

การปรับปรุงประสิทธิภาพประสบการณ์ผู้ใช้งานสำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้า  
ไฮบริดโครงสร้างบางส่วนในระบบโมโนขนานใหญ่



นางสาวฟ้ารุ่ง สัมกลาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2564

OPTIMIZATION QUALITY OF EXPERIENCE WITH HYBRID  
PRECODING PARTIALLY STRUCTURE MASSIVE MIMO SYSTEM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication and Computer Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2021

การปรับปรุงประสิทธิภาพประสบการณ์ผู้ใช้งานสำหรับการเข้าถึงสไลด์วงหน้า  
ไฮบริดโครงสร้างบางส่วนในระบบไมโมขนานใหญ่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. พีระพงษ์ อูชาரசกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. อภิญา ดีคำ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร. ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ฟารุ่ง สัมกลาง : การปรับปรุงประสิทธิภาพประสบการณ์ผู้ใช้งานสำหรับการเข้ารหัส  
ล่วงหน้า ไฮบริดโครงสร้างบางส่วนในระบบโมโฆขนานใหญ่ (OPTIMIZATION QUALITY  
OF EXPERIENCE WITH HYBRID PRECODING PARTIALLY STRUCTURE MASSIVE  
MIMO SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุचारสกุล, 76 หน้า.

คำสำคัญ : ประสบการณ์ผู้ใช้งาน/คุณภาพบริการของเครือข่าย/การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด  
คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย/โมโฆขนานใหญ่

โมโฆขนานใหญ่สำหรับการสื่อสารไร้สาย 5G ด้วยจำนวนสายอากาศที่มากขึ้นทำให้มี  
ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลและสามารถรองรับความหนาแน่นของอุปกรณ์ผู้ใช้งานสำหรับการเข้าถึง  
บริการอินเทอร์เน็ตได้เพิ่มขึ้น ซึ่งการเข้ารหัสล่วงหน้าเป็นเทคนิคอีกตัวที่สำคัญสำหรับโมโฆขนานใหญ่  
โดยมีงานวิจัยมากมายที่เกี่ยวกับการเข้ารหัสล่วงหน้าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสัญญาณที่สูงขึ้น การ  
เข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดก็เป็นหนึ่งในเทคนิคของโมโฆขนานใหญ่ที่ได้รับความสนใจมากเพราะมี  
การทำงานร่วมกันระหว่างดิจิทัลและอนาล็อก ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและลดความซับซ้อนของ  
ฮาร์ดแวร์ โดยที่ไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล และเพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณผู้  
ให้บริการเครือข่ายเริ่มตระหนักถึงความสำคัญของคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน (Quality of  
Experience : QoE) ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดด้วยโครงสร้าง  
บางส่วนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลและจัดสรรทรัพยากรในการบริการเครือข่ายเพื่อเพิ่ม  
ความพึงพอใจแก่ผู้ใช้งานภายใต้ข้อจำกัดด้านพลังงาน โดยผู้วิจัยมีความสนใจในบริการด้านเว็บ  
เบราวเซอร์ วิดีโอ และ การสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต (Voice Over-IP : VOIP) ซึ่งมีคะแนน  
ความคิดเห็นเฉลี่ย (Mean Opinion Score : MOS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดระดับคะแนนความ  
พอใจของผู้ใช้งาน ขั้นตอนในการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณ จะเริ่มด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพการ  
เข้ารหัสล่วงหน้าในส่วนของเบสแบนด์และ RF ด้วยอัลกอริทึม (Alternating Minimization : Alt-  
Min) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์คุณภาพของบริการด้านเครือข่าย  
(Quality of Service : QoS) และนำไปสู่ความพึงพอใจของผู้ใช้งานให้มีคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย  
(MOS) อยู่ในระดับที่ต้องการได้

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม  
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา

Ab

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

Qu

FARUNG SAMKLANG : OPTIMIZATION QUALITY OF EXPERIENCE WITH HYBRID  
PRECODING PARTIALLY STRUCTURE MASSIVE MIMO SYSTEM. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. PEERAPONG UTHANSAKUL, Ph.D. 76 PP.

Keyword: Quality of experience/Quality of service/Hybrid precoding/Mean of opinion  
score/Massive mimo

Massive MIMO for 5G communication expert system with more antennas, it provides faster transmit and receive data and can support a higher density of user devices for accessing Internet services. The hybrid precoding is another important technique for massive MIMO, there are many works of literature about the precoding for higher signal efficiency. Hybrid precoding is one of the massive MIMO techniques that are getting a lot of attention because combining between digital and analog technologies provide save energy and reduce complex hardware without degrading the data transmission performance and to improve the signal quality, network operators are becoming aware of the importance of Quality of Experience (QoE). In this paper, we proposed the hybrid precoding partially structure to improve data transmission performance and allocate network service resources to users to increase user satisfaction within the constraints of energy. The researcher was interested in the web browsing, video, and Voice Over IP (VOIP) services. Which has, a Mean Opinion Score (MOS) is employed to measure the level of user satisfaction. Steps to improve signal quality, start with optimizing the baseband and RF precoding using Alternating Minimization (Alt-Min) algorithms. As a result, can be optimized the Quality of Service (QoS) parameters and lead to the satisfaction of user with the achieving of the required level of Mean Opinion Score (MOS).

School of Telecommunication Engineering  
Academic Year 2021

Student's Signature 

Advisor's Signature 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสด้านการศึกษา ทั้งให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี อุสาหะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐวิทย์ ภูฉายา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิตพงศ์ เวชไธสงค์ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ คำแนะนำ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณนางสาววิรินภ อัจหาญ เลขานุการ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้ คำปรึกษา ตรวจสอบ และดำเนินการเกี่ยวกับเอกสารต่างๆ ตลอดระยะเวลาการศึกษา ขอขอบคุณ ดร.ปธิกร อันซีน และพี่ๆ นักศึกษาปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจน ส่งเสริมการศึกษา ทั้งยังให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา และขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ฟ้ารุ่ง สัมกลาง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2 ปรัชญาบรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ระบบการสื่อสารในยุค 5G.....	5
2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.3.1 ช่องสัญญาณไม่โมฆะขนาดใหญ่ (Massive MIMO Channel).....	7
2.3.2 การสูญเสียเส้นทาง (Path Loss).....	8
2.3.3 สลายตัวค่าเอกพจน์ของช่องสัญญาณ (Singular Value Decomposition : SVD).....	9
2.3.4 การวัดระยะห่างแบบยูคลิดีเนียน (Euclidean Distance).....	10
2.4 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding Technique).....	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดั้งเดิม (Conventional Precoding).....	11
2.4.2 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด (Hybrid Precoding).....	12
2.4.2.1 การเข้ารหัสล่วงหน้าโครงสร้างสมบูรณ์ (Fully Structure Precoding).....	13
2.4.2.2 การเข้ารหัสล่วงหน้าโครงสร้างบางส่วน (Partially Structure Precoding).....	13
2.5 ช่องสัญญาณโมโนขนานใหญ่ด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด (Massive MIMO Channel with Hybrid Precoding).....	14
2.5.1 อัตราการส่งข้อมูล (Data Rate).....	15
2.5.2 ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency).....	15
2.5.3 พลังงานที่ใช้ทั้งหมดในภาคส่ง (Total Power at Transmitter).....	16
2.6 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยอัลกอริทึม OMP (Orthogonal Matching Pursuit Algorithm).....	17
2.7 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยอัลกอริทึม DPS (Double Phase Shifter Algorithm).....	18
2.8 การพิจารณาประสิทธิภาพของสัญญาณ (Consider Performance of Signal)....	19
2.8.1 คุณภาพบริการของเครือข่าย (Quality of Service : QoS).....	19
2.8.2 ประสบการณ์ผู้ใช้งานและคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (Quality of Experience : QoE and Mean Opinion Score : MOS).....	20
2.9 สรุป.....	21
<b>3 การออกแบบระบบ.....</b>	<b>22</b>
3.1 กล่าวนำ.....	22
3.2 แบบจำลองระบบโมโนขนานใหญ่.....	22
3.3 การปรับปรุงคุณภาพการเข้ารหัสล่วงหน้าภายใต้ข้อจำกัดด้านพลังงาน.....	24
3.3.1 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบอนาล็อก.....	24
3.3.2 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดิจิทัล.....	25



## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.4	การปรับปรุงคุณภาพการเข้ารหัสสว่างหน้าด้วยอัลกอริทึม OMP .....	27
3.5	การปรับปรุงคุณภาพการเข้ารหัสสว่างหน้าด้วยอัลกอริทึม DPS.....	28
3.6	การพิจารณาบริการเครือข่ายแก่ผู้ใช้งาน .....	29
3.6.1	บริการเว็บเบราว์เซอร์ .....	29
3.6.2	บริการวิดีโอ .....	31
3.6.3	การสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต .....	33
3.7	การปรับปรุงประสิทธิภาพความพึงพอใจผู้ใช้งาน .....	35
<b>4</b>	<b>วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองระบบ .....</b>	<b>36</b>
4.1	กล่าวนำ .....	36
4.2	การจำลองระบบโมเมนตัมใหญ่ .....	37
4.3	เปรียบเทียบวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม OMP.....	39
4.3.1	การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์ .....	40
4.3.2	การเปรียบเทียบบริการวิดีโอ.....	41
4.3.3	การเปรียบเทียบบริการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต .....	42
4.4	เปรียบเทียบวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS .....	43
4.4.1	การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์ .....	44
4.4.2	การเปรียบเทียบบริการวิดีโอ.....	45
4.4.3	การเปรียบเทียบบริการสื่อสารอินเทอร์เน็ตผ่านเสียง.....	46
4.5	สรุป .....	47
<b>5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>48</b>
5.1	สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	48
5.2	ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต .....	49
	รายการอ้างอิง.....	50
	ภาคผนวก ก .....	54
	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ .....	54
	ประวัติผู้เขียน .....	76

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน..... 20
3.1	แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งานของบริการเว็บ เบราว์เซอร์ .....31
3.2	แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งานของบริการ วิดีโอ..... 33
3.3	แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของการสื่อสารทางเสียงผ่าน อินเทอร์เน็ต..... 34
4.1	พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบโมเมนตัมใหญ่..... 36

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การรับและขยายสัญญาณของเซลล์ขนาดเล็กจากสถานีฐานเพื่อส่งสัญญาณ ให้แก่อุปกรณ์ผู้ใช้งาน [3] .....	6
2.2 การเข้ารหัสแบบดั้งเดิมของระบบโมเด็มขนาดใหญ่.....	11
2.3 โครงสร้างสมบูรณของการเข้ารหัสแบบไฮบริด.....	12
2.4 โครงสร้างบางส่วนของเข้ารหัสแบบไฮบริด .....	14
2.5 การทำงานของอัลกอริทึม OMP [18].....	17
2.6 โครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS ในส่วนการเข้ารหัสแบบอนาล็อก [19].....	18
2.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของโครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS กับโครงสร้างสมบูรณของอัลกอริทึม OMP [19].....	19
3.1 โครงสร้างบางส่วนของเข้ารหัสแบบไฮบริดสำหรับระบบโมเด็มขนาดใหญ่ .....	22
4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเทียบกับค่า SNR (Signal to Noise Ratio) ด้วยจำนวนสายอากาศที่ต่างกัน .....	37
4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของการสูญเสียเส้นทางภายในอาคาร และภายนอกอาคารกับระยะทาง.....	38
4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานเทียบกับจำนวนห้วงโซ่ RF สำหรับ การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด .....	39
4.4 การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์เทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน.....	40
4.5 การเปรียบเทียบบริการวิดีโอเทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน .....	41
4.6 การเปรียบเทียบบริการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ตเทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน.....	42
4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเทียบกับค่า SNR .....	43
4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานเทียบกับจำนวนห้วงโซ่ RF สำหรับโครงสร้าง บางส่วน.....	44
4.9 การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์เทียบกับจำนวนผู้ใช้งานของทั้ง 3 วิธีการ .....	45
4.10 การเปรียบเทียบบริการวิดีโอเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานของทั้ง 3 วิธีการ .....	46

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การเปรียบเทียบบริการสื่อสารอินเทอร์เน็ตผ่านเสียงกับจำนวนผู้ใช้งาน ของทั้ง 3 วิธีการ.....	47



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

Multiple Input Multiple Output หรือไมโม (MIMO) เป็นเทคนิคที่ใช้มาตั้งแต่ระบบ 4G โดยหลักการพื้นฐานของระบบไมโมคือการใช้สายอากาศที่มากกว่าหนึ่งสายอากาศในการส่ง-รับข้อมูล ทำให้สามารถรองรับการใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่หรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับจุดส่งสัญญาณดังกล่าว ในปริมาณมากขึ้นได้ มีการกระจายสัญญาณออกไปหลายทิศทางพร้อมกัน แต่สำหรับระบบ 5G ซึ่งมีความต้องการในการรองรับข้อมูลที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ 4G จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สายอากาศในการส่ง-รับข้อมูล ที่มากกว่า 100 ต้น ซึ่งเราเรียกเทคนิคการใช้สายอากาศในปริมาณมากในระดับนี้ว่า ไมโมขนานใหญ่ (Massive MIMO) ระบบ 5G ด้วยจำนวนสายอากาศที่มากมีการทำงานที่ความถี่สูงหรือที่เรียกว่าคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter Wave: 30GHz - 300GHz) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แบนด์วิธก็สูงขึ้นทำให้เพิ่มอัตราการส่งข้อมูล และเพิ่มความจุของช่องสัญญาณ ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือการเพิ่มขึ้นของต้นทุนและมีการใช้พลังงานที่มากขึ้นด้วย โดยในเทคนิคการเข้ารหัสแบบดั้งเดิมของไมโมขนานใหญ่เป็นการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดิจิตอลเท่านั้น ทำให้ต้องใช้จำนวนห่วงโซ่ RF (Radio Frequency Chain) มากขึ้นเพราะสายอากาศแต่ละต้นจะมีห่วงโซ่ RF เชื่อมต่อโดยตรงซึ่งถ้าเสาอากาศเพิ่มขึ้นห่วงโซ่ RF ก็เพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้การใช้พลังงานก็มากตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดซึ่งเป็นวิธีการเข้ารหัสสำหรับระบบไมโมขนานใหญ่ที่ได้รับความสนใจมาก ด้วยการทำงานระหว่างดิจิตอลและอนาล็อกซึ่งสามารถให้ปริมาณอัตราข้อมูลที่สูง ลดจำนวนห่วงโซ่ RF และประหยัดพลังงาน ซึ่งการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดจะมีอยู่ 2 โครงสร้างคือแบบสมบูรณ์ (Fully) และแบบบางส่วน (Partially) โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด [1] ด้วยโครงสร้างสมบูรณ์ ได้ใช้อัลกอริทึมของ Manifold Optimization (MO) และโครงสร้างบางส่วนได้ใช้อัลกอริทึมของ SemiDefinite Relaxation (SDR) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างบางส่วนสามารถให้ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy Efficiency) ได้ดีกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างบางส่วนของการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด [2] โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของพลังงานกับโครงสร้างทั้งแบบสมบูรณ์และบางส่วนในอัลกอริทึม

Orthogonal Matching Pursuit (OMP) ซึ่งผลลัพธ์ก็ได้แสดงให้เห็นอีกว่าโครงสร้างบางส่วนแบบไฮบริดมีประสิทธิภาพดีกว่าในด้านการลดต้นทุนและประสิทธิภาพพลังงาน แต่ถ้าเป็นด้านประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล (Spectral Efficiency) โครงสร้างสมบูรณ์จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้กล่าวมาจะเน้นเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูลและการประหยัดพลังงาน แต่ยังไม่มียานใดที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณเพื่อเพิ่มความพึงพอใจหรือคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน (Quality of Experience : QoE)

ปัจจุบันนี้การใช้งานอินเทอร์เน็ตเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นบริการด้าน เว็บเบราว์เซอร์ HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) วิดีโอ การสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต (Voice Over IP : VOIP) และการสตรีมมิ่งเกม เป็นต้น เมื่อมีผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มมากขึ้นก็อาจทำให้เกิดปัญหาของเครือข่ายขึ้นได้ ดังนั้นนอกจากการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณให้ดีขึ้นในด้านประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล และปริมาณงาน (Throughput) ที่สูงขึ้นในดาวันลิงค์ของระบบโมโมขนานใหญ่ การเพิ่มประสิทธิภาพความพึงพอใจหรือประสบการณ์ของผู้ใช้งานก็มีความสำคัญเพราะเป็นตัวบ่งบอกถึงความพึงพอใจของผู้ที่ใช้งานเครือข่าย โดยมีคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (Mean Opinion Score : MOS) เป็นเครื่องมือในการวัดระดับความพึงพอใจโดยทั่วไปจะมีอยู่ 5 ระดับเมื่อ 5 คือยอดเยี่ยม และ 1 คือต้องปรับปรุง ส่วนของคุณภาพบริการของเครือข่าย (Quality of Service : QoS) มีผลต่อคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน ทั้งทางตรงและทางอ้อมเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่บอกคุณภาพของบริการเครือข่ายเช่น ปริมาณงาน ความล่าช้า (Delay) การสูญหายของแพ็กเก็ต (Packet Loss) และความกระวนกระวาย (Jitter) เป็นต้น โดยเทคนิคส่วนใหญ่ในการเพิ่มประสิทธิภาพความพึงพอใจของผู้ใช้งานมีการใช้เทคโนโลยี Heterogeneous Networks (HetNets) [3] โดยการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์ขนาดเล็ก (Small Cell : SC) ซึ่งสามารถเพิ่มความพึงพอใจของผู้ใช้ได้จริง แต่ก็มีการใช้งานของพลังงานมากขึ้นด้วยซึ่งก็ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงจะเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพความพึงพอใจของผู้ใช้งานโดยการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดของโครงสร้างบางส่วนโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพพลังงานและเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลโดยบริการที่สนใจเพื่อมาใช้วัดความพึงพอใจของผู้ใช้งานมี 3 บริการได้แก่ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงประสิทธิภาพคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน สำหรับระบบโมเมนตัมใหญ่บางส่วน

1.2.2 เพื่อลดการใช้พลังงานเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลด้วยระบบโมเมนตัมใหญ่บางส่วน สำหรับบริการ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การใช้ระบบโมเมนตัมใหญ่โครงสร้างบางส่วน สามารถลดการใช้พลังงานและเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลได้

1.3.2 ระบบโมเมนตัมใหญ่โครงสร้างบางส่วน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งานได้ดีกว่าโครงสร้างสมบูรณ์

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ใช้เทคนิคการเข้ารหัสแบบไฮบริดสำหรับโครงสร้างบางส่วนของระบบโมเมนตัมใหญ่

1.4.2 การศึกษาคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากปริทัศน์วรรณกรรม

1.4.3 จำลองระบบการสื่อสารโดยใช้โปรแกรม MATLAB

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 แสดงให้เห็นว่าเข้ารหัสแบบบางส่วนของ ระบบโมเมนตัมใหญ่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพคุณภาพประสบการณ์ผู้ใช้งาน

1.5.2 สามารถลดการใช้พลังงาน เพิ่มอัตราการส่งข้อมูลด้วยระบบโมเมนตัมใหญ่แบบบางส่วนสำหรับบริการ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 ศึกษาสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.2 ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณเทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าของระบบโมเมนตัมใหญ่ที่ใช้ในการสื่อสารใน 5G

1.6.3 ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณเพื่อเพิ่มคุณภาพประสบการณ์ผู้ใช้งาน

1.6.4 ออกแบบเงื่อนไขของระบบที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณภายใต้ข้อจำกัดพลังงานเพื่อเพิ่มคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน

1.6.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงาน และคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของผู้ใช้งานเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 5 บทด้วยกัน

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงานวิจัยและการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบโมเด็มขนาดใหญ่ เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าและทฤษฎีที่เกี่ยวกับพารามิเตอร์ในการใช้วัดประสิทธิภาพของสัญญาณ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานในการออกแบบระบบโมเด็มขนาดใหญ่ด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดโครงสร้างบางส่วน และการนำมาพิจารณากับโมเดลของคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของบริการเครือข่าย

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลอง การวิเคราะห์ และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านต่างๆ ทั้งการเพิ่มจำนวนสายอากาศ การสูญเสียเส้นทางจากปัจจัยภายในอาคารและภายนอกอาคาร ประสิทธิภาพด้านพลังงาน และคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยที่มีต่อบริการเครือข่าย

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

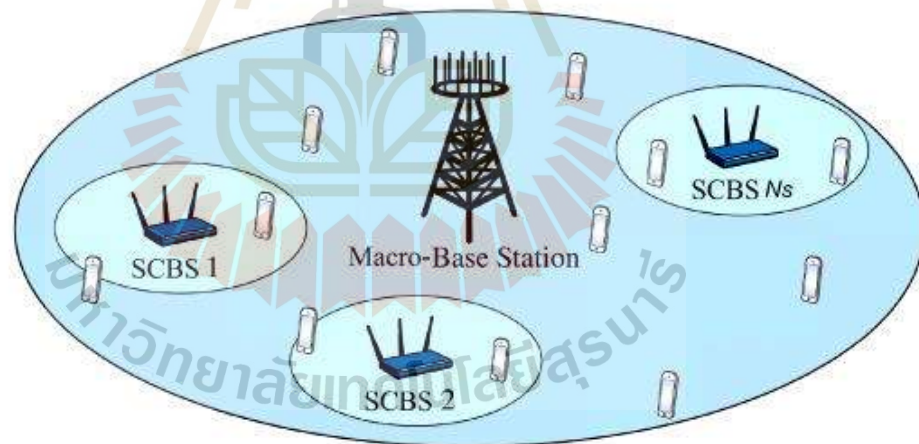
#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสาร 5G จากที่มีประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่สูงมาก และสามารถรองรับความหนาแน่นของผู้ใช้งานได้เพิ่มขึ้นในการเชื่อมต่อเพื่อใช้งานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นตาม เพื่อลดการใช้พลังงานของระบบการสื่อสาร 5G แต่ยังสามารถให้ประสิทธิภาพในการสื่อสารที่สูง การปรับปรุงประสิทธิภาพในส่วนของ การเข้ารหัสล่วงหน้าจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบการสื่อสาร 5G เพื่อลดการใช้พลังงาน เพิ่มอัตราการส่งข้อมูล และยังเพิ่มความพึงพอใจหรือคุณภาพประสบการณ์ผู้ใช้งาน (QoE) โดยการปรับปรุงในส่วนของคุณภาพบริการของเครือข่าย (QoS) ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้จะกล่าวในหัวข้อถัดไปตามลำดับ

#### 2.2 ระบบการสื่อสารในยุค 5G

MIMO เป็นเทคนิคที่ใช้มาตั้งแต่ยุค 4G โดยใช้สายอากาศที่มากกว่า 1 ต้น ในการรับส่งสัญญาณทั้งแบบ 2T2R, 4T4R, และ 8T8R เป็นต้น จึงทำให้มีความสามารถในการรองรับผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ในปัจจุบันมีจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการอัดแน่นอยู่บนคลื่นความถี่วิทยุเดียวกันทำให้มีแบนด์วิธที่น้อยลง ปัญหาที่ตามมาคือการใช้งานเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมีความติดขัด ต่อมาจึงได้มีการพัฒนามาสู่ยุค 5G ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า ไมโมขนานใหญ่ ด้วยจำนวนสายอากาศที่มากขึ้นทั้งแบบ 32T32R, 64T64R, และ 256T256R เป็นต้น ทำให้สามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากกว่า 4G หลายเท่าด้วยการใช้งานบนความถี่เดียวกัน [4] ทั้งยังมีเทคโนโลยีที่มาช่วยเพิ่มขีดความสามารถของระบบ เช่น คลื่นมิลลิเมตร ทำให้มีแบนด์วิธที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลและยังเพิ่มความจุช่องสัญญาณอีกด้วย ที่มีการทำงานร่วมกับเทคโนโลยี ลำแสงบีม (Beamforming) ที่สามารถระบุเส้นทางการส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพที่สุดให้ผู้ใช้งานและลด

สัญญาณรบกวนจากผู้ใช้งานอื่นที่อยู่ใกล้เคียงได้อีกด้วย และในพื้นที่ทางกายภาพเดียวกันเนื่องจากมีสายอากาศเพิ่มมากขึ้นย่อมมีทิศทางการส่งสัญญาณที่มากขึ้นด้วย ดังนั้น ลำแสงบีมจึงมีหน้าที่สำคัญมากในระบบโมโนขนานใหญ่ซึ่งลำแสงบีมที่เหมาะสมในการใช้งานก็ต้องเกิดจากการออกแบบระบบในส่วนการเข้ารหัสส่งที่ตีด้วย และเทคโนโลยีอีกตัวที่สำคัญของระบบ 5G ก็คือ เซลล์ขนาดเล็ก ด้วยคลื่นมิลลิเมตรมีความถี่ที่สูงมาก ทำให้กระจายสัญญาณได้ระยะสั้น จึงผ่านตึกหรืออาคารได้ไม่ค่อยดี เซลล์ขนาดเล็กจึงถูกออกแบบมาทำหน้าที่รับและขยายสัญญาณจากสถานีฐาน (Base Station) เพื่อส่งสัญญาณให้แก่ผู้ใช้งานเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งได้มีงานวิจัย [5] ที่ได้ทำการคำนวณการใช้พลังงานของเซลล์ขนาดเล็ก ซึ่งพบว่ามีการใช้พลังงานที่สูงกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานทั้งหมดจากสถานีฐาน นอกจากพลังที่เพิ่มขึ้นจากเซลล์ขนาดเล็กแล้ว ยังมีพลังงานที่เพิ่มจากจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้นในระบบการสื่อสารของโมโนขนานใหญ่ 5G ด้วย ดังนั้นจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัยเพื่อที่จะต้องการลดการใช้พลังงานของระบบการสื่อสารในยุค 5G



รูปที่ 2.1 การรับและขยายสัญญาณของเซลล์ขนาดเล็กจากสถานีฐานเพื่อส่งสัญญาณให้แก่อุปกรณ์ผู้ใช้งาน [3]

## 2.3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 ช่องสัญญาณไมโมขนานใหญ่ (Massive MIMO Channel)

สำหรับระบบการสื่อสารไมโมขนานใหญ่ด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ความถี่ตั้งฉาก (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing : OFDM) ที่จะสามารถใช้แบนด์วิธ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ให้อัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่สูง มีความคงทนต่อสัญญาณรบกวน ออกแบบง่ายลดความซับซ้อนของระบบ เมื่อ  $N_T$  คือจำนวนสายอากาศภาคส่ง และ  $N_R$  คือจำนวนสายอากาศภาครับ โดยมีสมการสัญญาณภาครับเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{N_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & \cdots & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{N_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปย่อได้ดังนี้

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\mathbf{s}$  คือสัญญาณภาคส่ง โดยที่  $\mathbf{n}$  คือสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ (Additive White Gaussian Noise : AWGN) โดยที่  $\mathbf{n} \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I}_{N_R})$  เมื่อ  $\sigma^2$  คือ การสูญเสียทั่วไป และ  $\mathbf{H}$  คือเมทริกซ์ของช่องสัญญาณโดยที่ภาคส่งรู้ข้อมูลข่าวสารของช่องสัญญาณ (Channel State Information : CSI) ระหว่างสถานีฐานและอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน หาได้จากสมการ [2]

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_T N_R P_k}{N_{cl} N_{ray}}} \sum_{c=0}^{N_{cl}} \sum_{r=1}^{N_{ray}} \alpha_{cr} \mathbf{a}_r(\theta_{cr}) \mathbf{g}_{cr}^H e^{-\frac{j2\pi cr}{K}} \quad (2.3)$$

โดยที่	$p_k$	คือ การสูญเสียเส้นทางระหว่างภาคส่งและภาครับ
	$N_{cl}$	คือ จำนวนคลัสเตอร์ระหว่างภาคส่งและภาครับ
	$N_{ray}$	คือ จำนวนรังสี (rays) ในแต่ละคลัสเตอร์ระหว่างภาคส่งและภาครับ
	$\alpha_{cr}$	คือ อัตราขยายของรังสีในคลัสเตอร์
	$a_r$	คือ มุมเวกเตอร์ของสายอากาศภาคส่ง
	$\theta_{cr}$	คือ มุมขาออก (Angles of Departure : AoDs)
	$\vartheta_{cr}$	คือ มุมขาเข้า (Angles of Arrival : AoAs)
	$(\cdot)^H$	คือ conjugate transpose

### 2.3.2 การสูญเสียเส้นทาง (Path Loss)

เมื่อมีการส่งสัญญาณสำหรับการสื่อสารจากภาคส่งไปยังภาครับ จะต้องเกิดการลดทอนของกำลังส่งการลดทอนนี้ก็คือ การสูญเสียเส้นทาง (Path Loss) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียเส้นทาง เช่น ความสูงของสถานีฐาน ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ และความถี่ เป็นต้น ซึ่งการสูญเสียเส้นทางส่วนใหญ่จะพิจารณาจาก ภายในอาคาร (Indoor) และภายนอกอาคาร (Outdoor) ซึ่งการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับจะมีลักษณะอยู่ 2 แบบที่รู้จักกันคือ แบบแนวสายตา (Line of Sight : LoS) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ โดยปราศจากสิ่งกีดขวาง และแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (Non line of Sight : NLoS) เกิดจากระหว่างภาคส่งถึงภาครับมีสิ่งกีดขวางอยู่ เช่น ตึก อาคาร หรือภูเขา โดยสัญญาณที่ได้รับจะมาจากหลายทิศทาง เช่น การสะท้อน (Reflection) ผ่านสิ่งกีดขวาง (Diffraction) เป็นต้น สมการคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณการสูญเสียเส้นทางมีอยู่หลายตัว ซึ่งการนำมาใช้ก็ขึ้นอยู่กับการศึกษาพารามิเตอร์หรือสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง จากงานวิจัย [6] ก็ทำการจำลองการส่งสัญญาณโดยมีการพิจารณาการสูญเสียเส้นทางทั้ง ภายในอาคาร และภายนอกอาคาร ซึ่งก็ได้มีการนำสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียเส้นทางมาถึง 9 แบบเพื่อหาสมการที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและความแม่นยำ โดยจากการศึกษาผู้วิจัยก็ได้นำสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียเส้นทางภายในอาคารดังสมการที่ 2.4 [7]

$$PL_{indoor} = L(d_0) + N \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + L_f(n) \quad (2.4)$$

กรณีการสูญเสียเส้นทางภายนอกอาคารดังสมการที่ 2.5 [8]

$$PL_{outdoor} = 10\alpha \log(d) + \beta + 10\gamma \log(f) \quad (2.5)$$

โดยที่  $L(d_0)$  คือ การสูญเสียของการส่งสัญญาณเมื่อ  $d_0$  เป็นระยะอ้างอิงที่ 1 เมตร โดยให้การแพร่กระจายในอากาศว่าง (free-space propagation)  $L(d_0)$  หาได้จากสมการ 2.6

$$L(d_0) = 20 \log f - 28 \quad (2.6)$$

- $d_0$  คือ ระยะอ้างอิง (m)
- $N$  คือ ระยะทางของสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (power loss coefficient)
- $d$  คือ ระยะทางจากสถานีฐานและอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (m)
- $L_f$  คือ ปัจจัยการสูญเสียจากการแทรก (penetration loss factor)
- $n$  คือ จำนวน floors ระหว่างสถานีฐานและอุปกรณ์ผู้ใช้งาน
- $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มขึ้นจากการสูญเสียการส่งสัญญาณกับระยะทาง
- $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าออฟเซตของการสูญเสียการส่งสัญญาณ
- $\gamma$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มขึ้นจากการสูญเสียการส่งสัญญาณกับความถี่
- $f$  คือ ความถี่ (MHz)

### 2.3.3 สลายตัวค่าเอกพจน์ของช่องสัญญาณ (Singular Value Decomposition : SVD)

สลายตัวค่าเอกพจน์ คือเทคนิคการแยกตัวประกอบของเมทริกซ์ ออกมาในรูปผลคูณของเมทริกซ์ 3 ตัว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้สำหรับลดหน่วยความจำแต่ยังคงประสิทธิภาพของข้อมูล ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Perform Principle Component Analysis : PCA) เป็นต้น โดยการสลายตัวค่าเอกพจน์ของช่องสัญญาณสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H \quad (2.7)$$

โดยที่  $\mathbf{U}$  คือ เมทริกซ์ขนาด  $N_T \times N_T$   
 $\Sigma$  คือ เมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix) โดยที่จำนวนจริงเป็นบวกมีขนาด  $N_T \times N_R$   
 $\mathbf{V}$  คือ เมทริกซ์ขนาด  $N_R \times N_R$

### 2.3.4 การวัดระยะห่างแบบยูคลิเดียน (Euclidean Distance)

ระยะห่างแบบยูคลิเดียน [9] คือ การวัดระยะทางระหว่างจุด 2 จุดหรือข้อมูล 2 ชุด ด้วยทฤษฎีบทพีทาโกรัส โดยระยะทางแบบยูคลิเดียนจะเป็นการคำนวณค่ารากที่สองของผลรวมของผลต่างกำลังสองระหว่างข้อมูลทั้งสอง ซึ่งถ้าข้อมูลทั้ง 2 มีค่าคล้ายกันมาก แสดงว่าข้อมูลจะอยู่ใกล้กันแล้วจะทำให้ค่ายูคลิเดียนมีค่าน้อย เข้าใกล้ศูนย์ สมการของการวัดระยะห่างแบบยูคลิเดียนเขียนได้ดังนี้

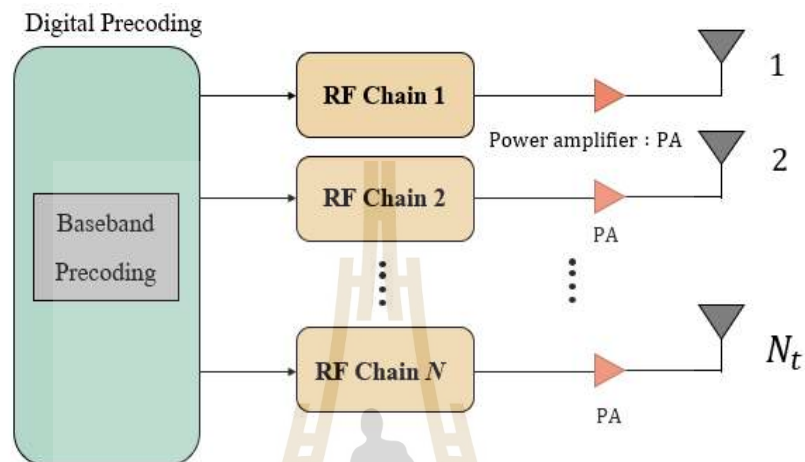
$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (2.8)$$

โดยที่  $D$  คือ ระยะห่างแบบยูคลิเดียนระหว่างข้อมูลทั้ง 2 ชุด  
 $n$  คือ จำนวนมิติ  
 $a_i, b_i$  คือ ชุดข้อมูล

## 2.4 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding Technique)

ลำแสงบีม (Beamforming) หรือ การเข้ารหัสล่วงหน้า (Precoding) สามารถนิยามได้ว่าเป็นความหมายที่เหมือนกันในทางเทคนิค [10] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญในระบบโมโนขนานใหญ่ โดยการเข้ารหัสล่วงหน้าจำเป็นจะต้องรู้ข้อมูลข่าวสารของช่องสัญญาณ (CSI) สามารถใช้ได้ทั้งในสถานการณ์แบบแนวสายตา (Line of Sight : LoS) และแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (Non Line of Sight : NLoS) การเข้ารหัสล่วงหน้าจะมีการประมวลผลที่เครื่องส่งสัญญาณในส่วนของเบสแบนด์ ดิจิตอล และสายอากาศแต่ละตัวจะทำการส่งสัญญาณออกไปยังอุปกรณ์ใช้งาน ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้

ระบบโมโฆขนานใหญ่มีประสิทธิภาพในการรับ-ส่งข้อมูลที่สูงและมีความแม่นยำ โดยการเข้ารหัสล่วงหน้าในระบบโมโฆขนานใหญ่จะสามารถแบ่งออกได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 การเข้ารหัสแบบดั้งเดิมของระบบโมโฆขนานใหญ่

#### 2.4.1 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดั้งเดิม (Conventional Precoding)

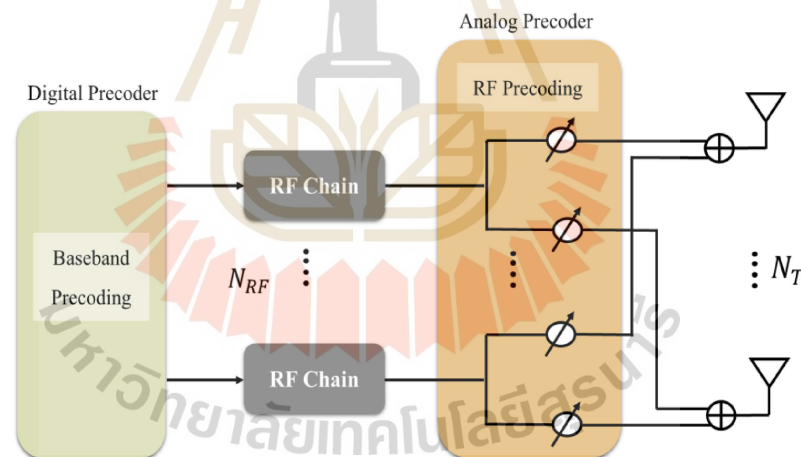
สำหรับระบบการสื่อสารโมโฆขนานใหญ่ เดิมมีการเข้ารหัสล่วงหน้าแค่ในส่วนของเบสแบนด์ดิจิทัลเท่านั้น โดยสายอากาศแต่ละต้นจะมีห้วงโซ่ RF เชื่อมต่อโดยตรงทำให้มีประสิทธิภาพในการรับ-ส่งข้อมูลที่สูง แต่ด้วยในระบบโมโฆขนานใหญ่มีจำนวนสายอากาศที่มากจึงต้องใช้จำนวนห้วงโซ่ RF ที่มากตาม ส่งผลให้การใช้พลังงานก็มากตามไปด้วย และทำให้ภายในระบบดิจิทัลมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น [11] ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจากเทคโนโลยีคลื่นมิลลิเมตรมีข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ที่ไม่ควรแยกการทำงานของห้วงโซ่ RF และการแปลงสัญญาณข้อมูลจากสายอากาศแต่ละต้นซึ่งข้อจำกัดมีดังนี้ [4]

1. ห้วงโซ่ RF แต่ละตัวต้องการพลังงานจากตัวขยายสัญญาณ (Power amplifier) และตัวขยายสัญญาณต้องมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำ
2. มีการใช้พลังงานที่สูงมากขึ้นในการแปลงจากสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก และแปลงจากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล
3. พื้นที่กายภาพเดียวกันมีจำนวนสายอากาศที่มากขึ้นและอยู่ใกล้กัน ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดที่ไม่ควรเชื่อมต่อห้วงโซ่ RF แต่ละตัวกับสายอากาศ

ดังนั้นจากข้อจำกัดที่กล่าวมาในข้างต้นปัจจุบันการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดั้งเดิมจึงเริ่มได้รับความสำคัญน้อยลงเมื่อเทคโนโลยีคลื่นมิลลิเมตรถูกนำมาใช้ในระบบโมโนแบนด์ใหญ่ และจึงได้มีการพัฒนาสถาปัตยกรรมใหม่ที่เหมาะสมกับคลื่นมิลลิเมตรซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 2.4.2 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด (Hybrid Precoding)

การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดเป็นการทำงานร่วมกันของเบสแบนด์ดิจิทัล และ RF อนุาล็อก ที่ห้วงโซ่ RF 1 ตัวสามารถรองรับจำนวนสายอากาศได้หลายตัว ทำให้สามารถลดจำนวนของห้วงโซ่ RF ทำให้การใช้พลังงานก็ลดลงและยังลดความซับซ้อนของระบบโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการรับ-ส่งข้อมูล [12] ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานสำหรับเทคโนโลยีคลื่นมิลลิเมตร โดยเบสแบนด์ดิจิทัลจะทำหน้าที่ออกแบบสัญญาณจากนั้นจะส่งข้อมูลต่อให้ห้วงโซ่ RF เพื่อนำไปประมวลผลต่อในส่วนอนุาล็อก โดยในการเข้ารหัสแบบอนุาล็อกจะใช้ตัวเปลี่ยนเฟส (Phase shifter) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณก่อนที่จะส่งออกไปยังอุปกรณ์ผู้ใช้งาน การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดจะมีอยู่ 2 โครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสมบูรณ์ของการเข้ารหัสแบบไฮบริด



#### 2.4.2.1 การเข้ารหัสล่วงหน้าโครงสร้างสมบูรณ์ (Fully Structure Precoding)

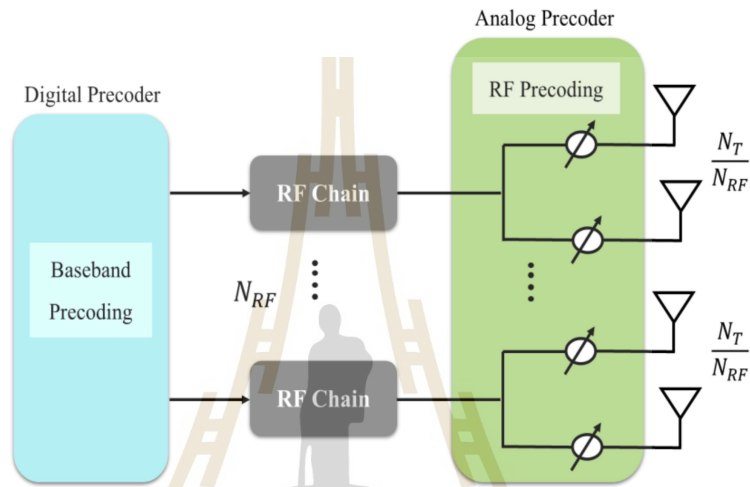
โครงสร้างแบบสมบูรณ์ในการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดจะให้ประสิทธิภาพให้การส่งข้อมูลที่สูงด้วยจำนวนท่วงโซ่ RF ที่ไปเชื่อมต่อกับสายอากาศทุกตัวในการประมวลผลของส่วนอนาล็อก โดยตัวเปลี่ยนเฟสของโครงสร้างสมบูรณ์ ซึ่งก็ทำให้มีการใช้พลังงานที่สูงขึ้นเพราะการเชื่อมต่อท่วงโซ่ RF ที่มากจะเพิ่มความซับซ้อนในส่วนของการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบอนาล็อก มีความจุช่องสัญญาณที่สูงขึ้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนทำให้ระบบฮาร์ดแวร์มีความซับซ้อนเพราะต้องมีการควบคุมการทำงานที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.3 แต่ถ้าเทียบกับการเข้ารหัสแบบดั้งเดิมที่มีการประมวลผลแค่ดิจิทัล โครงสร้างแบบสมบูรณ์ก็ยังมีค่าความซับซ้อนที่น้อยกว่า โดยโครงสร้างของส่วน RF อนาล็อก ( $\mathbf{F}_{RF}$ ) สามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{F}_{RF} = [f_{RF,1}, f_{RF,2}, \dots, f_{RF,N_{RF}}] \quad (2.9)$$

#### 2.4.2.2 การเข้ารหัสล่วงหน้าโครงสร้างบางส่วน (Partially Structure Precoding)

โครงสร้างบางส่วนจะให้ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ เนื่องจากโครงสร้างบางส่วนจะเป็นการเชื่อมต่อแบบจับกลุ่มย่อยกับสายอากาศ (Sub-antenna) โดยที่ท่วงโซ่ RF ไม่ต้องเชื่อมต่อกับสายอากาศทุกตัว ดังรูปที่ 2.4 ด้วยเหตุนี้โครงสร้างบางส่วนจึงสามารถลดความซับซ้อนของระบบ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าโครงสร้างแบบสมบูรณ์ และมีงานวิจัยมากมายที่ใช้การเข้ารหัสล่วงหน้าของโครงสร้างบางส่วน มาใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายโมเด็มขนาดใหญ่ เพื่อลดต้นทุนและลดความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ [13]-[14] โดยอัลกอริทึมที่นำมาใช้กับโครงสร้างบางส่วนที่นิยมกันเช่น อัลกอริทึม SDR (Semidefinite Relaxation) โครงสร้างของการเข้ารหัสล่วงหน้า RF อนาล็อก ( $\mathbf{F}_{RF}$ ) จะเป็นเมทริกซ์แบบบล็อก (Block diagonal matrix)  $\mathbf{F}_{RF} = \text{diag}\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_{RF}\}$  เมื่อ  $f_i = (N_T / N_{RF})$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.10 ดังนี้

$$\mathbf{F}_{RF} = \begin{bmatrix} f_{RF,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f_{RF,2} & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & f_{RF,N_{RF}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.4 โครงสร้างบางส่วนของการเข้ารหัสแบบไฮบริด

## 2.5 ช่องสัญญาณไม่โมฆานใหญ่ด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด (Massive MIMO Channel with Hybrid Precoding)

จากการศึกษาการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด ช่องสัญญาณสำหรับไม่โมฆานใหญ่ตามสมการที่ 2.2 จะมีตัวแปรของพารามิเตอร์เพิ่มเข้ามาในส่วนเบสแบนด์ดิจิทัล และ RF อนุภาคที่ต้องสอดคล้องกับการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด ดังนั้นสมการช่องสัญญาณไม่โมฆานใหญ่ด้วยการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2.11)$$

### 2.5.1 อัตราการส่งข้อมูล (Data Rate)

อัตราการส่งข้อมูลในหัวข้อนี้ก็คือหลักการเดียวกับทฤษฎี Shannon [29] จากการทำงานจริงของระบบการสื่อสารเมื่อมีการส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับย่อมมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นจึงพัฒนามาเป็นสมการหาความจุช่องสัญญาณ (Capacity) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการส่งข้อมูลในหน่วยบิตต่อสัญญาณรบกวน โดยอัตราการส่งข้อมูลนี้ก็เปรียบเสมือนการดูความสามารถของระบบการสื่อสารที่รับ-ส่งข้อมูลได้สำเร็จ สมการเขียนได้ดังนี้

$$DR = BW \log_2 (1 + SINR) \quad (2.12)$$

โดยที่	$DR$	คือ อัตราการส่งข้อมูล (bps)
	$BW$	คือ แบนด์วิธ (Hz)
	$SINR$	คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise Ratio)

จากสมการที่ 2.12 เมื่อค่า  $SINR$  มากขึ้นจะส่งผลให้มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง มีความผิดพลาดน้อยลงในระบบการสื่อสาร นอกจากนี้อัตราการส่งข้อมูลยังมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการส่งข้อมูล (Spectral Efficiency) คือปริมาณข้อมูลที่ส่งไปยังอุปกรณ์ผู้ใช้งานต่อแบนด์วิธทั้งหมด ซึ่งก็คืออัตราการส่งข้อมูลหารด้วยแบนด์วิธ  $DR/BW$  (bps/Hz)

### 2.5.2 ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency)

จากระบบโมบายขนาดใหญ่มีจำนวนสายอากาศที่มากขึ้น ส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบมีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพพลังงานเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาการส่งข้อมูลของระบบสื่อสารที่แสดงถึงการประหยัดพลังงาน จากความสามารถในการส่งข้อมูลที่สูงและยังใช้พลังงานที่น้อยลง ดังนั้นประสิทธิภาพพลังงานจึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการส่งข้อมูลหารด้วยพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในภาคส่ง เช่น พลังงานอัตราขยาย พลังงานจากการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก พลังงานของท่วงโซ่ RF เป็นต้น โดยสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$EE = \frac{DR}{P_{total}} \quad (2.13)$$

โดยที่  $EE$  คือ ประสิทธิภาพพลังงาน (bps/J)  
 $P_{total}$  คือ พลังงานที่ใช้ทั้งหมดในภาคส่ง (J)

### 2.5.3 พลังงานที่ใช้ทั้งหมดในภาคส่ง (Total Power at Transmitter)

ในส่วนของการเข้ารหัสล่วงหน้าสำหรับระบบโมเดมขนาดใหญ่ ที่มีการประมวลผลทั้งดิจิทัลและอนาล็อก จะมีการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลอยู่หลายส่วน ซึ่งมีการพิจารณาบนฐานข้อมูลงานวิจัยที่ศึกษา [2], [15]-[16] ดังนั้นพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในภาคส่ง  $P_{total}$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{total} = P_{commun} + P_{compu} + P_{fix} \quad (2.14)$$

โดยที่  $P_{commun}$  คือ พลังงานที่ใช้ในการสื่อสาร (Communication power)  
 $P_{compu}$  คือ พลังงานในส่วนการประมวลผลที่เบสแบนด์ดิจิทัล (Computation power)  
 $P_{fix}$  คือ พลังงานคงที่สำหรับภาคส่ง (Fixed power)

เมื่อ พลังงานที่ใช้ในการสื่อสาร  $P_{commun}$  คือ พลังงานจากส่วนของพลังงานอัตราขยาย  $P_{PA}$  และพลังงานของท่วงโซ่ RF  $P_{RF}$  ดังสมการที่ 2.15

$$P_{commun} = P_{PA} + P_{RF} \quad (2.15)$$

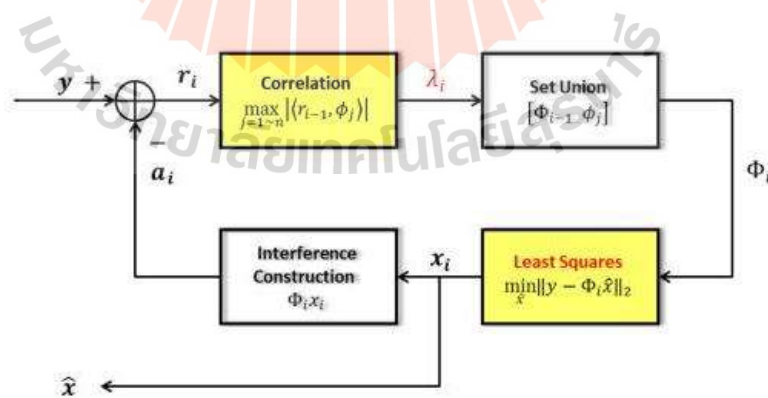
ส่วนพลังงานในส่วนการประมวลผลที่เบสแบนด์ดิจิทัล  $P_{compu}$  คือพลังงานที่ใช้ในการประมวลช่องสัญญาณแบบไร้สาย  $P_{CE}$  พลังงานที่ใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ  $P_{CD}$  พลังงานที่ใช้ในการ

ประมวลผลเชิงเส้นในส่วนเบสแบนด์และ RF  $P_{LP}$  และสุดท้ายคือพลังงานที่ใช้ในอัลกอริทึมที่เรา นำเสนอ  $P_{Complex}$  ดังสมการที่ 2.16

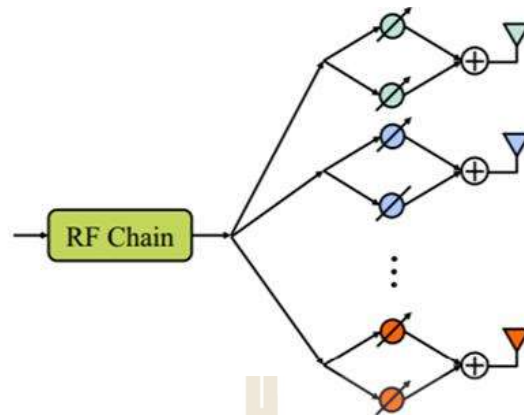
$$P_{compu} = P_{CE} + P_{CD} + P_{LP} + P_{Complex} \quad (2.16)$$

## 2.6 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยอัลกอริทึม OMP (Orthogonal Matching Pursuit Algorithm)

การเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยอัลกอริทึม OMP [17] เดิมมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เป็นการใช้อัลกอริทึม greedy เพื่อวนลูปซ้ำในการหาสัญญาณเบาบาง (Sparse signal) ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจากรูปที่ 2.5 [18] จะมีขั้นตอนในการหาคือ เริ่มต้นจากความสัมพันธ์  $\max_{j=1 \sim n} |(r_{i-1}, \phi_j)|$  หาค่าคอลัมน์ที่มากที่สุด จากนั้นทำการยุบเนียนเซต  $[\Phi_{i-1}, \phi_j]$  และนำมาแก้ปัญหาด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares)  $\min_x \|y - \Phi_i x\|_2$  และทำการอัปเดตค่าข้อมูล  $\Phi_i$  และ ค่าที่เหลือ (Residual)  $x_i$  และสุดท้ายวนลูปจนกว่าจะได้ค่าเอาต์พุตออกมา ซึ่งปัจจุบันวิธีการนี้มีข้อจำกัดในการสร้างสัญญาณเบาบาง และข้อจำกัดในพื้นที่การเข้ารหัสแบบอนาล็อก ส่งผลให้มีการสูญเสียประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล



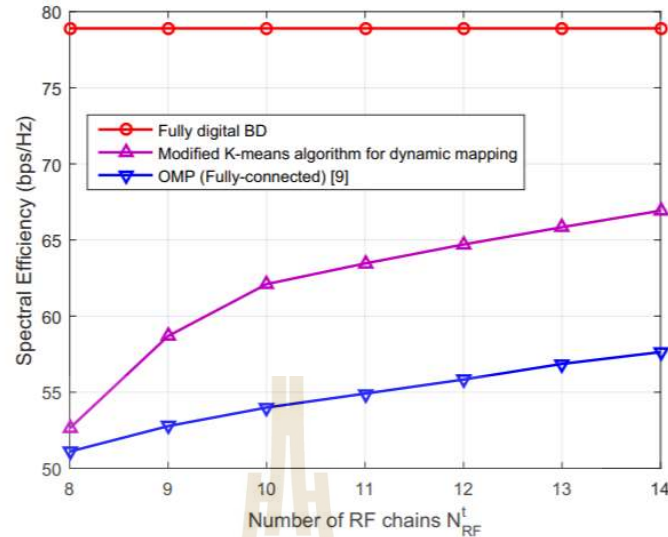
รูปที่ 2.5 การทำงานของอัลกอริทึม OMP [18]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS ในส่วนการเข้ารหัสแบบอนาล็อก [19]

## 2.7 เทคนิคการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยอัลกอริทึม DPS (Double Phase Shifter Algorithm)

จาก [19]-[20] ได้ศึกษาว่าการออกแบบระบบการเข้ารหัสล่วงหน้าส่วนใหญ่จะอยู่ในอนาล็อก ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเปลี่ยนเฟส โดยจากโครงสร้างส่วนใหญ่จะเห็นได้ว่าการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยโครงสร้างบางส่วนจะใช้จำนวนท่วงโซ่ RF ที่น้อย ทำให้ตัวเปลี่ยนเฟสในส่วนของอนาล็อกมีการทำงานที่ง่าย ลดความซับซ้อนของระบบ จึงเป็นส่วนที่ทำให้สามารถประหยัดพลังงาน ดังนั้นจึงมีการนำเสนออัลกอริทึม DPS ร่วมกับ อัลกอริทึม K-means ซึ่งอัลกอริทึม DPS เป็นวิธีการที่ทำในส่วนของตัวเปลี่ยนเฟส มีข้อจำกัดคือจำนวนท่วงโซ่ RF มีแค่ 2 ท่วงโซ่ โดยแต่ละท่วงโซ่จะเชื่อมต่อแบบจับกลุ่มย่อยกับสายอากาศและ 2 ตัวเปลี่ยนเฟส ดังรูปที่ 2.6 และจากผลการทดลองในรูปที่ 2.7 ทำการเปรียบเทียบในด้านประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลก็พบว่าอัลกอริทึม DPS โครงสร้างบางส่วนให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของโครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS กับ โครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP [19]

## 2.8 การพิจารณาประสิทธิภาพของสัญญาณ (Consider Performance of Signal)

### 2.8.1 คุณภาพบริการของเครือข่าย (Quality of Service : QoS)

การพิจารณาประสิทธิภาพของเครือข่ายเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ผู้ประกอบการได้รู้ถึง ปัญหาและความสามารถของระบบสื่อสาร ซึ่งนิยามของตัวชี้วัดนี้ก็คือ คุณภาพบริการของเครือข่าย (QoS) เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่จะตรวจวัดและควบคุมคุณภาพของข้อมูลให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ช่วยจัดสรรทรัพยากรแบนด์วิธ ให้แก่เครือข่าย มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเช่น ความกระวนกระวาย การสูญหายของแพ็กเก็ต ความล่าช้า เป็นต้น โดยพื้นฐานคุณภาพบริการของเครือข่ายสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. การจองทรัพยากรเครือข่าย (Reservation) คือก่อนที่จะเริ่มมีการส่งข้อมูล ทรัพยากรเครือข่ายที่จำเป็นต้องมีการจองก่อนเช่น แบนด์วิธ บัฟเฟอร์และ ความล่าช้า เป็นต้น
2. การจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization) เป็นการจัดลำดับความสำคัญของ ข้อมูล ว่าควรส่งข้อมูลอะไรก่อน-หลัง ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูล โดยปกติแพ็กเก็ต ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นคลาสตามระดับความสำคัญ (Class of Service : CoS) ซึ่งข้อมูลที่อยู่ในคลาสเดียวกันจะมีความสำคัญเท่ากัน

## 2.8.2 ประสบการณ์ผู้ใช้งานและคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (Quality of Experience : QoE and Mean Opinion Score : MOS)

จากที่เราทราบถึงความสำคัญของคุณภาพบริการของเครือข่าย (QoS) ไปแล้วซึ่งเป็นเพียงการวัดคุณภาพโดยรวมของเครือข่ายเท่านั้น จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมืออีกตัวที่สำคัญคือ ประสบการณ์ผู้ใช้งาน (QoE) ซึ่งเครื่องมือทั้งสองตัวนี้จะมีความสัมพันธ์ต่อกันทั้งทางตรง/ทางอ้อมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารและเพื่อให้ผู้ประกอบการเข้าถึงผู้ใช้งานหรือลูกค้ามากขึ้นว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อเครือข่ายเป็นอย่างไร ประสบการณ์ผู้ใช้งานเป็นการบอกคุณภาพโดยรวมของเครือข่าย จากมุมมองของผู้ใช้งาน โดยเป็นตัวชี้วัดแบบ end-to-end ซึ่งการวัดคุณภาพของการบริการเครือข่ายไม่ว่าจะเป็น เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปประสบการณ์ผู้ใช้งานมีวิธีการประเมินอยู่ 2 แบบ คือแบบ Subjective จะเป็นการที่ประเมินจากความรู้สึกของผู้ใช้งานโดยตรงซึ่งวิธีนี้อาจต้องใช้เวลาจำนวนมากเพื่อใช้ในการประเมินความพึงพอใจดังนั้นจึงอาจทำได้ยาก และอีกวิธีหนึ่งคือแบบ Objective เป็นการวัดความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่บนข้อเท็จจริง มีข้อมูลหรือทฤษฎีมารองรับซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายต่อการประเมินและจะต้องมีการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (Mean Opinion Score : MOS) ซึ่งถือว่าเป็นเครื่องมือมาตรฐานตาม ITU-T P.800 [21] ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปจะมีเกณฑ์คะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 5 ดังตารางที่ 2.1 เดิมทีคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยถูกใช้เพื่อวัดแค่คุณภาพของเสียงเท่านั้นในการสื่อสารผ่านโทรศัพท์ แต่ปัจจุบันสามารถนำมาใช้วัดคุณภาพของบริการเครือข่ายได้หลายรูปแบบ ทั้งคุณภาพด้านเสียงที่ได้ฟัง คุณภาพในการสนทนา คุณภาพของวิดีโอและ คุณภาพในการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ตารางที่ 2.1 แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (MOS)	ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน
5	ดีเยี่ยม
4	ดีมาก
3	ดี
2	พอใช้
1	ปรับปรุง



## 2.9 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงระบบการสื่อสารในยุค 5G ในส่วนของหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องคือช่องสัญญาณไม่โมฆนานใหญ่และการสูญเสียเส้นทาง ซึ่งจะมีทั้งการพิจารณาการสูญเสียเส้นทางทั้งแบบภายในอาคารและภายนอกอาคาร เป็นต้น จากนั้นจะกล่าวถึงการเข้ารหัสล่วงหน้าในระบบไม่โมฆนานใหญ่ทั้งแบบดั้งเดิมและแบบไฮบริดรวมถึงศึกษาช่องสัญญาณของการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด โดยจากการศึกษาการเข้ารหัสล่วงหน้าก็จะนำมาซึ่งปัญหาการใช้พลังงานที่สูง นอกจากนี้ยังศึกษาอัลกอริทึมตัวอื่นที่นำมาพิจารณาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ซึ่งก็คืออัลกอริทึม OMP และ DPS สุดท้ายจะเป็นการพูดถึงเครื่องมือในการใช้วัดประสิทธิภาพของเครือข่ายทั้ง คุณภาพบริการของเครือข่าย ประสบการณ์ผู้ใช้งาน และคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเพื่อนำมาใช้เพื่อปรับปรุงระบบการสื่อสารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อไป



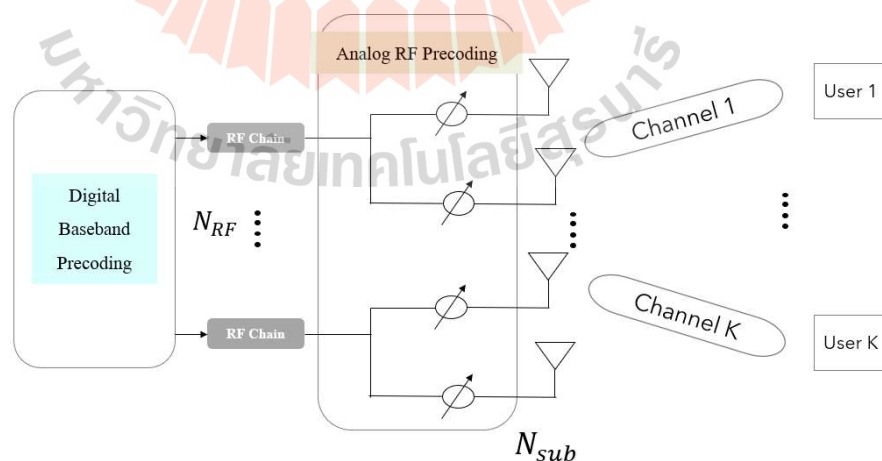
## บทที่ 3

### การออกแบบระบบ

#### 3.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลและการเพิ่มความพึงพอใจให้กับผู้ใช้งาน โดยได้ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยในการจำลองระบบการสื่อสารไม่โมฆานานใหญ่ 5G ซึ่งทางผู้วิจัยได้สนใจในการปรับปรุงการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดโครงสร้างบางส่วน ได้ใช้อัลกอริทึม Alt-Min สำหรับปรับประสิทธิภาพการเข้ารหัสในส่วนของ เบสแบนด์และ RF โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของพลังงาน ซึ่งจากเทคนิคนี้ที่ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลและสามารถลดการใช้พลังงานของโครงสร้างบางส่วนแล้ว จะนำมาเปรียบเทียบกับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP และอัลกอริทึม DPS ของโครงสร้างบางส่วน ทั้งในด้านความสามารถในการประหยัดพลังงาน และความสามารถในการเพิ่มความพึงพอใจของประสบการณ์ผู้ใช้งาน (QoE)

#### 3.2 แบบจำลองระบบไม่โมฆานานใหญ่



รูปที่ 3.1 โครงสร้างบางส่วนของการเข้ารหัสแบบไฮบริดสำหรับระบบไม่โมฆานานใหญ่

จากระบบโมโชนานใหญ่ที่งานวิจัยนี้ทำการศึกษาจะเป็นการพิจารณาแบบดาวนลิงค์ (Downlink : DL) คือการส่งสัญญาณจากสถานีฐานไปยังอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (K) ด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ความถี่ตั้งฉาก (OFDM) สำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยโครงสร้างบางส่วนดังรูปที่ 3.1 โดยที่จำนวนสายอากาศในภาคส่ง  $N_T$  มากกว่า 100 ต้น และจากวัตถุประสงค์ของงานที่ต้องการลดการใช้พลังงานในระบบดังนั้นเราจึงสนใจไปที่การเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยโครงสร้างบางส่วน ที่มีการใช้จำนวนห่วง RF ที่น้อยเพื่อลดความซับซ้อน โดย 1 ห่วงโซ่ RF จะทำการเชื่อมต่อกับจำนวนตัวเปลี่ยนเฟส  $N_{sub} = N_T / N_{RF}$  เมื่อ  $N_{RF}$  คือจำนวนของห่วงโซ่ RF ซึ่งสมการช่องสัญญาณสามารถเขียนได้ดังนี้ [2]

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s} + n_k \quad (3.1)$$

เมื่อ  $k = 1, 2, 3, \dots, K$

โดยที่  $\mathbf{y}_k$  คือ สัญญาณภาครับ  $N_R$   
 $\mathbf{H}_k$  คือ ช่องสัญญาณระหว่างภาคส่งและภาครับ  $N_R \times N_T$   
 $\mathbf{F}_{RF}$  คือ RF อนาล็อก  $N_T \times N_{RF}$   
 $\mathbf{F}_{BB}$  คือ เบสแบนด์ดิจิทัล  $N_{RF} \times K$   
 $\mathbf{s}$  คือ สัญญาณเวกเตอร์ภาคส่งที่มายังอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (K)  
 $n_k$  คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ (AWGN)

โดยที่สัญญาณจากภาคส่ง ช่องสัญญาณ ( $\mathbf{H}_k$ ) RF อนาล็อก ( $\mathbf{F}_{RF}$ ) และเบสแบนด์ดิจิทัล ( $\mathbf{F}_{BB}$ ) จะนำมาหาสมการอัตราการส่งข้อมูลเมื่อเราทำการพิจารณากับจำนวนอุปกรณ์ผู้ใช้งานจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$DR_k = \sum_{k=1}^K BW \log_2 \left( 1 + \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,k} \mathbf{F}_{BB,k}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}_k^H}{\sum_{k=1}^K \sum_{j \neq k} \mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,j} \mathbf{F}_{BB,j}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}_k^H + \sigma_k^2} \right) \quad (3.2)$$

### 3.3 การปรับปรุงคุณภาพการเข้ารหัสล่วงหน้าภายใต้ข้อจำกัดด้านพลังงาน

หัวข้อนี้จะนำเสนอการปรับปรุงคุณภาพสำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยโครงสร้างบางส่วนเพื่อนำไปสู่ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency) เราจะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวิธี Minimizing the Euclidean distance [2], [22] ระหว่างการเข้ารหัสล่วงหน้าดิจิทัลแบบสมบูรณ์ (Fully digital precoding) และการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดของเบสแบนด์ดิจิทัล  $\mathbf{F}_{BBPOWER}$  และ RF อนุภาค  $\mathbf{F}_{RFPOWER}$  โดยสมการเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RFPOWER}, \mathbf{F}_{BBPOWER}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RFPOWER} \mathbf{F}_{BBPOWER}\|_F \\ & \text{เมื่อ} \quad \begin{cases} \mathbf{F}_{RFPOWER} \in \text{diag}\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_{RF}\} \\ \|\mathbf{F}_{RFPOWER} \mathbf{F}_{BBPOWER}\|_F^2 \leq P_c \end{cases} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $P_c$  คือ พลังงานคงที่สำหรับภาคส่ง  
 $\mathbf{F}_{opt}$  คือ การเข้ารหัสล่วงหน้าดิจิทัลแบบสมบูรณ์ ซึ่งหาได้จากช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}_k$  ด้วยวิธีการแยกค่าเอกฐาน

#### 3.3.1 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบอนุภาค

สำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบอนุภาคเป็นส่วนที่ตัวเปลี่ยนเฟสทำหน้าที่ขยายสัญญาณ และขึ้นรูปลำแสงบีบเพื่อใช้ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ผู้ใช้งาน ดังนั้นเมทริกซ์  $\mathbf{F}_{RFPOWER}$  จะมีการเปลี่ยนแค่ส่วนสัญญาณเฟสแต่ในส่วนของสัญญาณแอมพลิจูดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากโครงสร้างของสมการที่ 3.3 ที่มีข้อจำกัดของพลังงานคงที่สำหรับภาคส่ง  $P_c$  ไม่ต้องนำมาคำนวณได้ และกำหนดให้ เบสแบนด์คือค่าคงที่ ซึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของเบสแบนด์และ RF อนุภาค จะทำได้โดยใช้ลกอริทึม Alt-Min ซึ่งในขั้นตอนแรกเราจะทำการปรับปรุงคุณภาพในส่วนของ RF อนุภาคก่อน จะถูกเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\|\mathbf{F}_{RFPOWER} \mathbf{F}_{BBPOWER}\|_F^2 \leq \frac{N_T}{N_{RF}} \|\mathbf{F}_{BBPOWER}\|_F^2 \leq P_c \quad (3.4)$$

โดยเมื่อทำการเขียนในรูปแบบของอัลกอริทึม Alt-Min จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.5

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RFPOWER} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RFPOWER} \mathbf{F}_{BBPOWER}\|_F \\ \text{เมื่อ} \quad & \mathbf{F}_{RFPOWER} \in \text{diag}\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_{RF}\} \end{aligned} \quad (3.5)$$

นอกจากนี้จากคุณสมบัติของคอลัมน์ในสมการที่ 3.4 จะสามารถเขียนสมการของ ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RFPOWER} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RFPOWER} \mathbf{F}_{BBPOWER}\|_F \\ & \text{phase}(\mathbf{F}_{opt}) = \text{phase}(\mathbf{F}_{RFPOWER} \mathbf{F}_{BBPOWER}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่  $\text{phase}(\mathbf{F}_{opt})$  คือ การดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละเฟสของเมทริกซ์ดิจิตอลแบบสมบูรณ์  $\mathbf{F}_{opt}$  และ RF อนุภาค  $\mathbf{F}_{RFPOWER}$  ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \text{phase}(\mathbf{F}_{RFPOWER(i,p)}) &= \text{phase}(\mathbf{F}_{opt(i,:)} \mathbf{F}_{BBPOWER(i,:)}^H) \\ 1 \leq i \leq N_T, p &= \left[ i \frac{N_{RF}}{N_T} \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

### 3.3.2 การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดิจิตอล

ในแบบแบนด์ดิจิตอลจากที่ทำหน้าที่ในการควบคุมกำลังงานภาคส่ง (Transmitted power) โดยการปรับปรุงในส่วนดิจิตอลจะทำการกำหนดค่า RF อนุภาคเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจากสมการที่ 3.3 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{BBPOWER} \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times K}}{\text{minimize}} \quad \left\| \mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RFPOWER} \mathbf{F}_{BBPOWER} \right\|_F \\ & \text{เมื่อ} \quad \left\| \mathbf{F}_{BBPOWER} \right\|_F^2 \leq \frac{N_{RF} P_c}{N_T} \end{aligned} \quad (3.8)$$

ซึ่งจากสมการที่ 3.8 จะมีข้อจำกัดของสมการกำลังสองแบบไม่นูน (Nonconvex Quadratically Constrained Quadratic Program : QCQP) [17] ดังนั้นจะสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n}{\text{minimize}} \quad \text{Tr}(\mathbf{QZ}) \\ & \text{เมื่อ} \quad \begin{cases} \text{Tr}(\mathbf{G}_1 \mathbf{Z}) \leq \frac{N_{RF} P_c}{N_T} \\ \text{Tr}(\mathbf{G}_2 \mathbf{Z}) = 1 \\ \mathbf{Z} = 0 \\ \text{Rank}(\mathbf{Z}) = 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (3.9)$$

โดยที่กำหนดให้  $\mathbf{z} = [\text{vec}(\mathbf{F}_{BBPOWER}) \ t]^T$ ,  $\mathbf{Z} = \mathbf{z}\mathbf{z}^H$ ,  $\zeta = \mathbf{I}_K \otimes \mathbf{F}_{BBPOWER}$ ,  $f_{opt} = \text{vec}(\mathbf{F}_{opt})$ ,  $t^2 = 1$

และ

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 0_{n-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \zeta^H \zeta & -\zeta^H f_{opt} \\ -f_{opt}^H \zeta & f_{opt}^H f_{opt} \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $n = KN_{RF} + 1$  คือ เมทริกซ์เฮอร์มิเทียนเชิงซ้อน (Complex hermitian matrices)

$\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \mathbf{Q}$  คือ เมทริกซ์สมมาตร (Symmetric matrix)

$\mathbf{z}, \zeta, f_{opt}$  คือ เวกเตอร์เชิงซ้อน (Complex vectors)

สำหรับสมการที่ 3.9 ยังมีข้อจำกัดของ  $\text{Rank}(\mathbf{Z}) = 1$  ซึ่งเป็นเรื่องยากในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธี SDP โดยมองข้ามข้อจำกัด  $\text{Rank}(\mathbf{Z}) = 1$  จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n}{\text{minimize}} \quad \text{Tr}(\mathbf{QZ}) \\ \text{เมื่อ} \quad & \begin{cases} \text{Tr}(\mathbf{G}_1 \mathbf{Z}) \leq \frac{N_{RF} P_c}{N_t} \\ \text{Tr}(\mathbf{G}_2 \mathbf{Z}) = 1 \\ \mathbf{Z} \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.10)$$

ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดของส่วนเบสแบนด์ดิจิทัลและ RF อนุภาคที่อยู่ภายใต้พลังงาน เราจะเรียกวิธีการนี้ว่า วิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน (Optimize power)

### 3.4 การปรับปรุงคุณภาพการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยอัลกอริทึม OMP

อัลกอริทึม OMP จะมีการใช้วิธี Minimizing the Euclidean distance สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างการเข้ารหัสล่วงหน้าดิจิทัลแบบสมบูรณ์ (Fully digital precoding) และการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดของเบสแบนด์ดิจิทัล  $\mathbf{F}_{BBOMP}$  และ RF อนุภาค  $\mathbf{F}_{RFOMP}$  ซึ่งอัลกอริทึมนี้จะเป็นโครงสร้างสมบูรณ์ จำนวนตัวเปลี่ยนเฟส  $N_{full} = N_T$  โดยสมการเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RFOMP}, \mathbf{F}_{BBOMP}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RFOMP} \mathbf{F}_{BBOMP}\|_F \\ \text{เมื่อ} \quad & \begin{cases} \mathbf{F}_{RFOMP} \in \mathbf{A}_{RF} \\ \|\mathbf{F}_{RFOMP} \mathbf{F}_{BBOMP}\|_F^2 = N_S \end{cases} \end{aligned} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $\mathbf{A}_{RF}$  คือ ส่วนของ RF อนุภาคโครงสร้างสมบูรณ์  $\mathbf{F}_{RFOMP} = [f_{RF,1}, f_{RF,2}, \dots, f_{RF,N_{RF}}]$  โดยจะมีความสัมพันธ์กับมุมเวกเตอร์ของสายอากาศภาคส่ง  $a_r(\theta_{cr}, \varphi_{cr})$

### 3.5 การปรับปรุงคุณภาพการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยอัลกอริทึม DPS

โครงสร้างบางส่วนสำหรับอัลกอริทึม DPS เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพพร้อมทั้งอัลกอริทึม K-means จำนวนตัวเปลี่ยนเฟส  $N_{sub} = N_T / N_{RF}$  ซึ่งจะเป็นการพิจารณาแบบ fixed mapping โดยสมการเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RF_{DPS}}, \mathbf{F}_{BB_{DPS}}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RF_{DPS}} \mathbf{F}_{BB_{DPS}}\|_F \\ \text{เมื่อ} \quad & \begin{cases} \mathbf{F}_{RF_{DPS}} \in \Delta_{RF} \\ \|\mathbf{F}_{RF_{DPS}} \mathbf{F}_{BB_{DPS}}\|_F^2 \leq KN_{RF} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $\Delta_{RF}$  คือ ส่วนของ RF อนุาล็อกโครงสร้างบางส่วน  $\mathbf{F}_{RF_{DPS}} \in \text{diag}\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_{RF}\}$  โดยมีข้อจำกัดของจำนวนห่วงโซ่ RF  $N_{RF} \leq 2$

จากสมการที่ 3.12 มีหลายองค์ประกอบที่ไม่ใช่ศูนย์ในแต่ละแถวของการเข้ารหัสของส่วน RF อนุาล็อก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 3.13 [20] ดังนี้

$$\underset{\{e_i, c_j\}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{d}_i - e_i c_j\|_F \quad (3.13)$$

$$\text{เมื่อ} \quad i = 1:N_T, j = 1:N_{RF}, \mathbf{d}_i = \mathbf{F}_{opt}^T(i,:), \mathbf{c}_j = \mathbf{F}_{BB}^T(j,:), e_i^* = \frac{\mathbf{c}_j^H \mathbf{d}_i}{\|\mathbf{c}_j\|_2^2}$$

และ  $(\bullet)^T$  คือ transpose

เมื่อนำมาปรับปรุงร่วมกับอัลกอริทึม K-means จะนำมาสู่การแก้ปัญหาเพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุด ดังสมการที่ 3.14



$$\begin{aligned} & \text{maximize} \sum_{j=1}^{N_{RF}} \lambda_j \left( \sum_{i \in D_j} d_i d_i^H \right) \\ \text{เมื่อ} & \begin{cases} \bigcup_{j=1}^{N_{RF}} D_j = \{1, \dots, N_T\} \\ D_j \cap D_k = \emptyset, \forall_j \neq k \end{cases} \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $D_j$  คือ เซตของจำนวนสายอากาศที่แมปรวมกับจำนวนห่วงโซ่ RF

$$\text{โดยที่ค่า Centroid : } c_j^* = \lambda_j \left( \sum_{i \in D_j} d_i d_i^H \right)$$

$$\text{Clustering : } j^* = \arg \max_j |d_i^H c_j|$$

### 3.6 การพิจารณาบริการเครือข่ายแก่ผู้ใช้งาน

ปัจจุบันการใช้งานอินเทอร์เน็ตกลายเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวัน จากที่ระบบโมเด็มขนาดใหญ่มีความสามารถในการรองรับผู้ใช้งานเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้มากขึ้น ซึ่งบริการสำหรับอินเทอร์เน็ตมีอยู่มาก ทั้งด้านการศึกษา ด้านความบันเทิง ตัวอย่าง เช่น การเรียนผ่านออนไลน์ การซื้อของออนไลน์ การดาวน์โหลดข้อมูล ฟังเพลง ดูวิดีโอ และเล่นเกม เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้เราจะสนใจไปที่ 3 บริการที่มีผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตสนใจมาก [3] คือ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต เพื่อนำมาวัดความพึงพอใจของประสบการณ์ผู้ใช้งานที่มีต่อประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของเครือข่ายหรือคุณภาพบริการของเครือข่าย

#### 3.6.1 บริการเว็บเบราว์เซอร์

การท่องเว็บเป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตเข้าถึงได้ง่าย อาจใช้เพื่อหาข้อมูล หรือการนำมาทำโฮมเพจเพื่อทำธุรกิจค้าขายออนไลน์ ภายในเว็บอาจจะมีทั้งข้อมูล รูปภาพ หรือแม้แต่ระบบมัลติมีเดียต่างๆ ในการเข้าถึงเว็บเบราว์เซอร์จะใช้โพรโทคอล HTTP ดังนั้นจากที่มีผู้ใช้งานบริการเว็บเบราว์เซอร์มาก เราจึงนำมาใช้ในการพิจารณากับประสบการณ์ผู้ใช้งานที่มีต่อเครือข่าย โดยสมการของบริการเว็บเบราว์เซอร์สามารถเขียนในรูปของคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยได้ดังนี้ [23]

$$MOS_{web} = -K_1 \ln(d(R_{web})) + K_2 \quad (3.15)$$

โดยที่  $MOS_{web}$  คือ คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของบริการเว็บเบราว์เซอร์ตามตารางที่ 3.1  
 $K_1, K_2$  คือ ค่าคงที่ ที่ทำให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1-5  
 $d(R_{web})$  คือ มีความสัมพันธ์กับปัจจัยกับบริการเว็บเบราว์เซอร์ เช่น เวลาไปกลับ ( $RTT$ ) ขนาดหน้าเว็บ (web page size :  $FS$ ) อัตราการข้อมูล ( $DR$ ) ขนาดเซ็กเมนต์สูงสุด ( $MSS$ ) โดยสมการเขียนได้ดังนี้

$$d(R_{web}) = 3RTT + \frac{FS}{DR} + L \left( \frac{MSS}{DR} + RTT \right) - \frac{2MSS(2^L - 1)}{DR} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $L = \min[L_1, L_2]$  คือ พารามิเตอร์ของจำนวนการเริ่มต้นซ้ำๆ ในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตกับช่วงเวลาหาได้ในสมการที่ 3.15 และ 3.16

$$L_1 = \log_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{DR \cdot RTT}{2MSS} \right) \quad (3.17)$$

$$L_2 = \log_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{FS}{4MSS} \right) \quad (3.18)$$

โดยที่  $L_1$  คือ จำนวนรอบในการเดินทางไปยัง bandwidth-delay product  
 $L_2$  คือ จำนวนรอบในการเดินทางไปยังขนาดหน้าเว็บ  $FS$

สำหรับระบบการสื่อสารไม่โมฆนานใหญ่ 5G เวลาไปกลับ ( $RTT$ ) มีขนาดเล็กมาก [5] และจากการที่เราทำการพิจารณาบริการสำหรับอินเทอร์เน็ตกับผู้ใช้งานเพียงไม่กี่คน ดังนั้นบริการเว็บเบราว์เซอร์จากสมการที่ 3.15 สามารถเขียนสมการได้ใหม่คือ

$$MOS_{web} = K_1 \ln \left( \frac{DR_k}{FS_k} \right) + K_2 \quad (3.19)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งานของบริการเว็บเบราว์เซอร์ [23]

คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (MOS)	ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน	ประสิทธิภาพการส่งข้อมูล (bps/Hz)
5	ดีเยี่ยม	มากกว่า 7
4	ดีมาก	5-7
3	ดี	3-5
2	พอใช้	2-3
1	ปรับปรุง	น้อยกว่า 2

จากตารางที่ 3.1 ที่แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งานของบริการเว็บเบราว์เซอร์ เราจะนำมาพิจารณากับสมการที่ 3.19 และจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์  $K_1$ ,  $K_2$  เพื่อให้ได้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ 1-5 ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลคืออัตราการส่งข้อมูลหารด้วยแบนด์วิธ (bps/Hz) เราจะกำหนดให้  $SE = \frac{DR_k}{BW}$  จะสามารถหาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MOS_{web}(SE_k) = \begin{cases} 1 & ; SE_k \leq SE_1 \\ K_1 \ln \left( \frac{SE_k \cdot BW}{FS_k} \right) + K_2 & ; SE_1 < SE_k < SE_{4.5} \\ 4.5 & ; SE_k \geq SE_{4.5} \end{cases} \quad (3.20)$$

### 3.6.2 บริการวิดีโอ

บริการเครือข่ายของวิดีโอเป็นอีกหนึ่งบริการที่ปัจจุบันถือว่ามีผู้ใช้งานนิยมมากในระบบออนไลน์พอๆกับการดูโทรทัศน์ และในระบบ 5G สามารถให้คุณภาพความชัดของภาพในระดับ HD โดยบริการนี้เราจะศึกษาการบีบอัดวิดีโอของ H.264/AVC ด้วยความสามารถการบีบอัดข้อมูลเพื่อ

ส่งผ่านเครือข่ายให้มีขนาดที่เล็กลงแต่ยังให้ความละเอียดของภาพที่สูง ทำให้สามารถดูวิดีโอได้อย่างราบรื่น และยังใช้แบนวิธที่น้อยลงด้วย ซึ่งได้ใช้  $PSNR$  มาวัดคุณภาพของ ซึ่งสมการสามารถเขียนได้ดังนี้ [3]

$$MOS_{video} = d \log(PSNR) + e \quad (3.21)$$

โดยที่  $MOS_{web}$  คือ คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของบริการวิดีโอตามตารางที่ 3.2  
 $d, e$  คือ ค่าคงที่ ที่ทำให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1-5  
 $PSNR$  คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (Peak Signal to Noise Ratio) (dB) โดย  $PSNR$  สามารถหาได้จากสมการ 3.21

$$PSNR = m + n \sqrt{\frac{DR_k}{p} \left(1 - \frac{p}{DR_k}\right)} \quad (3.22)$$

โดยที่  $m, n$  และ  $p$  คือ พารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยในการสตรีมมิ่งวิดีโอ [24]

เมื่อพิจารณาตารางที่ 3.2 ที่แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งานของบริการวิดีโอกับสมการที่ 3.21 เพื่อให้ได้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ 1-5 และจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์  $d, e$  จะสามารถหาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MOS_{video}(PSNR_k) = \begin{cases} 1 & ; PSNR_k \leq PSNR_1 \\ d \log(PSNR) + e & ; PSNR_1 < PSNR_k < PSNR_{4.5} \\ 4.5 & ; PSNR_k \geq PSNR_{4.5} \end{cases} \quad (3.23)$$

ตารางที่ 3.2 แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของผู้ใช้งานของบริการวิดีโอ [3]

คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (MOS)	ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน	PSNR (dB)
5	ดีเยี่ยม	มากกว่า 37
4	ดีมาก	31-37
3	ดี	25-31
2	พอใช้	20-25
1	ปรับปรุง	น้อยกว่า 20

### 3.6.3 การสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต

การสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ตเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้เราสามารถโทรสื่อสารกันผ่านอินเทอร์เน็ตเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าโทรศัพท์ที่เราใช้กันในปัจจุบันที่เป็นแบบระบบบอณาล็อก สำหรับการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ตที่เราศึกษาจะเป็นการแปลงสัญญาณแบบ AMR-WB เป็นการทำงานที่จะแปลงเสียงพูดของเราเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนที่จะส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต สามารถให้คุณภาพเสียงที่ชัดมาก โดยมาตรฐานของ AMR-WB จะมีความสัมพันธ์กับ R-factor [25], [26]

$$R_{factor} = R_o - I_s - I_d - I_{eff} - A_f \quad (3.24)$$

โดยที่  $R_o$  คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

$I_s$  คือ ผลรวมของการด้อยค่าที่ขึ้นระหว่างการส่งสัญญาณเสียง

$I_d$  คือ ปัจจัยการด้อยค่าที่ขึ้นจากความล่าช้าของสัญญาณเสียง

$A_f$  คือ ปัจจัยข้อได้เปรียบ

$I_{eff}$  คือ ปัจจัยการด้อยค่าที่จากประสิทธิภาพของอุปกรณ์หาได้จากสมการที่ 3.25

$$I_{eff} = I_e + (129 - I_e) \times \left( \frac{P_{pl}}{P_{pl} \times B_{pl}} \right) \quad (3.25)$$

โดยที่  $I_e$  คือ ปัจจัยการด้อยค่าของอุปกรณ์เมื่อการสูญหายของแพ็กเก็ต มีค่าเป็น 0  
 $P_{pl}$  คือ การสูญหายของแพ็กเก็ต  
 $B_{pl}$  คือ ปัจจัยการทนทานต่อการสูญหายของแพ็กเก็ต

จากสมการที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ตทั้ง 3.24 และ 3.25 จะนำมาสู่คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย  $MOS_{VOIP}$  ตามมาตรฐานของ ITU-T G.107.1 ซึ่งจากค่า  $R_o = 129$  ดังนั้น  $R = R_{factor} / 1.29$  โดยที่เกณฑ์ของคะแนนความคิดเห็นแสดงดังตารางที่ 3.3 และสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$MOS_{VOIP} = 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)(7 \times 10^{-6}) \quad (3.26)$$

ตารางที่ 3.3 แสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยเทียบกับความพึงพอใจของการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต [26]

คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (MOS)	ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน	R
4.3-5	ดีเยี่ยม	90-100
4-4.3	ดีมาก	80-90
3.6-4	ดี	70-80
3.1-3.6	พอใช้	60-70
2.6-3.1	ปรับปรุง	50-60
1-2.6	แย่	น้อยกว่า 50

จากสมการที่ 3.26 เมื่อนำมาพิจารณากับความสัมพันธ์ในตารางที่ 3.3 ที่แสดงคะแนนความคิดเห็นเทียบกับความพึงพอใจของการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต จากคะแนน 1-5 สามารถหาได้จากสมการ 3.27 ดังนี้

$$MOS_{VOIP}(R) = \begin{cases} 1 & ; R < 0 \\ 1 + 0.035R + R(R-60)(100-R)(7 \times 10^{-6}) & ; 0 < R < 100 \\ 4.5 & ; R > 100 \end{cases} \quad (3.27)$$

### 3.7 การปรับปรุงประสิทธิภาพความพึงพอใจผู้ใช้งาน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลโดยปรับปรุงไปที่พารามิเตอร์คุณภาพบริการของเครือข่ายอย่างค่า  $SINR$  ให้มีค่าที่สูงเพื่อนำไปสู่ความพึงพอใจของผู้ใช้งานในทั้ง 3 บริการ คือ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต ซึ่งเราต้องมีการตั้งเกณฑ์ของคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของสมการที่ 3.19, 3.21 และ 3.27 ด้วยอัลกอริทึม Alt-Min เมื่อเราทำการพิจารณาค่า  $SINR$  โดยอยู่ในเงื่อนไขที่ต้องมีค่ามากกว่า  $SINR_{\min}$  เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจสูงสุด และการเข้ารหัสล่วงหน้าทั้งในส่วนของดิจิทัล/อนาล็อก  $F_{RF} F_{BB}$  ยังอยู่ภายใต้เงื่อนไขของข้อจำกัดด้านพลังงาน เมื่อ  $MOS_k$  คือพารามิเตอร์ของบริการทั้ง 3 บริการ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{maximize } MOS_k \\ & F_{RF}, F_{BB,k,j} \\ & \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_k F_{RF} F_{BB,k} F_{BB,k}^H F_{RF}^H H_k^H}{\sum_{k=1}^K \sum_{j \neq k}^K H_k F_{RF} F_{BB,j} F_{BB,j}^H F_{RF}^H H_k^H + \sigma_k^2} \geq SINR_{\min} \\ \sum_{k=1}^K \sum_{j \neq k}^K F_{RF} F_{BB,k,j} \leq P_c \end{array} \right. \end{aligned} \quad (3.28)$$

## บทที่ 4

### วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองระบบ

#### 4.1 กล่าวนำ

จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดในระบบโมโนขนานใหญ่ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองของระบบสำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยโครงสร้างบางส่วนที่มีการปรับปรุงด้านประสิทธิภาพพลังงานเทียบกับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP และโครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS ซึ่งในแต่ละอัลกอริทึมจะมีการเปรียบเทียบทั้งในด้านการประหยัดพลังงาน ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลและความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อเครือข่ายเทียบกับโครงสร้างสมบูรณ์ และโครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองของระบบโมโนขนานใหญ่

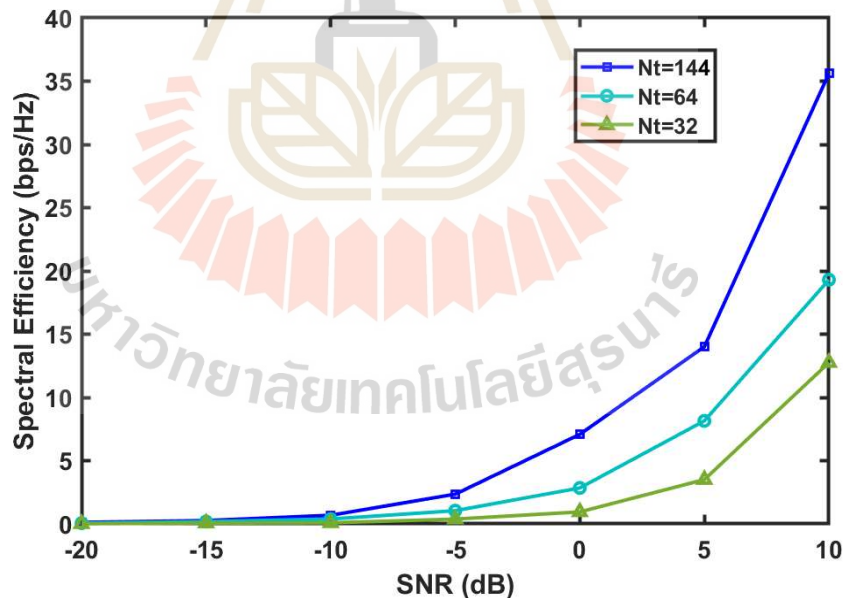
พารามิเตอร์	ค่า
จำนวนสายอากาศภาคส่ง	144
จำนวนสายอากาศภาครับ	36
แบนด์วิธ	300 kHz
ความถี่	28 GHz
จำนวนห่วงโซ่ RF	4
เซลล์ขนาดเล็ก	1
กำลังคงที่ภาคส่งสูงสุด	33 dBm
จำนวนรังสีในแต่ละเซลล์เตอร์	10
จำนวนเซลล์เตอร์	5



## 4.2 การจำลองระบบโมเด็มขนาดใหญ่

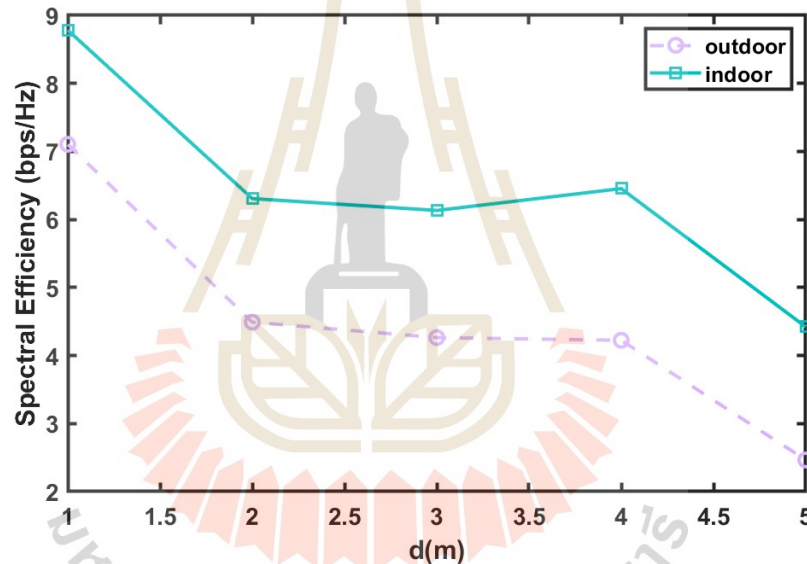
การจำลองระบบโมเด็มขนาดใหญ่ OFDM สำหรับดาวลิงค์เราจะทำการพิจารณา 64 ช่องความถี่ย่อย (sub-channels) ซึ่งพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.1 และสำหรับจำนวนอุปกรณ์ผู้ใช้งานจะสมมติให้มีจำนวน 10 ผู้ใช้งาน ซึ่งการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดสำหรับโครงสร้างบางส่วนด้วยวิธี Optimize power จะมีการผลการจำลองของการเพิ่มขึ้นของจำนวนสายอากาศ การสูญเสียเส้นทางและประสิทธิภาพด้านพลังงาน

จากรูปที่ 4.2 เป็นการพิจารณาความแตกต่างของจำนวนสายอากาศที่ต่างกันคือ  $N_T = 144 : N_T = 36$ ,  $N_T = 64 : N_T = 64$  และ  $N_T = 32 : N_T = 32$  กับประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเทียบกับค่า SNR จาก -20 ถึง 10 dB ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า SNR ทั้งหมด 3 กรณีของจำนวนสายอากาศที่ต่างกัน และจากผลการจำลองจะเห็นว่าจำนวนสายอากาศ  $N_T = 144$  ให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่ดีที่สุดซึ่งแสดงว่าเมื่อจำนวนสายอากาศส่งมีค่ามากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการส่งข้อมูลสูงขึ้นตามไปด้วย

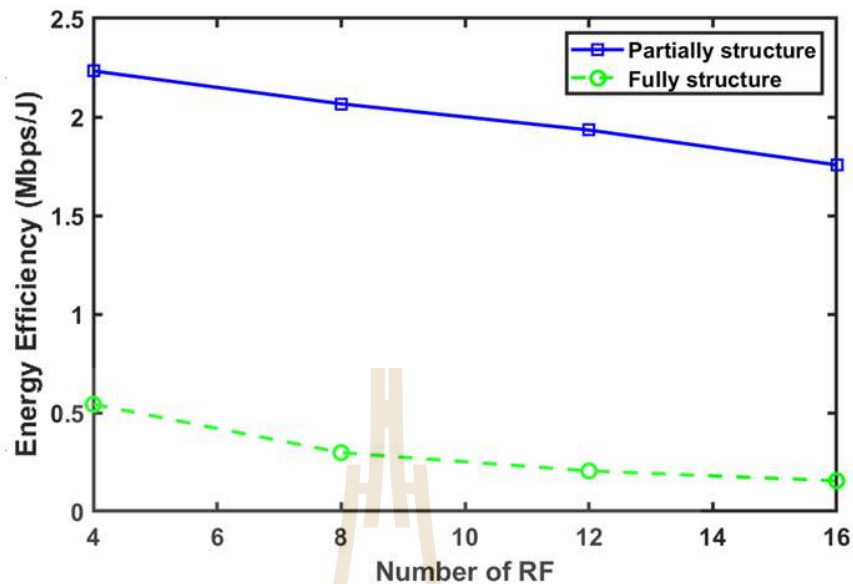


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเทียบกับค่า SNR (Signal to Noise Ratio) ด้วยจำนวนสายอากาศที่ต่างกัน  $N_T = 144$ ,  $N_T = 64$  และ  $N_T = 32$

สำหรับระบบการสื่อสารไมโมขนานใหญ่ในการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับย่อมมีการสูญเสียเส้นทางเกิดขึ้น ซึ่งเราจะพิจารณาแบบแนวสายตา (LoS) ทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร โดยการใช้การเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยโครงสร้างบางส่วนที่เป็นวิธี Optimize power จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟเปรียบเทียบการสูญเสียเส้นทางภายในอาคารและภายนอกอาคารกับระยะทาง ซึ่งเมื่อระยะทางมากขึ้นคือยิ่งห่างจากสถานีฐานจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลมีค่าลดลงทั้งแบบภายในอาคารและภายนอกอาคาร และจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลภายในอาคารจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าภายนอกอาคาร ซึ่งมาจากปัจจัยหลายอย่างเช่น แบบภายในอาคารอยู่ในพื้นที่ที่ครอบคลุมสัญญาณที่มากกว่าทำให้ความสามารถในการส่งข้อมูลดีกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของการสูญเสียเส้นทางภายในอาคารและภายนอกอาคารกับระยะทาง



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานเทียบกับจำนวนห้วงโซ่ RF สำหรับการเข้ารหัส ล่วงหน้าแบบไฮบริด

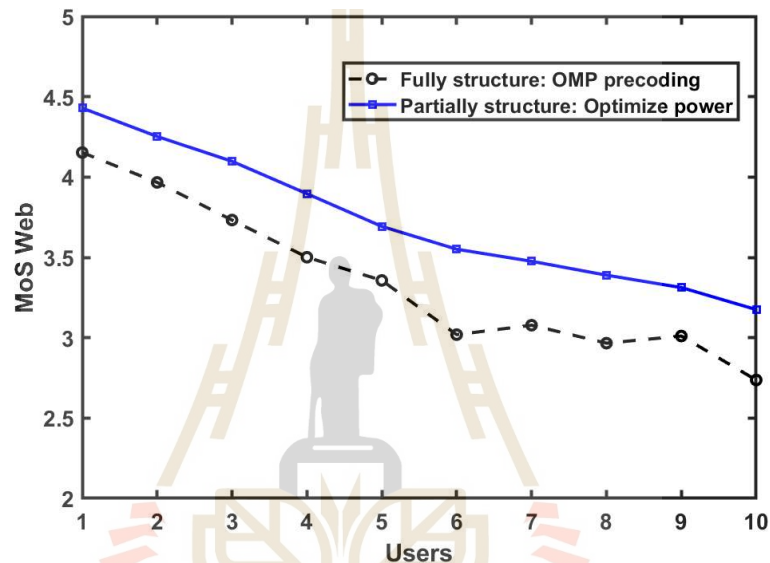
จากรูปที่ 4.3 โดยการพิจารณาประสิทธิภาพด้านพลังงานเราจะทำการเทียบกับจำนวนของ ห้วงโซ่ RF สำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดด้วยวิธี Optimize power โดยจากรูปที่ 4.3 เมื่อ เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงาน ระหว่างโครงสร้างบางส่วนกับโครงสร้างสมบูรณ์สำหรับการ เข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริด จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนห้วงโซ่ RF เพิ่มขึ้นการใช้พลังงานก็ เพิ่มขึ้นตามของทั้ง 2 โครงสร้าง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานโครงสร้างบางส่วน สามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ เพราะเมื่อจำนวนห้วงโซ่ RF เพิ่มขึ้นโครงสร้างบางส่วนจะเป็นการเชื่อมต่อแบบจับกลุ่มย่อยกับสายอากาศทำให้ประหยัดพลังงาน ได้มากกว่า

#### 4.3 เปรียบเทียบวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม OMP

จากงานวิจัย [27] การเข้าใช้งานอินเทอร์เน็ตบนมือถือส่วนใหญ่จะมีการใช้งานภายในอาคาร ดังนั้นสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านต่างๆ เราจะทำการพิจารณาแค่ภายในอาคาร โดย การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโครงสร้างบางส่วนของวิธี Optimize power กับโครงสร้าง สมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP

#### 4.3.1 การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์

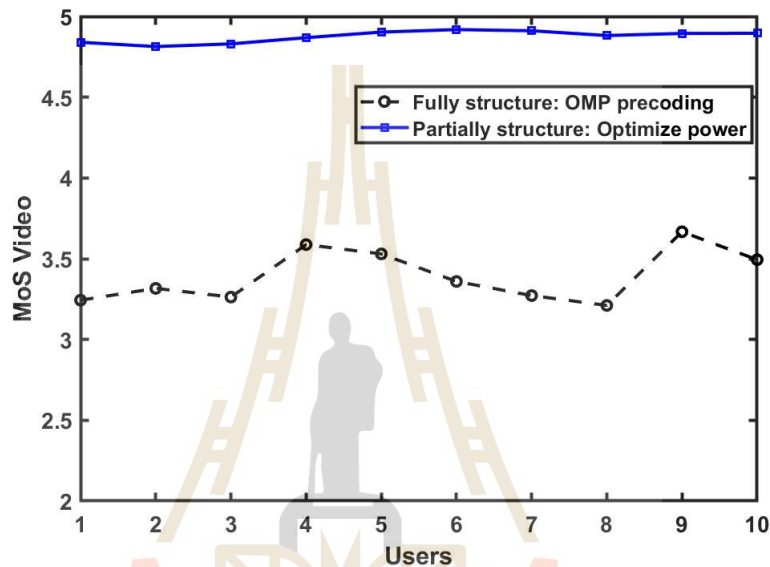
สำหรับบริการเว็บเบราว์เซอร์เราจะมีการพิจารณาจำนวนขนาดหน้าเว็บ 10 ขนาด ดังนี้  $FS = 18, 30, 50, 100, 200, 320, 400, 500, 650$  และ  $1000$  Kbyte [23] กับจำนวนผู้ใช้งานทั้ง 10 คน โดยที่จะกำหนดให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลต่ำสุดเท่ากับ  $2$  bps/Hz และประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ  $7$  bps/Hz



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์เทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน

จากรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของเว็บเบราว์เซอร์เทียบกับจำนวนผู้ใช้งานทั้ง 10 คน โดยที่แต่ละผู้ใช้งานมีการใช้ขนาดหน้าเว็บที่ต่างกัน โดยเราทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างบางส่วน of วิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานกับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อจำนวนหน้าเว็บมีขนาดใหญ่ขึ้นความพึงพอใจของผู้ใช้งานก็น้อยลงเนื่องจากความต้องการของอัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น และจากการเปรียบเทียบของทั้ง 2 โครงสร้างพบว่าโครงสร้างบางส่วน of วิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานสามารถให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของเว็บเบราว์เซอร์ที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP ซึ่งเมื่อวัดประสิทธิภาพตำแหน่งผู้ใช้งานคนที่ 1 เมื่อขนาดหน้าเว็บเล็กที่สุดโครงสร้างบางส่วนให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย  $MOS_{web} = 4.43$  โครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP ให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย  $MOS_{web} = 4.15$  และเมื่อวัดประสิทธิภาพตำแหน่งผู้ใช้งานคนที่ 10 เมื่อขนาดหน้าเว็บใหญ่

ที่สุดโครงสร้างบางส่วนให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย  $MOS_{web} = 3.17$  โครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP ให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย  $MOS_{web} = 2.73$  เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์จากผู้ใช้งานทั้งหมด 10 คน โครงสร้างบางส่วนจะสูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP ถึง 11.58 เปอร์เซ็นต์



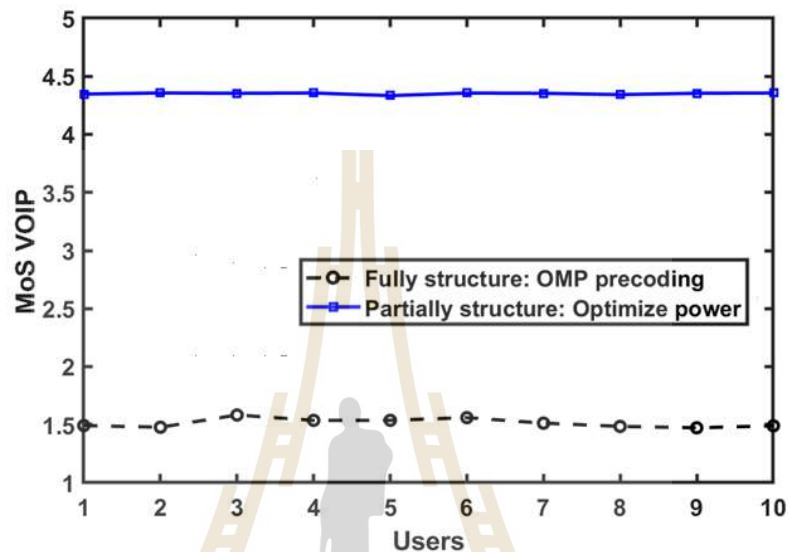
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบบริการวิดีโอเทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน

#### 4.3.2 การเปรียบเทียบบริการวิดีโอ

สำหรับบริการวิดีโอจากสมการที่ 3.18 ค่า  $PSNR$  ตามมาตรฐานการเข้ารหัส H.264/AVC จะมีค่าสูงสุด  $PSNR = 42$  dB และมีค่าต่ำสุด  $PSNR = 30$  dB [28] ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยกับผู้ใช้งานทั้ง 10 คน ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.5

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างบางส่วนของวิธี Optimize power กับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP ในการพิจารณาคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของวิดีโอแก่ผู้ใช้งานทั้ง 10 คน จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าโครงสร้างบางส่วนจะให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ถึง 48.1 เปอร์เซ็นต์ และจากกราฟผู้ใช้งานทั้ง 10 คน จะมีคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันแต่จะมีการแกว่งของกราฟเล็กน้อยซึ่งมาจากการที่เราต้องการเพิ่มความพึงพอใจของผู้ใช้งานหรือประสบการณ์ผู้ใช้งานสูงสุดนั้นก็คืออัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นแต่ในงานวิจัยนี้

ไม่ได้มีการใช้เทคนิคในการเพิ่มความเท่าเทียมกัน (Fairness techniques) ในแต่ละผู้ใช้งาน จึงส่งผลให้รูปที่ 4.5 มีการแกว่งขึ้นลงของคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบบริการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ตเทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน

#### 4.3.3 การเปรียบเทียบบริการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต

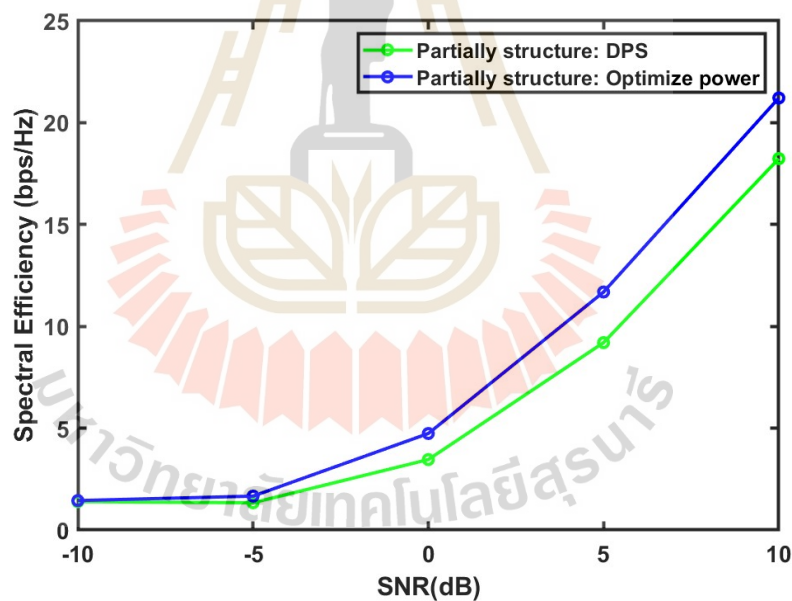
ในส่วนแบบจำลองการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต ในสมการ 3.20 ตามมาตรฐาน ITU-T G.107.1 และ ITU-T G.113 จะมีการกำหนดค่า  $A_f = 0$ ,  $I_d = 4.2552$  ms,  $B_{pl} = 16.1$  และ  $I_e = 11$  นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์  $MSS = 1460$  bytes และ  $RTT = 20$  ms

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของบริการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ตเทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน ระหว่างโครงสร้างบางส่วนของวิธี Optimize power กับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP ผลการทดลองก็แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างบางส่วนของประสิทธิภาพของคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP แต่เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของบริการวิดีโอจะให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยที่สูงกว่าในทั้ง 2 โครงสร้าง นั้นเพราะว่าการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ตต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่า

#### 4.4 เปรียบเทียบวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS ซึ่งทั้งคู่เป็นการเข้ารหัสล่วงหน้าด้วยโครงสร้างบางส่วน โดยในผลการจำลองจะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล เปรียบเทียบทั้ง 3 บริการคือ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานด้วย ซึ่งจากข้อจำกัดของอัลกอริทึมแบบ DPS จะต้องใช้จำนวนท่วงโซ่ RF  $N_{RF} = 2$

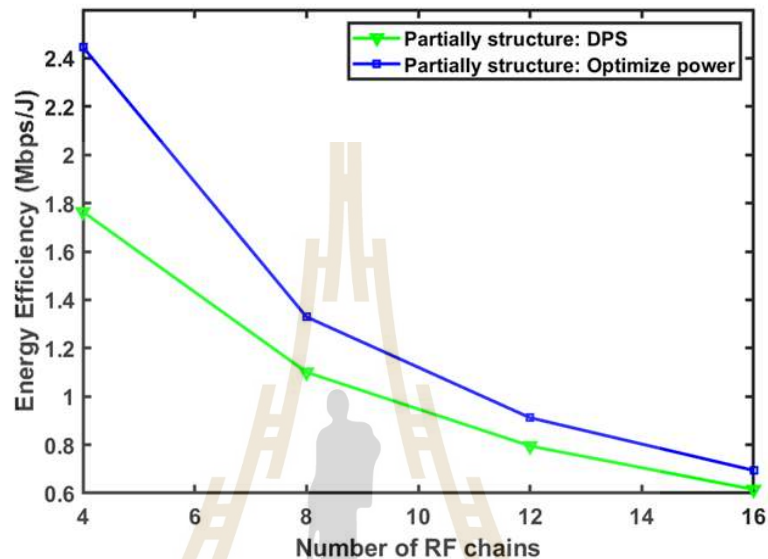
จากรูปที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเทียบกับค่า SNR จาก -20 ถึง 10 dB ระหว่าง วิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS เมื่อทั้งสองเป็นโครงสร้างบางส่วน จะเห็นได้ว่าความสามารถในการส่งข้อมูลให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันมาก แต่วิธี Optimize power จะมีค่าประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่สูงกว่า



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเทียบกับค่า SNR

แม้ว่าจากรูปที่ 4.7 ในด้านประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลทั้งคู่อาจจะมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันแต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานเทียบกับจำนวนท่วงโซ่ RF แต่ในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าวิธี Optimize power จะสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าอัลกอริทึม DPS ถึง 17.33

เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาห่วงโซ่ RF ตั้งแต่ 2 ถึง 16 ห่วงโซ่ และจากผลการจำลองของทั้ง 2 วิธีการคือ วิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS จะมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ลดตามจำนวนห่วงโซ่ RF



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานเทียบกับจำนวนห่วงโซ่ RF สำหรับโครงสร้างบางส่วน

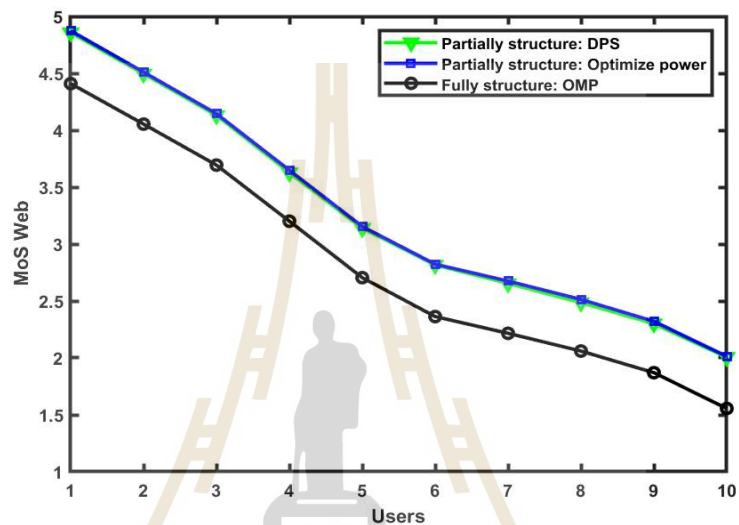
#### 4.4.1 การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์

ในหัวข้อการเปรียบเทียบบริการสำหรับเว็บเบราว์เซอร์นี้ จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างบางส่วน วิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในสมการที่ 3.15 จะใช้เหมือนกับหัวข้อ 4.31 คือค่าขนาดหน้าเว็บ  $FS_k$  จะมีอยู่ 10 ขนาดเท่ากับจำนวนผู้ใช้งานที่นำมาใช้ในแบบจำลอง นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบร่วมกับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP

จากรูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์เทียบกับจำนวนผู้ใช้งานทั้ง 10 คน จากผลการจำลองจะเห็นว่าโครงสร้างบางส่วนวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS จะให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยของผู้ใช้งานที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP ส่วนโครงสร้างบางส่วนของทั้ง 2 วิธีการจะให้ความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่ใกล้เคียงกันเพียงแต่วิธี Optimize power จะสูงกว่าอัลกอริทึม DPS ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากวิธี Optimize power มีการใช้เทคนิค Minimizing the Euclidean distance และอัลกอริทึม DPS ที่มีการทำงาน



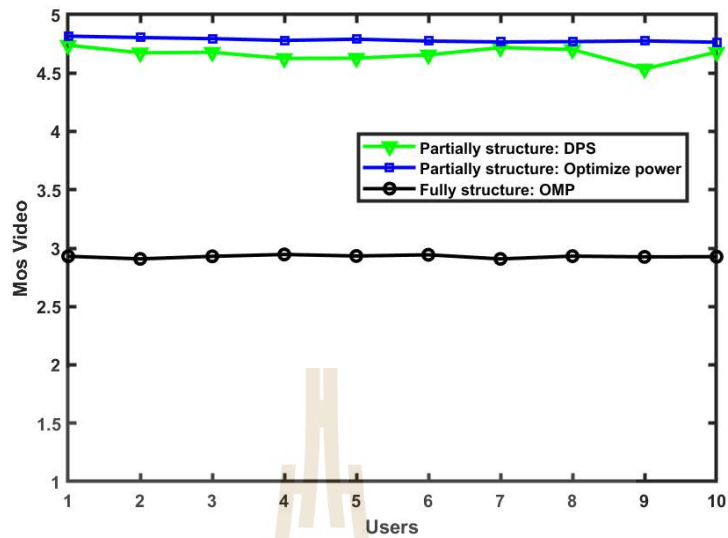
ร่วมกับ อัลกอริทึม K-means มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล นอกจากนี้ทั้งสองอัลกอริทึมของโครงสร้างบางส่วน การที่ห้วงโซ่ RF ไม่จำเป็นต้องไปเชื่อมต่อกับสายอากาศทุกตัว จึงทำให้สามารถควบคุมและลดสัญญาณรบกวนจากการเข้ารหัสล่วงหน้าที่มาจากสายอากาศอื่นที่อยู่ใกล้เคียงได้ ทำให้ทั้งคู่สามารถให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบบริการเว็บเบราว์เซอร์เทียบกับจำนวนผู้ใช้งานของทั้ง 3 วิธีการ

#### 4.4.2 การเปรียบเทียบบริการวิดีโอ

การเปรียบเทียบบริการสำหรับวิดีโอ จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างบางส่วนของวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS และเปรียบเทียบร่วมกับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP

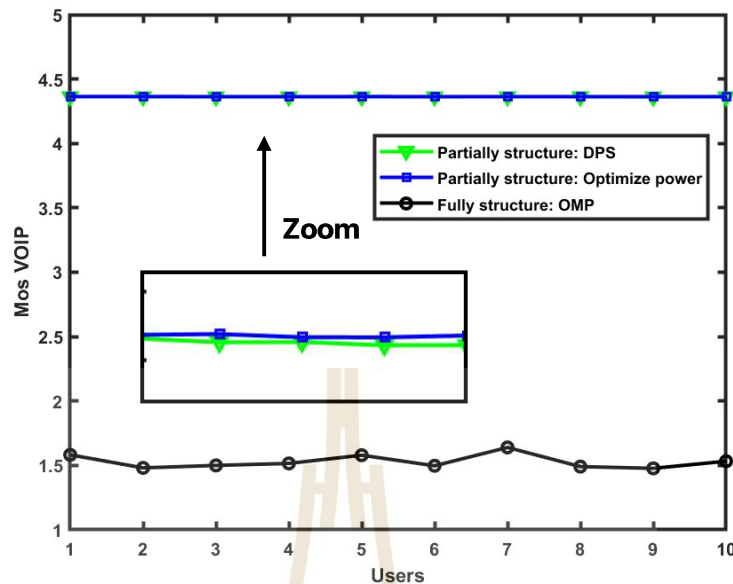


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบบริการวิดีโอเทียบกับจำนวนผู้ใช้งานของทั้ง 3 วิธีการ

จากรูปที่ 4.10 โครงสร้างบางส่วนของวิธี Optimize power จะให้เมื่อเทียบกับผู้ใช้งานคนที่ 10 อยู่ที่  $MOS_{video} = 4.72$  ซึ่งสูงกว่าโครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS เมื่อผู้ใช้งานคนที่ 10 จะมีคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย  $MOS_{video} = 4.68$  และค่าคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของผู้ใช้งานทั้งหมดวิธี Optimize power จะสูงกว่าอัลกอริทึม DPS 2.51 เปอร์เซ็นต์ แต่โครงสร้างบางส่วนของทั้ง 2 วิธีการ ยังให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของผู้ใช้งานทั้ง 10 คน ที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP

#### 4.4.3 การเปรียบเทียบบริการสื่อสารอินเทอร์เน็ตผ่านเสียง

การบริการสื่อสารอินเทอร์เน็ตผ่านเสียงจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างบางส่วนวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS และเปรียบเทียบร่วมกับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP โดยใช้สมการที่ 3.22 ในการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบบริการสื่อสารอินเทอร์เน็ตผ่านเสียงกับจำนวนผู้ใช้งานของทั้ง 3 วิธีการ

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยสำหรับบริการสื่อสารอินเทอร์เน็ตผ่านเสียง ผลที่ได้จากการจำลองคือโครงสร้างบางส่วนด้วยวิธี Optimize power จะให้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือโครงสร้างบางส่วนด้วยอัลกอริทึม DPS ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก และสุดท้ายที่ได้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยต่ำสุดคือโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP

#### 4.5 สรุป

จากผลการจำลองที่ได้ทำการเปรียบเทียบจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนห้วงไซ่ RF มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานมาก หากจำนวนห้วงไซ่ RF เพิ่มขึ้น การใช้พลังงานก็จะเพิ่มขึ้นตามมา ในส่วนของการเปรียบเทียบประสบการณ์ผู้ใช้งานต่อการบริการของเครือข่ายทั้ง 3 บริการ ได้แก่ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และบริการสื่อสารอินเทอร์เน็ตผ่านเสียง ด้วยวิธี Optimize power อัลกอริทึม DPS และอัลกอริทึม OMP ก็แสดงให้เห็นว่านอกจากวิธีการวิธี Optimize power จะสามารถให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุดแล้ว ยังให้คะแนนคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยของทั้ง 3 บริการที่สูงที่สุดด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

จากที่ได้ศึกษาการเข้ารหัสล่วงหน้าสำหรับระบบโมโนแบนด์ใหญ่ของระบบ 5G ด้วยจำนวนสายอากาศที่มากส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นจากจำนวนท่วงโซ่ RF ที่เพิ่มขึ้นตาม ทำให้การเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดั้งเดิมที่มีการทำงานแคในส่วนของดิจิทัล ผู้ประกอบการเริ่มให้ความสนใจที่น้อยลง ด้วยค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นและระบบมีความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ ทำให้ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างดิจิทัลและอนาล็อก สามารถลดความซับซ้อนของระบบ และลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบดั้งเดิม โดยสำหรับโครงสร้างสมบูรณ์ที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่สูงแต่ก็ด้วยจำนวนท่วงโซ่ RF ที่มีจำนวนที่มากตามจำนวนสายอากาศ ก็ทำให้ระบบมีการใช้พลังงานที่สูงเช่นกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าโครงสร้างบางส่วนสามารถนำมาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารให้ผู้ใช้งานเครือข่ายพึงพอใจได้ ทั้งยังประหยัดพลังงานได้มากกว่าด้วย

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้สำหรับระบบโมโนแบนด์ใหญ่บางส่วนของระบบ 5G เพื่อลดการใช้พลังงานเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลสำหรับบริการ เว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP และโครงสร้างบางส่วนของอัลกอริทึม DPS โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในส่วนของการเข้ารหัสล่วงหน้าแบบไฮบริดทั้งส่วนของดิจิทัลและอนาล็อก ซึ่งขั้นตอนแรกทำการเพิ่มประสิทธิภาพการเข้ารหัสล่วงหน้าของเบสแบนด์และการเข้ารหัสล่วงหน้า RF ด้วยอัลกอริทึม Alt-Min ซึ่งอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของพลังงานโดยเราจะเรียกว่าวิธี Optimize power จากนั้นนำพารามิเตอร์ที่ปรับปรุงในส่วนของการเข้ารหัสล่วงหน้ามาเพิ่มประสิทธิภาพคุณภาพบริการของเครือข่าย (QoS) เพื่อให้ได้ความพึงพอใจของประสบการณ์ผู้ใช้ (QoE) ที่ดีที่สุด ซึ่งจะใช้คะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (MOS) มาวัดระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อบริการเครือข่าย โดยมีคะแนนอยู่

5 ระดับ สำหรับบริการที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้มี 3 บริการคือ บริการเว็บเบราว์เซอร์ วิดีโอ และการสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างบางส่วนวิธี Optimize power สามารถประหยัดพลังงานของระบบโมเดมมานานใหญ่ได้มากกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ถึง 48 เปอเซ็นต์ สำหรับการวัดประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลเทียบกับทั้ง 3 บริการ ก็แสดงให้เห็นว่าวิธี Optimize power สามารถให้ระดับความพึงพอใจของประสบการณ์ผู้ใช้งาน (QoE) ที่สูงกว่าโครงสร้างสมบูรณ์ของอัลกอริทึม OMP นอกจากนั้นผู้วิจัยก็ได้ทำการเปรียบเทียบวิธี Optimize power กับอัลกอริทึม DPS ที่เป็นโครงสร้างบางส่วนเช่นกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งสองอัลกอริทึมให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลและคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันแต่หากพิจารณาในด้านการประหยัดพลังงาน วิธี Optimize power สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าถึง 17.33%

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการจำลองการทำงานของอัลกอริทึมสำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้าบนโปรแกรม MATLAB เมื่อเป็นการทำงานในสภาพแวดล้อมจริงอาจมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนที่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสื่อสารมีความคลาดเคลื่อนและมีความแม่นยำในการส่งข้อมูลที่น้อยลง ดังนั้นการพัฒนาในอนาคตควรมีการศึกษาสัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมจริงที่มากขึ้น เพื่อปรับใช้ในอัลกอริทึมสำหรับการเข้ารหัสล่วงหน้าโครงสร้างบางส่วน และควรศึกษาการวัดประสิทธิภาพเพิ่มเติม เพื่อเป็นตัวบ่งบอกความแม่นยำของระบบ เช่น อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER) ข้อผิดพลาดของค่าเฉลี่ยกำลังสองราก (Root Mean Square Error : RMSE) เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับการวัดประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลเทียบกับ ประสบการณ์ผู้ใช้งาน (QoE) ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพในส่วนของภายในอาคาร (Indoor) เท่านั้น ดังนั้นในอนาคตจึงควรปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลสำหรับภายนอกอาคาร (Outdoor) ด้วย เพื่อให้สามารถเพิ่มความพึงพอใจของประสบการณ์ผู้ใช้งาน (QoE) ได้มากยิ่งขึ้น และอาจมีการพิจารณากับบริการอื่นๆ ที่ผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตให้ความสนใจด้วย

## รายการอ้างอิง

- Yu, X., Shen, J.-C., Zhang, J., and Letaief, K. B., "Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 485–500, 2016.
- Ge, X., Sun, Gharavi, J. X., and Thompson, J., "Joint optimization of computation and communication power in multi-user massive MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 4051–4063, 2018.
- Abarghouyi, H., Razavizadeh, S. M., and Björnson, E., "QoE-aware beamforming design for massive MIMO heterogeneous networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 8315–8323, 2018.
- Nalband, A. H., Sarvagya, M., and Ahmed, M. R., "Optimal hybrid precoding for millimeter wave massive MIMO systems," *Procedia Computer Science*, vol. 171, pp. 810–819, 2020.
- Ge, X., Yang, J., Gharavi, H., and Sun, Y., "Energy efficiency challenges of 5G small cell networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 184–191, 2017.
- Rubina, A., Andryeyev, O., Harounabadi, M., Al-Khani, A., Artemenko, O., et al., "Investigation and adaptation of signal propagation models for a mixed outdoor-indoor scenario using a flying gsm base station," In *Ad Hoc Networks*, pp. 128–139, 2017.
- Union, "I.T.: P.1238 : Propagation data and prediction method for the planning of Indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz," Report ITU-R P.1238, 2015.

- Union, "I.T.: P.1411 : propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," Report ITU-R P.1411, 2015.
- Danielsson, P. E., "Euclidean distance mapping," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 14, no. 3, pp. 227 – 248, 1980.
- Björnson, E., Hoydis, J., and Sanguinetti, L., "Massive MIMO networks : Spectral, Energy, and hardware efficiency," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 11, no. 4, pp. 154–655, 2017.
- Dai, L., Gao, X., Quan, J., Han, S. and Chih-Lin, I., "June. Near-optimal hybrid analog and digital precoding for downlink mmWave massive MIMO systems," In 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1334–1339, 2015.
- Yu, X., Zhang, J. and Letaief, K.B., "Hybrid precoding in millimeter wave systems: How many phase shifters are needed?," in GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, pp. 1–6, 2017.
- Feng, Y., and Jiang, Y. "Hybrid precoding for massive MIMO systems using partially-connected phase shifter network," in Int. Conf. on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), pp. 1–6, 2019.
- Zheng, X., Wang, Y., and Liu, W., "Partially connected hybrid precoding design for millimeter wave MIMO systems," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1325, no.1, pp. 012057, 2019.
- Ribeiro, L. N., Schwarz, S., Rupp, M., and de Almeida, A. L. F., "Energy efficiency of mmWave massive MIMO precoding with low-resolution DACs," *Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 12, no. 2, pp. 298– 312, 2018.

- Li, A., and Masouros, C., "Hybrid precoding and combining design for millimeter-wave multi-user MIMO based on SVD," in IEEE Int. Conf. on Communications (ICC), Paris, France, pp. 1-6, 2017.
- Souto, N., Silva, J., Pavia, J. and Ribeiro, M., "An alternating direction algorithm for hybrid precoding and combining in millimeter wave MIMO systems," Journal of Physics Communications, vol. 34, pp. 165–173, 2019.
- Sahoo, S. K., and Makur, A., "Signal Recovery from Random Measurements via Extended Orthogonal Matching Pursuit," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 63, no. 10, pp. 2572–2581, 2015.
- Yu, X., Zhang, J., and Letaief, K. B., "Partially-connected hybrid precoding in mm-wave systems with dynamic phase shifter networks," IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), pp. 1–5, 2017.
- Yu, X., Zhang, J., and Letaief, K. B., "Doubling phase shifters for efficient hybrid precoder design in millimeter-wave communication systems," Journal of Communications and Information Networks, vol.4, no.2, pp.51–67, 2019.
- Union, "I.T.: P.800.1 : Mean opinion score (MOS) terminology," Report ITU-R P.800.1, 2016.
- Yu, X., Zhang, J., and Letaief, K.B., "November. Alternating minimization for hybrid precoding in multiuser OFDM mmWave systems," In 2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers , pp. 281–285, 2016.
- Rugelj, M., Sedlar, U., Volk, M., Sterle, J., Hajdinjak, M., et al., "Novel cross-layer QoE-aware radio resource allocation algorithms in multiuser OFDMA systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 9, pp. 3196–3208, 2014.



- Choi, L. U., Ivrlac, M. T., Steinbach, E., and Nossek, J. A., "Sequence-level models for distortion-rate behaviour of compressed video," in IEEE Int. Conf. on Image Processing, pp. II-486, 2005.
- Kwon, D., Gonzalez-Prelcic, N., Rangan, S., Roh, W., and Sayeed, A., "QoE-based adaptive mVoIP service architecture in SDN networks," in the Seventh Int. Conf. on Communication Theory, pp. 62-67, 2014.
- Nguyen, D., Nguyen, H., and Renault, É., "A new non-intrusive model for measuring VoLTE quality based on wideband E-model," Communications on Applied Electronics, vol. 5, no. 8, pp. 1-8, 2016.
- Zhang, J., and De la Roche, G., "Femtocells: technologies and deployment," John Wiley & Sons, 2011.
- Saul, A., and Auer, G. "Multiuser resource allocation maximizing the perceived quality," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2009, no. 6, pp. 1-15, 2009.
- Uthansakul P., Bialkowski M.E., "Multipath signal effect on the capacity of MIMO MIMO-OFDM and spread MIMO-OFDM," 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (IEEE Cat. No.04EX824), Vol.3, pp. 989-992, 2004



## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Samklang, F., Uthansakul, P. and Uthansakul, M., “QoE-Based Precoding for Partially Massive MIMO,” In 2021 18th Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 366-369, 2021.

Samklang, F., Uthansakul, P., Uthansakul, M. and Anchuen, P., “Optimal Hybrid Precoding Based QoE for Partially Structured Massive MIMO System,” CMC-Computers, Materials & Continua, vol.71, no.1, pp. 1887–1902, 2022.



# QoE-Based Precoding for Partially Massive MIMO

Farung Samklang, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul  
 School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology  
 Muang, NakhonRatchasima, Thailand 30000  
 Email: m6203184@g.sut.ac.th, uthansakul@sut.ac.th and mtp@sut.ac.th

**Abstract**—In literatures, many works on the area of massive MIMO (Multi Input Multi Output) presented the improvement of signal quality by using precoding in accordance with partial structure. However, only signal quality is not good enough to represent the satisfaction of users. In this paper, we proposed the precoding for partially-structured massive MIMO by utilizing user satisfaction in term of Quality of Experience (QoE). The level of Mean Opinion Score (MOS) is adopted to express QoE of web browsing service. In the first step, we optimize the baseband precoding and RF precoding by proposing the alternating minimization methods, then optimize the QoS parameters for the best QoE. The results show that the optimized QoS parameters lead to the satisfaction of user and the achieving of the required level of QoE.

**Keywords**— Quality of Experience (QoE), Massive MIMO, Quality of Service (QoS), Mean Opinion Score (MOS)

## I. INTRODUCTION

The 5th generation of communication technology can provide higher data rates, larger spectral efficiency since a massive numbers of antennas operating at high frequency or millimeter Wave (mmWave: 30GHz - 300GHz) is employed. However, the consequent problem is an increase in cost and the large amount of power consumed by Massive MIMO systems [1]. The hybrid precoding is precoding method for massive MIMO systems combining between digital and analog technologies that provide a high throughput, reduce the number of RF chains, and save energy without degrading the system performance while the traditional precoding can only improve only digital precoder and one RF chain to support only one antenna [2-3]. The existing hybrid precoding architecture has two features: partially and fully structures [4].

As shown in [5], the authors have proposed a hybrid precoding by alternating the minimization algorithms in which the full and partial structures are a Manifold Optimization (MO) and a SemiDefinite Relaxation (SDR) alternating minimizations respectively. The simulation results have shown that the partially structure is able to provide a better energy efficiency over the fully structure. In addition, as shown in [6], the authors have shown the comparison between the partially structure of hybrid precoding and the Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm [7]. The result has confirmed that the partially structure outperforms in terms of cost and energy efficiency. From the literatures, there has not been any idea to improve the signal quality based on user satisfaction, Quality of Experience (QoE), and Quality of Service (QoS).

In addition to improve the signal quality for a better spectral efficiency, energy efficiency, and high throughput on the downlink of massive MIMO systems, the user satisfaction

and QoE are significant [8]. The QoE indicates the satisfaction of user for the network service using Mean Opinion Score (MOS). The QoS can be reflected by many service parameters such as bandwidth, packet loss rate, and throughput caused by multipath fading [9]. The QoS is also a factor that has an effect on users' QoE [10-12]. As shown in [13], the authors have improved the spectral efficiency to improve QoS constraint using the Effective Capacity (EC) theory where the EC is the correlation between transmission rate and QoS constraints. Also, in [14], the authors have proposed a method to improve QoE for the Video and web browser services based on beamforming design for heterogeneous massive MIMO networks systems.

Therefore, this paper proposes a QoE-based precoding for partially massive MIMO. We optimize both digital and analog techniques. The baseband and RF precoding on the maximum power constants limit and optimize the QoS parameters to achieve the best QoE based on Mean Opinion Score (MOS). The proposed concept is suitable for the web browsing service and to allocate the 5th generation of communication technology resources. The remainder of this paper is organized as follows. Section II shows the system model for massive MIMO, data rate, energy efficiency, spectral efficiency, and web browsing model. Then, Section III discusses the problem formulation for baseband and RF precoding by alternating the minimization of partially structure in order to have a better QoE. Afterwards, Section IV presents simulation results and discussion. Finally, the conclusion of this paper is shown in Section V.

## II. SYSTEM MODEL

### A. Massive MIMO Model

For massive MIMO system, we consider the downlink of the partially structure as shown in Figure 1. We assume that the transmitter has known the channel state information (CSI), where  $N_T$  is transmitting antenna,  $N_R$  is receiving antenna,  $N_{RF}$  is the number of RF chains, and  $K$  is the number of users. The partially-connected RF chain is connected with  $N_{sub}$ , where  $N_{sub}$  is  $\frac{N_T}{N_{RF}}$ . The received signal model of user can be expressed as follows

$$y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,k} \mathbf{s} + n_k, \quad k=1,2,\dots,K \quad (1)$$

where  $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$  is transmitter vector,  $\mathbf{F}_{BB} \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times K}$  is digital baseband precoding,  $\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_T \times N_{RF}}$  is RF precoding and  $n_k$  is additive white Gaussian noise. Also, we assume variance of  $\sigma^2 = 1$ , and  $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$  is the channel matrix. The channel of massive MIMO model is expressed as [2].

$$\mathbf{H}_k = \gamma \sum_{c=0}^{N_{cl}} \sum_{r=1}^{N_{ray}} \alpha_{cr} \mathbf{a}_R(\theta_{cr}, \vartheta_{cr}) \mathbf{a}_T(\theta_{cr}, \vartheta_{cr})^H e^{-\frac{j2\pi cr}{K}}, \quad (2)$$

where  $\gamma = \sqrt{\frac{N_T N_R E_k}{N_{cl} N_{ray}}}$  is the normalization factor,  $N_{cl}$  is the amount of clusters,  $N_{ray}$  is the amount of rays in each cluster, and  $E_k$  is the path loss between transmitter and user. The azimuth and elevation angles of departure (AoDs) and arrival (AoAs) is  $\theta_{cr}$  and  $\vartheta_{cr}$ . Then, the data rate of the user is

$$R_k = BW \log_2(1 + \text{SINR}_k), \quad (3)$$

where  $BW$  is bandwidth and  $\text{SINR}_k$  is the Signal to Interference plus Noise Ratio expressed by [3]

$$\text{SINR}_k = \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,k} \mathbf{F}_{BB,k}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}_k^H}{\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,j} \mathbf{F}_{BB,j}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}_k^H + \sigma^2}. \quad (4)$$

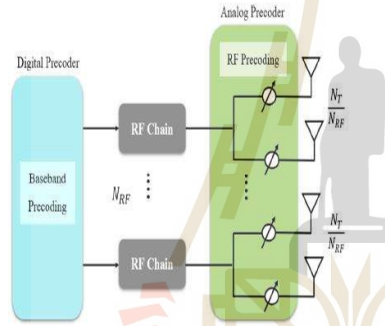


Fig. 1. Partially structure in hybrid Precoding.

### B. Energy Efficiency and Spectral Efficiency Model

The energy efficiency refers to the indicator of energy savings of massive MIMO systems for partially structure that is the value of data rate per total power consumption.

The spectral efficiency refers to the measure of the transmission rate performance formulated as

$$EE = \frac{\sum_{k=1}^K R_k}{N_T P_{PA} + N_T P_{PS} + N_{RF} (P_{RF} + P_{DAC}) + P_{BB}}, \quad (5)$$

$$SE = \frac{R_k}{BW}, \quad (6)$$

where  $EE$  is the Energy Efficiency with respect to the total power consumption of partially structure shown in [15]. Also  $P_{PA}$  is a power amplifier,  $P_{PS}$  is a power phase shifter,  $P_{RF}$  is the power of RF chains,  $P_{DAC}$  is a power digital to analog converter and  $P_{BB}$  is the power of baseband processor.

### C. Web Browsing Model

The QoS is the allocation of network resources based on the transmission model. The QoS parameters can be indicated by many parameters such as loss, bandwidth, delay, and jitter. For web browser service, the bandwidth is a concerning aspect for improving the signal quality for designed data rate to suit

the needs of users. However, the best level of QoS according to the user satisfaction is still questionable. Alternatively, the QoE is interesting as it can measure the user satisfaction or the quality of experience in network service. Also, it is the indicator of whether the improvement of signal quality in the transmission of communication data meets user needs or not. To measure the user satisfaction using QoE, we use the MOS to rank 5 levels as: 5 = Excellent, 4 = Best, 3 = Good, 2 = Fair, and 1 = Poor. The MOS on the web browsing service can be expressed as follows.

$$\text{MOS}_{\text{web}} = K_1 \ln\left(\frac{R_k}{FS_k}\right) + K_2, \quad (7)$$

where  $K_1$  and  $K_2$  are the constant of the web service and  $FS$  is the web page size.

## III. PROPOSED QOE-BASED PRECODING

### A. Baseband and RF Precoding

For hybrid precoding, we optimize both digital/analog precoding by minimizing the Euclidean distance method between  $\mathbf{F}_{BB}$  and  $\mathbf{F}_{RF}$  which can be written as

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \|\mathbf{F}_{\text{opt}} - \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}\|_F \\ & \mathbf{F}_{RF} \in \mathcal{A} \\ & \text{s.t. } \mathbf{F}_{BB} \leq \frac{P_c N_{RF}}{N_T}, \end{aligned} \quad (8)$$

where  $\mathbf{F}_{\text{opt}} \in \mathbb{C}^{N_T \times K}$  is fully digital precoding,  $P_c$  is maximum power constants,  $\mathbf{F}_{RF}$  is block diagonal matrix  $\mathbf{A}$  when  $f_i$  is  $\frac{N_T}{N_{RF}} \times 1$  complex is expressed as

$$\mathbf{F}_{RF} = \begin{bmatrix} f_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & f_{N_{RF}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

From (8), the  $\mathbf{F}_{\text{opt}}$  can be obtained from the singular value decomposition (SVD) method with the channel of massive MIMO. By alternating minimization, we fix  $\mathbf{F}_{RF}$  values to find  $\mathbf{F}_{BB}$  values on the maximum power constant limitation in order to obtain the optimum data rate for improving the efficiency and user satisfaction. And a non convex quadratic constraint quadratic program or QCQP can be expressed as follows.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \text{Tr}(\mathbf{QZ}) \\ & \mathbf{z} \in \mathbb{R}^n \\ & \text{s.t. } \text{Tr}(\mathbf{G}_1 \mathbf{Z}) \leq \frac{P_c N_{RF}}{N_T} \\ & \text{Tr}(\mathbf{G}_2 \mathbf{Z}) = 1 \\ & \mathbf{Z} = 0, \text{Rank}(\mathbf{Z}) = 1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{And } \mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} I_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 0_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \zeta^H \zeta & -\zeta^H \mathbf{f}_{\text{opt}} \\ -\mathbf{f}_{\text{opt}}^H \zeta & \mathbf{f}_{\text{opt}}^H \mathbf{f}_{\text{opt}} \end{bmatrix}$$

$n = KN_{RF} + 1$  complex hermitian matrices,  $\mathbf{z} = [\text{vec}(\mathbf{F}_{BB}) \ t]^T$ ,  $\mathbf{Z} = \mathbf{z}\mathbf{z}^H$ ,  $\zeta = \mathbf{I}_K \otimes \mathbf{F}_{BB}$ ,  $\mathbf{f}_{\text{opt}} = \text{vec}(\mathbf{F}_{\text{opt}})$  and  $t^2 = 1$ .

As shown in (10), the problem is that  $\text{Rank}(\mathbf{Z}) = 1$  which is not easy to achieve. So, we will use the semidefinite program (SDP) method is convex which can be rewritten as follows [2].

$$\begin{aligned}
 & \underset{\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^N}{\text{minimize}} \text{Tr}(\mathbf{QZ}) \\
 & \text{s.t. } \text{Tr}(\mathbf{G}_1 \mathbf{Z}) \leq \frac{P_c N_{RF}}{N_T} \\
 & \quad \text{Tr}(\mathbf{G}_2 \mathbf{Z}) = 1 \\
 & \quad \mathbf{Z} = 0. \quad (11)
 \end{aligned}$$

To optimize the baseband and RF precoding by the alternating minimization, Algorithm 1 is used as follows.

**Algorithm 1:** Optimize baseband and RF precoding based alternating minimization algorithm

**Input:**  $F_{opt}$

1. Random phase of  $F_{RF}^{(i)}$ ,  $i = 0$
2. Repeat
3. fix  $F_{RF}^{(i)}$ , to find  $F_{BB}^{(i)}$  by (11)
4. fix  $F_{BB}^{(i)}$ , to find the new  $F_{RF}^{(i)}$
5. until the stopping criterion

**B. QoE-Based Precoding**

As we know the relationship between QoS and QoE, thus we can find the best QoE. We can use the SINR to obtain the optimized QoS then use the MOS equation, so that we know the level of user satisfaction and QoE which are formulated as

$$\begin{aligned}
 & \underset{F_{RF}, F_{BB}}{\text{maximize}} K_1 \ln \left( \frac{R_k}{FS_k} \right) + K_2 \\
 & \text{s.t. } \frac{H_k F_{RF} F_{BB, k} F_{BB, k}^H F_{RF}^H H_k}{\sum_{j=1}^K H_k F_{RF} F_{BB, j} F_{BB, j}^H F_{RF}^H H_k + \sigma^2} \geq \text{SINR}_{k, \min} \\
 & \quad \frac{H_k F_{RF} F_{BB, k} F_{BB, k}^H F_{RF}^H H_k}{\sum_{j=1}^K H_k F_{RF} F_{BB, j} F_{BB, j}^H F_{RF}^H H_k + \sigma^2} \leq \text{SINR}_{k, \max} \quad (12)
 \end{aligned}$$

For the proposed optimizing QoE-based precoding in (12), the Algorithm 2 using CVX tool of MATLAB software for disciplined convex programming is shown as follows.

**Algorithm 2:** Optimize QoE-based precoding

**Input:**  $F_{RF}, F_{BB}$

1. Optimize the SINR<sup>i</sup> equation (4) by CVX,  $i = 1$ 
  - cvx\_begin
  - variables SINR<sup>i</sup> from (4)
  - maximize R<sub>k</sub><sup>i</sup> from (3)
  - subject to
  - SINR<sup>i</sup> ≥ SINR<sub>min</sub>
  - SINR<sup>i</sup> ≤ SINR<sub>max</sub>
  - cvx\_end // the stopping criterion
2. SINR<sub>new</sub> = SINR<sup>i</sup>
3. Use the new SINR value into (3)
4. Substitute (3) into the MOS equation in (7)

TABLE I. VALUES SIMULATION PARAMETERS

Parameters	Values	Parameters	Values
$BF$	300 kHz	$N_{ray}$	10
$N_T$	100	$P_{PA}$	30 mW
$N_R$	64	$P_{PS}$	10 mW
$K$	10	$P_{RF}$	50 mW
$N_c$	1	$P_{BB}$	10 mW
$N_{RF}$	5	$P_{DAC}$	200 mW
$N_{ci}$	5	$P_C$	1W

#### IV. SIMULATION RESULTS

For simulation result of the Hybrid Precoding, we present the partially structure compared with fully structure that considers with the number of RF chains and the number of users according to Table I.

For the MOS web browsing, we assume that  $SE_{\max}$  is 7 bps/Hz,  $SE_{\min}$  is 2 bps/Hz,  $K_1$  is 7.352 and  $K_2$  is -1.691. The sizes of web page are 18, 30, 50, 100, 200, 320, 400, 500, 650, and 1000 Kbyte [8].

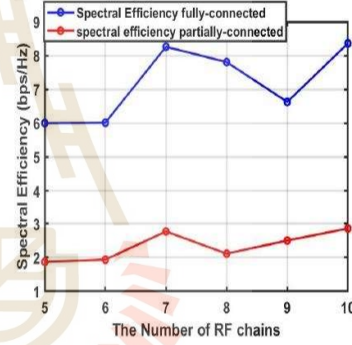


Fig. 2. Spectral efficiency of the fully and partially structures

From Figure 2, the spectral efficiency versus a number of RF chains are shown. The result indicates that the spectral efficiency of both partially structure and fully structure increases with the increase of the number of RF chains. However, the spectral efficiency of fully structure overperforms the partially structure.

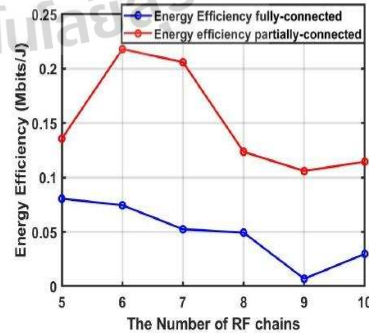


Fig. 3. Energy efficiency of the fully and partially structures

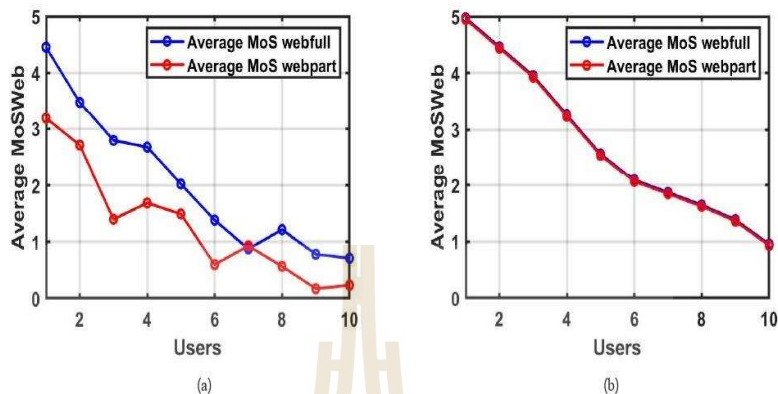


Fig. 4. Average MOS of the fully and partially structures (a) before optimizing web browsing (b) after optimizing web browsing

Figure 3 shows the energy efficiency versus a number of RF chains. The result indicates that the energy efficiency for both partially structure and fully structure decreases with an increase of the number of RF chains. In addition for the energy efficiency, the partially structure outperforms fully structure. Therefore, if we consider the energy savings and low-complex hardware, partially structure would be more appropriate than fully structure.

Also, Figures 4(a) and 4(b) show the average of MOS web browsing with respect to a number of users. We can see that the average MOS for web browsing of partially and fully structures decrease as the number of users increases. Furthermore, Figure 4(b) indicates that after SINR optimizing process the obtained higher SINR cause the data rate value to be increased. Then, the best QoS is achieved in terms of average MOS, the partially structure is very similar to fully structure. Also, the percentage of partially connected and fully structure are 55.24% and 11.67% respectively. As we can see, the average MOS percentage of partially structure is much higher.

#### V. CONCLUSION

In this paper, we have proposed the hybrid precoding in a partially structure with optimizing QoS parameters for the best QoE level. This has shown that, in terms of energy efficiency, the partially structure outperforms the fully structure. Also, after optimizing both partially and fully structures, MOSs are at similar level. Furthermore, the fully structure provides the best performance in terms of spectral efficiency. However, if we require a system of low-cost, energy efficiency, and low-complex hardware, the partially structure is suitably considered.

#### REFERENCES

- [1] Uthansakul P., Khan A.A., "On the energy efficiency of millimeter wave massive MIMO based on hybrid architecture," *Energies*, 12, 11, pp. 2227-2238, 2019.
- [2] Promsuwana N., Uthansakul P., "Feasibility of adaptive 4x4 MIMO system using channel reciprocity in FDD mode," 14th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2008, pp. 1-6.
- [3] Innok A., Uthansakul P., Uthansakul M., "Angular beamforming technique for MIMO beamforming system," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012, pp. 1-9
- [4] Nalband A.H., Sarvagya M., Ahmed M.R., "Optimal Hybrid Precoding for Millimeter wave Massive MIMO Systems," *Third International Conference on Computing and Network Communications*, 171, pp. 810-819, 2020.
- [5] Yu J.X., Shen J.-C., Zhang J., Lettaf K.B., "Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10, 3, pp. 485-500, 2016.
- [6] Ge X., Yang S., Gharavi H., Thompson J., "Joint Optimization of Computation and Communication Power in Multi-User Massive MIMO Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17, 6, pp. 4051-4063, 2018.
- [7] Ayach O.E., Rajagopal S., Abu-Surra S., Pi Z., Heath R.W., "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13, 3, pp. 1499-1513, 2014.
- [8] Rugej M., Sedlar U., Volk M., Sterle J., Hajdinjak M., Kos A., "Novel cross-layer QoE-aware radio resource allocation algorithms in multiuser OFDMA systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 62, 9, pp. 3196-3208, 2014.
- [9] Uthansakul P., Bialkowski M.E., "Multipath signal effect on the capacity of MIMO MIMO-OFDM and spread MIMO-OFDM," *15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON - 2004*, pp. 989-992.
- [10] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, Jr., "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13, 3, pp. 1499-1513, 2014.
- [11] Uthansakul P., Anchuem P., Uthansakul M., Khan A.A., "QoE-Aware self-tuning of service priority factor for resource allocation optimization in LTE networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69, 1, pp. 887-900, 2020.
- [12] Uthansakul P., Anchuem P., Uthansakul M., Ahmad Khan A., "Estimating and Synthesizing QoE Based on QoS Measurement for Improving Multimedia Services on Cellular Networks Using ANN Method," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 17, 1, pp. 389-402, 2020.
- [13] Chen L., Zhang L., "Spectral Efficiency Analysis for Massive MIMO System Under QoS Constraint: an Effective Capacity Perspective," *Mobile Networks and Applications*, 2020.
- [14] Abarghouyi H., Razavizadeh S.M., Bjornson E., "QoE-Aware Beamforming Design for Massive MIMO Heterogeneous Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67, 9, 2018.
- [15] Li A., Masouros C., "Hybrid Precoding and Combining Design for Millimeter-Wave Multi-User MIMO based on SVD," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, pp. 1938-1883, 2017.

## Optimal Hybrid Precoding Based QoE for Partially Structured Massive MIMO System

Farung Samklang, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul\* and Patikorn Anchuen

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

\*Corresponding Author: Monthippa Uthansakul. Email: mtp@sut.ac.th

Received: 28 July 2021; Accepted: 03 September 2021

**Abstract:** Precoding is a beamforming technique that supports multi-stream transmission in which the RF chain plays a significant role as a digital precoding at the receiver for wireless communication. The traditional precoding contains only digital signal processing and each antenna connects to each RF chain, which provides high transmission efficiency but high cost and hardware complexity. Hybrid precoding is one of the most popular massive multiple input multiple output (MIMO) techniques that can save costs and avoid using complex hardware. At present, network services are currently in focus with a wide range of traffic volumes. In terms of the Quality of Service (QoS), it is critical that service providers pay a lot of attention to this parameter and its relationship to Quality of Experience (QoE) which is the measurement of the overall level of user satisfaction. Therefore, this paper proposes hybrid precoding of a partially structured system to improve transmission efficiency and allocate resources to provide network services to users for increasing the user satisfaction under power constraints that optimize the quality of baseband precoding and radio frequency (RF) precoding by minimizing alternating algorithms. We focus on the web browsing, video, and Voice over IP (VOIP) services. Also, a Mean Opinion Score (MOS) is employed to measure the level of user satisfaction. The results show that the partially structured system provides a good user satisfaction with the network's services. The partially structured system provides high energy efficiency up to 85%. Considering web service, the partially structured system for 10 users provides MOS at 3.21 which is higher than 1.75 of fully structured system.

**Keywords:** Massive MIMO; quality of experience (QoE); mean opinion score (MOS); quality of service (QoS); hybrid precoding; partially structured system

### 1 Introduction

MIMO is a communications technology that has been used since 4G. The basic principle of MIMO is the use of more than one antenna to transmit and receive data. This technique is able to support the use of mobile phones in larger quantities. However, a 5G system involves higher data density to support user requirements compared to the 4G system. This introduces the need of



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



using more than 100 antennas to transmit and receive data, so called massive MIMO system and multi-directional beamforming. It can alter the magnitude and phase for signal control, allowing the antenna to focus on each user. Another outstanding wireless technology in massive MIMO is millimeter wave (mmWave), which operates in a frequency range of 30–300 GHz and allows high-speed data transmission. The conventional precoding technologies use many RF chains in only digital precoding, resulting in a loss of power consumption and consequent costs at the Base Stations (BS) [1]. Many researchers have focused on hybrid precoding, which is a combination of digital and analog systems that reduce the number of RF chains without sacrificing the efficiency of transmission [2,3]. For Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) technique in massive MIMO wireless communications, each subcarrier is modulated at a low symbol rate reducing multipath fading, high Signal to Noise Ratio (SNR). This can eliminate Inter Symbol Interference (ISI) [4–6].

The hybrid precoding has two structures: fully and partially structured systems. The fully structured system has a higher spectral efficiency than the partially structured system [7,8]. This is because there is more than one RF chain connected to the same antenna while more phase shifters and circuits are needed to be added in analog precoding causing an increase in power consumption and hardware complexity. However, for the partially structured system in the RF chain, the signal travels through fewer phase shifters, resulting in lower spectral efficiency but higher energy efficiency [9–11]. The work presented in [12] has demonstrated that the partially structured system in terms of spectral efficiency outperforms analog beamforming, particularly when the signal-to-noise ratio (SNR) value is high. For the partially structured system, the authors of [13] have proposed an alternative minimization method to optimize energy efficiency of baseband/RF precoding leading to the partially structured system of hybrid precoding which provides better energy efficiency than both fully and partially structured systems of Orthogonal Matching Pursuit-Sparse Precoding & Combining (OMP) algorithm [14]. The OMP algorithm can find the optimal array response vector, but there are some limitations of signal distribution and sparsity constraints in analog precoding.

The goal of 5G wireless communication is to provide high throughput for long-distance transmission while improving QoS performance. The QoS is the management bandwidth or network channel management to optimize the performance of an audio, video, and network quality service, where parameters such as packet loss, jitter, and delay are considered. To improve transmission quality for high QoS [15], beamforming technology has been proposed to Small Cell Access (SCA) in terms of dynamic and static under power constraint with the results indicating higher energy efficiency and data rate than the zero-forcing (ZF) method. This is because ZF has space constraints in the analog front-end and power consumption [16]. Consequently, QoS is an important parameter for operators to understand users in order to manage the service quality and efficiency to meet the user requirements.

The QoE is a customer-oriented service which is an important factor in user satisfaction or experience. When a consumer is dissatisfied with a network's service, the QoS has to be improved. Sometimes, even if the QoS value is high, the users may not be satisfied at the time since the area is dense with many users. So, in the relationship of both parameters to optimize the network service, we must evaluate several factors related to both QoE and QoS. For assessing QoE in the subjective part, a Mean Opinion Score (MOS) can be used to express the level of user satisfaction. In general, MOS ranks from 1 to 5 levels as 5 is excellent and 1 is poor [17]. Currently as mobile Internet services are rapidly growing, QoE services such as web browsers on chrome, online games, YouTube, and voice conference may pose subsequent problems. Therefore, a method

for improving the network must be presented to meet the needs of users [18,19]. In [20], the authors have presented an improvement in QoE quality in terms of Voice over Internet Protocol (VoIP) services with software-defined networking (SDN) by forwarding data path control and improved coders/decoders (CODECS) performance of VoIP service. The QoE user satisfaction is also predicted using an Artificial Neural Network (ANN) and resource blocks (RBs) with Particle Genetic (PGA) [21,22] to allocate QoS and data precision. As a result, the average QoE satisfaction for each service can be increased. To increase user satisfaction with respect to QoE, techniques presented in [23] employ OFDMA to support low data rates of multiple users (Multiple Access) and use Radio Resource Allocation (RRA) for downlink to ensure fairness to users and optimum user satisfaction. In addition, the authors in [24] have used heterogeneous network techniques which combine a variety of wireless communication nodes, such as Macro Cell, Small Cell, DAS, and Wireless LAN as well as the [15] to allocate QoS network resources. As a result, when user satisfaction increases with the increase of the SCA, it may be costly because the SCA uses higher computational power than 50% of total power at the BS [25].

The partially structured system is getting much attention both in implementation and simulation as mentioned above. However, although the partially structured system can simplify the system and achieve high energy efficiency, the partially structured system has not been measured whether it is efficient enough to meet the user needs. From the work presented in [24], although the heterogeneous technique is used to optimize user satisfaction, its increased cost and energy constraints also optimize user satisfaction.

In this paper, we propose a partially structured system of hybrid precoding in Massive MIMO-OFDM because it is flexible for designing, low complexity, and provides a bandwidth efficiency to achieve high bitrates. Also, we consider an improvement in the quality of user experience and network resource allocation to suit users. There are three services on focus: web browsing, video, and VOIP [20,23,24]. This paper concerns only three services including web browsing, video, and VOIP [20,23,24]. The reason is that three services are expected to be the most popular baseline services over 5G networks with fast connections and high-bandwidth connections [24]. The followings are the contributions of this work:

- Improvement in baseband and RF precoding under power constraints, and the appropriate number of RF chains to reduce power consumption on the massive MIMO-OFDM system in downlink.
- Improvement in the quality of experience for all three services to achieve user satisfaction and cost-effective use of network resources.
- Comparison in partially structured system to indicate that hybrid precoding provides higher energy efficiency and user satisfaction than OMP algorithm.

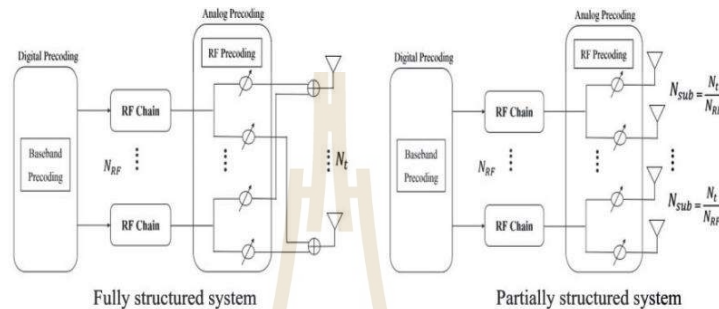
The rest of this paper is organized as follows. In Section 2, the system model involving the hybrid precoding and service model are discussed. Then, Section 3 shows the optimization of partially structured precoding. Section 4 presents the optimization of QOE-based precoding followed by the simulation results discussed in Section 5. Finally, Section 6 concludes the paper.

## 2 System Model

### 2.1 Hybrid System Model

The hybrid precoding is a massive MIMO-OFDM system technique. As seen in Fig. 1, it has two structures: fully and partially structured systems. For energy efficiency and reduction of

hardware complexity, we recommend that the partially structured system is suitable for massive MIMO systems.



**Figure 1:** The hybrid precoding of massive MIMO a) Fully structured system b) Partially structured system

We focus on the massive MIMO system's downlink where  $N_t$  is the number of transmitting antennas,  $N_r$  is the number of receiving antennas and  $N_{RF}$  is the number of RF chains. The  $N_{sub} = N_t / N_{RF}$  is connected to the partially structured system in one RF chain. In the system, there is a digital baseband precoding  $\mathbf{F}_{BB} \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times K}$  where  $K$  is the number of mobile users and the RF precoding  $\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}$  is block diagonal matrix  $\mathbf{F}_{RF} = \text{diag}\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_{N_{RF}}\}$  where  $f_i = (N_t / N_{RF}) \times 1$  complex. For the problem of the non-convex [6, 12] to solve the use of the decoupling program between transmitting and receiving, the received signal can be written as [13]

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,k} \mathbf{s} + \mathbf{n}_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, K \quad (1)$$

where  $\mathbf{y}_k \in \mathbb{C}^{N_r}$ ,  $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$  the channel matrix associated with Channel State Information (CSI) between the BS and  $K$  mobile users,  $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  is vector of transmitting and  $\mathbf{n}_k$  is additive white Gaussian noise, i.e., assuming without the loss of generality and  $\sigma_k^2 = 1$ . The channel matrix of massive MIMO-OFDM is

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{\frac{N_t N_{rf} p_k}{N_{cl} N_{ray}}} \sum_{c=0}^{N_{cl}} \sum_{r=1}^{N_{ray}} \alpha_{cr} \mathbf{a}_r(\theta_{cr}, \vartheta_{cr})^H e^{-\frac{j2\pi cr}{K}}, \quad (2)$$

where  $N_{ray}$  is the amount of rays in each cluster between the BS and  $K$  mobile users,  $N_{cl}$  is the amount of clusters between the BS and  $K$  mobile users,  $p_k$  is the path loss between the BS and  $K$  mobile users  $\alpha_{cr}$  is the complex gain of  $r$ th ray in the  $c$ th propagation cluster and  $\theta_{cr}, \vartheta_{cr}$  are the azimuth (elevation) angles of departure and angles of arrival (AoDs/AoAs). We decompose  $\mathbf{H}_k = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H$  by Singular value decomposition (SVD) where  $\mathbf{U}$  and  $\mathbf{V}$  are complex orthogonal matrix,  $\mathbf{\Sigma}$  is a diagonal matrix and a subscript  $H$  is a conjugate transpose. The data rate can be expressed as

$$R_k = BW \sum_{k=1}^K \log_2(1 + SINR_k), \quad (3)$$

where  $BW$  is bandwidth and  $SINR_k$  is the Signal to Interference plus Noise Ratio, which can be written as

$$SINR_k = \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,k} \mathbf{F}_{BB,k}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}_k^H}{\sum_{k=1}^K \sum_{j \neq k}^K \mathbf{H}_k \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB,j} \mathbf{F}_{BB,j}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}_k^H + \sigma_k^2} \quad (4)$$

### 2.2 Energy Efficiency

Spectral efficiency is a measurement of the data transmission performance which can be achieved over a given  $BW$ . Even theoretically, the spectral efficiency of fully structured system is also higher. However, in large MIMO systems, energy consumption is also an important indicator. It can consider the relationship between the data rate and the total power consumption, also known as energy efficiency can be expressed as

$$EE = \frac{R_k}{P_{BB} + N_{RF}(P_{RF} + P_{DAC}) + N_t P_{PA} + N_t P_{PS}}, \quad (5)$$

where the total power consumption of the partially structured system shown in [26]. The  $P_{BB}$  is the power for the baseband precoding,  $P_{RF}$  is the power of RF chains,  $P_{DAC}$  is the power digital to analog converter,  $P_{PA}$  is the power of power amplifier and  $P_{PS}$  is the power of a phase shifter. In the power parameters, we assume as follows:  $P_{BB} = 5$  mW,  $P_{RF} = 30$  mW,  $P_{DAC} = 200$  mW,  $P_{PA} = 20$  mW,  $P_{PS} = 30$  mW.

### 2.3 Service QoE Model

The QoE is a tool for measuring the overall level of user satisfaction or quality of experience with a communication network service. This can indicate that the quality of transmission signals is good or should be improved by assessing the satisfaction of each user. If communication is hampered during the now playing service, the network fails. When QoE is used to measure the level of satisfaction, the user may experience the good level of satisfaction without the utilization of high bandwidth or throughput. The QoE is regarded as a user-oriented service in which the QoS parameters are directly/indirectly contributed to their impact QoS which is a network-oriented performance parameter about hardware-software and in the physical layer i.e.,  $SINR$ , PLR and delays.

In this work, we also present the QoE for three services: web browsing, video H.242, and VOIP. The MOS as shown in Tab. 1 is employed.

**Table 1:** The MOS score with user satisfaction

MOS	User satisfaction
5	Excellent
4	Best
3	Good
2	Fair
1	Poor

### 2.3.1 Web Browsing Service

The QoE for web browsing is essential to measure user satisfaction since most people use the Internet as an indispensable part of their everyday lives, as a result, web surfing QoE can assist service providers in determining whether network circumstances are influencing user satisfaction. The MOS of web browsing service can be expressed as [23,24]

$$MOS_{web} = -K_1 \ln(d(R_{web})) + K_2, \quad (6)$$

where  $MOS_{web}$  is the satisfaction level of user, as shown in Tab. 1 where  $K_1$  and  $K_2$  are constant correlated with  $MOS_{web}$  in order to have a score of 1 to 5 and  $d(R_{web})$  have a correlation with web-related factors like the round trip time ( $RTT$ ), the web page size ( $FS$ ), the data rate ( $R_k$ ), the maximum segment size ( $MSS$ ) by TCP and HTTP are protocols that is used by  $d(R_{web})$  equation as follows [24]

$$d(R_{web}) = 3RTT + \frac{FS}{R_k} + L \left( \frac{MSS}{R_k} + RTT \right) - \frac{2MSS(2^L - 1)}{R_k}, \quad (7)$$

where  $L = \min[L_1, L_2]$  is the parameter of the number of slow start cycles with idle periods, where the parameter of  $L_1$  and  $L_2$  are the number of cycles which are taken for the congestion window to reach the bandwidth-delay product (BDP) and the number of slow start cycles required until the entire web page size is transferred, respectively. They are defined as [24]

$$L_1 = \log_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{R_k RTT}{2MSS} \right) \quad (8)$$

$$L_2 = \log_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{FS}{4MSS} \right). \quad (9)$$

In [24] and [27], the  $RTT$  in 5G is negligible and we only consider a few user experiences. Therefore, the use of Eq. (6) in web browsing service can be rewritten as

$$MOS_{web} = K_1 \ln \left( \frac{R_k}{FS} \right) + K_2. \quad (10)$$

### 2.3.2 Video Service

The use of video streaming of H.264/AVC video codec is a highly efficient codec that provides high-quality images and a minimum bandwidth for the recording and distribution of full HD video and audio. The video codec H.264/AVC uses the estimation of Peak Signal-to-Noise Ratio ( $PSNR$ ) which is a quality measurement as shown in Eq. (11) [28,29]

$$PSNR = m + n \sqrt{\frac{R_k}{p} \left( 1 - \frac{p}{R_k} \right)}, \quad (11)$$

The parameter  $m$ ,  $n$  and  $p$  are characterized as a specific video stream [28]. The relationship between  $PSNR$  and MOS of video can be expressed as follows [24]

$$MOS_{video} = d \log(PSNR) + e, \quad (12)$$

The parameters  $d$  and  $e$  are constant correlated with  $MOS_{video}$  in order to have a score of 1 to 5 with following conditions in the video MOS values

$$MOS_{video}(PSNR_k) = \begin{cases} 1; & PSNR_k \leq PSNR_1 \\ d \log(PSNR) + e; & PSNR_1 < PSNR_k < PSNR_{4.5} \\ 4.5; & PSNR_k \geq PSNR_{4.5} \end{cases} \quad (13)$$

In the design of video streaming,  $PSNR_{4.5} = 42$  dB is Excellent and  $PSNR_1 = 30$  dB is Poor, which are calculated from the coding chrominance component [29].

### 2.3.3 VoIP Browsing Service

VoIP employs the AMR-WB audio codec, which provides high-quality speech for HD VoIP as well as real-time multi-channel implementation. The model of AMR-WB implicates R-factor defined as follows [20,30–32]

$$R_{factor} = R_o - I_s - I_d - I_{eff} - A_f, \quad (14)$$

where  $R_o$  is the basic signal to noise ratio,  $I_s$  is the sum of all impairments which might simultaneously happen less or more with the voice transmission and this factor is set=0,  $I_d$  is the delay impairment factor showing all impairments due to voice signal delay,  $A_f$  is the advantage factor,  $I_{eff}$  is the effective equipment impairment factor, by  $I_e$  is the equipment impairment factor at zero packet-loss,  $B_{pl}$  is the packet-loss robustness factor and  $P_{pl}$  is the packet loss rate.

$$I_{eff} = I_e + (129 - I_e) \times \left( \frac{P_{pl}}{P_{pl} \times B_{pl}} \right), \quad (15)$$

The VOIP of MOS model relates to  $R_{factor}$  as the WB audio codec in ITU-T G.107.1. This has a maximum value of  $R_o = 129$  by  $R_o = R_{factor}/1.29$  [31,32]. The MOS of VOIP service can be written as follows

$$MOS_{VOIP} = 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)(7 \times 10^{-6}), \quad (16)$$

where  $R$  has the score criteria as shown in Tab. 2. summarizes the MOS score of VOIP on the scale 1 to 5 can be obtained as follows

$$MOS_{VOIP}(R) = \begin{cases} 1; & R < 0 \\ 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)(7 \times 10^{-6}); & 0 < R < 100 \\ 4.5; & R > 100 \end{cases} \quad (17)$$

**Table 2:** The MOS score of VOIP [31,32]

MOS	User satisfaction	R
4.3–5.0	Excellent	90–100
4.0–4.3	Best	80–90
3.6–4.0	Good	70–80
3.1–3.6	Fair	60–70
2.6–3.1	Poor	50–60
1–2.6	Bad	Less than 50

### 3 Optimization of a Partially Structured Precoding

For the partially structured system, we focus on the optimized fully digital precoding matrix  $\mathbf{F}_{opt}$  and the precoding of digital/analog by minimizing the euclidean distance method between  $\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}$  and  $\mathbf{F}_{opt}$  expressed as [13,33]

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RF}, \mathbf{F}_{BB}}{\text{minimize}} \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\|_F \\ & \text{subject to } \begin{cases} \mathbf{F}_{RF} \in \text{diag}\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_{RF}\} \\ \|\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\|_F^2 \leq P_c, \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

where  $P_c$  is a maximum power constant. We use alternating minimization method to optimize  $\mathbf{F}_{RF}$  and  $\mathbf{F}_{BB}$ , that alternate minimizing using a straightforward method for solving the minimal value of a function involving two more variables. The parameters  $\mathbf{F}_{RF}$  and  $\mathbf{F}_{BB}$  as shown in Eq. (18) can be used to optimize the spectral efficiency and energy efficiency based on power constraints

#### 3.1 Analog Precoding

The analog precoding is the part that amplifies the downlink signal and controls the transmit power. The phase of the signal is only changed by the  $\mathbf{F}_{RF}$  precoding matrix, there is a power constraints and structure of  $\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}$  Eq. (18), we can find the  $\mathbf{F}_{RF}$  by multiplying the row of  $\mathbf{F}_{BB}$ , so the  $\mathbf{F}_{RF}$  constraint can be rewritten as

$$\|\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\|_F^2 \leq \frac{N_t}{N_{RF}} \|\mathbf{F}_{BB}\|_F^2 \leq P_c. \quad (19)$$

Thus, the alternating minimizing of closed-form solution for  $\mathbf{F}_{RF}$  analog precoding expressed as

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}}{\text{minimize}} \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\|_F \\ & \text{subject to } \mathbf{F}_{RF} \in \text{diag}\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_{RF}\}, \end{aligned} \quad (20)$$

Furthermore, the column property of  $\mathbf{F}_{RF}$  in Eq. (19) can be rewriting as

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}}{\text{minimize}} \|\mathbf{F}_{opt} - \mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\|_F \\ & \text{phase}(\mathbf{F}_{opt}) = \text{phase}(\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}), \end{aligned} \quad (21)$$

$\text{phase}(\mathbf{F}_{opt})$  is the operation to achieve each  $\mathbf{F}_{opt}$  matrix element phase and  $\mathbf{F}_{RF}$  property, hence

$$\text{phase}(\mathbf{F}_{RF(i,f)}) = \text{phase}(\mathbf{F}_{opt(i,:)}\mathbf{F}_{BB(i,:)}^H),$$

$$1 \leq i \leq N_t, \quad f = \left[ i \frac{N_{RF}}{N_t} \right]. \quad (22)$$

### 3.2 Digital Precoding

In the digital baseband, the downlink signal and transmitted power can be controlled using the signal processing part in the precoding. To optimize the digital precoding, the value of  $F_{RF}$  is fixed to solve the solution of baseband and the value of  $F_{BB}$  is set to the maximum power constant. Then, the Eq. (18) can be written as

$$\begin{aligned} & \underset{F_{BB} \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times K}}{\text{minimize}} \quad \|F_{opt} - F_{RF} F_{BB}\|_F \\ & \text{subject to} \quad \|F_{BB}\|_F^2 \leq \frac{N_{RF} P_c}{N_t}, \end{aligned} \quad (23)$$

From [13] and Eq. (23), the problem is a nonconvex quadratically constrained quadratic program (QCQP). Let  $\mathbf{z} = [\text{vec}(F_{BB})]^T$ ,  $\mathbf{Z} = \mathbf{z}\mathbf{z}^H$ ,  $\mathbf{\zeta} = I_K \otimes F_{BB, f_{opt}} = \text{vec}(F_{opt})$ ,  $l^2 = 1$ , where  $\mathbf{G}_1$ ,  $\mathbf{G}_2$  and  $\mathbf{Q}$  are symmetric matrices

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} I_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 0_{n-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{\zeta}^H \mathbf{\zeta} & -\mathbf{\zeta}^H f_{opt} \\ -f_{opt}^H \mathbf{\zeta} & f_{opt}^H f_{opt} \end{bmatrix},$$

$n = KN_{RF} + 1$  complex Hermitian matrices expressed as minimize  $Tr(\mathbf{Q}\mathbf{Z})$

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n}{\text{minimize}} \quad Tr(\mathbf{Q}\mathbf{Z}) \\ & \text{subject to} \quad \begin{cases} Tr(\mathbf{G}_1\mathbf{Z}) \leq \frac{N_{RF} P_c}{N_t} \\ Tr(\mathbf{G}_2\mathbf{Z}) = 1 \\ \mathbf{Z} \succeq 0, \quad \text{Rank}(\mathbf{Z}) = 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

As shown in Eq. (24), the problem is that  $\text{Rank}(\mathbf{Z}) = 1$  which is not easy to achieve. So, we will use the semidefinite program (SDP) method as follows

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n}{\text{minimize}} \quad Tr(\mathbf{Q}\mathbf{Z}) \\ & \text{subject to} \quad \begin{cases} Tr(\mathbf{G}_1\mathbf{Z}) \leq \frac{N_{RF} P_c}{N_t} \\ Tr(\mathbf{G}_2\mathbf{Z}) = 1 \\ \mathbf{Z} \succeq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

Algorithm 1 is to optimize the partially structured precoding as the Alternating Minimization Algorithm of analog precoding on Eq. (20) and digital precoding on Eq. (23).



---

**Algorithm 1:** Optimize the Partially Structured Precoding as the Alternating Minimization Algorithm of Analog Precoding and Digital Precoding.

---

**Input:**  $F_{opt}$

1. Random phase of  $F_{RF}^{(i)}$ ,  $i=0$
  2. Repeat
  3. fix  $F_{RF}^{(i)}$ , to find  $F_{BB}^{(i)}$  by Eq. (25)
  4. fix  $F_{BB}^{(i)}$ , to find the new  $F_{RF}^{(i)}$
  5. until the criterion stops
- 

#### 4 Optimize QOE-Based Precoding

This section optimizes the QoS parameters to high the spectral efficiency of all three services. To optimize the MOS of service, the MOS minimum threshold based on Eqs. (10), (12) and (16), which in optimizing as we know that QoS are related to QoE, we will consider SINR by defining the minimum  $SINR_{min}$  as a constant with alternating maximize methods for user satisfaction, which can be written as follows

minimize  $MOS_k$   
 $F_{RF}, F_{BB,k,j}$

$$\text{subject to } \begin{cases} \frac{H_k F_{RF} F_{BB,k} F_{BB,k}^H F_{RF}^H H_k^H}{\sum_{k=1, j \neq k}^K \sum_{k=1}^K H_k F_{RF} F_{BB,j} F_{BB,j}^H F_{RF}^H H_k^H + \sigma_k^2} \geq SINR_{min} \\ \sum_{k=1, j \neq k}^K \sum_{k=1}^K F_{RF} F_{BB,k,j} \leq P_c, \end{cases} \quad (26)$$

where  $MOS_k$  represents all three services; web browsing, video and VOIP. The purpose of this paper is to achieve a high data rate using an alternating maximized method. In the part of optimizing  $SINR$  for user satisfaction, the baseband precoding and RF precoding  $F_{RF} F_{BB,k,j}$  are considered while remaining the maximum power constraint of systems  $P_c$ . We optimize the user satisfaction for all three services as shown in Algorithm 2

---

**Algorithm 2:** Optimized QoE-Based Precoding

---

**Input:**  $F_{RF}, F_{BB}$

1. Optimize the  $SINR^i$  Eq. (4),  $i=1$
  2. Repeat
  3. Find maximize  $R_k^i$  from Eq. (3) under in Eq. (26)
  4. until the criterion stops
  5.  $SINR_{new} = SINR^i$ , use the new  $SINR$  value into Eq. (3)
  6. Substitute Eq. (3) into the  $MOS_k$  equation in Eqs. (10), (12) and (16).
- 

#### 5 Simulation Results

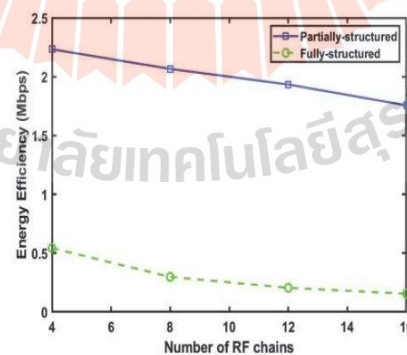
In this section, the proposed system with partial structure of hybrid precoding for the downlink in the massive MIMO-OFDM system is discussed. We present numerical simulations

which have parameters as shown in Tab. 3. In this massive MIMO-OFDM system, we consider 64 sub-channels. In terms of energy efficiency compared to the number of RF chains, the spectral efficiency is compared with SNR. To analyze three services, we compare the partially structured system of hybrid precoding and the fully-structured system of OMP precoding, which are referred to the method presented in [14].

From Fig. 2, we consider the energy efficiency vs. the number of RF chains in massive MIMO systems. When comparing the hybrid precoding's energy efficiency, it can be seen that the partially structured system provides higher energy efficiency than a fully structured system. Also, when the RF chains are less, the systems can save more energy. The energy efficiency of fully and partially structured systems decreases with an increase in the number of RF chains in which the partially structured system provides a higher percentage up to 85% compared to fully structured system with an average number of 16 RF chains.

**Table 3:** Numerical simulation parameters

parameter	value
Transmitting antennas	144
Receiving antennas	36
Amount of rays in each cluster	10
Amount of clusters	5
Number of RF chains	4
path loss	3.5
Maximum power constant	33 dBm
Bandwidth	300 kHz
Frequency	28 GHz



**Figure 2:** Energy efficiency in massive MIMO systems versus the number of RF chains for hybrid precoding in fully and partially structured systems

Fig. 3 shows the partially structured system based on different number of transmitted antennas with the spectral efficiency, when comparing the number of transmitted antennas as follows:  $N_t = 32 : N_r = 32$ ,  $N_t = 64 : N_r = 64$  and  $N_t = 144 : N_r = 36$ . Usually, the following numbers of antennas are commonly used for the massive MIMO in BS for Nokia, Ericsson [34]:  $N_t = 32$  and  $N_t = 64$ . As seen in Fig. 3, the system performance for all three cases increases for  $N_t = 32$ ,  $N_t = 64$  and  $N_t = 144$  in which the spectral efficiency increases when the SNR value and the number of antennas increases. Also,  $N_t = 144$  results in the system becoming high resistance to noise interference. The spectral efficiency of  $N_t = 144$  provides higher efficiency than  $N_t = 32$  and  $N_t = 64$  with a percentage of 64.19% and 51.84% respectively, compared to the average of SNR from  $-20$  to  $10$  dB.

### 5.1 Web Browsing Service

For the parameters for web browsing service shown in Eq. (9), we assume the number of users  $K = 10$  and the web page size of the website according to [23]. The web page size most accessible by users are  $FS = 18, 30, 50, 100, 200, 320, 400, 500, 650,$  and  $1000$  Kbyte. We consider the minimum spectral efficiency and maximum spectral efficiency are  $2$  bps/Hz and  $7$  bps/Hz respectively. So, we use parameters of  $K_1 = 3.1929$  and  $K_2 = 29.9216$ . The average web page size is  $FS = 320$  Kbyte.

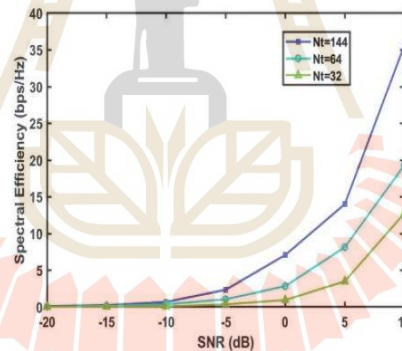
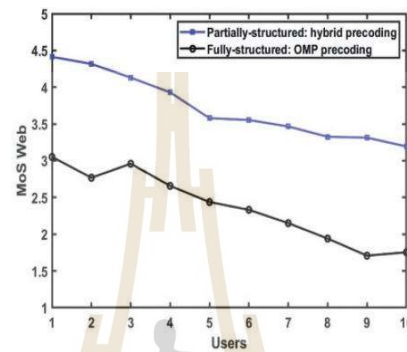


Figure 3: Spectral efficiency versus received SNR in massive MIMO systems for three different number of transmitted antennas  $N_t = 32$ ,  $N_t = 64$  and  $N_t = 144$

Fig. 4 shows the MOS of web browsing service with respect to the number of users. In this figure, we compare the partially structured system of hybrid precoding with the fully structured system of OMP precoding in massive MIMO systems. The partially structured system provides a higher MOS web than the fully structured system. Also, the size of the web page grows greater, the level of MOS decreases. This means that, for the number of users is 10 with a web page size of 1000 Kbyte, a larger data rate is necessary due to the lowest satisfaction. However, the partially structured system with the number of 10 still regards the MOS for web = 3.21 and MOS web of OMP precoding = 1.75. The OMP algorithm of fully structured system can find an optimal array vector. Where the space constraints of analog precoding at a low RF chain affects low spectrum.

As a result, the MOS of user satisfaction is less compared to hybrid precoding of the partially structured system which processes both digital and analog precoding at RF chain = 4.



**Figure 4:** MOS Web versus the number of users for the partially structured system of hybrid precoding and the fully structured system of OMP precoding

### 5.2 Video Service

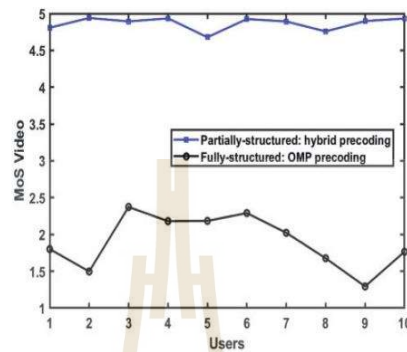
In terms of video service for parameters concerned in Eqs. (11) and (12), we assume the parameters  $m$ ,  $n$ , and  $p$  which are 9.45, 5.24 and 0.23 respectively. For the parameters  $d = 27.37$  and  $e = -39.43$  from the H.264/AVC video codec standard with maximum PSNR = 42 dB and minimum PSNR = 30 dB.

According to Fig. 5 shows the MOS of video service with respect to the number of users. It obviously can be seen that the partially structured system of hybrid precoding provides a higher satisfaction MOS video than the fully structured system of OMP precoding. We aim to give a high data rate without approaching the fairness techniques for each user. Note that the level of MOS video shown in Fig. 5 is not equal for all users because the bitrate is changed by the randomness of interference and nonlinear element. As a result, the graph is a variation of MOS at 10 users.

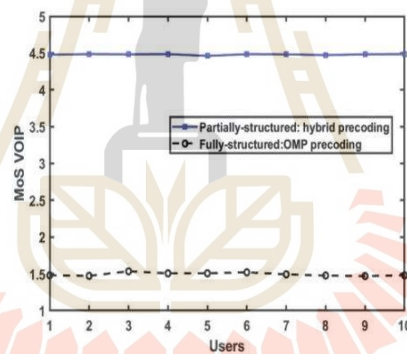
### 5.3 VOIP Service

For the part of simulation for VOIP service, the E-model at 100 ms in Eq. (14) follows ITU-T G.107.1 and ITU-T G.113. We set  $A_f = 0$ ,  $I_d = 4.2552$  ms,  $B_{pl} = 16.1$  and  $I_e = 11$ . The parameters involved in finding the packet loss rate as the bytes and  $RTT = 20$  ms.

Fig. 6 illustrates the MOS VOIP with respect to the number of users compared with the fully structured system of OMP precoding in massive MIMO systems. The results are similar to the video service in which the partially structured system of hybrid precoding provides better user satisfaction than the fully-structured of OMP precoding. However, MOS Video shown in Fig. 5 provides higher user satisfaction than MOS VOIP because VOIP requires a higher data rate.



**Figure 5:** MOS Video with the number of users for partially structured system of hybrid precoding and the fully structured system of OMP precoding



**Figure 6:** MOS VOIP with the number of users for the partially structured system of hybrid precoding and the fully structured system of OMP precoding

## 6 Conclusion

This paper has proposed the hybrid precoding of a massive MIMO-OFDM system for the partially structured system. The optimized solution of a partially structured system under power constraints can achieve a high data rate for user satisfaction, when considering three services on the web browsing, video, and Voice over IP (VOIP) services. The simulation results have shown that increasing the number of transmitted antennas can reduce signal interference, resulting in high spectral efficiency which leads to better QoE for user satisfaction. Moreover, the partially structured system provides higher user satisfaction than OMP precoding for the fully structured system. Also, the partially structured system still provides energy efficiency up to 85% and reduces complexity in a massive MIMO system.

**Funding Statement:** This work is supported by SUT Research and Development Funds and by Thailand Science Research and Innovation (TSRI).

**Conflicts of Interest:** The authors declare that they have no conflicts of interest to report regarding the present study.

#### References

- [1] A. Salh, L. Audah, N. Shah and S. Hamzah, "Adaptive antenna selection and power allocation in downlink massive MIMO systems," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, no. 11, pp. 3521–3528, 2017.
- [2] P. Uthansakul and A. A. Khan, "On the energy efficiency of millimeter wave massive MIMO based on hybrid architecture," *Energies*, vol. 12, no. 11, pp. 2227–2238, 2019.
- [3] P. Uthansakul and A. A. Khan, "Enhancing the energy efficiency of mmWave massive MIMO by modifying the RF circuit configuration," *Energies, MDPI Open Access Journal*, vol. 12, no. 22, pp. 1–23, 2019.
- [4] X. Gao, L. Dai, S. Han, I. Chih-Lin and R. W. Heath, "Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 998–1009, 2016.
- [5] X. Zheng, Y. Wang and W. Liu, "Partially connected hybrid precoding design for millimeter wave MIMO systems," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1325, no. 1, pp. 012057, 2019.
- [6] Y. Feng, Y. Jiang, S. Han, C. I. and R. W. Heath, "Hybrid precoding for massive MIMO systems using partially-connected phase shifter network," in *Int. Conf. on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Xi'an, China, pp. 1–6, 2019.
- [7] J. Du, W. Xu, H. Shen, X. Dong and C. Zhao, "Hybrid precoding architecture for massive multiuser MIMO with dissipation: Sub-connected or fully-connected structures?," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 5465–5479, 2018.
- [8] L. N. Ribeiro, S. Schwarz, M. Rupp and A. L. F. de Almeida, "Energy efficiency of mmWave massive MIMO precoding with low-resolution DACs," *Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 12, no. 2, pp. 298–312, 2018.
- [9] P. Uthansakul and M. E. Bialkowski, "Multipath signal effect on the capacity of MIMO, MIMO-oFDM and spread MIMO-oFDM," in *Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Warsaw, Poland, vol. 3, pp. 989–992, 2004.
- [10] R. A. Pitaval, B. M. Popovic, M. Mohamad and R. Nilsson, "Spectrally-precoded OFDM for 5G wide-band operation in fragmented sub-6 GHz spectrum," *ArXiv Preprint ArXiv:1606.00623*, vol. 1606.00623, pp. 1–12, 2016.
- [11] L. Zhao, K. Li, K. Zheng and M. O. Ahmad, "An analysis of the tradeoff between the energy and spectrum efficiencies in an uplink massive MIMO-oFDM system," *Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 62, no. 3, pp. 291–295, 2014.
- [12] X. Yu, J. C. Shen, J. Zhang and K. B. Letaief, "Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 485–500, 2016.
- [13] X. Ge, J. Sun, X. Gharavi and J. Thompson, "Joint optimization of computation and communication power in multi-user massive MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 4051–4063, 2018.
- [14] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi and R. W. Heath, "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, 2014.
- [15] S. Ragunathan and P. Dananjayan, "Qos and sum rate maximization in heterogeneous massive MIMO network," in *IEEE Int. Conf. on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*, Pondicherry, India, pp. 1–4, 2019.

- [16] R. W. Heath, R. Thay, H. Kim and H. Ju, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 436–453, 2014.
- [17] D. Wu, Q. Wu, Y. Xu and Y. C. Liang, "QoE and energy aware resource allocation in small cell networks with power selection, load management and channel allocation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 8, pp. 7461–7473, 2017.
- [18] M. Fiedler, T. Hossfeld and P. Tran-Gia, "A generic quantitative relationship between quality of experience and quality of service," *IEEE Network*, vol. 24, no. 2, pp. 36–41, 2010.
- [19] P. Casas, M. Seufert, F. Wamser, B. Gardlo, A. Sackl *et al.*, "Next to you: Monitoring quality of experience in cellular networks from the end-devices," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 13, no. 2, pp. 181–196, 2016.
- [20] D. Kwon, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh and A. Sayeed, "Qoe-based adaptive mVoIP service architecture in SDN networks," in *the Seventh Int. Conf. on Communication Theory*, Nice, France, pp. 62–67, 2014.
- [21] P. Uthansakul, P. Anchuen, M. Uthansakul and A. A. Khan, "Estimating and synthesizing QoE based on QoS measurement for improving multimedia services on cellular networks using ANN method," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 17, no. 1, pp. 389–402, 2020.
- [22] P. Uthansakul, P. Anchuen, M. Uthansakul and A. A. Khan, "Qoe-aware self-tuning of service priority factor for resource allocation optimization in LTE networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 887–900, 2020.
- [23] M. Rugej, U. Sedlar, M. Volk, J. Sterle, M. Hajdinjak *et al.*, "Novel cross-layer QoE-aware radio resource allocation algorithms in multiuser OFDMA systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3196–3208, 2014.
- [24] H. Abarghouyi, S. M. Razavizadeh and E. Bjornson, "Qoe-aware beamforming design for massive MIMO heterogeneous networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 8315–8323, 2018.
- [25] X. Ge, J. Yang, H. Gharavi and Y. Sun, "Energy efficiency challenges of 5G small cell networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 184–191, 2017.
- [26] A. Li and C. Masouros, "Hybrid precoding and combining design for millimeter-wave multi-user MIMO based on SVD," in *IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, Paris, France, pp. 1–6, 2017.
- [27] J. A. del Peral-Rosado, F. Gunnarsson, S. Dwivedi, S. M. Razavi, O. Renaudin *et al.*, "Exploitation of 3D city maps for hybrid 5G RTT and GNSS positioning simulations," in *ICASSP IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Barcelona, Spain, pp. 9205–9209, 2020.
- [28] L. U. Choi, M. T. Ivrlac, E. Steinbach and J. A. Nossek, "Sequence-level models for distortion-rate behaviour of compressed video," in *IEEE Int. Conf. on Image Processing*, Genova, Italy, pp. II–486, 2005.
- [29] A. Saul and G. Auer, "Multiuser resource allocation maximizing the perceived quality," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, no. 6, pp. 1–15, 2009.
- [30] A. Raja, R. M. A. Azad, C. Flanagan and C. Ryan, "A methodology for deriving VoIP equipment impairment factors for a mixed NB/WB context," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 10, no. 10, pp. 1046–1058, 2008.
- [31] D. Nguyen, H. Nguyen and É. Renault, "A new non-intrusive model for measuring VoLTE quality based on wideband E-model," *Communications on Applied Electronics*, vol. 5, no. 8, pp. 1–8, 2016.
- [32] D. Nguyen and H. Nguyen, "A dynamic rate adaptation algorithm using WB E-model for voice traffic over LTE network," in *IEEE Conference on Wireless Days*, Toulouse, France, pp. 1–6, 2016.
- [33] N. Souto, J. Silva, J. Pavia and M. Ribeiro, "An alternating direction algorithm for hybrid precoding and combining in millimeter wave MIMO systems," *Journal of Physics Communications*, vol. 34, pp. 165–173, 2019.
- [34] R. Chataut and R. Akl, "Massive MIMO systems for 5G and beyond networks-overview, recent trends, challenges, and future research direction," *Sensors*, vol. 20, no. 10, pp. 2753, 2020.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวฟ้ารุ่ง สัมกลาง เกิดเมื่อวันที่ 6 เดือนกันยายน พ.ศ. 2540 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนชุมชนบ้านบุสามัคคีพัฒนา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนจักราชวิทยา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตด้านการสื่อสารไร้สาย จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนสนับสนุนจากทุนกิตติบัณฑิต

ระหว่างศึกษาได้มีโอกาสนำเสนอบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 ฉบับ และตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 ฉบับ ดังนี้

1) The 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2021) ในหัวข้อเรื่อง. “QoE-Based Precoding for Partially Massive MIMO.” Chiang Mai, Thailand , 19-22 May 2021.

2) Computers, Materials & Continua (CMC) ในหัวข้อเรื่อง. “Optimal Hybrid Precoding Based QoE for Partially Structured Massive MIMO System.” Henderson, USA.