

ผลกระทบของอัตราขยายของสายอากาศ MASSIVE MIMO ที่มีต่อระบบการ
สื่อสารยุคที่ 5



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**EFFECT OF ANTENNA GAINS OF MASSIVE MIMO ON
5G COMMUNICATION SYSTEMS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in
Telecommunication Engineering and Computer Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

ผลกระทบบของอัตราขยายของสายอากาศ MASSIVE MIMO ที่มีต่อระบบ
การสื่อสารยุคที่ 5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. พิชญา ชัยปัญญา)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

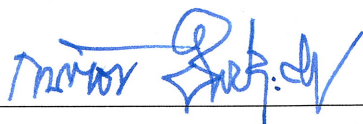
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. เศรษฐวิทย์ ภูญาษา)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

WORAPON PUANGKOH : EFFECT OF ANTENNA GAINS OF MASSIVE
MIMO ON 5G COMMUNICATION SYSTEMS. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. PEERAPONG UTHANSAKUL, Ph.D.,86 PP.

MASSIVE MIMO/MMWAVE/FIFTH GENERATION/

With the increase of user demands on lifestyle communications such as voice/video communications, social media communications and cloud data access, these make the volume of traffic increase enormously. The worldwide research and development of the fifth generation (5G) of mobile communications are expected to support a significantly large amount of mobile data traffic and a huge number of wireless connections. Multiple Input Multiple Output (MIMO) is a wireless technology that utilizes multiple antennas at transmitters and receivers to transfer more data at the same time. MIMO has been involved into many standards of mobile communications since 4G. In order to achieve the requirement of 5G, the expectation of new radio frequency band is on the much higher frequency than 6 GHz. Recently, the frequency range that has received a lot of attention for 5G communication is 30-300 GHz called as millimeter wave (mmWave) because of having a wavelength in unit of millimeters. The use of mmWave communication is expected to be a key success in achieving the huge data rates required to meet 5G specifications. However, the large signal attenuation at mmWave due to oxygen absorption, object blockages, and lack of scattering is the major problem to decrease the wave propagation distance. This could significantly shorten the coverage radius of eNodeB in mobile communications. Therefore, the use of massive MIMO technology in cooperating with mmWave is compulsory to mitigate this problem.

This thesis is interested to increase gain of massive MIMO antenna in order to reduce pathloss, increase the signal distribution distance due to the large signal attenuation.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature วศพร

Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด รวมทั้งตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูญาษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตพงษ์ เวชโรสงค์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณนางสาววิรินทร์ อาจหาญ เลขานุการ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษา ตรวจสอบ และดำเนินการเกี่ยวกับเอกสารต่างๆตลอดระยะเวลาการศึกษา ขอขอบคุณ นายอัครชัย อินทนิล ดร.ปรีกร อันซีน และนายณัฐวุฒิ ภูงามเงิน พี่ๆ นักศึกษาปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำ คำชี้แนะและแก้ไขปัญหาแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ความรู้ด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัย ทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบ ให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

วรพล พวงเกาะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของเรื่อง.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2.1 แนวคิดและภาพรวมของระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5	4
2.2.2 การสื่อสารไร้สายบนเครือข่ายที่ต่างกันในยุคที่ 5.....	6
2.2.3 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5	7
2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	8
2.3.1 คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร	8
2.3.2 ระบบ massive MIMO.....	9
2.3.2.1 เทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	2.3.2.1.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น.....	10
	2.3.2.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ	13
	2.3.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเทคโนโลยี massive MIMO	16
2.3.3	พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ	19
	2.3.3.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน.....	19
2.3.4	อัตราขยายของสายอากาศ.....	25
2.3.5	แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ	27
	2.3.5.1 กลไกการแพร่กระจายแบบหลายเส้น ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	27
	2.3.5.2 ช่องสัญญาณไร้สาย.....	28
3	การออกแบบระบบ.....	35
3.1	บทนำ.....	35
3.2	พารามิเตอร์การจำลอง	35
	3.2.1 ตัวเลือกในการแก้ปัญหา.....	35
	3.2.2 ตัวเลือกในการพล็อต.....	35
	3.2.3 พารามิเตอร์ทั่วไป.....	36
	3.2.4 ตัวเลือกการสร้างหมายเลขสุ่ม	36
	3.2.5 เวลาในการจำลอง.....	36
	3.2.6 ตัวเลือกแคช.....	36
	3.2.7 โครงร่างของเครือข่ายและพารามิเตอร์การสูญเสีย	37
	3.2.8 Shadow Fading (สำหรับเครือข่ายที่สร้างขึ้นเท่านั้น)	39
	3.2.9 Small-scale Fading.....	39
	3.2.10 การตั้งค่าผู้ใช้.....	40
	3.2.11 การตั้งค่า eNodeB.....	40
	3.2.12 การตั้งค่าการจัดตารางเวลา.....	41
	3.2.13 การตั้งค่า Uplink channel	41
	3.2.14 การบันทึกผลลัพธ์.....	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	การกำหนดค่าสายอากาศเรียงลำดับแบบ 2 มิติ.....	41
3.4	รูปแบบการแผ่กระจายของสายอากาศ	42
3.5	แผนที่ตำแหน่งของสถานีฐานกับผู้ใช้งาน.....	43
4	การจำลองระบบ	44
4.1	บทนำ.....	44
4.2	การจำลองระบบ 4G.....	44
4.3	การจำลองระบบ 5G.....	49
4.3.1	ความถี่ 28 GHz 8x2 MIMO	49
4.3.2	ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO.....	55
4.3.3	ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi.....	60
4.4	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ.....	66
4.4.1	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างความถี่ 2.1 GHz กับ 28 GHz.....	66
4.4.2	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อเพิ่มอัตราขยาย ที่ความถี่ 28 GHz.....	69
4.5	สายอากาศที่ออกแบบ	72
4.5.1	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศที่ออกแบบ กับสายอากาศอุดมคติระหว่าง 2.1 GHz กับ 28 GHz.....	78
4.6	สรุป	80
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	81
5.2	ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	81
	รายการอ้างอิง	83
	ประวัติผู้เขียน.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง สำหรับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ	33
4.1	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 4G	44
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ที่ความถี่ 28 GHz 8x2 MIMO.....	49
4.3	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO.....	55
4.4	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi.....	60
4.5	แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ของสายอากาศที่ออกแบบ.....	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	มาตรฐานสำหรับระบบการสื่อสารยุคที่ 5 ตาม ITU-R M.2083-0 5
2.2	สถาปัตยกรรมของเครือข่ายการสื่อสารยุคที่ 5 ที่ผสมผสานกันระหว่าง massive MIMO และเทคโนโลยี mmWave..... 7
2.3	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น $N \times 1$ ต้น 11
2.4	สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2 15
2.5	จำนวนหลายผู้ใช้งาน และ ผู้ใช้งานเดี่ยว บนสถานีฐานของระบบ massive MIMO..... 16
2.6	การใช้สายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ สำหรับระบบ massive MIMO 17
2.7	การรับส่งแอนะล็อกโดยใช้เทคนิค digital precoding สำหรับระบบ massive MIMO..... 18
2.8	การรับส่ง โดยใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น สำหรับระบบ massive MIMO..... 18
2.9	การรับส่ง โดยใช้เทคนิค hybrid digital และการก่อรูปลำคลื่นสำหรับระบบ massive MIMO..... 19
2.10	รูปแบบสายอากาศ สำหรับระบบ massive MIMO 19
2.11	ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ..... 20
2.12	แบบรูปการแผ่คลื่นแบบรอบตัวในระนาบเดียว..... 21
2.13	แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานหลักในระนาบสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรทรงพีรามิด..... 22
2.14	ก. แสดงโพลการแผ่คลื่นและความกว้างลำของแบบรูปการแผ่คลื่นของสายอากาศ..... 23 ข. ภาพพล็อตเชิงเส้นของแบบรูปกำลังงานและ โพลที่เกิดขึ้นและความกว้างของแบบรูปการแผ่คลื่น..... 23
2.15	บริเวณสนามที่เกิดขึ้นของสายอากาศ..... 24
2.16	รูปทรงทางเรขาคณิตที่ใช้แสดงความแตกต่างระหว่างเรเดียนและสเตอเรเดียน..... 25
2.17	ลักษณะการเดินทางของสัญญาณทางตรงและสัญญาณสะท้อนจากพื้นผิว..... 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 การกำหนดค่าสายอากาศและโพลาริซเอชันของ eNodeB และ ผู้ใช้.....	42
3.2 ตำแหน่งของ eNodeB และ UE.....	43
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทาง กับระยะทางที่ความถี่ 2.1 GHz.....	45
4.2 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 2.1 GHz.....	46
4.3 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz	47
4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz.....	48
4.5 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น.....	50
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทาง กับระยะทางที่ความถี่ 28 GHz	51
4.7 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz.....	52
4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz	53
4.9 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz.....	54
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO	56
4.11 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO	57
4.12 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO.....	58
4.13 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO.....	59
4.14 รูปแบบการแผ่กระจายของสายอากาศ.....	61
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi	62
4.16 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi	63
4.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi.....	65
4.19 ก. เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 2.1 GHz..... ข. เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz.....	66
4.20 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz	67
4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SPECTRAL EFFICIENCY ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz	68
4.22 ก. เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยาย 10 dBi..... ข. เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยาย 15 dBi..... ค. เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยาย 20 dBi..... ง. เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยาย 25 dBi	69
4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งที่เพิ่มขึ้น.....	70
4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งที่เพิ่มขึ้น.....	71
4.25 สายอากาศที่สร้างโดยใช้การออกแบบสายอากาศแพทช์ไมโครสตริป	72
4.26 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในแนวนอนของสายอากาศที่ออกแบบ	73
4.27 รูปแบบการแผ่กระจายของสายอากาศที่ออกแบบ	73
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ของสายอากาศที่ออกแบบ	74
4.29 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ของสายอากาศที่ออกแบบ	75
4.30 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานของสายอากาศที่ออกแบบ.....	76
4.31 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานของสายอากาศที่ออกแบบ	77
4.32 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ที่ใช้สายอากาศที่ออกแบบและสายอากาศอูมคคิ	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.33 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่
ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ที่ใช้สายอากาศที่ออกแบบและสายอากาศอุดมคติ 79



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสื่อสารมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารแบบไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารผ่านทางเสียง การสื่อสารผ่านทางข้อความหรือแม้กระทั่งการสื่อสารผ่านวิดีโอ ซึ่งเป็นเรื่องปกติในสังคมยุคออนไลน์ในปัจจุบัน ทำให้ปริมาณการรับส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในอนาคตจะมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ โดยเชื่อมโยงผ่านการสื่อสารไร้สายเป็นจำนวนมากนับไม่ถ้วน ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์พกพาแต่ละบุคคล ยานพาหนะ ระบบสัญญาณไฟจราจร ระบบสมาร์ตโฮม ระบบสมาร์ตฟาร์ม หรือการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ นี้จะเรียกได้ว่ายุค IoT (Internet of Things) หรือการสื่อสารยุคที่ 5 นั่นเอง ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ระบบมีความเสถียรภาพมากที่สุด

การสื่อสารยุคที่ 5 นั้นจะมีความคาดหวังว่า จะมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด (Peak data rate) เพิ่มขึ้น 20 เท่า อัตราการส่งข้อมูลที่ใช้ได้จริง (User experienced data rate) เพิ่มขึ้น 10 เท่า ความหน่วงของระบบ (Latency) ลดลง 10 เท่า ความสามารถในการรองรับข้อมูลในขณะเคลื่อนที่ (Mobility) โดยสามารถรองรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า ความหนาแน่นในการเชื่อมต่อ (Connection density) ซึ่งหมายถึงจำนวนอุปกรณ์ที่สามารถรองรับได้ เพิ่มขึ้น 10 เท่า ประสิทธิภาพการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum efficiency) เพิ่มขึ้น 3 เท่าและอัตราการส่งข้อมูลต่อพื้นที่ (Area traffic capacity) เพิ่มขึ้น 100 เท่า ซึ่งความต้องการจากข้างต้นนี้ จะมีเทคนิคที่ใช้สำหรับการเพิ่มความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น คือ การใช้เทคนิค Multiple Input Multiple Output หรือ MIMO ซึ่งเทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ทั่วไปในการสื่อสารยุคที่ 4 โดยหลักการพื้นฐานของระบบ MIMO คือ การใช้สายอากาศมากกว่าหนึ่งต้นในการรับส่งข้อมูล ซึ่งการใช้สายอากาศมากกว่าหนึ่งต้นในการรับส่งข้อมูลนั้น ทำให้สามารถรองรับการใช้งานอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับจุดส่งสัญญาณในปริมาณมากขึ้นได้ สำหรับการสื่อสารยุคที่ 5 นั้นมีความต้องการมากถึงหนึ่งร้อยเท่าเมื่อเทียบกับการสื่อสารยุคที่ 4 จึงมีความจำเป็นต้องใช้สายอากาศในการส่งและรับมากถึงระดับร้อยหรือระดับพันสายอากาศ ซึ่งเรียกเทคนิคการใช้สายอากาศในปริมาณมากระดับนี้ว่า massive MIMO นั่นเอง [28][29]

ซึ่งในการสื่อสารยุคที่ 5 นั้นจะมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนมากจึงต้องมีการรองรับอุปกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้นและเพิ่มความจุของช่องสัญญาณ จึงต้องการใช้ความกว้างแถบความถี่สำหรับส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในปัจจุบันคลื่นความถี่ที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 6 กิกะเฮิรตซ์ เช่น คลื่นความถี่ย่าน 800 เมกะเฮิรตซ์ 900 เมกะเฮิรตซ์ 1800 เมกะเฮิรตซ์ และ 2100 เมกะเฮิรตซ์ โดยคลื่นความถี่ดังกล่าวมีข้อจำกัดของความกว้างแถบความถี่ คลื่นความถี่ในย่านที่สูงกว่า 6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถใช้ความกว้างแถบความถี่ที่สูงขึ้นได้ จึงเป็นคลื่นความถี่ที่ได้รับความสนใจสำหรับการนำมาใช้ในระบบ 5G ส่วนหนึ่งของคลื่นความถี่ที่มากขึ้นนี้ สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คลื่นความถี่ Millimeter Wave (mmWave) ซึ่งการใช้ย่านความถี่ที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้การสูญเสียในเส้นทางเพิ่มมากขึ้นและจะส่งผลให้ระยะในการกระจายสัญญาณนั้นสั้นกว่าย่านความถี่ที่ต่ำกว่าหรือมีพื้นที่ครอบคลุมที่ลดลง ซึ่งจากปัญหาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศเพื่อที่จะชดเชยการสูญเสียตามเส้นทางและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบในระบบการสื่อสารไร้สายเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ massive MIMO

1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายในระบบการสื่อสารยุคที่ 5

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การเพิ่มจำนวนสายอากาศโดยใช้เทคนิค massive MIMO จะสามารถเพิ่มสมรรถนะของการสื่อสารไร้สายได้

1.3.2 การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ massive MIMO จะช่วยเพิ่มระยะในการกระจายสัญญาณหรือพื้นที่ครอบคลุมและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายโดยใช้เทคนิค MASSIVE MIMO และวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆของระบบเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 จำลองระบบการสื่อสารโดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.5.2 วิเคราะห์ผลและประสิทธิภาพเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถหาความเสถียรภาพของระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 ได้

1.6.2 สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 ได้

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผล ซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บทด้วยกัน

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมุติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ massive MIMO และตามด้วยการกล่าวถึงการสนใจในประสิทธิภาพต่างๆของ massive MIMO สำหรับในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะประกอบด้วย คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร ระบบ massive MIMO พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ อัตราขยายของสายอากาศ และแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ

บทที่ 3 กล่าวถึงการอธิบายพารามิเตอร์ต่างๆในระบบการสื่อสาร หลักการในกระบวนการรันโปรแกรม โดยนำโปรแกรม Vienna Simulators LTE-A Downlink System Level Simulator Documentation, v2.0 Q3-2018 จ 1 ก Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง ประสิทธิภาพต่างๆของระบบ โดยการทดลองเพิ่มความถี่ เพิ่มจำนวนของสายอากาศภาคส่ง เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและนำสายอากาศที่ออกแบบมาใช้ในการจำลองระบบ เพื่อดูการเปรียบเทียบ วิเคราะห์ผล

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะ อีกทั้งแนวทางในการแก้ปัญหา และการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

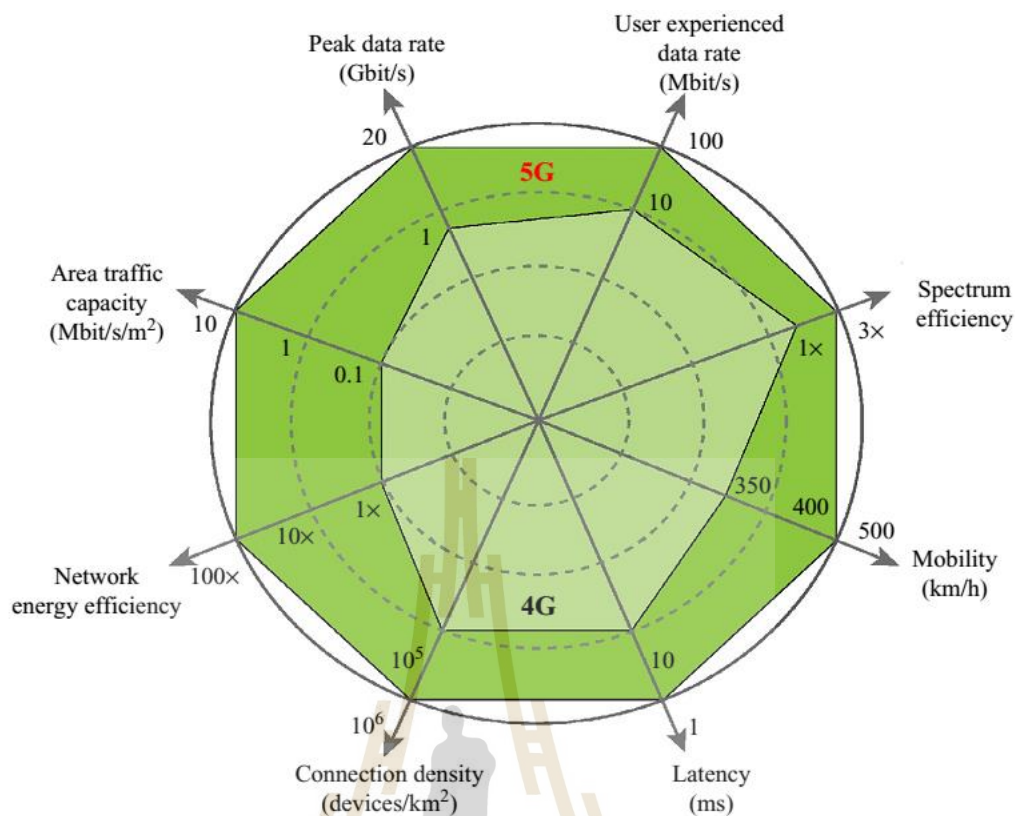
2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารยุคที่ 5 ซึ่งในระบบการสื่อสารยุคที่ 5 นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาประสิทธิภาพในหลายๆด้านมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพในระบบการสื่อสารยุคที่ 5 นั้นมีผู้นำเสนอด้วยกันหลายรูปแบบ โดยมีการศึกษาค่าประสิทธิภาพที่ต่างกันออกไป ในงานวิจัยนี้จึงสนใจการศึกษาพัฒนาประสิทธิภาพต่างๆ เพื่อนำไปเปรียบเทียบหาข้อแตกต่างกับระบบการสื่อสารยุคที่ 4 เพื่อให้ทราบข้อดีและข้อเสียที่เกิดขึ้นและเพื่อนำไปประยุกต์และพัฒนาประสิทธิภาพของการสื่อสารยุคที่ 5 และสำหรับทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องจะกล่าวในหัวข้อถัดไปตามลำดับ

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 แนวคิดและภาพรวมของระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบการสื่อสารไร้สายได้มีบทบาทต่อการดำรงชีวิตประจำวันอย่างมากไม่ว่าจะเป็นการติดต่อสื่อสารหรือใช้เพื่อความบันเทิงที่มากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาค้นคว้า วิจัยระบบการสื่อสารไร้สายมากยิ่งขึ้น การวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาทางเทคนิคที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน มีความท้าทายและความต้องการที่ได้ดึงดูดทั้งภาควิชาการและภาคอุตสาหกรรม[27] ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารในยุคที่ 5 นั้น จะมีบทบาทสำคัญในด้านต่างๆมากมาย ไม่ว่าจะเป็น เกษตรกรรม ยานยนต์ การขนส่ง การเงิน สุขภาพ อุตสาหกรรมการผลิต เป็นต้น จากบทบาทสำคัญข้างต้นนี้การสื่อสารในยุคที่ 5 นั้นจำเป็นที่จะต้องพัฒนาประสิทธิภาพของการสื่อสารให้มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ITU-R ได้กำหนดมาตรฐาน IMT for 2020 and beyond ซึ่งมีขีดความสามารถในด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้นจากมาตรฐาน IMT-Advanced ของระบบการสื่อสารยุคที่ 4 โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังแผนภาพไฮแมงมุมในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 มาตรฐานสำหรับระบบการสื่อสารยุคที่ 5 ตาม ITU-R M.2083-0 [26]

เราจะพบว่าระบบการสื่อสารยุคที่ 5 [24] จะมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด (Peak data rate) เพิ่มขึ้น 20 เท่า อัตราการส่งข้อมูลที่ใช้ได้จริง (User experienced data rate) เพิ่มขึ้น 10 เท่า ความหน่วงของระบบ (Latency) ลดลง 10 เท่า ความสามารถในการรับข้อมูลในขณะที่เคลื่อนที่ (Mobility) โดยสามารถรองรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า ความหนาแน่นในการเชื่อมต่อ (Connection density) ซึ่งหมายถึงจำนวนอุปกรณ์ที่ระบบสามารถรองรับได้เพิ่มขึ้น 10 เท่า ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโครงข่าย (Energy efficiency) เพิ่มขึ้น 100 เท่า ประสิทธิภาพการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum efficiency) เพิ่มขึ้น 3 เท่า และอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดต่อพื้นที่ (Area traffic capacity) เพิ่มขึ้น 10 เท่า ซึ่งขีดความสามารถที่มากขึ้นเหล่านี้ จะตอบสนองความสามารถในรองรับการทำงานของระบบการสื่อสารยุคที่ 5 ใน 3 ด้านหลัก [25] ดังนี้

- eMBB หรือ enhanced Mobile Broadband คือ การใช้งานในลักษณะที่ต้องการการส่ง ข้อมูลความเร็วสูงในระดับจีบิตต่อวินาที (Gbps) ซึ่งการใช้งานลักษณะนี้ตอบสนองความต้องการ การส่ง และรับข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

- mMTC หรือ massive Machine Type Communications คือ การใช้งานที่มีการเชื่อมต่อของ อุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน โดยมีปริมาณมากถึงระดับล้านอุปกรณ์ต่อตารางกิโลเมตร

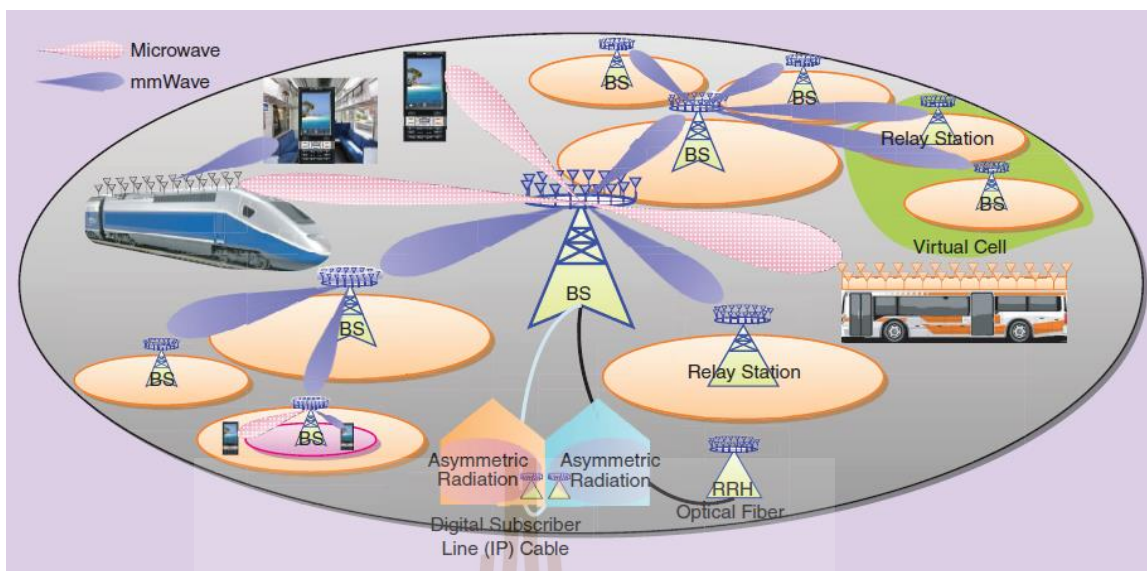
โดยการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ในการใช้งานลักษณะนี้ จะเป็นการส่งข้อมูลปริมาณน้อย ๆ ที่ไม่ต้องการความเร็วสูง หรือ ความหน่วงเวลา อุปกรณ์โดยทั่วไปมีราคาถูก และมีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่มากกว่าอุปกรณ์ทั่วไป ซึ่งความสามารถนี้ทำให้ระบบการสื่อสารยุคที่ 5 เหมาะสมกับการทำงานของอุปกรณ์จำพวก IoT

- URLLC หรือ Ultra-reliable and Low Latency Communications คือ การใช้งานที่ต้องการความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีความเสถียรมาก รวมทั้งมีความหน่วงเวลา (latency) หรือความหน่วงในการส่งข้อมูลต่ำในระดับ 1 มิลลิวินาที (ระบบการสื่อสารยุคที่ 4 ในปัจจุบันรองรับความหน่วงเวลาในระดับ 10 มิลลิวินาที) ซึ่งความสามารถนี้ทำให้ระบบการสื่อสารยุคที่ 5 เหมาะสมกับการใช้งานระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง

2.2.2 การสื่อสารไร้สายบนเครือข่ายที่ต่างกันในยุคที่ 5

การสร้างความหนาแน่นของเครือข่ายตลอดจนการปรับใช้เซลล์ในแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน เช่น มาโครเซลล์ ไมโครเซลล์ พิโคเซลล์และเฟมโตเซลล์ ซึ่งเป็นเทคนิคในการเสริมสร้างเครือข่าย ประสิทธิภาพการครอบคลุมและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน มีการนำวิธีการสร้างความหนาแน่นแบบนี้มาใช้ในเครือข่ายเซลลูลาร์ไร้สายที่มีเฉพาะ 3G และระบบ 4G LTE

massive MIMO และเทคโนโลยี mmWave มีแนวทางเพื่อการแก้ไขปัญหาทางเทคนิคมากมายในการสื่อสารไร้สายบนเครือข่ายที่ต่างกันในยุคที่ 5 และสามารถผสมผสานรวมได้อย่างลงตัวด้วยเครือข่ายปัจจุบันและการเข้าถึงเทคโนโลยี ซึ่งการเพิ่มจำนวนมากของสายอากาศที่ภาครับและภาคส่ง (massive MIMO) จะทำให้สเปกตรัมและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการสื่อสารไร้สายดีขึ้นอย่างยิ่ง ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายส่วนใหญ่เน้นทำงานที่ความถี่ไมโครเวฟที่ต่ำกว่า 6 GHz ซึ่งความต้องการความจุของระบบการสื่อสารไร้สายในยุคถัดไปนั้นมีความต้องการที่จะใช้ประโยชน์ช่วงความถี่ที่สูงกว่า 6 GHz ซึ่งช่วงความถี่ mmWave จะอยู่ระหว่าง 30 – 300 MHz ซึ่งจะสามารถได้รับสเปกตรัมที่มาก มีความเป็นไปได้มากที่จะใช้งานการสื่อสารไร้สายบนเครือข่ายที่ต่างกันในยุคที่ 5 ที่ผสมผสานกันระหว่าง massive MIMO และ เทคโนโลยี mmWave จากปริทัศน์วรรณกรรมที่ [27] พบว่าสถาปัตยกรรมของเครือข่ายการสื่อสารยุคที่ 5 ที่แสดงในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นการทำงานของ massive MIMO และเทคโนโลยี mmWave ที่สามารถใช้งานในส่วนต่างๆและวัตถุประสงค์การสื่อสารที่แตกต่างกัน ซึ่งจะใช้งานทั้งความถี่ mmWave และความถี่ไมโครเวฟที่กำหนดการใช้งานของช่วงความถี่ของการสื่อสารที่ต่างกัน



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายการสื่อสารยุคที่ 5 ที่ผสมผสานกันระหว่าง massive MIMO และ เทคโนโลยี mmWave

จากการใช้ช่วงความถี่ mmWave ซึ่งเป็นความถี่ที่สูง จึงทำให้การสูญเสียตามเส้นทางนั้นมีค่าที่สูงขึ้น และความยาวของคลื่นจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นค่าที่ผกผันกันระหว่างความถี่และความยาวคลื่น จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการ ultra-dense networks (UDNs) ซึ่งหมายถึงการใช้ความหนาแน่นของเซลล์ขนาดเล็กของสถานีฐานที่อยู่ภายในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีขนาดใหญ่ (macrocell) ซึ่งจะได้รับประสิทธิภาพที่เต็มที่มากยิ่งขึ้นตลอดจนการครอบคลุมของเครือข่าย ซึ่งเซลล์ขนาดเล็กนั้นประกอบด้วย เมโทเซลล์ ไมโครเซลล์ พิโคเซลล์หรือเฟมโตเซลล์ จากการผสมผสานกันของ mmWave Massive MIMO และ UDNs เกิดเป็นสถาปัตยกรรมของการสร้างการสื่อสารไร้สายบนเครือข่ายที่ต่างกัน

2.2.3 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5

ในการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 นั้น มีความต้องการที่จะต้องพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายให้มีประสิทธิภาพและมีความเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อรองรับการสื่อสารต่างๆและเทคโนโลยีที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคต ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่มีการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สายเป็นจำนวนมาก ซึ่งงานวิจัยที่ [31] เป็นงานวิจัยที่ทำการทดสอบเพิ่มจำนวนสายอากาศส่งและภาครับเพื่อดูประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจที่ค่าของความจุของช่องสัญญาณและอัตราข้อผิดพลาดของบิต เมื่อทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศส่งและภาครับแล้วนั้นส่งผลให้ค่าของความจุของช่องสัญญาณมีค่ามากขึ้นแต่ค่าของอัตราข้อผิดพลาดของบิตยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงและงานวิจัยต่อมาคืองานวิจัยที่ [32] เป็นงานวิจัยที่นำเสนอสถาปัตยกรรมขนาดใหญ่ของ

สายอากาศ MIMO ที่ใช้สำหรับเครือข่ายการสื่อสารในรุ่นต่อไป ซึ่งงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์แนวทางใหม่ๆ ในการประมาณผลของสัญญาณและมีการออกแบบระบบสายอากาศ massive MIMO และงานวิจัยที่ [33] เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการออกแบบและแก้ไขสายอากาศ MIMO สำหรับทั้งจุดเชื่อมต่อและสายอากาศโทรศัพท์ มีการวัดค่าประสิทธิภาพของสายอากาศและเปรียบเทียบกับผลการจำลองและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นงานวิจัยที่สนใจในประสิทธิภาพของ การรับส่งข้อมูล ประสิทธิภาพสเปกตรัม อัตราขยายของสายอากาศ จึงเป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัยในงานวิจัยนี้

2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร

คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร (Millimeter wave หรือ mmWave) [2] เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่คลื่นที่ 30 GHz ถึง 300 GHz โดยในช่วงคลื่นนี้จะสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่ง คือ Extremely high frequency ซึ่งปกติแล้ว คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรจะมีความยาวคลื่นระหว่าง 1 mm ถึง 10 mm โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญของเทคโนโลยีนี้ คือ ชิพเซต คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรและสายอากาศในการส่งสัญญาณแบบไร้สาย โดยใช้ช่วงความถี่พาหะที่ 60 GHz เป็นหลัก ซึ่งช่วงความถี่นี้มีความถี่สูงเกือบ 1,000 เท่าของคลื่นที่ใช้สำหรับวิทยุเอฟเอ็มทั่วไป และเนื่องจากการส่งข้อมูลความเร็วสูงของระบบเทคโนโลยีไร้สายรูปแบบคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรนี้สามารถทำการโอนถ่ายข้อมูลได้สูงในระดับ gigabit per second จึงทำให้มีความจำเป็นในการเข้ารหัสข้อมูลที่มีการรับส่งเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล แต่ด้วยความเร็วที่มีสูงมากจึงไม่สามารถใช้ระบบการเข้ารหัสแบบเดียวกับเทคโนโลยี linear wire แบบในปัจจุบันได้ และที่แย่ไปกว่านั้นระบบไร้สายความเร็วสูงนี้ยังได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงจากการรบกวนต่าง ๆ เช่น การสะท้อน การดูดซับคลื่นและอื่น ๆ ในพื้นที่ว่าง หรือแม้กระทั่งการดูดซับสัญญาณที่เกิดจากออกซิเจนในอากาศเอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเข้ารหัสและถอดรหัส และการตรวจสอบข้อมูลอย่างเหมาะสม โดยยังคงอัตราการรับส่งข้อมูลที่ gigabit per second ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนาจนสามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างมีความน่าเชื่อถือและมีการสูญเสียข้อมูลระหว่างการโอนถ่ายที่ต่ำ โดยทั่วไประบบแลนไร้สายจะมีความถี่อยู่ที่ 2.5 GHz หรือ 5 GHz ส่วนคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรจะใช้ประโยชน์จากความกว้างของคลื่นความถี่ที่ทั่วโลกยังไม่ได้ทำการจดทะเบียน คือ ช่วงความถี่ 30 GHz ถึง 300 GHz ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ความถี่สูงยังหมายถึงค่าเฉลี่ยความยาวคลื่นที่สั้นกว่า เป็นผลให้ระบบสายอากาศสามารถมีขนาดขนาดเล็กในระดับมิลลิเมตร ในบางครั้งยังสามารถบรรจุสายอากาศไว้ในตัวชิพเซตในการรับส่งสัญญาณก็สามารถทำได้เช่นกัน มากไปกว่านั้นตัวอุปกรณ์มีราคาถูกลงมาก เมื่อเทียบกับระบบไร้สายอื่น ๆ โดยคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรได้รับการ

พัฒนามานานแล้ว แต่เนื่องจากตัวรับส่งสัญญาณเองเป็นตัวที่มีความถี่สูงมาก จึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพงมาก ซึ่งเป็นทางเลือกเดียวในขณะนั้นในการพัฒนาตัวรับส่งสัญญาณ ทำให้อุปกรณ์มีราคาแพง จึงทำให้คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรไม่เป็นที่ต้องการในตลาดมากนัก แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาชิปเซตด้วยเทคโนโลยีซิลิกอน เพื่อลดราคาและทำให้มีการใช้ไฟฟ้าต่อบิตลดลง นอกจากนี้ยังทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงมาก

กฎเกณฑ์สำคัญของการนำคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรมาใช้งานมี 3 ประการดังนี้

1) ช่วงความถี่ใหม่ที่รองรับผู้ใช้บริการที่เพิ่มมากขึ้น มาตรฐานใหม่ในการสื่อสารแบบไร้สายมีการเสนออย่างต่อเนื่อง มีเหตุผลหลัก 2 ประการ คือ ประการแรกจำนวนผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคุณภาพที่ดีขึ้นของบริการ รวมถึงการเข้าถึงได้อย่างรวดเร็วแม้จะมีความคล่องตัวและการรบกวนที่เพิ่มขึ้น ประการที่สองคลื่นความถี่ต่ำกว่า 3 GHz ทั้งหมดได้ถูกใช้เกือบหมดแล้วและมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ประโยชน์แถบความถี่ใหม่และสูงขึ้น เพื่รองรับจำนวนผู้ใช้ที่เพิ่มมากขึ้น

ช่วงความถี่สำหรับระบบสื่อสารยุคที่ 5 [23] แยกออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงความถี่ที่ถูกพัฒนาต่อจากระบบสื่อสารยุคที่ 4 คือ ช่วงต่ำกว่า 6 GHz อาจมีแถบความถี่ไม่เกิน 3 GHz และคลื่นความถี่ใหม่ ระหว่าง 6-100 GHz ขึ้นอยู่ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (f) และความยาวคลื่น $\lambda = c/f$ ซึ่ง c เป็นความเร็วเฟส (Phase Velocity) นอกจากนี้ยังมีชื่อว่า คลื่นมิลลิเมตร มีลักษณะพิเศษในการสื่อสารแบบความยาวคลื่นระดับมิลลิเมตร มีค่าการสูญเสียเส้นทางที่สูง การทะลุของสัญญาณ ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้ช่วยเพิ่มความท้าทายในการออกแบบระบบเป็นอย่างมาก

นอกจากนี้การเชื่อมต่อทุกอย่างเป็นหนึ่งในเป้าหมายหลักของระบบการสื่อสารยุคที่ 5 อย่างไม่ก็ตามผู้ใช้ที่เชื่อมต่อกันมากขึ้น หมายถึง การรบกวนที่มากขึ้นตามและเกิดความล่าช้าของการรับส่งข้อมูลซึ่งยังต้องหาเทคนิคใหม่มาช่วยในการปรับปรุง

2) อัตราส่งข้อมูลสูงและความหน่วงต่ำ ข้อกำหนดที่สำคัญที่สุด คือ อัตราส่งข้อมูลที่สูงและความหน่วงต่ำ หมายความว่าเราจำเป็นต้องค้นหาเทคนิคที่มีความซับซ้อนต่ำที่สามารถเพิ่มข้อมูลได้และลดเวลาในการตอบสนองของระบบ

3) การเข้าถึงโดยใช้เทคนิคก่อรูปลำคลื่น เป็นเทคนิคที่สำคัญในการสื่อสารแบบไร้สาย มีจุดมุ่งหมายในการสร้างก่อรูปลำคลื่น หรือส่งสัญญาณโดย สายอากาศแถวลำดับและการเลื่อนเฟส เนื่องจากการสูญเสียเส้นทางสูงช่วงคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร แม้จะมีการใช้เทคนิคก่อรูปลำคลื่นเพื่อบรรเทาข้อจำกัดเหล่านี้ในคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร โดยใช้ เทคนิคก่อรูปลำคลื่นแบบ แบบ codebook ที่มีสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ เพื่อตอบสนองความต้องการในการรับส่งข้อมูลด้วยการกำจัดสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน

2.3.2 ระบบ massive MIMO

ระบบ Massive Multiple-Input Multiple-Output systems หรือ Massive MIMO ถือได้ว่ามีความสำคัญและเป็นปัจจัยที่น่าสนใจ เนื่องจากระบบสายอากาศกระจายคลื่นขนาดใหญ่เป็นเครื่องยืนยันว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัมอย่างมากต่อเซลล์ ระบบสายอากาศกระจายคลื่นขนาดใหญ่มักจะกำหนดคุณสมบัติจำนวนสายอากาศว่าจำนวนต้องมากกว่า 100 ขึ้นไป สามารถควบคุมการสื่อสารได้ดีทั้งฝั่งส่งและรับ ถือได้ว่าเป็นอีกวิธีการหนึ่งสำหรับการเพิ่มความสามารถในการส่งข้อมูลที่มากขึ้น เพื่อรองรับการใช้งาน แบบ eMBB คือ การใช้เทคนิค Multiple Input Multiple Output หรือ MIMO ซึ่งเทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้สำหรับระบบการสื่อสารยุคที่ 4 หรือแม้แต่วิธีการ Wi-Fi โดยหลักการพื้นฐานของระบบ MIMO คือ การใช้สายอากาศ มากกว่าหนึ่งสายอากาศในการส่งข้อมูล รวมทั้งใช้สายอากาศมากกว่าหนึ่งสายอากาศในการรับข้อมูล ซึ่งการใช้สายอากาศมากกว่าหนึ่งสำหรับการส่งและรับข้อมูลนี้ทำให้เราสามารถรองรับการใช้งานของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับจุดส่งสัญญาณดังกล่าวในปริมาณมากขึ้นได้

2.3.2.1 เทคโนโลยีการใช้สายอากาศหลายต้น

การใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวนั้น มักจะพบปัญหาอยู่เสมอ เช่น มีลำคลื่นค่อนข้างกว้างทำให้มีสภาพเงาเงาทิศทางและอัตราขยายค่อนข้างต่ำ ซึ่งการนำสายอากาศใช้กับระบบการสื่อสารระยะไกลนั้นจำเป็นต้องใช้สายอากาศที่มีสภาพเงาเงาทิศทางที่สูงมาก วิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้มากมายในปัจจุบัน คือ การนำสายอากาศหลาย ๆ ต้นมาประกอบวางเรียงให้มีรูปร่างเชิงเรขาคณิต เรียกว่า สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) การนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลาย ๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดียว ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเงาเงาทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นเทคโนโลยีสายอากาศหลายต้น การใช้สายอากาศหลายต้นจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่จำเป็นมากต่อระบบก่อรูปลำคลื่น ที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่นรองหรือจุดศูนย์ ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น สายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังต่อไปนี้

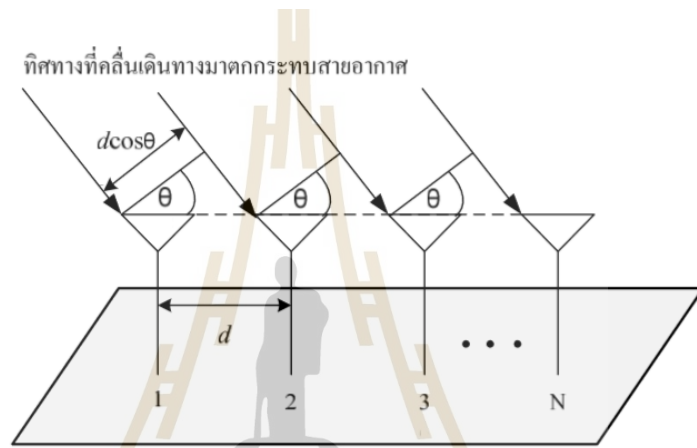
2.3.2.1.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น[3] เป็นสายอากาศแถวลำดับที่พื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด คือ ประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นเรียงกันเป็นเส้นตรง ซึ่งอาจจะมียะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้น หรือ $N \times 1$ ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่างขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบของ

สายอากาศ โดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหา ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น
 λ คือ ความยาวคลื่น



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

ในรูปที่ 2.3 แสดงถึงสายอากาศแบบเชิงเส้น $N \times 1$ ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้นและมีแอมพลิจูดเท่ากัน ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน มีการป้อนกระแสให้กับทุก ๆ องค์ประกอบเท่ากันและจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกัน ไปอย่างเท่า ๆ กัน เราสามารถหาค่าของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$AF = 1 + e^{+j(kd\cos\theta+\beta)} + e^{+j2(kd\cos\theta+\beta)} + \dots + e^{+j(kd\cos\theta+\beta)} \quad (2.2)$$

$$AF = \sum_{n=1}^n e^{j(n-1)kd(\cos\theta+\beta)} \quad (2.3)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\psi = kdcos\theta + \beta$ และ k มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$ และ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น และ β คือ ความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น จากสมการ 2.4 เราสามารถลดรูปของสมการได้ดังนี้

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j\psi(N-1)} + e^{jN\psi} \quad (2.5)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.4 ลงใน 2.5 จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

$$(AF)(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (2.6)$$

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

$$\begin{aligned} AF &= \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] \\ &= e^{j\left[\frac{N-1}{2}\right]\psi} \left[\frac{e^{j\left(\frac{N}{2}\right)\psi} - e^{-j\left(\frac{N}{2}\right)\psi}}{e^{j\left(\frac{1}{2}\right)\psi} - e^{-j\left(\frac{1}{2}\right)\psi}} \right] \\ &= e^{j\left[\frac{N-1}{2}\right]\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นค่าของระยะห่างของสายอากาศ $d = 2\pi/\lambda$ และ $\beta = 0$ ดังนั้น $\psi = kdcos\theta + \beta = 0$ ดังนั้นสมการที่ 2.7 จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.8)$$

ค่าของ ψ จะถือน้อยมาก ๆ ดังนั้น เราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

$$AF \cong \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\frac{\psi}{2}} \right] \quad (2.9)$$

ค่าสูงสุดของสมการที่ 2.8 และ 2.9 จะมีค่าเท่ากับ N เพื่อที่จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบแวล ลำดับเป็นมาตรฐานเราจึงต้องกำหนดให้ค่าสูงสุดของแต่ละสมการเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นสมการ มาตรฐานของตัวประกอบแวลลำดับ คือ

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{\psi}{2})} \right] \quad (2.10)$$

$$(AF)_n \cong \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.11)$$

2.3.2.1.2 สายอากาศแวลลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแวลลำดับเชิงระนาบ[8] เป็นรูปแบบที่ประยุกต์ มาจากรูปแบบสายอากาศแวลลำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายไว้ใน 2.3.2.1.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวาง เป็นสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่าสายอากาศแวลลำดับเชิงระนาบ สายอากาศแวลลำดับเชิงระนาบจะมีแบบ รูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเชิงเส้น คือ สามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่ พลังงานได้ ดังนั้น สายอากาศแวลลำดับเชิงระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถใช้แบบ รูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ สายอากาศแวลลำดับระนาบจึงเหมาะสมกับการ นำไปใช้ในงานเรดาร์ การชี้ทางระยะไกล การสื่อสาร ไร้สายและรวมถึงระบบสายอากาศแก่งด้วย เรา สามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแวลลำดับระนาบ โดยใช้สมการที่ 2.12 ได้เช่นเดียวกับ สายอากาศแวลลำดับแบบเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแวลลำดับแตกต่างกันซึ่งสามารถหาได้ โดยเริ่ม จากพิจารณามุม γ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4 จะได้

$$\begin{aligned} \cos\gamma &= \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r \\ &= \hat{a}_x \cdot (\hat{a}_x \sin\theta \cos\phi + \hat{a}_y \sin\theta \sin\phi + \hat{a}_z \cos\theta) \\ &= \sin\theta \cos\phi \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ \hat{d}_x \hat{d}_y \hat{d}_z และ \hat{d}_r คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน x y z และ r ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับ ดังนี้

$$\begin{aligned} AF_x &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \cos\gamma + \beta_x)} \\ &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ I_{m1} คือ สัมประสิทธิ์กระแสของสายอากาศแต่ละต้น d_x คือ ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ β_x คือ ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x

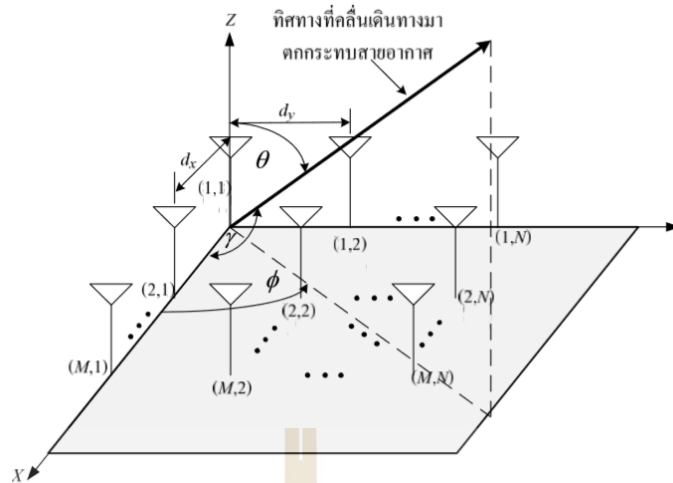
เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน y เช่นเดียวกันกับที่พิจารณาแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

$$\begin{aligned} AF_y &= \sum_{n=1}^N I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \cos\gamma + \beta_y)} \\ &= \sum_{n=1}^N I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

เมื่อ I_{n1} คือ สัมประสิทธิ์กระแสของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือ ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y และ β_y คือ ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y

ดังนั้น เราสามารถหาค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y รวมกัน หรือที่เรียกว่าแบบระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y เข้าด้วยกันจะได้

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{n1} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \cos\gamma + \beta_y)} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.4 สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน $M \times N$ [20]

ถ้าสมมติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากันจะได้

$$I_{mn} = I_{m1}I_{n1} \quad (2.17)$$

และกำหนดให้แอมพลิจูดมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยจะได้ $I_{mn} = I_0$ ดังนั้น เราสามารถลดรูปสมการ 2.16 ลงเหลือเท่ากับ

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} \quad (2.18)$$

เช่นเดียวกันกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น เราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \left[\frac{\sin(\frac{M}{2}\psi_x)}{\sin(\frac{\psi_x}{2})} \right] \right\} \left\{ \frac{1}{N} \left[\frac{\sin(\frac{N}{2}\psi_y)}{\sin(\frac{\psi_y}{2})} \right] \right\} \quad (2.19)$$

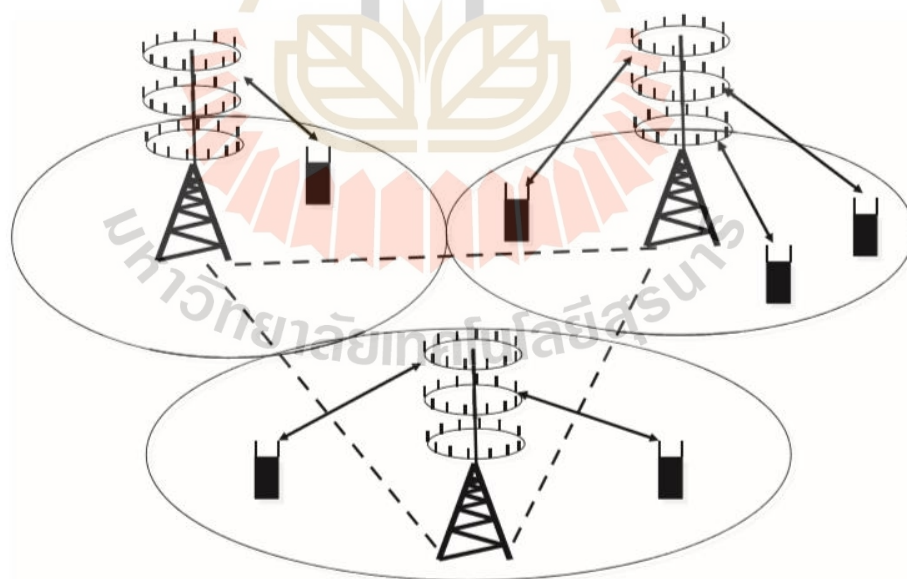
เมื่อ

$$\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x \quad (2.20)$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y \quad (2.21)$$

2.3.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเทคโนโลยี massive MIMO

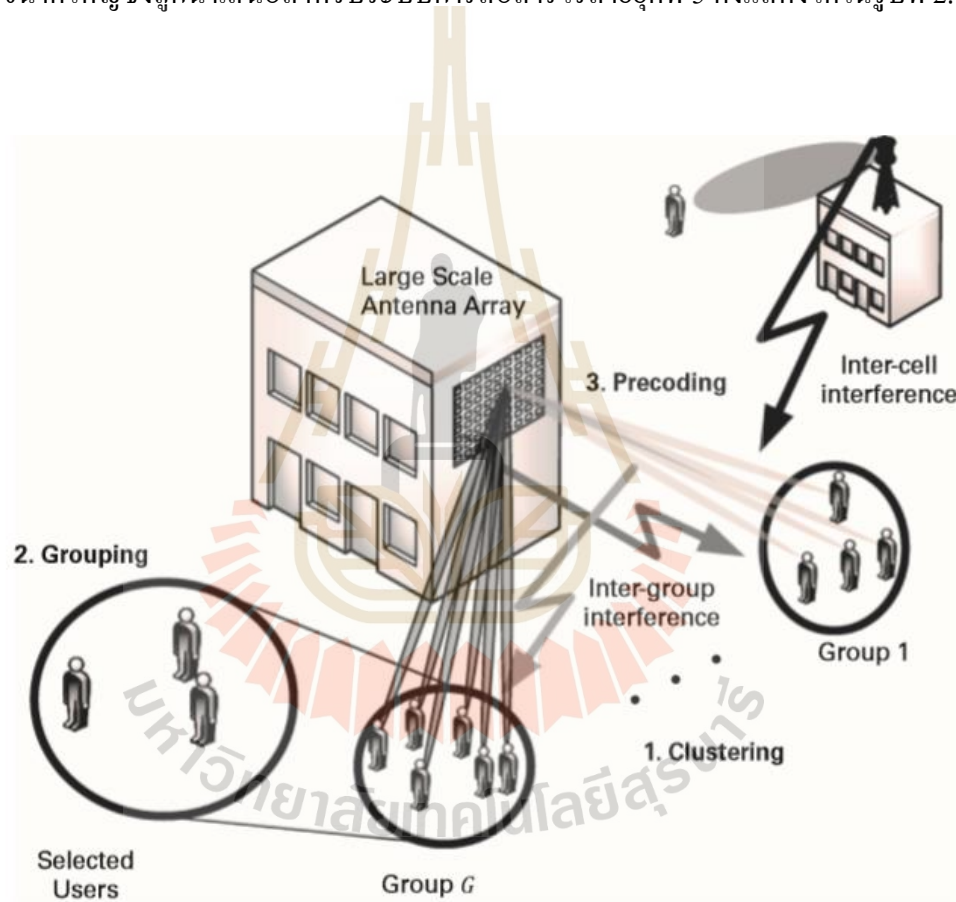
ระบบ massive MIMO [18] [21] ได้ถูกนำมาพิจารณาถึงความสำคัญในหลาย ๆ ปัจจัย เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของสเปกตรัมที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ระบบ massive MIMO คือ ระบบที่ออกแบบสายอากาศที่มีจำนวนหลายองค์ประกอบ หรือ จำนวน 100 ต้น หรือมากกว่านั้น อีกทั้งยังสามารถที่จะทำการปรับเปลี่ยนทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละองค์ประกอบได้อย่างอิสระจากจำนวนสายอากาศจำนวนมาก เพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้หรืออุปกรณ์ที่ทำการเชื่อมต่อที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นที่เวลาและความถี่เดียวกัน สำหรับระบบสื่อสารไร้สายที่สถานีฐาน [5-6] สำหรับรูปแบบการใช้งานระบบ massive MIMO ที่ฝั่งสถานีฐานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ยังมองที่รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณที่พุ่งยังทิศทางของสายอากาศที่ภาครับและการแทรกสอดของสัญญาณภายในเซลล์และระหว่างเซลล์ [7-10] การเจาะจงรูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณ โดยเฉพาะทิศทางที่เป็นไปได้ สำหรับการส่งที่สัญญาณเดียวกันจากจำนวนสายอากาศจำนวนมากในหลาย ๆ จุด แต่จะมีการเลื่อนเฟสที่ต่างกันในสายอากาศแต่ละต้นเพื่อเป็นการป้องกันการทับซ้อนของสัญญาณในช่วงความกว้างของแถบความถี่ในขณะเตรียมโค้ดและยังช่วยลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนให้มีขนาดที่เล็กลง ใน โคนความถี่นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอัตราขยาย โดยการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ



รูปที่ 2.5 จำนวนหลายผู้ใช้งาน และ ผู้ใช้งานเดี่ยว บนสถานีฐานของระบบ massive MIMO [11]

แม้ว่าการใช้สายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่จะมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบเรดาร์ ตั้งแต่ ค.ศ. 1960 [10] โดยระบบ massive MIMO ได้ถูกพัฒนาเชิงพาณิชย์ เช่น สำหรับการ

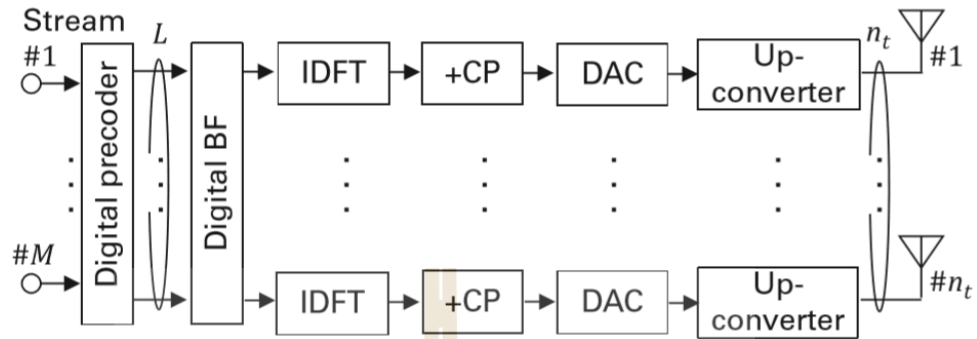
ติดต่อสื่อสารในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาการทดลองและการดำเนินการมีปัจจัยที่ท้าทายนอกเหนือจากประสิทธิภาพของระบบ massive MIMO แล้ว ซึ่งหนึ่งในปัจจัยหลัก คือ ความต้องการส่งข้อมูลที่รวดเร็วขึ้นบนช่องสัญญาณ และการกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่ภาคส่งและรับ รวมถึงความล่าช้าในการส่งข้อมูล นอกจากนี้การใช้ประโยชน์ของระบบ massive MIMO ด้วยการใช้นพื้นที่ขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นสูง อาจทำได้ยาก เนื่องจากขนาดของสายอากาศแถวลำดับ ที่ความถี่สูง เช่น ความถี่ระดับมิลลิเมตร แม้จะมีการแทรกสอดต่ำ แต่ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กส่งผลให้อัตรายายต่ำ ดังนั้นวิธีที่ช่วยเพิ่มอัตรายายเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการออกแบบสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ซึ่งถูกนำเสนอสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6



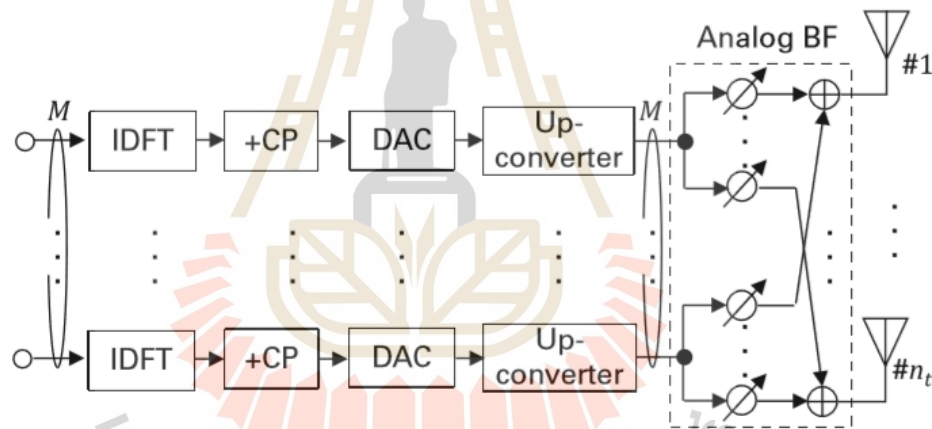
รูปที่ 2.6 การใช้สายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ สำหรับระบบ massive MIMO [11]

นอกเหนือจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีแล้วยังมีการวิเคราะห์โหมด Single User และ Multiple User ของระบบ massive MIMO ด้วย ซึ่งสิ่งที่สำคัญของระบบ massive MIMO คือ ข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์ [12] เพื่อลดความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์กับจำนวนของสายอากาศที่ทำงานแต่ละ

องค์ประกอบในระบบ ซึ่งต้องยอมรับและไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ อย่างไรก็ตามความซับซ้อนขึ้นอยู่กับรูปแบบการรับส่งดิจิทัลและแอนะล็อก รูปแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

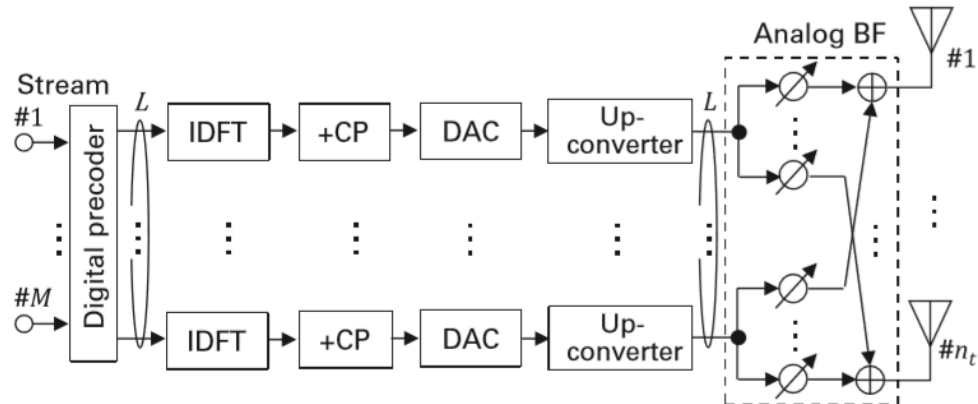


รูปที่ 2.7 การรับส่งแอนะล็อกโดยใช้เทคนิค digital precoding สำหรับระบบ massive MIMO [11]

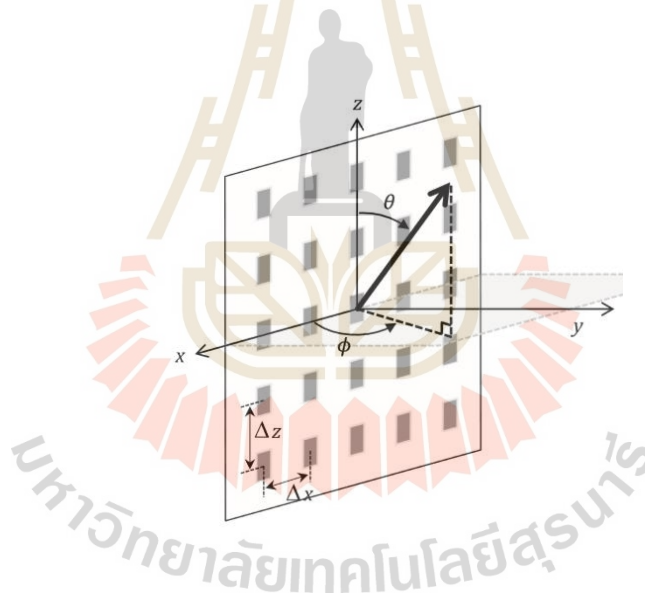


รูปที่ 2.8 การรับส่ง โดยใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น สำหรับระบบ massive MIMO [11]

สำหรับเหตุผลและแนวทางที่เหมาะสม สำหรับการเตรียมโค้ดและการก่อรูปลำคลื่น [19] ในระบบ massive MIMO คือ การใช้ระบบ hybrid beamforming [13-16] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 คือ ตัวอย่างของสายอากาศระบบ massive MIMO เมื่อ M คือ การเตรียมโค้ดในระบบดิจิทัล และสัญญาณพื้นฐานจำนวน L สัญญาณที่มีความแตกต่างกัน และได้ถูกคัดลอกเพื่อนำไปกำจัดสัญญาณแทรกสอดระหว่างรูปแบบสัญญาณแอนะล็อก เพื่อช่วยในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศในเทคนิคการก่อรูปลำคลื่น



รูปที่ 2.9 การรับส่ง โดยใช้เทคนิค hybrid digital และการก่อรูปลำคลื่น สำหรับระบบ massive MIMO[22]



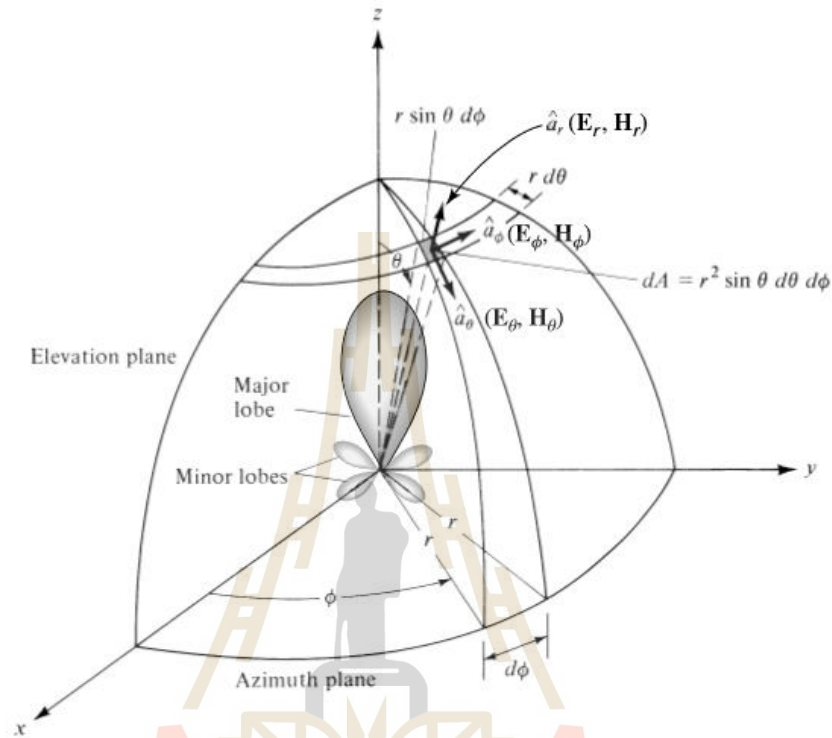
รูปที่ 2.10 รูปแบบสายอากาศ สำหรับระบบ massive MIMO [11]

2.3.3 พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ

2.3.3.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน

การนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่พลังงานของสายอากาศเชิงกราฟฟิก หรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่คลื่นจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (far-field region) และจะนำเสนอในลักษณะฟังก์ชันของพิกัดเชิงทิศทางเสมอ

ซึ่งคุณสมบัติการแผ่คลื่นนี้จะสามารถพิจารณาถึงความหนาแน่นเส้นแรงแห่งกำลังงาน ความเข้มการแผ่กระจายกำลังงาน ความแรงของสนาม เฟสของการขึ้นนำ หรือการแยกขั้วคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.11



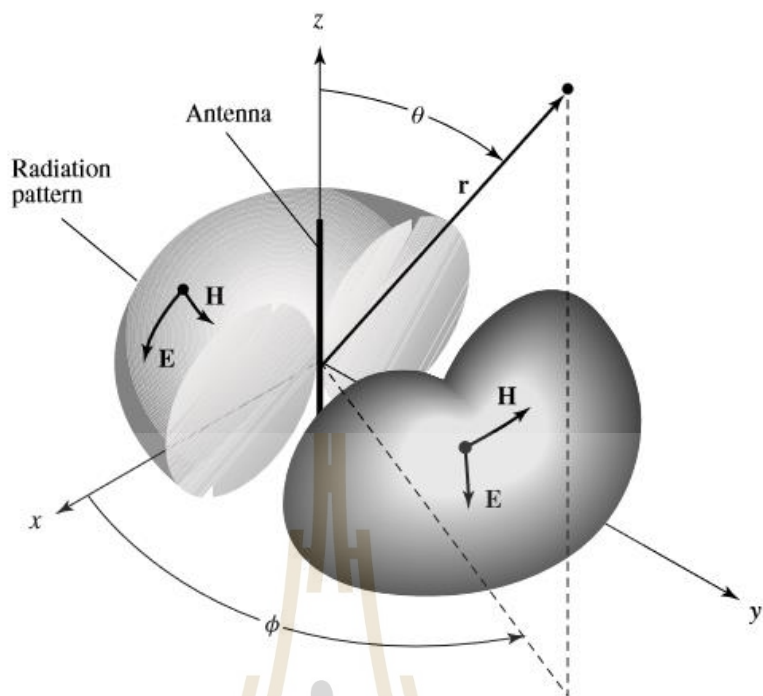
รูปที่ 2.11 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [17]

1) แบบรูปการแผ่คลื่นแบบไอโซทรอปิกแบบมีทิศทางและแบบรอบตัวในระนาบเดียว

- ตัวแผ่คลื่นแบบ ไอโซทรอปิก (isotropic radiator) คือ สายอากาศที่สมมุติขึ้นมาว่าปราศจาก การสูญเสียและมีการแผ่คลื่นออกมาเท่ากันทุกทิศทางทุกทาง

- สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่ หรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ คำนี้มักจะใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (maximum directivity) มากกว่าของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น

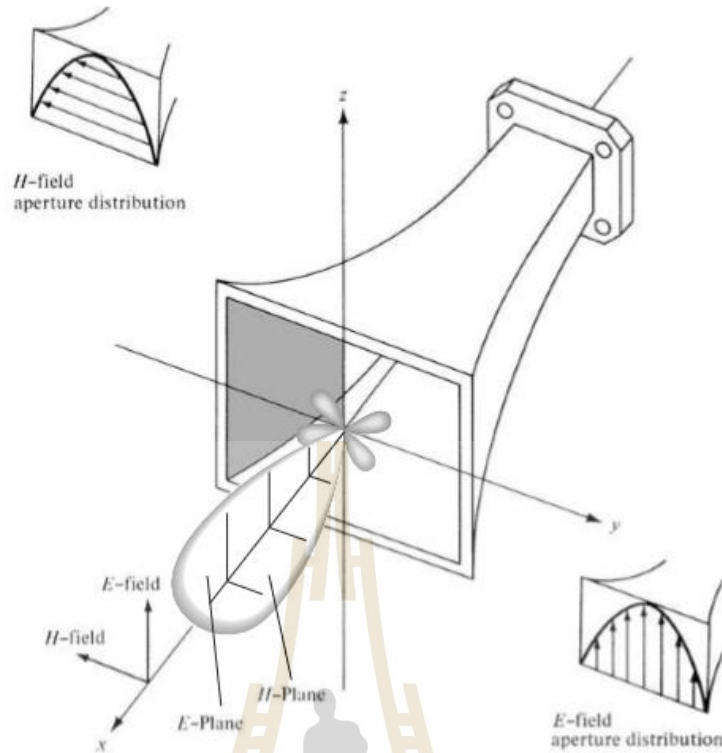
- แบบรูปการแผ่คลื่นแบบรอบตัวในระนาบเดียว (omnidirectional pattern) คือแบบรูปการแผ่คลื่นที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ คือ มุมอาซิมูท (azimuth) และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่คลื่นแบบมีทิศทาง คือ มุมเงย (elevation) ซึ่งแบบรูปการแผ่คลื่นแบบรอบตัวในระนาบเดียวแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบรูปการแผ่คลื่นแบบรอบตัวในระนาบเดียว [17]

2) แบบรูปการแผ่พลังงานหลัก

พฤติกรรมของสายอากาศที่มีการแยกขั้วคลื่นเชิงเส้นมักจะอธิบายรูปแบบการแผ่คลื่นในเทอมของแบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) แสดงดังรูปที่ 2.13



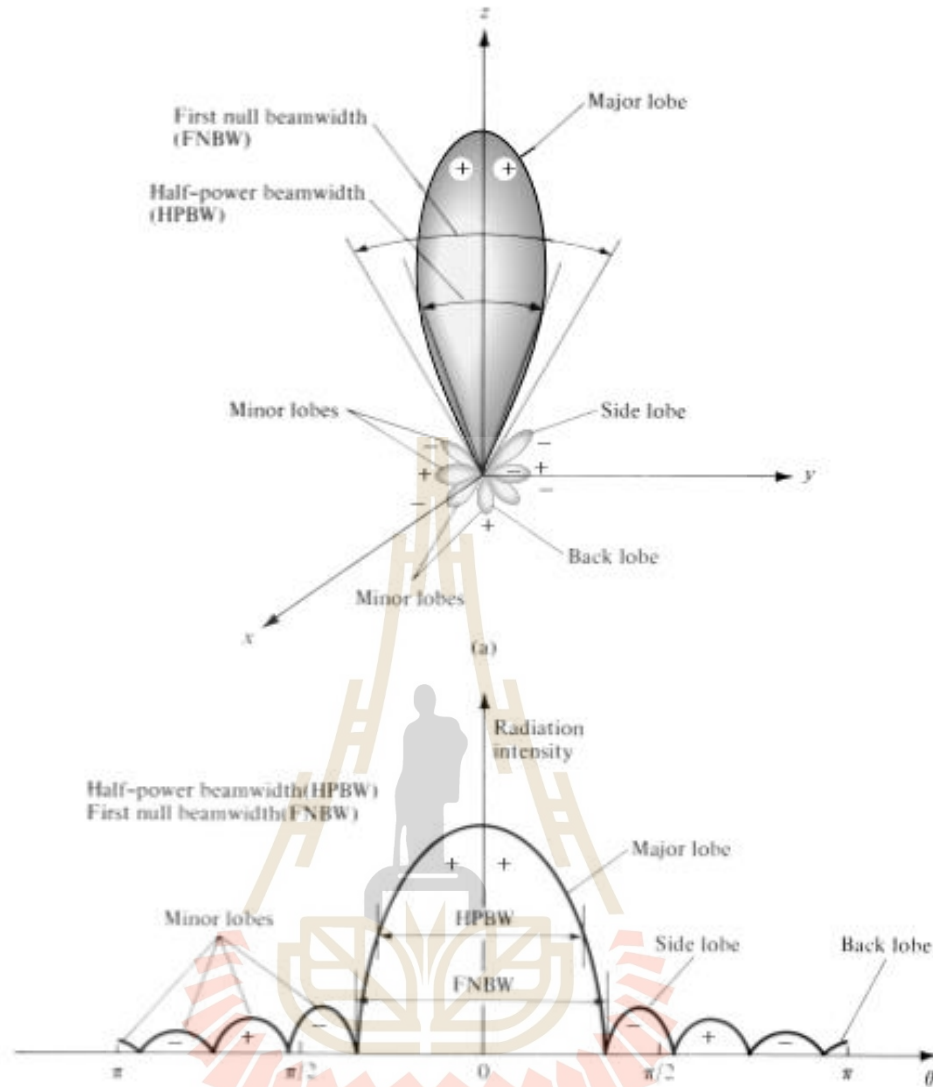
รูปที่ 2.13 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานหลักในระนาบสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรทรงพีรามิด [17]

- ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) คือระนาบที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางที่มีการแผ่คลื่นสูงสุด (ระนาบ x-z หรือระนาบ มุมเงย, $\varphi = 0$)

- ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) คือระนาบที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางที่มีการแผ่คลื่นสูงสุด (ระนาบ x-y หรือระนาบมุมอาซิมุท, $\theta = \frac{\pi}{2}$)

3) โทลบของแบบรูปการแผ่พลังงาน

- โทลบการแผ่คลื่น (radiation lobe) คือ ส่วนต่าง ๆ ของแบบรูปการแผ่คลื่นที่บ่งบอกถึงบริเวณที่มีความเข้มของการแผ่คลื่นแตกต่างกันอย่างไร สามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มต่าง ๆ คือ โทลบหลัก โทลบย่อย โทลบด้านข้าง และ โทลบด้านหลัง แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 (ก) แสดงโหนดการแผ่คลื่นและความกว้างลำของแบบรูปการแผ่คลื่นของสายอากาศ
 (ข) ภาพพล็อตเชิงเส้นของแบบรูปกำลังงานและโหนดที่เกิดขึ้นและความกว้างของ
 แบบรูปการแผ่คลื่น [17]

- โหนดหลัก (major/main lobe) คือ โหนดของแบบรูปการแผ่คลื่นที่มีทิศทางการแผ่คลื่นสูงสุด (ในรูปที่ 2.22 จะอยู่ที่ $\theta = 0$)
- โหนดย่อย (minor lobe) คือ โหนดใด ๆ ที่ปรากฏอยู่นอกเหนือจากโหนดหลัก
- โหนดด้านข้าง (side lobe) คือ โหนดของแบบรูปการแผ่คลื่นในทิศทางใด ๆ ที่นอกเหนือจากทิศทางหลักมักจะพิจารณาในโหนดที่อยู่ด้านข้างของโหนดหลักและอยู่บนครึ่งวงกลมเดียวกันกับโหนดหลัก

- โหลบด้านหลัง (back lobe) คือ โหลบของแบบรูปแบบการแผ่คลื่นที่มีทิศทางการแผ่คลื่น ตรงกันข้ามกับโหลบหลัก หรืออยู่ที่ประมาณ 180 องศาเมื่อเทียบกับโหลบหลัก

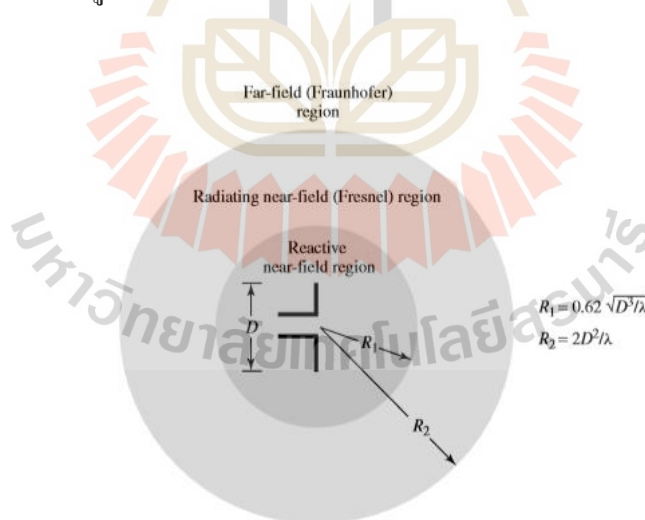
อัตราส่วนของโหลบด้านข้าง (side lobe ratio) หรือระดับของโหลบด้านข้าง (side lobe level) มักจะกำหนดไว้ที่ระดับ -20 dB หรือต่ำกว่า เพื่อลดการผิดพลาดในการเล็งเป้าหมายอันเกิดมาจากโหลบด้านข้างนี้

บริเวณสนามอากาศอิสระที่อยู่ล้อมรอบสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณสนามระยะใกล้รีเอกทีฟ บริเวณสนามระยะใกล้ที่มีการแผ่ และบริเวณสนามระยะไกล

- บริเวณสนามระยะใกล้รีเอกทีฟ คือ ส่วนของบริเวณสนามระยะใกล้ที่อยู่โดยรอบสายอากาศโดยตรง สนามที่เกิดขึ้นบริเวณนี้จะเป็นสนามรีเอกทีฟ

- บริเวณสนามระยะใกล้ที่มีการแผ่ คือ บริเวณของสนามของสายอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณสนามระยะใกล้รีเอกทีฟกับบริเวณสนามระยะไกล ถ้าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น สนามบริเวณนี้จะไม่เกิดขึ้น

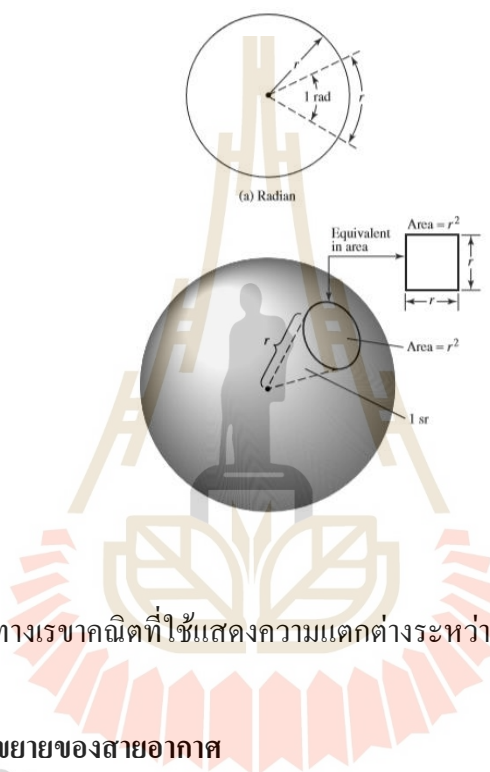
- บริเวณสนามระยะไกล คือ บริเวณของสนามของสายอากาศซึ่งมีการกระจายของสนามเชิงมุมไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางที่ห่างออกมาจากตัวสายอากาศบริเวณต่าง ๆ ของสนามที่เกิดขึ้นของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 บริเวณสนามที่เกิดขึ้นของสายอากาศ [17]

5) เรเดียนและสเตอเรเดียน

การวัดมุมเชิงระนาบ (plane angle) มีหน่วยเป็นเรเดียน (radian) และการวัดมุมเชิงรูปทรง หรือรูปตัน (solid angle) ของทรงกลมมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (steradian) สำหรับพื้นที่เล็ก ๆ dA บนผิวของทรงกลมที่มีรัศมี r สามารถกำหนดได้โดย $dA = r^2 \sin\theta d\theta d\phi$ และอิลิเมนต์ของมุมรูปตัน $d\Omega$ ของทรงกลมสามารถกำหนดได้โดย $d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi$ ความแตกต่าง ระหว่างเรเดียนและสเตอเรเดียน แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปทรงทางเรขาคณิตที่ใช้แสดงความแตกต่างระหว่างเรเดียนและสเตอเรเดียน [17]

2.3.4 อัตราขยายของสายอากาศ

ค่าอัตราขยายของสายอากาศ (antenna gain) คือ อัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้กับค่าความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานที่สายอากาศได้รับ ถ้ากำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศถูกแผ่กระจายออกไปในลักษณะของไอโซทรอปิก สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้คือ

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (2.22)$$

โดยอัตราขยายที่ได้นี้จะไม่มีหน่วย ซึ่งจะมีค่าเดียวกันกับค่าสภาพเจาะจงทิศทางหากสายอากาศไม่มีการคิดค่าสูญเสีย (losses) และเมื่อกำหนดให้ $P_{in} = \Pi$ ก็จะแสดงได้ว่า $G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi)$ ดังนั้นการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศจึงต้องคิดรวมค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

สายอากาศด้วย โดยจะถูกคำนวณจากกำลังงานที่ป้อนให้แก่อินพุต ซึ่งเป็นปริมาณที่สามารถวัดได้ แตกต่างจากการคำนวณค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่คำนวณจากกำลังงานที่แผ่กระจายออกไป

ในทางปฏิบัตินั้นการที่สายอากาศจะมีอัตราขยายมากเพียงพอดตามที่ต้องการหรือไม่ นั้นจะมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้องที่ทำให้การส่งผ่านพลังงานจากเครื่องส่ง ไปยังสายอากาศ หรือจากสายอากาศมายังเครื่องรับลดต่ำลงได้ ได้แก่ การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไม่แมตช์กันระหว่างสายนำสัญญาณและสายอากาศ การสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายนำสัญญาณ และการสูญเสียภายในตัว สายอากาศซึ่งเกิดจากส่วนประกอบของสายอากาศเอง เช่น การสูญเสียจากไดโอดรีกและตัวนำที่ประกอบเป็นโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งปกติโดยทั่วไปนั้นกำลังงานที่ถูกแผ่ออกมาจากสายอากาศมักจะมีค่าน้อยกว่ากำลังงานที่ป้อนให้กับระบบสายอากาศเสมอ $\Pi \leq P_{in}$ ยกเว้นในสายอากาศนั้นมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับเพิ่มการขยายสัญญาณติดตั้งเพิ่มเข้าไปด้วย นั่นคือ สาเหตุที่ว่าทำไมอัตราขยายของสายอากาศจึงมีค่าน้อยกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางเสมอ $G \leq D$

จากมาตรฐานของ IEEE (International Electrical and Electronic Engineering) ได้กำหนดไว้ว่า การพิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศจะไม่คิดรวมค่าการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์ของค่าอิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์ของขั้วคลื่น ที่เกิดขึ้นในระบบ แต่จะคิดเฉพาะค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากไดโอดรีกและตัวนำที่เป็นองค์ประกอบของสายอากาศ ดังนั้น กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศจึงสัมพันธ์กับค่ากำลังงานอินพุตและค่าประสิทธิภาพในการแผ่ กระจายกำลังงานของสายอากาศ นั่นคือ

$$\Pi = eP_{in} \quad (e \leq 1) \quad (2.23)$$

ดังนั้น

$$G(\theta, \varphi) = eD(\theta, \varphi) \quad (2.24)$$

ในกรณีที่สายอากาศมีการกำหนดการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะการโพลาริซชันของสนามที่เรา กำหนดให้จะเรียกค่าอัตราขยายลักษณะนี้ว่าเป็นค่าอัตราขยายบางส่วน (partial gain: $G_0 = G_\theta + G_\varphi$) เช่นเดียวกับกรณีของค่าสภาพเจาะจงทิศทางบางส่วน และถ้าต้องการแสดงค่าทั้ง ของอัตราขยายและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศให้มีหน่วยเป็นเดซิเบล (decibel) ก็ สามารถทำได้โดยนำค่าที่ได้จากสมการข้างต้นไปคำนวณเป็นค่าลอการิทึมคูณด้วย 10 ซึ่งสมการแสดงดังตัวอย่างเช่น

$$D(\theta, \varphi)|_{dB} = 10 \log D(\theta, \varphi) \quad \text{หรือ} \quad G(\theta, \varphi)|_{dB} = 10 \log G(\theta, \varphi)$$

2.3.5 แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ

2.3.5.1 กลไกการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่หรือความยาวคลื่นต่าง ๆ มีคุณสมบัติในการแพร่กระจายในอากาศและได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมไม่เหมือนกัน ในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางในอากาศระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเดินทางในแนวเส้นสายตาคือ แนวเส้นตรงที่เชื่อมต่อสายอากาศส่งและสายอากาศรับ สัญญาณที่แพร่กระจายในแนวเส้นสายตามีการลดทอนน้อยที่สุด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ยังสามารถเดินทางทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ดี ถ้าความยาวคลื่นมีค่ามากกว่าความหนาของวัตถุมาก ๆ แต่ถ้าความยาวคลื่นมีขนาดลดลง พลังงานสัญญาณจะถูก ลดทอนมากขึ้น เมื่อเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง ดังนั้นสัญญาณอาจจะไม่สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางไปถึงด้านรับได้ เช่น คลื่นย่านความถี่เหนือม่วงหรืออัลตราไวโอเลต และคลื่นความถี่ที่สูงกว่า มีขนาดความยาวคลื่นที่น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้ในการสื่อสารไร้สายได้ เนื่องจากคลื่นในย่านความถี่ดังกล่าวถูกลดทอนพลังงานอย่างมากเมื่อเดินทางผ่านอากาศหรือผ่านสิ่งมีชีวิต นอกเหนือจากสัญญาณที่เดินทางในแนวเส้นสายตาคือ จากเครื่องส่งกับเครื่องรับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางนอกแนวเส้นสายตา โดยอาศัยกลไกการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทางดังนี้

- การสะท้อนคลื่นที่เดินทางตกกระทบวัตถุที่มีความหนาแน่นกว่าความยาวคลื่นมาก เช่น กำแพง ผนัง หรือพื้นอาคาร คลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับ ในขณะที่บางส่วนจะเดินทางผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นของวัตถุมีขนาดเท่ากับกับความยาวคลื่น ปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นหรือแปรผันตามความถี่ ดังนั้นคลื่นวิทยุจะถูกลดทอนพลังงานน้อยกว่า เมื่อเดินทางผ่านกำแพงเมื่อเทียบกับคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากมีความยาวคลื่นมากกว่า ส่วนคลื่นในย่านอินฟราเรดหรือสูงกว่าไม่สามารถเดินทางผ่านวัตถุทึบแสง หมอก และฝนได้ เนื่องจากความยาวคลื่นมีค่าน้อยมาก

- การเลี้ยวเบนคลื่นที่เดินทางใกล้ขอบของวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาก ๆ เช่น ภูเขา หรือตึกสูง จะเกิดปรากฏการณ์ที่คลื่นเลี้ยวเบนตรงขอบวัตถุ เสมือนกับว่าคลื่นเดินทางหักเหอ้อมขอบของสิ่งกีดขวางได้

- การกระจัดกระจายคลื่นที่เดินทางผ่านวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงหรือน้อยกว่าความยาวคลื่นจะเกิดปรากฏการณ์ที่คลื่นเกิดการกระจัดกระจายไปหลายทิศทาง ส่งผลให้คลื่นที่เดินทางไปถึงสายอากาศด้านรับมีพลังงานลดลงมาก เช่น คลื่นในย่าน 10 - 20 กิกะเฮิรตซ์ซึ่งใช้ในการสื่อสารดาวเทียมมีความยาวคลื่นในช่วง 1 - 1.5 เซนติเมตร จะเกิดการสูญเสียอย่างมากในสภาพอากาศที่มีฝน เนื่องจากขนาดของเม็ดฝนใกล้เคียงกับความยาวคลื่น

ดังนั้นในสภาพแวดล้อมจริงสัญญาณจากด้านส่งเดินทางมาถึงด้านรับได้หลายเส้นทาง สัญญาณที่เดินทางในเส้นทางตรงจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับในแนวเส้นสายตา

เรียกว่า สัญญาณทางตรง ส่วนสัญญาณที่มีการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทางด้วยการสะท้อน เลี้ยวเบน และ การกระจัด กระจาย เนื่องจากสิ่งกีดขวางหรือวัตถุระหว่างทาง เรียกว่า สัญญาณทางอ้อม การแพร่กระจายของ สัญญาณแบบหลายเส้นทางเป็นลักษณะที่สำคัญของช่องสัญญาณไร้สายในระบบ ที่เครื่องรับและเครื่องส่งตั้งอยู่ภาคพื้นดิน

2.3.5.2 ช่องสัญญาณไร้สาย

ระบบสื่อสารไร้สายอาศัยตัวกลางไร้สาย ได้แก่ อากาศ และน้ำ ในการส่ง สัญญาณ หรือเรียกว่า ช่องสัญญาณไร้สาย คุณสมบัติเฉพาะของช่องสัญญาณ ไร้สาย คือ สัญญาณ สามารถแพร่กระจายไปได้ทุกทิศทาง ทำให้สัญญาณสามารถเดินทางไปได้หลายเส้นทางไปยัง เครื่องรับ และได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่สัญญาณเดินทางผ่าน

1) การจางหายของสัญญาณ หมายถึง การผันผวนของสัญญาณภาครับ เนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในเส้นทางเดินของสัญญาณที่มีการแพร่กระจายแบบหลายทางจาก เครื่องส่งมายังเครื่องรับ สัญญาณในแต่ละเส้นทางของการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทางเดินทาง มาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกันและกำลังของสัญญาณถูกลดทอนไม่เท่ากัน เนื่องจากความแตกต่างของ สภาพแวดล้อมและสิ่งกีดขวางในเส้นทาง เมื่อสัญญาณที่เดินทางจากหลายเส้นทางมารวมกันที่ด้านรับ ผลรวมสัญญาณที่ได้ อาจจะมีค่าสูงกว่าสัญญาณด้านส่งมากถ้าสัญญาณเสริมกันเอง เมื่ออยู่ในเฟส เดียวกัน หรืออาจมีค่าต่ำกว่าสัญญาณด้านส่งมาก ถ้าสัญญาณหักล้างกันเองจากการกลับเฟส นอกจากนั้น สภาพแวดล้อมในเส้นทางเดินของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเกือบตลอดเวลาไม่มากนัก น้อยจากการเคลื่อนที่ ของวัตถุรอบ ๆ หรือจากการเคลื่อนที่ของเครื่องรับเอง ดังนั้นสัญญาณที่ด้านรับ จากการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทาง จึงมีการผันผวนอย่างรวดเร็ว โดยสัญญาณภาครับที่ระยะทาง ระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับต่างกันเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้กำลังของสัญญาณภาครับต่างกันหลาย เท่า

2) การสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณ

การส่งสัญญาณในแนวเส้นสายตา หมายถึง สัญญาณจากเครื่องส่งเดินทางไปถึง เครื่องรับในเส้นทางของแนวสายตา โดยที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ระหว่างทาง ในกรณีนี้แบบจำลองการสูญเสีย ในเส้นทางที่นิยมใช้มีอยู่สองแบบ ได้แก่

2.1) แบบจำลองการสูญเสียจากการส่งสัญญาณแบบ LoS หรือ Line of Sight ใน ช่องว่างอิสระ

การส่งแบบ LoS ในช่องว่างอิสระหมายถึงการสื่อสาร ที่สัญญาณไม่มีการ สะท้อนกับพื้นผิวโลกก่อนเดินทางไปถึงด้านรับ ซึ่งเป็นลักษณะการส่งในอุดมคติเสมือนกับการ สื่อสารเกิดขึ้นในช่องว่างอิสระที่ไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ ระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ เช่น การสื่อสาร ระหว่างดาวเทียมที่โคจรอยู่ในอวกาศ หรือ การสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน

โดยสมมติให้ เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณแทนด้วยจุดในช่องว่าง ดังนั้นเราจึงเรียก แบบจำลอง การสูญเสียแบบนี้ว่า แบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free-space path loss model) ในกรณีนี้ กำลังเฉลี่ยของสัญญาณภากรับ P_r หาได้จากสมการ

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.25)$$

โดยที่ P_t คือ กำลังเฉลี่ยของสัญญาณด้านส่ง (หน่วยวัตต์)
 G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง
 G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ
 λ คือ ความยาวคลื่น
 d คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ (หน่วยเมตร)

ถ้าหากทราบความไวเครื่องรับ P_{min} ระยะทางสูงสุดระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับสามารถ หาได้จากสมการ

$$P_t G_t G_r \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \geq P_{min} \quad (2.26)$$

แก้สมการ 2.26 เพื่อหาค่า d จะได้

$$d \leq \frac{c}{4\pi f} \sqrt{\frac{G_t G_r P_t}{P_{min}}} \quad (2.27)$$

จากสมการ 2.27 จะพบว่า ระยะทางแปรผกผันกับความถี่ของสัญญาณ จากสมการ $P_L = \frac{P_t}{P_r}$ และสมการ 2.25 ความสูญเสียในเส้นทางในแบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างในหน่วยเดซิเบล สามารถหาได้เป็น

$$\begin{aligned} P_L &= -10 \log_{10} \left[G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right] \\ &= -10 \log_{10} G_t - 10 \log_{10} G_r - 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \\ &= -10 \log_{10} G_t - 10 \log_{10} G_r - 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \end{aligned}$$

$$= -10\log_{10}G_t - 10\log_{10}G_r - 20\log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) + 20\log_{10}d \quad (2.28)$$

ถ้ากำหนดให้ $G_t = G_r = 1$ เพื่อความง่ายในการคำนวณ แทนค่า $\lambda = \frac{c}{f}$ และ $c = 3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาทีจะได้

$$\begin{aligned} P_L &= -10\log_{10}(1) - 10\log_{10}(1) - 20\log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) + 20\log_{10}d \\ &= 0 - 0 - 20\log_{10}(3 \times 10^8) + 20\log_{10}(4\pi f) + 20\log_{10}d \\ &= -20\log_{10}(3 \times 10^8) + 20\log_{10}(4\pi) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}d \\ &= -169.54 + 21.98 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}d \\ &= -147.56 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}d \\ &= 20\log_{10}d + 20\log_{10}(f) - 147.56 \end{aligned} \quad (2.29)$$

ถ้าแทน d ในหน่วยกิโลเมตร และ f ในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ลงในสมการ 2.29 จะได้

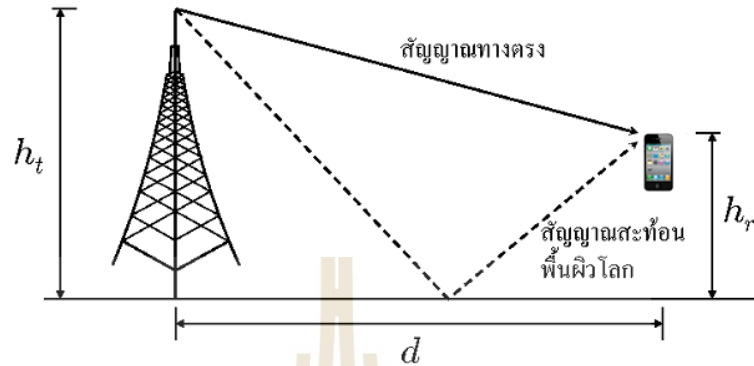
$$\begin{aligned} P_L &= 20\log_{10}(d \times 10^3) + 20\log_{10}(f \times 10^6) - 147.56 \\ &= 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 147.56 + 20\log_{10}10^3 + 20\log_{10}10^6 \\ &= 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44 \end{aligned} \quad (2.30)$$

ข้อดีของแบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ คือ ง่ายต่อการใช้งานสามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบข้อมูลที่ไม่น่าแน่นอนของสภาพแวดล้อม หรือใช้ในการประมาณระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับอย่างคร่าว ๆ

2.2) แบบจำลองการสูญเสียจากการส่งสัญญาณแบบ LoS บนพื้นผิวสะท้อน

ในกรณีที่เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ในภาคพื้นดินสัญญาณจากด้านส่งสามารถสะท้อนกับพื้นผิวโลกก่อนเดินทางมาถึงด้านรับ ดังนั้น สัญญาณที่ด้านรับจะประกอบด้วยสองส่วนคือ สัญญาณที่เดินทางโดยตรงจากด้านส่งมายังด้านรับและสัญญาณที่สะท้อนกับพื้นผิวโลกก่อนจะเดินทางมายังด้านรับดังแสดงในรูปที่ 2.17 แบบจำลองการสูญเสียที่ใช้ในกรณีนี้เรียกว่า แบบจำลอง

การสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว(Ground-reflected path loss model) ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระในกรณีที่เครื่องส่งและเครื่องรับอยู่บนภาคพื้นดิน



รูปที่ 2.17 ลักษณะการเดินทางของสัญญาณทางตรงและสัญญาณสะท้อนจากพื้นผิว

ในกรณีนี้ กำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับมีค่าเป็น

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2.31)$$

โดยที่ h_t คือ ความสูงของสายอากาศด้านส่งจากพื้นดิน (เมตร)

h_r คือ ความสูงของสายอากาศด้านรับจากพื้นดิน (เมตร)

และระยะทาง d จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข คือ

$$d \gg \frac{h_t h_r}{\lambda/4} \quad (2.32)$$

โดยที่สัญลักษณ์ \gg หมายถึง มีค่ามากกว่ามาก ๆ ดังนั้น ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็น

$$P_L = \frac{P_t}{P_r} = \left(G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \right)^{-1} \quad (2.33)$$

หรือ ถ้าให้ L_p , G_t และ G_r อยู่ในหน่วยเดซิเบล จะได้

$$P_L = -G_t - G_r - 20 \log_{10} h_t - 20 \log_{10} h_r + 40 \log_{10} d \quad (2.34)$$

สังเกตว่าในแบบจำลองนี้ไม่มีตัวแปรความถี่ในสมการ นั่น คือ ความสูญเสียในเส้นทางไม่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ

3) แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางนอกแนวเส้นสายตา

สัญญาณที่ด้านรับในสภาพแวดล้อมเกิดจากสัญญาณที่เดินทางนอกแนวเส้นสายตา (NLoS) จากกลไกการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทาง ประกอบด้วย การสะท้อน เลี้ยวเบน และกระจายออก การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายการสูญเสียในเส้นทางของสัญญาณที่เดินทางนอกแนวเส้นสายตา ได้อย่างสมบูรณ์นั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความซับซ้อนของสภาพแวดล้อมที่สัญญาณเดินทาง จากผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะทางเท่ากัน การสูญเสียของสัญญาณที่ด้านรับเปลี่ยนไปตามลักษณะของสภาพแวดล้อม เช่น ที่โล่งกว้างกลางแจ้ง ตัวเมือง ชานเมือง ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งกีดขวาง หรือวัตถุต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป เช่น ขนาด ความสูง และ ปริมาณความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ ยานพาหนะ ในพื้นที่ เป็นต้น แบบจำลองการสูญเสีย สำหรับการสื่อสารนอกแนวเส้นสายตาต้องอาศัยการวัดสัญญาณในสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ อย่างละเอียด แล้วนำข้อมูลนำมาปรับเข้ากับสมการทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองการสูญเสียสำหรับการสื่อสารนอกแนวเส้นสายตามีหลายแบบ แต่แบบที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานที่สุด คือ แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-distance ซึ่งถูกดัดแปลงมาจากแบบจำลองการสูญเสียในช่องว่างอิสระ จากผลทางทฤษฎีและข้อมูลจากการวัด พบว่า กำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับจะลดลงเร็วกว่าค่ายกกำลังสองของระยะทาง ดังนั้น เราสามารถให้ ความสูญเสียในเส้นทางเพิ่มขึ้นเร็วกว่ากำลังสองของระยะทางด้วยการใช้เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง แบบจำลองการสูญเสียแบบ Log-distance หาได้จากการแทนค่า d^2 ด้วย d^α ในสมการ 2.25 และกำหนดให้ $G_t = G_r = 1$ จะได้

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{d^\alpha}, \alpha \geq 2 \quad (2.35)$$

จาก $P_r = \frac{P_t}{P_L}$ จะได้

$$P_L = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^{-2} d^\alpha \quad (2.36)$$

แทนค่า $\lambda = \frac{c}{f}$ และแปลง L_p เป็นเดซิเบล จะได้ความสูญเสียในเส้นทางในหน่วยเดซิเบลมีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 P_L(dB) &= 10\log_{10} \frac{P_t}{P_r} \\
 &= -20\log_{10} \left(\frac{c}{4\pi f} \right) + 10\alpha\log_{10}d \\
 &= -20\log_{10}(3 \times 10^8) + 20\log_{10}(4\pi f) + 10\alpha\log_{10}d \\
 &= -20\log_{10}(3 \times 10^8) + 20\log_{10}(4\pi) + 20\log_{10}f + 10\alpha\log_{10}d \\
 &= -169.54 + 21.98 + 20\log_{10}f + 10\alpha\log_{10}d \\
 &= -147.56 + 20\log_{10}f + 10\alpha\log_{10}d \\
 &= 10\alpha\log_{10}d + 20\log_{10}f - 147.56
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

จากสมการ 2.25 และ 2.37 จะได้

$$P_r = P_t - 20\log_{10}f + 147.56 - 10\alpha\log_{10}d \tag{2.38}$$

โดยที่ P_r และ P_t มีหน่วยเดซิเบลมิลลิวัตต์และเลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง α มีค่าขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมตาม ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง สำหรับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

สภาพแวดล้อม	เลขชี้กำลังการสูญเสียในเส้นทาง (α)
ช่องว่างอิสระ (Free space)	2.0
ภายในอาคารที่มี LOS	1.6 - 1.8
ภายในอาคารที่ไม่มี LOS	4.0 - 6.0
ภายในโรงงาน	2.0 - 3.0
เขตเมือง	2.7 - 3.5
เขตเมืองที่มีการบดบังของตึกสูง	3.0 - 5.0
ชนบท	2.5

แบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง กลางแจ้งมีความแม่นยำ เมื่อพื้นที่ครอบคลุมมีขนาดใหญ่ ในกรณีที่ พื้นที่ครอบคลุมมีขนาดเล็กในระดับหลายสิบเมตร เช่น ภายในอาคารหรือพิโคเซลล์ (Picocell) การสูญเสียของสัญญาณในเส้นทางจะมีความแตกต่างจากสภาพแวดล้อมที่เป็นพื้นที่ กลางแจ้ง ดังนั้นจึงต้องใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ที่สามารถอธิบายสภาพแวดล้อมภายในอาคารและ ตึกสูงได้



บทที่ 3

การออกแบบระบบ

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและพารามิเตอร์ต่างๆของระบบสื่อสารไร้สาย โดยได้นำโปรแกรม Vienna Simulators LTE-A Downlink System Level Simulator Documentation, v2.0 Q3-2018 จาก Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการจำลองระบบการสื่อสารได้หลายรูปแบบ มีพารามิเตอร์ต่างๆที่ครบถ้วนและมีคู่มือการใช้งานให้ศึกษา ซึ่งการจำลองงานนี้จะเริ่มจากไฟล์ใช้งานหลักที่ซึ่งเก็บในโฟลเดอร์ `sim_main_launcher_files`. ซึ่งในโฟลเดอร์นี้จะมีไฟล์ใช้งานต่างๆ ซึ่งการดำเนินการหลักๆจะอยู่ใน `LTE_sim_main.m` ซึ่งเป็นไฟล์การจำลองหลัก จะเรียกงานที่ต้องการและมีรูปของการจำลองหลัก พารามิเตอร์การจำลองจะถูกโหลดผ่าน `LTE_load_parem.m` ซึ่งจะใช้พารามิเตอร์เฉพาะจากหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ติดตั้งในหัวข้อที่ 3.2

3.2 พารามิเตอร์การจำลอง

3.2.1 ตัวเลือกในการแก้ปัญหา

กำหนดค่าว่าจะแสดง output เท่าไร

- 1) 0 : ไม่มี output
- 2) 1 : basic output
- 3) 2 : extended output

3.2.2 ตัวเลือกในการพล็อต

กำหนดจำนวนพล็อตที่ถูกแสดงออกมา

- 1) 0 : ไม่มีการพล็อต
- 2) 1 : แสดงบางพล็อต
- 3) 2 : แสดงทุกพล็อต ซึ่งรวมถึงการแสดงผลการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ผู้ใช้ (UE) ซึ่งอาจทำให้การจำลองช้าลง

- 4) 3 : แสดงพล็อตของการเกิดร่องรอยการจางหายด้วย

3.2.3 พารามิเตอร์ทั่วไป

- 1) LTE_config.frequency. : ความถี่ซึ่งอยู่ในระบบที่ให้บริการ (Hz)
- 2) LTE_config.bandwidth. : แบนด์วิดท์ ค่าที่อนุญาตคือ 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz และ 20 MHz ซึ่งค่าแบนด์วิดท์นี้มีค่าเทียบเท่ากับ 6, 15, 25, 50, 75 และ 100 Resource Block (RBs) ตามลำดับ

- 3) LTE_config.nTx : จำนวนพอร์ทของสายอากาศภาคส่ง
- 4) LTE_config.nRx : จำนวนพอร์ทของสายอากาศภาครับ
- 5) LTE_config.tx_mode : โหมดในการสื่อสาร
 - Single antenna.
 - Transmission Diversity (TxD).
 - Open Loop Spatial Multiplexing (OLSM). Spatial multiplexing with Large
 - Cyclic Delay Diversity (CDD).
 - Closed Loop Spatial Multiplexing (CLSM).
 - Multiuser MIMO.
 - Rank-1 CLSM
 - Beamforming
 - Eight Layer Spatial Multiplexing

3.2.4 ตัวเลือกการสร้างหมายเลขสุ่ม

- 1) LTE_config.seedRandStream : สามารถสุ่มค่าเริ่มต้นของ Matlab ได้โดยตั้งค่าเป็นจริงหรือเท็จ
- 2) LTE_config.RandStreamSeed : หากการตั้งค่าเป็นจริง จะต้องเป็นจำนวนเต็มระหว่าง 0 และ 2^{32}

3.2.5 เวลาในการจำลอง

LTE_config.simulation_time_tti : ความยาวในการจำลองในช่วงเวลาสัญญาณ

3.2.6 ตัวเลือกแคช

- 1) LTE_config.cache_network : ไม่ว่าจะต้องการบันทึก eNodeB ที่สร้างขึ้น Pathloss map และ shadow fading อาจจะเป็นจริงหรือเท็จก็ได้ ตัวเลือกแคชทั้งหมดทำงานด้วยวิธีดังต่อไปนี้
 - cache = จริง และมีไฟล์อยู่ : อ่านไฟล์แคช
 - cache = จริง และไม่มีไฟล์ : สร้างและเก็บข้อมูลในไฟล์แคช
 - cache = เท็จ : ห้ามใช้แคช

2) LTE_config.network_cache : ชื่อของไฟล์แคชตั้งเป็นอัตโนมัติ หากต้องการให้เครื่องมือจำลองกำหนดชื่ออัตโนมัติ

3) LTE_config.delete_ff_trace_at_end : เนื่องจากร่องรอยการจางหายจะใช้พื้นที่จำนวนมากเมื่อทำการสั่งคำสั่งบันทึกสุดท้าย จะเป็นผลที่ดีกว่าที่จะลบเพื่อไม่ให้ไฟล์ผลลัพธ์ที่ใหญ่เกินไป

4) LTE_config.delete_pathloss_at_end : ลดปริมาณพื้นที่เพิ่มเติมที่จำเป็นในการจัดเก็บร่องรอยการลบแผนที่ path loss จากไฟล์ผลลัพธ์

5) LTE_config.UE_cache : จะบันทึกตำแหน่งของผู้ใช้ไปยังไฟล์หรือไม่ อาจเป็นจริงหรือเท็จก็ได้

6) LTE_config.UE_cache_file : ชื่อของไฟล์แคชตั้งเป็นอัตโนมัติ หากต้องการให้เครื่องมือจำลองกำหนดชื่ออัตโนมัติ

3.2.7 โครงร่างของเครือข่ายและพารามิเตอร์การสูญเสีย

พารามิเตอร์เหล่านี้ระบุวิธีสร้าง โครงร่างเครือข่าย หากโหลดแผนที่พารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นถูกเขียนทับโดยแผนที่ที่โหลด

1) สร้างพารามิเตอร์เครือข่าย

LTE_config.network_geometry :

*regular_hexagonal_grid : กริดหกเหลี่ยมและระยะทางระหว่าง eNodeB คงที่

*stochastic : กระจายด้วยความหนาแน่นเชิงพื้นที่

*hybrid : การกระจายเชิงพื้นที่แบบไฮบริดพร้อมส่วนที่กำหนดขึ้นและสุ่ม

*predefined : ตำแหน่งของ eNodeB ตามที่กำหนดใน LTE_config.eNodeB_positions

- LTE_config.map.resolution : ความละเอียดที่ใช้สำหรับการสร้างผู้ใช้เริ่มต้นในหน่วยเมตร/พิกเซล

- LTE_config.nr_eNodeB_rings : จำนวนวงแหวน eNodeB

- LTE_config.minimum_coupling_loss (optional) : อธิบายการสูญเสียสัญญาณขั้นต่ำ [dB] ระหว่างสถานีฐานกับ UE หรือ UE และ UE ในกรณีที่แย่ที่สุดและถูกกำหนดให้เป็นการสูญเสียระยะทางขั้นต่ำรวมถึงการวัดอัตราขยายสายอากาศระหว่างชั้นต่อสายอากาศ ค่าที่แนะนำคือ 70 dB สำหรับพื้นที่ในเมืองและ 80 dB สำหรับในชนบท

- LTE_config.macroscopic_pathloss_model : กำหนดการใช้แบบจำลอง macroscopic pathloss

* free space : การสูญเสียในพื้นที่ว่าง

* cost231 : แบบจำลองการสูญเสีย cost231

- urban micro : microcell LOS and NLOS pathloss ขึ้นอยู่กับ the COST23 Walfish-Ikegami model คู่มือใน TR25.996 และ COST 231 book

- urban macro : urban macrocell pathloss ขึ้นอยู่กับ COST231 ซึ่งถูกขยายจาก Hata model คู่มือใน 3GPP TR25.996 และ COST 231 book

- suburban macro : suburban macrocell pathloss ขึ้นอยู่กับ COST231 ซึ่งถูกขยายจาก Hata model คู่มือใน 3GPP TR25.996 และ COST 231 book

* TS36942 :

- urban : $L = 40(1 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot D_{hb}) \cdot \log_{10}(R) - 18\log_{10}(D_{hb}) + 21\log_{10}(f) + 80 \text{ dB}$ โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้ ในหน่วย กิโลเมตร , f คือ ความถี่พาหะ ในหน่วย MHz และ D_{hb} คือ ความสูงของสถานีฐาน ในหน่วย เมตร

- suburban : $L = 69.55 + 26.16 \cdot \log_{10}(f) - 13.82 \cdot \log_{10}(H_b) + [44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(H_b)] \cdot \log_{10}(R) - 4.78[\log_{10}(f)]^2 + 18.33 \cdot \log_{10}(f) - 40.94$ โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้ ในหน่วย กิโลเมตร , f คือความถี่พาหะ ในหน่วย MHz และ D_{hb} คือ ความสูงของสถานีฐาน ในหน่วย เมตร

* TS25814 : $L = I + 37.6 \cdot \log_{10}(R)$ โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้ ในหน่วย กิโลเมตร , $I = 128.1$ เมื่อใช้ความถี่พาหะ 2 GHz และ $I = 120.9$ สำหรับ 900 MHz

* TR36873 :

- 3D-Uma : Urban Macro cell ที่มีความหนาแน่นของผู้ใช้สูง

- 3D-Umi : Urban Micro cell ที่มีความหนาแน่นของผู้ใช้สูง

* TR38901 :

- mmw-Uma : Urban Macro cell ที่มีความหนาแน่นของผู้ใช้สูง

- mmw-Umi : Urban Micro cell

- mmw-RMa : Rural Macro cell

- mmw-Indoor-OpenOffice, mmw-Indoor-Office, mmw-Indoor-

MixedOffice :

* TR38900 :

- mmw-Indoor-ShoppingMall

- LTE_config.eNodeB_Tx_power : กำลังส่งสูงสุดของ eNodeB ในหน่วย วัตต์

* 43 dBm สำหรับ 1.25 MHz และ 5 MHz carrier

* 46/49 dBm สำหรับ 10 MHz และ 20 MHz carrier

- สำหรับ 3D channel model
 - * 3D-UMa : 46/49 dBm สำหรับ 10 MHz และ 20 MHz carrier
 - * 3D-UMi : 41/44 dBm สำหรับ 10 MHz และ 20 MHz carrier
- สำหรับ mmWave channel model
 - * UMa : 49/35 dBm สำหรับ 20 MHz และ 100 MHz
 - * UMi – Street Canyon : 44/35 dBm สำหรับ 20 MHz และ 100 MHz
 - * InH – Office : 24 dBm สำหรับทุกความถี่

3.2.8 Shadow Fading (สำหรับเครือข่ายที่สร้างขึ้นเท่านั้น)

- 1) LTE_config.shadow_fading_type :
 - claussen : สร้างแผนที่เงาแบบเลือนรางที่สัมพันธ์กับพื้นที่ 2 มิติแบบกระจาย
 - claussen_3D_Uma : สร้างแผนที่เงาที่มีความสัมพันธ์ในพื้นที่ 2 มิติ สำหรับ urban macro cell
 - claussen_3D_Umi : สร้างแผนที่เงาที่มีความสัมพันธ์ในพื้นที่ 2 มิติ สำหรับ urban micro cell
 - none : ไม่มีแผนที่เงา
- 2) LTE_config.shadow_fading_map_resolution : ความละเอียดของแผนที่การสูญเสียการจางหายของสัญญาณ (เมตร/พิกเซล)
- 3) LTE_config.shadow_fading_n_neighbors : ระบุจำนวนเพื่อนบ้านที่อัลกอริทึมคำนึงถึง
- 4) LTE_config.shadow_fading_mean : ค่าเฉลี่ยของการแจกแจง
- 5) LTE_config.shadow_fading_sd : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ
- 6) LTE_config.shadow_fading_sd_LOS : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ สำหรับ LOS ใช้เฉพาะ 3GPP 3D channel model
- 7) LTE_config.shadow_fading_sd_NLOS : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ สำหรับ NLOS ใช้เฉพาะ 3GPP 3D channel model
- 8) LTE_config.shadow_fading_sd_OTOI : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ สำหรับ outdoor-to-indoor ใช้เฉพาะ 3GPP 3D channel model

3.2.9 Small-scale Fading

- 1) LTE_config.channel_model.type : PDP ที่ใช้สำหรับสร้างช่องสัญญาณ
- 2) LTE_config.channel_model.trace_length : ความยาวของช่องทางในหน่วยวินาที

3) LTE_config.channel_model.correlated_fading : เปิดใช้งาน หรือ ปิดใช้งาน ความสัมพันธ์ของเวลาของสัญญาณ

4) LTE_config.pregenerator_ff_file : ตำแหน่งบันทึกการติดตามของช่องสัญญาณ

3.2.10 การตั้งค่าผู้ใช้

1) LTE_config.UE.receiver_noise_figure : เสียงสัญญาณที่รับได้ในหน่วย เดซิเบล (dB) ตั้งค่าไว้ที่ 9 เดซิเบล

2) LTE_config.UE.thermal_noise_density : ความหนาแน่นของเสียงรบกวนในหน่วย dBm/Hz

3) LTE_config.UE_distribution : วิธีสร้าง UE จากส่วนที่น่าสนใจ

4) LTE_config.min_UE_eNodeB_distance : ระยะทางขั้นต่ำจาก UE ถึง eNodeB กำหนดไว้สำหรับแบบช่อง 3D เท่านั้น

5) LTE_config.UE_speed : ความเร็วที่ UEs เคลื่อนที่ ในหน่วย เมตร/วินาที

6) LTE_config.UE_antenna_polarization : การโพลาไรซ์ของสายอากาศที่ UE ซึ่งแบบเป็น 2 แบบ

- ULA : linear polarization

- XPOL : cross polarization

7) LTE_config.UE_antenna_slant_angle : มุมในการโพลาไรซ์

- ULA : มุมเอียงเป็น 0°

- XPOL : มุมเอียงเป็น 90°

3.2.11 การตั้งค่า eNodeB

1) LTE_config.antenna_gain_pattern : รูปแบบอัตรายายของสายอากาศ

- berger : $A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{70^\circ}\right)^2, 20\text{ dB}\right], -180 \leq \theta \leq 180$

- TS 36.942 : $A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{65^\circ}\right)^2, 20\text{ dB}\right], -180 \leq \theta \leq 180$

- omnidirectional : $A(\theta) = 0$

- six-sector : $A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{35^\circ}\right)^2, 23\text{ dB}\right], -180 \leq \theta \leq 180$

- TS 36.873 3D antenna :

* LTE_config.antenna.antenna_polarization : โหมดโพลาไรซ์สามารถใช้ได้ 2 แบบ

- COPOL : Linear polarization

- XPOL : Cross polarization

* LTE_config.antenna.slant_angle : มุมเอียงในหน่วย ($^\circ$)

- COPOL : มุมเอียง 0°

-XOPOL : มุมเอียง +/- 45°

* LTE_config.nr_of_antenna_element_in_each_column : ค่าจำนวนสายอากาศในแนวตั้ง ซึ่ง
ไม่มีการจำกัดของขนาดสายอากาศในทิศทางแนวตั้ง

* LTE_config.antenna_element_vertical_spacing : ระยะห่างของสายอากาศในแนวตั้ง โดย
พื้นฐานจะมีค่า 0.5λ และ 0.8λ

* LTE_config.antenna_element_horizontal_spacing : ระยะห่างของสายอากาศในแนวนอน
โดยพื้นฐานจะมีค่า 0.5λ

* LTE_config.electrical_downtilt : มุมเอียงไฟฟ้าในหน่วย (°) การวางแนวมุมถูกกำหนดไว้
ระหว่าง 0° และ 180° โดยที่มุม 90° จะตั้งฉากกับแนวลำดับ

* LTE_config.mechanical_downtilt : มุมเอียงทางกลในหน่วย (°)

2) LTE_config.max_antenna_gain : อัตราขยายของสายอากาศในหน่วย dB

3.2.12 การตั้งค่าการจัดตารางเวลา

1) LTE_config.scheduler : ประเภทของการกำหนดการที่จะใช้

- round robin : กำหนดทรัพยากรทางกายภาพให้กับ UE อย่างเท่าเทียมกันทั้งหมด

- best cqi : แต่ละทรัพยากรทางกายภาพถูกกำหนดให้กับ UE ด้วยเงื่อนไข

ช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

- prop fair Sun : การกำหนดการยุติธรรมตามสัดส่วน

3.2.13 การตั้งค่า Uplink channel

1) LTE_config.feedback_channel_delay : ความล่าช้าของอ์ฟลิงค์ใน TTIs เมื่อตั้ง
ค่า TTIs เป็น 0 รายงาน ACK มีความล่าช้าขั้นต่ำ 1 TTIs

2) LTE_config.unquantized_CQI_feedback : เมื่อตั้งค่าเป็นจริง CQI ที่ส่งจะไม่ถูก
ปิดเศษ ค่าเริ่มต้นโหมดเป็นเท็จ (CQI เป็นค่าจำนวนเต็ม)

3.2.14 การบันทึกผลลัพธ์

- LTE_config.results_folder : โฟลเดอร์ที่จะบันทึกผล

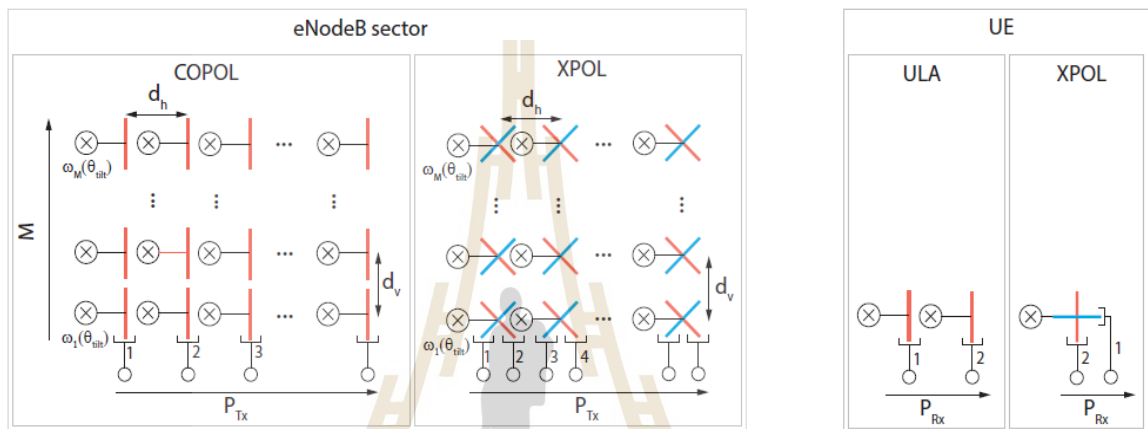
- LTE_config.results_files : ชื่อไฟล์ผลลัพธ์

3.3 การกำหนดค่าสายอากาศเรียงลำดับแบบ 2 มิติ

- LTE_config.antenna.antenna_polarization : โพลาริซั่มโหมด ประกอบด้วย COPOL และ
XPOL

- LTE_config.antenna.slanr_angle : มุมโพลาริซั่ม ในกรณีที่ใช้ COPOL มุมจะมีค่า 0° และ
ในกรณีที่ใช้ XPOL มุมจะมีค่า 45°

- LTE_config.antenna_element_vertical_spacing : ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวตั้ง
- LTE_config.antenna_element_horizontal_spacing : ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวนอน
- LTE_config.nr_of_antenna_element_in_each_column : จำนวนสายอากาศในแนวตั้ง ซึ่งตัวเลขจำนวนสายอากาศในแนวตั้งไม่จำกัด
- LTE_config.electrical_downlit : มุมเอียงทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 การกำหนดค่าสายอากาศและโพลาไรซ์โหมดที่ eNodeB และ ผู้ใช้งาน [30]

การจัดเรียงของสายอากาศแถวลำดับแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่ง d_v หมายถึง ระยะห่างของสายอากาศในแนวตั้ง d_h คือ ระยะห่างของสายอากาศในแนวนอน พารามิเตอร์ P_{Tx} คือ สายอากาศภาคส่งและ พารามิเตอร์ P_{Rx} คือ สายอากาศภาคส่ง M คือ จำนวนของสายอากาศในทิศทางแนวตั้ง ในรูปที่ 3.1 นั้นจะแบ่งเป็นการกำหนดค่าสายอากาศและโพลาไรซ์โหมดที่ eNodeB และผู้ใช้งาน ซึ่งในส่วนของ eNodeB นั้นจะแบ่งโหมดในการโพลาไรซ์เป็น 2 แบบ คือ COPOL(Linear polarization) และ XPOL(Cross polarization) ซึ่งโหมดการโพลาไรซ์แบบ COPOL จะทำมุม 0° และโหมดการโพลาไรซ์แบบ XPOL จะทำมุม 45°

3.4 รูปแบบการแผ่กระจายของสายอากาศ

งานวิจัยนี้จะมีการปรับค่าของอัตราขยายของสายอากาศเพื่อที่จะวิเคราะห์ห้ระบบการจำลองว่ามีผลเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ซึ่งการปรับค่าอัตราขยายของสายอากาศในแนวตั้งคือ

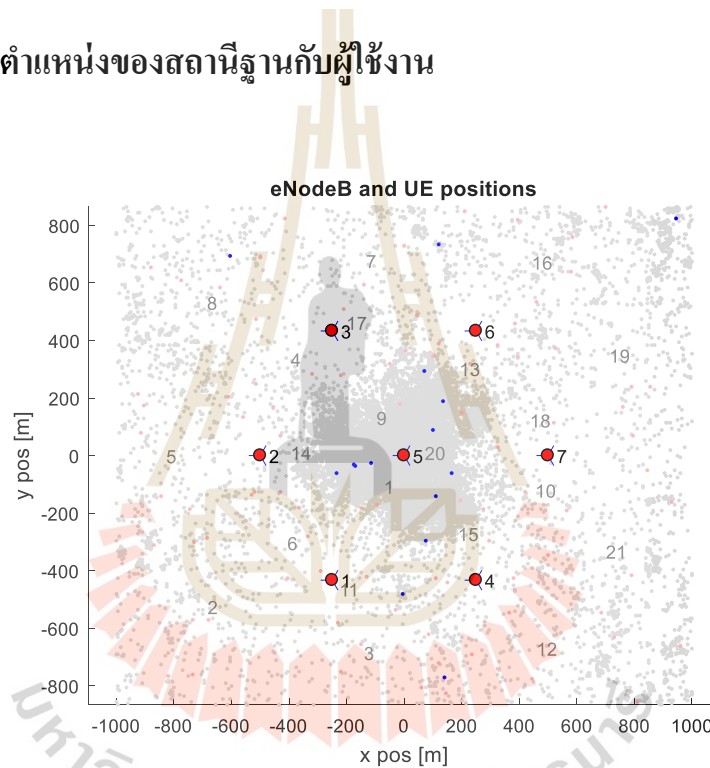
$$A_{E,V}(\theta'') = -\min\left[12\left(\frac{\theta''-90^\circ}{\theta_{dB}}\right)^2\right] \quad (3.1)$$

และการปรับค่าอัตราขยายของสายอากาศในแนวนอนคือ

$$A_{E,H}(\varphi'') = -\min\left[12\left(\frac{\varphi''}{\varphi_{adB}}\right)^2\right] \quad (3.2)$$

ในส่วนของอัตราขยายของสายอากาศในแนวตั้ง θ'' คือ มุมเซต้าและ θ_{adB} คือองศาของพูในแนวตั้ง และในส่วนของอัตราขยายของสายอากาศในแนวนอน φ'' คือ มุมฟีและ φ_{adB} คือองศาของพูในแนวนอน ซึ่ง θ_{adB} และ φ_{adB} คือพารามิเตอร์ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) ในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ

3.5 แผนที่ตำแหน่งของสถานีฐานกับผู้ใช้งาน



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของ eNodeB และ UE[30]

จากรูปที่ 3.2 จะแสดงตำแหน่งของ eNodeB และ ผู้ใช้งาน จุดสีแดงจะหมายถึงตำแหน่งของ eNodeB ซึ่งระยะห่างของแต่ละ eNodeB จะอยู่ที่ 500 เมตร และจุดสีน้ำเงินคือตำแหน่งของผู้ใช้งาน

บทที่ 4

การจำลองระบบ

4.1 บทนำ

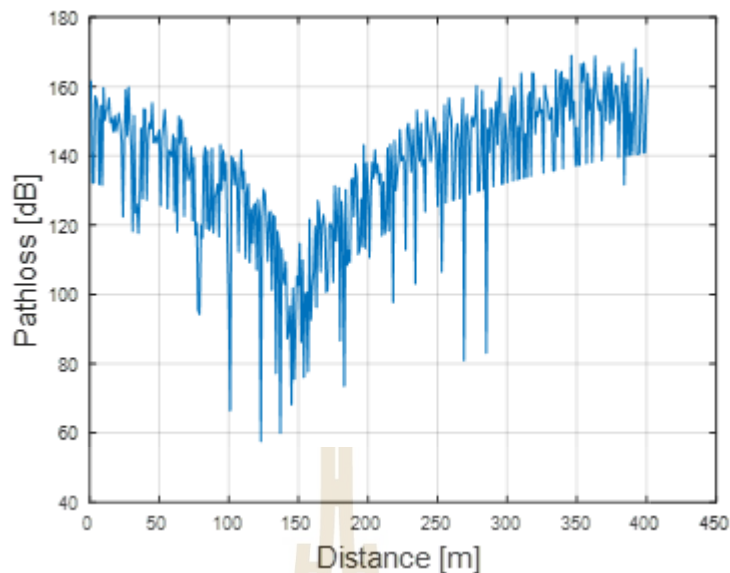
บทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการจำลองระบบสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 และยุคที่ 5 ซึ่งในการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 นั้นจะทำการจำลองระบบโดยการเพิ่มความถี่ เพิ่มจำนวนสายอากาศภาคส่งและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง และทำการนำสายอากาศที่ออกแบบไว้มาปรับใช้ในการจำลองเพื่อทดสอบและวิเคราะห์ผลที่มีต่อระบบการสื่อสารไร้สายนี้

4.2 การจำลองระบบ 4G

การจำลองระบบ 4G ในส่วนนี้นั้นจะจำลองเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์กับระบบ 5G ในส่วนถัดไปว่าส่วนแตกต่างและเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

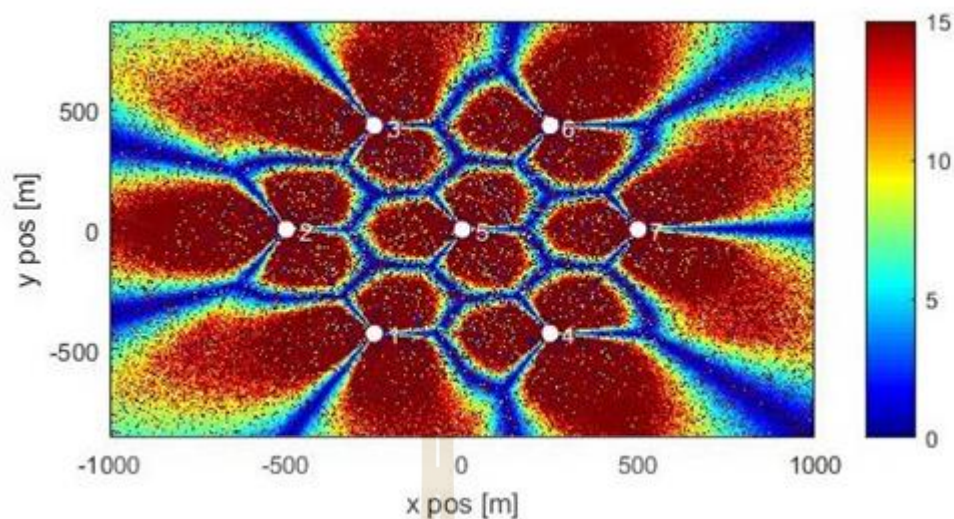
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 4G

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่	2.1 GHz
แบนด์วิธ	10 MHz
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวตั้ง	0.5λ
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวนอน	0.5λ
โหมดในการส่ง	Spatial Multiplexing
จำนวนสายอากาศภาคส่ง	8 ต้น
จำนวนสายอากาศภาครับ	2 ต้น
กำลังในการส่ง	40 วัตต์
อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง	7 dBi



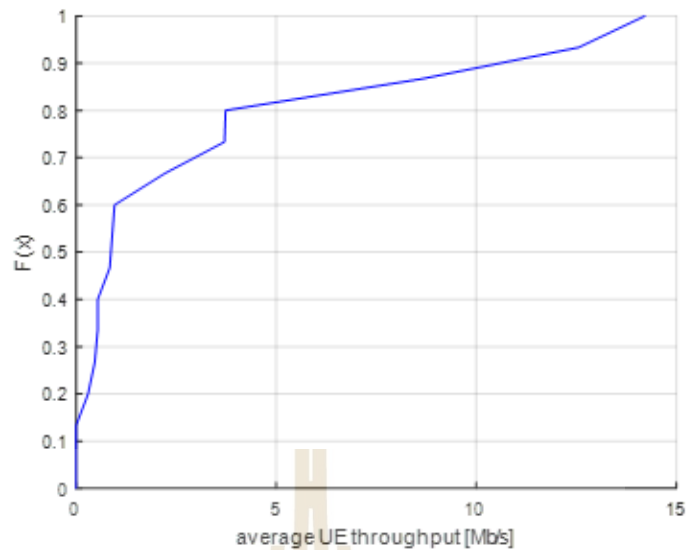
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทางที่ความถี่ 2.1 GHz

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ซึ่งแกนในแนวดิ่งจะเป็นค่าการสูญเสียตามเส้นทางมีหน่วยเป็น dB และแกนในแนวนอนเป็นระยะทางมีหน่วยเป็น เมตร ซึ่งกราฟนี้เป็นกราฟแสดงผลการจำลองระบบที่ความถี่ 2.1 GHz จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียตามเส้นทางที่ระยะทางประมาณ 150 เมตร จะอยู่ในช่วง 80-100 dB และค่าการสูญเสียตามเส้นทางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าการสูญเสียตามเส้นทางในช่วง 140-160 dB ที่ระยะทาง 400 เมตร ที่ระยะทางที่ 150 เมตรนั้นเป็นจุดที่มีค่าการสูญเสียตามเส้นทางต่ำที่สุดเนื่องจากเป็นจุดที่พบสถานีฐานอื่น จึงทำให้ระยะทางตั้งแต่ 150 เมตรถึง 400 เมตรนั้นมีค่าการสูญเสียตามเส้นทางเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ห่างออกจากสถานีฐาน



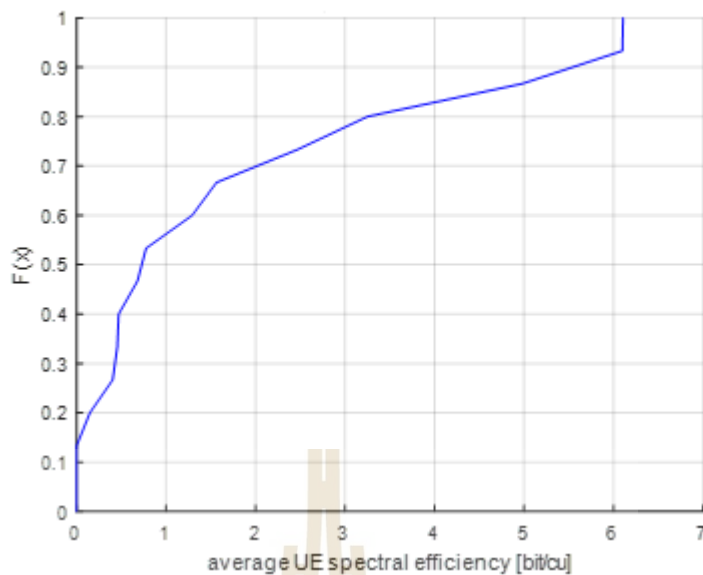
รูปที่ 4.2 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 2.1 GHz

จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่า SINR โดยจุดสีและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณ โดยที่จุดสีขาวคือสถานีฐาน ซึ่งมีทั้งหมด 7 สถานีและระยะห่างแต่ละสถานีอยู่ที่ 500 เมตร ซึ่งจุดสีที่มีสีแดงเข้มจะมีค่า SINR ที่มากและจุดสีที่อยู่ในจุดสีฟ้าจนถึงน้ำเงินเข้มก็จะมีค่าน้อยลงตามลำดับของความเข้มจุดสี



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย throughput ในหน่วย เมกกะบิตต่อวินาทีพิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz จะอยู่ที่ 12.97 เมกกะบิตต่อวินาที ซึ่งการใช้ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 นั้นเป็นช่วงค่าประมาณที่ได้ทำการคำนวณจากการใช้สูตรของ Greenwood [35][36] ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ในหน่วย บิตต่อซียู พิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz จะอยู่ที่ 6.1 บิตต่อซียู

ในหัวข้อที่ 4.2 นี้จะเป็นการจำลองระบบสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 ซึ่งประสิทธิภาพต่างๆ ข้างต้นนั้นจะเป็นค่าที่เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับ การจำลองในขั้นตอนต่อไป

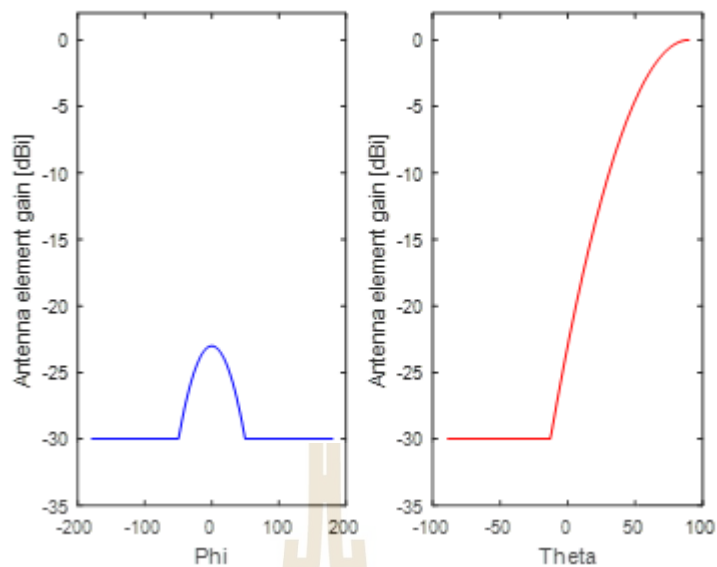
4.3 การจำลองระบบ 5G

4.3.1 ความถี่ 28 GHz 8x2 MIMO

การจำลองระบบในหัวข้อที่ 4.3.1 นี้ จะเป็นการจำลองระบบที่เพิ่มความถี่จาก 2.1 GHz ที่อยู่ในส่วนของหัวข้อที่ 4.2 เป็น 28 GHz โดยใช้สายอากาศภาคส่ง 8 ต้นและสายอากาศภาครับ 2 ต้น เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของระบบการสื่อสารไร้สายที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนความถี่ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ที่ความถี่ 28 GHz 8x2 MIMO

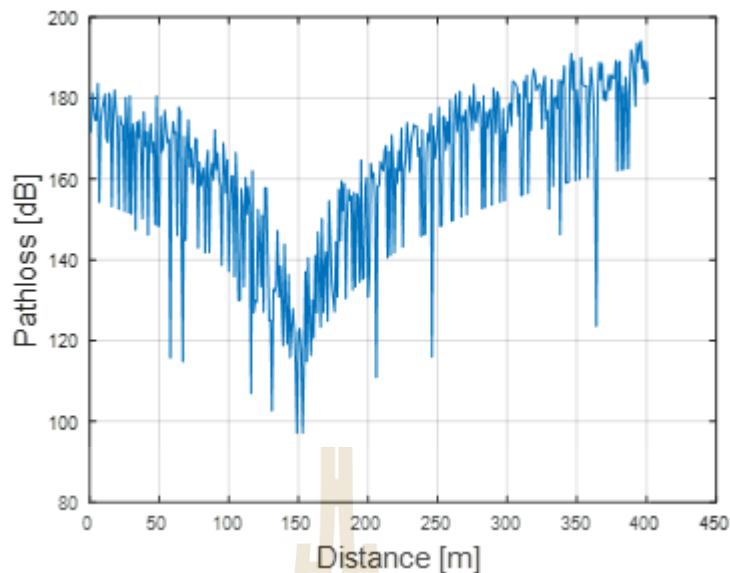
พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่	28 GHz
แบนด์วิธ	10 MHz
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวตั้ง	0.5 λ
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวนอน	0.5 λ
โหมดในการส่ง	Spatial Multiplexing
จำนวนสายอากาศภาคส่ง	8 ต้น
จำนวนสายอากาศภาครับ	2 ต้น
กำลังในการส่ง	40 วัตต์
อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง	7 dBi



รูปที่ 4.5 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

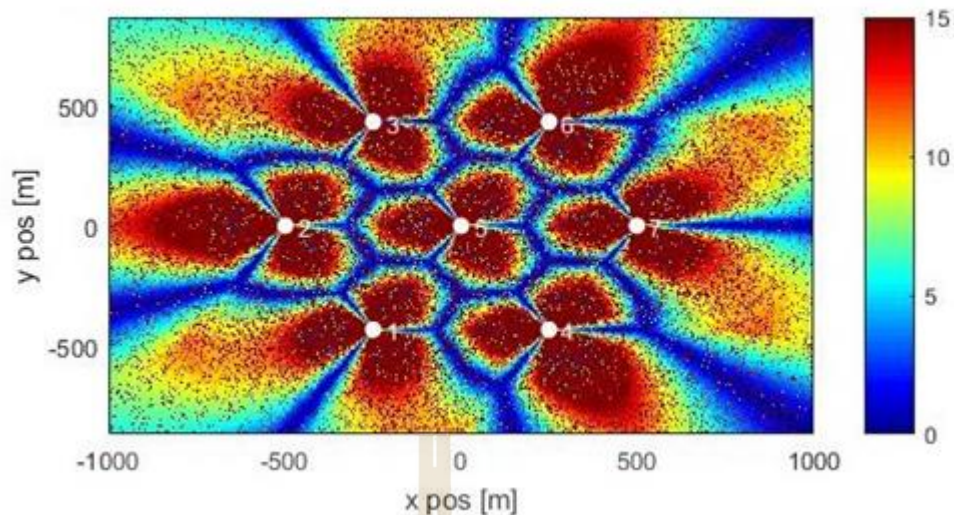
จากรูปที่ 4.5 ข้างต้นนี้เป็นภาพรูปแบบการแผ่กระจายของสายอากาศทั้งแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งจากรูปข้างต้นเป็นรูปแบบการแผ่กระจายของสายอากาศที่ทาง Vienna Simulators ได้ตั้งค่าไว้ ซึ่งมี อัตราขยายของสายอากาศอยู่ที่ 7 dBi





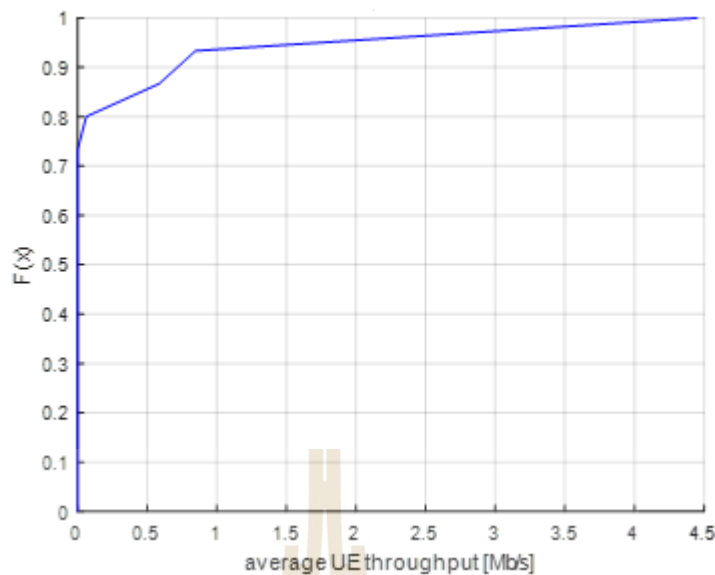
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทางที่ความถี่ 28 GHz

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ซึ่งกราฟนี้เป็นกราฟแสดงผลการจำลองระบบที่ 28 GHz ค่าการสูญเสียตามเส้นทางที่ระยะประมาณ 150 เมตร จะอยู่ในช่วง 100-120 dB ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 เป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทางที่ 2.1 GHz ที่ระยะประมาณ 150 เมตร จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียตามเส้นทางที่ความถี่ 28 GHz จะมีค่ามากกว่าความถี่ 2.1 GHz เนื่องจากความถี่ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียตามเส้นทางนั้นสูงขึ้นเช่นกัน



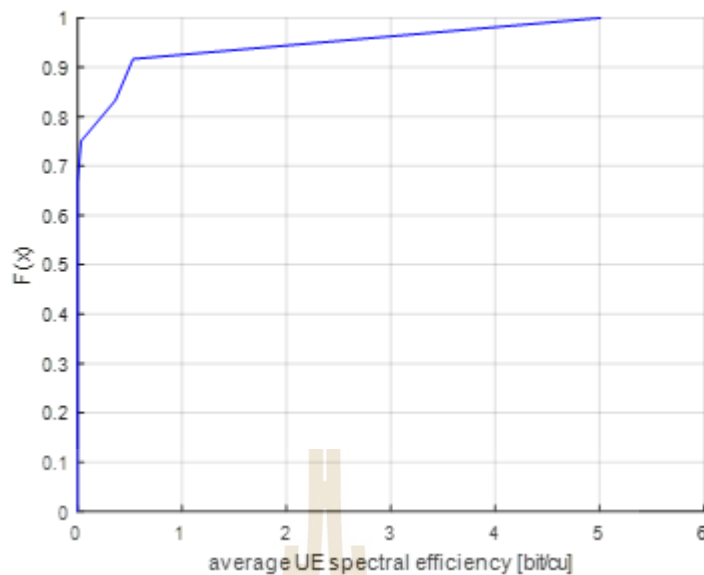
รูปที่ 4.7 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz

จากรูปที่ 4.7 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่า SINR โดยเฉลี่ยและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณ ที่ความถี่ 28 GHz เมื่อทำไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นรูปภาพการแสดงการเปรียบเทียบค่า SINR ที่ความถี่ 2.1 GHz จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.7 มีเฉลี่ยที่อ่อนกว่าและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณนั้นน้อยกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียตามเส้นทางเนื่องจากความถี่ที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย throughput ในหน่วย เมกกะบิตต่อวินาทีพิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz จะอยู่ที่ 1.75 เมกกะบิตต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz จะเห็นได้ว่ามีค่าเฉลี่ย throughput ที่น้อยกว่า เนื่องจากความถี่ที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียตามเส้นทางมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz มีค่าน้อยกว่าผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ในหน่วย บิตต่อซียู พิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz จะอยู่ที่ 2.32 บิตต่อซียู

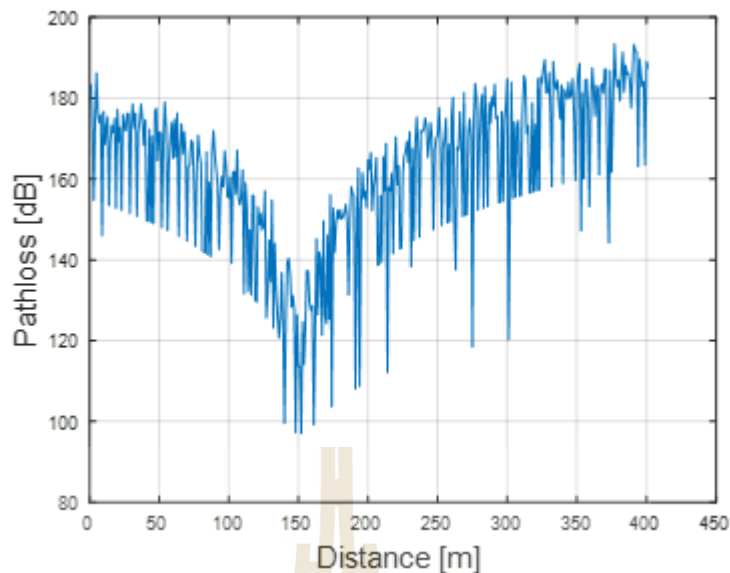
ในหัวข้อที่ 4.3.1 นี้ เป็นการจำลองระบบสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนความถี่ จากเดิม 2.1 GHz เป็น 28 GHz ซึ่งผลการจำลองข้างต้นนี้พบว่า ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 ในหัวข้อที่ 4.3.1 นี้ มีประสิทธิภาพที่ลดลง เนื่องจากการใช้ความถี่ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการสูญเสียตามเส้นทางนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

4.3.2 ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO

ในหัวข้อที่ 4.3.2 นี้ เป็นการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายที่ความถี่ 28 GHz โดยในหัวข้อนี้ จะทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศส่งจากเดิม 8 ต้น เป็น 128 ต้น เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของระบบ การสื่อสารไร้สายเมื่อทำการเพิ่มจำนวนสายอากาศส่ง

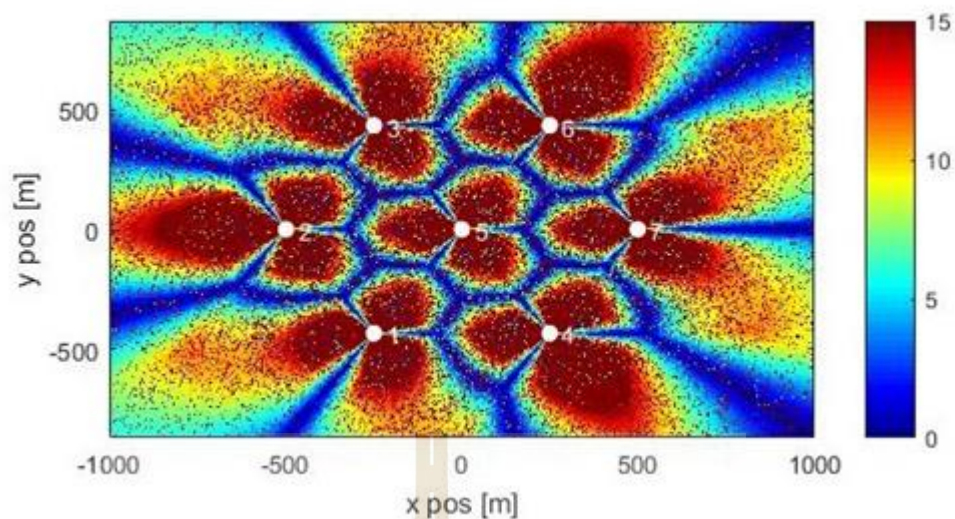
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่	28 GHz
แบนด์วิธ	10 MHz
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวตั้ง	0.5λ
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวนอน	0.5λ
โหมดในการส่ง	Spatial Multiplexing
จำนวนสายอากาศส่ง	128 ต้น
จำนวนสายอากาศรับ	2 ต้น
กำลังในการส่ง	40 วัตต์
อัตราขยายของสายอากาศส่ง	7 dBi



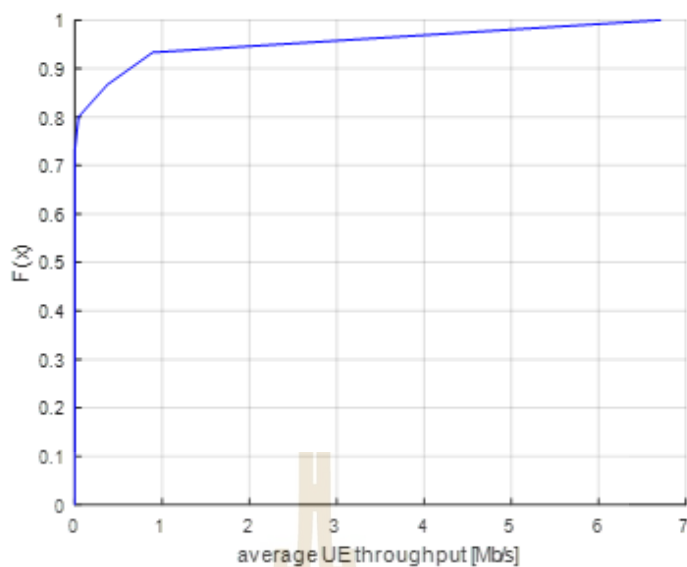
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทางที่
ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO

จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ซึ่งกราฟนี้เป็นกราฟแสดงผลการจำลองระบบที่ 28 GHz โดยเพิ่มจำนวนของสายอากาศภาคส่งจากเดิม 8 ต้น เป็น 128 ต้น จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียตามเส้นทางที่ระยะประมาณ 150 เมตร จะอยู่ในช่วง 100-120 dB ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับรูปที่ ซึ่งเป็นรูปที่มีความถี่ 28 GHz เช่นเดียวกันแต่เพิ่มจำนวนของสายอากาศเพิ่มขึ้นจาก 8 ต้นเป็น 128 ต้น จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียตามเส้นทางนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก จะอยู่ในช่วง 100-120 dB



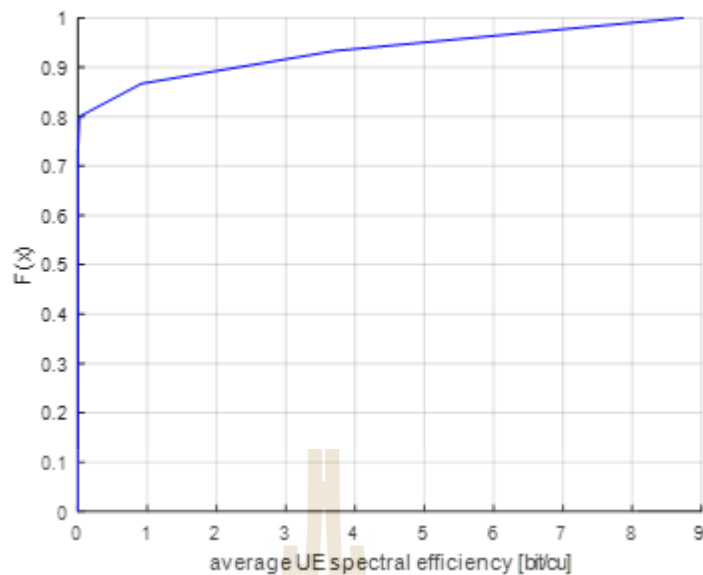
รูปที่ 4.11 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO

จากรูปที่ 4.11 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่า SINR โดยเจดสีและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณ ที่ความถี่ 28 GHz สายอากาศภาคส่ง 128 ต้นและสายอากาศภาครับ 2 ต้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นเป็นรูปที่มีความถี่เดียวกันคือ 28 GHz แต่รูปที่ 4.11 เพิ่มจำนวนสายอากาศภาคส่งจาก 8 ต้น เป็น 128 ต้น จะเห็นได้ว่าเจดสีและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณนั้นไม่เปลี่ยนแปลงจากรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย throughput ในหน่วย เมกกะบิตต่อวินาทีพิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO จะอยู่ที่ 2.35 เมกกะบิตต่อวินาที



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO

จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ในหน่วย บิตต่อซียู พิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO จะอยู่ที่ 4.96 บิตต่อซียู

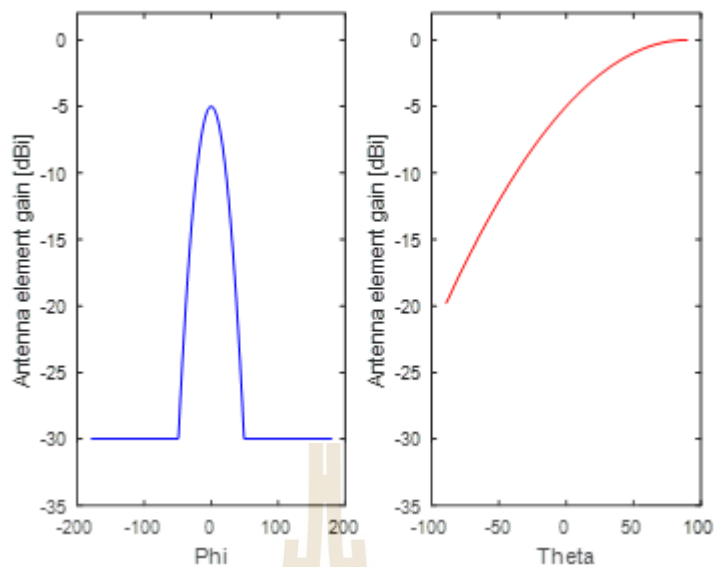
4.3.3 ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายที่ได้ทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศส่งจากเดิม 7 dBi เพิ่มเป็น 25 dBi

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi

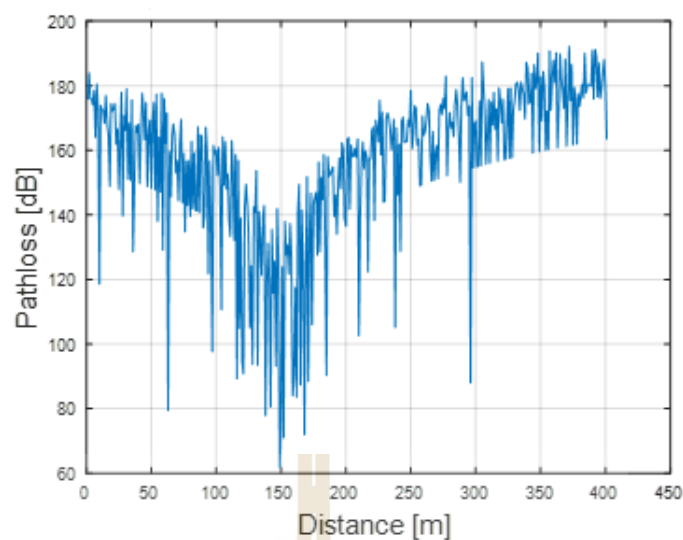
พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่	28 GHz
แบนด์วิธ	10 MHz
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวตั้ง	0.5λ
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวนอน	0.5λ
โหมดในการส่ง	Spatial Multiplexing
จำนวนสายอากาศส่ง	128 ต้น
จำนวนสายอากาศรับ	2 ต้น
กำลังในการส่ง	40 วัตต์
อัตราขยายของสายอากาศส่ง	25 dBi





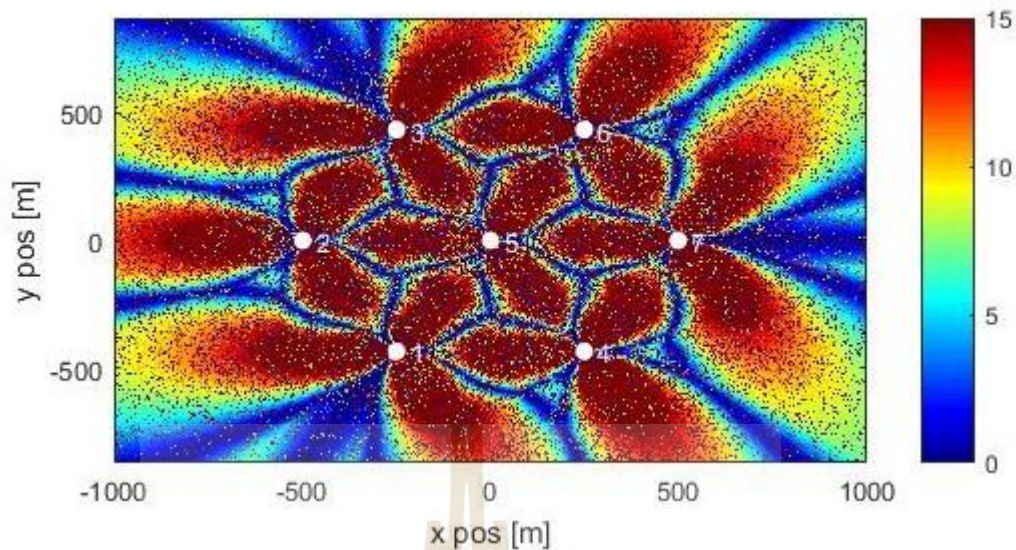
รูปที่ 4.14 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

จากรูปที่ 4.14 เป็นภาพแสดงรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งในหัวข้อที่ 4.2.3 นี้ได้ทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจากเดิม 7 dBi เปลี่ยนเป็น 25 dBi เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในส่วนอื่นต่อไป



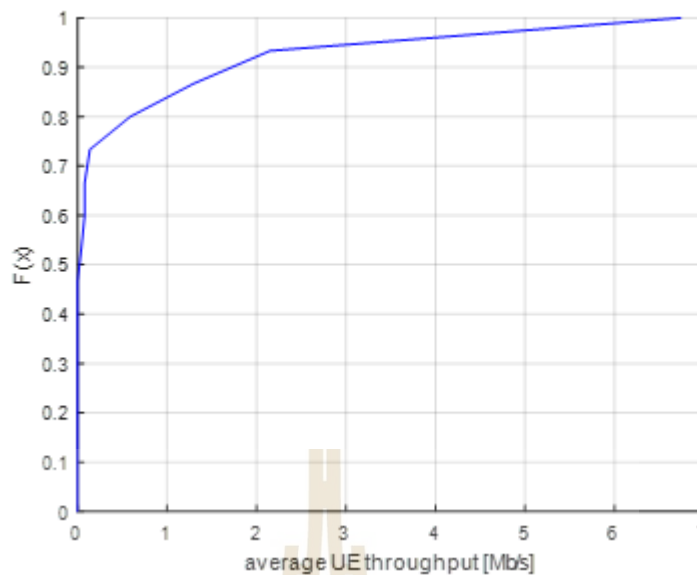
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทางที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ซึ่งกราฟนี้เป็นกราฟแสดงผลการจำลองระบบที่ 28 GHz สายอากาศภาคส่ง 128 ต้น สายอากาศภาครับ 2 ต้นและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจาก 7 dBi เป็น 25 dBi จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียตามเส้นทางที่ระยะประมาณ 150 เมตร จะอยู่ในช่วง 60-100 dB ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นรูปของการจำลองระบบ 4G จะเห็นได้ว่าค่าของการเพิ่มอัตราขยายเป็น 25 dBi มีค่าการสูญเสียตามเส้นทางเทียบเท่าและน้อยกว่าการจำลองของระบบ 4G



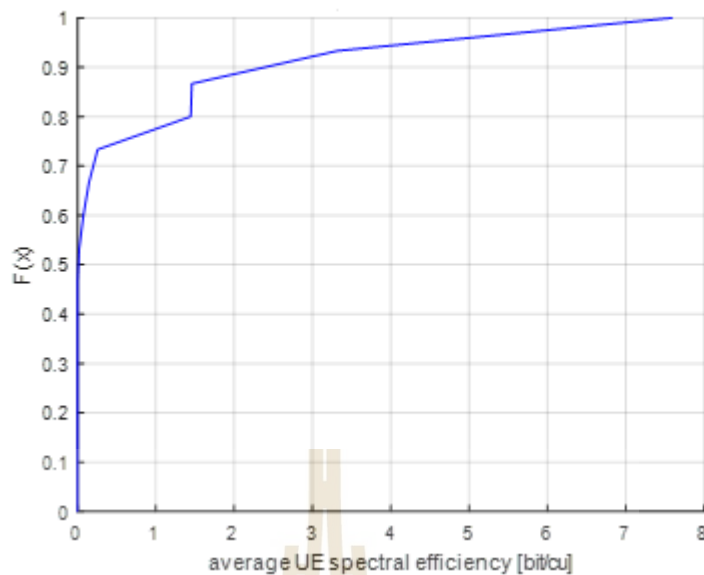
รูปที่ 4.16 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi

จากรูปที่ 4.16 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่า SINR โดยเฉลี่ยและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณ ที่ความถี่ 28 GHz สายอากาศภาคส่ง 128 ต้น สายอากาศภาครับ 2 ต้นและอัตราขยายของสายอากาศ 25 dBi จะเห็นได้ว่าเฉลี่ยที่เข้มและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณนั้นเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นรูปที่จำลองในระบบ 4G



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz
128x2 massive MIMO 25 dBi

จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย throughput ในหน่วย เมกกะบิตต่อวินาทีที่พิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi จะอยู่ที่ 3.3 เมกกะบิตต่อวินาที



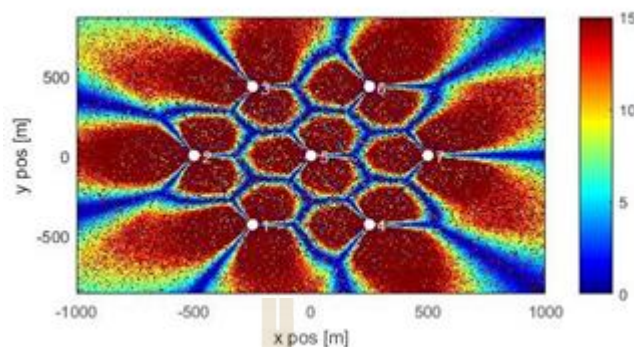
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย Spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz
128x2 massive MIMO 25 dBi

จากรูปที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ในหน่วย บิตต่อเฮิรตซ์ พิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz 128x2 massive MIMO 25 dBi จะอยู่ที่ 4.4 บิตต่อเฮิรตซ์

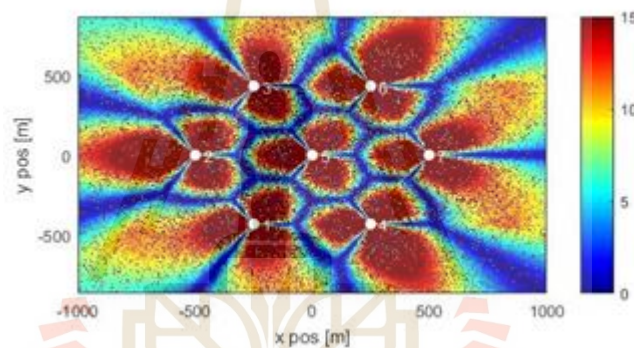
จากประสิทธิภาพต่างๆข้างต้นนี้เป็นค่าที่เกิดจากการที่เพิ่มจำนวนสายอากาศส่งและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศส่ง ซึ่งผลที่ได้ในส่วนนี้ของพื้นที่และระยะทางการแผ่กระจายของสัญญาณนั้นสามารถทดแทนและเพิ่มจากส่วนเดิมได้ และในส่วนของค่าเฉลี่ย throughput และค่าเฉลี่ยของ spectral efficiency ของผู้ใช้งานนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

4.4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างความถี่ 2.1 GHz กับ 28 GHz



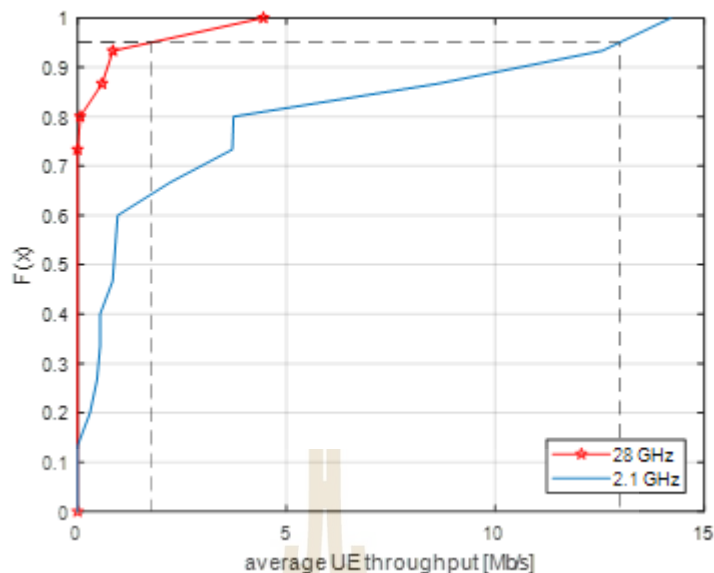
ก.



ข.

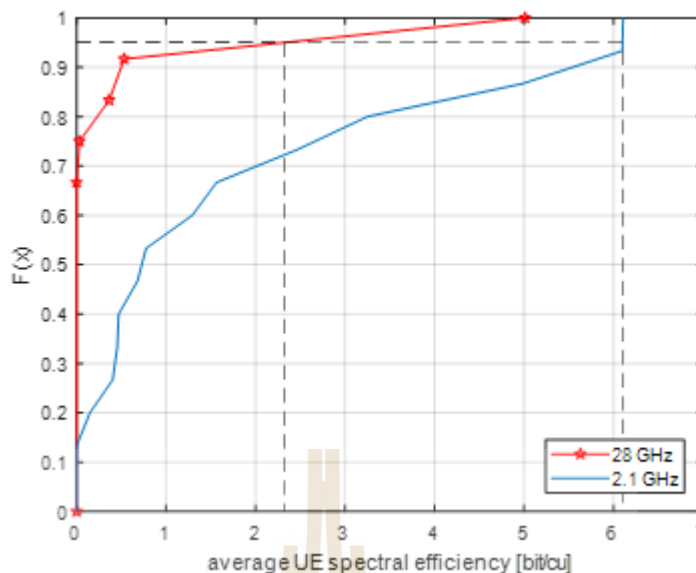
รูปที่ 4.19 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ก. ที่ความถี่ 2.1 GHz ข. ที่ความถี่ 28 GHz

จากรูปที่ 4.19 เป็นรูปแสดงรูปร่างของ SINR และการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งจะแบ่งเป็นสองรูป รูป ก. เป็นเส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 2.1 GHz และรูป ข. เป็นเส้นแสดงรูปร่างของ SINR ที่ความถี่ 28 GHz เมื่อพิจารณาทั้งรูป ก. และ รูป ข. จะสังเกตเห็นได้ว่า รูป ข. ที่เป็นรูปที่แสดงรูปร่าง SINR ที่ความถี่ 28 GHz จะมีเจดสีที่จางกว่ารูป ก. ที่เป็นรูปที่แสดงรูปร่าง SINR ที่ความถี่ 2.1 GHz และระยะเวลาการแผ่กระจายของสัญญาณมีระยะทางที่ลดลง



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz

จากรูปที่ 4.20 นี้ เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ซึ่งเป็นกราฟที่มีความสัมพันธ์กันระหว่าง $F(x)$ หรือความน่าจะเป็นสะสมกับค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานในหน่วย เมกกะบิตต่อวินาที เมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ที่ความถี่ 2.1 GHz นั้นจะได้ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานอยู่ที่ 12.97 เมกกะบิตต่อวินาทีและพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ที่ความถี่ 28 GHz จะได้ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานอยู่ที่ 1.75 เมกกะบิตต่อวินาที เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย throughput ที่ความถี่ 2.1 GHz และ 28 GHz พบว่า ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz มีค่ามากกว่า ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ความถี่ที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ค่าการสูญเสียตามเส้นทางนั้นเพิ่มมากขึ้นด้วย

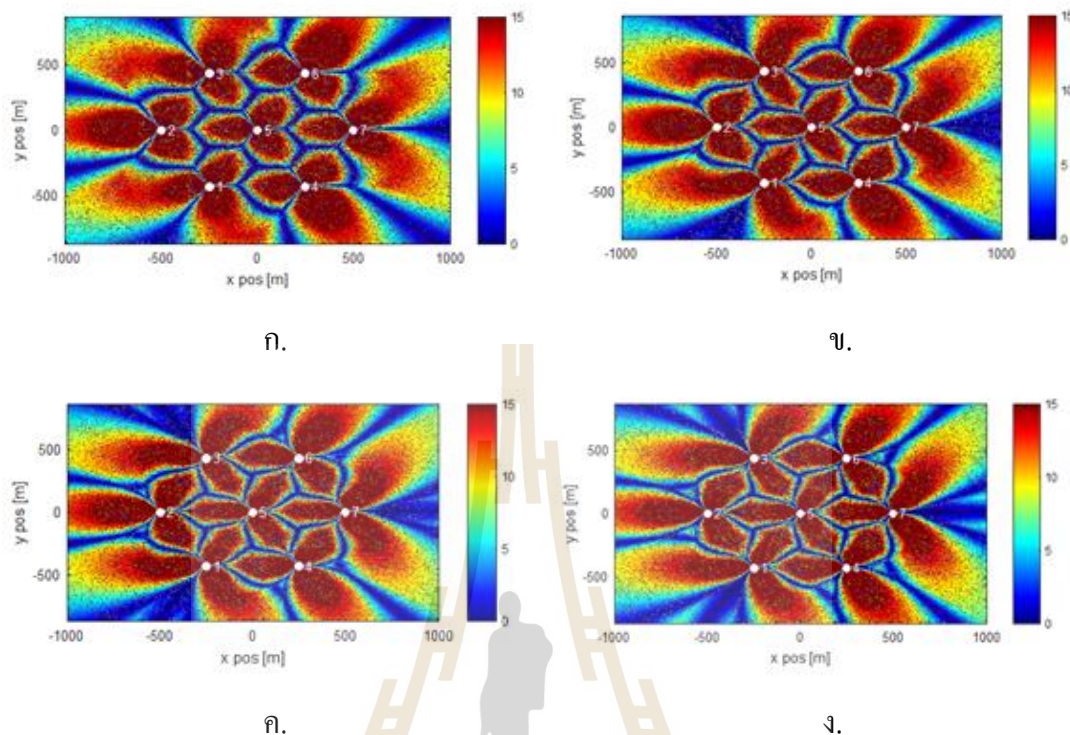


รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz

จากรูปที่ 4.21 นี้ เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ซึ่งเป็นกราฟที่มีความสัมพันธ์กันระหว่าง $F(x)$ หรือความน่าจะเป็นสะสมกับค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานในหน่วย bit/cu เมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ที่ความถี่ 2.1 GHz นั้นจะได้ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานอยู่ที่ 6.1 บิตต่อซียู และพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ที่ความถี่ 28 GHz จะได้ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานอยู่ที่ 2.32 บิตต่อซียู เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย spectral efficiency ที่ความถี่ 2.1 GHz และ 28 GHz พบว่า ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 2.1 GHz มีค่ามากกว่า ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่ความถี่ 28 GHz ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ความถี่ที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ค่าการสูญเสียตามเส้นทางนั้นเพิ่มมากขึ้นด้วย

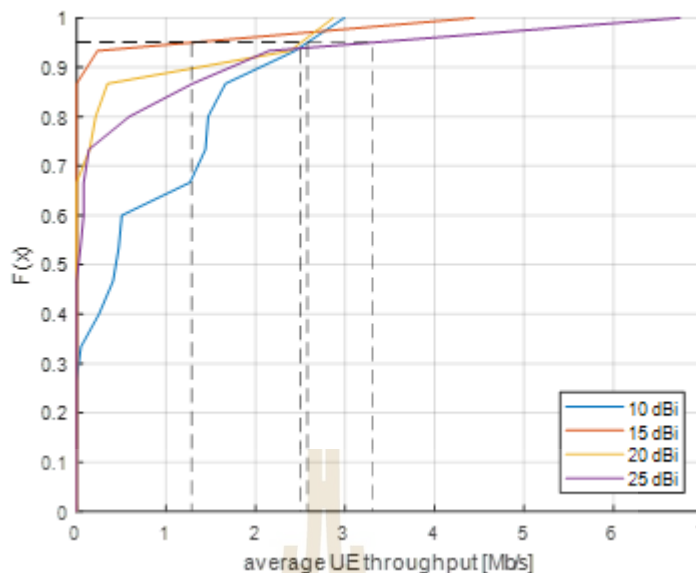
ในหัวข้อที่ 4.4.1 นี้ เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างความถี่ 2.1 GHz กับ 28 GHz ซึ่งจากการเปรียบเทียบข้างต้นนี้ จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มความถี่ที่มากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพต่างๆของระบบการสื่อสารไร้สายนี้มีประสิทธิภาพที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความถี่ที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการสูญเสียตามเส้นทางมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

4.4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อเพิ่มอัตราขยายที่ความถี่ 28 GHz



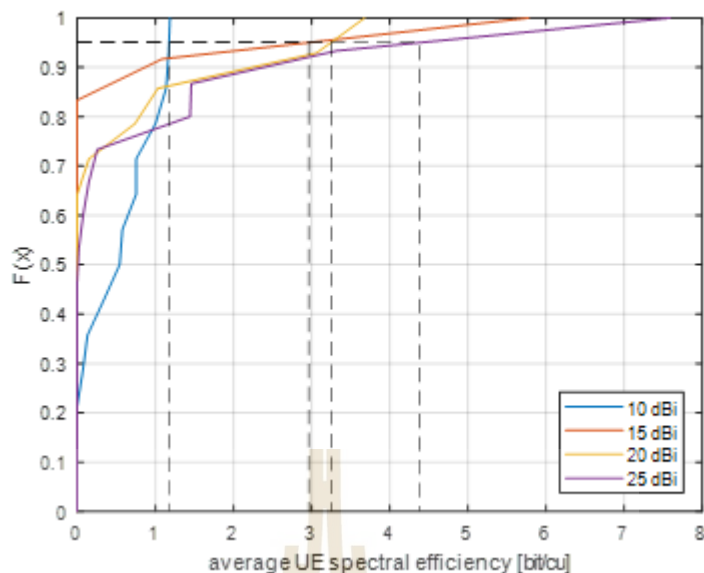
รูปที่ 4.22 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ก. ที่อัตราขยาย 10 dBi ข. ที่อัตราขยาย 15 dBi
ค. ที่อัตราขยาย 20 dBi ง. ที่อัตราขยาย 25 dBi

จากรูปที่ 4.22 เป็นรูปแสดงรูปร่างของ SINR และการแผ่กระจายคลื่นซึ่งจะแบ่งเป็น 4 รูปโดยรูป ก. แสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยายที่ 10 dBi รูป ข. แสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยายที่ 15 dBi รูป ค. แสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยายที่ 20 dBi และรูป ง. แสดงรูปร่างของ SINR ที่อัตราขยายที่ 25 dBi เมื่อพิจารณาทั้ง 4 รูปจะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งจะส่งผลให้เนคทีมีลีที่เข้มข้น ซึ่งจะมีผลคือค่า SINR จะมีค่ามากขึ้นด้วยตามเนคที และระยะการแผ่กระจายสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามลำดับที่ได้ทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานที่อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.23 นี้ เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานซึ่งจะเป็นใน ส่วนของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานโดยการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ภาคส่ง ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งนั้นจะประกอบไปด้วย 10 dBi 15 dBi 20 dBi และ 25 dBi ซึ่งจากในรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าเส้นสีฟ้าจะเป็นค่าของ 10 dBi เส้นสีส้มจะเป็นค่าของ 15 dBi เส้นสี เหลืองจะเป็นค่าของ 20 dBi และเส้นสีม่วงจะเป็นค่าของ 25 dBi เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นสะสม ที่ 0.95 จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายค่าของค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่ง จะสังเกตได้ว่าอัตราขยายที่ 25 dBi จะให้ค่าของค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานมีค่ามากที่สุดในการ เปรียบเทียบอัตราขยายที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งที่เพิ่มขึ้น

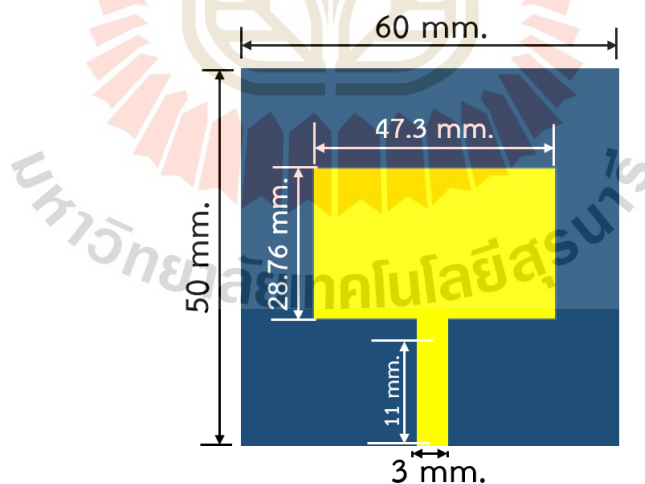
จากรูปที่ 4.24 นี้ เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานซึ่งจะเป็นในส่วนของกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งาน โดยการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งนั้นจะมีค่าเช่นเดียวกับรูปที่ 4.26 ก่อนหน้านี้ ซึ่งจากในรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเส้นสีฟ้าจะเป็นค่าของ 10 dBi เส้นสีส้มจะเป็นค่าของ 15 dBi เส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ 20 dBi และเส้นสีม่วงจะเป็นค่าของ 25 dBi เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง ค่าของค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่อัตราขยาย 10 dBi มีค่า 1.17 บิตต่อซียู ค่าของค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่อัตราขยาย 15 dBi มีค่า 2.96 บิตต่อซียู ค่าของค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่อัตราขยาย 20 dBi มีค่า 3.25 บิตต่อซียูและค่าของค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานที่อัตราขยาย 25 dBi มีค่า 4.39 บิตต่อซียู เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานในอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

4.5 สายอากาศที่ออกแบบ

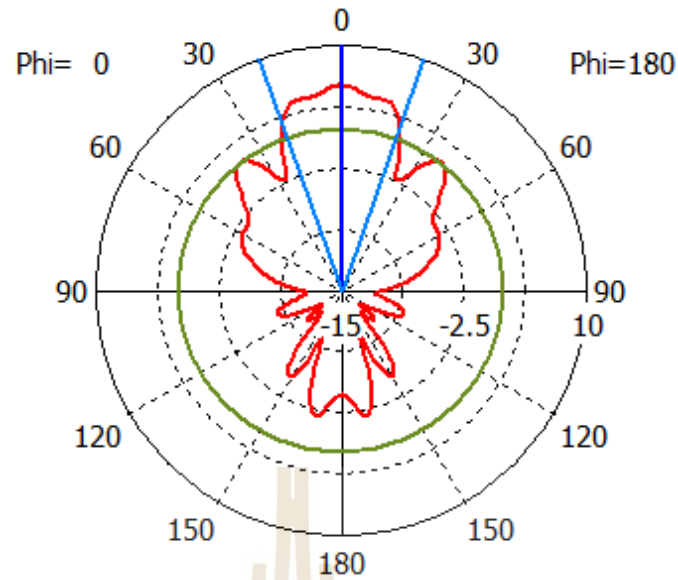
ในหัวข้อที่ 4.5 นี้จะเป็นการนำสายอากาศ[31]ที่มีรูปแบบการแผ่กระจายที่มีพวยย่อย พู่ด้านข้างเพิ่มขึ้นมา เพื่อที่จะวิเคราะห์ผลว่าประสิทธิภาพระบบการสื่อสารไร้สายเปลี่ยนไปอย่างไร

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการจำลองระบบ 5G ของสายอากาศที่ออกแบบ

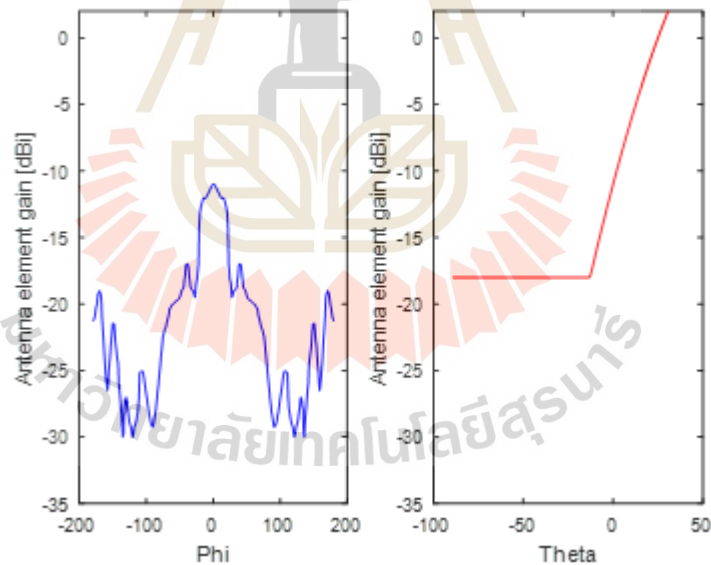
พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่	28 GHz
แบนด์วิธ	10 MHz
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวตั้ง	0.5λ
ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวนอน	0.5λ
โหมดในการส่ง	Spatial Multiplexing
จำนวนสายอากาศภาคส่ง	128 ต้น
จำนวนสายอากาศภาครับ	2 ต้น
กำลังในการส่ง	40 วัตต์
อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง	20 dBi



รูปที่ 4.25 สายอากาศที่สร้างโดยใช้การออกแบบสายอากาศแพทช์ไมโครสตริป[34]

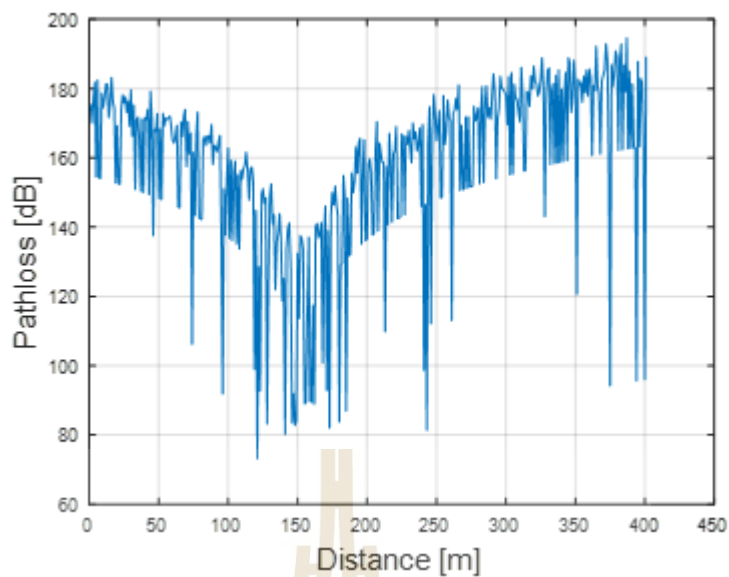


รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในแนวนอนของสายอากาศที่ออกแบบ[34]



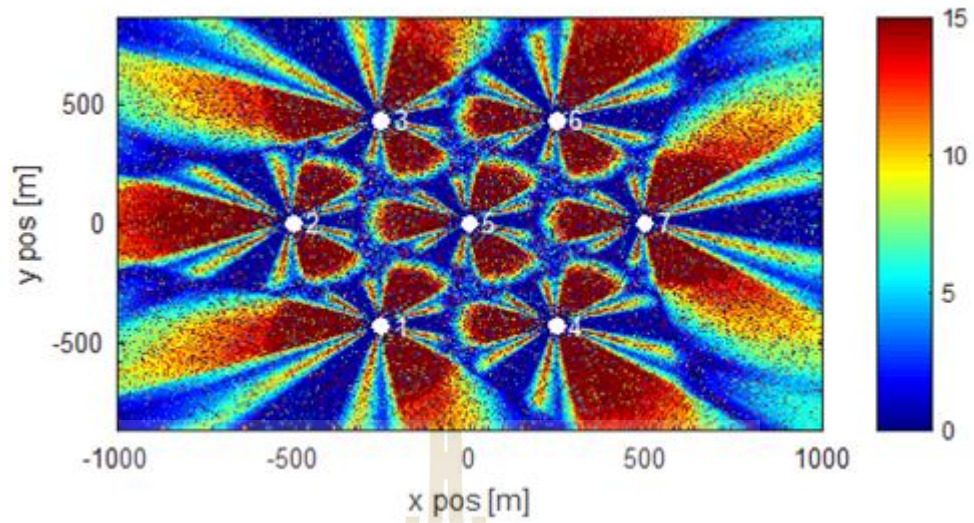
รูปที่ 4.27 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบ[34]

จากรูปที่ 4.27 นี้เป็นรูปที่แสดงรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศจริงที่มีพวย่อย พูด้านข้างเพิ่มขึ้นมา ซึ่งแตกต่างจากสายอากาศในหัวข้อต่างๆที่ผ่านมาซึ่งเป็นรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในอุดมคติซึ่งจะมีแต่พวยหลัก



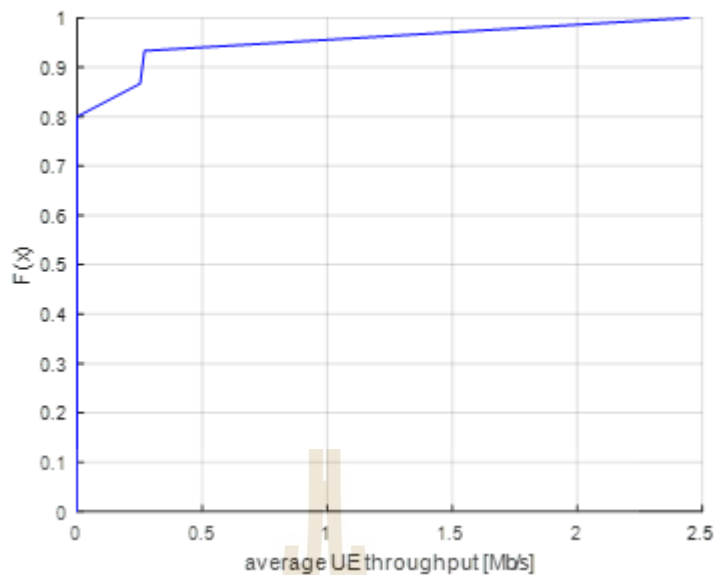
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทางของสายอากาศที่ออกแบบ

จากรูปที่ 4.28 นี้เป็นรูปแสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียตามเส้นทางกับระยะทาง ที่ช่วงระยะทางประมาณ 150 เมตรนั้นค่าการสูญเสียตามเส้นทางจะมีค่าประมาณ 80-140 dB เมื่อสังเกตในช่วงนี้



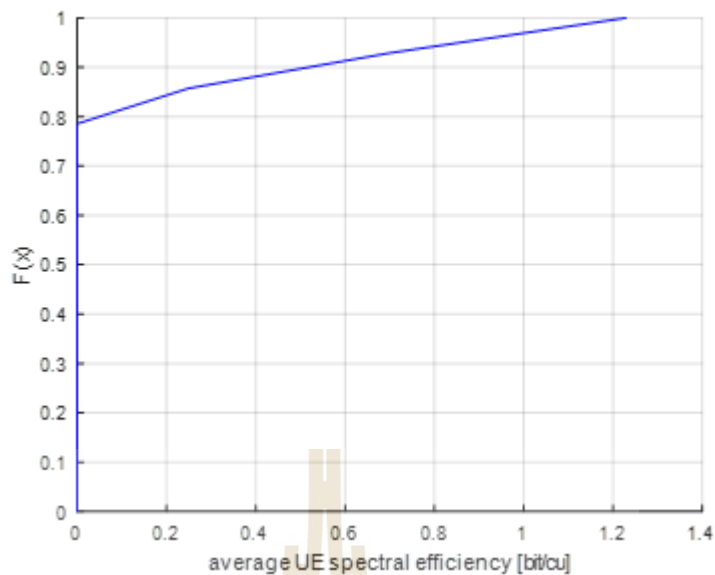
รูปที่ 4.29 เส้นแสดงรูปร่างของ SINR ของสายอากาศที่ออกแบบ

จากรูปที่ 4.29 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่า SINR โดยจุดสีและพื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณ จะเห็นได้ว่าจุดสีมีสีที่เข้มแต่พื้นที่การแผ่กระจายสัญญาณและระยะทางการแผ่กระจายสัญญาณนั้นสั้นลงและยังมีการแผ่กระจายสัญญาณขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเนื่องจากการที่มีพวยย่อยและพวยข้างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานของสายอากาศที่ออกแบบ

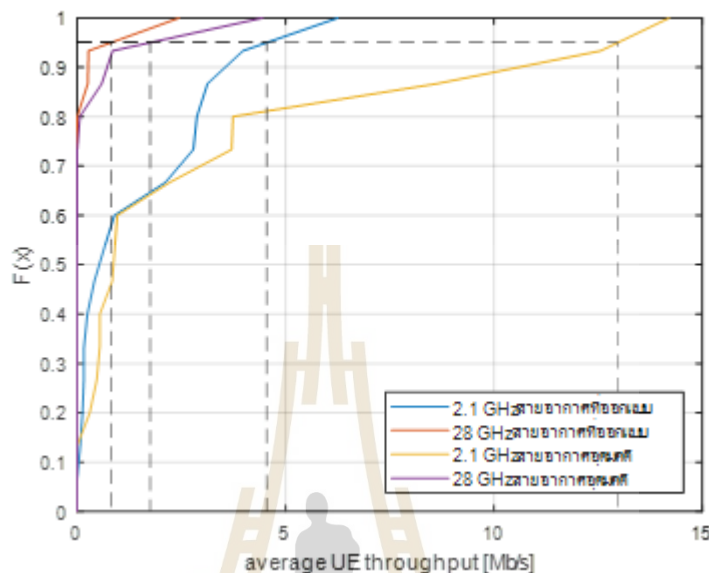
รูปที่ 4.30 นี้เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย throughput ในหน่วย เมกกะบิตต่อวินาที ซึ่งกราฟนี้เป็นกราฟของการนำสายอากาศจริงที่มีพวยย่อยและพูด้านข้างเพิ่มขึ้นมา เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งาน จะมีค่าเฉลี่ย throughput อยู่ที่ 0.813 เมกกะบิตต่อวินาที



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานของสายอากาศที่ออกแบบ

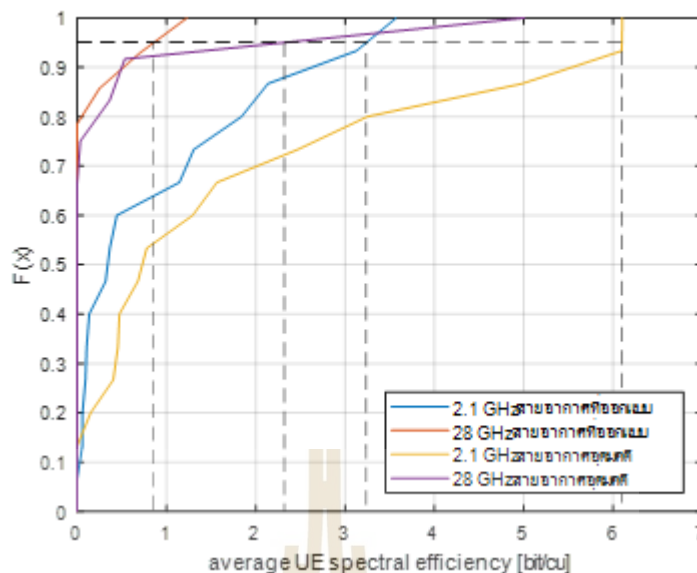
จากรูปที่ 4.31 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งาน จากกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(x)$ หรือ ความน่าจะเป็นสะสม กับ ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ในหน่วย บิตต่อซียู ซึ่งกราฟนี้เป็นกราฟของการนำสายอากาศจริงที่มีพวยย่อยและพูด้านข้างเพิ่มขึ้นมา เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานจะมีค่าอยู่ที่ 0.858 บิตต่อซียู

4.5.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศที่ออกแบบกับสายอากาศอุดมคติระหว่าง 2.1 GHz กับ 28 GHz



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ที่ใช้สายอากาศที่ออกแบบและสายอากาศอุดมคติ

จากรูปที่ 4.32 นี้ เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ที่ใช้สายอากาศที่ออกแบบ ซึ่งในส่วนของเส้นกราฟสีฟ้าจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่ที่ 2.1 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานจะมีค่า 4.55 เมกกะบิตต่อวินาที เส้นกราฟสีแดงจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่ที่ 28 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานจะมีค่า 0.81 เมกกะบิตต่อวินาที เส้นกราฟสีเหลืองจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศอุดมคติที่ความถี่ที่ 2.1 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานจะมีค่า 12.97 เมกกะบิตต่อวินาทีและเส้นกราฟสีม่วงจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศอุดมคติที่ความถี่ที่ 28 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย throughput ของผู้ใช้งานจะมีค่า 1.75 เมกกะบิตต่อวินาที



รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ที่ใช้สายอากาศที่ออกแบบและสายอากาศอุดมคติ

จากรูปที่ 4.33 นี้ เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานระหว่างความถี่ที่ 2.1 GHz และ 28 GHz ที่ใช้สายอากาศที่ออกแบบ ซึ่งในส่วนของเส้นกราฟสีฟ้าจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่ที่ 2.1 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานจะมีค่า 3.24 บิตต่อซียู เส้นกราฟสีแดงจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่ที่ 28 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานจะมีค่า 0.86 บิตต่อซียู เส้นกราฟสีเหลืองจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศอุดมคติที่ความถี่ที่ 2.1 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานจะมีค่า 6.1 บิตต่อซียู และเส้นกราฟสีม่วงจะเป็นเส้นกราฟของสายอากาศอุดมคติที่ความถี่ที่ 28 GHz ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความน่าจะเป็นสะสมที่ 0.95 ค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานจะมีค่า 2.32 บิตต่อซียู

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความถี่ในการใช้สายอากาศที่ออกแบบและสายอากาศอุดมคติ ค่าเฉลี่ย throughput และค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความถี่จะเกิดการสูญเสียตามเส้นทางที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพที่ได้มีคุณภาพที่ต่ำลงและเมื่อพิจารณาระหว่างสายอากาศที่ออกแบบและสายอากาศอุดมคติที่ความถี่เดียวกันทั้งความถี่ที่ 2.1 GHz และความถี่ที่ 28 GHz จะพบว่าค่าเฉลี่ย throughput และค่าเฉลี่ย spectral efficiency ของผู้ใช้งานของสายอากาศที่ออกแบบมีค่าน้อยกว่าสายอากาศอุดมคติ

เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบนั้นจะมีพู่ข้าง พู่ย่อยและพู่หลังเกิดขึ้น ส่วนสายอากาศในอุดมคตินั้นจะมีแค่พู่หลักจึงทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

4.6 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้ทำการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 และในยุคที่ 5 ซึ่งจากการจำลองข้างต้นพบว่า การเพิ่มจำนวนสายอากาศภาคส่งและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งนั้นสามารถทดแทนการสูญเสียตามเส้นทางและเพิ่มระยะการแผ่กระจายของสัญญาณได้ และการนำสายอากาศที่ออกแบบมาทดลองในการจำลองนั้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพต่างๆของระบบการสื่อสารไร้สายนั้นมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงเนื่องจาก การจำลองก่อนหน้านี้เป็นการจำลองจากการนำสายอากาศในอุดมคติมาใช้ซึ่งจะมีแค่พู่หลัก แต่สายอากาศที่ออกแบบนั้นจะมีพู่ต่างๆเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายนั้นต่ำลง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 และระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพต่างๆของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยใช้โปรแกรม Vienna Simulators LTE-A Downlink System Level Simulator Documentation, v2.0 Q3-2018 จาก Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria ซึ่งได้อธิบายพารามิเตอร์ต่างๆในระบบการสื่อสารไร้สายของโปรแกรม การกำหนดค่าสายอากาศเรียงลำดับแบบ 2 มิติ ในบทที่ 3 ซึ่งในงานวิจัยนี้การสื่อสารยุคที่ 5 นั้นจะทำการเพิ่มความถี่ เพิ่มจำนวนสายอากาศภาคส่งและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง เพื่อทดสอบการทดแทนประสิทธิภาพที่สูญเสียจากค่าการสูญเสียตามเส้นทางและเพิ่มระยะการแผ่กระจายของสัญญาณ และทำการนำสายอากาศที่ออกแบบมาทดลองในการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายนี้และได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายเมื่อทำการเพิ่มความถี่ เพิ่มจำนวนสายอากาศภาคส่งและเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 และได้สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในบทที่ 5 นี้

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ในการทำงานของการจำลองระบบการสื่อสารไร้สายนั้นจะใช้โปรแกรม Vienna Simulators LTE-A Downlink System Level Simulator Documentation, v2.0 Q3-2018 ซึ่งใช้งานในโปรแกรม Matlab เนื่องจากการทำงานของโปรแกรมนั้นใช้เวลาในการจำลองนานและการทำงานของคอมพิวเตอร์ทำงานหนัก เป็นผลทำให้คอมพิวเตอร์มีอาการค้าง สะดุด และโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่มีข้อมูลการใช้งานที่มาก ควรศึกษาข้อมูลให้ละเอียดเพื่อการใช้งานที่เกิดประโยชน์สูงสุด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งเพื่อทดแทนประสิทธิภาพที่สูญเสียไปจากการเพิ่มความถี่ ซึ่งในอนาคตการสื่อสารไร้สายจะมีการใช้ความถี่ที่เพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นที่ต้องเพิ่มสถานีฐาน ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงเป็นแนวคิดและแนวทางที่จะสามารถทดแทนประสิทธิภาพของ

ระบบการสื่อสารไร้สายและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังคงต้องศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศส่งเพื่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] ITU-R, “**Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000),**” *Recommendation ITU-R M.1457-13*, (2017).
- [2] 3GPP TR 38.803, “**Study on New Radio Access Technology: Radio Frequency (RF) and Coexistence Aspects,**” (2016).
- [3] C.A. Balanis., “**Antenna Theory: Analysis and Design 2nd edition,**” *John Wilay & Sons*, (1997).
- [4] Ben Allen, M. Ghavami., “**Adaptive Array System: Fundamentals and Applications,**” *John Wilay & Sons*, (2005).
- [5] E. G. Larsson, O. Edfors, Fr. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “**Massive MIMO for next generation wireless systems,**” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, (2014).
- [6] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “**Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems,**” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 4, (2013).
- [7] T. Marzetta, “**Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,**” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, (2010).
- [8] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, “**Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays,**” *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 30, no. 1, (2013).
- [9] J. Hoydis, S. T. Brink, and M. Debbah, “**Massive MIMO: How many antennas do we need?,**” in *Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, Monticello, IL, (2011).
- [10] L. Lu, G. Li, A. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, “**An overview of massive MIMO: Benefits and challenges,**” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, (2014).
- [11] A. Osseiran, J. F. Monserrat, and P. Marsch., “**5G Mobile and Wireless Communications Technology,**” *Published by Cambridge University Press*, (2016).

- [12] U. Gustavsson, C. Sanchez-Perez, T. Eriksson, F. Athley, G. Durisi, P. Landin, K. Hausmair, C. Fager, and L. Svensson, **“On the impact of hardware impairments on massive MIMO ,”** in *IEEE Global Telecommunications Conference Workshops*, (2014).
- [13] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, Jr. **“Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge,”** in *Information Theory and Applications*, (2013).
- [14] O. El Ayach, R. W. Heath, Jr., S. Abu-Surra, S. Rajagopal, and Z. Pi, **“Low complexity precoding for large millimeter wave MIMO systems,”** in *IEEE International Conference on Communications*, (2012).
- [15] A. Alkhateeb, J. Mo, N. G. Prelcic, and R. W. Heath, Jr., **“MIMO precoding and combining solutions for millimeter-wave systems,”** *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 12, (2014).
- [16] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, Jr., **“Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems,”** *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, (2014).
- [17] Constantine A. Balanis., **“Antenna Theory Analysis and Design 2nd edition,”** John Wiley & Sons, (2005).
- [18] L. Wei, R.Q. Hu, Y. Qian, G. Wu, **“Key elements to enable millimetre wave communications for 5G wireless systems,”** *IEEE Wirel. Commun*, (2014).
- [19] S. Hur, T. Kim, D. Love, J. Krogmeier, T. Thomas, A. Ghosh, **“Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks,”** *IEEE Trans. Commun*, (2013).
- [20] F. Rusek, D. Persson, B.K. Lau, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, O. Edfors, F. Tufvesson, **“Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays,”** *IEEE Signal Process. Mag*, (2013).
- [21] T. Wu, T.S. Rappaport, C.M. Collins, **“Safe for generations to come: considerations of safety for millimeter waves in wireless communications,”** *IEEE Microw*, (2015).
- [22] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. Heath, **“Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems,”** *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol.8, no. 5, (2014).

- [23] C. Dehos, J. Gonzalez, A. De Domenico, D. Ktenas, and L. Dussopt, “**Millimeter-wave access and backhauling: The solution to the exponential data traffic increase in 5G mobile communications systems?**” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 9, (2014).
- [24] E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, T.L. “**Marzetta, Massive MIMO for next generation wireless systems,**” *IEEE Commun. Mag.*, (2014).
- [25] ITU-R, “**Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio inter- face(s),**” *Report ITU-R M.2410*, (2017).
- [26] ITU-R, “**IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,**” *Recommendation ITU-R M.2083*, (2015).
- [27] Tadilo Endeshaw Bogale, Long Bao Le, “**Massive MIMO and mmWave for 5G Wireless HetNet : Potential Benefits and Challenges**”, *IEEE Veh. Technol. Mag.* 11,(2016)
- [28] A.L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydasri, F. Capolino, “**Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?,**” *IEEE Commun.*, (2014).
- [29] X. Gao, L. Dai, S. Han, C.-L. I, R.W. Heath Jr., “**Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays,**” *IEEE J. Sel. Areas Commun.* (2016).
- [30] Institute of Telecommunications Vienna University of Technology Austria, “**Vienna Simulators LTE-A Downlink System Level Simulator Documentation, v2.0 Q3-2018**”
- [31] Shoriful Islam, Kamruzzaman, Tazkia Jessy, Salim Zahan, Sabuj Hassan, “**Performance Analysis of Massive MIMO for 5G Wireless Communication Systems**”, *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2016)*. IEEE, 2016.
- [32] Khem Narayan Poudel, Shankar Gangaju, “**Spectral Efficiency, Diversity Gain, Multiplexing Capacity Analysis for Massive MIMO, 5G Communication System**”, *2017 International Conference on Networking and Network Applications*. IEEE, 2017.
- [33] Erma Putri Fitriawati, Joko Suryana, “**Perfomance of 5G Networks Massive MIMO Using 5,9 GHz band**”, *IEEE*, (2018).
- [34] ณัฐวุฒิ ภูงามเงิน, “**แนวทางการออกแบบเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ Massive MIMO สำหรับการสื่อสารยุคที่ 5**”, การสอบวัดคุณสมบัติและ โครงร่างวิทยานิพนธ์
- [35] Cox, D.R., and D. Oakes, “**Analysis of Survival Data**”, London:Chapman % Hall, 1984.
- [36] Lawless, J.F., “**Statistical Models and Methods for Lifetime Data**”, Inc., 2003.

ประวัติผู้เขียน

นายวรพล พวงเกาะ เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พุทธศักราช 2537 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนอนุบาลนครราชสีมา และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีพุทธศักราช 2556 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในพุทธศักราช 2560 ได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านการสื่อสารไร้สาย จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมในงานวิชาการนานาชาติ The 11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE 2019) ณ Holiday Inn Pattaya ประเทศไทย วันที่ 10-11 ตุลาคม 2562



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี