม่สะดวกเวลาใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดที่จะออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับระบบสายอากาศก่่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 ที่มีการก่อรูปลำคลื่นได้ 4 ทิศทาง มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถใช้งานในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้จริงและมีค่าใช้จ่ายในการสร้างไม่สูง ซึ่งออกแบบที่ความถี่ของระบบยูเอมทีเอส (1.92 - 2.17 GHz) โดยงานวิจัยนี้จะออกแบบสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานไปยังทิศทางต่างๆ ซึ่งนำมาวมรวมกันอยู่บนวัสดุรองรับแผ่นเดียวกัน โดยไม่ใช้สายอากาศแถวลำดับเพื่อทำให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยลง มีขนาดเล็กกะทัดรัด และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ต่ำลงอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการออกแบบสายอากาศต้นแบบที่ใช้สำหรับระบบสวิตซ์ลำคลื่น โดยงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio จากนั้นจึงสร้างสายอากาศต้นแบบ ซึ่งสายอากาศจะมีการก่อรูปลำคลื่นได้ 4 ทิศทาง ซึ่งจะเกิดขึ้นได้โดยการสลับตำแหน่งพอร์ตที่ใช้ในการรับสัญญาณ และนำสายอากาศต้นแบบที่สร้างจริงไปทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อยืนยันว่าสายอากาศสามารถก่อรูปลำคลื่นได้ 4 ทิศทางจริง ตามการจำลองแบบในโปรแกรม นอกจากนี้ยังได้นำสายอากาศที่สร้างขึ้นไปทำการทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริง เพื่อวัดความแรงของสัญญาณและค่าวิสัยสามารถ ซึ่งเปรียบเทียบกันระหว่างสายอากาศต้นแบบและสายอากาศแบบรอบทิศทางอีกด้วย

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากบทที่ 4 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ เมื่อใช้พอร์ตที่ 3 ในการรับสัญญาณ แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้ยังมีขนาดกว้างอาจทำให้พอร์ตนี้รับสัญญาณข้างเคียงมาด้วย ปัญหานี้อาจเกิดจากการสร้างออกแบบรูปแบบของสายอากาศต้นแบบ ดังนั้นควรออกแบบสายอากาศให้รูปร่างของสายอากาศให้ได้ลำคลื่นที่แคบลง

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศที่สามารถใช้กับระบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 โดยสายอากาศมีลำคลื่นต่างกัน 4 ทิศทาง ซึ่งจะต่างกันเนื่องจากการสลับตำแหน่งพอร์ตที่ใช้ในการรับสัญญาณ แต่การสวิตซ์ลำคลื่นยังต้องอาศัยคนในการควบคุมการปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการรับสัญญาณของสายอากาศต้นแบบ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตจึงควรมีการออกแบบระบบควบคุมการสวิตซ์ลำคลื่นที่สามารถกำหนดให้สายอากาศเลือกใช้ลำคลื่นที่เหมาะสมที่สุด (ลำคลื่นที่มีการรับสัญญาณได้สูงที่สุด) ได้โดยอัตโนมัติ เช่นอาจสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ผ่านแผงวงจรควบคุม เป็นต้น และอีกแนวทางในการพัฒนาคือ นำสายอากาศต้นแบบไปพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง แต่ยังคงให้มีทิศทางของลำคลื่นเท่าเดิม เนื่องจากสายอากาศต้นแบบในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มี 4 ลำคลื่นในทิศทางที่ต่างกัน และขนาดที่ปรับได้ตอนนี้คือประมาณขนาดของโทรศัพท์เคลื่อนที่ไอโฟนคือขนาดประมาณ  $55 \times 110 \times 1.67$  มิลลิเมตร ซึ่งอาจจะทำให้เล็กลงได้อีกโดยใช้วัสดุฐานรองชนิดอื่น

## รายการอ้างอิง

- Ahmed, M. B., Bouhorma, M. and Ouai, F.E. (2009) **A new miniaturized patch antenna for wireless systems: GSM, UMTS, HIPERLAN.** IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. pp. 191 - 195.
- Alvaro. A. A. de Salles, Claudio R. F., and Mateus B. (2003) **FDTD Simulations and Measurements on Planar Antennas for Mobile Phones.** Microwave and Optoelectronics Conference, 2003. IMOC 2003. Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT\_S International. Vol.2, pp. 1043 - 1048
- Balanis, C.A. (1997). **Antenna Theory Analysis and Design.** John Wiley & Sons. New York.
- Braun, C., Nilsson, M., and Murch R.D. (2009) **Measurement of the Interference Rejection Capability of Smart Antennas on Mobile Telephones.** Vehicular Technology Conference, IEEE 49 th, Vol.2, pp. 1068 - 1072.
- Gokce, B., Karakus, C., and Akleman, F. (2009) **Microstrip Patch Antenna Design for UMTS Handsets.** Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED 2009. International Seminar/Work Shop on 2009, pp. 171 - 174.
- Ghouddane, N., and Essaïdi, M. (2009) **A Novel Compact Multiband Planar Antenna for Wireless and Mobile Handsets.** Microwave Symposium (MMS), Mediterranean 2009, pp. 1 - 4.
- Jin, D., Xiao, S., Gao, S., Tang, M, and Wang, B. (2010) **Ultra Wide-Band Slot Antenna Based on Liquid Crystal Polymer Material for Millimeter Wave Application.** Ultra-Wideband (ICUWB), 2010 IEEE International Conference, Vol.1, pp. 1 - 4.
- Jun, L., Donglin, S., Yazhou, W. (2009) **Design of a millimeter-wave tapered-slot antenna.** Antennas Propagation & EM Theory, ISAPE 2006 7th International Symposium, pp. 1-3.
- Jan, J.Y., and Su, J.W. (2005) **Bandwidth Enhancement of a Printed Wide-Slot Antenna with a Rotated Slot.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.53, No.6, June 2005, pp. 2111 - 2114.

- Kraus, J.D. **Antennas**. Second Edition, Electrical Engineering and Astronomy, The Ohio state University
- Koyanagi, Y. Yamamoto, A., and Ogawa, K. (2005) **Experimental study of the Performance of Handset Adaptive Array Antennas in the Vicinity of a Human Operator**. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE, Vol.1B, pp. 323 - 326.
- Herscovici, N. and Christodoulou, C. (2000) **Smart Antennas**. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.42, No.3, June 2000, pp. 129 - 136.
- Ogawa, K., Yamamoto, A., and Takada, J. (2005) **A Handset Adaptive Array Antenna for the Reduction of Multipath Co-Channel Interference in a Realistic Talking Situation**. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE, Vol.1B, pp. 327 - 330.
- Qu, S.W., Li, J.L., Chen, J.X., and Quan, X. (2007) **Ultrawideband Strip-Loaded Circular Slot Antenna with Improved Radiation Patterns**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.55, No.11, November 2007, pp. 3348 - 3353.
- Shin, S. H., Johnson, K., Axness, T., and Berkowitz, J.S. (2005) **Subscriber Based Smart Antenna for wireless Mobile Networks: Design, Algorithm, and Field Test Result**. Communication, ICC 2005 IEEE, International Conference, Vol.4, pp. 2239 - 2243.
- Sung, Y.J. (2011) **Bandwidth Enhancement of a Microstrip Line-Fed Printed Wide Slot Antenna With a Parasitic Center Patch**. Antennas and Propagation, IEEE Transactions, Vol.60, Issue.4, pp. 1712 - 1716.
- Steven Yang, S.L., Kishk, A.A. and Lee, K.F. (2008) **Wideband Circularly Polarized Antenna with L-Shaped slot**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.56, No.6, June 2008, pp. 1780 - 1783.
- Garg, V.K., Laxpati, S.R., and Wang, D. (2004) **Use of Smart Antenna System in Universal Mobile Communications Systems (UMTS)**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.3, pp. 66 - 70.
- Yahya, M., Awang, Z. (2010) **Cross Polarization Ratio Analysis of Circular Polarized Patch Antenna**. Electromagnetics in Advanced Application (ICEAA), 2010 International Conference, pp. 442 - 445.

- Yeung, S.H., Man, K.F., and Chan, W.S. (2011) **A Bandwidth Improved Circular Polarized Slot Antenna Using a Slot Composed of Multiple Circular Sectors.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.59 No.8, August 2011, pp. 3065 - 3070.
- Yuan, Q., Suguro, T., Chen, Q., Sawaya, K., Kudoh, E., and Adachi, F. (2006) **Performance Study of W-CDMA Adaptive Array Antennas.** Antennas and Propagation Society International Symposium, 2006 IEEE, pp. 4573 - 4576.
- Zurcher, F.J., and Gardiol, F.E (1995) **Broadband Patch Antennas** Artech House Boston, London
- Zervos, T., Alexandridis, A.A., Lazarakis, F., Dangakis, K., (2009) **Patch Antenna with Polarization Agility using Ferrimagnetic Materials.** Loughborough Antennas and Propagation Conference, Loughborough, UK, pp. 541 - 544.
- Zervos, T., Alexandridis, A.A., Lazarakis, F., Stamopoulos, D., Pissas, M., Dangakis, K. (2010) **Epoxy Bonded Ferrimagnetic Compounds as Patch Antennas Substrate.** Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference, pp. 1 - 5.







## ภาคผนวก

### บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

**Monthippa Uthansakul** and **Peerapong Uthansakul**, “Antenna Design for Switched-Beam Systems on Mobile Terminal”, accepted for publication in WSEAS Transactions.

