

สายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยู
สำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

A U-SHAPED RECTANGULAR PRINTED DIPOLE ARRAY ANTENNA
FOR 5G WIRELESS COMMUNICATION BASE STATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2567
KMITL-2024-EN-M-017-269

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A U-SHAPED RECTANGULAR PRINTED DIPOLE ARRAY ANTENNA
FOR 5G WIRELESS COMMUNICATION BASE STATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-M-017-269

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูสำหรับ สถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5
นักศึกษา	นายฤกษ์ชัย พุกรักษา
รหัส	62601099
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 องค์ประกอบของสายอากาศประกอบด้วยตัวแพร่กระจายคลื่นที่เป็นไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูสายอากาศองค์ประกอบมีช่วงกว้างความถี่คิดเป็น 68.25% เมื่อออกแบบเพื่อรักษา $|S_{11}|$ มีค่าน้อยกว่า -10 dB ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 3.82 GHz สร้างจากสายอากาศองค์ประกอบจำนวน 4 ส่วน วางเรียงตัวในแนวนอนบนแผ่นสะท้อน มีผลการจำลองและผลการทดสอบของสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 พบว่ามีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ตลอดช่วงกว้างความถี่ 3.00 - 3.82 GHz ผลการทดสอบค่าอัตราขยายได้ 6.49 dBi ตลอดช่วงความถี่ 3.00 - 3.82 GHz และมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบในแนวตั้งประมาณ $101.45^\circ \pm 5^\circ$ และแนวนอนประมาณ $22.44^\circ \pm 5^\circ$ สำหรับช่วงความถี่ 3.5 GHz และผลการทดลองนี้สามารถยืนยันได้ถึงประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูที่ออกแบบโดยแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A U-Shaped Rectangular Printed Dipole Array Antenna for 5G Wireless Communication Base Station
Student	Mr. Rerkchai Pukraksa
Student ID.	62601099
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunication Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents a rectangular patch array antenna for 5th generation wireless communication base station. The antenna components consist of a radiating element in the form of a rectangular patch with a frequency bandwidth of approximately 68.25%, designed to maintain $|S_{11}|$ values below -10 dB throughout the frequency range from 3.00 GHz to 3.82 GHz. The antenna is composed of four elements arranged horizontally on a reflective surface, resulting in simulations and tests showing that the rectangular patch array antenna achieves impedance matching with $|S_{11}|$ values below -10 dB across the frequency range of 3.00 - 3.82 GHz. Experimental results indicate a gain of 6.49 dBi across the frequency range of 3.00 - 3.82 GHz, with a narrow vertical beamwidth of approximately $101.45^\circ \pm 5^\circ$ and a horizontal beamwidth of approximately $22.44^\circ \pm 5^\circ$ at the frequency of 3.5 GHz. These experiments confirm the effectiveness of the designed rectangular patch array antenna, demonstrating its suitability for deployment in 5G wireless communication base station.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเรียบร้อย ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจากศาสตราจารย์ ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นผู้ช่วยเหลือ ดูแลในด้านการศึกษาและงานวิจัยทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการวิจัยตลอด ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์อีกท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร. สมพล โกศลวิตร ที่ได้ร่วมประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำพื้นฐานด้านวิชาการ ทำให้ปัจจุบันนี้ข้าพเจ้านำความรู้ที่ได้นำมาพัฒนาต่อยอดงานเพื่อใช้ในการทำงานวิจัยในระดับปริญญาโทให้สำเร็จลุล่วง ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสมาชิกในหอปฏิบัติกรรมการสื่อสารไร้สายทุกท่าน ที่ให้การแนะนำ ช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ฤกษ์ชัย พุกรักษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในประเทศไทย.....	1
1.2 การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	2
1.3 ความถี่สำหรับการติดต่อสื่อสารของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	3
1.4 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและวิวัฒนาการการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 วิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย.....	7
2.3 เทคโนโลยีสถาปัตยกรรมเครือข่ายการสื่อสารไร้สายตั้งแต่รุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 5.....	12
2.4 การใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในอดีตถึงปัจจุบันในประเทศไทย.....	15
2.4.1 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 1.....	15
2.4.2 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 2.....	16
2.4.3 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 3.....	15
2.4.4 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 4.....	16
2.4.5 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 5.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 มาตรฐานและลักษณะทางเทคนิคของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	17
2.6 คลื่นความถี่เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	19
2.7 การนำเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านดาวเทียมมาใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.	21
2.8 ย่านความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล.....	23
2.9 คลื่นความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากลประเทศไทย.....	25
2.10 การศึกษาวิจัยที่มีมาก่อน.....	27
2.10.1 งานวิจัยสายอากาศชนิดไดโพลแผ่นพิมพ์พิมพ์.....	28
2.10.2 งานวิจัยสายอากาศการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สำหรับสถานีฐานที่มีก่อน..	33
2.11 บทสรุป.....	42
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	44
3.1 สายอากาศไดโพลสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ตั้งต้น.....	44
3.2 บทสรุป.....	59
บทที่ 4 การพัฒนาองค์ประกอบสายอากาศด้วยสายอากาศแถวลำดับ.....	61
4.1 ทฤษฎีสายอากาศแถวลำดับที่เกี่ยวข้อง.....	61
4.2 แถวลำดับสององค์ประกอบ.....	62
4.3 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับ.....	69
4.4 ผลกระทบจากการวิวัฒนาการสายอากาศต้นแบบ.....	74
4.5 การทดสอบสายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	77
4.6 สรุปผลทดสอบสายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5..	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	83
เอกสารอ้างอิง.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	87
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วิวัฒนาการของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายตั้งแต่รุ่นที่ 1 จนถึงรุ่นที่ 5.....	8
2.2	ความแตกต่างทาง Physical Layer ระหว่างการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 และรุ่นที่ 4 (LTE).....	14-15
2.3	สรุปคุณสมบัติของสายอากาศชนิดไดโพลแบบพิมพ์ที่มีมาก่อน.....	32-33
2.4	สรุปคุณลักษณะของสายอากาศการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สำหรับสถานีฐานจากผลงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	40-41
3.2	ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio.....	47
3.3	ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio.....	51
3.4	ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio.....	55
3.5	ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio.....	59
4.1	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ.....	70
4.2	ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio.....	72
4.3	ผลการจำลองและการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับที่นำเสนอ.....	80

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ระบบการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่.....	7
2.2	เส้นทางวิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 5.....	13
2.3	มาตรฐานสำหรับการสื่อสารไร้สาย 5 ตาม ITU-R M.2083-0 (ITU, 2015).....	18
2.4	เทคโนโลยีการสื่อสารดาวเทียมที่ประยุกต์ใช้กับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5.....	23
2.5	โครงสร้างสายอากาศ ในรูปที่ 4 , 6 ของอ้างอิง [5].....	29
2.6	แสดงผลการจำลองและการวัดค่าสายอากาศ ในรูปที่ 7, 10 ของอ้างอิง [5].....	29
2.7	โครงสร้างสายอากาศของอ้างอิง [6].....	30
2.8	ผลการวัดค่าการสูญเสียสะท้อนกลับและอัตราขยายสายอากาศในรูปที่ 2 ของอ้างอิง [6].....	30
2.9	สายอากาศจากอ้างอิง [7].....	30-31
2.10	สายอากาศจากอ้างอิง [8].....	31
2.11	สายอากาศจากอ้างอิง [9].....	32
2.12	สายอากาศจากอ้างอิง [10].....	34-35
2.13	สายอากาศจากอ้างอิง [11].....	36
2.14	สายอากาศจากอ้างอิง [12].....	37
2.15	สายอากาศจากอ้างอิง [13].....	38
2.16	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [14].....	39-40
2.17	การสำรวจความต้องการใช้งาน 3 ด้าน ผู้ใช้งานการสื่อสารไร้สายโดย ITU.....	43
3.1	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าออกแบบที่ความถี่ 3.5 GHz.....	44-45
3.2	ผลจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	45
3.3	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ ความถี่ 3.5 GHz.....	46-47
3.4	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแผ่นสะท้อนคลื่น.....	48
3.5	ผลจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น.....	49

สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	50-51
3.7	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นและองค์ประกอบร่องตัด U-Shape.....	52
3.8	ผลจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นและองค์ประกอบร่องตัด U-Shape.....	53
3.9	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	54-55
3.10	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเจาะร่องวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape.....	56
3.11	ผลจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศไดโพลเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นและองค์ประกอบร่องตัด U-Shape.....	57
3.12	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	58-59
4.1	การจำลองแวลวลำดับสององค์ประกอบ ที่วางตามแนวแกน z.....	62
4.2	การจำลองที่สนามระยะไกลของแวลวลำดับจำนวน N องค์ประกอบของแหล่งกำเนิดแบบจุด ตามแนวแกน z	64
4.3	โครงสร้างของสายอากาศแวลวลำดับ.....	71
4.4	การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแวลวลำดับด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio	72
4.5	ผลจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศแวลวลำดับ.....	72
4.6	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแวลวลำดับที่ความถี่ 3.5 GHz.....	73
4.7	การเปรียบเทียบวิวัฒนาการผลจำลอง $ S_{11} $ ของการออกแบบสายอากาศต้นแบบ.....	74-76

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	การเปรียบเทียบวิวัฒนาการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระนาบสนามไฟฟ้า (xz plane) ระนาบสนามแม่เหล็ก (yz plane) ของการออกแบบสายอากาศ ต้นแบบ.....	76
4.9	สายอากาศแถวลำดับต้นแบบที่นำเสนอ.....	77
4.10	เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ $ S_{11} $ และ อัตราขยายของ สายอากาศแต่ละอีลีเมนต์ฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ.....	78
4.11	เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแถวลำดับต้นแบบสำหรับฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่ นำเสนอ.....	78-79
5.1	สายอากาศไดโพลร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า องค์กรประกอบร่องตัดรูปตัว U บนแผ่น สะท้อนคลื่น.....	82
5.2	สายอากาศแถวลำดับ 4 องค์กรประกอบ บนแผ่นสะท้อนคลื่น.....	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในประเทศไทย

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในรุ่นที่แรกเริ่มต้นขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1950 ถึง ประมาณ ค.ศ. 1980 โดยเริ่มต้นจากการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 หรือ The first generation of wireless mobile telecommunications ซึ่งการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 เป็นระบบแอนะล็อก โดยในช่วงแรก มีการเริ่มใช้งานการติดต่อสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 ในประเทศญี่ปุ่น และในประเทศยุโรปตอนเหนือ ต่อมาในปี ค.ศ. 1982 องค์การบริหารงานไปรษณีย์และโทรคมนาคมของสหภาพยุโรป หรือ The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) ได้กำหนดมาตรฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 หรือ 2G โดยมีการใช้เทคโนโลยีหลักของโทรศัพท์เคลื่อนที่ คือ Global System for Mobile communications (GSM) ซึ่งได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วโลกในปี ค.ศ. 1991 ลักษณะเด่นของการติดต่อสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายที่ในรุ่นที่ 2 คือ การส่งสัญญาณด้วยระบบดิจิทัล ซึ่งมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าระบบแอนะล็อก ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับมีความคมชัดมากขึ้น นอกจากนี้การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 ยังสามารถส่งข้อความ หรือ SMS และสามารถเข้าใช้งานอินเทอร์เน็ตในเบื้องต้นได้ด้วย การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 หรือ 3G เป็นรุ่นที่เริ่มต้นของการสื่อสารไร้สายความเร็วสูง (Mobile broadband) โดยตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 2000 ซึ่งเทคโนโลยีของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในรุ่นนี้ ไม่ได้มีไว้ใช้เพียงแค่โทรเข้าและโทรออกเท่านั้น แต่ยังสามารถรองรับการเข้าใช้งานอินเทอร์เน็ต หรือ data service ทั้งการโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต (Voice over IP) การพูดคุยผ่านวิดีโอ (Video call) การเล่นเกมออนไลน์ (Game online) และยังสามารถรับชมรายการโทรทัศน์ออนไลน์ (TV online) ได้ด้วย โดยมาตรฐานการติดต่อสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 นี้คือ มาตรฐาน IMT-2000 ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระบบ Long Term Evolution หรือ LTE โดยระบบ LTE นี้เป็นจุดเริ่มต้นของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 โดยมาตรฐานของระบบที่มีความสำคัญได้แก่ มาตรฐาน IMT-Advanced ของ International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) และมาตรฐาน LTE Release 10 ของ 3PP มาตรฐานทั้งสองมาตรฐานได้มีการกำหนดระบบการติดต่อสื่อสารเคลื่อนที่ ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น มีประสิทธิภาพการใช้งานคลื่นความถี่ที่เพิ่มขึ้น และความหน่วง (Latency) ของระบบน้อยลง เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายในรุ่นที่ 3 นี้ มีการใช้ Carrier Aggregation หรือการรวมช่องความถี่จำนวนมากเพื่อให้ได้ความจุที่มากขึ้นและสามารถส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการใช้หลักการ Multiple Input Multiple Output (MIMO) หรือการใช้สายอากาศจำนวนมาก ในการรับและส่งสัญญาณ ให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลได้มากขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย รุ่นที่ 5 หรือ 5G หรือมาตรฐาน IMT for 2020 and beyond ของ ITU-R มีวัตถุประสงค์ต่างจากรุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 4 โดยการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับความต้องการในการติดต่อสื่อสารทุกสิ่งกับภาคส่วนต่าง ๆ ทั้งด้านเศรษฐกิจ ด้านการเกษตร ด้านการศึกษา เป็นต้น โดยสามารถนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงขึ้น ซึ่งเป็นรุ่นที่ของการเปลี่ยนผ่านสู่สังคมดิจิทัลเต็มรูปแบบกว่าได้ หรือที่เรียกว่า Internet of things (IoT)

1.2 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 นั้นมีอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย เทียบเท่ากับการติดต่อสื่อสารผ่านระบบไฟเบอร์ออปติก เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จึงจะมีบทบาทสำคัญในด้านต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น เกษตรกรรม ยานยนต์ การขนส่ง สิ่งก่อสร้าง พลังงาน การเงิน สุขภาพ อุตสาหกรรม ความบันเทิง ความมั่นคงปลอดภัย และพฤติกรรมผู้บริโภค โดย ITU-R ได้กำหนดมาตรฐาน IMT for 2020 and beyond ซึ่งมีขีดความสามารถในด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้นจากมาตรฐาน IMT-Advanced ของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 โดยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จะมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดเพิ่มขึ้น (Peak data rate), อัตราการส่งข้อมูลที่ได้รับเพิ่มขึ้น (User experienced data rate), ความหน่วงของระบบ (Latency) ลดลง, การรับข้อมูลในขณะที่เคลื่อนที่ (Mobility) มีความเร็วเพิ่มขึ้น, ความหนาแน่นในการเชื่อมต่อ (Connection density) ซึ่งระบบสามารถรองรับจำนวนอุปกรณ์ได้เพิ่มขึ้น, ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโครงข่าย (Energy efficiency) เพิ่มขึ้น, ประสิทธิภาพการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum efficiency) เพิ่มขึ้น และอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดต่อพื้นที่ (Area traffic capacity) เพิ่มขึ้น โดยขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้นนี้ จะรองรับการทำงานของ การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ใน 3 ด้านหลัก

1. eMBB หรือ enhanced Mobile Broadband คือ การใช้งานในลักษณะที่ต้องการการส่งข้อมูลความเร็วสูงในระดับกิกะบิตต่อวินาที (Gbps) ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการการรับและส่งข้อมูลที่มากขึ้น

2. mMTC หรือ massive Machine Type Communications คือ การเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน โดยมีปริมาณมากถึงระดับล้านอุปกรณ์ต่อตารางกิโลเมตร โดยการส่งข้อมูลของอุปกรณ์นั้น จะเป็นการส่งข้อมูลปริมาณน้อย ๆ ที่ไม่ต้องการความเร็วสูง หรือความหน่วงเวลาต่ำ อุปกรณ์มีราคาถูก และมีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่มากกว่าอุปกรณ์ทั่วไป ซึ่งทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เหมาะสมกับการทำงานของอุปกรณ์ประเภท Internet of things (IoT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. URLLC หรือ Ultra-reliable and Low Latency Communications คือความต้องการส่งข้อมูลที่มีความเสถียรมาก และมีความหน่วงเวลา (Latency) ต่ำในระดับ 1 มิลลิวินาที ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เหมาะกับระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง (Critical application) เช่น การผ่าตัดทางไกล (Telesurgery), การควบคุมเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม (Controlling machinery in industrial plants) หรือการควบคุมอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

1.3 ความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

ความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จะมีทั้งความถี่ที่ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายระบบเดิม และความถี่ใหม่เพิ่มเติม โดยสามารถแบ่งความถี่ได้ตามคุณสมบัติของคลื่นความถี่ที่แตกต่างกันได้ ดังนี้

1) ความถี่ต่ำกว่า 1 GHz (Low Band) เป็นความถี่เพื่อรองรับสัญญาณครอบคลุม (Coverage) เป็นบริเวณกว้าง โดยมีความถี่ดังนี้

- ความถี่ 700 MHz 900 MHz 1800 MHz และ 2100 MHz เป็นความถี่ที่มีการใช้สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (International Mobile Telecommunications – IMT) ในประเทศไทยในปัจจุบัน

2) ความถี่ระหว่าง 1 GHz และ 6 GHz (Mid Band) เป็นความถี่ที่รองรับความจุของโครงข่าย (Capacity) โดยมีความถี่ดังนี้

- ความถี่ L-band (1427 - 1518 MHz) เป็นความถี่ที่การประชุมใหญ่ระดับโลกว่าด้วยวิทยุรุ่นที่มกราคม ค.ศ. 2015 (World Radiocommunication Conference 2015: WRC-15) ได้กำหนดให้ใช้สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่ สำหรับประเทศไทยปัจจุบันยังคงมีการใช้งานในกิจการด้านการติดต่อสื่อสารแบบประจำที่

- ความถี่ C-band (3300 4200 MHz และ 4400 5000 MHz) มีบางประเทศนำมาทำการทดลองใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดย ความถี่ 3400 - 3600 MHz มีการระบุเป็นความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล ในข้อบังคับวิทยุของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ อย่างไรก็ตาม การนำความถี่มาใช้งานในทางปฏิบัติจะต้องพิจารณาการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันกับกิจการอื่นด้วย โดยในประเทศไทย ความถี่ 3400 - 4200 MHz ยังมีการใช้งานในกิจการดาวเทียมอยู่ และความถี่ 4400 - 5000 MHz มีการใช้งานในกิจการด้านการติดต่อสื่อสารแบบประจำที่

3) ความถี่สูงกว่า 24 GHz (High Band) เป็นความถี่ที่อยู่ในช่วงความถี่ที่เรียกว่า millimeter-wave ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ที่มีความยาวคลื่นสั้นมากในระดับมิลลิเมตร ปัจจุบันยังมีการใช้งานคลื่นความถี่ในช่วงนี้ไม่มากนัก มีขนาดความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) ที่กว้างมากสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองรับความจุได้สูงมาก (ultra-high capacity) และความหน่วง (latency) ที่ต่ำมาก โดยสถานีฐานส่งสัญญาณได้ครอบคลุมรัศมีขนาดเล็ก โดยมุ่งเน้นในพื้นที่ที่มีปริมาณการใช้งานสูงหรือมีความต้องการอัตราข้อมูลที่สูง โดยมีความถี่ดังนี้

- ความถี่ 24.25-27.5 GHz, 37-40.5 GHz, 42.5-43.5 GHz, 45.5-47 GHz, 47.2-50.2 GHz, 50.4-52.6 GHz, 66-76 GHz และ 81-86 GHz ซึ่งมีการกำหนดให้ความถี่ใช้ในกิจการเคลื่อนที่เป็นกิจการหลักในข้อบังคับวิทยุ หากประเทศใดประสงค์จะนำความถี่เหล่านี้มาใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ก็สามารถทำได้ แต่ความถี่ดังกล่าวนี้ยังไม่ได้รับการยอมรับในระดับสากล

- ความถี่ 31.8-33.4 GHz, 40.5-42.5 GHz และ 47-47.2 GHz ปัจจุบันยังไม่ได้มีการกำหนดความถี่ให้กิจการเคลื่อนที่เป็นกิจการหลักในข้อบังคับวิทยุ โดยหากจะนำมาใช้ใ้ในกิจการการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ต้องมีการกำหนดความถี่เพิ่มเติมให้กิจการเคลื่อนที่เป็นกิจการหลัก และระบุให้เป็นยความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยการประชุม WRC-19

- ความถี่ 27.5 29.5 GHz เป็นความถี่ที่มีการกำหนดให้ใช้ในกิจการเคลื่อนที่ในข้อบังคับวิทยุอยู่แล้ว มีบางประเทศเช่น สหรัฐอเมริกา เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น ยังอยู่ระหว่างพิจารณาสำหรับนำมาใช้กับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เพิ่มเติม ซึ่งการนำความถี่มาใช้งานในทางปฏิบัติจะต้องพิจารณาการใช้ความถี่ร่วมกันกับกิจการอื่นด้วย โดยในประเทศไทย ความถี่นี้มีการใช้งานในกิจการดาวเทียม

1.4 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มีกำเนิดมาจากความต้องการในการพัฒนาเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่มีประสิทธิภาพและสามารถรองรับการใช้งานที่มากขึ้นในโลกที่เชื่อมต่ออยู่ตลอดเวลา ต่อมาก็มีความต้องการในการรองรับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในด้านการสื่อสารและการเชื่อมต่อเครือข่ายข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การพัฒนาของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เกิดขึ้นเนื่องจากการพัฒนาของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 (LTE) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 (LTE) นำเสนอความเร็วในการสื่อสารที่ดี แต่การเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถรองรับอุปกรณ์มากมายและการใช้งานที่ต้องการความเร็วสูงทำให้เกิดความต้องการในการพัฒนามาตรฐานใหม่ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มีการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการให้บริการที่หลากหลาย เช่น การสื่อสารแบบมีความเร็วสูง การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) และการรองรับการใช้งานที่มีความต้องการความเสถียร โดยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ได้มีการพัฒนาทางเทคนิคที่กว้างขึ้น รวมถึงการใช้งานคลื่นความถี่ที่สูงขึ้น เช่น เทคโนโลยี MIMO (Multiple Input Multiple Output) และการใช้งานระบบความหลากหลายของคลื่นความถี่ มีการกำหนดมาตรฐานในการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยองค์กร

มาตรฐานทางวิชาการ เพื่อให้ทุกคนในอุตสาหกรรมสื่อสารสามารถทำงานร่วมกันได้ อีกทั้งได้มีการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบและการทดลองอย่างแพร่หลาย เพื่อปรับปรุงความเสถียร และประสิทธิภาพในการให้บริการ โดยจะเห็นได้ว่า ส่วนประกอบของระบบที่สำคัญในการแพร่สัญญาณในการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ก็คือ สถานีฐาน ซึ่งสถานีฐานหรือที่รู้จักกันว่า "cell site" หรือ "cell tower" เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายมือถือ หน้าที่หลักคือเพื่อให้การสื่อสารไร้สายระหว่างอุปกรณ์เคลื่อนที่ (เช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต และอุปกรณ์ไร้สายอื่น ๆ) และเครือข่ายหลักของผู้ให้บริการโทรคมนาคม เป็น สถานีฐานที่สำคัญในการเปิดให้บริการการสื่อสารเสียงและข้อมูลผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์ สถานีฐานให้บริการการครอบคลุมไร้สายภายในพื้นที่ซึ่งเรียกว่า "เซลล์" การติดตั้งสถานีฐานหลาย ๆ ตัวถูกวางแผนไว้อย่างเชิงกลยุทธ์เพื่อครอบคลุมพื้นที่บริการที่ใหญ่ขึ้น สถานีฐานใช้สัญญาณความถี่วิทยุ (RF) เพื่อส่งและรับข้อมูลจากอุปกรณ์เคลื่อนที่ สัญญาณ RF เหล่านี้นำเสนอการสื่อสารเสียง ข้อความ และข้อมูล ซึ่งสถานีฐานได้รับการติดตั้งเสาอากาศเพื่อส่งและรับสัญญาณ RF ตัวรับส่ง ซึ่งรวมการทำงานของตัวส่งและตัวรับ ใช้ในการรองรับ Facilitat การสื่อสารสองทางกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ ใน วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอการศึกษา ออกแบบ และทดสอบสายอากาศ สำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 3.82 GHz เพื่อส่งและรับสัญญาณระหว่างสถานีฐานกับเครือข่ายหลัก ทำให้สามารถโอนข้อมูลระหว่างสถานีฐานและเครือข่ายหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความมุ่งหมายเพื่อออกแบบสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นสายอากาศตั้งต้น ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการสร้าง ซึ่งจะวิเคราะห์จากค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.00 - 3.82 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และอัตราขยายสายอากาศ โดยศึกษาออกแบบด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio เมื่อได้สายอากาศตั้งต้นที่เหมาะสม จึงพัฒนาและออกแบบองค์ประกอบของสายอากาศตั้งต้น โดยจะศึกษาออกแบบสายอากาศองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ที่มีค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ 3.5 GHz จากนั้นทำการพัฒนาสายอากาศแถวลำดับเพื่อหาจำนวนองค์ประกอบที่เหมาะสม สำหรับสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยู สำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 (A U-SHAPED RECTANGULAR PRINTED DIPOLE ARRAY ANTENNA FOR 5G WIRELESS COMMUNICATION BASE STATION)

วัตถุประสงค์

1. ได้สายอากาศไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยู
2. ได้สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. ได้สายอากาศแถวลำดับทำงานย่านความถี่ตั้งแต่ 3.00 - 3.82 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ได้ผลวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) หรือค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ของสายอากาศที่นำเสนอซึ่งสร้างจากวัสดุแผ่นทองแดงและแผ่นอะลูมิเนียม กับการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยู
2. ออกแบบและสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. ออกแบบและสร้างสายอากาศแฉวลำดับทำงานย่านความถี่ตั้งแต่ 3.00 - 3.82 GHz
4. เปรียบเทียบผลการจำลองและการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศนำเสนอที่สร้างขึ้น ซึ่งจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็นจำนวน 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ความมุ่งหมายวัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับไดโพลประจำสถานีฐาน และงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศประจำสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า พร้อมทั้งศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ เพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 3.00 - 3.82 GHz และมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ใช้งาน

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของสายอากาศแฉวลำดับ การออกแบบ การจำลอง การวิเคราะห์ สร้างและทดสอบ ในส่วนของสายอากาศแฉวลำดับ

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมทั้งแนวทางการศึกษาสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

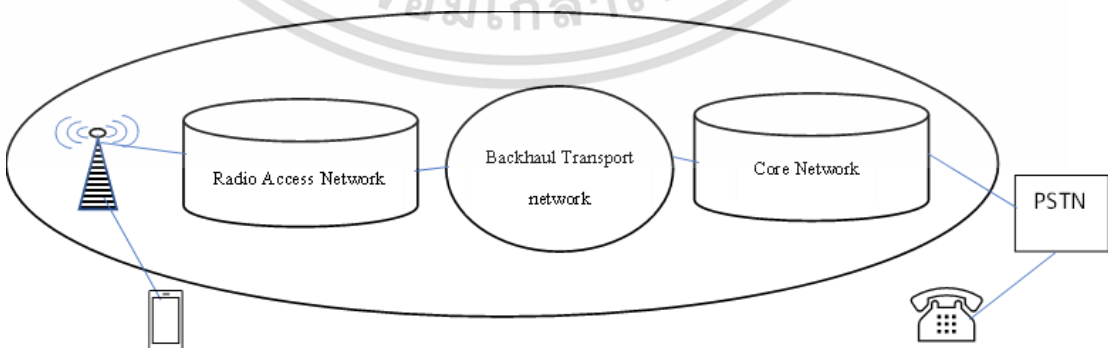
ทฤษฎีและวิวัฒนาการการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและวิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่งเริ่มมีวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 หรือเรียกว่า การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 จนถึงปัจจุบันนี้ ซึ่งเป็นการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 และงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศไดโพลแถบความถี่กว้าง และสายอากาศประจำสถานีฐานส่งสัญญาณ

2.2 วิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย

ระบบการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ประกอบด้วย 2 ระบบย่อย คือ ระบบเครือข่ายการเข้าถึงทางวิทยุ (Radio Access Network) มีหน้าที่หลักคือ เป็นทางเข้าสู่ระบบเครือข่ายสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย (เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่) โดยทำหน้าที่เป็นช่องทางการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุระหว่างอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ กับเครือข่ายหลัก (Core Network) ของผู้ให้บริการ และระบบเครือข่ายหลัก ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังปลายทางตามที่ใช้โทรออกไป (เช่น หมายเลขโทรศัพท์ที่ต้องการโทรถึง) ระบบเครือข่ายหลักให้บริการโทรออกโดยเชื่อมต่อไปยังเครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐานของผู้ให้บริการ (Public Switched Telephone Network : PSTN) คือเครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐานที่ให้บริการเชื่อมต่อการโทรภายในประเทศและระหว่างประเทศ สำหรับโทรศัพท์พื้นฐาน รวมไปถึงโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นเก่า ๆ โดย PSTN จะเป็นกลไกสำคัญในการเชื่อมต่อเพื่อให้บริการโทรภายในและการโทรระหว่างประเทศตามที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถรองรับปริมาณการจราจรข้อมูลที่เพิ่มขึ้น โดยในรุ่นที่แรก ๆ ใช้สำหรับการสื่อสารเสียงเป็นหลัก ต่อมาภายหลังสามารถรับส่งข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น ข้อความ รูปภาพ วิดีโอ อินเทอร์เน็ต จึงมีการพัฒนาระบบรองรับทั้งเสียงและข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วิวัฒนาการของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายตั้งแต่รุ่นที่ 1 จนถึงรุ่นที่ 5 [1]

รุ่นที่	ปีที่เริ่มนำมาใช้	เทคโนโลยี เครือข่าย	ความเร็วการ รับส่ง	นำมาใช้ประโยชน์
1	ค.ศ. 1980	AMPS, NMT, TACS	14.4 kbps	Voice
2	ค.ศ. 1990	GSM, PCS	14.4 kbps	Voice and Data
3	ค.ศ. 2004	UMTS	500-700 kbps	Multimedia
4	ค.ศ. 2011	LTE	100-300 Mbps	Video streaming
5	ค.ศ. 2020	5 NR	10 Gbps	Communication and IOT

วิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สายได้ดำเนินการต่อเนื่องมาหลายปี ตั้งแต่รุ่นที่ 1 ราวปี 1970 ไปจนถึงรุ่นที่ 5 ในปัจจุบัน ตามวิวัฒนาการของเทคโนโลยีคลื่นวิทยุ และจะมีการพัฒนาต่อเนื่อง ตามการขยายตัวของการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ โดยมีการเริ่มต้นจากการสื่อสารระหว่างมนุษย์ ไปสู่การสื่อสารระหว่างมนุษย์กับเครื่อง และขยายไปสู่การสื่อสารเครื่องกับเครื่อง หรือ IoT เพื่อสนับสนุน Vertical services ต่าง ๆ เช่น รถยนต์อัจฉริยะ โรงงานอัตโนมัติ การดูแลสุขภาพ เป็นต้น ในแต่ละรุ่นที่สมัยจะมีการพัฒนาจากรุ่นที่ก่อนหน้า โดย 0G เป็นบริการไร้สายประจำที่อาศัยเครือข่ายประจำที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ รุ่นที่ 1 ใช้เทคโนโลยีอนาล็อกสำหรับโทรศัพท์เป็นหลัก รุ่นที่ 2 ใช้เทคโนโลยีดิจิทัล รองรับเสียงและข้อความ รุ่นที่ 3 รองรับข้อมูลแบบมัลติมีเดียที่อัตราสูงขึ้น รุ่นที่ 4 นำอินเทอร์เน็ตไร้สายมาให้บริการแก่ผู้ใช้ และ รุ่นที่ 5 จะนำการสื่อสารไร้สายมาเพื่อรองรับ IoT โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ จะมีความสามารถในการเก็บข้อมูลและส่งผ่านเซนเซอร์ เชื่อมต่อกันผ่านอินเทอร์เน็ต โดยใช้ WiFi หรือ 5G

การแบ่งรุ่นที่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (0G, 1G, 2G ฯลฯ) จะใช้มุมมองทางเทคโนโลยีเกี่ยวข้องกับการวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการเข้าถึงทางคลื่นวิทยุ (ระหว่างอุปกรณ์เคลื่อนที่กับหอส่งสัญญาณ) เป็นหลัก มากกว่าจะเกี่ยวข้องกับความถี่ของเครือข่ายหลัก อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีเครือข่ายหลักก็ได้รับการพัฒนาไปด้วย เพื่อรองรับเทคโนโลยีการเข้าถึงทางคลื่นวิทยุแต่ละรุ่นที่สมัย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเครือข่ายหลักทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางเชื่อมต่อเครือข่ายการเข้าถึงทางวิทยุเข้ากับเครือข่ายภายนอก ส่วนเทคโนโลยีเครือข่ายหลักได้รับการพัฒนาเพิ่มขึ้นเพื่อสนับสนุนบริการที่ดีขึ้น เช่น จากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล หรือจาการรองรับเพียงเสียงไปยังเสียงและข้อมูล หรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างเครือข่าย ทำให้การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จากมุมมองของผู้ใช้ พวกเขาอาจไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีเครือข่ายหลักได้ชัดเจนเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีคลื่นวิทยุ ที่สังเกตได้จากอุปกรณ์มือถือที่ดีขึ้นและความเร็วข้อมูลที่เพิ่มขึ้น

การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 0

การสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ เริ่มต้นรุ่นที่ 0 ซึ่งเริ่มใช้งานหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เรียกว่า การติดต่อสื่อสารทางโทรศัพท์ก่อนรุ่นที่เซลลูลาร์ มีให้บริการบนรถยนต์บางคันก่อนการเกิดขึ้นของโทรศัพท์มือถือในปี 1970 ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของเซลลูลาร์ ในรุ่นที่ 0 ไม่มีความสามารถในการสื่อสารไร้สายหรือส่งต่อสัญญาณ จึงคล้ายกับบริการติดต่อสื่อสารไร้สายประจำที่ใช้ในงานก่อสร้าง คุณสมบัติหลักคือ บุ่มกดพูด หรือ Push-to-Talk ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นเครือข่ายวิทยุประจำที่ โดยใช้เครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐานของผู้ให้บริการ (Public Switched Telephone Network : PSTN) เป็นเครือข่ายหลัก

การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1

การเริ่มต้นของ ระบบเซลลูลาร์ไร้สาย ซึ่งเริ่มต้นขึ้นในกลางปี 1980 โดยนำเสนอความสามารถในการเคลื่อนที่และการส่งต่อสัญญาณ ระบบเหล่านี้ถูกเรียกว่า 1G (รุ่นที่แรก) สำหรับการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ทางโทรศัพท์มือถือ หลายประเทศในอเมริกาเหนือและออสเตรเลียใช้มาตรฐาน AMPS (Advanced Mobile Phone System) ที่พัฒนาโดย ANSI (American National Standards Institute) แต่ก็มีมาตรฐานอนาล็อกอื่น ๆ ที่แต่ละประเทศพัฒนาขึ้นและไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้ เช่น TACS (Total Access Communications System) ซึ่งเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในประเทศสหราชอาณาจักร โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงปี 1980 ถึง 1990, JTACS (Japanese Total Access Communications System) ซึ่งเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในประเทศญี่ปุ่น ระบบ JTACS เป็นรูปแบบของระบบ TACS (Total Access Communications System) ที่ปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานในประเทศญี่ปุ่น โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงปี 1990, NMT (Nordic Mobile Telephone) ซึ่งเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบแรกที่ใช้ในประเทศสหภาพยุโรป ระบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นในตอนต้นของปี ค.ศ. 1980 โดยเป็นผลงานของการร่วมมือระหว่างประเทศเขตเศรษฐกิจร่วมแห่งสหภาพยุโรป (EEC) ซึ่งประกอบด้วยประเทศสวีเดน นอร์เวย์ ฟินแลนด์ และเดนมาร์ก ระบบ NMT (Nordic Mobile Telephone) ใช้เทคโนโลยีแบบ FDMA (Frequency Division Multiple Access) เพื่อแบ่งความถี่ของสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสาร แต่ไม่ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความเสี่ยงต่อการรบกวนสัญญาณและมีความล่าช้าในการสื่อสาร การที่มีมาตรฐานอนาล็อกหลากหลาย ทำให้ยากต่อการสนับสนุนการโรมมิ่งระหว่างประเทศสำหรับผู้ใช้งานที่เดินทางไปประเทศอื่นที่ใช้มาตรฐานอนาล็อกต่างกัน

การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2

เครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 เริ่มให้บริการในยุโรปในปี 1991 โดยใช้มาตรฐาน GSM (Global System for Mobile Communications) ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้กันทั่วโลก มาตรฐานนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มงานวิจัยและพัฒนาในสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute: ETSI) ในช่วงปี 1982-1985 และเปิดให้บริการในปี ค.ศ. 1991 โดยใช้เทคโนโลยี TDMA (Time Division Multiple Access) และ FDMA (Frequency Division Multiple Access) มาตรฐาน GSM ได้รับความนิยมและเป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุนี้หลายประเทศและพื้นที่ส่วนใหญ่ทั่วโลกได้ใช้ มาตรฐาน GSM (Global System for Mobile Communications) เป็นมาตรฐานหลักสำหรับการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมถึงการสื่อสารข้อมูลและการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตผ่านโทรศัพท์มือถือด้วย สำหรับบริการเสียงและข้อความ และต่อมาได้เพิ่ม ระบบ GPRS (General Packet Radio Service) ที่มีความสามารถในการแบ่งการใช้งานความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA) และการแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) ทำให้มีความสามารถในการส่งข้อมูลแบบพัฒนาการ (Packet Switching) และส่งข้อมูลได้ต่อเนื่อง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานอินเทอร์เน็ตและบริการอื่น ๆ ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการขัดข้องในการใช้งานโทรศัพท์ในเวลาเดียวกัน การใช้งาน GPRS ยังเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ขั้นสูงอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพและความเร็วสูงขึ้นอย่างมาก เช่น EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) และคุณสมบัติ SMS (Short Message Service) และ MMS (Multimedia Messaging Service) ได้ถูกเพิ่มเข้ามาในการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 การเริ่มให้บริการข้อมูลนั้น เริ่มจากเครือข่ายหลักการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 โดยเริ่มจากบริการข้อมูลความเร็วต่ำแบบ Circuit-Switched ก่อน ต่อมาได้มีการเพิ่ม Packet-Switched Network และการปรับปรุง Radio Access Technology เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความแตกต่างหลักระหว่างการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 กับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 คือการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 ใช้สัญญาณอนาล็อก ในขณะที่การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 ใช้สัญญาณดิจิทัล เทคโนโลยี Circuit-Switching ใช้ในเครือข่ายหลักสำหรับการสื่อสารเสียง แต่การติดต่อกับเครือข่ายข้อมูลทำได้โดยการเชื่อมต่อ Circuit-Switched กับโมเด็มปลายทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3

อัตราข้อมูลที่ได้จาก GPRS (General Packet Radio Service) และ EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) ซึ่งเป็นการปรับปรุงจากการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 นั้นมีขีดจำกัดและมีประสิทธิภาพดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออยู่ใกล้สถานีฐาน ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 (Third Generation) หรือ เทคโนโลยี WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) ซึ่งใช้เทคโนโลยี CDMA (Code Division Multiple Access) ในการแบ่งการใช้ความถี่ (Frequency) และเวลา (Time) โดยเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Communication) ที่ใช้ในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่เรียกว่าการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 (Third Generation) ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น และเปิดให้บริการเชิงพาณิชย์ครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นในปี 2001 ให้ความเร็วอินเทอร์เน็ตที่เร็วขึ้น ทำให้สามารถให้บริการบรอดแบนด์ได้ เมื่อ 3PP (3rd Generation Partnership Project) องค์กรที่มีความร่วมมือระหว่างอุตสาหกรรมที่กำลังพัฒนาเทคโนโลยีโทรคมนาคม โดยเฉพาะในด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3PP ได้ถูกจัดตั้งขึ้นเพื่อให้ทั่วโลกมีมาตรฐานที่เหมือนกันในการใช้งานเทคโนโลยีเครือข่าย 3G โดย 3PP ได้ถูกก่อตั้งขึ้นในปี 1998 เพื่อผลักดันมาตรฐาน GSM ให้เป็นมาตรฐานโลก และได้รับเอาโครงสร้างเครือข่ายหลักของมาตรฐาน GSM ที่เป็นมาตรฐาน ETSI (European Telecommunications Standards Institute) มาเป็นรุ่นแรกสำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 คือ Release 1999 หรือ Rel-99 หรือ R99 เทคโนโลยีนี้เรียกว่า UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) เทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นต่อไปหลังจาก GSM (Global System for Mobile Communications) ในการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 (Third Generation) ซึ่งพัฒนาโดย 3PP (3rd Generation Partnership Project) จุดเน้นหลัก คือการออกแบบเทคโนโลยีการเชื่อมต่อทางวิทยุใหม่จากรุ่นที่ก่อนหน้านี้ เช่น GSM ที่ใช้เทคโนโลยี WCDMA แทนเทคโนโลยี TDMA (Time Division Multiple Access) / FDMA (Frequency Division Multiple Access) ในการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2

การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4

ในปี 2551 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 LTE (4th Generation Long-Term Evolution) เป็นมาตรฐานเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Latvijas Mobilais Telefons (LMT) ซึ่งเป็นผู้ให้บริการโทรคมนาคมและอินเทอร์เน็ตในประเทศลัตเวีย นับเป็นหนึ่งในผู้ให้บริการสื่อสารที่เชื่อถือได้ โดยพัฒนาจาก 3PP (3rd Generation Partnership Project) เพื่อให้มีความเร็วและประสิทธิภาพในการสื่อสารและการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่สูงขึ้น การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 LTE ใช้เทคโนโลยีพื้นฐานแบบ OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) และ SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) มีความเร็วในการสื่อสารและการใช้งานข้อมูลสูงถึงกว่า 10 เท่าของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการความเร็วสูง ได้รับการเปิดตัวเพื่อนำเสนอความสามารถตามที่กำหนดโดย ITU ใน International Mobile Telecommunications (IMT) Advanced ส่งผลให้การสื่อสารไร้สายกับเครือข่ายข้อมูลเพิ่มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น IP โทรศัพท์ การประชุมทางวิดีโอ และเกมมิ่ง นอกจากนี้ในปี 2551 เครือข่ายหลัก (Core Networks) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเครือข่ายวิวัฒนาการจากการใช้เทคโนโลยีสวิตช์วงจรดิจิทัลและแพ็กเก็ตร่วมกันไปสู่เครือข่ายหลักออลไอพีในการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 กำจัดการสวิตช์วงจรโดยสิ้นเชิง

การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

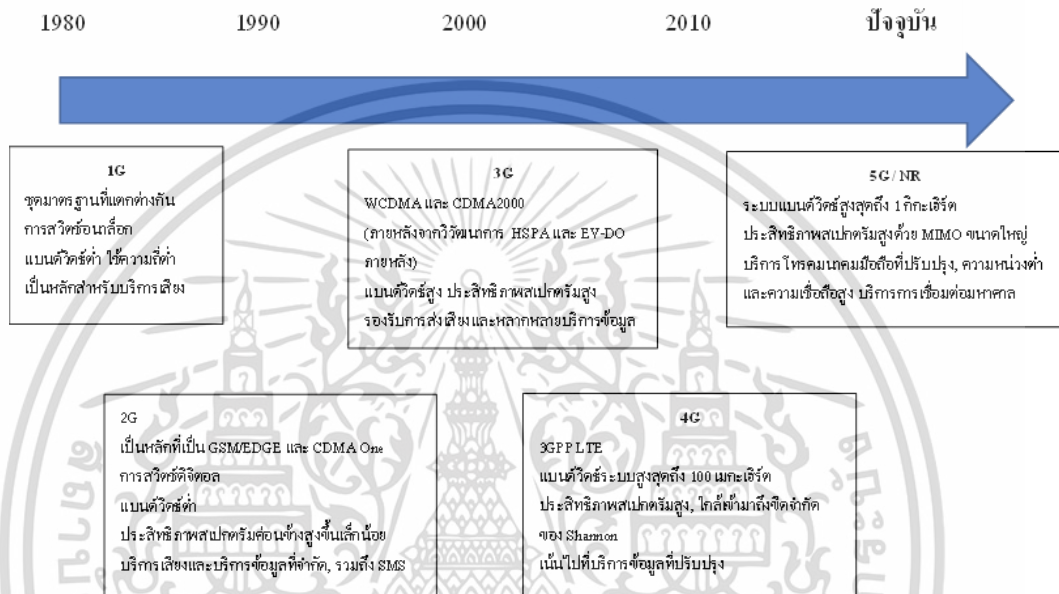
ในปี 2562 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 NR (5th Generation New Radio) ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารโทรคมนาคมที่เกิดจากการพัฒนาของมาตรฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยมีจุดเน้นที่การใช้งานความถี่สูง (High Frequency Spectrum) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการสื่อสาร รวมถึงการรองรับจำนวนผู้ใช้งานและอุปกรณ์ที่มากขึ้น ถูกพัฒนาขึ้นโดยคณะทำงานที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐาน 3PP (3rd Generation Partnership Project) เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วสูงในการสื่อสารข้อมูล การลดความล่าช้าในการสื่อสาร และการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IoT (Internet of Things) ที่มีการเปลี่ยนแปลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เทคโนโลยี 5 NR มีความสามารถในการให้บริการในหลายรูปแบบ เช่น สตรีมวิดีโอคุณภาพสูง (High-Definition Video Streaming) การเล่นเกมออนไลน์ที่ไม่มีความล่าช้า (Low-Latency Online Gaming) และการทำงานอื่น ๆ ที่ต้องการความเร็วและประสิทธิภาพสูงในการสื่อสารและการเชื่อมต่อข้อมูล ได้เกิดขึ้น ซึ่งมุ่งเน้นที่จะสนับสนุน การสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ขั้นสูง ยานพาหนะเชื่อมต่อทุกสรรพสิ่งขั้นสูง การเชื่อมต่ออย่างมหาศาล และการสื่อสารไร้สายซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูงและมีความล่าช้าต่ำ ซึ่งจำเป็นต่อการสื่อสารไร้สายแบบเครื่องต่อเครื่อง

2.3 เทคโนโลยีสถาปัตยกรรมเครือข่ายการสื่อสารไร้สายตั้งแต่รุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 5

เครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 เป็นเครือข่ายการเข้าถึงสัญญาณวิทยุโดยใช้เทคโนโลยีการส่งสัญญาณอนาล็อกซึ่งมีการใช้งานทั่วไปในช่วงเวลานั้นและถูกออกแบบเพื่อให้บริการเสียงพื้นฐาน เครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 สามารถทำให้คุณภาพเสียงที่ดีขึ้นและเป็นต้นแบบการบริการข้อมูลครั้งแรกในการวิวัฒนาการของเครือข่ายมือถือ นอกจากนี้ยังมีแพลตฟอร์มที่ได้รับการปรับใช้จากผู้ให้บริการทั่วโลกเพื่ออนุญาตให้มีการโรมมิ่งระหว่างประเทศ ประเทศเกาหลีและญี่ปุ่นได้นำเทคโนโลยี CDMA ที่ถูกใช้ในสหรัฐอเมริกาไปใช้งาน สำหรับเครือข่ายที่ใช้ระบบ GSM การปรับปรุงสำหรับการให้บริการข้อมูลถูกเรียกว่า EDGE และสำหรับเครือข่ายที่ใช้ระบบ Code Division Multiple Access (CDMA) มาตรฐาน ANSI ในอเมริกาเหนือเครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 ให้บริการเครือข่ายดิจิทัลที่ใช้ในการให้บริการ การติดต่อสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์และมัลติมีเดีย การสนับสนุนอัตราการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ปรับปรุงความเร็ว และคุณภาพ พร้อมกับบริการโรมมิ่งระหว่างประเทศพร้อมกับการรวมสัญญาณข้อมูลและเสียงที่ปรับปรุงภายในโครงสร้างถือเป็นเทคโนโลยีหลักสำคัญสำหรับเครือข่าย 3G เครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 ได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้งานแทนเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์ เพื่อให้การสื่อสารไร้สายมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรการพัฒนาของเครือข่ายการเข้าถึงเครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ ตั้งแต่รุ่นที่ 1 ไปจนถึงรุ่นที่ 5 ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เส้นทางวิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 5 [2]

เนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 และเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 นั้นมีความแตกต่างทาง Physical Layer ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพ และความสามารถในการให้บริการของระบบเครือข่าย โดยทั่วไปเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จะมีประสิทธิภาพในการสื่อสาร และการให้บริการที่สูงกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 และมีความสามารถในการรองรับการใช้งานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้นโดยความแตกต่างทาง Physical Layer ระหว่างเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 และเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบและการใช้งานของระบบเครือข่าย ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญต่อประสิทธิภาพในการออกแบบและการใช้งานของเครือข่าย ดังที่แสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างทาง Physical Layer ระหว่างการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 และการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 (LTE) [2]

หัวข้อ	การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 (LTE)	การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5
Frame structure (โครงสร้างการสื่อสารข้อมูล)	แบบ 1 : Frequency division duplexing (FDD) แบบ 2 : Time division duplexing (TDD)	-โครงสร้างเฟรมเดียวและสามารถกำหนดค่าได้สูง -ระบบรู้จักความสำคัญของการสื่อสารทั้งในทิศทาง DownLink (DL) และUpLink(UL) DLการส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยังอุปกรณ์ผู้ใช้ UL การส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ผู้ใช้ไปยังสถานีฐาน
Scheduling flexibility (ความยืดหยุ่นการสื่อสารข้อมูลในเครือข่าย)	1ms subframe based Release 15 ของมาตรฐานการสื่อสารไร้สาย ได้มีการนำเสนอความสามารถใหม่ที่เรียกว่า sTII (shorter Time Interval for Transmission Time Interval)	-Slot-based (Type A Scheduling) -Mini-slot based (Type 8 Scheduling)
Waveform (รูปแบบของสัญญาณ)	DownLink (DL) : OFDM UpLink(UL) : SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) หรือเป็นระบบการโมดูเลชันเชิงเดียว และการเข้าถึงหลายทางในระบบสื่อสารไร้สาย ที่มักนิยมใช้ในการส่งข้อมูลขึ้น (uplink) ของเครือข่าย LTE ของ 3PP	DownLink (DL) : OFDM UpLink(UL) : SC- FDMA และ OFDM FR 1 : 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz (data) 15 kHz, 30 kHz (SSB) FR 2 : 60 kHz, 120 kHz (data) 120 kHz,240 kHz (SSB)
Transmission Modes (โหมดการส่งข้อมูล)	TM 1-7 (Release 8) TM8 (Release 9) TM9 (Release 10) TM10 (Release 11) SFBC TxDiv for control channels	Single-transmission mode for data channels Transparent TxDiv scheme
Channel Coding (การเข้ารหัสช่องสัญญาณ)	Data: Turbo codes Control: TBCC	Data: LDPC codes Control: Polar codes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ	การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 (LTE)	การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5
Multi-beam operation (การทำงานรองรับการใช้งานหลายสัญญาณ)	N/A	FR1: Up to 8 SSB beams FR2: Up to 64 SSB beams
Bandwidths & bandwidth part concept (แถบกว้างและการจัดการแถบกว้างความถี่ย่อย)	BWs: 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz BWP: N/A	BWs: FR1: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100 MHz FR2: 50, 100, 200, 400 MHz BWP: Up to 4 configured BWPs. Single-active BWP.

2.4 การใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในอดีตถึงปัจจุบันในประเทศไทย

การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยได้พัฒนาเปลี่ยนแปลงมาต่อเนื่องตลอดหลายทศวรรษตั้งแต่การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 2 3 4 จนมาถึงรุ่นที่ 5 ในปัจจุบัน โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบไร้สายกลายเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันของสังคมไทยตั้งแต่วัยเรียน จนถึงวัยทำงาน หรือแม้แต่วัยเกษียณ และการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่มีความเร็วสูงได้แพร่หลายไปทุกพื้นที่ในประเทศไทย และยังคงมีความต้องการในการเข้าถึงข้อมูลเหล่านี้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นที่จะต้องหาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายใหม่ ๆ เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานในรูปแบบใหม่อันเป็นสิ่งสำคัญในการส่งเสริมการพัฒนาสังคมดิจิทัลในรุ่นที่ 4.0 จนกระทั่งพัฒนามาถึงการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ในปัจจุบัน

2.4.1 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 1

เครื่องโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ เครื่องแรกได้มีการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1982 และประสบความสำเร็จใน ต้นปี ค.ศ. 1990 ซึ่งระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ในรุ่นที่นี้สามารถสื่อสารด้วยสัญญาณเสียงเท่านั้น โดยนำเทคโนโลยี Advanced Mobile Phone System (AMPS) ซึ่งระบบ AMPS นั้นเป็นระบบที่ใช้การ Modulated ความถี่แบบ Frequency Division Multiple Access (FDMA) ด้วยช่องสัญญาณความถี่ขนาดกว้าง 30 KHz ที่ย่านความถี่ช่วง 824-894 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 2

การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 หรือที่รู้จักกันดีในชื่อระบบ GSM ได้มีการพัฒนาขึ้นในช่วงปลายปี ค.ศ. 1980 โดยการใช้สัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับการส่งสัญญาณเสียง การพัฒนาส่วนใหญ่จะเน้นไปทางด้าน การนำสัญญาณแบบดิจิทัลมาใช้ในการให้บริการรับ - ส่ง ข้อมูลตัวหนังสือและภาพ ด้วยความเร็วที่ระดับ kbps โดยมีการใช้ช่องสัญญาณความถี่ที่กว้างตั้งแต่ 30 ถึง 200 KHz หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาต่อยอดจากการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 เป็นการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2.5 โดยมีการเริ่มใช้ระบบ Packet switch แยกออกมาจากระบบ Circuit switch ซึ่งการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2.5 สามารถ รับ - ส่งข้อมูลได้ความเร็วสูงสุดมากถึง 144 kbps

2.4.3 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 3

ระบบการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 ได้มีการพัฒนามาจากระบบ GSM โดยเริ่มมีการใช้งานครั้งแรกในปี 2000 โดยมีวัตถุประสงค์หลักของเทคโนโลยีคือการให้บริการรับ - ส่งข้อมูลให้มีความเร็วมากขึ้นจากเทคโนโลยี GSM โดยการพัฒนาการรับส่งข้อมูลผ่าน Wide Band Wireless Network ที่สามารถรองรับการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงสุดถึง 14 Mbps ซึ่งทำให้สามารถรองรับการให้บริการข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถเข้าถึงบริการวิทยุโทรทัศน์ วิทยุ เอฟ.เอ็ม. และสื่อต่าง ๆ ผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไร้สาย รวมถึงมีการเปิดบริการให้ครอบคลุมการใช้ภายนอกประเทศหรือที่เรียกว่า Global Roaming ในช่วงเริ่มต้นของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 นั้นได้เปิดการใช้บนคลื่นความถี่ในย่าน 2100 MHz ด้วยความกว้างของช่องสัญญาณ 15-20 MHz ซึ่งเพียงพอกับการให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง

2.4.4 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 4

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 ได้ถูกพัฒนาให้มีความสามารถในการรับข้อมูล (Download) ด้วยความเร็วสูงถึง 100 Mbps สามารถรองรับการให้บริการที่เกิดขึ้นในการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 3 ได้ดีมากขึ้น รวมถึงการให้บริการแบบใหม่ เช่นการบริการสื่อสิ่งพิมพ์ในรูปแบบมัลติมีเดีย การดูรายการโทรทัศน์ผ่านระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความคมชัดของสัญญาณภาพมากขึ้น และรับ - ส่งข้อมูลได้เร็วมากยิ่งขึ้นกว่าระบบ 3 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 หรือที่รู้จักเรียกว่า ระบบ LTE (Long Term Evolution) ถูกพัฒนามาเพื่อเพิ่มคุณภาพของระบบให้รองรับบริการของแอปพลิเคชันรูปแบบใหม่เช่น การให้บริการบรอดแบนด์ไร้สาย (Mobile Broadband) การรับ - ส่ง ข้อความและรูปภาพ (MMS) การดูโทรทัศน์ผ่านระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile TV) การรับสื่อและรายการในรูปแบบ HDTV ระบบกระจายสัญญาณวิดีโอแบบดิจิทัล Digital Video Broadcasting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(DVB) และยังสามารถให้บริการรับ - ส่งข้อมูลแบบเสียงผ่านระบบ IP เครือข่าย หรือที่เรียกว่า VoLTE (Voice Over LTE)

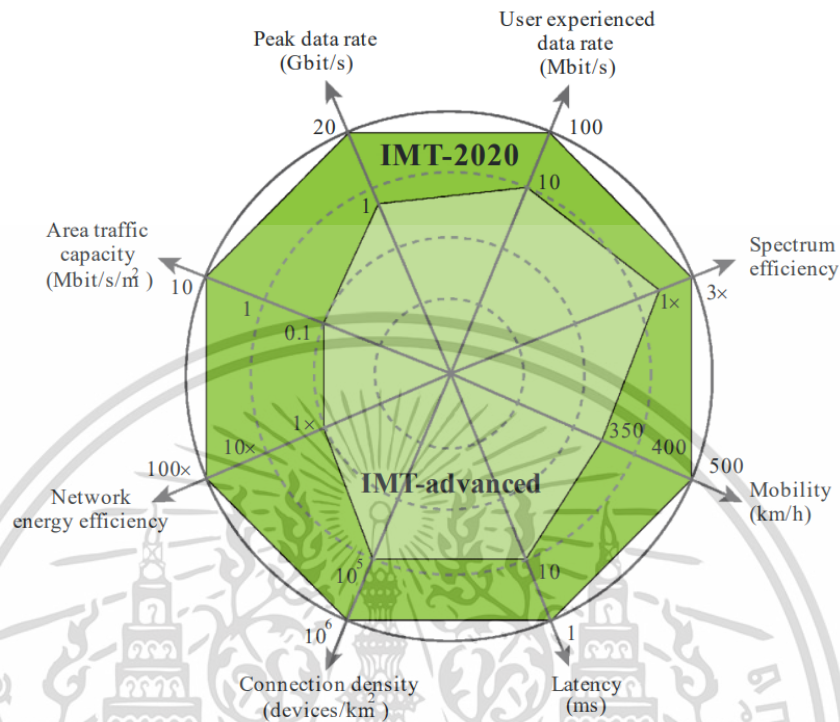
2.4.5 การสื่อสารไร้สายในประเทศไทยรุ่นที่ 5

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ได้พัฒนาขึ้นช่วงปลายปี ค.ศ. 2010 และเริ่มมีการใช้งานในประเทศผู้นำด้านเทคโนโลยี เช่น ประเทศเกาหลีใต้ ประเทศสหรัฐอเมริกา และสาธารณรัฐประชาชนจีน ในปี ค.ศ. 2019 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 นั้นสามารถรับ - ส่งข้อมูลได้ ความเร็วและมีความจุมากยิ่งขึ้นกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 อีกทั้งได้มีการพัฒนาให้มีความหน่วงที่ต่ำและมีเสถียรภาพของระบบมากขึ้นซึ่งทำให้เพียงพอต่อการนำคลื่นความถี่มาใช้เชื่อมต่อระบบปฏิบัติการในรุ่นที่อุตสาหกรรม 4.0 และการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ IOT ที่มีการใช้งานอย่างแน่นหนา เทคโนโลยีการกระจายภาพและเสียงบนภาคพื้นดิน (Terrestrial Broadcasting) และการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ ได้ถูกนำมาใช้งานแบบบูรณาการร่วมกัน ซึ่งทั้งสองเทคโนโลยีนั้นได้มีการพัฒนาบนพื้นฐานของการส่งสัญญาณ ผ่านเครือข่าย IP และระบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ผ่านช่องสัญญาณในอากาศ โดยเครื่องรับ - ส่งข้อมูลนั้นจะสามารถรับเนื้อหาข้อมูลในรูปแบบของโพรโตคอลตามมาตรฐาน 3PP สัญญาณจะถูกจัดส่งในรูปแบบ DVB-T2 สามารถถูกเปลี่ยนมาเป็นการกระจายสัญญาณในรูปแบบ FeMBMS อย่างเหมาะสม และความถี่ที่ถูกใช้นั้นอยู่ในย่านที่เหมาะสมในการเผยแพร่สัญญาณโทรทัศน์แบบดั้งเดิมอยู่แล้ว ซึ่งความถี่เหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้งานผ่านระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ ปัจจุบันในรูปแบบการถ่ายทอดการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ในรูปแบบดิจิทัลหรือการจัดสรรคลื่นความถี่เพื่อนำมาใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ สำหรับเครื่องรับสัญญาณหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายไร้สายต้องสามารถรองรับภาครับ (Receive-only Mode) และต้องอาศัยการเข้าใช้ระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ โดยใช้ซิมการ์ดเหมือนอุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณการรับสัญญาณโทรทัศน์

2.5 มาตรฐานและลักษณะทางเทคนิคของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

มาตรฐาน IMT (International Mobile Telecommunications) เป็นมาตรฐานที่กำหนดการให้บริการโทรคมนาคมระดับโลก เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานโทรคมนาคมที่หลากหลายและที่พร้อมใช้งานทั่วโลก ได้รับการพัฒนาเพื่อให้รองรับการใช้งานโทรคมนาคมที่มีความเร็วสูงขึ้น รวมถึงการสนับสนุนการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพสำหรับอุปกรณ์และการทำงานที่ต่างกัน เช่น การสื่อสารเสียง การส่งข้อมูล การเชื่อมต่ออุปกรณ์อัจฉริยะ (IoT) และการทำงานอื่น ๆ ในโลกที่เชื่อมต่อระบบดิจิทัลมากขึ้น และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานโทรคมนาคมที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการพัฒนาสู่มาตรฐานที่สูงขึ้นเช่น 5 และมีการกำหนดมาตรฐานในทางที่เป็นระบบเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับโลก โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IMT ที่สำคัญเกี่ยวกับระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายในปัจจุบัน มี 2 มาตรฐาน คือ IMT-2020 และ IMT-advanced ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 มาตรฐานสำหรับระบบ 5 ตาม ITU-R M.2083-0 (ITU, 2015) [3]

มาตรฐาน IMT-advanced ถูกพัฒนาเพื่อต่อจากมาตรฐาน IMT-2000 เพื่อเป็นมาตรฐานสำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 เป้าหมายเพื่อทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความเร็วมากขึ้น และเกิดบริการใหม่ ๆ โดยจากการพิจารณาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 ที่ถูกนำเสนออย่างหลากหลาย ทาง ITU-R ได้พิจารณาเหลือเพียง 2 เทคโนโลยี คือ LTE Advance มาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM และ WirelessMan Advance2 (Wimax) มาตรฐานที่พัฒนามาจากมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งเป็นมาตรฐานเดียวกันกับ Wi-Fi แต่มาตรฐาน Wimax สามารถส่งสัญญาณได้ไกลถึง 40 ไมล์ ด้วยความเร็ว 70 Mbps และมีความเร็วสูงสุด 100 Mbps อย่างไรก็ตามเกือบทุกประเทศทั่วโลกใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 LTE แต่มีเพียงบางประเทศเท่านั้นที่ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 Wimax เช่น ประเทศญี่ปุ่น ไต้หวัน บังคลาเทศ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยี 4 สามารถขยายขีดจำกัดของสมาร์ตโฟนออกไปได้อีก เนื่องจากเทคโนโลยีสามารถทำให้ส่งข้อมูลที่เร็วขึ้น มากขึ้น จึงเกิดบริการใหม่ ๆ

มาตรฐาน IMT-2020 มีการเพิ่มขีดความสามารถในด้านต่าง ๆ จากมาตรฐาน IMT-Advanced โดยในเบื้องต้น ITU-R ได้สำรวจว่าผู้ใช้งานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จะมีความต้องการใช้งาน 3 ด้านหลักดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- eMBB หรือ enhanced Mobile Broadband คือ การใช้งานในลักษณะที่ต้องการการส่งข้อมูลความเร็วสูงสุดได้มากถึง 20 Gbps ซึ่งการใช้งานลักษณะนี้ตอบสนองความต้องการการส่ง และรับข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งตรงต่อความต้องการการใช้งานอินเทอร์เน็ตในปัจจุบัน

- mMTC หรือ massive Machine Type Communications คือ การใช้งานที่มีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่เดียวกันที่มีความต้องการหนาแน่นมากถึงระดับล้านอุปกรณ์ต่อตารางกิโลเมตร โดยการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ในการใช้งานลักษณะนี้ จะเป็นการส่งข้อมูลขนาดเล็กที่ไม่ต้องการความเร็วสูงมาก ซึ่งความสามารถนี้ทำให้การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เหมาะสมกับการทำงานของอุปกรณ์จำพวก IoT ในอนาคตสำหรับการให้บริการในเมืองอัจฉริยะต้นแบบ

- URLLC หรือ Ultra-Reliable and Low Latency Communications คือการใช้งานที่ต้องการความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีต้องการความเสถียรเป็นอย่างมาก รวมทั้งมีความหน่วงเวลา (Latency) หรือความหน่วงในการส่งข้อมูลในระดับที่น้อยกว่า 1 มิลลิวินาที ในขณะที่การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 ในนั้นสามารถรองรับความหน่วงเวลาในระดับ 10 มิลลิวินาทีเท่านั้น ซึ่งความสามารถนี้ทำให้การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เหมาะกับการใช้งานระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง (Critical Application) เช่น การให้บริการเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับการผ่าตัดทางไกล การควบคุมเครื่องจักร และระบบอัตโนมัติในโรงงาน หรือการควบคุมหรือระบบให้ความช่วยเหลือรถยนต์หรืออากาศยานไร้คนขับ เป็นต้น

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและความสามารถเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 ได้ดังนี้

- อัตราการส่งข้อมูลสูงสุด (Peak Data Rate) เพิ่มขึ้น 20 เท่า สำหรับอัตราการส่งข้อมูลที่ได้รับ
- ความหน่วงของระบบ (Latency) ลดลงมากที่สุดได้ถึง 10 เท่า
- การรับข้อมูลในขณะเคลื่อนที่ (Mobility) สามารถรองรับการเคลื่อนที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า
- ความหนาแน่นในการเชื่อมต่อ (Connection Density) หมายถึงจำนวนอุปกรณ์ที่ระบบสามารถรองรับได้ในพื้นที่เฉพาะเจาะจงเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า
- ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโครงข่าย (Energy efficiency) เพิ่มขึ้น 100 เท่า
- ประสิทธิภาพการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum efficiency) เพิ่มขึ้น 3 เท่า
- อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดต่อพื้นที่ (Area traffic capacity) เพิ่มขึ้น 100 เท่า

2.6 คลื่นความถี่เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

Low Band : ย่านความถี่ที่อยู่ในย่านความถี่ที่น้อยกว่า 1 GHz (Low Band) โดยมีย่านความถี่ในช่วง 600 MHz และ 700 MHz เป็นย่านความถี่เพื่อรองรับความครอบคลุมของสัญญาณ (Coverage) เป็นบริเวณกว้างเหมาะแก่การนำมาใช้งานในรูปแบบ MBB Massive IOT และ URLLC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย MBB (Mobile Broadband) และ Massive IOT เป็นสองแอปพลิเคชันหลักที่ใช้ประโยชน์จาก scheduling flexibility ของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่ง MBB คือบริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ เช่น สมาร์ทโฟน ทำให้เรียกใช้งานวิดีโอและแอปพลิเคชันแบบ Real-Time ได้ และการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สามารถจัดสรรแบนด์วิดท์ตามความต้องการให้ MBB ได้ ทำให้การใช้งานได้ดียิ่งขึ้น สำหรับ Massive IOT คือการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเซนเซอร์จำนวนมาก โดยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สามารถรองรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์พร้อมกันเป็นจำนวนมาก ทำให้ IOT ขนาดใหญ่เป็นไปได้ด้วย scheduling flexibility การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จึงสามารถรองรับทั้ง MBB และ Massive IOT ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และ URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications) เป็นอีกหนึ่งแอปพลิเคชันที่ใช้ประโยชน์จาก scheduling flexibility ของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยที่ URLLC คือการสื่อสารที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงมาก และความล่าช้าต่ำมาก เช่น การควบคุมระยะไกล ระบบอัตโนมัติ ยานพาหนะเชื่อมต่อ เป็นต้น เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สามารถจัดลำดับความสำคัญและจัดสรรทรัพยากร เพื่อให้ URLLC ได้รับข้อมูลอย่างต่อเนื่อง มีเสถียรภาพสูง และความล่าช้าต่ำมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของ แอปพลิเคชันเหล่านี้ ความยืดหยุ่นในการจัดสรรทรัพยากร การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สามารถรองรับ URLLC ได้

Mid Band : ย่านความถี่ที่อยู่ระหว่างช่วงความถี่ 1 GHz และ 6 GHz (Mid Band) โดยมี ย่านความถี่ C-band (3300-4200 MHz และ 4400-5000 MHz) เป็นย่านความถี่เพื่อรองรับความต้องการความจุของโครงข่าย (Capacity) ที่สูง ซึ่งเป็นความถี่ที่ประเทศส่วนใหญ่ได้นำมาใช้สำหรับ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยย่านความถี่ 3400-3600 MHz เป็นย่านความถี่สำหรับกิจการ โทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล ในข้อบังคับวิทยุของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ สำหรับในประเทศไทยนั้น ย่านความถี่ 3400-4200 MHz ในปัจจุบันมีการจัดสรรเพื่อใช้งานในกิจการดาวเทียม และย่านความถี่ 4400-5000 MHz มีการจัดสรรเพื่อใช้งานในการสื่อสารเกี่ยวกับกิจการประจำที่อยู่

High Band: ย่านความถี่ที่อยู่ในย่านความถี่ที่สูงกว่า 24 GHz (High Band) นั้นเป็นย่านความถี่ที่อยู่ในช่วงที่เรียกว่า Millimeter Wave (mmW) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่มีความยาวคลื่นสั้นมากในระดับมิลลิเมตร โดยในปัจจุบันทุกประเทศทั่วโลกนั้นยังมีการใช้งานคลื่นความถี่ในช่วงนี้ไม่มากนัก เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านความครอบคลุมพื้นที่โดยสถานีฐานส่งสัญญาณครอบคลุมรัศมีได้ขนาดเล็ก แม้จะมีขนาดความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) กว้างมาก และสามารถรองรับความจุได้สูงมาก (Ultrahigh Capacity) และความหน่วง (Latency) ที่น้อยมาก การนำความถี่ย่านนี้มาใช้จะมุ่งเน้นใช้งานในพื้นที่ที่มีปริมาณการใช้งานสูงหรือมีความต้องการอัตราข้อมูลที่สูงสำหรับประเทศไทยเองได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่มาโดยตลอด ตั้งแต่เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2 จนเปลี่ยนเป็นรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 จนในปัจจุบันไทยได้เข้าสู่รุ่นที่เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่งคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.)

เป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การนำเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านดาวเทียมมาใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

การนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มาใช้ในโครงข่ายการสื่อสารไร้สาย จำเป็นจะต้องติดตั้งเสาอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับเทคโนโลยี Massive MIMO และมีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งเสาสัญญาณที่ถี่ขึ้นมากสำหรับคลื่นความถี่สูงระดับ mmWave (millimeter Wave) เนื่องจากความถี่ในย่านนี้ มีความสามารถครอบคลุมพื้นที่ในขอบเขตจำกัด และไม่สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ผนังตึก กำแพง ต้นไม้ หรือสภาพอากาศที่มีฝนตกจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการลงทุนในการติดตั้งเสาสัญญาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อต้นทุนในการสร้างเครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ในหลายประเทศทั่วโลกโดยเฉพาะในพื้นที่สำคัญและมีประชากรหนาแน่นของประเทศต่าง ๆ ซึ่งในหลายพื้นที่ความต้องการนั้นมีมากกว่าความสามารถในการสร้างโครงสร้างโครงข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 พื้นฐาน โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความต้องการมากแต่ยากที่จะเข้าไปติดตั้งโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งความยากลำบากเหล่านี้จะได้รับการแก้ปัญหาโดยนำเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านดาวเทียมมาใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ในหลายปีที่ผ่านมาการสื่อสารดาวเทียมนั้นเป็นเทคโนโลยี Standalone ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการสื่อสารไร้สายผ่านโครงข่ายไร้สาย จนมาถึงปัจจุบันที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีดาวเทียมรุ่นที่ใหม่ที่ออกแบบสร้างจากสถาปัตยกรรมการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 และจะเป็นส่วนเชื่อมต่อเครือข่ายกับรถยนต์ พาหนะ เครื่องบิน และอุปกรณ์ IoT ในสถานที่ห่างไกลและทุรกันดาร ในอนาคตอันใกล้สัญญาณคลื่นการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 อาจจะสามารถถูกส่งลงมาจากอวกาศ เพื่อรองรับกับระบบการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 บนโลกซึ่งจะเป็นผลให้ผู้ใช้งานได้รับประสบการณ์เชื่อมต่อสัญญาณที่ต่อเนื่องไปในที่ต่าง ๆ ทั่วโลกจากดาวเทียมในอวกาศที่ถูกส่งขึ้นไปโคจรรอบโลกในชั้นวงโคจรที่เรียกว่า LEO (Low Earth Orbit) ดาวเทียมในวงโคจร LEO จะมีส่วนเป็นอย่างมากในการขยายขอบเขตของเครือข่ายการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ไปใน อากาศ ทะเล และพื้นที่ห่างไกลที่ไม่สามารถครอบคลุมได้ ด้วยการส่งสัญญาณการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ผ่านดาวเทียม ซึ่งจะทำให้การเชื่อมต่อข้อมูลเป็นไปอย่างต่อเนื่อง จากในเมืองไปยังเครื่องบิน เรือสำราญ และพาหนะอื่น ๆ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ IoT และ Sensor ในฟาร์มในพื้นที่ห่างไกล เป็นการยกระดับของการส่งข้อมูลการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ให้ได้ครอบคลุมมากขึ้นรวมทั้งเพิ่มความจุของเครือข่ายและประหยัดคลื่นความถี่ รวมถึงเพิ่มเสถียรภาพของโครงข่าย ซึ่งอาจจะสามารถเสียหายได้จากการโดนทำลายบนภาคพื้นดิน ถึงแม้จะไม่สามารถรองรับการรับส่งสัญญาณได้ทุกรูปแบบในขณะนี้ แต่ก็เพียงพอต่อการสื่อสารเพื่อการดำรงชีพและช่วยเหลือผู้คนในช่วงระหว่างภัยพิบัติด้วยการครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างไกลของดาวเทียมจึงมีความสามารถรองรับในการสื่อสารแบบ Broadcast และรองรับการใช้งาน IOT ด้วยการสื่อสารดาวเทียมแบบดั้งเดิมนั้นเป็นที่แน่ชัดว่ามีความสามารถรองรับการบริการกระจายเสียงและโทรทัศน์ การเชื่อมต่อสัญญาณการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ผ่านดาวเทียมจึงเป็นส่วนสำคัญใน การนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มาใช้รองรับบริการ Streaming Media และ Content ในรุ่นที่ปัจจุบันที่เปลี่ยนผ่านจากรูปแบบ Live Linear Television Broadcasts ไปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

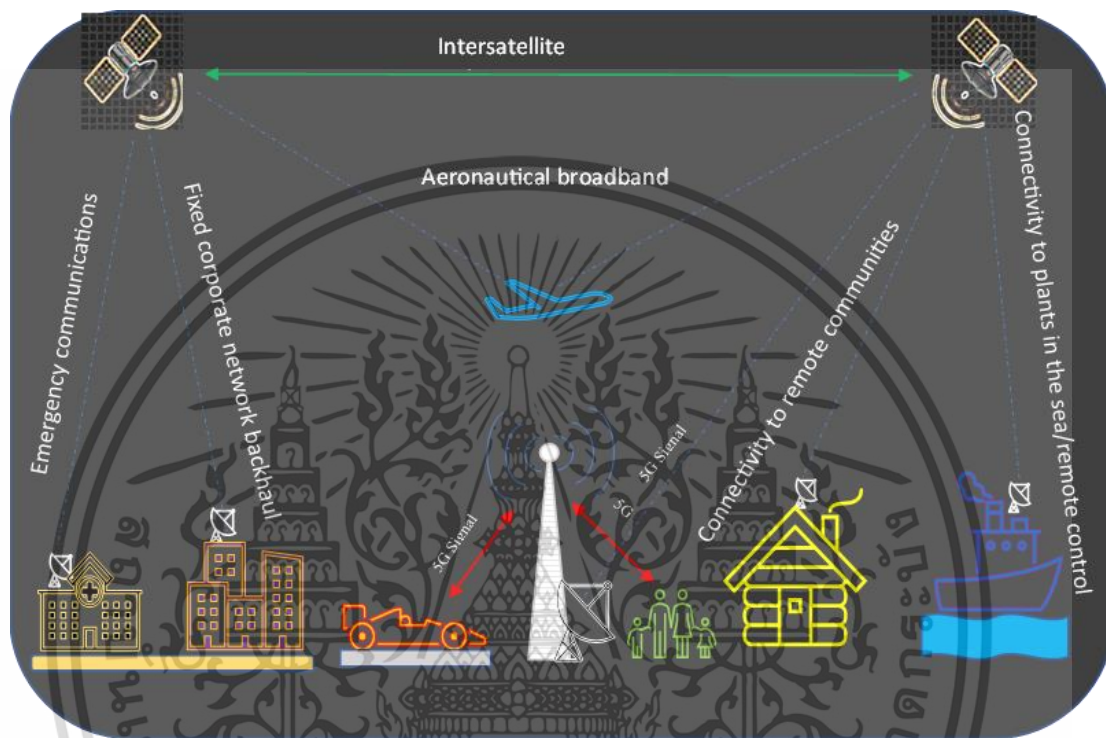
แบบ Low Latency on-demand Streaming จะเป็นบริการที่สำคัญมากที่สุดในการนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มาใช้งาน เพื่อส่งสัญญาณ 8K Video Streaming และ Online VR/AR Application/Gaming ด้วยการเชื่อมต่อสัญญาณการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ผ่านดาวเทียม ซึ่งจะสามารถกระจายสัญญาณไปได้ทั่วโลกด้วยการรับส่งข้อมูลความเร็วสูงและความหน่วงต่ำไปยังอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่แบบไร้สาย

ทางด้านอุตสาหกรรมสื่อและบันเทิงการได้มีการนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มาใช้ร่วมกับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) และ Virtual Reality (VR) ซึ่งสามารถเพิ่มอรรถรสในการรับรู้ของผู้ชมหรือ ผู้ใช้บริการได้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการนำไปใช้ให้เกิดการตอบสนองสูงขึ้นในโหมดของความละเอียดสูงในการเล่นเกมนในตลาดของ e-Sport ซึ่งกำลังโตขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับการใช้ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สามารถเผยแพร่สัญญาณให้กับผู้ชมที่อยู่ในที่เดียวกันเป็นจำนวนมาก หรือ ส่งสัญญาณระยะไกลทำให้สามารถขยายขอบเขตผู้ชมได้กว้างขวางขึ้น รวมไปถึงการใช้ AR และ VR เพื่อให้ประสบการณ์ในการรับชมรายการดังกล่าวมีอรรถรสและเป็นการเพิ่มความพึงพอใจให้กับผู้ชมซึ่งเป็นจุดสำคัญในการทำให้อุตสาหกรรมมีการเติบโตมากขึ้น แม้ว่าเทคโนโลยี AR/VR จะเริ่มมีมาตั้งแต่ในรุ่นที่ 4 แต่ด้วยข้อจำกัดในเรื่องของความหน่วงทำให้การใช้ AR/VR ผ่านเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจึงยังไม่เกิดความแพร่หลายในการใช้งานในรุ่นที่เครือข่ายอินเทอร์เน็ตทั้งแบบมีสายและไร้สายมีความเร็วสูงขึ้น โดยในรุ่นที่ 5 กิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์สามารถถ่ายทอดผ่านแพลตฟอร์มดิจิทัลหลากหลายรูปแบบที่สามารถเข้าถึงผู้บริโภคได้ทุกที่ทุกเวลา และทุกอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณ ไม่ว่าจะ เป็นโทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต กล้องรับทีวีผ่านระบบอินเทอร์เน็ตหรือทีวีอัจฉริยะ โดยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มีความสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้เร็วขึ้นกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 ถึง 20 เท่าและตอบสนองการใช้งานทำได้รวดเร็วมากขึ้นใช้ความหน่วงต่ำกว่า 0.01 วินาที (Reduce Latency) สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ IoT (Internet of Things) ได้ถึง 1 ล้านอุปกรณ์ในพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จึงสามารถถูกนำไปใช้เป็นช่องทางในการนำสัญญาณและรับส่งข้อมูลได้เป็นอย่างดีด้วยการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการแสดงผลรูปแบบใหม่มากยิ่งขึ้น สามารถนำการสื่อสารดาวเทียมมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ได้โดยการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ช่วยให้การจัดการการจราจรมีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้วยการรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์และกล้อง CCTV ระบบการสื่อสารฉุกเฉิน (Emergency Communication) โดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มีความสำคัญในการให้บริการและการจัดการฉุกเฉินในสถานการณ์ที่ต้องการการตอบสนองทันทีและมีความรวดเร็ว ระบบเครือข่ายสำหรับองค์กรหรือธุรกิจที่มีการเชื่อมต่อแบบคงที่ (Fixed Corporate Network Backhaul) ระหว่างสถานีฐานหรือสำนักงานหลักกับจุดที่เชื่อมต่อสู่ระบบโครงข่ายหลัก ระบบการสื่อสารทางอากาศที่ใช้เทคโนโลยีส่งข้อมูลแบบบรอดแบนด์ (Aeronautical Broadband) ในอุตสาหกรรมการบินและการ

ทำงานบนเครื่องบิน การเชื่อมต่อระบบสื่อสารและอินเทอร์เน็ตไปยังพื้นที่ทางทะเล การเชื่อมต่อนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศในทะเล ที่ช่วยให้เกิดการเฝ้าระวัง และการจัดการทรัพยากรทางทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การส่งข้อมูลเกี่ยวกับสภาพและคุณภาพของน้ำทะเล ระดับน้ำ ความเค็ม อุณหภูมิ การเคลื่อนไหวของสัตว์น้ำ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญ สำหรับการอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและการวิจัยทางทะเล ดังที่แสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 เทคโนโลยีการสื่อสารดาวเทียมที่ประยุกต์ใช้กับ 5 [4]

2.8 ย่านความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล

การจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่สากล โดยแบ่งย่านความถี่ตามคุณสมบัติของคลื่นความถี่ ดังนี้

- 1) ย่านความถี่ต่ำกว่า 1 GHz (Low Band) เป็นย่านความถี่ที่รองรับความครอบคลุมของสัญญาณ (Coverage) เป็นบริเวณกว้าง ประกอบด้วยย่านความถี่สำคัญดังนี้
 - ย่านความถี่ 700 MHz เป็นย่านความถี่ที่ได้มีการเรียกคืนคลื่นความถี่จากการใช้งานในกิจการโทรทัศน์ เพื่อนำมาใช้ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล
 - ย่านความถี่ 900 MHz เป็นย่านความถี่ที่มีการใช้งานสำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากลของประเทศไทย ในปัจจุบัน

2) ย่านความถี่ระหว่าง 1 GHz และ 6 GHz (Mid Band) เป็นย่านความถี่ที่รองรับความจุของโครงข่าย (Capacity) ที่ประกอบด้วยย่านความถี่ที่มีความสำคัญดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz ในปัจจุบันเป็นย่านความถี่ที่มีการใช้งานสำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากลของประเทศไทย

- ย่านความถี่ 1427 - 1518 MHz (L-band) เป็นย่านความถี่ที่การประชุมใหญ่ระดับโลก ว่าด้วยวิทยุที่มกราคม ค.ศ. 2015 (World Radiocommunication Conference 2015: WRC-15) ได้กำหนด ให้ใช้สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่ แต่ในปัจจุบันประเทศไทยยังคงใช้งานในกิจการประจำที่อยู่

- ย่านความถี่ 3300-4200 MHz และ 4400-5000 MHz หลายประเทศได้เริ่มมีการทดลองใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยย่านความถี่ 3400-3700 MHz มีการระบุเป็นย่านความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล ในปัจจุบัน ย่านความถี่ 3400-4200 MHz ประเทศไทยใช้ในกิจการดาวเทียม และย่านความถี่ 4400-5000 MHz ใช้ในกิจการประจำที่

3) ย่านความถี่สูงกว่า 24 GHz (High Band) เป็นย่านความถี่ในช่วงที่เรียกว่า Millimeter wave ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ที่มีความยาวคลื่นสั้นมากในระดับมิลลิเมตร มีขนาดความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) ที่กว้างมากจึงสามารถรองรับความจุได้สูงมาก (Ultrahigh capacity) และความหน่วง (Latency) ที่ต่ำมาก โดยสถานีสถานีสัญญาณได้ครอบคลุมรัศมีขนาดเล็ก โดยจะมุ่งเน้นใช้งานในพื้นที่ที่มีปริมาณการใช้งานสูงหรือมีความต้องการอัตราข้อมูลที่สูง

2.9 คลื่นความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากลประเทศไทย

คลื่นความถี่ย่าน 700 MHz

ข้อมูลพื้นฐานสำคัญ	<p>กำหนดคลื่นความถี่ 703 - 748/758 - 803 MHz สำหรับใช้งานในลักษณะแบบเป็นคู่ (Paired band)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ช่วงความถี่ 703 - 748 MHz เป็นความถี่รับของสถานีฐาน (Base RX) - ช่วงความถี่ 758 - 803 MHz เป็นความถี่ส่งของสถานีฐาน (Base TX) <p>ขนาดความกว้างแถบคลื่นความถี่ในลักษณะเป็นคู่ เท่ากับ 2 x 5 MHz</p> <p>ขนาดคลื่นความถี่ (Bandwidth) : 45 MHz</p> <p>Duplex Mode : FDD</p> <p>ประกาศ กสทช. เรื่อง แผนความถี่วิทยุกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (International Mobile Telecommunications – IMT)</p>
สถานการณ์ใช้งานปัจจุบัน	<p>กสทช. ได้มีนโยบายเรียกคืนคลื่นความถี่ย่าน 700 MHz จากการใช้งานในกิจการและนำมาจัดสรรสำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล</p> <p>จัดสรรคลื่นความถี่ :</p> <p>ปี 2562 : จัดสรรคลื่นความถี่ครั้งที่ 7</p> <ul style="list-style-type: none"> - ช่วงความถี่วิทยุ 703 - 713/758 - 768 MHz (2 x 10 MHz) ผู้รับใบอนุญาต : บจ. ทรูมูฟ เอช ยูนิเวอร์แซล คอมมิวนิเคชั่น - ช่วงความถี่วิทยุ 713 - 723/768 - 778 MHz (2 x 10 MHz) ผู้รับใบอนุญาต : บจ. ดีแทค ไตรเนต - ช่วงความถี่วิทยุ 723 - 733/778 - 788 MHz (2 x 10 MHz) ผู้รับใบอนุญาต : บจ. แอดวานซ์ ไวร์เลส เน็ทเวอร์ค

คลื่นความถี่ย่าน 1500 MHz

ข้อมูลพื้นฐานสำคัญ สถานการณ์ใช้งานปัจจุบัน	<p>- คลื่นความถี่ย่าน 1481.25 - 1509.25 MHz/1432.25 - 1460.25 MHz มีการใช้ มีการนำไปใช้งานในการสำรวจและผลิตปิโตรเลียม และการนำไปใช้งานในการให้บริการโทรศัพท์สาธารณะทางไกลชนบท</p> <p>- ผู้รับใบอนุญาต : บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน)</p> <p>- ระยะเวลาการอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่ : เริ่มต้น 16 เมษายน 2530 / สิ้นสุด 3 สิงหาคม 2568</p>
นโยบายและแนวทางการอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่	<p>- ย่านความถี่ 1427 - 1518 MHz (L-band) เป็นย่านความถี่ที่การประชุมใหญ่ระดับโลกว่าด้วยวิหุ่รุ่นที่มึนาคม ค.ศ. 2015 (World Radiocommunication Conference 2015 : WRC-15) ได้กำหนดให้ใช้สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สำหรับ ประเทศไทย</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นความถี่ย่าน 1800 MHz

ข้อมูลพื้นฐานสำคัญ	<p>กำหนดย่านความถี่ 1710 - 1785/1805 - 1880 MHz สำหรับใช้งานในลักษณะแบบเป็นคู่ (Paired band)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ช่วงความถี่ 1710 - 1785 MHz เป็นความถี่รับของสถานีฐาน (Base RX) - ช่วงความถี่ 1805 - 1880 MHz เป็นความถี่ส่งของสถานีฐาน (Base TX) - ขนาดความกว้างแถบคลื่นความถี่ในลักษณะเป็นคู่ เท่ากับ 2 x 5 MHz - ขนาดคลื่นความถี่ (Bandwidth) : 2 x 75 MHz - Duplex Mode : FDD - ประกาศ กสทช. เรื่อง แผนความถี่วิทยุกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (International Mobile Telecommunications - IMT) ย่านความถี่ 1710 - 1785/1805 - 1880 MHz
สถานการณ์ใช้งานปัจจุบัน	<ul style="list-style-type: none"> - มีการจัดสรรคลื่นความถี่แล้ว : 60% การจัดสรรคลื่นความถี่ : <ul style="list-style-type: none"> ปี 2558 : จัดสรรคลื่นความถี่ครั้งที่ 2 <ul style="list-style-type: none"> - ช่วงความถี่วิทยุ 1710 - 1725/1805 - 1820 MHz (2 x 15 MHz) ผู้รับใบอนุญาต : บจ. ทรุมฟ เอช ยูนิเวอร์แซล คอมมิวนิเคชั่น - ช่วงความถี่วิทยุ 1725 - 1740/1820 - 1835 MHz (2 x 15 MHz) ผู้รับใบอนุญาต : บจ. แอดวานซ์ ไวร์เลส เน็ตเวิร์ค ปี 2561 : จัดสรรคลื่นความถี่ครั้งที่ 5 <ul style="list-style-type: none"> - ช่วงความถี่วิทยุ 1740 - 1745/1835 - 1840 MHz (2 x 5 MHz) ผู้รับใบอนุญาต : บจ. แอดวานซ์ ไวร์เลส เน็ตเวิร์ค - ช่วงความถี่วิทยุ 1745 - 1750/1840 - 1845 MHz (2 x 5 MHz) ผู้รับใบอนุญาต : บจ. ดีแทค ไตรเน็ต - ประเภทการใช้งาน : IMT 2000 / IMT Advance ระยะเวลาการอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่ : <ul style="list-style-type: none"> - ย่าน 1710 - 1725/1805 - 1820 MHz : เริ่มต้น 4 ธันวาคม 2558/ สิ้นสุด 15 กันยายน 2576 - ย่าน 1725 - 1740/1820 - 1835 MHz : เริ่มต้น 26 พฤศจิกายน 2558/ สิ้นสุด 15 กันยายน 2576

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน

เนื่องด้วยวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขอแนะนำเสนอการศึกษา ออกแบบ และทดสอบสายอากาศ สำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการกระจายสัญญาณที่ใช้ในระบบ การสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่งสายอากาศสำหรับสถานีฐานที่ใช้กระจาย สัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ มีหลายประเภท และเป็นที่ยอมรับได้แก่

- สายอากาศแบบ Omni-directional: เป็นสายอากาศที่ส่งสัญญาณได้ 360 องศา มักติดตั้ง ในจุดศูนย์กลางของเซลล์ เพื่อกระจายสัญญาณไปทั่วบริเวณ

- สายอากาศแบบ Sector: เป็นสายอากาศที่ส่งสัญญาณในมุมจำกัด เช่น 60-90 องศา มัก ติดตั้งชายขอบของเซลล์เพื่อเพิ่มการเข้าถึงผู้ใช้

- สายอากาศแบบ Panel: เป็นสายอากาศที่มีการกระจายสัญญาณในแนวนอน มักติดตั้งบน เพดานหรือฝาผนัง

- สายอากาศแบบ MIMO: ใช้หลายต้นสายอากาศส่งข้อมูลพร้อมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การรับส่งข้อมูล ลดการรบกวนจากมลติพาท

นอกจากนี้ ยังมีอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Repeaters หรือ DAS เพื่อ เพิ่มพื้นที่ครอบคลุมและคุณภาพสัญญาณ ตามมาตรฐานที่ถูกระบุไว้ และต้องมีช่วงกว้างความถี่ ครอบคลุม 3.00 - 3.80 GHz ดังนั้นโครงสร้างที่จะนำมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบจะต้องมีคุณสมบัติที่มี แถบความถี่กว้างด้วย โดยในปัจจุบัน มีสายอากาศแถบความถี่กว้างมากมายในงานวิจัยถูกนำเสนอ และตีพิมพ์ในวารสารต่าง ๆ โดยเฉพาะสายอากาศไดโพล (dipole) สายอากาศไดโพลที่ใช้กับสถานี ฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ มีลักษณะสำคัญ คือเป็นสายอากาศที่มี 2 ต้น (Dipole Antenna) ต้นที่หนึ่งมี ขั้วไฟฟ้าเป็นบวกร อีกต้นหนึ่งมีขั้วไฟฟ้าเป็นลบ มีการแผ่กระจายคลื่นแบบ Omni-directional หรือ รอบทิศทาง 360 องศา เหมาะสำหรับสถานีฐานกลางท่ามุ่มเอียงระหว่างสายอากาศแต่ละต้น ประมาณ 60 - 90 องศา เพื่อให้เกิดโพลาริไซซ์ และได้สัญญาณที่ดี ออกแบบให้ทนต่อสภาพแวดล้อม ภายนอก เช่น ฝน ลม แสงแดด ความชื้น อุณหภูมิต่าง ๆ มีกราวด์เพลนอยู่ภายใน เพื่อช่วยส่งกระจาย คลื่นให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทราบกันดีและยอมรับในวงการวิจัยสายอากาศ ถึงคุณสมบัติที่มี แถบความถี่กว้างและถูกใช้ในระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ เช่น ระบบโทรศัพท์ไร้สายเคลื่อนที่ (Mobile communications) ระบบวิทยุสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ (Mobile Radio Communication System) ที่มีสถานีฐาน (Base Station) เป็นจุดศูนย์กลางในการควบคุมระบบคือระบบการสื่อสารผ่านคลื่น ความถี่วิทยุ โดยไม่ต้องใช้สายนำสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างผู้ส่งและผู้รับ ใช้คลื่นความถี่วิทยุ VHF หรือ UHF ในการรับส่งข้อมูล มีโครงข่ายเชื่อมโยงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ต่าง ๆ อย่างทั่วถึง เหมาะ สำหรับการติดต่อสื่อสารแบบเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เช่น วิทยุสื่อสารมือถือ อุปกรณ์ Walkie Talkie เป็นต้น

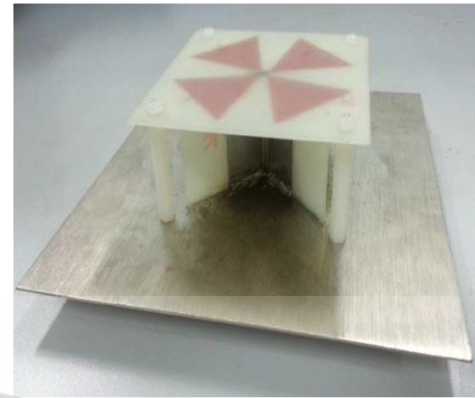
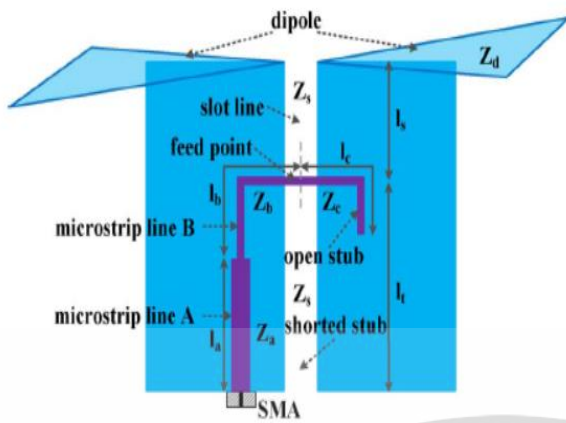
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 งานวิจัยสายอากาศชนิดไดโพลแบบพิมพ์

สำหรับงานวิจัยที่มีมาก่อนจากเอกสารอ้างอิงที่ [5] ซึ่งเป็นสายอากาศไดโพลแบบพิมพ์รูปสามเหลี่ยมโพลาริซเซชันเชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนสำหรับสถานีฐานแบนด์กว้าง (A Compact Dual-Polarized Printed Dipole Antenna With High Isolation for Wideband Base Station Applications) จากเอกสารอ้างอิงที่ [6] สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์ร่องโค้งเรียวสำหรับความถี่แบนด์กว้างยิ่งยวด (A Printed Dipole Antenna With Tapered Slot Feed for Ultrawide-Band Applications) เอกสารอ้างอิงที่ [7] สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์รูปวงรีมีโพรงด้านหลังแบนด์กว้างเพิ่มประสิทธิภาพแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (A Wideband Cavity-Backed Elliptical Printed Dipole Antenna With Enhanced Radiation Patterns) ตามเอกสารอ้างอิงที่ [8] สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์ร่องก้นสำหรับการลดกระแสรั่วขอบสำหรับความถี่กว้างยิ่งยวด (Suppression of Cable Leakage Current for Edge-Fed Printed Dipole UWB Antennas Using Leakage-Blocking Slots) ตามเอกสารอ้างอิงที่ [9] สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์โค้งพับช่องอากาศแบนด์กว้างขนาดเล็กบนแผ่นกราวด์ (Wideband Low-Profile Printed Dipole Antenna Incorporated With Folded Strips and Corner-Cut Parasitic Patches Above the Ground Plane) ซึ่งแต่ละงานวิจัยมีโครงสร้างและคุณลักษณะดังต่อไปนี้

สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์รูปสามเหลี่ยมโพลาริซเซชันเชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนสำหรับสถานีฐานแบนด์กว้างจากเอกสารอ้างอิงที่ [5] เป็นงานวิจัยของ Yanshan Gou และคณะ ซึ่งตีพิมพ์ในปี 2014 ได้นำเสนอสายอากาศไดโพลแบบพิมพ์ขนาดกะทัดรัดบนซับสเตรตสำหรับการใช้งานสถานีฐานไดโพลแพทช์สามเหลี่ยม 4 ตัวถูกนำมาใช้เพื่อสร้างโพลาริซเซชันเชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน สายอากาศในระบบ IMT-Advanced จำเป็นต้องครอบคลุมแบนด์วิดท์กว้างได้ เพื่อแก้ปัญหานี้ได้วางตัวบาลัน (Balun: Balanced-Unbalanced) ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองตัวที่เชื่อมต่อกับตัวเชื่อมต่อ SMA 50 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เห็นได้ว่าค่า VSWR ที่ได้จากการจำลองและการวัด ในช่วงความถี่ 1.7 ถึง 2.9 GHz แบนด์วิดท์ของอิมพีแดนซ์กว้างพอสำหรับการใช้งานสถานีฐานครอบคลุมความถี่ GSM1800 (1.7 - 1.88 GHz), CDMA1900 (1.85 - 1.99 GHz), TD-SCDMA (2.01 - 2.025 GHz), WiFi (2.4 - 2.48 GHz) และ LTE (2.5 - 2.69 GHz) และผลจากการวัดและการจำลองค่า $|S_{11}|$ ช่วงแถบความถี่ใช้งานตั้งแต่ 1.7 GHz ถึง 2.9 GHz ต่ำกว่า -35 dB และต่ำกว่า -39 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การออกแบบสายอากาศตามเอกสารอ้างอิงที่ [5] อาศัยพื้นฐานของสายอากาศโพลาริซเซชันเชิงเส้นและได้รับการยืนยันจากการทดลอง สายอากาศไดโพลที่เสนอมีข้อได้เปรียบ คือ ต้นทุนต่ำ มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และมีแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ 52% ครอบคลุมความถี่ใช้งานตั้งแต่ 1.7 - 2.9 GHz

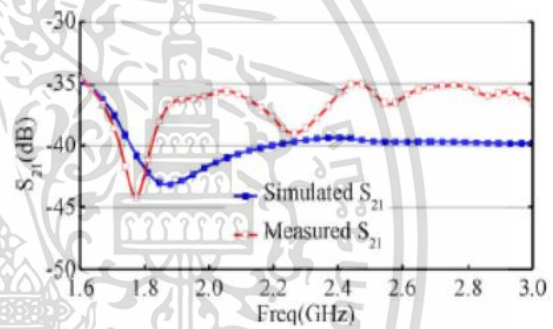
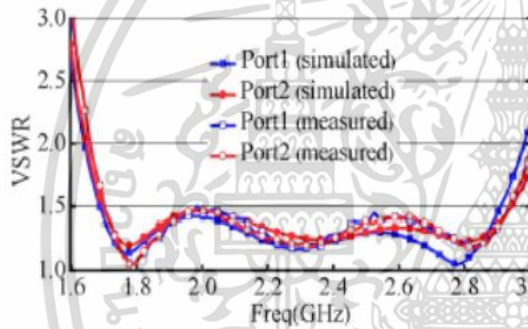
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายอากาศ ในรูปที่ 4, 6 ของอ้างอิง [5]



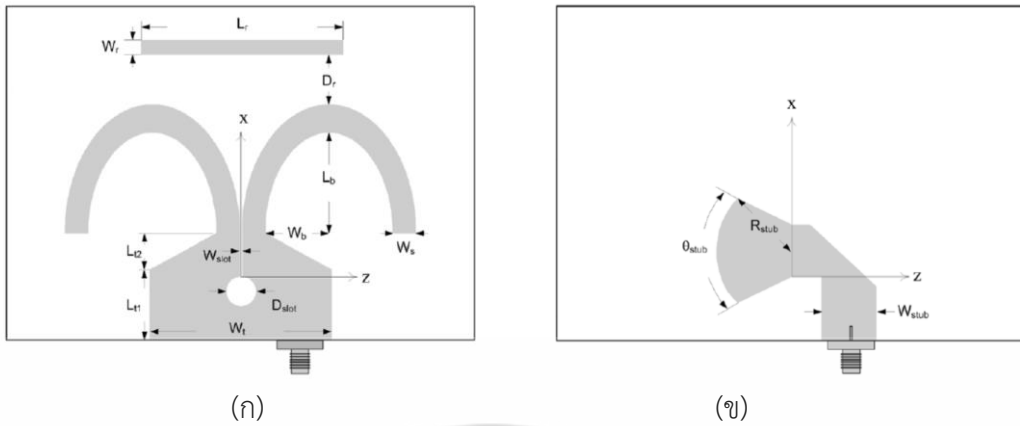
(ก) เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งผลการจำลอง และการวัด

(ข) เปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับผลการจำลองและการวัด

รูปที่ 2.6 ผลการจำลองและการวัดค่าสายอากาศ ในรูปที่ 7 และ 10 ของอ้างอิง [5]

สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์ร่องโค้งเร็วสำหรับความถี่แบนด์กว้างยิ่งยวดจากเอกสารอ้างอิงที่ [6] ได้ศึกษาสายอากาศระนาบสำหรับการประยุกต์ใช้งานความถี่แบนด์กว้างยิ่งยวด (UWB) สายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างแบบตัวแพร่กระจายคลื่นโค้งมน ขนาดกว้างที่ค่อย ๆ เรียวโค้งลง ดังรูปที่ 2.7 โดยนำเสนอแนวทางการออกแบบ และศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และอัตราขยายสายอากาศ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของสายอากาศที่นำเสนอสำหรับการประยุกต์ใช้งานความถี่แบนด์กว้างยิ่งยวด UWB ซึ่งสายอากาศมีค่า $|S_{11}| < -9.5$ dB (หรือ $VSWR < 2$) และอัตราขยายสายอากาศครอบคลุมสเปกตรัม UWB ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งรวมถึงมีแบนด์วิดท์กว้าง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง

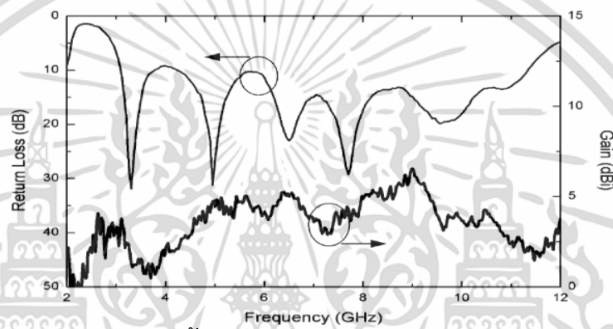
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

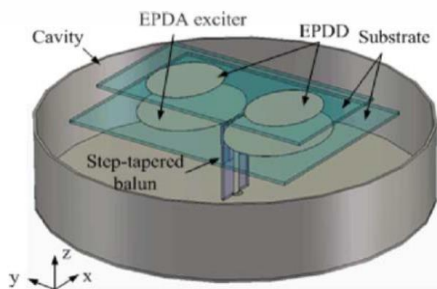
(ข)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างสายอากาศของอ้างอิง [6]

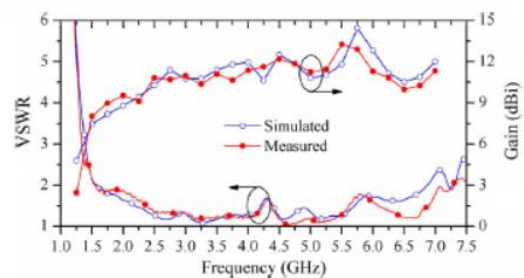


รูปที่ 2.8 ผลการวัดการสูญเสียสะท้อนกลับและอัตราขยายสายอากาศในรูปที่ 2 ของอ้างอิง [6]

สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์รูปวงรีมีโพรงด้านหลังแบนด์กว้างเพิ่มประสิทธิภาพแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากเอกสารอ้างอิงที่ [7] นำเสนอสายอากาศไดโพลรูปวงรีแบนด์วิดท์กว้าง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ตัวชี้้นำรูปวงรีถูกวางไว้ด้านหน้าสายอากาศไดโพลแบบพิมพ์รูปวงรี เพื่อปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแถบความถี่สูง สายอากาศถูกบ่อนสัญญาณโดยใช้ตัวเชื่อมต่อแบบ SMA ผ่านบอลันที่ค่อย ๆ ลดขนาดลง มีผลการจำลองและการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ 129.7% สำหรับ $VSWR < 2$ ในช่วงความถี่ 1.55 - 7.27 GHz มีอัตราขยายสายอากาศ 8.04 - 13.27 dBi และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ที่มีการแพร่คลื่นด้านหลังต่ำ ดังที่แสดงในรูป 2.9

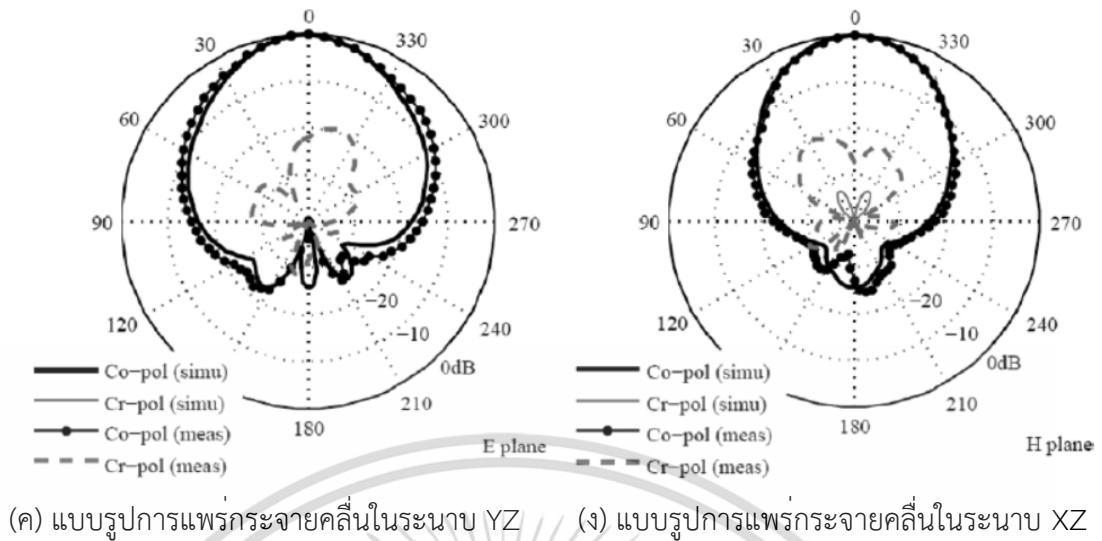


(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



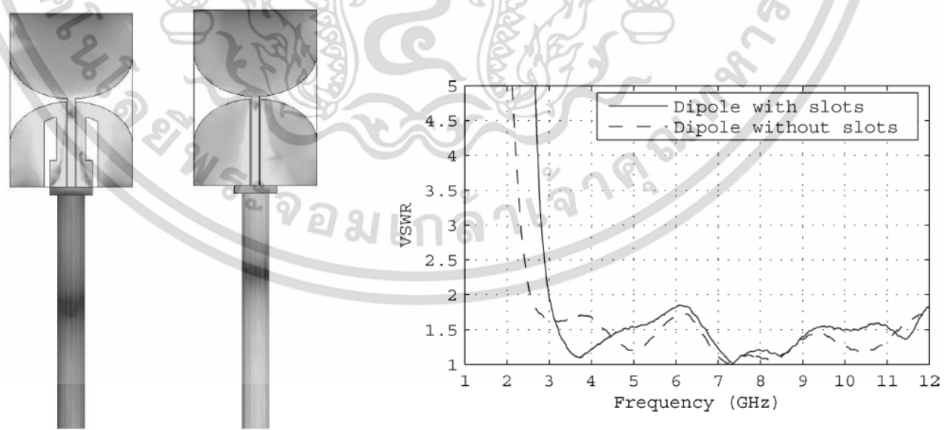
(ข) VSWR และ Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 สายอากาศจากอ้างอิง [7]

สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์พร้อมกันสำหรับการลดกระแสรั่วขอบจากเอกสารอ้างอิงที่ [8] นำเสนอวิธีการสำหรับการลดกระแสรั่วไหลสำหรับสายอากาศไดโพลแบบพิมพ์อัล (UWB) โดยใช้ร่องบล็อกการรั่วไหล การมีร่องดังกล่าวสองร่อง บริเวณลำคลื่นนำ (Coplanar Waveguide (CPW) Transmission Line) จะช่วยยับยั้งกระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวภายนอกของตัวนำสัญญาณ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ VSWR ใดๆก็ตาม จะเห็นว่าสายอากาศไดโพลทั้งสองตัวสามารถใช้งานสำหรับความถี่ 3.1 - 10.6 GHz (UWB) เมื่อดูจากผลการทดสอบค่า VSWR ดังแสดงในรูปที่ 2.10



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) VSWR

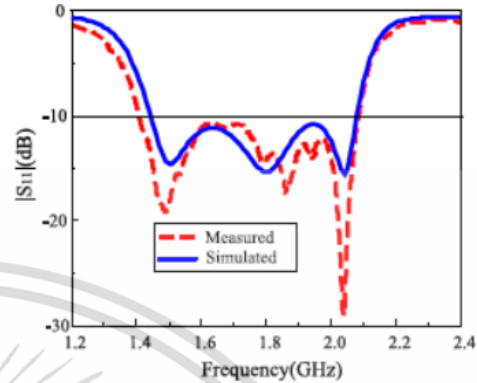
รูปที่ 2.10 สายอากาศจากอ้างอิง [8]

สายอากาศไดโพลแบบพิมพ์โค้งพับช่องกากบาทแถบกว้างขนาดเล็กบนแผ่นกราวด์ จากเอกสารอ้างอิงที่ [9] ได้ใช้สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นแบบพิมพ์เป็นสายอากาศองค์ประกอบในการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร์กระจายคลื่น แถบพับและฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มแบนด์วิดท์ โครงสร้างสายอากาศมีขนาดรวม 120 มม × 120 มม × 16.3 มม ($0.69\lambda_0 \times 0.69\lambda_0 \times 0.094\lambda_0$ ที่ 1.74 GHz) และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ 1.39 - 2.09 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2.11



(ก) โครงสร้างสายอากาศ

(ข) $|S_{11}|$

รูปที่ 2.11 สายอากาศจากอ้างอิง [9]

สรุปคุณสมบัติของสายอากาศชนิดไดโพลแบบพิมพ์จากงานวิจัยที่มีมาก่อน ที่ได้กล่าวมาในข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศชนิดไดโพลแบบพิมพ์ที่มีมาก่อน

งานวิจัยที่มีมาก่อน	โครงสร้างสายอากาศ	ความถี่	การประยุกต์ใช้งาน	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	วัสดุที่ใช้
[5]	แบบพิมพ์รูปสามเหลี่ยม	1.9 - 2.9 GHz	สถานีฐาน	ทิศทางเดียว	PCB
[6]	แบบพิมพ์ร่องโค้งเรียว	3.1 - 10.6 GHz	เทคโนโลยี UWB	รอบทิศทาง	PCB
[7]	แบบพิมพ์รูปวงรีมีโพรงด้านหลัง	1.55 - 7.27 GHz	ระบบสื่อสารไร้สายแถบกว้าง	ทิศทางเดียว	แผ่นทองแดงและแผ่นอลูมิเนียม
[8]	แบบพิมพ์ร่องก้น	3.1 - 10.6 GHz	เทคโนโลยี UWB	รอบทิศทาง	PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

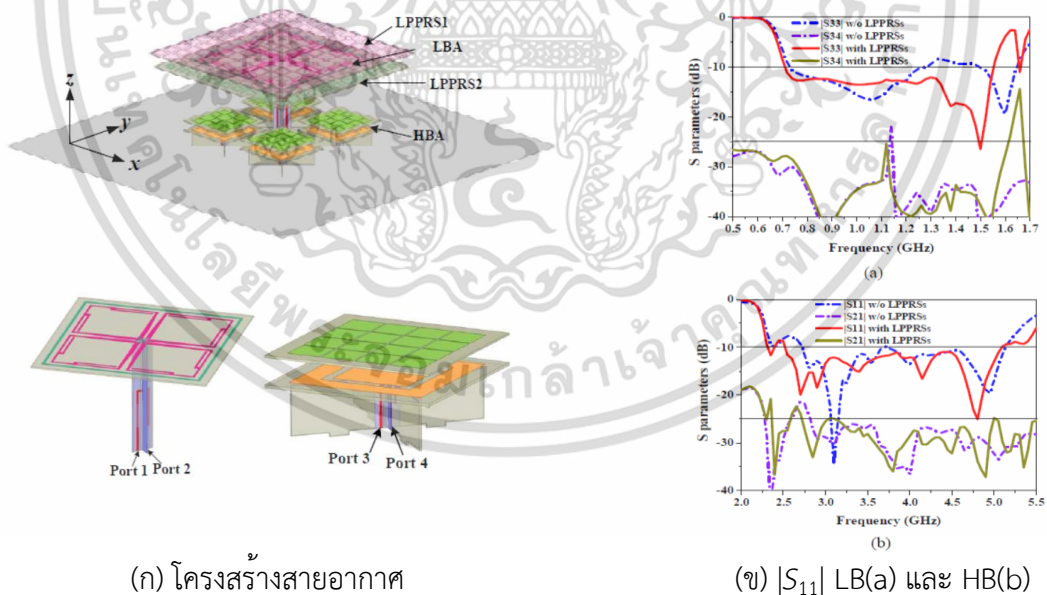
งานวิจัยที่มีมาก่อน	โครงสร้างสายอากาศ	ความถี่	การประยุกต์ใช้งาน	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	วัสดุที่ใช้
[9]	แบบพิมพ์โค้งพับช่องกากบาท	1.39 - 2.09 GHz	เทคโนโลยีแถบความถี่กว้าง	ทิศทางเดียว	PCB

2.10.2 งานวิจัยสายอากาศการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สำหรับสถานีฐานที่มีมาก่อน

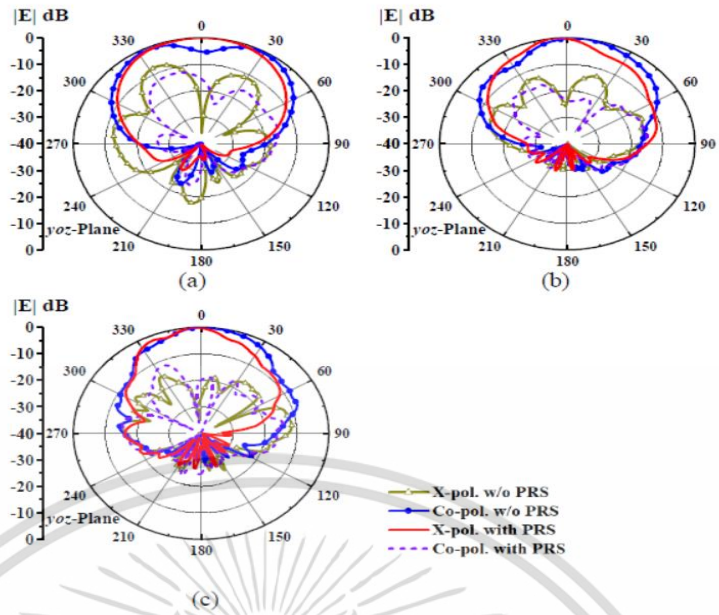
สายอากาศสำหรับสถานีฐานมีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นส่วนที่มีความสำคัญในด้านการสื่อสารเบื้องต้นสำหรับระบบโทรคมนาคม การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ การทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาและพัฒนาสายอากาศประจำสถานีฐานที่มีความสามารถในการใช้งานและสามารถรองรับการใช้งานของระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ที่มีความเร็วและประสิทธิภาพสูงในการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มีสายอากาศหลายชนิดถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สำหรับสถานีฐานที่มีมาก่อนตามเอกสารอ้างอิงที่ [10 - 14] โดยสายอากาศตามเอกสารอ้างอิงที่ [10] สายอากาศแถวลำดับแบบช่องแบนด์กว้างคู่ขนาดกะทัดรัดสำหรับการใช้งานสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 (A Compact Dual Broadband Shared-Aperture Antenna Array for 5G Base Station Applications) เป็นสายอากาศไดโพลที่ทำงานในแบนด์ต่ำ (LB) ที่ 0.69 - 1.52 GHz และสายอากาศแถวลำดับ 2x2 ที่ทำงานในแบนด์สูง (HB) ที่ 2.3 - 5.0 GHz สายอากาศมีคุณลักษณะที่เหมาะสมและมีแถบความถี่กว้างครอบคลุมความถี่ที่ต้องการศึกษา สำหรับสายอากาศในเอกสารอ้างอิง [11] สายอากาศไดโพลโพลาริซ์คู่ขนาดกะทัดรัดสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 (A Compact Dual-Polarized Dipole Antenna for 5G Base Station) ถูกนำเสนอโดยส่วนแพร่กระจายคลื่นแบบรูปคู่ขนาน มีบาลันสำหรับป้อนสัญญาณสองตัว และแขนของสายอากาศถูกพับลงด้านล่างเพื่อทำให้มีขนาดเล็กลง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าสายอากาศทำงานได้ในแถบความถี่ 3.68 - 4.05 GHz ตามเอกสารอ้างอิงที่ [12] สายอากาศแถวลำดับแบบช่องโพลาริซ์คู่สำหรับสถานีฐาน 2/3/4/5 จากผลที่ได้ สายอากาศแถวลำดับประกอบด้วยสายอากาศไดโพล 4 ตัวทำงานในย่านความถี่ 2/3/4 และสายอากาศไมโครสตริบช่องเชื่อมต่อ 7 ตัว ทำงานในย่านความถี่ 5 สายอากาศในเอกสารอ้างอิงที่ [13] สายอากาศไดโพลเชิงเส้นตั้งฉากแถบกว้างโพลาริซ์คู่สำหรับสถานีฐาน LTE/5 (A Dual-Polarized and Wideband Orthogonal Dipole Antenna for LTE/5G Base Station Applications) ออกแบบสายอากาศด้วยย่านความถี่ทำงานครอบคลุมการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 4 และการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 (2.3~3.6 GHz) สายอากาศนี้เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้ในสถานีฐาน LTE/5G ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 6 GHz ในเอกสารอ้างอิงที่ [14] เป็นสายอากาศสายอากาศไดโพลแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกว้างและโพลาริซ์คู่โครงสร้างกะทัดรัดสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Broadband Dual-Polarized Magnetolectric Dipole Antenna With Compact Structure for 5 Base Station) งานวิจัยนี้จึงใช้สายอากาศไดโพลในการออกแบบโดยใช้เทคนิคที่น่าสนใจคือไดโพลแม่เหล็กไฟฟ้า (Magneto-Electric dipole) ซึ่งประกอบด้วยไดโพลไฟฟ้า (Electric Dipole) และ ไดโพลแม่เหล็ก (Magnetic Dipole) ที่ทำงานร่วมกันโดยใช้การป้อนสัญญาณแบบแอมมาเพื่อเพิ่มการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ทำให้มีแถบความถี่กว้าง มีแบบรูปการแพร่พลังงานที่สมมาตรทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก รองรับความถี่ใช้งานที่ 3.06 - 5.28 GHz และมีอัตราขยาย 9.61 dBi โดยประมาณ ซึ่งแต่ละงานวิจัยมีโครงสร้างและคุณลักษณะดังต่อไปนี้

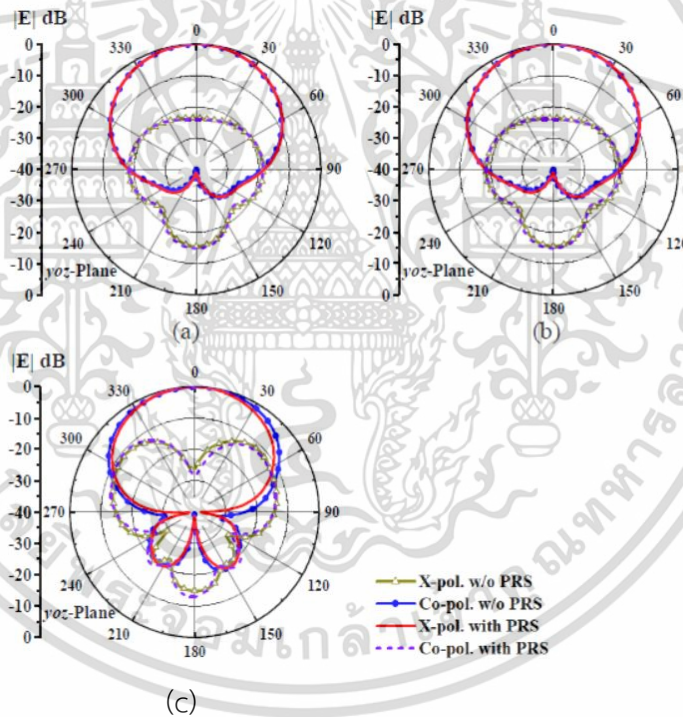
สายอากาศแถวลำดับแบบช่องแบนด์กว้างคู่ขนาดกะทัดรัดสำหรับการใช้งานสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จากอ้างอิงที่ [10] รูปแบบของสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศไดโพลสำหรับย่านความถี่ต่ำ และสายอากาศแถวลำดับขนาด 2x2 สำหรับย่านความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}| < -10$ dB สายอากาศมีแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ 75% ในย่านความถี่ 0.69 - 1.52 GHz สำหรับ LBA (Low-band antenna) ขณะที่แถวลำดับ HBA (High-band antenna) มีแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ 74% ครอบคลุมความถี่ใช้งาน 2.3 - 5.0 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสายอากาศแถวลำดับ 2x2 สำหรับย่านความถี่สูง และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสายอากาศไดโพลสำหรับย่านความถี่ต่ำ มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่มีทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ค, ง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น HB ที่ความถี่ (a) 2.3 GHz (b) 3.6 GHz และ (c) 5 GHz

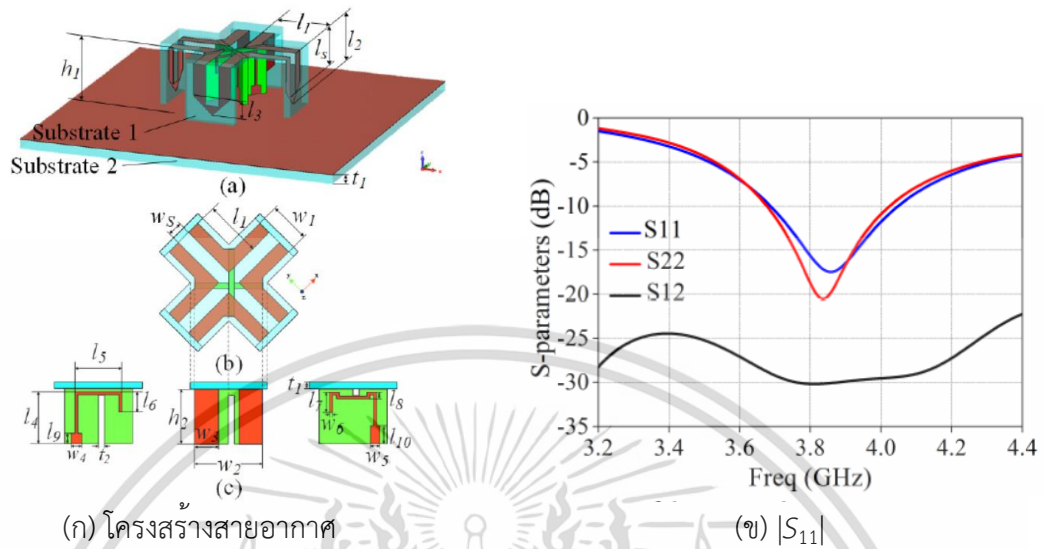


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น LB ที่ความถี่ (a) 0.7 GHz (b) 1.1 GHz และ (c) 1.52 GHz

รูปที่ 2.12 สายอากาศจากอ้างอิง [10]

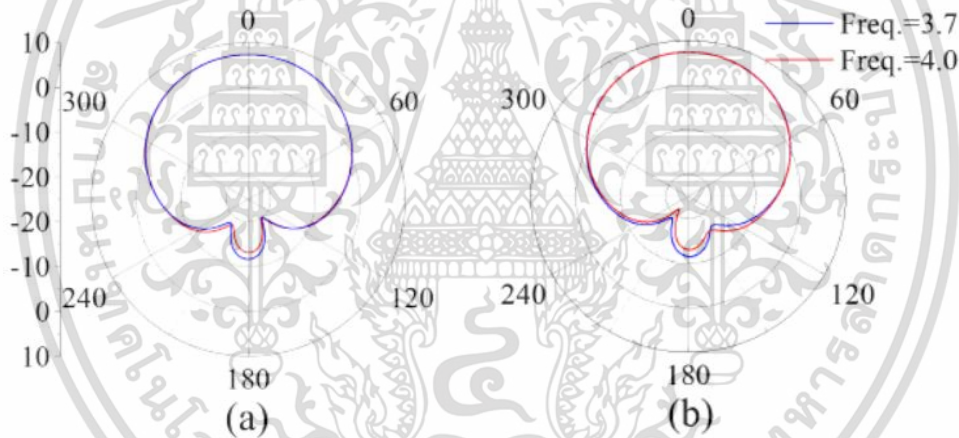
สายอากาศไดโพลโพลาริซชันคู่ขนาดกะทัดรัดสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จากเอกสารอ้างอิงที่ [11] ประกอบด้วยสายอากาศไดโพลไขว้สองเส้น บาลันป้อนสัญญาณ 2 ตัว แขนของตัวแพร่กระจายคลื่นงอลงด้านล่างวางบนแผ่นสะท้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.13(ก) ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -27dB ในช่วงความถี่ 3.68 - 4.05 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2.13(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ y-z ที่ความถี่ 3.7 GHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่หวังกำไร ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GHz (port-1) และในระนาบ y-z ที่ความถี่ 4.0 GHz (port-2) สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และมีความกว้างครึ่งกำลัง (HPBW) ประมาณ 84° ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ค)



(ก) โครงสร้างสายอากาศ

(ข) $|S_{11}|$

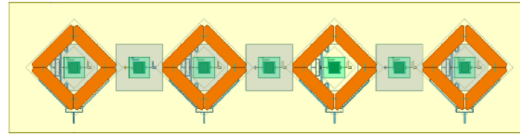


(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น yz plane port-1 (a) และ yz plane port-2 (b)

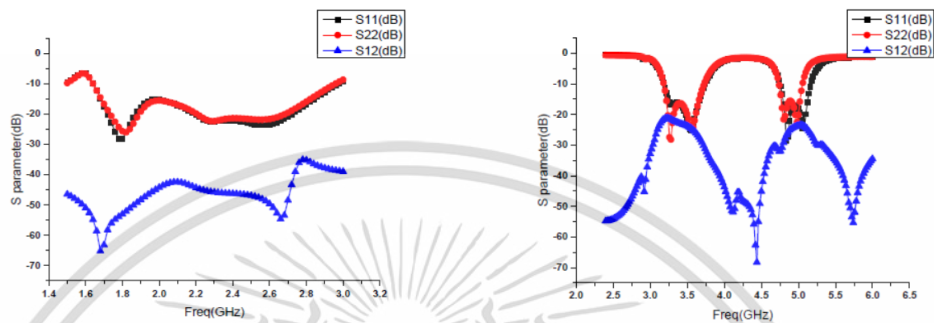
รูปที่ 2.13 สายอากาศจากอ้างอิง [11]

สายอากาศแฉกลำดับแบบช่องโพลาร์ซึ่งคู่สำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 2/3/4/5 จากเอกสารอ้างอิงที่ [12] ประกอบด้วยสายอากาศไดโพล 4 ตัวที่ทำงานในย่านความถี่ 2/3/4 และสายอากาศไมโครสตริบเจาะร่องคู่จำนวน 7 ตัวที่ทำงานในย่านความถี่ 5 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) จากผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ช่วงความถี่ต่ำของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -15dB ตลอดย่านความถี่ 1.70 - 2.75 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) และผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ช่วงความถี่สูงของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -15dB ช่วงความถี่ 3.4 - 3.6 GHz และ 4.8 - 5.0 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



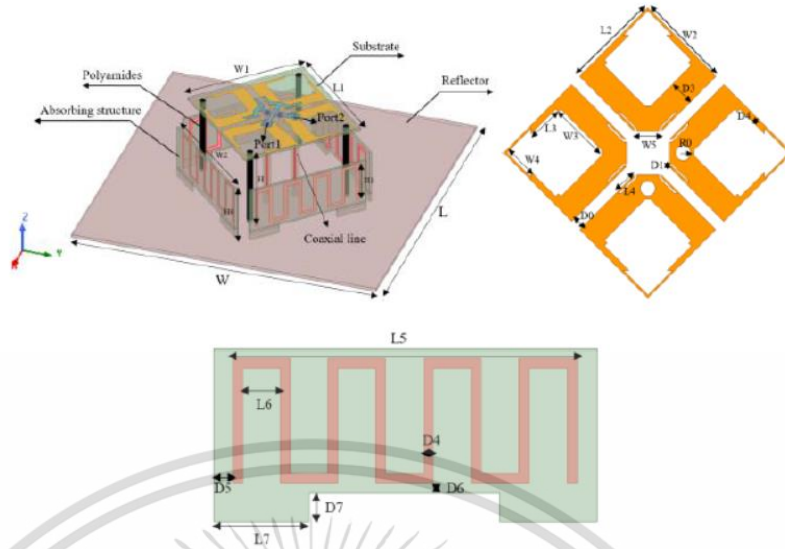
(ก) โครงสร้างสายอากาศ

(ข) $|S_{11}|$ ความถี่ 1.7 - 2.7 GHz(ค) $|S_{11}|$ ความถี่ 3.4 - 3.6 GHz, 4.8 - 5.0 GHz

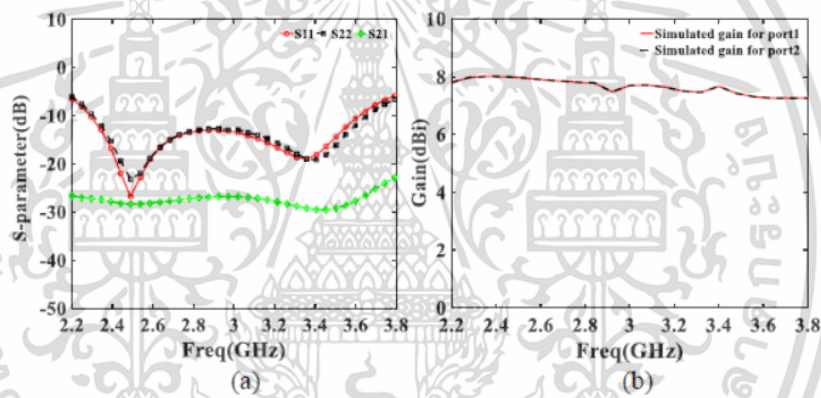
รูปที่ 2.14 สายอากาศจากอ้างอิง [12]

สายอากาศไดโพลเชิงเส้นตั้งฉากแถบกว้างโพลาริซเอชันสำหรับสถานีฐาน LTE/5G จากเอกสารอ้างอิงที่ [13] ประกอบด้วยสายอากาศไดโพลคู่ตั้งฉาก แผ่นสะท้อน โครงสร้างดูดซับ และบาลูนไมโครสตริปรูปตัว Y สายอากาศไดโพลตั้งฉากพิมพ์บนแผ่นวัสดุ Taconic RF-30 ซึ่งมีค่าสภาพยอมสัมพันธ์ เท่ากับ 3.0 และค่าตัวประกอบการสูญเสียเท่ากับ 0.0014 โดยมีความหนา 0.762 มม. ชั้นส่วนดูดซับถูกพิมพ์อยู่บนแผ่นวัสดุ FR4 ที่มีความหนา 0.8 มม. สภาพยอมสัมพันธ์ 4.4 และตัวประกอบการสูญเสีย 0.02 ใช้เสาไนลอนจำนวน 4 ตัวเพื่อรองรับสายอากาศ สายนำสัญญาณแบบเคเบิลรวมถูกต่อเข้ากับบาลูนไมโครสตริปรูปตัว Y เพื่อป้อนสัญญาณให้สายอากาศ การออกแบบ การปรับแก้ และการวิเคราะห์ทั้งหมด ใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ANSYS HFSS ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) สายอากาศมีแบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์ 53.3% ครอบคลุมความถี่ใช้งาน 2.3 - 3.63 GHz สำหรับค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|/|S_{22}| \leq -10$ dB และการแยกสัญญาณ $|S_{21}| \leq -26$ dB นอกจากนี้ สายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 7.6 ± 0.4 dBi ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โครงสร้างสายอากาศ



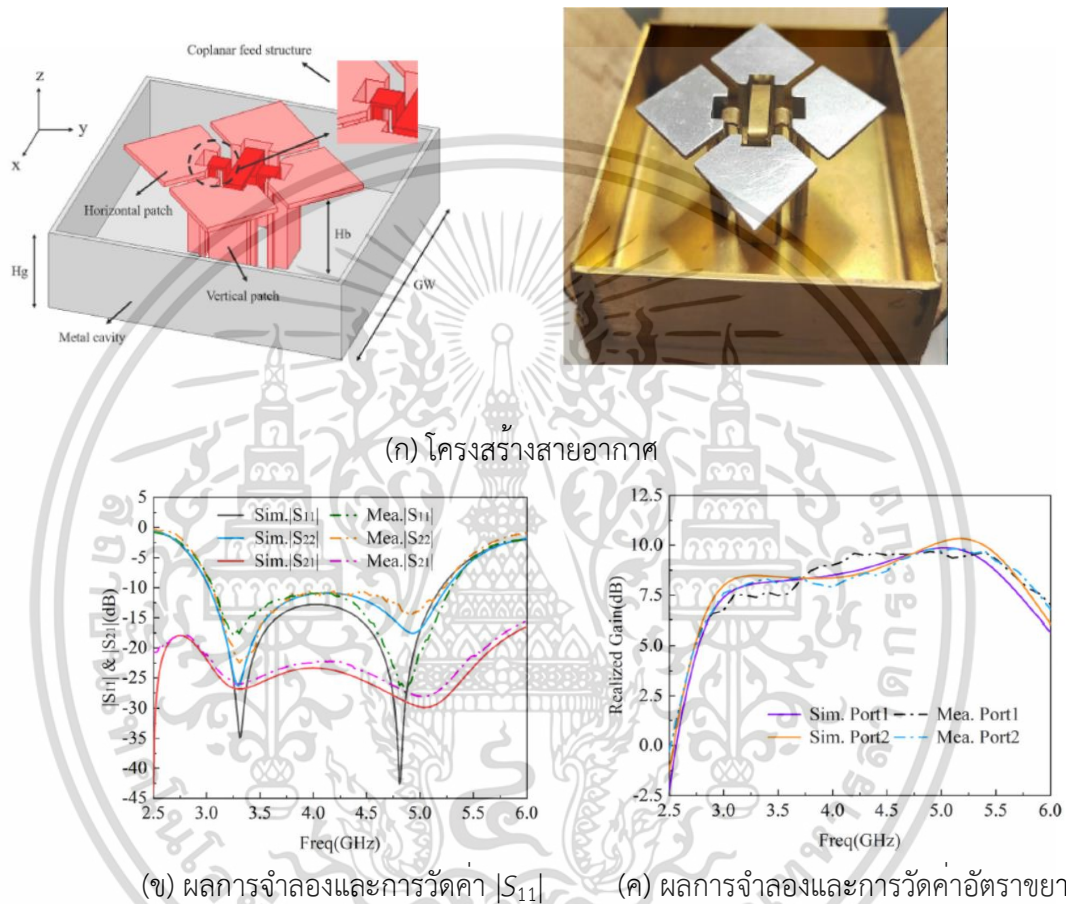
(ข) ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และผลการจำลองอัตราขยาย

รูปที่ 2.15 สายอากาศจากอ้างอิง [13]

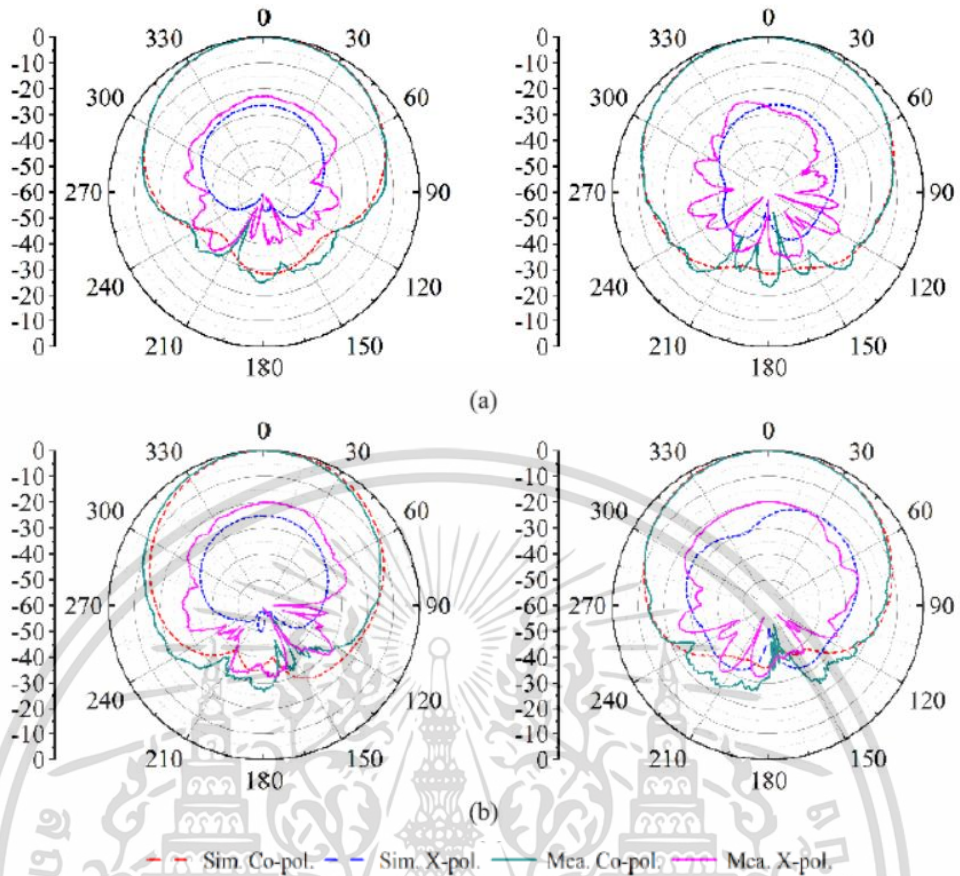
สายอากาศไดโพลแม่เหล็กไฟฟ้าแบนด์กว้างและโพลาริซเคชันโครงสร้างกะทัดรัดสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จากเอกสารอ้างอิงที่ [14] ประกอบด้วยสายอากาศแบบระนาบเชื่อมต่อในแนวนอน และสายอากาศแบบระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแนวตั้งฉากที่เจาะช่องรูปสี่เหลี่ยมโค้งมน สายนำสัญญาณรูปตัวแอลสองเส้น และช่องเปิดทรงสี่เหลี่ยม ไดโพลสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นระหว่างระนาบตั้งฉากและกราวด์ และระนาบเชื่อมต่อแนวนอนแพตช์จะทำหน้าที่เป็นไดโพลไฟฟ้า โครงสร้างโดยรวมมีขนาด 56 มม. x 56 มม. x 19.4 มม. โดยทำการสร้างสายอากาศจากแผ่นโลหะที่มีความหนาซึ่งสามารถลดการสูญเสียของซบสเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ผลการจำลองและการวัดที่ต่ำกว่า -10 dB มีค่าแบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์ 53% ที่ความถี่ 3.02 - 5.20 GHz และมีค่าแบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์ 53.2% ที่ความถี่ 3.06 - 5.28 GHz ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 (ข) พบว่ามีความแตกต่างระหว่างผลการวัดจริงกับผลการจำลอง อาจเกิดจากการสร้างสายอากาศและความผิดพลาดในการวัด แต่โดยรวมมีความสอดคล้องกัน และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงความถี่ใช้งานสายอากาศมีอัตราขยายสูงสุดได้ถึง 9.6 dBi ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 (ค) สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E และระนาบ H จากการจำลองและการวัด ที่ความถี่ 3.3 GHz และ 4 GHz มีโพลาไรซ์แนวนอนและแนวตั้ง ค่าสูงสุดต่ำกว่า -19 dB และโพลาไรซ์แนวนอนและแนวตั้ง $\pm 60^\circ$ ต่ำกว่า -23 dB ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 (ง) ซึ่งโพลาไรซ์แนวนอนและแนวตั้งนี้มีเหมาะสำหรับสายอากาศประจำสถานีฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ 3.3 GHz และ ความถี่ 4 GHz

รูปที่ 2.16 สายอากาศจากอ้างอิง [14]

สรุปคุณลักษณะของสายอากาศการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สำหรับสถานีฐานที่มีมาก่อนที่
ได้กล่าวมาในข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 สำหรับสถานีฐานจาก
ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน

งานวิจัยที่มี มาก่อน	โครงสร้าง สายอากาศ	ช่วงกว้าง ความถี่ (MHz)	แบบรูปการ แพร่กระจาย คลื่น	โพลาไรซ์	อัตรา ขยาย (dBi)
[10]	แถวลำดับแบบช่อง	0.69 - 1.5 GHz และ 2.3-5 2 GHz	ทิศทางเดียว	เชิงเส้น	8-11
[11]	แบบลูบไขว้	3.68 - 4.05 GHz	ทิศทางเดียว	เชิงเส้น	6.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่มีมาก่อน	โครงสร้างสายอากาศ	ช่วงกว้างความถี่ (MHz)	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	โพลาริซ	อัตราขยาย (dBi)
[12]	แถวลำดับแบบช่อง	1.7 - 2.7 GHz และ 3.4 - 3.6 GHz และ 4.8 - 5 GHz	ทิศทางเดียว	เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน	-
[13]	แบบเชิงเส้นตั้งฉาก	2.3 - 3.63 GHz	ทิศทางเดียว	เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน	9.6
[14]	แบบระนาบและแผ่นพิมพ์	3.06 - 5.28 GHz	ทิศทางเดียว	เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน	7.6

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามที่กล่าวมา สายอากาศไดโพลที่ใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ประจำสถานีฐานนั้น ได้มีการนำเสนอเทคนิคการขยายแถบกว้างความถี่ โดยมีโครงสร้างหลายแบบ เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานที่ต้องการ รวมถึงการใช้หลักการสายอากาศแถวลำดับแบบสมมาตร และการเพิ่มแผ่นสะท้อน ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดระดับของลำคลื่นด้านหลัง และสายอากาศจะมีพลังงานไปด้านหน้าโดยตรง มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบมีผลให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบพิมพ์สี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่งมีคุณลักษณะการแพร่พลังงานแบบทิศทางเดียว มีโครงสร้างตัวแพร่พลังงานไม่ซับซ้อน โดยพัฒนาจากโครงสร้างไดโพลแผ่นพิมพ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และใช้เทคนิคการเจาะร่อง (Slot) และเพิ่มองค์ประกอบร่องตัวรูปตัว U แบบคู่ เพื่อขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศเกิดการคัปปลิงระหว่างตัวแพร่พลังงาน และสามารถทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการได้ สายอากาศที่ออกแบบจะมีโครงสร้างลักษณะเป็นแถวลำดับเชิงเส้น (Linear array) ถูกวางเรียงกันในแนวตั้งหรือในระนาบ H-plane เพื่อให้มีอัตราขยายสูง มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่แคบในแนวตั้ง และมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังที่กว้างในแนวนอน และนอกจากนี้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่เหมาะสมก็ช่วยลดระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างได้ (Side lobe level: SLL)

ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับที่นำเสนอประกอบสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

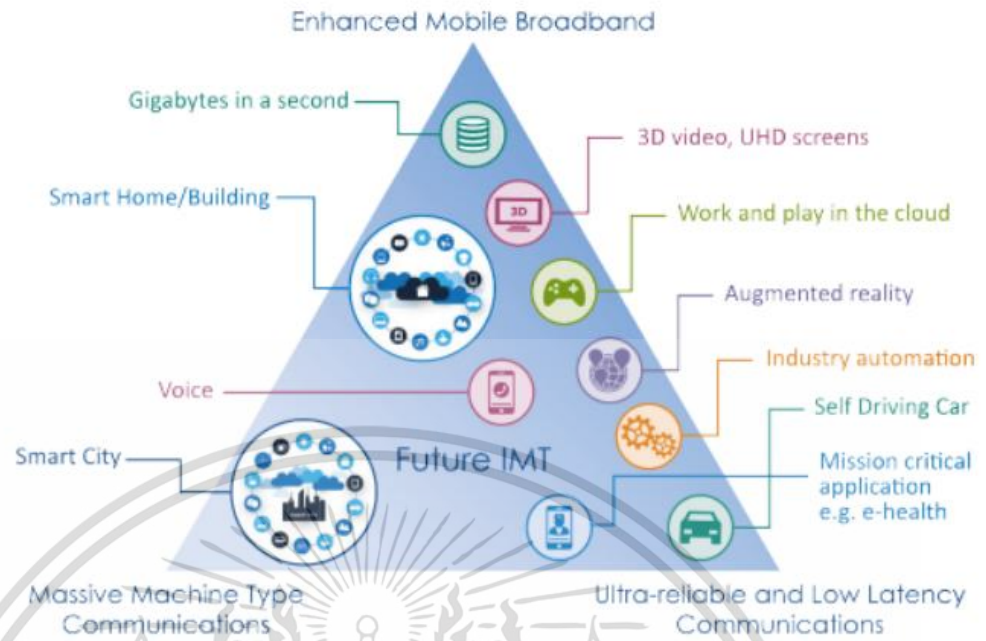
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียงในแนวตั้งด้วยระยะห่างสม่ำเสมอ มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่เหมาะสม วางอยู่เหนือแผ่นสะท้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยจะทำการออกแบบสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 3.5 GHz ภายใต้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศไม่ต่ำกว่า 2 dBi ตลอดย่านความถี่ใช้งานและมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในแนวตั้งแคบ อยู่ที่ประมาณ $15^\circ \pm 5^\circ$

2.11 บทสรุป

ในบทนี้ได้เสนอทฤษฎีและวิวัฒนาการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยเริ่มการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 1 จนถึงปัจจุบันนี้ ซึ่งเป็นการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 และงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศไดโพลแถบความถี่กว้าง และงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศประจำสถานีฐานส่งสัญญาณ 5 จากประวัติความเป็นมารวมทั้งมาตรฐานระบบการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบเคลื่อนที่ ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยได้นำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มาเริ่มใช้แล้ว และได้ขยายไปสู่การสื่อสารเครื่องกับเครื่อง หรือ IoT เพื่อสนับสนุน Vertical services ต่าง ๆ โดยส่วนมากแล้วการสร้างสายอากาศเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 นี้ ตามมาตรฐานของ IMT-2020 ที่มีการเพิ่มขีดความสามารถในด้านต่าง ๆ จากมาตรฐาน IMT-Advanced โดยเบื้องต้น ITU-R ได้สำรวจว่าผู้ใช้งานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 จะมีความต้องการใช้งาน 3 ด้านหลัก ๆ ดังรูปที่ 2.17 หรือขึ้นอยู่กับมาตรฐานซึ่งในประเทศไทย ได้ตั้งข้อกำหนดโดย กสทช. เรื่อง มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมลูกข่ายกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล International Mobile Telecommunications (IMT) ซึ่งใช้เทคโนโลยี IMT 2020

จากข้อกำหนดการออกแบบสายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่กล่าวมาแล้วนั้น จะต้องออกแบบสายอากาศให้มีแถบความถี่กว้าง มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเพราะต้องการอัตราขยายสูง มีโพลาไรซ์เซชันในแนวนอน และสามารถรองรับกำลังส่งสูง ๆ ได้ ด้วยเหตุผลหลัก ๆ ดังนี้ จึงได้นำโครงสร้างชนิดไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมผืนผ้าองค์ประกอบร่องตัดรูปตัว U มาออกแบบเป็นสายอากาศองค์ประกอบเดียวของสายอากาศอาร์เรย์เพื่อให้ได้แถบความถี่กว้าง ถูกวางอยู่เหนือแผ่นสะท้อนเพื่อให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สายอากาศองค์ประกอบเดียวถูกจัดวางในแนวนอนเพื่อควบคุมให้กระแสเรียงตัวในแนวนอนซึ่งทำให้เกิดโพลาไรซ์แนวนอนตามที่ต้องการ วัสดุที่นำมาใช้ออกแบบเป็นทองแดงและอลูมิเนียมเนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ต้นทุนต่ำ ทนต่ออุณหภูมิและกำลังงานส่งได้สูง โดยงานวิจัยที่นำเสนอนี้มีข้อดีในการนำมาจัดวางเรียงสายอากาศแถวลำดับได้ง่ายโดยที่คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการวางสายอากาศที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนคลื่นอาจทำให้โครงสร้างคูมีขนาดใหญ่ที่เป็นข้อด้อยของงานวิจัย



รูปที่ 2.17 การสำรวจความต้องการใช้งาน 3 ด้าน ผู้ใช้งาน 5 โดย ITU [3]

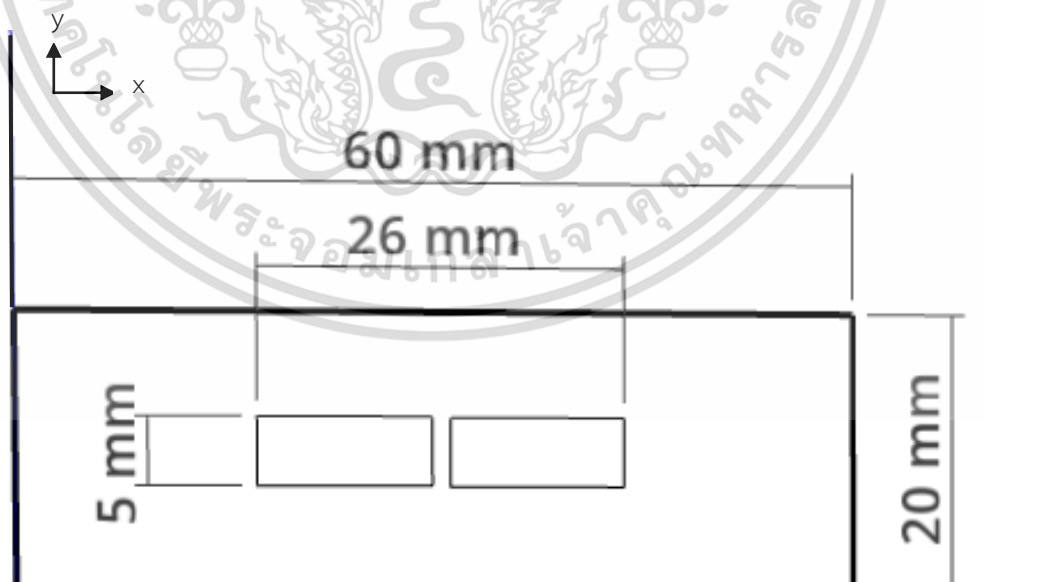
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

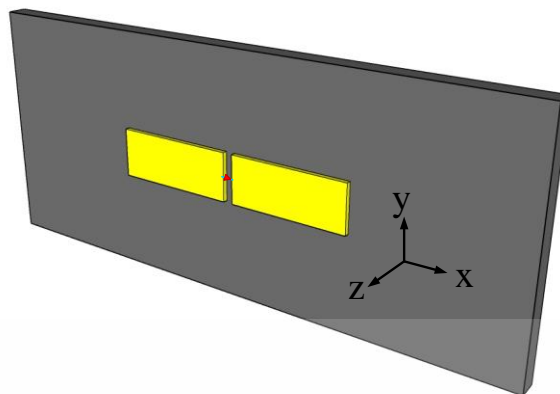
3.1 สายอากาศไดโพลสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ตั้งต้น

การศึกษาและออกแบบสายอากาศไดโพลสำหรับสำหรับสถานีฐานรุ่นที่ 5 การออกแบบ การสร้าง และการวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลพิมพ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับสถานีฐาน การสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 องค์ประกอบของสายอากาศประกอบด้วยไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูป สี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดตั้งอยู่บนตัวสะท้อนแบบสี่เหลี่ยม เพื่อให้ได้สายอากาศที่สามารถทำงานได้อย่างมี ประสิทธิภาพในย่านความถี่ที่ต้องการ (3.00 - 3.82 GHz) สายอากาศเริ่มต้นถูกออกแบบที่ความถี่ กลางของย่านความถี่ใช้งาน (f_c) ที่ 3.5 GHz สายอากาศไดโพลพิมพ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับสถานี ฐานรุ่นที่ 5 ตั้งต้น ที่ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio โดยทำการวิเคราะห์ $|S_{11}|$ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth) และมีอัตราขยายของสายอากาศที่ สูง เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีช่วงกว้างความถี่ที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดย ขนาดของโครงสร้างสายอากาศไดโพลเริ่มต้นถูกออกแบบที่ $\lambda_c/4 = 26$ mm เมื่อ λ_c คือความยาว คลื่นในอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz (λ มีความยาว = 85.71 mm, $\lambda/2$ มีความยาว = 42.855 mm) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1



(ก) ภาพด้านหน้าสายอากาศเริ่มต้น

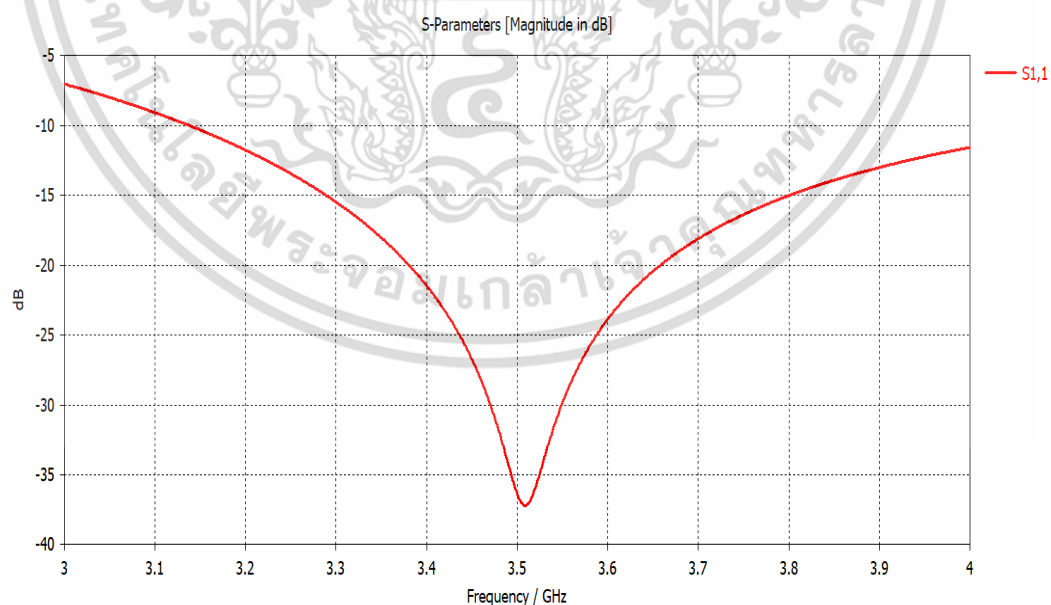
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพ 3 มิติจากการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าออกแบบที่ความถี่ 3.5 GHz

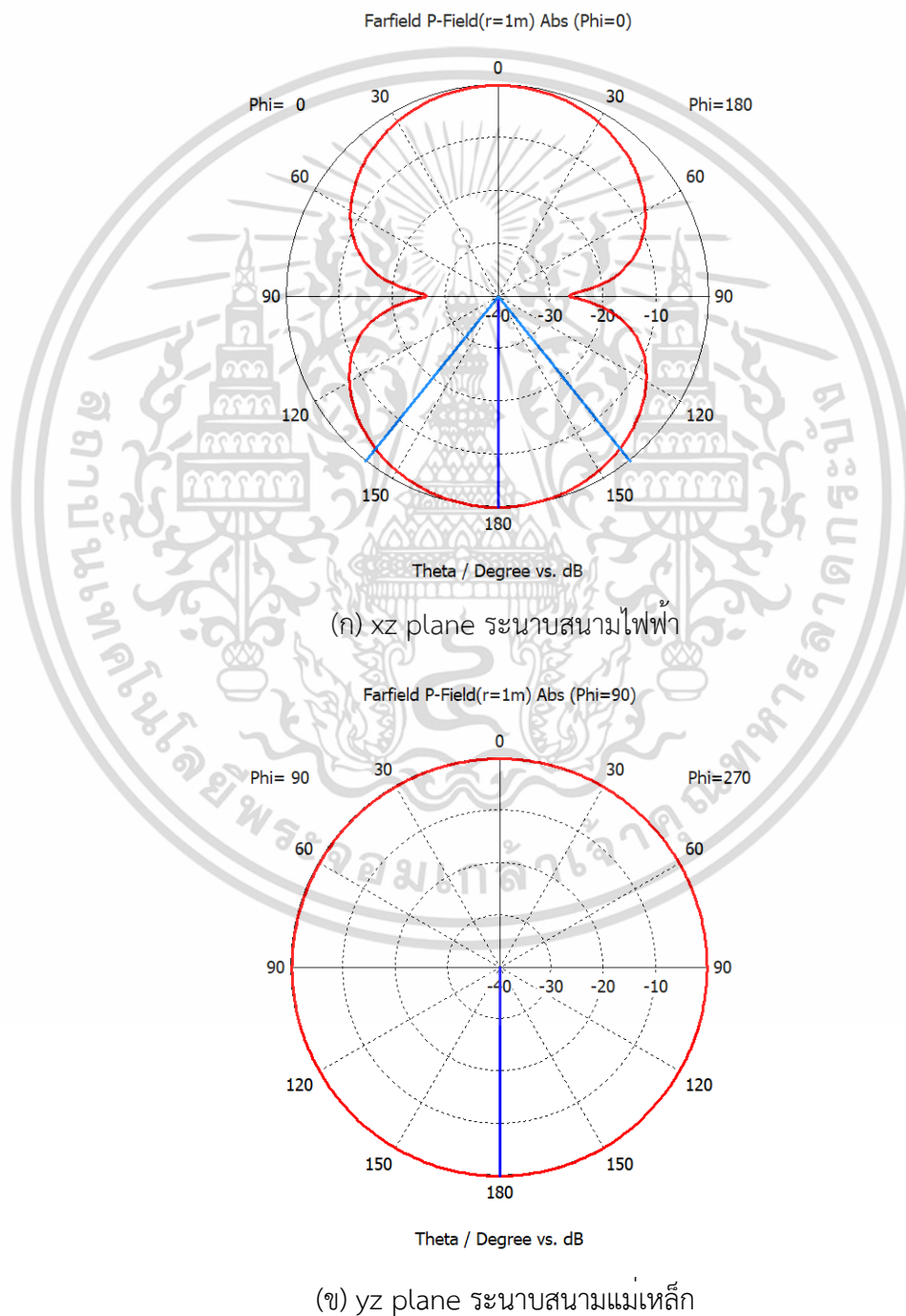
จากการจำลองผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะสามารถอธิบายได้ว่าสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ออกแบบด้วยค่าความยาวคลื่นประมาณ $\lambda_c / 4$ ซึ่งเท่ากับ 26 mm นั้นมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ตั้งแต่ 3.15 - 4.00 GHz ดังนั้นโครงสร้างไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่น่าเสนอได้



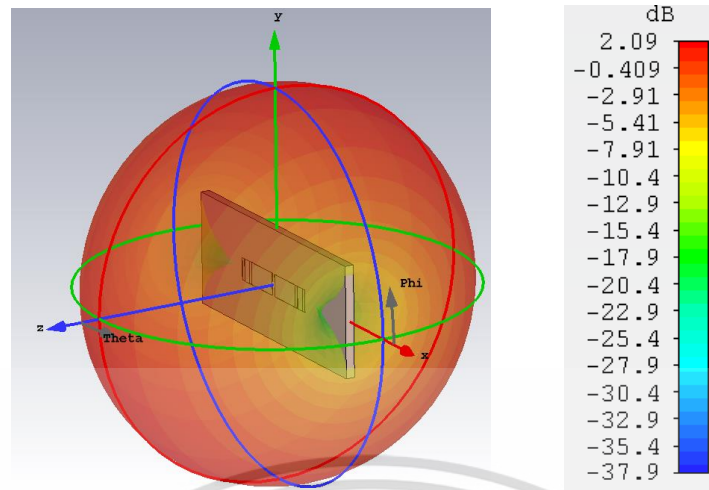
รูปที่ 3.2 ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ความถี่ 3.5 GHz ซึ่งสายอากาศตั้งต้นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Omnidirectional ซึ่งแสดงอยู่ในรูป 2 มิติ ระนาบ E-plane ($\phi = 0^\circ$) และระนาบ H-plane ($\phi = 90^\circ$) และรูป 3 มิติ โดยถูกกำหนดให้เป็นระนาบแนวนอน (Horizontal) และระนาบแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งค่าคุณลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่ว่าจะเป็น ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบแนวนอน ในระนาบแนวตั้ง ระดับของลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe level) และค่าอัตราขยายสายอากาศ (Gain Antenna) แสดงไว้ในตารางที่ 3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูป 3 มิติ

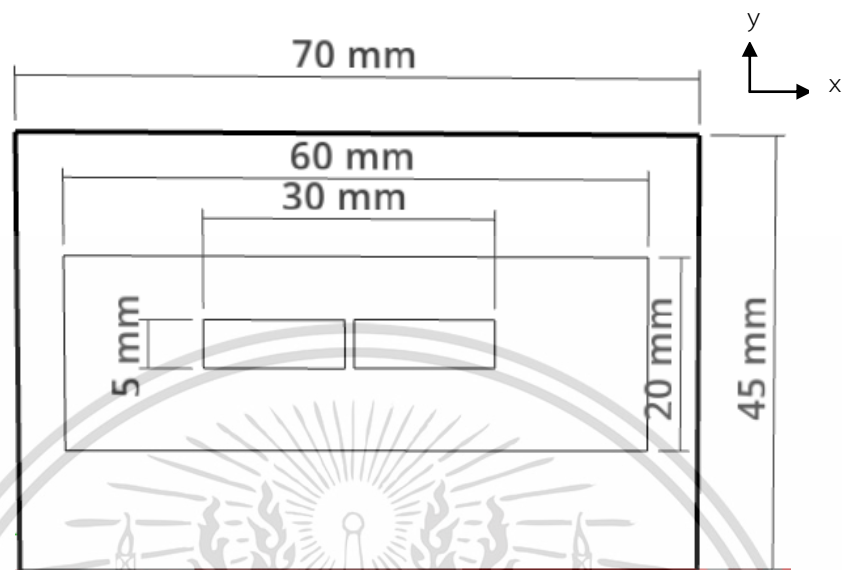
รูปที่ 3.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตั้งต้น
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ ความถี่ 3.5 GHz

ตารางที่ 3.2 ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

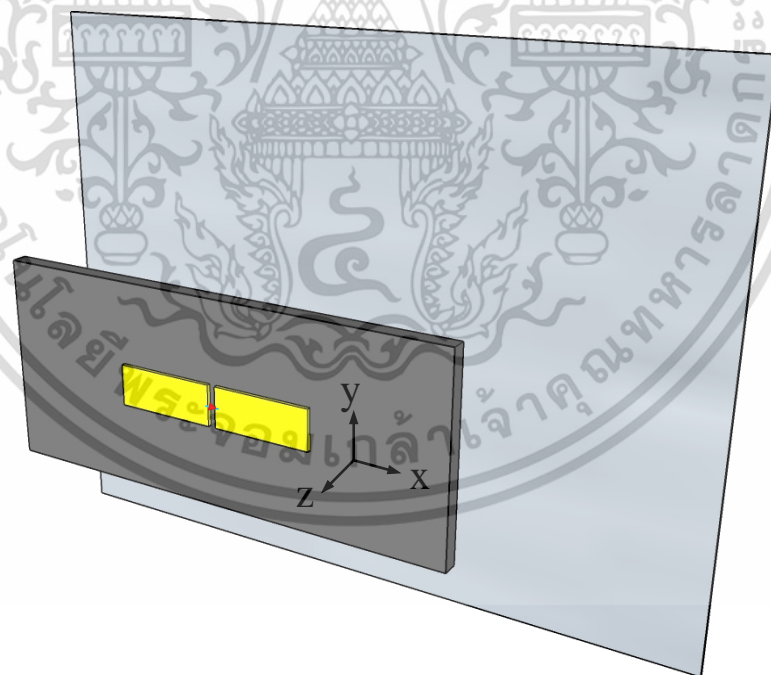
ค่าคุณลักษณะ	3.5 GHz
HPBW in E-plane (deg)	77.2
HPBW in H-plane (deg)	-
Back lobe level (dB)	-
Gain (dBi)	2.09

จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 3.5 GHz ข้างต้น สายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Omnidirectional แต่เนื่องจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศประจำสถานีฐานรุ่นที่ 5 ที่เหมาะสมควรมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Unidirectional ดังนั้นจึงทำการปรับโครงสร้างสายอากาศไดโพลตั้งต้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยปรับขนาดความยาวสายอากาศไดโพลจากเดิม 26 mm เป็นขนาด 30 mm และทำการเพิ่มแผ่นตัวสะท้อน (Reflector) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อให้พลังงานที่แพร่กระจายไปสอดคล้องกับเป้าหมายที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาพด้านหน้าสายอากาศตั้งต้น และแผ่นสะท้อนคลื่น

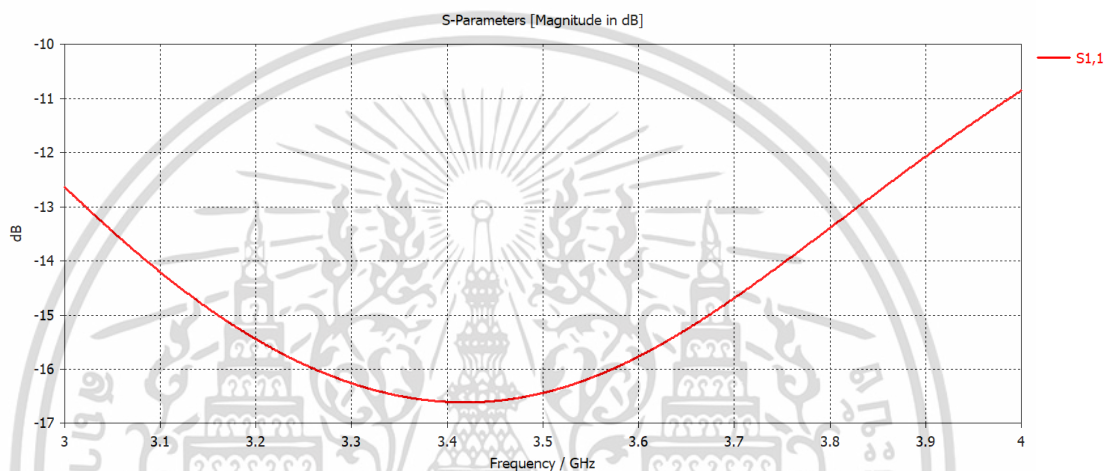


(ข) ภาพ 3 มิติการจำลองสายอากาศไดโพลและแผ่นสะท้อนคลื่นด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแผ่นสะท้อนคลื่น

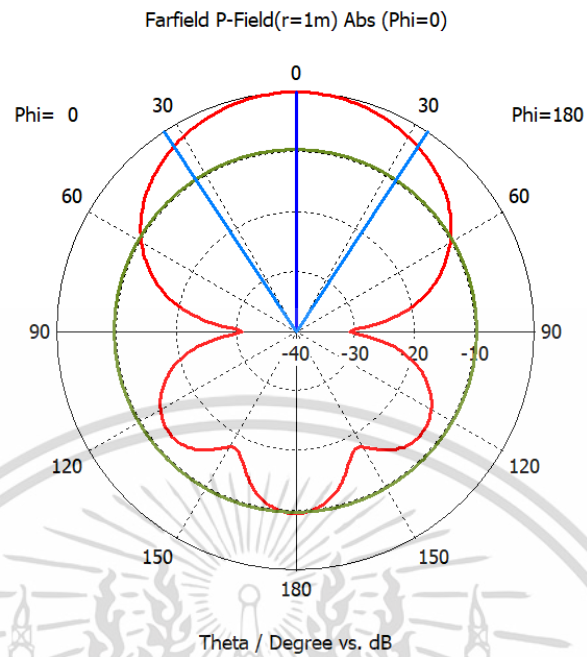
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองเพื่อหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 พบว่าสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ ที่ทำการปรับขนาดของสายอากาศไดโพลจากเดิม 26 mm เป็นขนาด 30 mm และนำมาวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ มีค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ที่เพิ่มขึ้นโดยสามารถครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 3 GHz - 4 GHz ดังนั้นสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ที่ทำการออกแบบ จึงเหมาะสมกับการใช้งานที่นำเสนอ เพื่อนำไปพัฒนาและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อไป

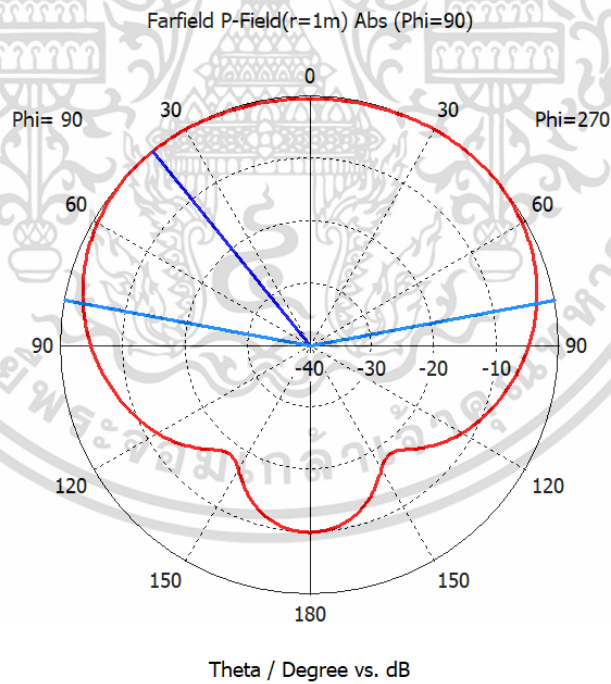


รูปที่ 3.5 ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น

ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ ที่ความถี่ 3.5 GHz ซึ่งสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Unidirectional ซึ่งแสดงอยู่ในรูป 2 มิติ ระนาบ E-plane ($\phi = 0^\circ$) และระนาบ H-plane ($\phi = 90^\circ$) และรูป 3 มิติ โดยถูกกำหนดให้เป็นระนาบแนวนอน (Horizontal) และระนาบแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศต้นแบบมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบแนวนอน ในระนาบแนวตั้ง ระดับของลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe level) และค่าอัตราขยายสายอากาศ (Gain Antenna) ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

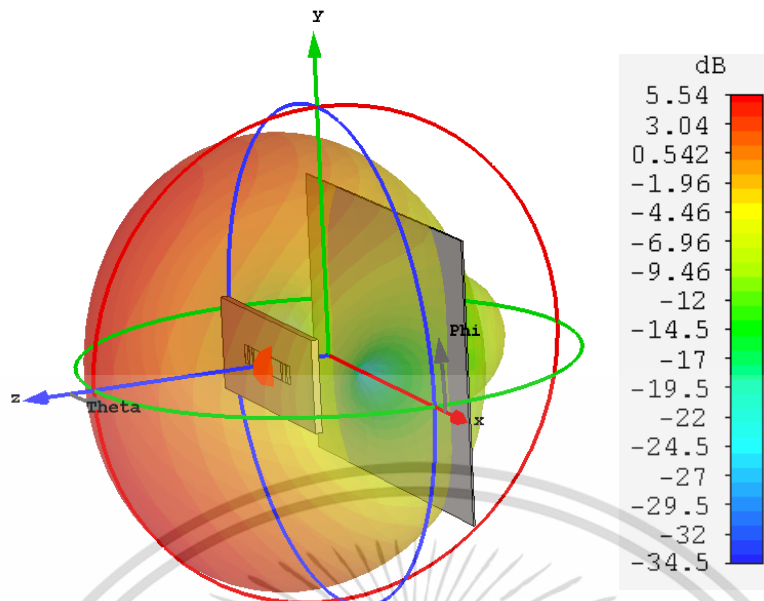


(ก) xz plane ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) yz plane ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูป 3 มิติ

รูปที่ 3.6 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล

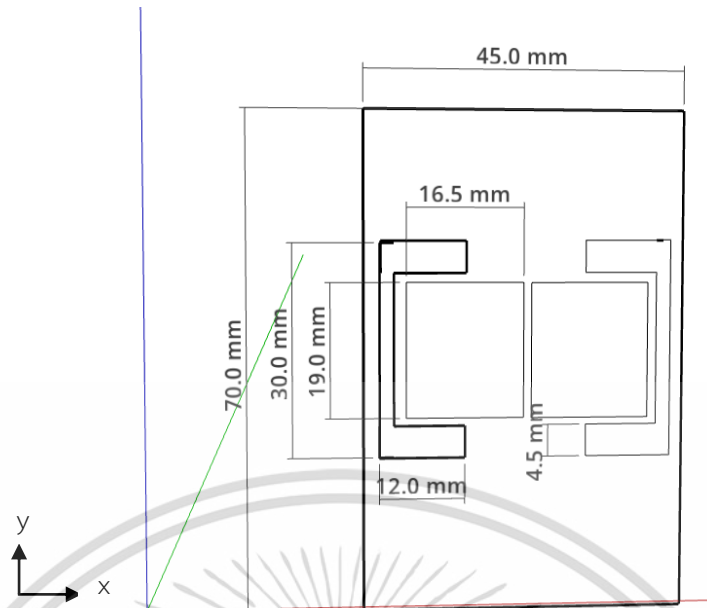
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ที่ความถี่ 3.5 GHz

ตารางที่ 3.3 ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

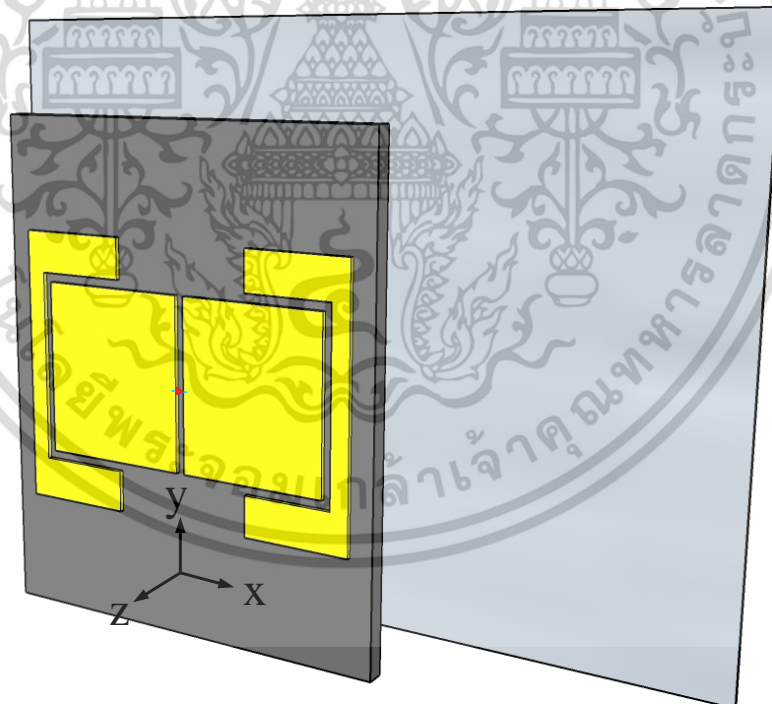
ค่าคุณลักษณะ	3.5 GHz
HPBW in E-plane (deg)	67.1
HPBW in H-plane (deg)	159
Back lobe level (dB)	-10.02
Gain (dBi)	5.54

จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ ที่ความถี่ 3.5 GHz ข้างต้น สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Unidirectional และจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) หรือค่า $|S_{11}|$ นั้นครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานแล้ว แต่ยังต้องการให้ได้แบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์กว้างมากขึ้น จึงได้ใช้การเจาะร่องบนตัวแพร่กระจายคลื่นไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำให้สายอากาศไดโพลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และองค์ประกอบร่องตัว U ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาพด้านหน้าสายอากาศไดโพล แผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape

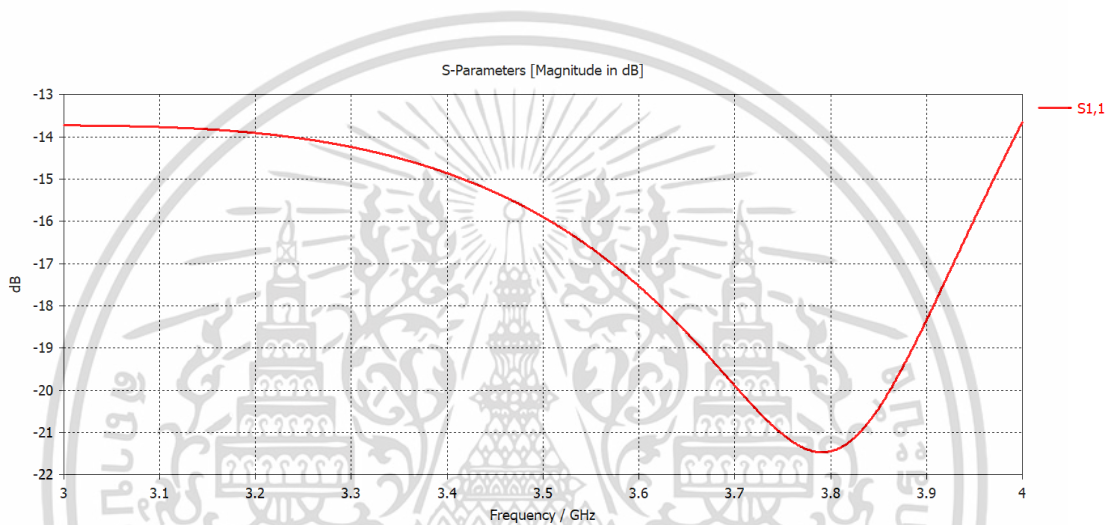


(ข) การออกแบบจำลองสายอากาศไดโพล แผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

รูปที่ 3.7 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape

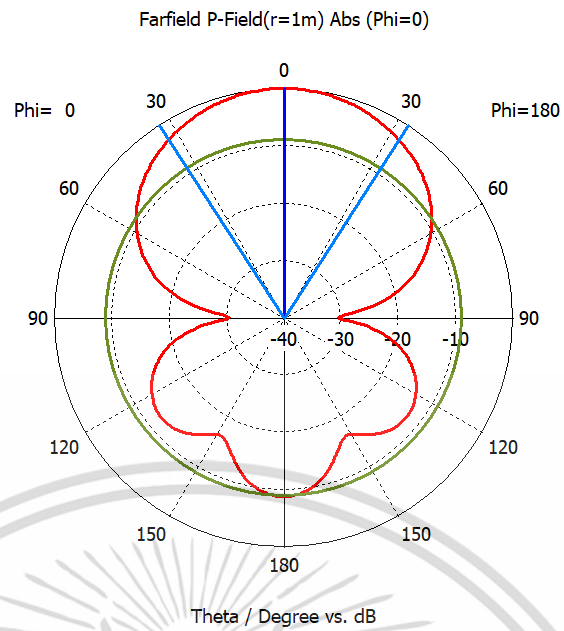
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ตั้งแต่ $3 - 4$ GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งเห็นได้ว่าการเจาะร่องทำให้เกิดการคับปลิงระหว่างตัวแพร่กระจายคลื่นซึ่งช่วยเพิ่มแบนด์วิธของสายอากาศ โดยหากการเจาะร่องมีขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสม จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นได้ ดังนั้นสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ที่ทำการออกแบบ จึงเหมาะสมกับการใช้งานที่นำเสนอ เพื่อนำไปพัฒนาและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อไป

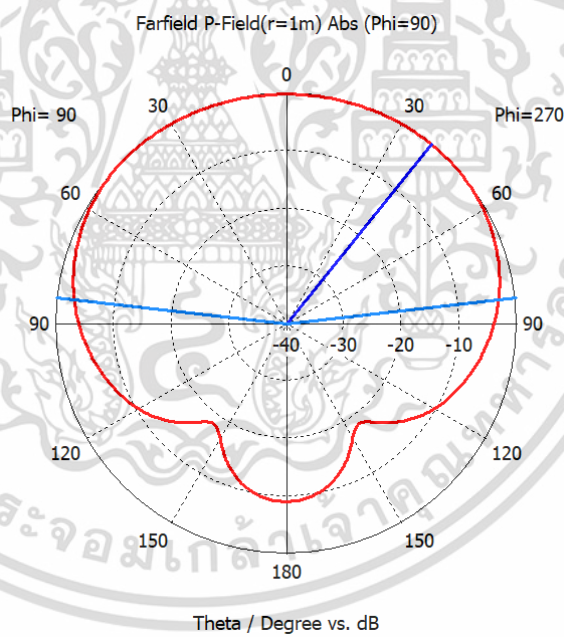


รูปที่ 3.8 ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape

ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ที่ความถี่ 3.5 GHz ซึ่งแสดงอยู่ในรูป 2 มิติ ระนาบ E-plane ($\phi = 0^\circ$) และระนาบ H-plane ($\phi = 90^\circ$) และรูป 3 มิติ โดยถูกกำหนดให้เป็นระนาบแนวนอน (Horizontal) และระนาบแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.9 จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศต้นแบบมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบแนวนอน ในระนาบแนวตั้ง ระดับของลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe level) และค่าอัตราขยายสายอากาศ (Gain Antenna) แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

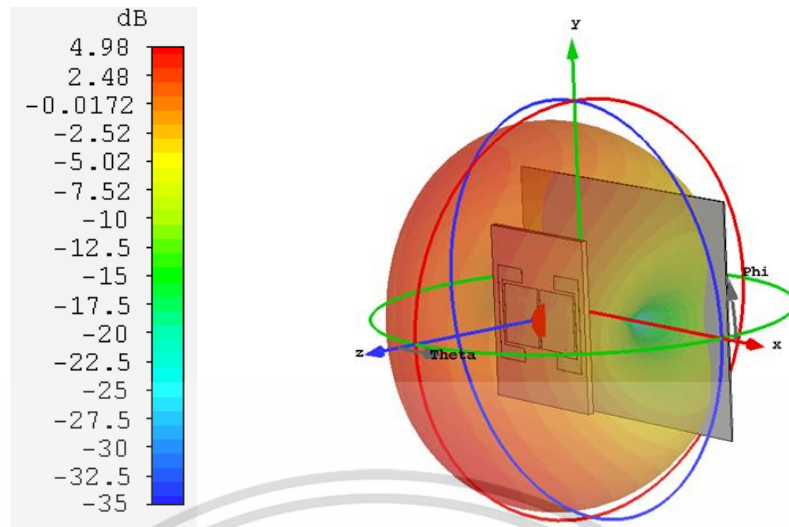


(ก) xz plane ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) yz plane ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูป 3 มิติ

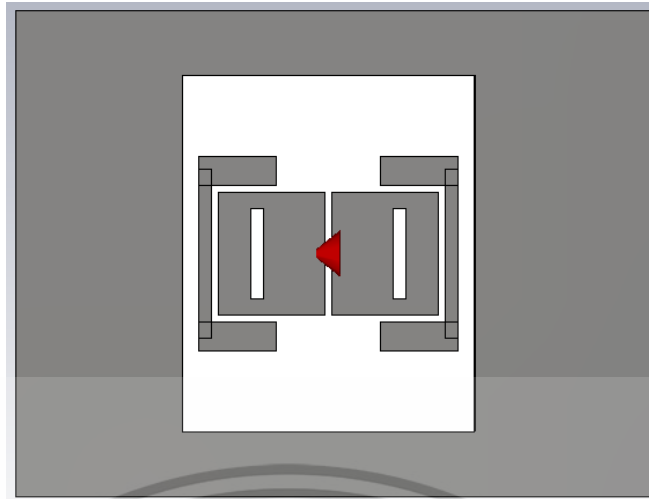
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape
ที่ความถี่ 3.5 GHz

ตารางที่ 3.4 ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-
Microwave Studio

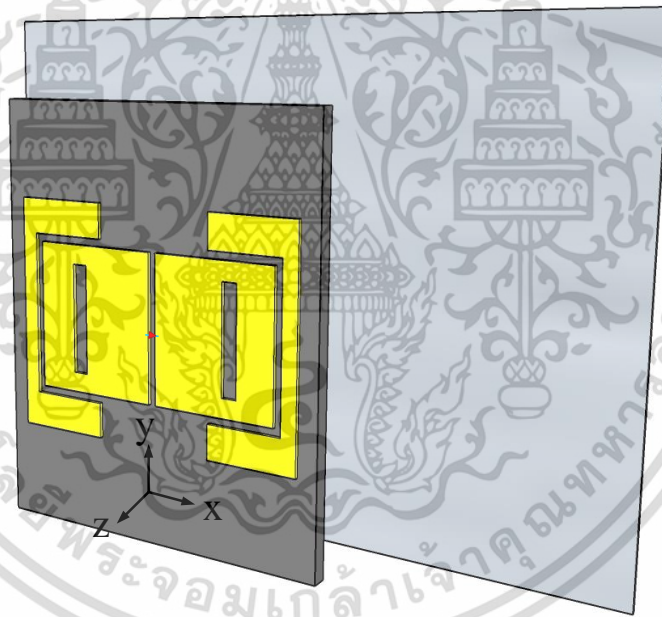
ค่าคุณลักษณะ	3.5 GHz
HPBW in E-plane (deg)	65.5
HPBW in H-plane (deg)	167.5
Back lobe level (dB)	-9.107
Gain (dBi)	4.98

จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ที่ความถี่ 3.5 GHz ข้างต้นสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Unidirectional และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) หรือค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานและมีแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์กว้างมากขึ้น แต่เพื่อลดการรบกวนและการทับซ้อนของสัญญาณ จึงนำหลักการเจาะร่องของสายอากาศมาใช้กับสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape เพื่อลดการเกิดการทับซ้อนของสัญญาณ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



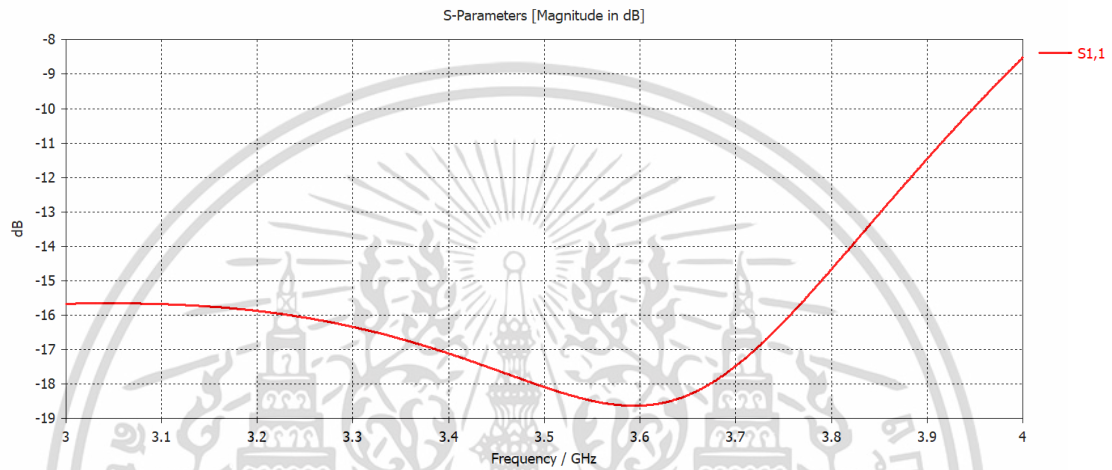
(ก) ภายด้าหน้าสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเจาะร่องวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และ
องค์ประกอบร่องตัด U-Shape



(ข) การออกแบบจำลองสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเจาะร่องวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และ
องค์ประกอบร่องตัด U-Shape ด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเจาะร่องวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และ
องค์ประกอบร่องตัด U-Shape

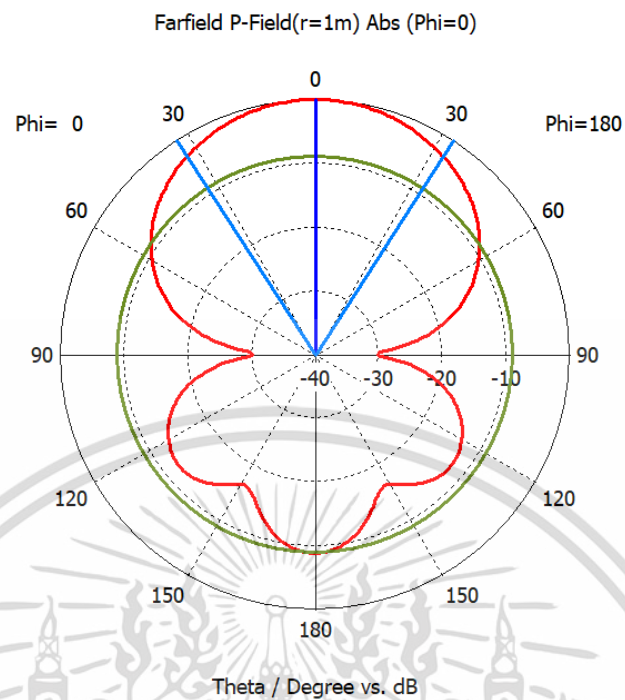
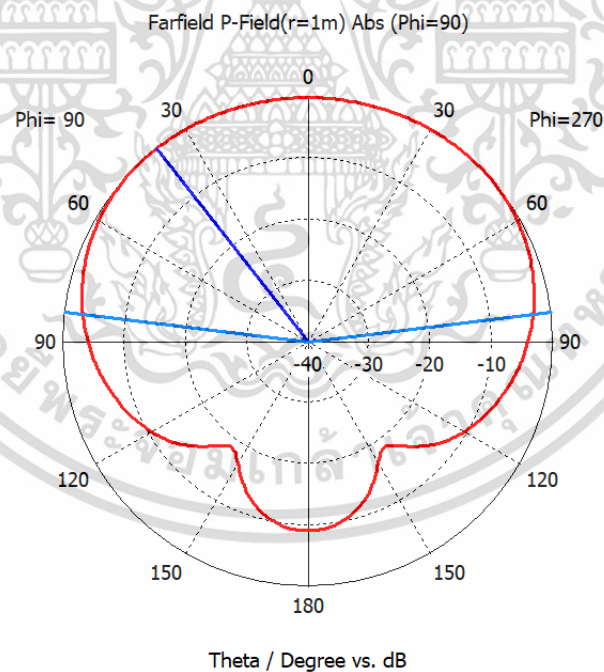
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเจาะร่องวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape มีค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.00 GHz - 3.95 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.11 หลังจากทำการออกแบบสายอากาศด้วยการเจาะร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนสายอากาศไดโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เห็นได้ว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์กว้างขึ้น และมีค่าอัตราขยายสายอากาศเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 (ค)

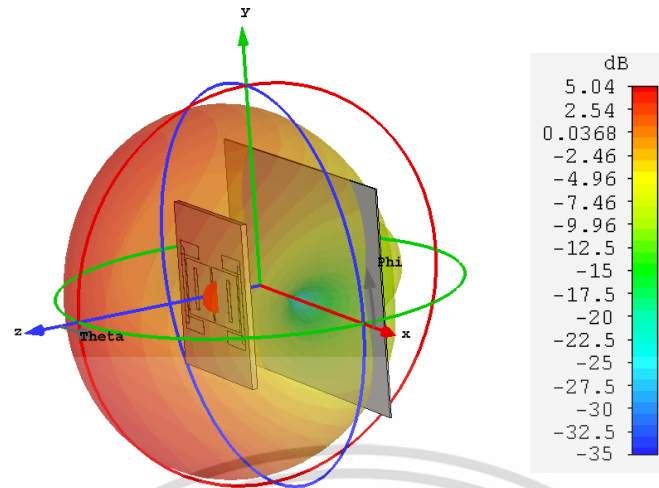


รูปที่ 3.11 ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape

ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลเจาะร่องแบบพิมพ์สี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่นความถี่ และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape ที่ความถี่ 3.5 GHz ซึ่งสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Unidirectional ซึ่งแสดงอยู่ในรูป 2 มิติ ระนาบ E-plane ($\phi = 0^\circ$) และระนาบ H-plane ($\phi = 90^\circ$) และรูป 3 มิติ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 โดยถูกกำหนดให้เป็นระนาบแนวนอน (Horizontal) และระนาบแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับ จากผลที่ได้พบว่าสายอากาศต้นแบบมีผลการมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบแนวนอน ในระนาบแนวตั้ง ลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe level) และค่าอัตราขยายสายอากาศ (Gain Antenna) ซึ่งค่าคุณลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าว แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

(ก) xz plane ระนาบสนามไฟฟ้า(ข) yz plane ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูป 3 มิติ

รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล
เจาะรูรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนแผ่นสะท้อนคลื่น และองค์ประกอบร่องตัด U-Shape
ที่ความถี่ 3.5 GHz

ตารางที่ 3.5 ค่าคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

ค่าคุณลักษณะ	3.5 GHz
HPBW in E-plane (deg)	65.7
HPBW in H-plane (deg)	166
Back lobe level (dB)	-9.16
Gain (dBi)	5.04

3.2 บทสรุป

สายอากาศต้นแบบสร้างจากแผ่นทองแดงความหนา 1 mm ซึ่งมีโครงสร้างแบบพิมพ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางอยู่เหนือแผ่นสะท้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำมาจากอลูมิเนียมหนา 2 mm เพื่อให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยที่สายอากาศกับแผ่นสะท้อนถูกยึดอยู่กับวัสดุชนิด Polyoxymethylene (POM) ซึ่งมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ_r) ในช่วงความถี่ใช้งาน (3.00 - 3.82 GHz) ขนาดที่เหมาะสมของแผ่นสะท้อนเป็น 13×30.5 cm ซึ่งสามารถลดระดับลำคลื่นด้านหลังต่ำกว่า -15 dB ตลอดย่านความถี่ใช้งาน และช่องว่างรอยตัดถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ โดยสายอากาศถูกเชื่อมต่อกับขั้วต่อแบบ SMA สัญญาณถูกป้อนโดยใช้สายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในทางที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ต้นแบบ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองถูกประเมินด้วยการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผล โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราขยาย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลาริเซชัน ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และระดับลำคลื่นด้านหลัง ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องเป็นในทิศทางเดียวกันและพิจารณาสรุปถึงข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศได้ดังนี้

ข้อดี

- สายอากาศทำงานย่านความถี่ใช้งานสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ได้
- โครงสร้างสายอากาศไม่ซับซ้อน และอธิบายโครงสร้างทางกายภาพได้
- เทคนิคช่องเปิดรอยตัด ช่วยให้สามารถเพิ่มช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศได้
- สายอากาศใช้วัสดุทองแดงกับอลูมิเนียม ซึ่งมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับงานสำหรับสายอากาศสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ได้
- สายอากาศมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเหมาะกับการนำไปใช้งานสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ได้

ข้อด้อย

- สายอากาศมีแผ่นสะท้อนคลื่นขนาดใหญ่ อาจทำให้การติดตั้งสายอากาศ ทำได้ไม่สะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การพัฒนาองค์ประกอบสายอากาศด้วยสายอากาศแถวลำดับ

4.1 ทฤษฎีสายอากาศแถวลำดับที่เกี่ยวข้อง

ตามที่ได้ทำการการศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศองค์ประกอบ เกี่ยวกับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งพบว่ามีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่กว้างและมีอัตราขยายไม่เพียงพอในการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่งต้องการอัตราขยายสูง เพื่อที่จะทำให้คุณสมบัติสายอากาศเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานรุ่นที่ 5 ที่ต้องการอัตราขยายสูง การเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า (Electrical size) ของสายอากาศเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้น หากใช้วิธีการเพิ่มขนาดองค์ประกอบของสายอากาศ อาจเกิด Side lobe จำนวนมาก และสายอากาศมีขนาดใหญ่ไม่สะดวกต่อการนำมาใช้งาน แต่ยังคงมีอีกหนึ่งวิธีที่สามารถทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดขององค์ประกอบสายอากาศ ซึ่งทำได้โดยการจัดองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง โดยนำสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวมาเรียงกัน เรียกว่า สายอากาศแถวลำดับ (Array Antenna)

สนามรวมของแถวลำดับจะคำนวณจากการรวมเวกเตอร์ของสนามการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบเดี่ยว โดยสมมติว่ากระแสในแต่ละองค์ประกอบเหมือนกันและไม่เกี่ยวข้องกัน (ไม่เกิดการคับลิ้ง) เพื่อที่จะให้เกิดสภาพเจาะจงทิศทาง และอัตราขยายเพิ่มขึ้น การหาสนามรวมของแถวลำดับทำได้โดยการรวมเวกเตอร์ของสนามที่แพร่กระจายจากแต่ละองค์ประกอบ และจะต้องเสริมกันในทิศทางที่ต้องการและหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการ โดยมีปัจจัยอย่างน้อย 5 ประการด้วยกันที่จะควบคุมรูปร่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับ (เป็นเส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม หรือทรงกลม เป็นต้น)

4.1.2 ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ

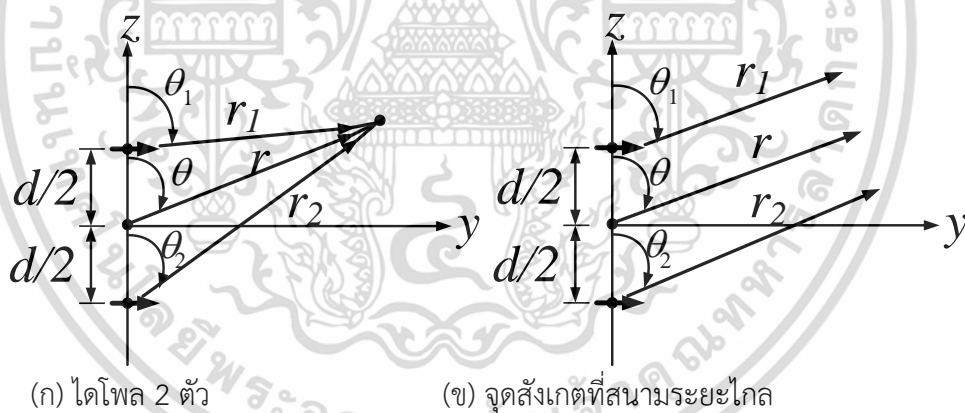
4.1.3 ขนาดกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ

4.1.4 เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ

4.1.5 แบบรูปของแต่ละองค์ประกอบ

4.2 แฉลล่ำด้บสององค้ประกอบ

สายอากาศไดโพลแฉลล่ำด้บสององค้ประกอบ [15] จะทำการวิเคราะห์ โดยสมมติการวางตามแนวอนและเรียงตามแกน z ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และสมมติว่าไม่มีการค้บปล้ิงระหว่างอีลิเมนต์ทั้งสองของสายอากาศ ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศไดโพลแฉลล่ำด้บสององค้ประกอบ จะเกิดจากผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งสองจากสายอากาศในระนาบ yz ซึ่งจะพิจารณาสมการสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นในแนวแกน o การคำนวณหาค่าโดยประมาณของสนามระยะไกลของสายอากาศแฉลล่ำด้บสององค้ประกอบ โดยองค้ประกอบของแฉลล่ำด้บต้องเหมือนกัน ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากองค้ประกอบเดี่ยวดังสมการ (4.1) และสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากสายอากาศแฉลล่ำด้บสององค้ประกอบ จะหาได้จากสมการ (4.2) โดยวิธีการประมาณระยะทางระหว่างจุดสังเกตของสนามไฟฟ้ากับสายอากาศ สามารถใช้คุณสมบัติสนามระยะไกล เทียบกับขนาดที่กว้างสุดของแฉลล่ำด้บ จะประมาณได้ว่า r_1, r_2 และ r วางขนานกัน และประมาณมุมได้ว่า $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ตามสมการ (4.3ก) หากเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับแฉลล่ำด้บมีความต่างเฟสเรียงล่ำด้บกันไปตามองค้ประกอบ จะสามารถหาค่า r_1, r_2 ได้ตามสมการ (4.3ข) และมีค่าตามขนาดดังสมการ (4.3ค)



รูปที่ 4.1 การจำลองแฉลล่ำด้บสององค้ประกอบ ที่วางตามแนวแกน z

$$E_{n1}(\theta, \varphi) = E_{n2}(\theta, \varphi) = E_{n3}(\theta, \varphi) \quad (4.1)$$

$$E_t = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos \theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 - (\beta/2)]}}{r_2} \cos \theta_2 \right\} \quad (4.2)$$

เมื่อ β คือ ความต่างเฟสระหว่างกระแสที่เข้ากระตุ้บขององค้ประกอบทั้งสองโดยขนาดของการกระตุ้บทั้งสองมีค่าเท่ากัน ซึ่งสนามระยะไกลแสดงดังรูปที่ 4.1 (ข) และมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta \quad (4.3ก)$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r - \frac{d}{2} \cos \theta \\ r_2 &= r + \frac{d}{2} \cos \theta \end{aligned} \right\} \text{สำหรับการเปลี่ยนแปลงของเฟส} \quad (4.3ข)$$

$$r_1 = r_2 = r \text{ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของขนาด} \quad (4.3ค)$$

แทนค่าสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (4.2) จะลดเหลือ

$$\begin{aligned} E_t &= \hat{a}_\theta j \eta \frac{kl_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \{e^{+j(kd \cos \theta + \beta)/2} + e^{-j(kd \cos \theta + \beta)/2}\} \\ E_t &= \hat{a}_\theta j \eta \frac{kl_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \left\{ 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.4)$$

จากการสังเกตสมการที่ (4.3) จะเห็นว่าสนามรวมของแวลลำดับมีค่าเท่ากับสนามองค์ประกอบเดี่ยวที่วางในตำแหน่งจุดกำเนิดคูณกับตัวประกอบตัวหนึ่งที่อยู่จกกันในเรื่อง ตัวประกอบแวลลำดับ (Array factor)

$$AF = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (4.5)$$

ซึ่งนอร์มัลไลซ์แล้วจะได้

$$AF = \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (4.5ก)$$

ตัวประกอบแวลลำดับเป็นฟังก์ชันของการจัดวางแวลลำดับและเฟสที่กระตุ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่าง d และ/หรือเฟส β ระหว่างองค์ประกอบทั้งสอง เราจะสามารถควบคุมคุณลักษณะของตัวประกอบแวลลำดับและสนามรวมของแวลลำดับได้

จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า สนามของแวลลำดับที่สนามระยะไกลขององค์ประกอบสองตัวที่มีลักษณะเหมือนกันจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของสนามองค์ประกอบตัวเดียวที่จุดอ้างอิง (ปกติที่จุดกำเนิด) กับตัวประกอบแวลลำดับ นั่นคือ

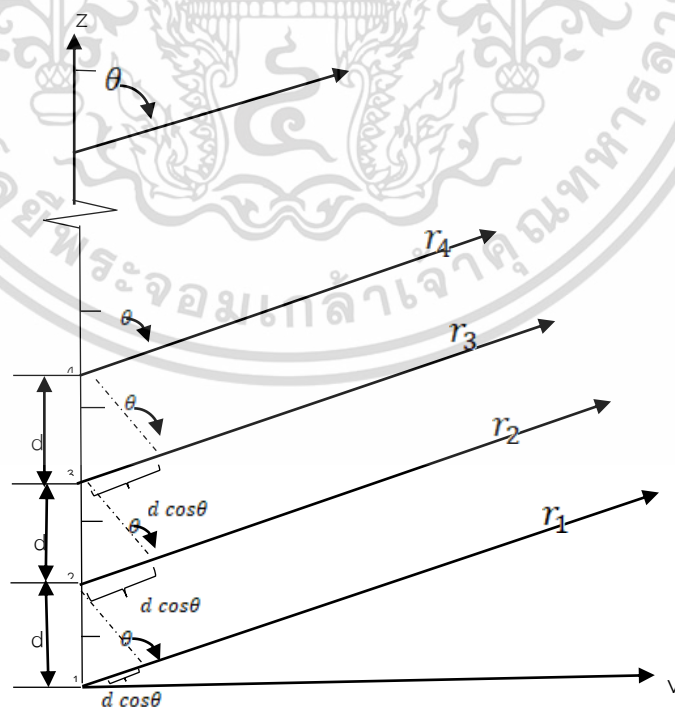
$$E(\text{total}) = [E(\text{single element at reference point})] \times [\text{Array factor}] \quad (4.6)$$

จากสมการที่ 4.6 จะเรียกว่า การคูณแบบรูป (Pattern multiplication) สำหรับแวลลำดับที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน ถึงแม้ว่าสมการที่ (4.6) จะประยุกต์สำหรับแวลลำดับสองตัวที่มีลักษณะเหมือนกันและมีขนาดการกระตุ้นที่เท่ากัน แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกรณีที่มีขนาด เฟส และ/หรือ ระยะห่างที่ไม่เท่ากันก็ได้

แถวลำดับแต่ละตัวจะมีองค์ประกอบแถวลำดับในตัวเอง ตัวประกอบแถวลำดับโดยทั่วไปนั้น เป็นฟังก์ชันของจำนวนองค์ประกอบ การวาง ขนาด เฟสการกระตุ้นและระยะห่างแต่ละองค์ประกอบ ตัวประกอบแถวลำดับจะจัดรูปได้ง่ายขึ้นถ้าหากในแต่ละองค์ประกอบมี ขนาด เฟสของการกระตุ้น และระยะห่างเหมือนกัน เนื่องจากองค์ประกอบแถวลำดับจะไม่ขึ้นกับคุณลักษณะการมีทิศทางของตัว แพร่กระจายคลื่น ในการวิเคราะห์และสร้างสมการจะแทนองค์ประกอบจริงด้วยแหล่งจ่ายแบบจุด หรือไอโซทรอปิก (Point or isotropic source) โดยตัวประกอบแถวลำดับจะเกิดจากแหล่งจ่ายไอโซทรอปิกและผลรวมของสนามสามารถหาได้จากสมการที่ (4.6) ซึ่งในแต่ละจุดของแหล่งจ่ายจะสมมติให้มีขนาด เฟส และตำแหน่งเดียวกับองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นจริง

การออกแบบขององค์ประกอบสายอากาศแถวลำดับในที่นี้มีได้ให้ความสำคัญเฉพาะแบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมเท่านั้น แต่การกำหนดระยะห่างระหว่างองค์ประกอบแต่ละตัว และการกระตุ้นที่เหมาะสมก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ

ในกรณีสายอากาศแถวลำดับมีจำนวน N องค์ประกอบ โดยมีขนาดและระยะห่างแต่ละ องค์ประกอบสม่ำเสมอ [15] ซึ่งจะสมมติให้องค์ประกอบแต่ละตัวมีขนาดเหมือนกัน และมีการกระตุ้น เฟสขององค์ประกอบแต่ละตัวให้มีเฟสหน้าหน้าอยู่ β เมื่อเทียบกับองค์ประกอบก่อนหน้า (β คือเฟสของกระแสแต่ละองค์ประกอบ) เฟสจะมีการไล่ลำดับกันไปแบบหน้าหน้าด้วยขนาดที่เท่ากัน และมีเฟสเพิ่มขึ้น ซึ่งการจัดแถวลำดับแบบนี้เรียกว่า “แถวลำดับแบบสม่ำเสมอ” (Uniform Array) เนื่องจากตัวประกอบแถวลำดับรวมของแถวลำดับแบบสม่ำเสมอคือ ผลรวมของเอ็กโปเนนเชียล โดย แสดงในรูปของผลรวมของเวกเตอร์จากเฟสเซอร์ จำนวน N ตัว ดังรูปที่ 4.2 ที่มีขนาดหนึ่งหน่วย



รูปที่ 4.2 การจำลองที่สนามระยะไกลของแถวลำดับจำนวน N องค์ประกอบของ

แหล่งกำเนิดแบบจุด ตามแนวแกน z [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos\theta + \beta)} + e^{+j(kd \cos\theta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos\theta + \beta)} \quad (4.7)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos\theta + \beta)}$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\varphi} \quad (4.8\text{ก})$$

เมื่อ

$$\varphi = kd \cos\theta + \beta \quad (4.8\text{ข})$$

นอกจากนี้ ตัวประกอบแถวลำดับยังสามารถแสดงในรูปอื่นได้ดังนี้
คุณสมบัติที่ (4.8) ทั้งสองข้างด้วย $e^{j\varphi}$ จะได้

$$(AF)e^{j\varphi} = e^{j\varphi} + e^{2j\varphi} + \dots + e^{j(N-1)\varphi} + e^{jN\varphi} \quad (4.9)$$

ลบสมการที่ (4.8) จากสมการที่ (4.9) จะได้

$$AF(e^{j\varphi} - 1) = (-1 + e^{jN\varphi}) \quad (4.10)$$

เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} AF \left[\frac{e^{jN\varphi} - 1}{e^{j\varphi} - 1} \right] &= e^{j[(N-1)/2]\varphi} \left[\frac{e^{j(N/2)\varphi} - e^{-j(N/2)\varphi}}{e^{j(1/2)\varphi} - e^{-j(1/2)\varphi}} \right] \\ &= e^{j[(N-1)/2]\varphi} \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\varphi)}{\sin(\frac{1}{2}\varphi)} \right] \end{aligned} \quad (4.11)$$

ถ้าจุดอ้างอิงอยู่ตรงกลางของแถวลำดับ ตัวประกอบแถวลำดับจะลดเหลือ

$$AF = \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\varphi)}{\sin(\frac{1}{2}\varphi)} \right] \quad (4.12\text{ก})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อขนาดของ φ มีขนาดเล็ก สมการข้างต้น จะประมาณได้เป็น

$$AF \approx \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\varphi\right)}{\frac{\varphi}{2}} \right] \quad (4.12ข)$$

ค่าสูงสุดของสมการที่ (4.12 ก) หรือ (4.12 ข) มีค่าเท่ากับ N หากทำการนอร์มัลไลซ์ตัวประกอบ แลวลำดับ โดยการหารค่าสูงสุดเพื่อจะทำให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง จะได้สมการที่ (4.12 ก) และ (4.12 ข) นอร์มัลไลซ์ ได้

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\varphi\right)}{\sin\frac{\varphi}{2}} \right] \quad (4.12ค)$$

และประมาณค่าได้

$$(AF)_n \approx \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\varphi\right)}{\frac{N}{2}\varphi} \right] \quad (4.12ง)$$

การหาค่าของแวลวลำดับ (Null of an Array) เป็นการหาทิศทางหรือมุมที่สัญญาณจากสายอากาศ n แลวลำดับไปไม่ถึง หรือมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะมีความสำคัญในการออกแบบสายอากาศแวลวลำดับ ที่สามารถหาได้จากการกำหนดให้สมการ (4.12ค) หรือ (4.12ง) เท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$\sin\left(\frac{N}{2}\varphi\right) = 0 \rightarrow \frac{N}{2}\varphi|_{\theta=n} = \pm n\pi \rightarrow \theta_n = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \left(-\beta \pm \frac{2n}{N}\pi \right) \right]$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, n \neq N, 2N, 3N, \dots \text{ สำหรับสมการที่ (4.12 ค.)} \quad (4.13)$$

ในกรณีของ $n = N, 2N, 3N, \dots$ จะเกิดค่าสูงสุดเพราะสมการจะลดเหลือในรูปของ $\sin(0)/0$ ค่าของ n ใช้คำนวณอันดับของนัล (หนึ่ง สอง สาม ไปเรื่อย ๆ) กรณีที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าในการหา \cos^{-1} มีค่าไม่เกินหนึ่ง จำนวนของนัลที่เกิดขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของระยะระหว่างองค์ประกอบ d และเฟส β ที่แตกต่างกันในการกระตุ้น

ค่าสูงสุดในสมการ (4.12ค) เกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta)|_{\theta=\theta_m} = \pm m\pi \rightarrow \theta_m = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d} (-\beta \pm 2m\pi) \right] \quad (4.14)$$

เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบแฉวลำดับ สมการที่ (4.12) มีค่าสูงสุดเพียงค่าเดียวและเกิดขึ้นเมื่อ $m = 0$ ตามสมการที่ (4.14)

$$\theta_m = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda \beta}{2\pi d} \right] \quad (4.15)$$

ซึ่งมุมจากจุดสังเกต คือ $\varphi = 0^\circ$

จุดที่ -3dB สำหรับตัวประกอบแฉวลำดับของสมการที่ (4.12 ค) เกิดเมื่อ

$$N \frac{\varphi}{2} = \frac{N}{2} (kd \cos \theta + \beta) \Big|_{\theta=\theta_n} = \pm 1.391$$

$$\theta_n = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \left(-\beta \pm \frac{2.782}{N} \right) \right] \quad (4.16)$$

เขียนได้เป็น

$$\theta_n = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \left(-\beta \pm \frac{2.782}{N} \right) \right] \quad (4.16 ก)$$

สำหรับค่าของ $d (d \gg \lambda)$ ขนาดใหญ่ สมการจะลดเหลือ

$$\theta_n \cong \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d} \left(-\beta \pm \frac{2.782}{N} \right) \quad (4.16 ข)$$

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) สามารถหาได้จากมุมสูงสุดมุมแรก (θ_h) และจุดที่กำลังครึ่งหนึ่ง (θ_m) นำมาคำนวณในแบบรูปที่สมมาตร

$$HPBW = 2|\theta_m - \theta_h| \quad (4.16 ค)$$

สำหรับตัวประกอบแฉวลำดับในสมการที่ (4.12 ค) จะเกิดสูงสุด 2 จุด สามารถประมาณได้จากสมการที่ (4.12 ค) คือ

$$\begin{aligned}\sin\left(\frac{N}{2}\varphi\right) &= \sin\left[\frac{N}{2}(kd\cos\theta + \beta)\right]_{\theta=\theta_s} \cong \pm 1 \rightarrow \frac{N}{2}(kd\cos\theta + \beta)_{\theta=\theta_s} \\ &\cong \pm\left(\frac{2s+1}{s}\right)\pi \rightarrow \theta_s \cong \cos^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right]\right\}, s = 1, 2, 3, \dots\end{aligned}\quad (4.17)$$

ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\theta_s \cong \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left\{\frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right]\right\}, s = 1, 2, 3, \dots\quad (4.17 ก)$$

กรณีค่าของ $d(d \gg \lambda)$ มีขนาดใหญ่ สมการจะลดลงเหลือ

$$\theta_s \cong \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d}\left[-\beta \pm \left(\frac{2s+1}{N}\right)\pi\right], s = 1, 2, 3, \dots\quad (4.17 ข)$$

ค่าสูงสุดของโพลย่อยแรก จาก สมการที่ (4.12 ค) โดยประมาณได้ดังนี้

$$\frac{N}{2}\varphi = \frac{N}{2}(kd\cos\theta + \beta)_{\theta=\theta_s} \cong \pm\left(\frac{3\pi}{2}\right)\quad (4.18)$$

หรือเมื่อ

$$\theta_s \cong \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{3\pi}{N}\right)\right]\quad (4.18 ก)$$

สมการที่ (4.12 ง) จะมีขนาดลดลงเหลือ

$$(AF)_n \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\varphi\right)}{\frac{N}{2}\varphi}\right]_{\theta=\theta_s}\quad (4.19)$$

จากสมการ (4.19) ตัวประกอบแถวลำดับจะเป็นฟังก์ชันสของรูปทรงแถวลำดับและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศที่จะทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST-Microwave Studio ในการจำลองเพื่อให้ได้ค่า $|S_{11}|$ อยู่ต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ที่ 3.4 GHz 3.5 GHz และ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับ

ในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ต้องการองค์ประกอบสำหรับสายอากาศที่นำเสนอ เพื่อให้ได้ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้อธิบายประสิทธิภาพของสายอากาศในการส่งสัญญาณออกไปโดยมีการสูญเสียที่น้อยที่สุด อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ สายอากาศที่ออกแบบจะมีโครงสร้างลักษณะเป็นแถวลำดับเชิงเส้น (Linear array) ถูกวางเรียงกันในแนวตั้งหรือในระนาบ H-plane เพื่อให้มีอัตราขยายสูง มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่แคบในแนวตั้ง และมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังที่กว้างในแนวนอน และนอกจากนี้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่เหมาะสมก็สามารถช่วยลดระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างได้ (Side lobe level: SLL) ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบ ซึ่งสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบ วางเรียงในแนวตั้งด้วยระยะห่างสม่ำเสมอ มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 4.4 cm ซึ่งระยะห่างที่เหมาะสมจะทำให้ลดปริมาณการเกิดเกรตติงโกลบ (Grating lobes) และคุณลักษณะอีกประการของสายอากาศส่ง เป็นสายอากาศแบบแถวลำดับเชิงเส้นในแนวตั้ง โดยสายอากาศแถวลำดับที่นำเสนอนี้ตัวแผ่พลังงานสร้างจากวัสดุทองแดงชนิดแผ่น ความหนา 1mm วางด้านหน้าเหนือตัวสะท้อนที่สร้างจากแผ่นอลูมิเนียม ความหนา 1 mm และใช้ตัวเชื่อมต่อชนิดตัวเชื่อมต่อแบบ SMA จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบตัวแผ่พลังงาน และนำมาวางแถวลำดับจนวิวัฒนาการมาเป็นสายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่งมีผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศอยู่ระหว่าง 2.47 ถึง 6.49 dBi และมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างมีระดับที่ใกล้เคียงกับ -20 dB ตลอดย่านความถี่ใช้งาน พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา วิเคราะห์และจำลองสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบ ที่นำเสนอ สามารถสรุปพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีเกณฑ์พิจารณาจากสัดส่วนของความยาวคลื่น เช่น ความยาวรวมของอีลีเมนต์ที่แพร่กระจายคลื่นมีความยาวประมาณ $\lambda/2$ โดยมีโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และได้ทำการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งผลการจำลองค่า Reflection Coefficient หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$ ของสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยมีผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบ ที่นำเสนอที่ความถี่ 3.5 GHz ซึ่งสายอากาศแถวลำดับ ที่นำเสนอ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ unidirectional ซึ่งแสดงอยู่ในรูป 2 มิติ ระนาบ E-plane ($\phi = 0^\circ$) และระนาบ H-plane ($\phi = 90^\circ$) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และถูกกำหนดให้เป็นระนาบแนวนอน (Horizontal) และระนาบแนวตั้ง (Vertical) ตามลำดับ จากผลที่ได้พบว่าสายอากาศแถวลำดับที่นำเสนอมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ที่ 108.1° ในระนาบแนวนอน และ 14.7° ในระนาบแนวตั้ง สายอากาศแถวลำดับที่นำเสนอมีระดับลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe level) อยู่ที่ -16.29 dB ซึ่งค่าคุณลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้

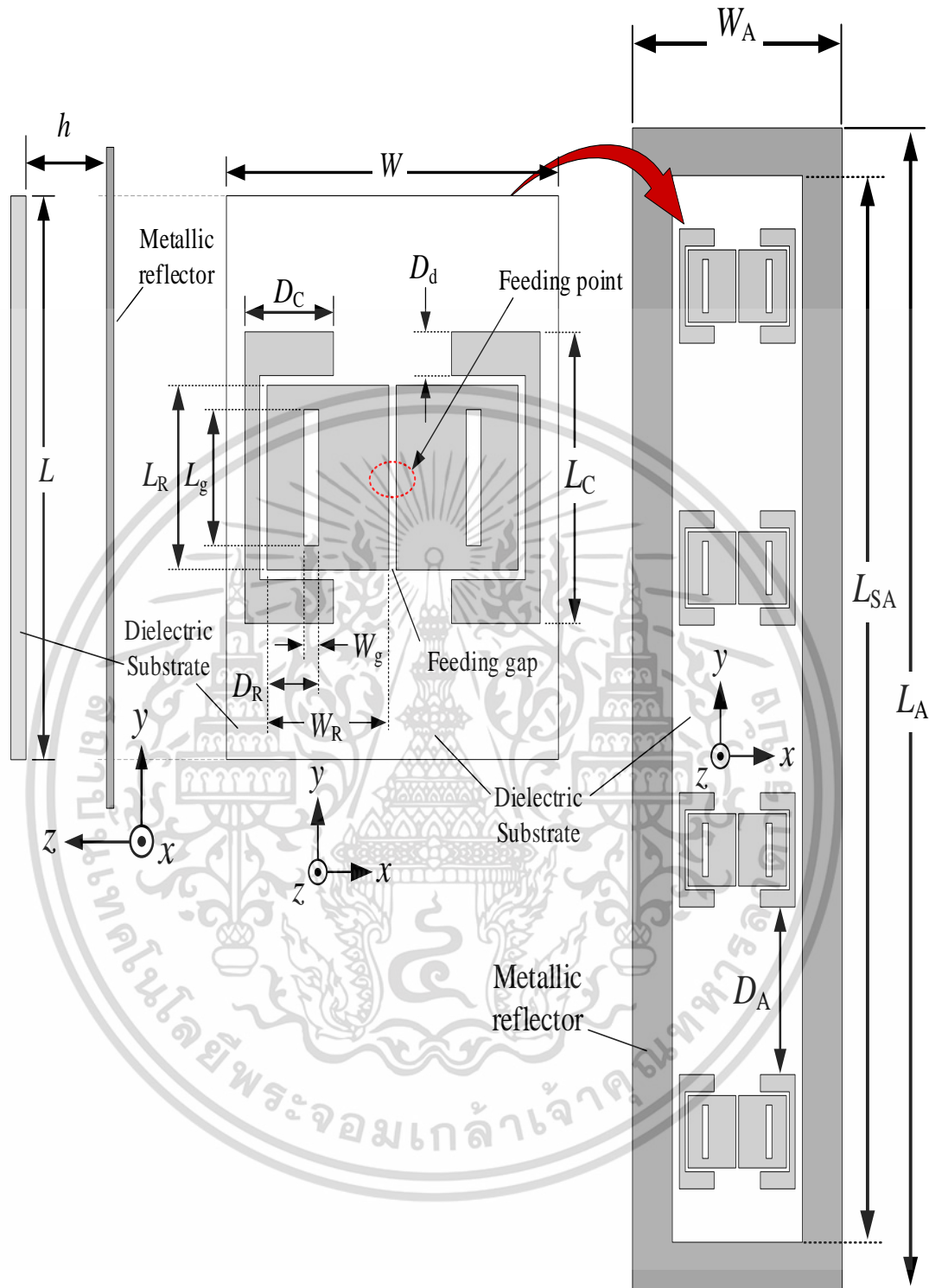
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแฉวลำดับสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ

พารามิเตอร์ ของ สายอากาศ	รายละเอียดพารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)	ขนาดทางไฟฟ้า ที่ความถี่ 3.5 GHz (λ_c)
L	ความยาวรวมขององค์ประกอบ	70	0.81
W	ความกว้างรวมขององค์ประกอบ	45	0.52
h	ความสูงของตัวแผงพลังงาน	33	0.38
L_A	ความยาวของแผ่นสะท้อน	305	3.55
W_A	ความกว้างของแผ่นสะท้อน	130	1.51
D_A	ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ	44	0.51
L_{SA}	ความยาวรวมของชั้นสเตรทสายอากาศ	280	3.26
L_R	ความยาวขององค์ประกอบ	19	0.22
W_R	ความกว้างขององค์ประกอบ	16.5	0.19
L_C	ความยาวขององค์ประกอบตัวยู	30	0.35
D_C	ความกว้างขององค์ประกอบตัวยู	12	0.14
D_d	ความหนาขององค์ประกอบตัวยู	4.5	0.05
L_g	ความยาวของช่องเปิด	14	0.16
W_g	ความกว้างของช่องเปิด	2	0.02
D_R	ระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบ กับ ช่องเปิด	7	0.08
Feeding gap	ระยะห่างของช่องป้อนสัญญาณ	1	0.01

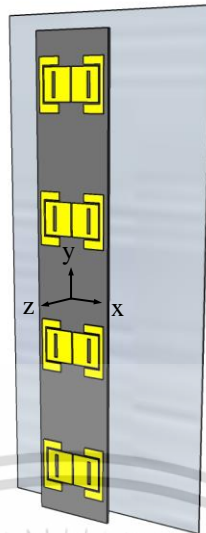
λ_c : ความยาวคลื่นในอากาศของย่านความถี่ใช้งาน (3.5 GHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

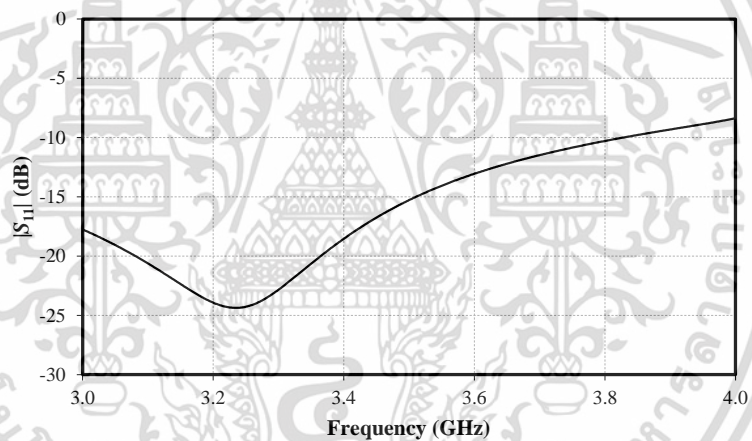


รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

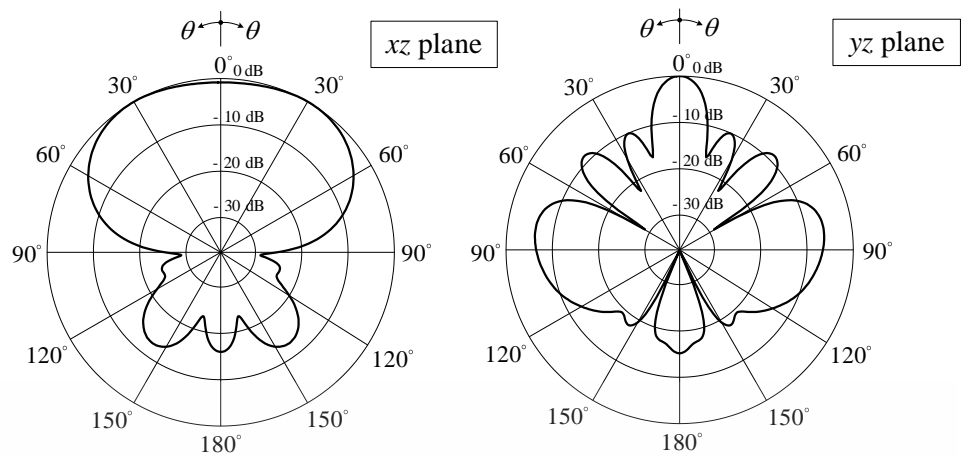


รูปที่ 4.5 ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศแถวลำดับ

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio

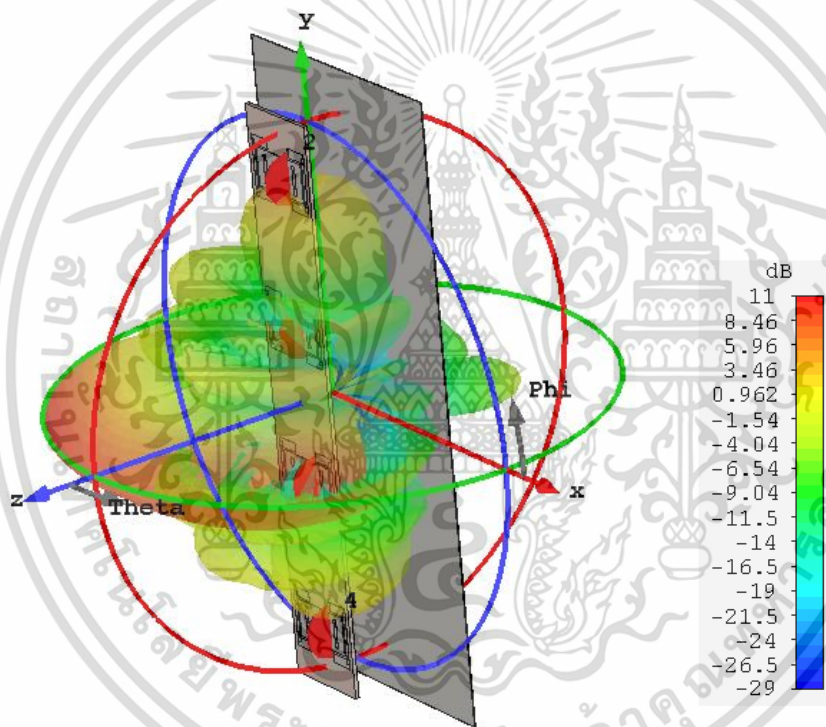
ค่าคุณลักษณะ	3.5 GHz
HPBW in E-plane (deg)	108.1
HPBW in H-plane (deg)	14.7
Back lobe level (dB)	-16.29
Gain (dBi)	11.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) xz plane ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) yz plane ระนาบสนามแม่เหล็ก

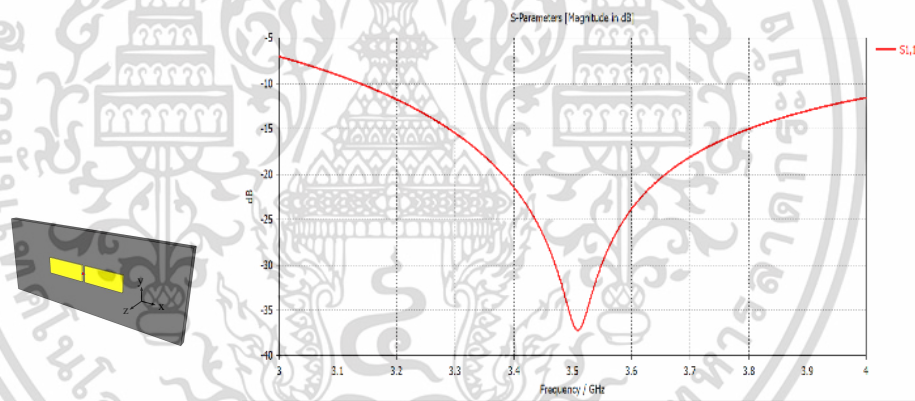


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกลำดับที่ความถี่ 3.5 GHz

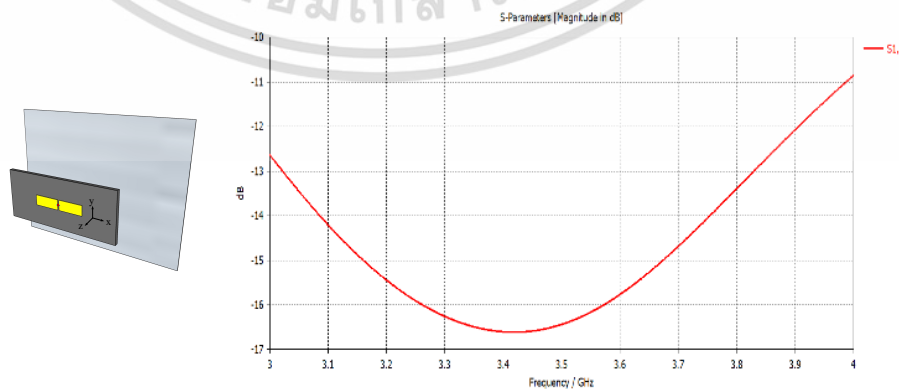
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลกระทบจากการวิวัฒนาการสายอากาศต้นแบบ

การศึกษาผลกระทบการจำลองผลค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่มีการวิวัฒนาการจากสายอากาศต้นแบบ กระทั่งได้เป็นโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูที่นำเสนอ โดยสายอากาศต้นแบบรุ่นที่ 1 (First-generation) ถึง สายอากาศต้นแบบรุ่นที่ 4 (Fourth-generation) เป็นการจำลองผล $|S_{11}|$ ที่ความถี่ 3.5 GHz และสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูที่นำเสนอ (Proposed antenna) เป็นการจำลองผล $|S_{11}|$ ที่ความถี่ 3.4 GHz, 3.5 GHz และ 3.7 GHz ผลกระทบจากการวิวัฒนาการเป็นไปดังที่แสดงในรูปที่ 4.7 โดยมีผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศต้นแบบรุ่นที่ 1 (First-generation) ถึง สายอากาศต้นแบบรุ่นที่ 4 (Fourth-generation) ที่ความถี่ 3.5 GHz และสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูที่นำเสนอ (Proposed antenna) เป็นการจำลองผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 3.4 GHz, 3.5 GHz และ 3.7 GHz ซึ่งแสดงอยู่ในรูป 2 มิติ ระนาบ E-plane ($\phi = 0^\circ$) หรือ xz-plane และระนาบ H-plane ($\phi = 90^\circ$) หรือ yz-plane ผลกระทบจากการวิวัฒนาการเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 4.8

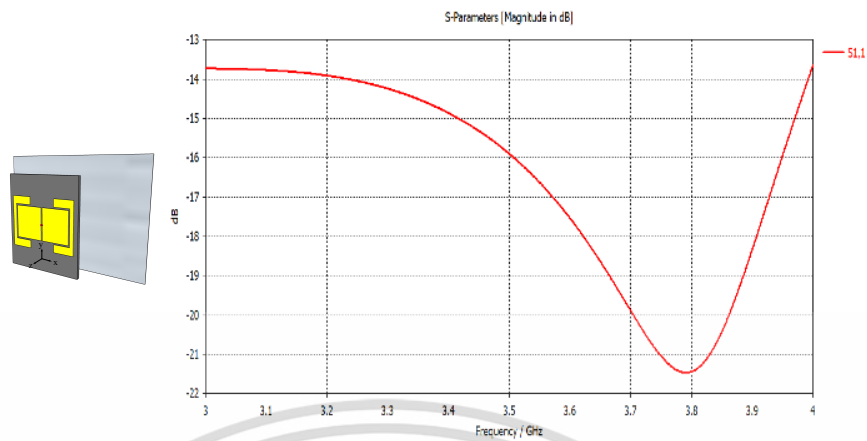


(ก) โครงสร้างสายอากาศและผลจำลอง $|S_{11}|$ รุ่นที่ 1 (First-generation)

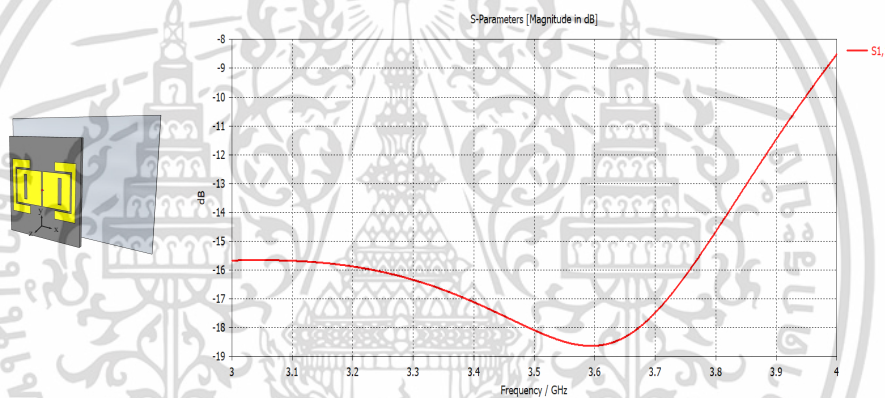


(ข) โครงสร้างสายอากาศและผลจำลอง $|S_{11}|$ รุ่นที่ 2 (Second-generation)

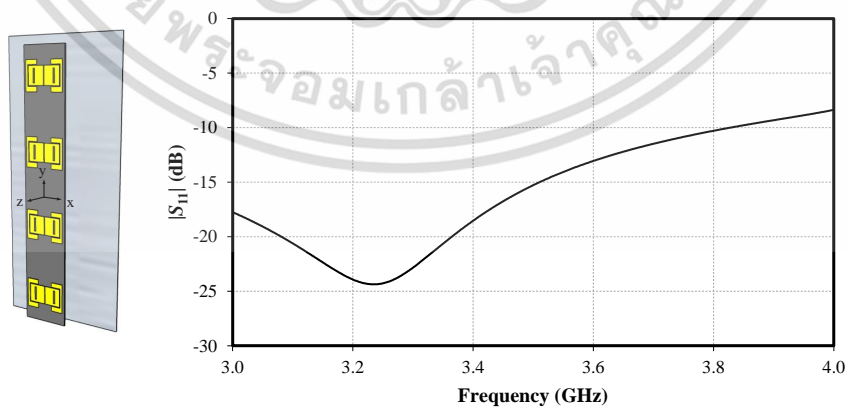
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) โครงสร้างสายอากาศและผลจำลอง $|S_{11}|$ รุ่นที่ 3 (Third-generation)

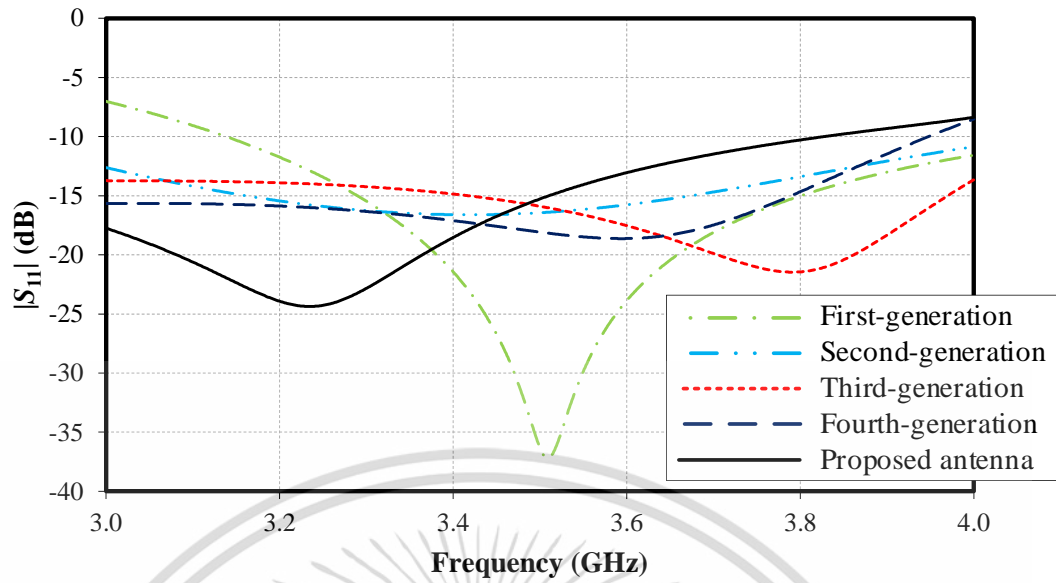


(ง) โครงสร้างสายอากาศและผลจำลอง $|S_{11}|$ รุ่นที่ 4 (Fourth-generation)

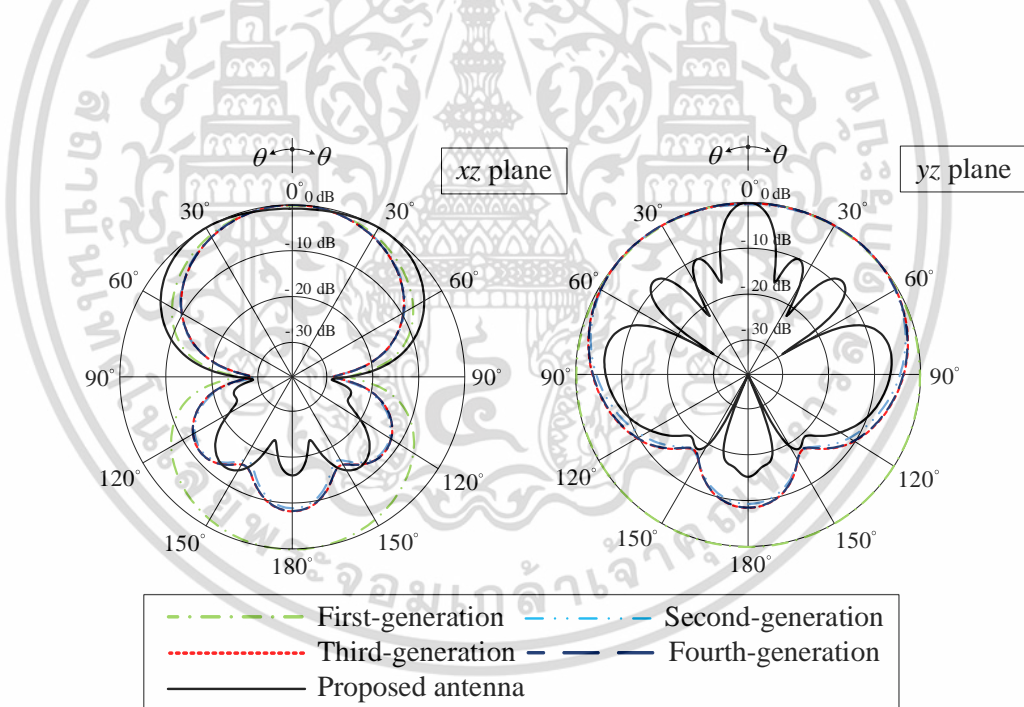


(จ) โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอและผลจำลอง $|S_{11}|$ (Proposed antenna)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบวิวัฒนาการการผลจําลอง $|S_{11}|$ ของการออกแบบสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบวิวัฒนาการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระนาบสนามไฟฟ้า (xz plane) ระนาบสนามแม่เหล็ก (yz plane) ของการออกแบบสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบสายอากาศแกลลุ่มสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

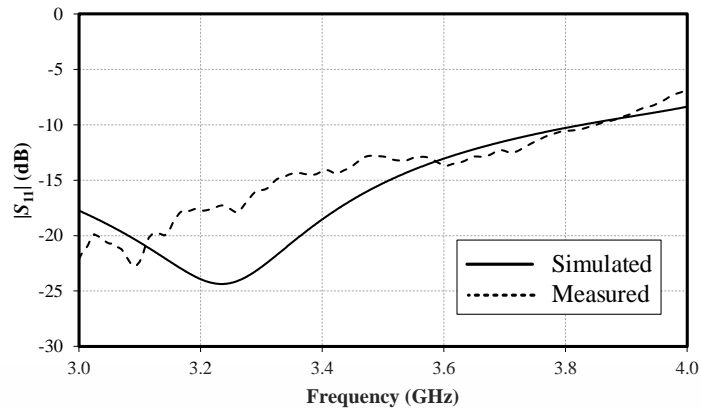
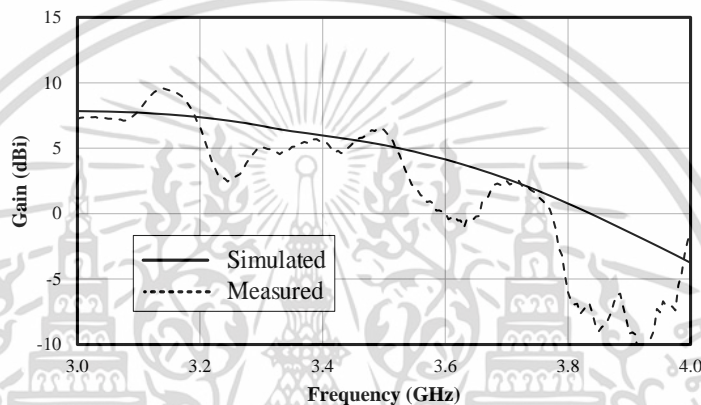
จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่เหมาะสมขององค์ประกอบตัวแผ่พลังงาน สายอากาศองค์ประกอบ และสายอากาศแกลลุ่มแบบสำหรับสถานีฐานรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแกลลุ่มสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ ที่ความถี่ 3.4 GHz, 3.5 GHz และ 3.7 GHz เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ พารามิเตอร์ $|S_{11}|$ แบบรูปการแผ่พลังงาน ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และอัตราขยาย โดยผลการจำลองและการทดสอบพบว่าสายอากาศแกลลุ่มแบบที่นำเสนอ มี $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 3.00 - 3.85 GHz (simulated) และครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 3.00 - 3.82 GHz (Measured) ดังแสดงในรูป 4.10 (ก) และผลการจำลองและการทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ 3.4 - 3.7 GHz โดยอัตราขยายสายอากาศแต่ละอีลีเมนต์อยู่ที่ 5.97 dBi และ 6.49 dBi สำหรับการทดสอบ โดยอัตราขยายสายอากาศรวม 4 อีลีเมนต์ (Combine) อยู่ที่ 11.0 dBi โดยสายอากาศแกลลุ่มแบบที่นำเสนอแสดงในรูป 4.10 (ข)



(ก) มุมมองด้านบนบนสายอากาศแกลลุ่ม



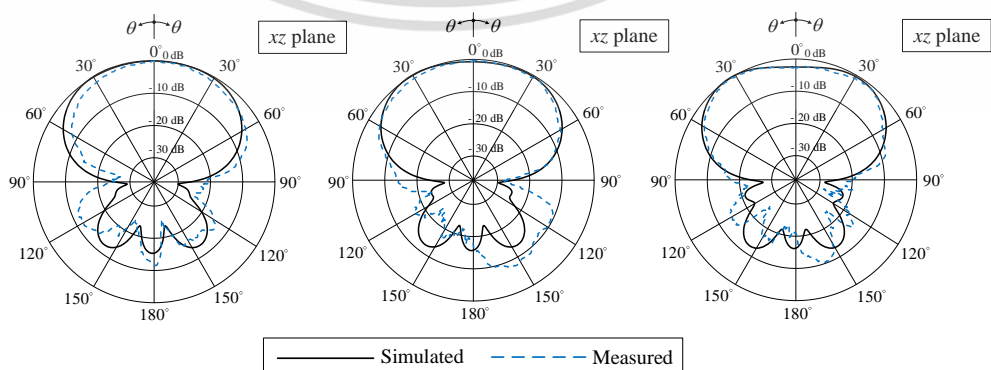
(ข) มุมมองด้านหน้าและด้านข้างสายอากาศแกลลุ่ม
รูปที่ 4.9 สายอากาศแกลลุ่มแบบที่นำเสนอ

(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$ 

(ข) ค่าอัตราขยาย

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ และอัตราขยายของสายอากาศแต่ละอีลีเมนต์สถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ

โดยผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ ที่ความถี่ 3.4 GHz, 3.5 GHz และ 3.7 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ unidirectional แสดงอยู่ในรูป 2 มิติ ระนาบ E-plane ($\phi = 0^\circ$) หรือ xz-plane และระนาบ H-plane ($\phi = 90^\circ$) หรือ yz-plane ดังที่แสดงในรูป 4.11

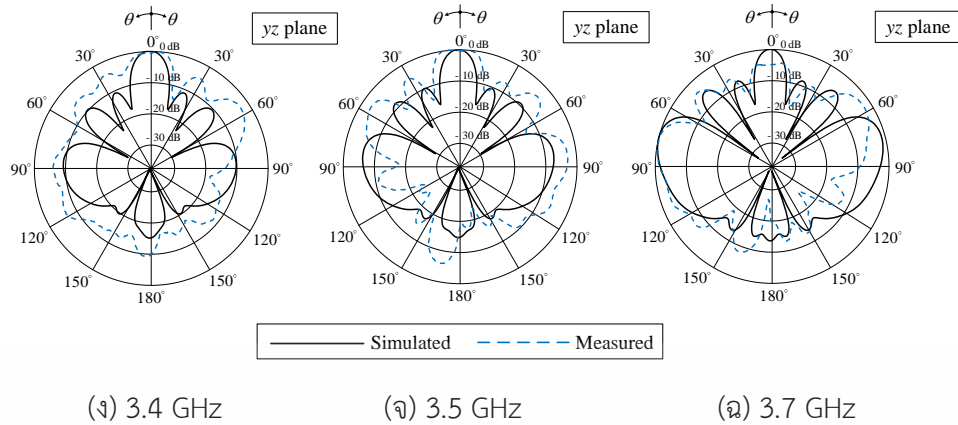


(ก) 3.4 GHz

(ข) 3.5 GHz

(ค) 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแกลวลำดับต้นแบบสำหรับสถานีฐานรุ่นที่ 5 ที่นำเสนอ

4.6 สรุปผลทดสอบสายอากาศแกลวลำดับสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

สำหรับการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศแกลวลำดับที่นำเสนอ สายอากาศแกลวลำดับต้นแบบถูกสร้างเพื่อดำเนินการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) อัตราขยายสายอากาศ (Gain Antenna) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern) บริเวณสนามระยะไกล (Farfield) โดยผลการทดสอบที่ได้มีความมีความคลาดเคลื่อนจากผลการจำลองเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงมีแนวโน้มสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลอง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตร และเป็นสายอากาศแบบทิศทางเดียว โดยพบว่าสายอากาศแกลวลำดับที่นำเสนอมีผลการมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ในระนาบสนามไฟฟ้า (xz plane) การจำลองสายอากาศแกลวลำดับ 104.6° และการทดสอบสายอากาศแกลวลำดับที่นำเสนอ 86.18° ที่ความถี่ 3.4 GHz การจำลองสายอากาศแกลวลำดับ 108.1° และการทดสอบสายอากาศแกลวลำดับที่นำเสนอ 101.45° ที่ความถี่ 3.5 GHz การจำลองสายอากาศแกลวลำดับ 111.9° และการทดสอบสายอากาศแกลวลำดับที่นำเสนอ 79° ที่ความถี่ 3.7 GHz โดยผลการทดสอบจะมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่แคบกว่าผลการจำลองในระนาบ xz ซึ่งผลที่ต่างกันนี้อาจมาจากระยะของแผ่นสะท้อนที่น้อยกว่าที่ได้จากผลการจำลอง โดยผลการจำลองและการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแกลวลำดับที่นำเสนอตามที่แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองและการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับที่นำเสนอ

Items	Simulation			Measurement		
	3.4 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	3.4 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz
$ S_{11} \leq -10$ dB bandwidth, %	(3.00 - 3.85), 24%			(3.00 - 3.82), 23%		
HPBW in xz-plane, (deg.)	104.6	108.1	111.9	86.18	101.45	79
HPBW in yz-plane, (deg.)	15.6	14.7	12.9	19.76	22.44	17.96
Cross-pol. in xz-plane (dB)	≤ -40			≤ -40		
Cross-pol. in yz-plane (dB)	≤ -40			≤ -40		
Radiation pattern	Unidirectional			Unidirectional		



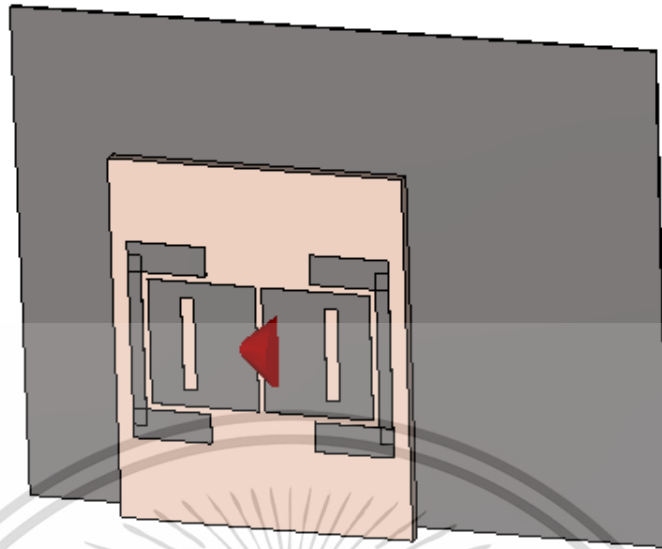
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

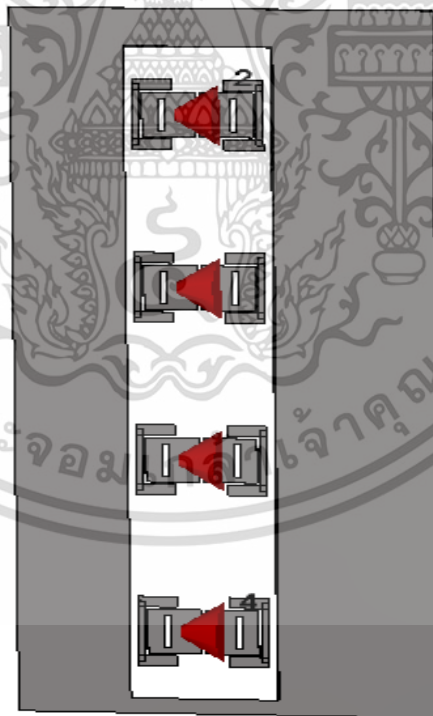
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศประจำสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบในแนวตั้งที่มีอัตราขยายสูง มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกว้างในแนวนอนเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่การใช้งาน และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยในการออกแบบจากแนวความคิดหลักจากสายอากาศไดโพลมาตรฐานซึ่งมีแบนด์วิดท์แคบเพราะพื้นที่กระแสพื้นผิวน้อย จึงออกแบบไดโพลระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนแผ่น PCB ที่ติดตั้งอยู่บนตัวสะท้อนสี่เหลี่ยม เพื่อให้ได้สายอากาศที่สามารถทำงานแบนด์กว้างได้ในย่านความถี่ 3.00 - 3.82 GHz ซึ่งสายอากาศตั้งต้นถูกออกแบบที่ความถี่กลางของย่านความถี่ใช้งาน ที่ความถี่ 3.5 GHz โดยขนาดของโครงสร้างสายอากาศไดโพลสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ตั้งต้น ถูกออกแบบที่ $\lambda_L / 4 = 21.427$ mm ทำการออกแบบและการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่เหมาะสมของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และได้ทำการปรับขนาดของสายอากาศไดโพล เป็นขนาด 30 mm ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อยู่ต่ำกว่า -10 dB ในย่านความถี่ตั้งแต่ 3 GHz - 4 GHz และวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอองค์ประกอบรูปตัว U แบบคู่ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เพื่อการปรับแต่งความกว้างลำคลื่น (beamwidth) ของสัญญาณให้แคบ และกระตุ้นให้เกิดการคัปปลิงระหว่างตัวแพร่พลังงานไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมผืนผ้าและองค์ประกอบรูปตัว U แบบคู่ เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ให้กับสายอากาศตั้งต้น ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ใช้งาน โดยผลจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST-Microwave Studio พบว่าสายอากาศตั้งต้นมีผลการมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ที่ 65.7° ในระนาบแนวนอน และ 166° ในระนาบแนวตั้ง สายอากาศต้นแบบมีลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe level) อยู่ที่ -9.16 dB หลังจากนั้นจึงนำสายอากาศไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมผืนผ้าและองค์ประกอบรูปตัว U แบบคู่ ที่ได้จากการออกแบบไปสร้างเป็นสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และนำผลการจำลองและผลทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อตรวจสอบความถูกต้องตามคุณลักษณะที่เหมาะสมของสายอากาศและครอบคลุมตลอดย่านความถี่ใช้งานที่ความถี่ 3.00 - 3.82 GHz ทำให้การออกแบบสายอากาศแถวลำดับไดโพลแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมรูปตัวยูสำหรับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 มีความสมบูรณ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการใช้งานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ตามมาตรฐาน IMT-2020



รูปที่ 5.1 สายอากาศได้ไฟร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า องค์กรประกอบร่องตัว U บนแผ่นสะท้อนคลื่น



รูปที่ 5.2 สายอากาศแถวลำดับ 4 องค์กรประกอบ บนแผ่นสะท้อนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ตามที่ได้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากผลการจำลองและการทดสอบของสายอากาศที่นำเสนอนี้ สายอากาศที่นำเสนอสามารถนำไปปรับปรุงให้มีคุณลักษณะที่ดีขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้กับสถานีฐานการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 หรือการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5 ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นได้ดังนี้

5.2.1 เพื่อการปรับปรุงสายอากาศให้มีการแมตชิงที่ดี อาจทำการเพิ่มสตัปเพื่อช่วยปรับความต้านทานของสายอากาศให้สอดคล้องกับความต้านทานที่ต้องการในระบบ

5.2.2 การใช้ Filter ในการป้องกันสัญญาณที่ไม่ต้องการจากภายนอก การลดรบกวน (interference) นอกจากนี้ยังสามารถทำให้รีแอกทีฟอิมพีแดนซ์ลดลงเพื่อลดการสะท้อนของสัญญาณที่ถูกส่งผ่านสายอากาศ

5.2.3 เนื่องจากขนาดของสายอากาศที่นำเสนอมีขนาดเล็กจึงอาจส่งผลให้มีอัตราขยายต่ำ อาจทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ด้วยการใส่ EBG หรือ Electromagnetic Band Gap บนแผ่นสะท้อนสายอากาศ เพื่อความเสถียรของการสื่อสารไร้สายรุ่นที่ 5

5.2.4 การใช้เทคโนโลยี massive MIMO เพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้หรืออุปกรณ์ที่ทำการเชื่อมต่อที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ณ เวลาและความถี่เดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Syed S. Husain., Athul Prasad., Andreas Kunz., JaeSeung Song., Adrian Buckley., Emmanouil Pateromichelakis ‘End-to-End Mobile Communications: Evolution to 5’, (New York: McGraw Hill, 2021.)
- [2] Wanshi Chen, Ph.D., Peter Gall, PH.D., Juan Montojo, PH.D., Haris Zisimopoulos, M.Sc., ‘Fundamentals of 5 Communications connectivity for Enhanced Mobile Broadband and Beyond’, (McGraw Hill, 2021.)
- [3] ITU. (2015). ITU-R Recommendation M.2083-0, IMT Vision - “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”. Retrieved July 19, 2021, from https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf.
- [4] <https://www.semanticscholar.org/paper/Satellite-5-Integration%3A-A-Network-Perspective-Giambene-Kota>
- [5] Y. Gou, S. Yang, J. Li, Z. Nie: “A Compact Dual-Polarized Printed Dipole Antenna with High Isolation for Wideband Base Station Applications”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, pp. 4392-4395, 2014.
- [6] T.-G. Ma, S.-K. Jeng: “A Printed Dipole Antenna with Tapered Slot Feed for Ultrawide-Band Applications”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, pp. 3833-3836, 2005.
- [7] Z. Tu, D.-F. Zhou, G.-Q. Zhang, F. Xing, X. Lei, D.-W. Zhang: “A Wideband Cavity-Backed Elliptical Printed Dipole Antenna with Enhanced Radiation Patterns”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.*, vol. 12, pp. 1610-1613, 2013.
- [8] D.-H. Kwon, Y. Kim: “Suppression of Cable Leakage Current for Edge-Fed Printed Dipole UWB Antennas Using Leakage-Blocking Slots”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.*, vol. 5, pp. 183-186, 2006.
- [9] K. E. Kedze, H. Wang, S. X. Ta, I. Park: “Wideband Low-Profile Printed Dipole Antenna Incorporated with Folded Strips and Corner-Cut Parasitic Patches Above the Ground Plane”, *IEEE Access.*, 2019.
- [10] Z. Tu, Y. Cui, R. Li: “A Compact Dual Broadband Shared-Aperture Antenna Array for 5 Base Station Applications”, *IEEE conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA).*, 2022.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] J. S. Lin, Z. J. Xiao, Y. F. Cao, Y. Lan: “A Compact Dual-Polarized Dipole Antenna for 5 Base Station”, *2021 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IWEM)*., 2021.
- [12] S. He, Xi. R. Q. Wang, Xi Li: “A Dual-polarization Common-aperture Antenna Array for 2/3/4/5 Base station”, *2021 IEEE International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*., 2021.
- [13] Y. Zhu, Q.-M. Cai, S.-l. Rao, T. Chen, X. Cao, Y. Zhu, J. Fan: “Dual-Polarized and Wideband Orthogonal Dipole Antenna for LTE/5 Base Station Applications”, *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2022.
- [14] S. Wu, F. SHANG: ‘Broadband Dual-Polarized Magnetolectric Dipole Antenna with Compact Structure for 5 Base Station’, *IEEE Access.*, 2023.
- [15] Balanis, A. C.: “Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed.”, (New York: John Wiley & Sons, 2005.)
- [16] “CST Microwave Studio”, (User’s Manual, 2011.)
- [17] Chen, Z.N., Luk, K.-M.: “Antennas for Base station in Wireless Communications”, (USA: McGraw-Hill, 2009.)
- [18] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, and D. Chandramouli, “5 Evolution: A View on 5 Cellular Technology Beyond 3PP Release 15,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [19] R. Safitri, D. Setiawan, and A. C. Situmorang, “Techno-Economics Analysis of Ext. C-Band Frequency Reallocation in Indonesia,” *2021 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, vol. 2. Oxford: Clarendon, pp.73–78, 2021.
- [20] Z. Tu, D.-F. Zhou, G.-Q. Zhang, F. Xing, X. Lei, D.-W. Zhang, “A Wideband Cavity-Backed Elliptical Printed Dipole Antenna with Enhanced Radiation Patterns,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1610-1613, 2013.
- [21] T. SUN, S. LIN, and J. WANG, “A Method to Reduce the Influence of Coaxial Lines on the Radiation of Printed Dipole Fed by CPW,” *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pp. 1-2, 2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] D.-h. Kwon and Y. Kim, "Suppression of Cable Leakage Current for Edge-Fed Printed Dipole UWB Antennas Using Leakage-Blocking Slots," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 183-186, 2006.
- [23] K. E. Kedze, H. Wang, S. X. Ta, and I. Park, "Wideband Low-Profile Printed Dipole Antenna Incorporated with Folded Strips and Corner-Cut Parasitic Patches Above the Ground Plane," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 15537 - 15546, 2019.
- [24] T.-G. Ma and S.-K. Jeng, "A Printed Dipole Antenna with Tapered Slot Feed for Ultrawide-band Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, pp. 3833 - 3836, 2005.
- [25] A. Goudarzi, M. M. Honari, A. Gharaati, and R. Mirzavand, "A Printed Dipole Antenna with Tapered Slot Feed for Ultrawide-band Applications," *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, pp. 1737 - 1738, 2021.
- [26] Y. Gou, S. Yang, J. Li, and Z. Nie, "A Compact Dual-Polarized Printed Dipole Antenna with High Isolation for Wideband Base Station Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, issue 8, pp. 4392 - 4395, 2014.
- [27] <https://www.nbtc.go.th>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายฤกษ์ชัย พุกรักษา
วัน เดือน ปีเกิด	6 สิงหาคม 2523
ที่อยู่	149/185-210 กรมการทหารสื่อสาร ถนนพระราม 5 เขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10300
ประวัติการศึกษา	
ปริญญาตรี	สำเร็จการศึกษา พ.ศ.2552 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิชาเฉพาะวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ความชำนาญเฉพาะด้าน	สายอากาศรับสัญญาณสำหรับโทรทัศน์ระบบ DVB-T2
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2544-ปัจจุบัน	ข้าราชการทหาร เหล่าทหารสื่อสาร สังกัดกรมการทหารสื่อสาร
พ.ศ.2565-ปัจจุบัน	- เจ้าหน้าที่ฝ่ายโครงข่ายโทรทัศน์ระดับดิจิทัล สถานีวิทยุโทรทัศน์กองทัพบก
พ.ศ.2563-ปัจจุบัน	- เจ้าหน้าที่ฝ่ายรายการ สถานีวิทยุกระจายเสียงกองทัพบก เอฟ.เอ็ม.103.5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] K. Pookkapund, R. Pukraksa, C. Phongcharoenpanich and S. Denti “Pragmatic Design of a Rectangular Printed Dipole Array Antenna for 5 Base Station,” 2024 International Electrical Engineering Congress (iEECON 2024), Pattaya Chonburi, Thailand, March 6-8, 2024.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้