การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลา RR และ CQA ในโครงข่าย LTE

ไกรฤกษ์ ราชพิทักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
พ.ศ. 2562

Performance Evolution of RR and CQA Scheduling Algorithms in LTE Network

Krairoek Rachpitak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Computer and Telecommunication

College of Innovative Technology and Engineering,

Dhurakij Pundit University

2019

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึ่มการจัดตารางเวลา RR และ CQA ในโครงข่าย LTE

เสนอโดย จ่าสิบเอกไกรฤกษ์ ราชพิทักษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ธนัญ จารุวิทยโกวิท

ได้พิจารณาเห็นชอบโดยคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์แล้ว

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(อาจารย์ ดร.ธนัญ จารุวิทยโกวิท

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาตะพันธ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัชฌิกา อ่องแตง)

วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์รับรองแล้ว

..... คณบดีวิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์เดช กีรติพรานนท์)

วันที่ ....12..... เดือน .....ก.ค..... พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลา RR และ CQA ในโครงข่าย LTE
ชื่อผู้เขียน	จ่าสิบเอก ไกรฤกษ์ ราชพิทักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ธนัญ จารุวิทยโกวิท
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันโครงข่าย LTE มีการเติบโตทางด้านข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการใช้งานข้อมูลหลากหลายประเภท เช่น เสียง(Voice), ภาพเคลื่อนไหว(Video), เกม(Gaming) และข้อมูล(Data) ซึ่งข้อมูลแต่ละประเภทมีความสำคัญกับผู้ใช้งานแตกต่างกันไป ทั้งแบบประเภท Real time และ Non-Real time ในโครงข่าย LTE มีการใช้อัลกอริทึมการจัดตารางเวลาในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโครงข่ายรวมไปถึงการรับประกันคุณภาพในการให้บริการข้อมูลของโครงข่าย งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบอัลกอริทึม Round Robin (RR) และ Channel and QoS Aware (CQA) ซึ่งทั้ง 2 อัลกอริทึมเป็นอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาของ eNodeB ในโครงข่าย LTE โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม NS3

งานวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมด้วยค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput) ค่าความล่าช้าทางเวลา (Delay) และค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลา (Jitter) โดยมีการรับส่งข้อมูลประเภท Guarantee Bit Rate (GBR) และ Non Guarantee Bit Rate (non-GBR) พร้อมกัน ผลการศึกษาพบว่า CQA สามารถใช้งานโครงข่ายได้เต็มประสิทธิภาพได้ดีกว่า RR ในกรณีที่มีการส่งข้อมูลประเภท GBR ในโครงข่ายและ CQA สามารถรับประกันคุณภาพข้อมูลได้ แต่ในกรณีที่มีการส่งข้อมูลประเภท non-GBR เพียงประเภทเดียว RR จะทำให้สามารถใช้งานโครงข่ายได้เต็มประสิทธิภาพได้ดีกว่า แต่ในการใช้งานโครงข่ายในปัจจุบัน มีการใช้งานข้อมูลประเภท GBR และ non-GBR พร้อมกัน งานวิจัยนี้เสนอให้นำอัลกอริทึม CQA มาประยุกต์ใช้กับโครงข่าย

Thesis Title	Performance Evolution of RR and CQA Scheduling Algorithms in LTE Network
Author	Sergeant Major 1st Class Krairoek Rachpitak
Thematic Paper Advisor	Dr.Tanun Jaruvitayakovit
Department	Computer and Telecommunication Engineering
Academic Year	2018

ABSTRACT

In the present, the LTE network has increasing data growth continuously and has is used in different ways such as voice, video, video, gaming, and data. The importance of each data is different depending on users. Both Real time and Non-Real time data in the LTE network use scheduling algorithm to increase network efficiency and guarantee the quality of network data services. This research studies and compares Round Robin (RR) algorithm and Channel and QoS Aware (CQA) algorithm. Both algorithms are eNodeB scheduling algorithms in the LTE network by simulating the process by NS3.

This research compares the performance of the algorithms by Throughput, Delay, and Jitter. This is done by transferring Guarantee Bit Rate (GBR) and Non Guarantee Bit Rate (non-GBR) data at the same time. From the study, CQA can be used more efficiently than RR in case data is GBR and CQA can guarantee data quality. However, if only non-GBR data is transferred, RR can be used more efficiently. Currently, GBR and non-GBR data are used at the same time, therefore, this research suggests to apply CQA algorithm to the network.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความเมตตากรุณาจากท่านอาจารย์ ดร.ธนัญ จารุวิทยโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการทำวิจัย รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอนและทุกกระบวนการ และอาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาตะพันธ์ ที่คอยช่วยชี้แนะแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดทั้งรองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ มาเป็นประธานในการสอบเปิดเล่ม และสอบปิดเล่ม รวมไปถึงคณะกรรมการทุกท่าน ที่ชี้แนะแนวทางจนสามารถสอบวิทยานิพนธ์ได้อย่างเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ จ่าสิบเอก ชาติชาย และนางมาเรียม ราชพิทักษ์ ผู้ซึ่งเป็นบิดาและมารดา ตลอดครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและคอยให้ความรักมาโดยตลอดเวลา

ขอขอบคุณ นายภาณุวง เมฆไพบูลย์ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม และเพื่อนๆพี่น้องทั้งที่ทำงานและที่สาขาวิชาฯ ม.ธุรกิจบัณฑิตย์ ที่คอยให้คำปรึกษา หากข้าพเจ้ามีความบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

จ่าสิบเอก ไกรฤกษ์ ราชพิทักษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ฆ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ง

กิตติกรรมประกาศ..... จ

สารบัญตาราง..... ซ

สารบัญภาพ..... ฌ

บทที่

1. ที่มาและความสำคัญ..... 1
   - 1.1 ที่มาและความสำคัญของ..... 1
   - 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2
   - 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย..... 2
   - 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2
   - 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
2. แนวคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
   - 2.1 สถาปัตยกรรมของโครงข่าย LTE..... 4
   - 2.2 รูปแบบการจราจรของข้อมูลในโครงข่าย LTE..... 6
   - 2.3 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย..... 7
   - 2.4 การมอดูเลชันบนบนโครงข่าย LTE..... 8
   - 2.5 Packet Downlink Scheduling 11
   - 2.6 Network Simulator Version 3 (NS3)..... 15
   - 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 18
3. ระเบียบวิธีวิจัย..... 21
   - 3.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงข่าย LTE..... 21
   - 3.2 ค่าตัวแปรของโครงข่าย LTE..... 22
   - 3.3 แผนการดำเนินงาน..... 29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	30
	3.5 การวัดประสิทธิภาพของโครงข่าย……..	31
4.	ผลการศึกษา…..……..…….….....	35
	4.1 การทดสอบ.....……	41
	4.2 อภิปรายผลการทดสอบ….....……	54
5.	สรุปผล และข้อเสนอแนะ…..…….	55
	5.1 สรุปผลการวิจัย…….….....	55
	5.2 ข้อจำกัดและแนวทางการแก้ไข.....……...	57
	5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต…..……..…….	57
บรรณานุกรม……..		58
ประวัติผู้เขียน……..……		60

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 QCI (QoS Class Identifier)..... 6

2.2 เปรียบเทียบช่องสัญญาณกับ ResourceBlocks..... 8

2.3 ตารางเปรียบเทียบช่อง CQI กับ MCS..... 9

2.4 แสดงความดัชนีของ MCS..... 10

2.5 เปรียบเทียบบทความวิจัย..... 20

3.1 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 1..... 23

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 1..... 23

3.3 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานระยะ 500 เมตร..... 23

3.4 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE ในครั้งที่ 2..... 24

3.5 ข้อมูลที่ใช้ในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 2..... 24

3.6 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานระยะ 500 เมตร..... 25

3.7 ข้อมูลที่ใช้ในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 3..... 25

3.8 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานระยะ 500 เมตร..... 25

3.9 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE ในครั้งที่ 3..... 26

3.10 ข้อมูลที่ใช้ในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 4..... 26

3.11 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็น 3 ระยะ..... 27

3.12 ข้อมูลที่ใช้ในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 5..... 27

3.13 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็น 3 ระยะ..... 28

3.14 ข้อมูลและค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ..... 28

3.15 แผนการดำเนินการ..... 30

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย…..…… 36
4.2 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE…...……...…… 37
4.3 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE…..……... 38
4.4 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE ..…..……... 39
4.5 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE…..……... 40
4.6 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาน แบบ GBR และ NGBR……... 42
4.7 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาน แบบ GBR……... 44
4.8 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาน แบบ Non GBR……... 46
4.9 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาน แบบ GBR และ NGBR โดยกำหนดระยะห่างหลายระยะ……... 48
4.10 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาน แบบ GBR และ NGBR……... 52

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 แสดงสถาปัตยกรรมโครงข่าย LTE..... 4

2.2 รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ Greedy Source Model……..... 7

2.3 รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ On/Off Source Model……..... 8

2.4 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม Round Robin ……..……... 12

2.5 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม Channel and Qos Aware..... 14

3.1 โครงข่าย LTE ที่ใช้ในงานวิจัย…….. 21

2.7 การบริหารจัดการคิวข้อมูลแบบกำหนดค่าความสำคัญ……. 16

3.1 โครงข่าย LTE/EPC ที่ใช้ในงานวิจัย..... 21

3.2 การเปิดไฟล์ชื่อ DlRlcStats.txt ที่ได้จากการ Run โปรแกรม NS3 (1)..... 31

3.3 การเปิดไฟล์ชื่อ DlRlcStats.txt ที่ได้จากการ Run โปรแกรม NS3 (2)……... 32

3.4 การคำนวณหา Throughput ด้วยโปรแกรม Libre Office Calc ……..…… 32

3.5 การคำนวณหา Delay ด้วยโปรแกรม Libre Office Calc …… 33

3.6 การคำนวณหา Jitter ด้วยโปรแกรม MS Excel …… 34

4.1 รูปแบบการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็นระยะเดียว……... 35

4.2 รูปแบบการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็น 3 ระยะ……... 37

4.3 รูปแบบการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็นระยะเดียว…… 39

4.4 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR และ NGBR……... 41

4.5 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR……... 43

4.6 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาแบบ Non-GBR……..…… 45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.7 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาน แบบ GBR โดยกำหนดระยะห่างหลายระยะ..... 47

4.8 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงาน แบบ GBR และ non-GBR..... 51

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโครงข่ายการสื่อสาร LTE (Long Term Evolution) มีเป้าหมายให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้มากขึ้นและเร็วขึ้น รองรับกับการเติบโตของข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงที่มีคุณภาพ เพราะคุณภาพของการให้บริการจะช่วยดึงดูดผู้ใช้งาน เนื่องจากผู้ใช้บริการต่างต้องการใช้บริการอินเทอร์เน็ตด้วยบริการที่มีคุณภาพ ด้วยความเร็วของโครงข่าย LTE ที่มีประสิทธิภาพด้านความเร็วสูง (>100 Mbps) ประเภทของข้อมูลที่ต้องการรับประกันคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service – QoS) ได้แก่ เสียง (voice), ภาพเคลื่อนไหว (video) และข้อมูล (data) ดังนั้น เพื่อให้การส่งถ่ายข้อมูลจำนวนมากมีประสิทธิภาพ และมีการรับประกันคุณภาพของบริการ จึงมีเทคนิคที่เรียกว่า LTE Downlink Scheduler ในการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจาก สถานีฐาน (eNodeB) มายังอุปกรณ์ไร้สาย (User Equipment - UE) ในโครงข่าย LTE ที่ใช้งานในปัจจุบัน มีการใช้งานอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งข้อมูลแบบ Round Robin (RR) ซึ่งไม่คำนึงถึงคุณภาพในการส่งข้อมูลและแบบ Channel and QoS Aware (CQA) ซึ่งมีการรับประกันคุณภาพในการให้บริการ

ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะจำลองอัลกอริทึม CQA มาใช้กับการทำ Downlink Scheduler เพราะว่ามีการนำค่า QCI ของบริการแต่ละประเภทมาช่วยในการจัดการทำ Priority เนื่องจากเวลาใช้งานจริงต้องมีการส่งข้อมูลหลายรูปแบบและข้อมูลแต่ละแบบมีการใช้ QCI ที่แตกต่างกันไป

งานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งข้อมูลแบบ CQA กับ RR เนื่องจากในปัจจุบัน โครงข่าย LTE ที่ใช้งานจริงใช้อัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งข้อมูลแบบ RR ส่วน CQA นั้น เป็นอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาที่คำนึงถึงความสำคัญของประเภทข้อมูลมาใช้ โดยงานวิจัยนี้จะจำลองการทำงานของระบบด้วย Network Simulator 3 (NS3) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม CQA และ RR โดยคำนึงถึงผลของบริการแบบ Real time เช่น เสียง, ภาพเคลื่อนไหว และบริการแบบ Non-Real Time เช่น อีเมล์ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาและจำลองการนำอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาแบบ Round Robin (RR) , Channel and QoS Aware (CQA) มาใช้ในโครงข่าย LTE ด้วยโปรแกรม NS3

2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและปัญหาของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งข้อมูล 2 แบบ คือ RR และ CQA โดยจะประเมินประสิทธิภาพการทำงานจาก ค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput), ค่าความล่าช้าทางเวลา (Delay) และ ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลา (Jitter)

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

อัลกอริทึมการจัดตารางเวลาในโครงข่าย LTE แบบ Channel and QoS Aware (CQA) เป็นอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาที่คำนึงถึงความสำคัญของประเภทข้อมูลมาใช้ และอัลกอริทึมแบบ Round Robin (RR) เป็นการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบ First In First Out (FIFO) และมีการส่งข้อมูลในปริมาณที่เท่าๆกันให้ทุก UE ตามรอบเวลา (Transmission Time Interval – TTI) ทำให้ข้อมูลที่ต้องการความต่อเนื่อง เช่น เสียง (voice) และภาพเคลื่อนไหว (video) ไม่สามารถรับประกันคุณภาพได้ โดยเฉพาะบริเวณที่มีการใช้งานข้อมูลปริมาณมาก อัลกอริทึม CQA ควรมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า RR ในแง่ของการรับประกันคุณภาพการให้บริการ (QoS) เนื่องจากมีการนำ QCI มาช่วยในการจัดการทำ Priority

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขอบเขตงานวิจัยดังต่อไปนี้

1) จำลองการทำงานโครงข่าย LTE ด้วยโปรแกรม NS3
2) ใช้อัลกอริทึมการจัดตารางเวลาเพื่อจัดส่งข้อมูลจาก eNodeB มาที่ UE 2 วิธี คือ Channel and QoS Aware (CQA) และ Round Robin (RR)
3) มีการจำลองโครงข่าย LTE โดยมีการกำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับสถานีฐาน เป็นระยะห่างเดียว และ หลายระยะห่าง
4) มีการกำหนดประเภทของการส่งข้อมูล เป็นแบบ Greedy Source และ On/Off Source
5) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลา ด้วยการพิจารณาค่าต่างๆ ดังนี้
   - ค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput)
   - ค่าความล่าช้าทางเวลา (Delay)
   - ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลา (Jitter)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เข้าใจหลักการทำงานของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาในโครงข่าย LTE ทั้ง 2 ประเภท

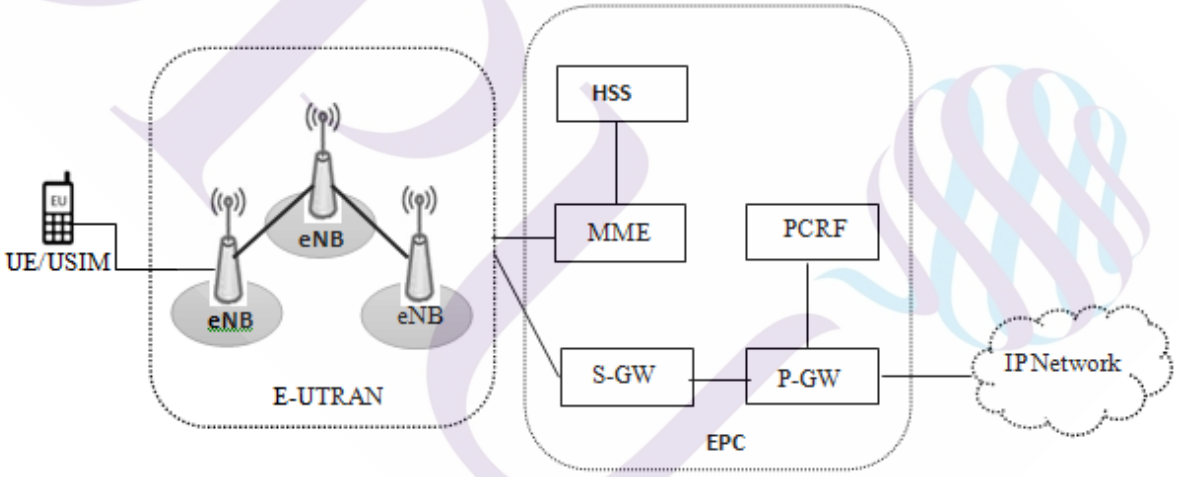
2) สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและข้อจำกัดของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาทั้ง 2 ประเภท เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในโครงข่าย LTE

บทที่ 2
ทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยสถาปัตยกรรมของโครงข่าย LTE, รูปแบบการจราจรของข้อมูลภายในโครงข่าย LTE, การมอดูเลชันบนโครงข่าย LTE, LTE Downlink Scheduling, Network Simulator version 3 (NS3) และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สถาปัตยกรรมของโครงข่าย LTE[1]

สถาปัตยกรรมเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G หรือ โครงข่าย LTE มีสถาปัตยกรรมโครงสร้างของระบบ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงสถาปัตยกรรมโครงข่าย LTE

ที่มา: LTE Network Architecture [online] : เข้าถึง 26 พ.ย. 2561. จาก https://www.researchgate.net/figure/LTE-Network-architecture_fig1_318502441

[1] mvt & tutorialspoint , LTE Network Architecture

จากภาพที่ 2.1 สถาปัตยกรรมโครงข่าย LTE จะประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลักดังต่อไปนี้

2.1.1 อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE : User Equipment)

สถาปัตยกรรมภายในของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานสำหรับโครงข่าย LTE เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งใน UE ประกอบไปด้วย MT (Mobile Termination) ทำหน้าที่ควบคุมการสื่อสารทั้งหมด , TE (Terminal Equipment) ทำหน้าที่หยุดการทำงานของการส่งข้อมูลแบบ data stream และ UICC (Universal Integrated Circuit Card) หรือ Sim card ที่ทำงานด้วยแอลพลิเคชั่นที่เรียกว่า USIM (Universal Subscriber Identity Module) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่ระบุตัวตนของผู้ใช้งาน คล้ายกับ Sim card ในโครงข่าย 3G เช่น หมายเลขโทรศัพท์ของผู้ใช้งาน , การเข้ารหัสระหว่างการรับส่งข้อมูลกับสถานีฐาน เป็นต้น

2.1.2 เครือข่ายการเข้าถึง (E-UTRAN)

E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) หรือเครือข่ายการเข้าถึง ทำหน้าที่ควบคุมการเชื่อมต่อภาคไร้สายและกระจายสัญญาณระหว่าง อุปกรณ์ไร้สายของผู้ใช้งานกับโครงข่ายหลัก (Evolved packet core : EPC) โดยจะมีสถานีฐาน (Base Station Subsystem) ที่เรียกว่า Evolved node B หรือ eNodeB (eNB) เป็นองค์ประกอบ โดยในช่วงเวลาหนึ่งจะมีเพียงหนึ่งสถานีฐานและอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ติดต่อสื่อสารกัน ซึ่ง eNodeB แต่ละตัว

2.1.3 โครงข่ายหลัก (EPC : Evolve Packet Core)

สถาปัตยกรรม EPC เป็นโครงข่ายหลัก (Core Network) ประกอบด้วยอุปกรณ์ MME, S-GW และ P-GW หน้าที่หลักของแต่ละอุปกรณ์เป็นดังนี้

- The mobility management entity (MME) เป็นอุปกรณ์จัดการสัญญานควบคุมสำหรับการเข้าใช้งานและจัดการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของผู้ใช้บริการ ซึ่งเป็นส่วน Control plane
- The serving gateway (S-GW) เป็นเกตเวย์เชื่อมกับฝั่ง E-UTRAN โดยจะสร้างท่อขนส่งข้อมูล (Bearer) สำหรับผู้ใช้บริการแต่ละราย ข้อมูลการใช้งานของผู้ใช้บริการจะถูกส่งผ่าน S-GW ส่งต่อไปที่ P-GW ไปยังปลายทาง
- The Packet Data Network (PDN) Gateway (P-GW) เป็นเกตเวย์เชื่อมกับเครือข่าย IP ภายนอกทั่วไป โดยข้อมูลการใช้งานของผู้ใช้บริการแต่ละรายจะถูกส่งผ่านท่อขนส่งข้อมูล (Bearer) จาก S-GW มาที่ P-GW ออกไปยังปลายทาง

The Home Subscriber Server (HSS) เป็นเซิร์ฟเวอร์ฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลการลงทะเบียนผู้ใช้บริการโทรศัพท์มือถือ และทำฟังก์ชันสนับสนุนการจัดการการเคลื่อนที่ การทำ Authentication และรับรองการเข้าใช้งานของผู้ใช้บริการ

2.2 รูปแบบการจราจรข้อมูลในโครงข่าย LTE[2]

รูปแบบการจราจรที่ใช้งานในโครงข่าย LTE จะแบ่งออกตามประเภทการบริการตามคุณภาพการให้บริการ (QoS : Quality of Service) แบ่งโดยค่า QCI (QoS Class Identifier) เป็น 9 class โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามตารางที่ 2.1 ได้แก่

- Guaranteed Bit Rate (GBR) การรับประกันคุณภาพการให้บริการ โดยให้มี Bit Rate ต่ำที่สุด เป็นการให้บริการแบบ Real Time
- Non-Guaranteed Bit Rate (Non-GBR) การรับประกันคุณภาพการให้บริการโดยไม่คำนึงถึงขนาด Bit Rate เป็นการบริการประเภทรับส่งข้อมูล และไม่ใช่บริการแบบ Real Time

ตารางที่ 2.1 QCI (QoS Class Identifier)

LTE QCI	Resource Type	Priority	Packet Delay Budget	Packet Error Loss Rate	Example Services
QCI-1	GBR	2	100ms	10^{-2}	Conversational voice
QCI-2		4	150ms	10^{-3}	live streaming of conversational voice
QCI-3		3	50ms		Real time gaming
QCI-4		5	300ms	10^{-6}	Non conversational video(Buffered streaming)
QCI-5	Non-GBR	1	100ms		IMS signalling
QCI-6		6	300ms		Video (buffered streaming),TCP based applications
QCI-7		7	100ms	10^{-3}	Voice, video (live streaming) , interactive gaming
QCI-8		8	300ms	10^{-6}	Video (Buffered streaming) , TCP based applications
QCI-9		9			

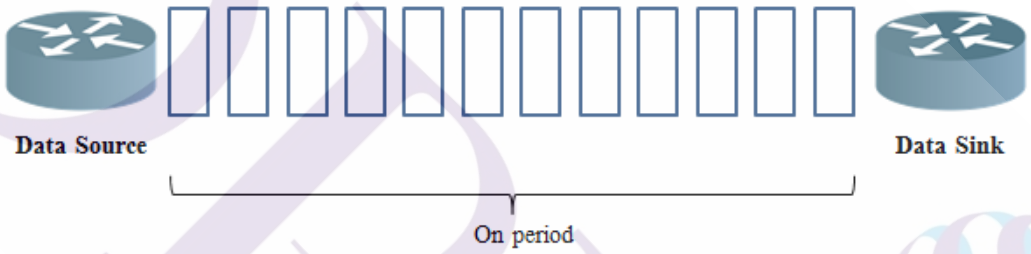
[2] rfwireless-world,QCI class in LTE

จากตารางที่ 2.1 ค่า QCI 1-4 เป็นข้อมูลประเภท Real time โดยมีการรับประกันคุณภาพของข้อมูล (GBR) ค่า QCI 5 เป็นค่า IMS signaling และค่า QCI 6-9 เป็นข้อมูลประเภท Non-real time ซึ่งไม่มีการรับประกันคุณภาพของข้อมูล (Non-GBR)

2.3 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย[3]

การกำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย (Traffic Model) พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพต่างๆของโครงข่าย เช่น โปรโตคอล, อัลกอริทึมต่างๆ และการกำหนดรูปแบบโครงข่าย เป็นต้น โดยมีตัวอย่าง ดังนี้

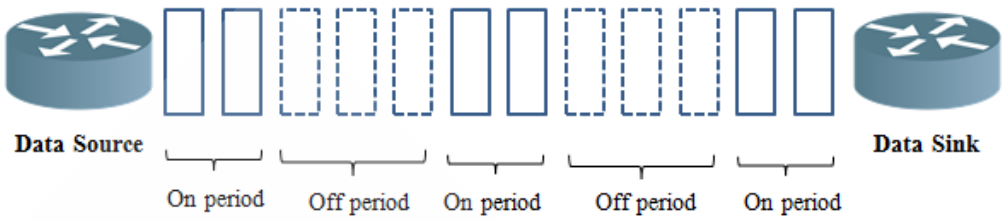
- The Greedy source model การส่งข้อมูลที่มีในโครงข่ายอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีช่วงเวลาที่หยุดส่งข้อมูลเพื่อวิเคราะห์หา Maximum Throughput ของระบบ



ภาพที่ 2.2 รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ Greedy Source Model[3]

- On/Off source model การส่งข้อมูลในโครงข่ายที่มีการกำหนดช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูล (On time) และช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูล (Off time)

[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_generation_model



ภาพที่ 2.3 รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ On/Off Source Model[3]

2.4 การมอดูเลชันบนบนโครงข่าย LTE[4]

การส่งสัญญาณโครงข่าย LTE การจาก eNodeB ถึง UE จะต้องมีการทำมอดูเลชันมีการคำนวนโดยคำนวณรายละเอียดดังนี้

1. แบนด์วิดท์ (Bandwidth)
2. คุณภาพของช่องสัญญาณ (Channel Quality)
3. ปริมาณทราฟฟิคในโครงข่าย (Network Load)

แบนด์วิดท์

ช่องสัญญาณ LTE ที่สามารถใช้งานได้มี 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz ยิ่งแบนด์วิดท์มากเท่าไร Througput ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ทุกคลื่นความถี่แบ่งออกเป็น Resource Blocks (RB) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบช่องสัญญาณกับ ResourceBlocks[4]

	Channel bandwidth, MHz					
	1.4	3	5	10	15	20
Number of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100

[4] http://anisimoff.org/eng/lte_throughput.html ,17/7/59

คุณภาพของช่องสัญญาณ

เงื่อนไขที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการส่งข้อมูลและ Throughput ที่ดีที่สุดในการรับ - ส่งระหว่าง eNodeB ถึง UE ขึ้นกับค่า MCS ซึ่งจะมีค่าแปรผันตามสถาพแวดล้อมและเงื่อนไขในการรับ - ส่ง มาตารฐานในการส่งของช่องส่งสัญญาณและการส่ง CQI (Channel Quality Indicator) เพื่อให้ eNodeB เลือก MCS ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 ตารางเปรียบเทียบช่อง CQI กับ MCS[5]

	Before Rel.12		Rel.12 and beyond	
CQI	Modulation	Code rate	Modulation	Code rate
0	Out of range			
1	QPSK	0.0762	QPSK	0.0762
2	QPSK	0.1172	QPSK	0.1885
3	QPSK	0.1885	QPSK	0.4385
4	QPSK	0.3008	16QAM	0.3691
5	QPSK	0.4385	16QAM	0.4785
6	QPSK	0.5879	16QAM	0.6016
7	16QAM	0.3691	64QAM	0.4551
8	16QAM	0.4785	64QAM	0.5537
9	16QAM	0.6016	64QAM	0.6504
10	64QAM	0.4551	64QAM	0.7539
11	64QAM	0.5537	64QAM	0.8525
12	64QAM	0.6504	256QAM	0.6943
13	64QAM	0.7539	256QAM	0.7783
14	64QAM	0.8525	256QAM	0.8634
15	64QAM	0.9258	256QAM	0.9258

[5] http://anisimoff.org/eng/lte_throughput.html ,17/7/59

ปริมาณทราฟฟิคในโครงข่าย

ทรัพยากรที่มีอยู่จะถูกแบ่งออกให้กับสมาชิกที่ใช้งาน ดังนั้นถ้าเกิดมีสมาชิกมากขึ้นจะต้องมีการแบ่งจัดสรรทรัพยากรให้กับสมาชิกทุกคน นอกจากนั้นยังขึ้นกับลำดับความสำคัญระหว่างผู้ให้บริการกับสมาชิกอีกด้วย

การคำนวน Throughput ของโครงข่าย LTE

จะมีการคำนวนเป็นขั้นตอนได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. กำหนด แบนด์วิดท์ ที่ใช้งาน 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz และดูว่าใช้งาน Resource blocks แบบใด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2. เลือกและค้นหาช่องสัญญาณที่ดีที่สุดให้กับการเชื่อมต่อและในการคำนวนต้องทราบว่าใช้งาน MCS ช่องไหน MCS จะขึ้นอยู่กับ CQI แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง MCS กับ CQI เป็นการกำหนดเฉพาะเจาะจงขึ้นอยู่กับผู้ผลิต และตารางที่ 2.3 ต่อไปนี้สามารถนำมาใช้ในการเลือกดัชนี MCS ส่วนช่อง TBS (Transport Block Size) คือจำนวนบิตที่สามารถส่งต่อ 1 TTL = 1 มิลลิวินาที

ตารางที่ 2.4 แสดงความดัชนีของ MCS[6]

MCS Index	Modulation	TBS Index
0	QPSK	0
1		1
2		2
3		3
4		4
5		5
6		6
7		7
8		8
9		9
10	16QAM	9
11		10
12		11
13		12
14		13
15		14
16		15

MCS Index	Modulation	TBS Index
17	64QAM	15
18		16
19		17
20		18
21		19
22		20
23		21
24		22
25		23
26		24
27		25
28		26
29	QPSK	Reserved
30	16QAM	
31	64QAM	

[6] http://anisimoff.org/eng/lte_throughput.html ,17/7/59

3. ดูข้อมูลที่อยู่ใน Transport Block Size (TBS) เพื่อตรวจสอบว่ามีการส่งผ่านข้อมูลไปกี่บิตต่อ 1 TTL (1 มิลลิวินาที) และทำการคูณด้วย 1,000 เท่ากับ bps (bit per second)

2.5 Packet Downlink Scheduling[7]

ในโครงข่าย LTE มีหนึ่งองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้การส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE มีประสิทธิภาพได้แก่ Downlink Packet Scheduler ซึ่งเป็น Radio Resource Management (RRM) ประเภทหนึ่งใน Evolved node B (eNodeB) ทำหน้าที่จัดการตารางเวลาการส่งข้อมูลจากผู้ให้บริการไปที่ผู้ใช้งาน (UEs) โดยการจัดการการส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานและผู้ใช้งานแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- Time Domain (TD) การส่งข้อมูลด้าน Uplink (การส่งข้อมูลจากผู้ใช้งานไปที่สถานีฐาน) กับ Downlink (การส่งข้อมูลจากสถานีฐานมาที่ผู้ใช้งาน) ที่ความถี่เดียวกัน แต่แบ่งการส่งคนละช่วงเวลา โดยจะแบ่งส่งการแต่ละช่วงเป็น frame และในแต่ละ frame จะแบ่งเป็น 2 subframe ย่อย ได้แก่ uplink subframe และ downlink subframe โดยสามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาของ frame ได้ตามปริมาณความหนาแน่นของข้อมูลขา Uplink และ Downlink ในขณะนั้น TD จึงมีความยืดหยุ่นในการจัดการ bandwidth
- Frequency Domain (FD) การส่งข้อมูล Uplink และ Downlink ที่คนละความถี่ทำให้การส่งข้อมูล Uplink และ Downlink สามารถส่งได้ในเวลาเดียวกัน

การจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Packet Downlink Scheduler) มีอัลกอริทึมต่างๆ โดยมีทั้งแบบ TD และ FD เช่น

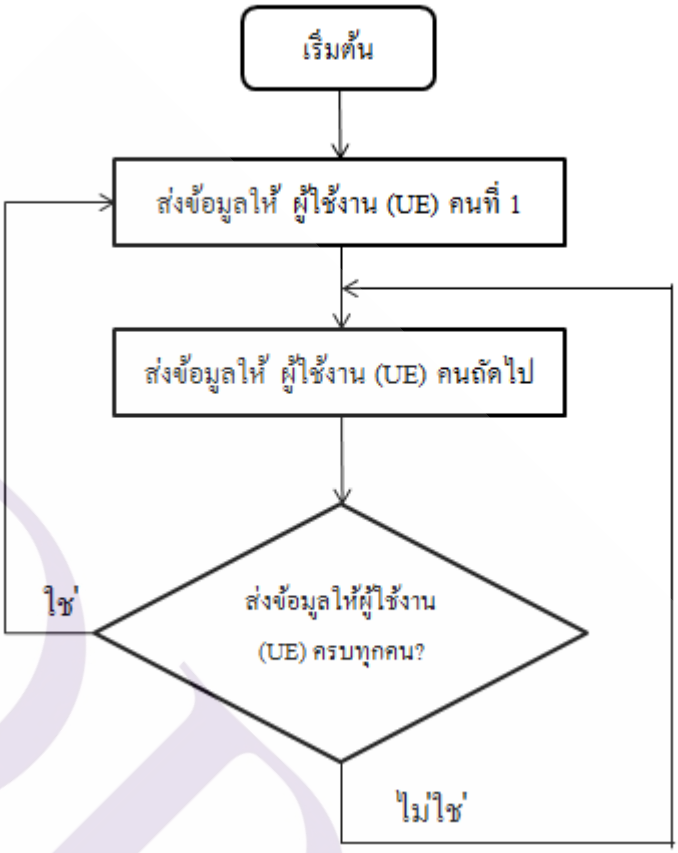
2.4.1 Round Robin Scheduler (RR)[8]

เป็นการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจาก eNodeB ให้กับแต่ละ UE ที่ไม่มีการคำนึงถึงคุณภาพในการให้บริการในการส่งข้อมูล โดยที่จะวนลูปการส่งข้อมูลในปริมาณที่เท่ากันไปให้แต่ละ UE ทำให้ข้อมูลที่ต้องการความต่อเนื่อง ไม่สามารถรับประกันได้ว่าจะได้รับข้อมูลครบถ้วนและต่อเนื่องหรือไม่ โดยมีขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม Round Robin ดังภาพ 2.4

---

[7] Tshiteya Dikamba (2011),Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution (LTE)

[8] https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html#round-robin-rr-scheduler



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม Round Robin[9]

จากภาพที่ 2.4 แสดงถึงขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม Round Robin (RR) โดยก่อนจะทำการส่งข้อมูล สถานีฐาน (eNodeB) จะพิจารณาว่ามีอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) อยู่ในระบบกี่เครื่อง และทำการแบ่ง Resource Block ให้แต่ละเครื่องเท่าๆกัน และจะเริ่มส่งให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 และคนถัดไป ไปเรื่อยๆ เมื่อส่งครบทุกคน จะวนรอบในการส่งโดยกลับมาเริ่มส่งให้ผู้ใช้งานคนแรกอีกครั้ง

[9] Dinesh Mannani (2012),Modeling and Simulation of Scheduling Algorithms in LTE Networks

2.4.2 Channel-QoS Aware (CQA)[10]

เป็นการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจาก eNodeB ให้กับแต่ละ UE โดยคำนึงถึงคุณภาพในการให้บริการในการส่งข้อมูล (QoS) เป็นหลัก โดยอัลกอริทึมนี้จะทำการส่งข้อมูลให้ UE ที่มีค่า Metric ที่คำนวณจากค่า Head of Line (HOL) Delay, Guarantee Bit Rate (GBR) และ Channel Quality สูงที่สุดให้ทำงานก่อน โดยจะแบ่ง UE ตามส่งข้อมูลในรูปแบบของ Proportional Fair (PF) และจะทำการส่งข้อมูลให้ UE ที่มีค่าการคำนวณที่ต่ำกว่าในลำดับต่อไป

$$m_{td}^{j}(t) = \lceil \frac{d_{hol}^{j}(t)}{g} \rceil , \tag{2}$$

จากสมการที่ (2) จะได้ค่า Head of Line (HOL) Delay ในขณะนั้น

$$m_{fd}^{(k,j)}(t) = d_{HOL}^{j}(t) \cdot m_{GBR}^{j}(t) \cdot m_{ca}^{kj}(t), \tag{3}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ค่า m (Metric) ที่คำนวณจากค่า HOL delay ในขณะนั้น กับค่า GBR และค่า Channel Quality

$$m_{GBR}^{j}(t) = \frac{GBR^{j}}{R^{j}(t)} = \frac{GBR^{j}}{(1-\alpha)\cdot \overline{R^{j}(t-1)} + \alpha \cdot r^{j}(t)}, \tag{4}$$

จากสมการที่ (4) จะได้ค่า m (Metric) ของ GBR ที่คำนวณจากค่า Bit Rate ใน EPS หารด้วยค่าเฉลี่ยในการส่งครั้งที่แล้วบวกกับค่า Throughput ในช่วงเวลา

$$m_{pf}^{(k,j)}(t) = \frac{R_{i}^{(k,j)}}{R^{j}(t)}, \tag{5}$$

จากสมการที่ (5) จะได้ค่า m (Metric) ของการส่งแบบ Proportional Fair (PF)

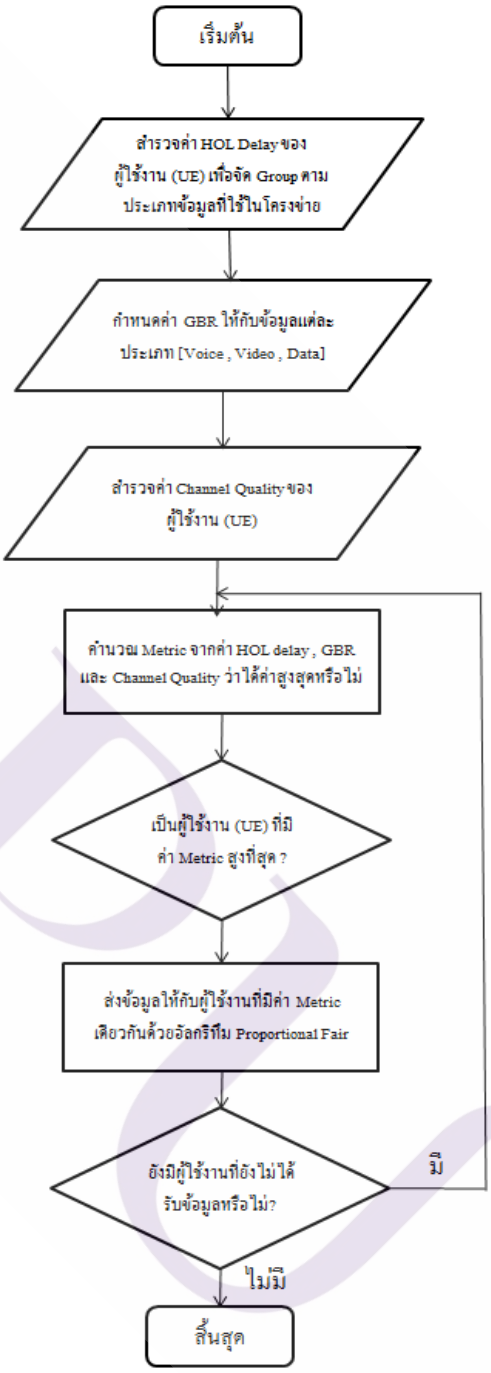
$$m_{ff}^{(k,j)}(t) = \frac{CQI^{(k,j)}(t)}{\sum_{k=1}^{K} CQI(t)^{(k,j)}}, \tag{6}$$

จากสมการที่ (6) จะได้ค่า m (Metric) ที่การส่งแบบ Frequency

โดยที่ค่า GBR หาได้จากค่า GBR หารด้วย ค่า Throughput เฉลี่ยในอดีต และค่า Channel Quality หาได้จาก ค่าประมาณการ Throughput หารด้วยค่า Throughput เฉลี่ยในอดีต

โดยอัลกอริทึม CQA มีขั้นตอนการทำงาน ดังภาพ 2.5

[10] https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html#channel-and-qos-aware-scheduler



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม Channel and Qos Aware[11]

[11] Dinesh Mannani (2012),Modeling and Simulation of Scheduling Algorithms in LTE Networks

จากภาพที่ 2.5 แสดงถึงขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม Channel and Qos Aware (CQA) โดยเริ่มจาก สถานีฐานจะคำนวณค่า Metric ที่มาจาก

- ค่า HOL delay โดยจะทำการ Group ข้อมูลตามประเภท โดยเมื่อมีข้อมูลที่เป็น GBR จะเริ่มตั้งแต่ Group ที่ 1,2,3,… ตามลำดับ และเมื่อมีข้อมูลที่เป็น Non-GBR ก็จะเริ่ม Group ที่ 1,2,3,… ตามลำดับเช่นเดียวกัน
- ค่า Guarantee Bit Rate (GBR) ของข้อมูลแต่ละประเภท เช่น Voice จะมีค่า Bit Rate อยู่ที่ 80 Kbps เป็นต้น
- ค่า Channel Quality เช่น 16 QAM , 256 QAM เป็นต้น

หลังจากที่ได้ค่า Metric แล้ว จะทำการส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่มีค่า Metric สูงที่สุดด้วยอัลกอริทึม Proportional Fair (PF) และเมื่อส่งให้กับอุปกรณ์ของผู้ใช้งานครบทุกตัว ก็จะส่งให้กับอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่มีค่า Metric ลำดับถัดไป และส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ของผู้ใช้งานจนครบทุก Metric ตามลำดับ

2.6 Network Simulator Version 3 (NS3)[12]

โปรแกรมจำลองเครือข่าย Version 3 (NS3 : Network Simulator 3) เป็นโปรแกรมจำลองสถานการณ์เชิงเหตุการณ์ที่มีไว้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการทำงานใช้ภาษา C++ ในการพัฒนาโปรแกรมของระบบเครือข่ายมีทั้งแบบมีสายและแบบไร้สาย ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยสร้างขึ้นเพื่อระบบอินเตอร์เน็ต และเพื่อศึกษางานวิจัยเป็นหลัก โดยมีส่วนที่น่าสนใจดังนี้

โปรแกรมจำลองเครือข่าย Version 3 (NS3 : Network Simulator 3) เป็นโปรแกรมจำลองเครือข่ายแบบไม่ต่อเนื่องโดยมีเป้าหมายเพื่อการวิจัยและการศึกษาเป็นหลัก NS3 เป็นซอฟต์แวร์ฟรีที่ได้รับอนุญาตภายใต้ลิขสิทธิ์ GNU GPLv2 สามารถเผยแพร่ต่อสาธารณชน เพื่อการวิจัยการพัฒนาและการใช้งาน

เป้าหมายของโครงการ NS3 คือการพัฒนาสภาพแวดล้อมแบบจำลองที่เปิดกว้างสำหรับการวิจัยเครือข่าย สอดคล้องกับความต้องการจำลองของการวิจัยเครือข่ายที่ทันสมัยและสนับสนุนการมีส่วนร่วมในการตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์

Simulation Models

---

[12] https://www.nsnam.org/doxygen/index.html, http://wrc-ejust.org/crn/images/Tutorials/ns2vsns3.pdf

โครงการ NS3 มุ่งมั่นที่จะสร้างแกนการจำลองที่มั่นคงซึ่งได้รับการบันทึกไว้เป็นอย่างดีใ ช้งานง่ายและตอบสนองความต้องการของเวิร์กโฟลว์การจำลองทั้งหมดตั้งแต่การตั้งค่าการจำลองไปจนถึงการติดตามและการวิเคราะห์

นอกจากนี้โครงสร้างพื้นฐานซอฟต์แวร์ NS3 สนับสนุนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ซึ่งมีความเป็นจริงมากพอที่จะอนุญาตให้ NS3 เป็นโปรแกรมจำลองเครือข่ายเรียลไทม์เชื่อมต่อกับโลกแห่งความจริงและอนุญาตให้มีการนำโปรโตคอลโลกแห่งความจริงมาใช้ภายใน NS3

การจำลองของ NS3 รองรับการวิจัยทั้งในเครือข่าย IP และที่ไม่ใช่ IP อย่างไรก็ตามผู้ใช้ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การจำลองแบบไร้สาย /IP ซึ่งเกี่ยวข้องกับแบบจำลองสำหรับ Wi-Fi, WiMAX หรือ LTE ของ Layel 1 และ 2 ของโปรโตคอลการจัดเส้นทางแบบคงที่หรือไดนามิกเช่น OLSR และ AODV

ในปัจจุบันมีการรองรับการใช้งาน Module ของ NS3 และทุก Module จะต้องเป็นที่ยอมรับแล้วและได้มีการตีพิมพ์เรียบร้อย[13] แล้วดังนี้

- Organization
- Animation
- Antenna Module
- Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)
- 3GPP HTTP applications
- Bridge NetDevice
- BRITE Integration
- Buildings Module
- Click Modular Router Integration
- CSMA NetDevice
- DSDV Routing
- DSR Routing
- Emulation Overview
- Energy Framework
- File Descriptor NetDevice

[13] www.nsnam.org/docs/models/html/index.html

- Flow Monitor
- Internet Models (IP, TCP, Routing, UDP, Internet Applications)
- Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN)
- LTE Module
- Wi-Fi Mesh Module Documentation
- MPI for Distributed Simulation
- Mobility
- Network Module
- Nix-Vector Routing Documentation
- Optimized Link State Routing (OLSR)
- OpenFlow switch support
- PointToPoint NetDevice
- Propagation
- Spectrum Module
- 6LoWPAN: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks
- Tap NetDevice
- Topology Input Readers
- Traffic Control Layer
- UAN Framework
- WAVE models
- Wi-Fi Module
- Wimax NetDevice

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ LTE Downlink Scheduling มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.7.1 งานวิจัย A new Channel and QoS Aware Scheduler to enhance the capacity of Voice over LTE systems[14] ผู้วิจัยได้นำเสนอเกี่ยวกับอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Packet Downlink Scheduler) แบบต่างๆที่มีใน NS3 โดยได้ทำการจำลองการทดสอบบน NS3 และ LTE-Sim เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยวัดจากค่า Throughput ใน NS3

จากการศึกษางานวิจัยนี้ พบว่ามีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

ข้อดีของงานวิจัย

1. มีการเปรียบเทียบสองอัลกอริทึมระหว่าง Channel-QoS Aware (CQA) และ Priority Set (PSS)

ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. จำลองเฉพาะทราฟฟิกที่เป็น voice เท่านั้น
2. จำลองการส่งข้อมูลแบบ GBR เพียงอย่างเดียว

2.7.2 งานวิจัย Performance Study of Channel-QoS Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3[15] ผู้วิจัยได้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Packet Downlink Scheduler) แบบต่างๆที่มีใน NS3 โดยได้ทำการจำลองการทดสอบบน NS3 และ LTE-Sim เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยวัดจากค่า Throughput ใน NS3 และ จากค่า Packet loss Ratio, Packet delay, Average Throughput, Fairness Index ใน LTE-Sim

จากการศึกษางานวิจัยนี้ พบว่ามีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

ข้อดีของงานวิจัย

1. มีการเปรียบเทียบหลายอัลกอริทึม คือ Round Robin (RR), Proportional Fair (PF), Priority Set (PSS) และ Channel-QoS Aware (CQA)
2. การจำลองการทดสอบมีข้อมูล (traffic) หลายประเภท คือ Voice, Vodeo และ Data

ข้อจำกัดของงานวิจัย

---

[14] Biljana Bojovic and Nicola Baldo. Barcelona. Spain. A new Channel and QoS Aware Scheduler to enhance the capacity of Voice over LTE systems.

[15] Adi S.M.Y.,Kuokkwee Wee,Ee Mae A.,Mohd. F.A.A. Melaka,Malaysia. Performance Study of Channel-QoS Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3.

1. การจำลองการทดสอบบน NS3 แต่เป็นการจำลองสถานการณ์ที่แยกประเภท Traffic คือ Data, Voice และ Video โดยแยกทดสอบทีละ Traffic
2. การจำลองการทดสอบบน NS3 ทำการจำลองที่ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐาน อยู่ที่ระยะเดิมเสมอ

2.7.3 งานวิจัย Performance Analysis of Quality of Service And Energy Efficient Aware (QEEA) Scheduling Algorithm for Long Term Evolution (LTE) [16] ผู้วิจัยได้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Packet Downlink Scheduler) แบบต่างๆที่มีใน NS3 โดยได้ทำการจำลองการทดสอบบน NS3 และ LTE-Sim เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยวัดจากค่า Throughput ใน NS3 และ จากค่า Packet delay, Packet loss Ratio, Energy Consumption Rate, Energy Efficiency ใน LTE-Sim

จากการศึกษางานวิจัยนี้ พบว่ามีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

ข้อดีของงานวิจัย

1. มีการเปรียบเทียบหลายอัลกอริทึม คือ Channel-QoS Aware (CQA), Priority Set (PSS) และ Proportional Fair (PF)
2. การจำลองการทดสอบมีข้อมูล (traffic) หลายประเภท คือ Voice, Vodeo และ Data

ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. การจำลองการทดสอบบน NS3 แต่เป็นการจำลองสถานการณ์ที่แยกประเภท Traffic คือ Data, Voice และ Video โดยแยกทดสอบทีละ Traffic
2. การจำลองการทดสอบบน NS3 เน้นเปรียบเทียบการใช้พลังงานในโครงข่าย

[16] NURULANIS M. YUSOFF, DARMAWATY MOHD ALI, AZLINA IDRIS,Malaysia. Performance Analysis of Quality of Service And Energy Efficient Aware (QEEA) Scheduling Algorithm for Long Term Evolution (LTE)

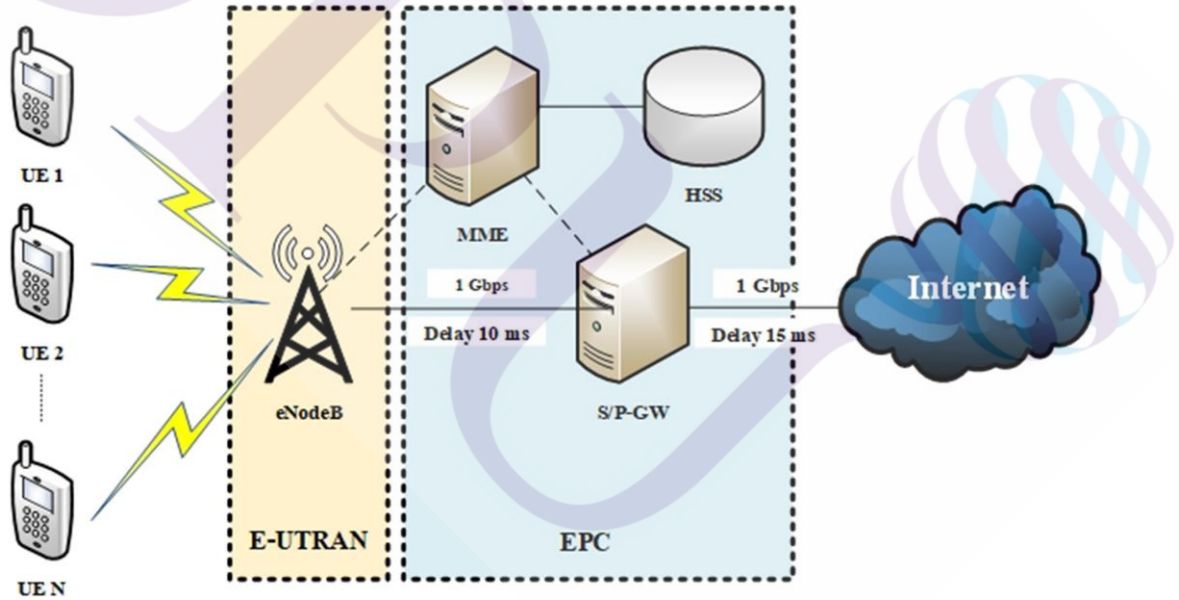
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบบทความงานวิจัย

บทความ งานวิจัย	อัลกอริทึมการจัดตารางเวลา ที่ใช้ทดสอบ	ทราฟฟิก ที่ใช้ทดสอบ
A new Channel and QoS Aware Scheduler to enhance the capacity of Voice over LTE systems.	Channel-QoS Aware (CQA) Priority Set (PSS)	Voice
Performance Study of Channel-QoS Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3.	Round Robin (RR) Proportional Fair (PF) Priority Set (PSS) Channel-QoS Aware (CQA)	Data , Voice , Video โดยแยกทดสอบทีละ traffic
Performance Analysis of Quality of Service And Energy Efficient Aware (QEEA) Scheduling Algorithm for Long Term Evolution (LTE)	Channel-QoS Aware (CQA) Priority Set (PSS) Proportional Fair (PF)	Data , Voice , Video โดยแยกทดสอบทีละ traffic
งานวิจัยที่นำเสนอ	Round Robin (RR) Channel-QoS Aware (CQA)	Data, Voice และ Video โดยมีการใช้งานพร้อมกัน

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึง ขั้นตอนการออกแบบเพื่อจำลองโครงข่าย LTE ที่ใช้ในการวิจัย ค่าตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย การนำซอฟต์แวร์ NS3 มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับโครงข่าย LTE ที่ได้ทำการออกแบบ การทดสอบการทำงานของโครงข่าย LTE ที่มีการนำอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจาก eNodeB มาที่ UE โดยงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึม Round Robin (RR) ที่โครงข่ายผู้ให้บริการทั้งหมดใช้ กับอัลกอริทึม Channel and QoS Aware (CQA)

3.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงข่าย LTE



ภาพที่ 3.1 โครงข่าย LTE ที่ใช้ในงานวิจัย

ภาพที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงโครงข่าย LTE ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1.1 อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) เชื่อมต่อกับสถานีฐาน (eNodeB) และจำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) ปรับตามรูปแบบการจำลองทางโครงข่าย LTE ซึ่งอุปกรณ์ของผู้ใช้งานสามารถใช้บริการเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่อยู่โครงข่ายอินเตอร์เน็ทต่อไป

3.1.2 โครงข่ายหลัก (Core Network) ประกอบด้วย Serving Gateway (S-GW) , Packet Data Network Gateway (PDN-GW) และ Mobility Management Entity (MME) ซึ่งมีการร้องขอข้อมูลจากผู้ใช้งานจากอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) ไปยังสถานีฐาน (eNodeB) ไปที่โครงข่ายหลัก (S/P-GW) และมี MME ทำหน้าที่ควบคุมการส่งข้อมูล ระหว่างสถานีฐาน (eNodeB) ไปยังโครงข่ายหลัก (S/P-GW)

3.1.3 โครงข่ายสาธารณะ (Internet) เป็นโครงข่ายภายนอกเครือข่ายผู้ให้บริการซึ่งได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ PDN-GW ซึ่งเครื่องแม่ข่ายที่อยู่ภายนอกเครือข่ายผู้ให้บริการ จะเป็นผู้ให้ข้อมูลที่เกิดจากการร้องขอใช้บริการจากผู้ใช้บริการอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน

3.2 ค่าตัวแปรของโครงข่าย LTE

ในการออกแบบโครงข่าย LTE นั้นจะต้องมีการคำนึงถึงค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการทำงานของโครงข่าย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 รูปแบบโครงข่าย LTE ที่ใช้เป็นแบบ SISO มีค่า Bandwidth 20 MHz และมีค่า Modulation and Coding Scheme (MCS) 0-9

3.2.2 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่ายและการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐาน มีการทดสอบแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

3.2.2.1 มีการทำงานแบบ GBR และ NGBR และมีการทดสอบการส่งข้อมูล Voice, Video และ Data พร้อมกัน โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) และสถานีฐาน (eNodeB) เป็นระยะเดียวคือ 500 เมตร และมีการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบ On/Off Source Traffic และรูปแบบ Greedy Source Traffic โดยมีรายละเอียดการส่งข้อมูลเป็นไปตามตาราง 3.1 มีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทดสอบเป็นไปตาราง 3.2 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและระยะห่างระหว่างสถานีฐานเป็นไปตามตาราง 3.3

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 1

รูปแบบการส่งข้อมูล	On Time (second)	Off Time (second)
On/Off Source Traffic	0.15	0.3

จากตารางที่ 3.1 กำหนดให้มีช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูล 150 ms และช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูลเป็น 300 ms

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 1

ประเภทของข้อมูล (Protocol)	CQI	Packet size	MBR	GBR
UDP (voice)	1	160 Bytes	100 Kbps	80 Kbps
UDP (video)	2	1440 Bytes	400 Kbps	300 Kbps
TCP (data)	9	1440 Bytes	20 Mbps	-

โดยที่ข้อมูลประเภท UDP (Voice) เป็นการจำลองการใช้งาน VoIP ด้วยโมดูล OnOffHelper ในซอฟต์แวร์ NS3 เพื่อสร้าง Traffic ขึ้นมาเพื่อใช้ทดสอบ[1]

ตารางที่ 3.3 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานระยะ 500 เมตร

อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE)	ประเภทข้อมูล	ค่า QCI	ระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB
เครื่องที่ 1 - 10	Voice	1	500 เมตร
เครื่องที่ 11 - 20	Video	2	500 เมตร
เครื่องที่ 21 - 30	Data	9	500 เมตร

[1] di S.M.Y.,Kuokkwee Wee,Ee Mae A.,Mohd. F.A.A. Melaka,Malaysia. Performance Study of Channel-Qos Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3.

3.2.2.2 มีการทำงานแบบ GBR และมีการทดสอบการส่งข้อมูล Voice, Video และ Data พร้อมกัน โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน(UE) และสถานีฐาน(eNodeB) เป็นระยะเดียวคือ 500 เมตร และมีการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบ On/Off Source Traffic และรูปแบบ Greedy Source Traffic โดยมีรายละเอียดการส่งข้อมูลเป็นไปตามตาราง 3.4 มีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทดสอบเป็นไปตาราง 3.5 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและระยะห่างระหว่างสถานีฐานเป็นไปตามตาราง 3.6

ตารางที่ 3.4 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 2

รูปแบบการส่งข้อมูล	**On Time (second)**	**Off Time (second)**
On/Off Source Traffic	0.15	0.3

จากตารางที่ 3.4 กำหนดให้มีช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูล 150 ms และช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูลเป็น 300 ms

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 2

ประเภทของข้อมูล (Protocol)	**CQI**	**Packet size**	**MBR**	**GBR**
UDP (voice)	1	160 Bytes	100 Kbps	80 Kbps
UDP (video)	2	1440 Bytes	400 Kbps	300 Kbps
UDP (Gaming)	3	1440 Bytes	5 Mbps	500 Kbps

โดยที่ข้อมูลประเภท UDP (Voice) เป็นการจำลองการใช้งาน VoIP ด้วยโมดูล OnOffHelper ในซอฟต์แวร์ NS3 เพื่อสร้าง Traffic ขึ้นมาเพื่อใช้ทดสอบ

ตารางที่ 3.6 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานระยะ 500 เมตร

อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE)	ประเภทข้อมูล	ค่า QCI	ระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB
เครื่องที่ 1 - 10	Voice	1	500 เมตร
เครื่องที่ 11 - 20	Video	2	500 เมตร
เครื่องที่ 21 - 30	Gaming	3	500 เมตร

3.2.2.3 มีการทำงานแบบ NGBR และมีการทดสอบการส่งข้อมูล Data โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) และสถานีฐาน (eNodeB) เป็นระยะเดียวคือ 500 เมตร และมีการส่งข้อมูลรูปแบบ Greedy Source Traffic โดย มีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทดสอบเป็นไปตาราง 3.7 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและระยะห่างระหว่างสถานีฐานเป็นไปตามตาราง 3.8

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 3

ประเภทของข้อมูล (Protocol)	CQI	Packet size	MBR	GBR
TCP (Data)	9	1440 Bytes	20 Mbps	-

ตารางที่ 3.8 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานระยะ 500 เมตร

อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE)	ประเภทข้อมูล	ค่า QCI	ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน	รูปแบบการส่งข้อมูล
เครื่องที่ 1 - 30	Data	9	500 เมตร	Greedy Source

3.2.2.4 มีการทำงานแบบ GBR และมีการทดสอบการส่งข้อมูล Voice, Video และ Gaming พร้อมกัน โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน(UE) 9 เครื่อง และสถานีฐาน (eNodeB) เป็นระยะหลายระยะคือ 500, 2,000 และ 3,500 และมีการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบ On/Off Source Traffic และรูปแบบ Greedy Source Traffic โดยมีรายละเอียดการส่งข้อมูลเป็นไปตามตาราง 3.9 มีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทดสอบเป็นไปตาราง 3.10 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและระยะห่างระหว่างสถานีฐานเป็นไปตามตาราง 3.11

ตารางที่ 3.9 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 3

รูปแบบการส่งข้อมูล	**On Time (second)**	**Off Time (second)**
On/Off Source Traffic	0.15	0.3

จากตารางที่ 3.9 กำหนดให้มีช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูล 150 ms และช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูลเป็น 300 ms

ตารางที่ 3.10 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 4

ประเภทของข้อมูล (Protocol)	**QCI**	**Packet size**	**MBR**	**GBR**
UDP (voice)	1	160 Bytes	100 Kbps	80 Kbps
UDP (video)	2	1440 Bytes	400 Kbps	300 Kbps
UDP (gaming)	3	1440 Bytes	500 Kbps	400 Kbps

ตารางที่ 3.11 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็น 3 ระยะ

อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE)	ประเภทข้อมูล	ค่า QCI	ระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB
เครื่องที่ 1	Voice	1	500 เมตร
เครื่องที่ 2	Video	2	500 เมตร
เครื่องที่ 3	Gaming	3	500 เมตร
เครื่องที่ 4	Voice	1	2,000 เมตร
เครื่องที่ 5	Video	2	2,000 เมตร
เครื่องที่ 6	Gaming	3	2,000 เมตร
เครื่องที่ 7	Voice	1	3,500 เมตร
เครื่องที่ 8	Video	2	3,500 เมตร
เครื่องที่ 9	Gaming	3	3,500 เมตร

3.2.2.5 มีการทำงานแบบ GBR และ non-GBR และมีการทดสอบการส่งข้อมูล Video และ Data พร้อมกัน โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน(UE) 8 เครื่อง และสถานีฐาน (eNodeB) เป็นระยะเดียวคือ 500 เมตร และมีการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบ Greedy Source Traffic โดยมีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทดสอบเป็นไปตาราง 3.12 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและระยะห่างระหว่างสถานีฐานเป็นไปตามตาราง 3.13

ตารางที่ 3.12 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE ในการทดสอบครั้งที่ 5

ประเภทของข้อมูล (Protocol)	QCI	Packet size	MBR	GBR
UDP (video)	2	1440 Bytes	15 Mbps	15 Mbps
TCP (data)	9	1440 Bytes	15 Mbps	-

ตารางที่ 3.13 จำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานระยะ 500 เมตร

อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE)	ประเภทข้อมูล	ค่า QCI	ระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB
เครื่องที่ 1	Video	2	500 เมตร
เครื่องที่ 2	Video	2	500 เมตร
เครื่องที่ 3	Video	2	500 เมตร
เครื่องที่ 4	Video	2	500 เมตร
เครื่องที่ 5	Data	9	500 เมตร
เครื่องที่ 6	Data	9	500 เมตร
เครื่องที่ 7	Data	9	500 เมตร
เครื่องที่ 8	Data	9	500 เมตร

ตารางที่ 3.14 ข้อมูลและค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
Macro cell transmission power	40 dBm
Bandwidth	100 RB (20 MHz)
eNodeB : S/P-GW	1 Gbps
S/PGW : Internet	1 Gbps
Delay	UE และ eNodeB เทียบเท่าระยะทาง 500 เมตร eNodeB และ S/P-GW คือ 10 ms S/PGW และ Internet คือ 15 ms
Number of UEs in system	9 และ 30
Simulation time	8 s

3.3 แผนการดำเนินงาน

3.3.1 ศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Scheduling Algorithm

ทฤษฎีและรูปแบบของ Scheduling Algorithm สำหรับการจำลองระบบและ ค้นคว้าการทำงานแต่ละรูปแบบของ Scheduling Algorithm เพื่อทำการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพระหว่างการทำงานอัลกอริทึม

3.3.2 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้ทำการจำลองระบบ

ศึกษาค้นหาและรวบรวมโปรแกรมที่จะทำการจำลองระบบเพื่อที่จะสามารถประยุกต์ใช้ Scheduling Algorithm ต่างๆ บนระบบโครงข่าย ซึ่งสามารถนำเสนอได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Network Simulator 3 (NS3) ซึ่งเป็น Open Source ที่ให้ใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย

3.3.3 จำลองระบบที่จะทดสอบ

จำลองระบบโดยใช้โปรแกรม NS3 ที่ศึกษาจากข้างต้น พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลในการออกแบบ เพื่อที่จะทดสอบการทำงานของแต่ละอัลกอริทึม

3.3.4 เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้ และสรุป

เมื่อทำการจำลองระบบที่ทำการนำเสนอเสร็จแล้ว และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ทำการนำเสนอ เพื่อที่จะสรุปผลการจำลองว่าประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึมนั้นเป็นอย่างไร

3.3.5 รวบรวมข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจัดทำวิทยานิพนธ์

ทำการรวบรวมข้อมูลของอัลกอริทึมที่ทำการนำเสนอ ที่ได้ทำมาตั้งแต่ต้นเพื่อจัดทำเป็นวิทยานิพนธ์ แผนการดำเนินงานที่ได้วางแผนไว้ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.15 แผนการดำเนินงาน

งาน \ เดือน	เม.ย.-พ.ค.61	มิ.ย.-ก.ค.61	ส.ค.-ก.ย.61	ต.ค.-พ.ย.61	ธ.ค. 61-ม.ค.62	ก.พ.-มี.ค.62
ศึกษาข้อมูลและรวบรวมงานวิจัย Scheduling Algorithm						
ศึกษาหลักการทำงาน Scheduling Algorithm ทดสอบโดยใช้ NS3						
ออกแบบจำลองโครงข่าย LTE โดยประยุกต์ใช้ Scheduling Algorithm แบบต่างๆ						
ทดสอบ ตรวจสอบ และปรับปรุงระบบ						
สรุปผลการจำลองระบบและประโยชน์ที่ได้รับ						

3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นการจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์ประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดตารางเวลา ใช้การทดสอบโดยโปรแกรม NS 3 โดยมีสภาวะที่กำหนดไว้ในสมมติฐานการวิจัย

3.4.1 จำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้งานอัลกอริทึม Round Robin (RR) บนโครงข่าย LTE และดำเนินการเก็บค่าการใช้งาน ต่างๆ เพื่อทำการข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบ

3.4.2 จำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้งานอัลกอริทึม Channel and QoS Aware (CQA) บนโครงข่าย LTE และดำเนินการเก็บค่าการใช้งาน ต่างๆ เพื่อทำการข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบ

3.4.3 นำข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลา เพื่อนำค่า Throughput, Delay และ Jitter ของระบบมาเปรียบเทียบ

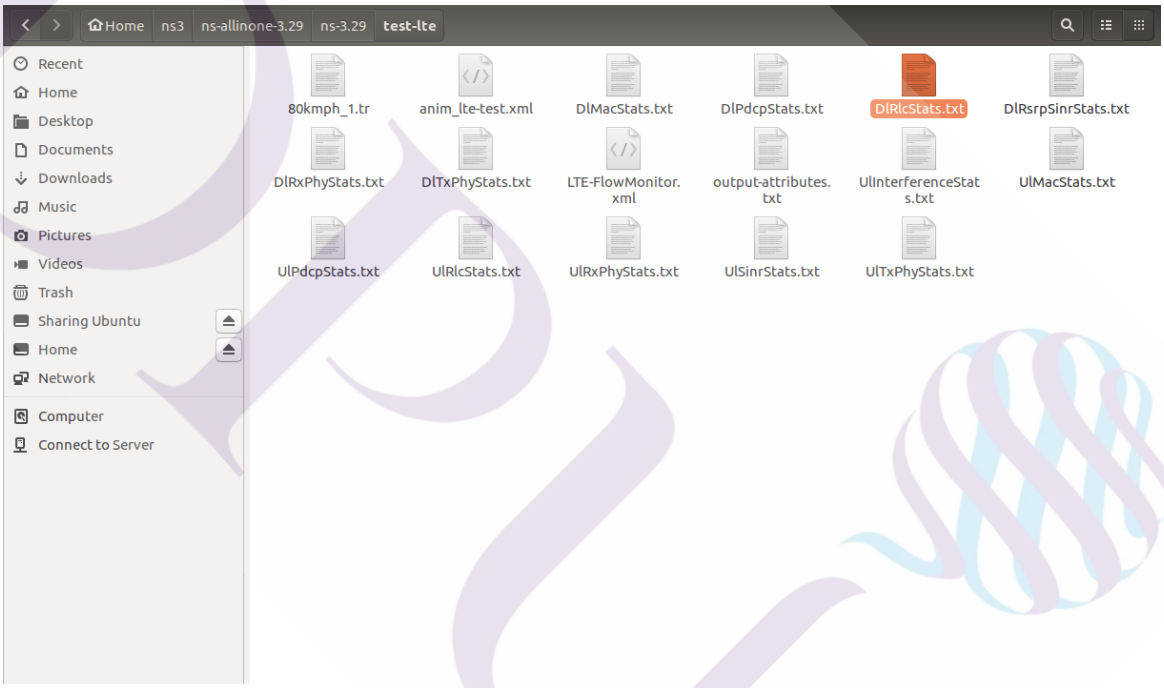
3.5 การวัดประสิทธิภาพของโครงข่าย

การทดสอบโครงข่ายด้วยซอฟต์แวร์ NS3 ได้มีการกำหนดให้ ผลการทดสอบ เป็นไฟล์นามสกุล .txt และทำการ Export มาเพื่อใช้โปรแกรม LibreOffice Calc และ MS Excel ในการคำนวณหาค่าต่างๆ ดังนี้

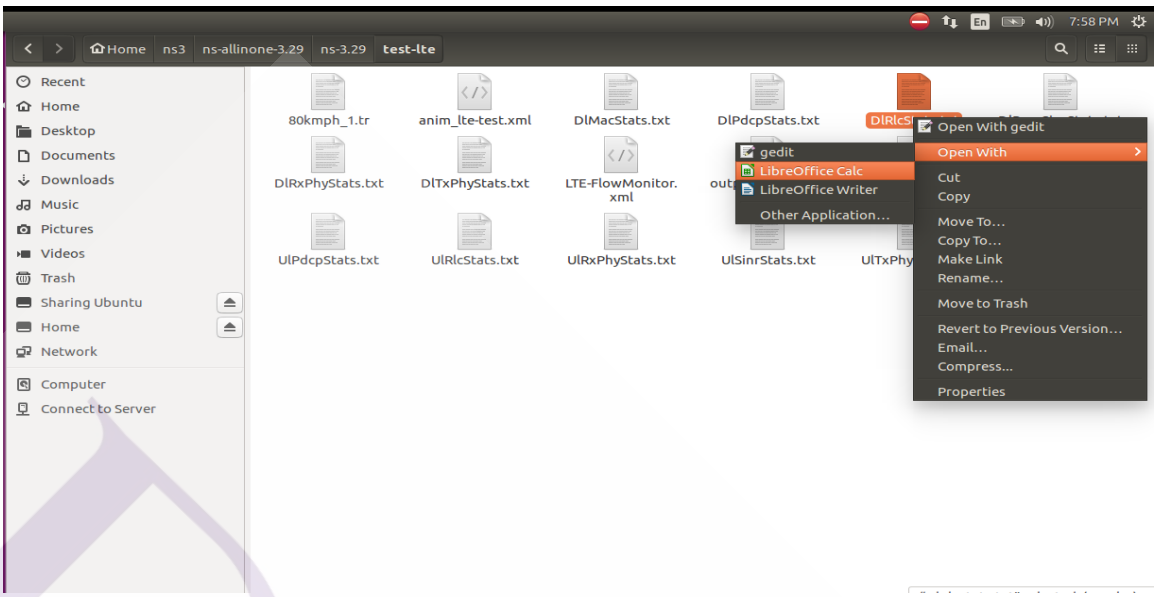
3.5.1 ค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput) พิจารณาจากค่าการส่งและการรับของ Packet หารด้วยเวลาเฉลี่ย

3.5.1.1 เปิดไฟล์ชื่อ DlRlcStats.txt ที่ได้จากการ Run โปรแกรม NS3 และ Export เป็นไฟล์นามสกุล txt

คลิกขวาที่ไฟล์เลือก Open With -> LibreOffice Calc

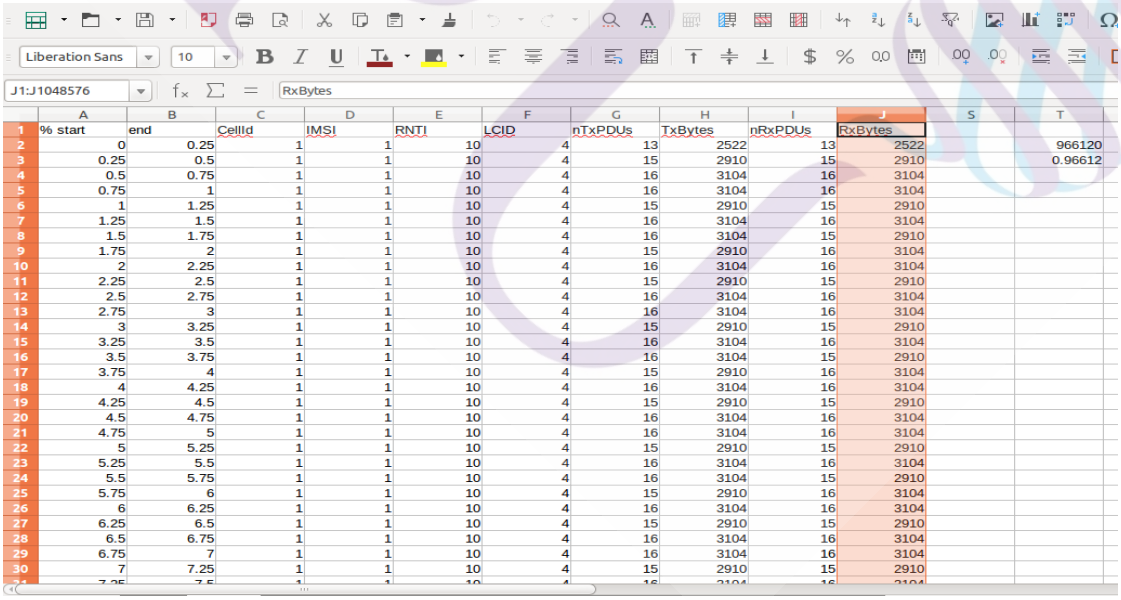


ภาพที่ 3.2 การเปิดไฟล์ชื่อ DlRlcStats.txt ที่ได้จากการ Run โปรแกรม NS3 (1)



ภาพที่ 3.3 การเปิดไฟล์ชื่อ DlRlcStats.txt ที่ได้จากการ Run โปรแกรม NS3 (2)

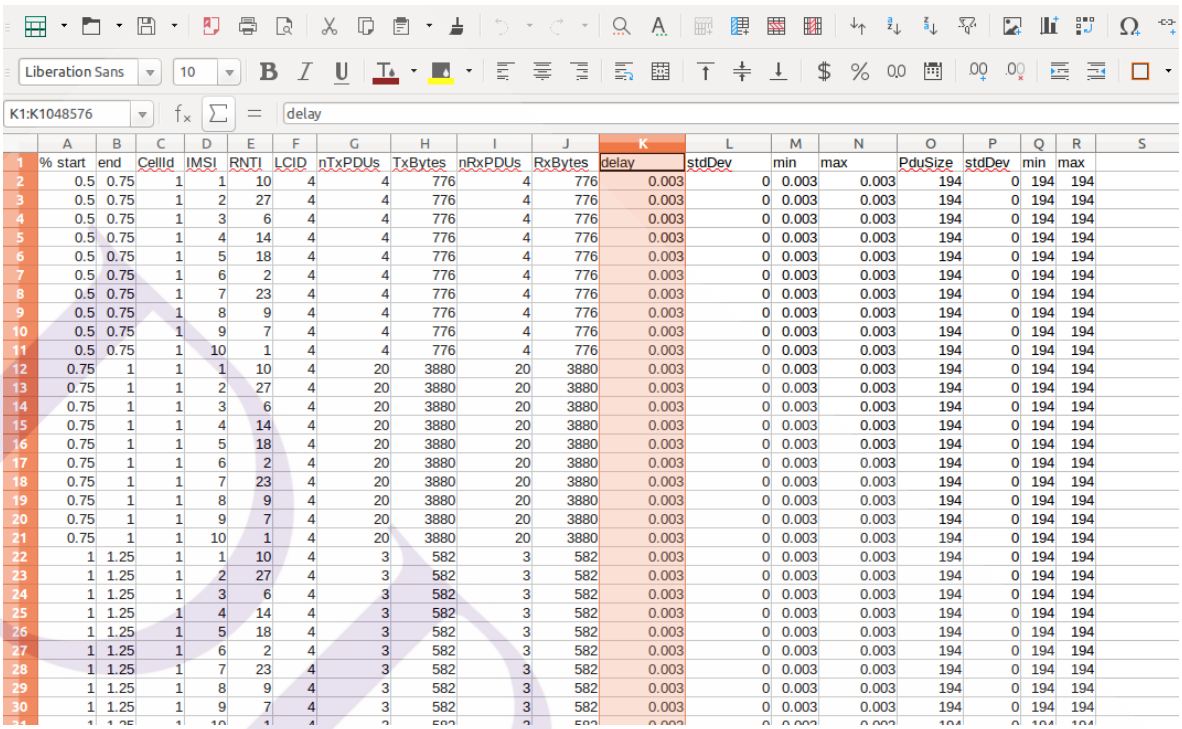
3.5.1.2 นำข้อมูลทั้งหมด ที่อยู่ใน Column “RxBytes” มาบวกรวมกันคูณด้วย 8 เพื่อเป็น Bit หารด้วย 10^6 เพื่อแปลงหน่วยเป็น Miga จากนั้นหารด้วยเวลา 8 วินาที จะได้เป็นหน่วย Mbps ของ Throughput



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	S	T
1	% start	end	CellId	IMSI	RNTI	LCID	nTxPDUs	TxBytes	nRxPDUs	RxBytes		
2	0	0.25	1	1	10	4	13	2522	13	2522		966120
3	0.25	0.5	1	1	10	4	15	2910	15	2910		0.96612
4	0.5	0.75	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
5	0.75	1	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
6	1	1.25	1	1	10	4	15	2910	15	2910		
7	1.25	1.5	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
8	1.5	1.75	1	1	10	4	16	3104	15	2910		
9	1.75	2	1	1	10	4	15	2910	16	3104		
10	2	2.25	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
11	2.25	2.5	1	1	10	4	15	2910	15	2910		
12	2.5	2.75	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
13	2.75	3	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
14	3	3.25	1	1	10	4	15	2910	15	2910		
15	3.25	3.5	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
16	3.5	3.75	1	1	10	4	16	3104	15	2910		
17	3.75	4	1	1	10	4	15	2910	16	3104		
18	4	4.25	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
19	4.25	4.5	1	1	10	4	15	2910	15	2910		
20	4.5	4.75	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
21	4.75	5	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
22	5	5.25	1	1	10	4	15	2910	15	2910		
23	5.25	5.5	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
24	5.5	5.75	1	1	10	4	16	3104	15	2910		
25	5.75	6	1	1	10	4	15	2910	16	3104		
26	6	6.25	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
27	6.25	6.5	1	1	10	4	15	2910	15	2910		
28	6.5	6.75	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
29	6.75	7	1	1	10	4	16	3104	16	3104		
30	7	7.25	1	1	10	4	15	2910	15	2910		

ภาพที่ 3.4 การคำนวณหา Throughput ด้วยโปรแกรม Libre Office Calc

3.5.2 ค่าความล่าช้าทางเวลา (Delay) ที่อยู่ใน Column “delay” ในแต่ละครั้งที่ส่งข้อมูล และนำข้อมูลมาหาค่า Delay โดยนำข้อมูลในแต่ละครั้งที่ส่งข้อมูลทั้งหมดมาหารด้วยเวลาเฉลี่ย

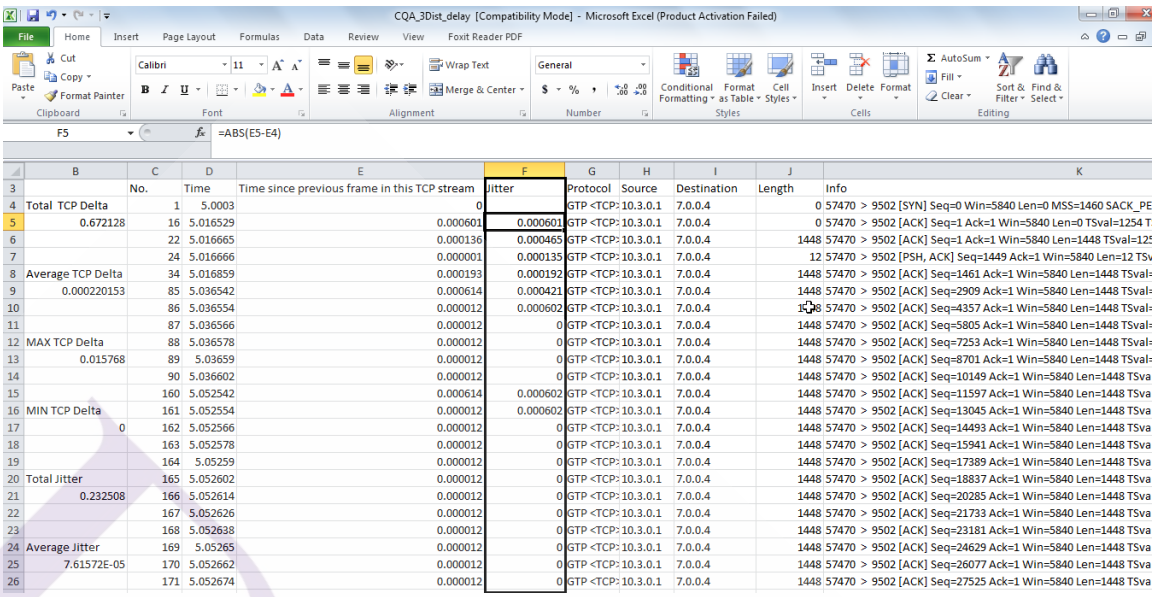


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	% start	end	CellId	IMSI	RNTI	LCID	nTxPDUs	TxBytes	nRxPDUs	RxBytes	delay	stdDev	min	max	PduSize	stdDev	min	max
2	0.5	0.75	1	1	10	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
3	0.5	0.75	1	2	27	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
4	0.5	0.75	1	3	6	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
5	0.5	0.75	1	4	14	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
6	0.5	0.75	1	5	18	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
7	0.5	0.75	1	6	2	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
8	0.5	0.75	1	7	23	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
9	0.5	0.75	1	8	9	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
10	0.5	0.75	1	9	7	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
11	0.5	0.75	1	10	1	4	4	776	4	776	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
12	0.75	1	1	1	10	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
13	0.75	1	1	2	27	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
14	0.75	1	1	3	6	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
15	0.75	1	1	4	14	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
16	0.75	1	1	5	18	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
17	0.75	1	1	6	2	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
18	0.75	1	1	7	23	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
19	0.75	1	1	8	9	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
20	0.75	1	1	9	7	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
21	0.75	1	1	10	1	4	20	3880	20	3880	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
22	1	1.25	1	1	10	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
23	1	1.25	1	2	27	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
24	1	1.25	1	3	6	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
25	1	1.25	1	4	14	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
26	1	1.25	1	5	18	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
27	1	1.25	1	6	2	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
28	1	1.25	1	7	23	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
29	1	1.25	1	8	9	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194
30	1	1.25	1	9	7	4	3	582	3	582	0.003	0	0.003	0.003	194	0	194	194

ภาพที่ 3.5 การคำนวณหา Delay ด้วยโปรแกรม Libre Office Calc

3.5.3 ค่าความแปรปรวนของความล่าช้าทางเวลา (Jitter) เมื่อได้ค่า Delay ก็สามารถหาค่า Jitter ได้โดยนำค่า Delay แต่ละรายการมาลบกัน ด้วยคำสั่ง ABS(Delay 1 – Delay 2) แล้วนำค่า Jitter ทั้งหมดมาหารด้วยเวลาเฉลี่ย[2]

[2] www.youtube.com/watch?v=QqKAnZnHs

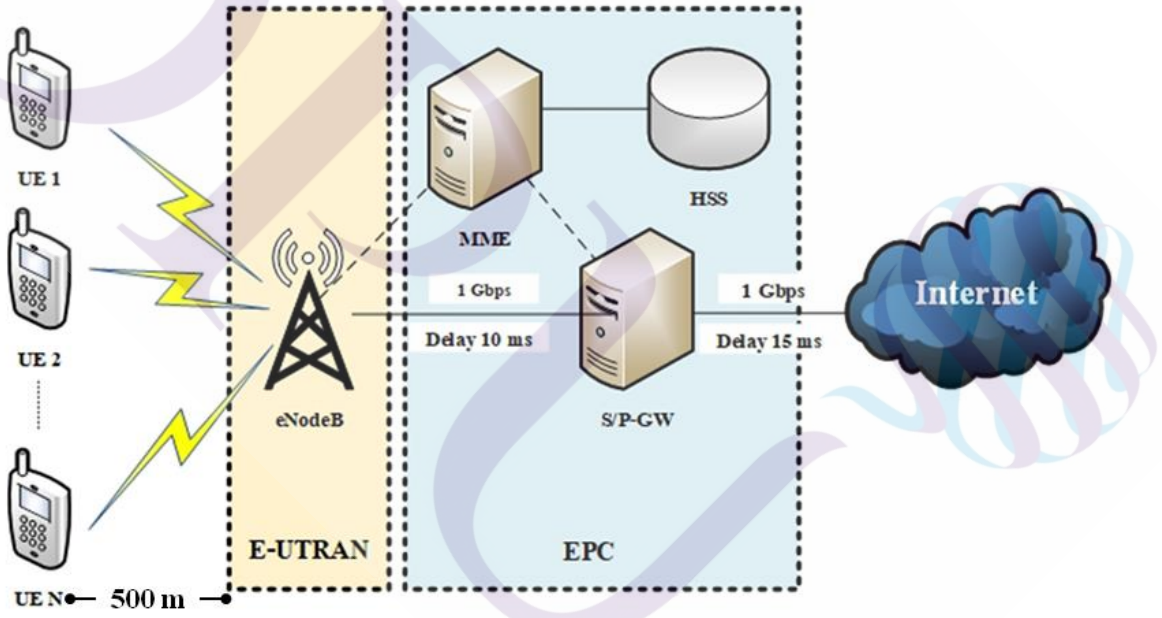


	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
3		No.	Time	Time since previous frame in this TCP stream	Jitter	Protocol	Source	Destination	Length	Info
4	Total TCP Delta	1	5.0003	0		GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	0	57470 > 9502 [SYN] Seq=0 Win=5840 Len=0 MSS=1460 SACK_PE
5	0.672128	16	5.016529	0.000601	0.000601	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	0	57470 > 9502 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5840 Len=0 TSval=1254 T
6		22	5.016665	0.000136	0.000465	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSval=125
7		24	5.016666	0.000001	0.000135	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	12	57470 > 9502 [PSH, ACK] Seq=1449 Ack=1 Win=5840 Len=12 TSv
8	Average TCP Delta	34	5.016859	0.000193	0.000192	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=1461 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSval=
9	0.000220153	85	5.036542	0.000614	0.000421	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=2909 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSval=
10		86	5.036554	0.000012	0.000602	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=4357 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSval=
11		87	5.036566	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=5805 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSval=
12	MAX TCP Delta	88	5.036578	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=7253 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSval=
13	0.015768	89	5.03659	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=8701 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSval=
14		90	5.036602	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=10149 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
15		160	5.052542	0.000614	0.000602	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=11597 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
16	MIN TCP Delta	161	5.052554	0.000012	0.000602	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=13045 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
17	0	162	5.052566	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=14493 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
18		163	5.052578	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=15941 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
19		164	5.05259	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=17389 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
20	Total Jitter	165	5.052602	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=18837 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
21	0.232508	166	5.052614	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=20285 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
22		167	5.052626	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=21733 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
23		168	5.052638	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=23181 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
24	Average Jitter	169	5.05265	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=24629 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
25	7.61572E-05	170	5.052662	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=26077 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva
26		171	5.052674	0.000012	0	GTP <TCP>	10.3.0.1	7.0.0.4	1448	57470 > 9502 [ACK] Seq=27525 Ack=1 Win=5840 Len=1448 TSva

ภาพที่ 3.6 การคำนวณหา Jitter ด้วยโปรแกรม MS Excel

บทที่ 4
ผลการศึกษา

ในบทนี้กล่าวถึงผลการศึกษาวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย โดยผู้วิจัยทำการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากสถานีฐาน (eNodeB) มาที่อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) บนโครงข่าย LTE โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึม Round Robin (RR) ที่โครงข่ายผู้ให้บริการส่วนใหญ่ใช้ กับอัลกอริทึม Channel and QoS Aware (CQA) และทำการทดสอบเป็น 5 การทดสอบ ดังภาพ 4.1, 4.2 และ 4.3



ภาพที่ 4.1 รูปแบบการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็นระยะเดียว

จากภาพที่ 4.1 เป็นภาพจำลองการทำงานของโครงข่าย LTE ที่มีการกำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็นระยะห่างเดียวคือ 500 เมตร โดยจะมีการส่งข้อมูลประเภท Voice, Video, Gaming และ Data พร้อมกันและมีจำนวนของผู้ใช้งาน(UE) 30 เครื่อง ซึ่งการทดสอบจะเป็นแบบระยะเดียว มีการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะมีการทดสอบการ

ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR, GBR กับ Non-GBR พร้อมกัน และแบบ Non-GBR แบบเดียว โดยมีคุณลักษณะตามตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE

การทดสอบ	จำนวน UE	QCI	MBR	GBR
1	UE 1-10	Voice (GBR)	100 Kbps	80 Kbps
	UE 11-20	Video (GBR)	400 Kbps	300 Kbps
	UE 21-30	9 (Data)	20 Mbps	-
2	UE 1-10	Voice (GBR)	100 Kbps	80 Kbps
	UE 11-20	Video (GBR)	400 Kbps	300 Kbps
	UE 21-30	Gaming(GBR)	500 kbps	400 Kbps
3	UE 1-30	Data (non-GBR)	20 Mbps	-

จากตารางที่ 4.1 แบ่งการทดสอบเป็น 3 การทดสอบ ดังนี้

- การทดสอบครั้งที่ 1 เป็นการส่งข้อมูล ประเภท Voice, Video และ Data พร้อมกัน ซึ่งการทดสอบนี้จะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR และ Non-GBR พร้อมกัน
- การทดสอบครั้งที่ 2 เป็นการส่งข้อมูล ประเภท Voice, Video และ Gaming พร้อมกัน ซึ่งการทดสอบนี้จะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR เพียงแบบเดียว
- การทดสอบครั้งที่ 3 เป็นการส่งข้อมูล ประเภท Data แบบเดียว ซึ่งการทดสอบนี้จะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ Non-GBR เพียงแบบเดียว แต่จะแบ่งการส่งเป็น 2 รูปแบบ คือ Greedy Source Traffic และรูปแบบ On/Off Source Traffic

โดยที่ข้อมูลประเภท UDP (Voice) เป็นการจำลองการใช้งาน VoIP ด้วยโมดูล OnOffHelper ในซอฟต์แวร์ NS3 เพื่อสร้าง Traffic ขึ้นมาเพื่อใช้ทดสอบ[1] และมีการส่งข้อมูลเป็น 2 รูปแบบ ตามตาราง 4.2

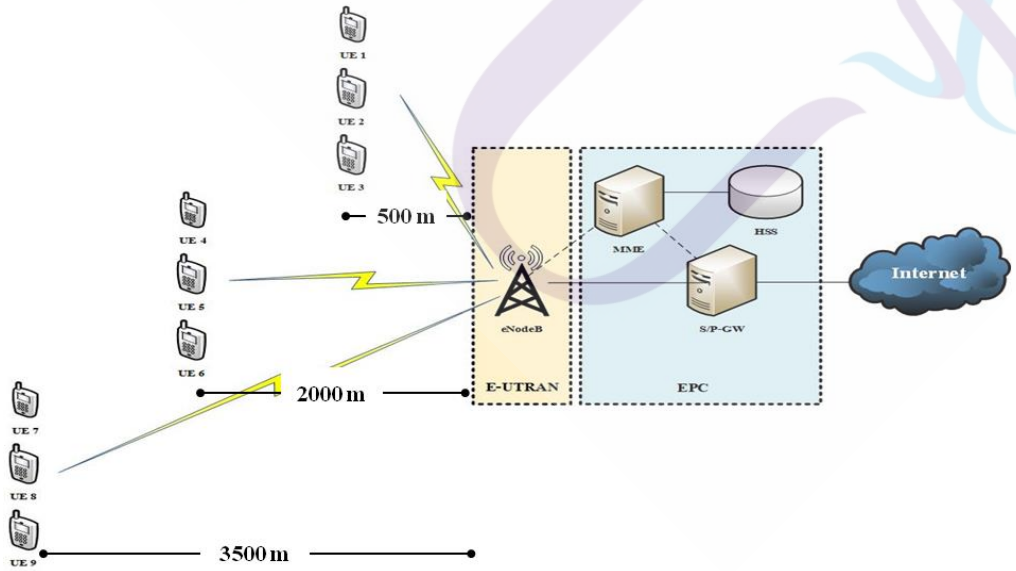
[1] di S.M.Y.,Kuokkwee Wee,Ee Mae A.,Mohd. F.A.A. Melaka,Malaysia. Performance Study of Channel-Qos Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3.

ตารางที่ 4.2 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE

รูปแบบการส่งข้อมูล	On Time (second)	Off Time (second)
Greedy Source Traffic	1	0
On/Off Source Traffic	0.15	0.3

จากตารางที่ 4.2 มีการส่งข้อมูล 2 รูปแบบ โดย Greedy Source Traffic จะเป็นการส่งข้อมูลในโครงข่ายอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เห็นถึง Maximum Throughput ที่ผู้ใช้งานจะได้รับ จึงกำหนดค่า Off Time (ช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูล) เป็น 0 และเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงในโครงข่าย จึงมีการกำหนดช่วงเวลาในการส่งข้อมูล โดยรูปแบบ On/Off Source Traffic จะมีการกำหนดค่า On Time (ช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูล) เป็น 150 ms และ Off Time (ช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูล) เป็น 300 ms และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาในโครงข่าย LTE ด้วยอัลกอริทึม Round Robin (RR) และ Channel and QoS Aware (CQA) โดยผลการศึกษาวิจัยจะวัดผลจากค่าประสิทธิภาพโครงข่าย ต่อไปนี้

- ค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput)
- ค่าความล่าช้าทางเวลา (Delay)
- ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลา (Jitter)



ภาพที่ 4.2 รูปแบบการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็น 3 ระยะ

จากภาพที่ 4.2 เป็นภาพจำลองการทำงานของโครงข่าย LTE ที่มีการกำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐาน เป็น 3 ระยะได้แก่ 500 เมตร 2,000 เมตร และ 3,500 เมตร โดยมีการส่งข้อมูลประเภท Voice, Video และ Gaming พร้อมกันและมีจำนวนของผู้ใช้งาน (UE) 9 เครื่อง การทดสอบการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR โดยมีคุณลักษณะตามตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE

การทดสอบ	จำนวน UE	QCI	MBR	GBR	ระยะ UE : eNodeB
4	UE 1	Voice (GBR)	100 Kbps	80 Kbps	500 เมตร
	UE 2	Video (GBR)	400 Kbps	300 Kbps	500 เมตร
	UE 3	Gaming (GBR)	500 Kbps	40 Kbps	500 เมตร
	UE 4	Voice (GBR)	100 Kbps	80 Kbps	2,000 เมตร
	UE 5	Video (GBR)	400 Kbps	300 Kbps	2,000 เมตร
	UE 6	Gaming (GBR)	500 Kbps	40 Kbps	2,000 เมตร
	UE 7	Voice (GBR)	100 Kbps	80 Kbps	3,500 เมตร
	UE 8	Video (GBR)	400 Kbps	300 Kbps	3,500 เมตร
	UE 9	Gaming (GBR)	500 Kbps	40 Kbps	3,500 เมตร

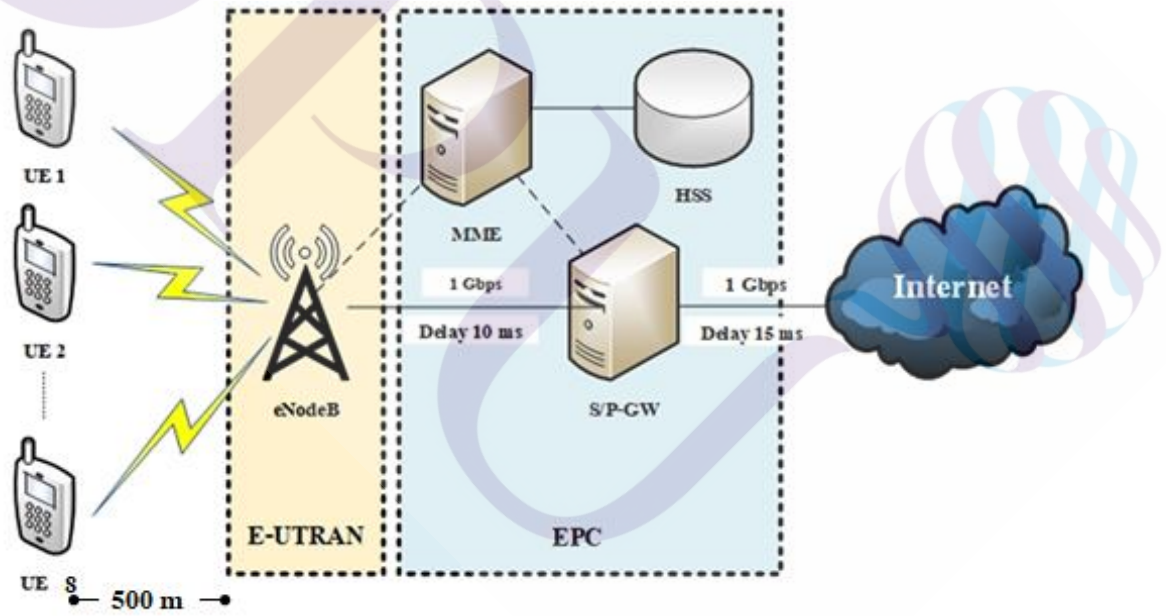
จากตารางที่ 4.3 เป็นการทดสอบครั้งที่ 4 เป็นการทดสอบแบบหลายระยะและมีการส่งข้อมูล ประเภท Voice, Video และ Gaming พร้อมกัน ซึ่งการทดสอบนี้จะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR

โดยที่ข้อมูลประเภท UDP (Voice) เป็นการจำลองการใช้งาน VoIP ด้วยโมดูล OnOffHelper ในซอฟต์แวร์ NS3 เพื่อสร้าง Traffic ขึ้นมาเพื่อใช้ทดสอบและมีการส่งข้อมูลเป็น 2 รูปแบบ ตามตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 รูปแบบการส่งข้อมูลในโครงข่าย LTE

รูปแบบการส่งข้อมูล	On Time (second)	Off Time (second)
Greedy Source Traffic	1	0
On/Off Source Traffic	0.15	0.3

จากตารางที่ 4.4 มีการส่งข้อมูล 2 รูปแบบ โดย Greedy Source Traffic จะเป็นการส่งข้อมูลในโครงข่ายอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เห็นถึง Maximum Throughput ที่ผู้ใช้งานจะได้รับ จึงกำหนดค่า Off Time (ช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูล) เป็น 0 และเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงในโครงข่าย จึงมีการกำหนดช่วงเวลาในการส่งข้อมูล โดยรูปแบบ On/Off Source Traffic จะมีการกำหนดค่า On Time (ช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูล) เป็น 150 ms และ Off Time (ช่วงเวลาที่ไม่มีการส่งข้อมูล) เป็น 300 ms และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาในโครงข่าย LTE ด้วยอัลกอริทึม Round Robin (RR) และ Channel and QoS Aware (CQA)



ภาพที่ 4.3 รูปแบบการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็นระยะเดียว

จากภาพที่ 4.3 เป็นภาพจำลองการทำงานของโครงข่าย LTE ที่มีการกำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและสถานีฐานเป็นระยะห่างเดียวคือ 500 เมตร โดยจะมีการส่งข้อมูลประเภท Video และ Gaming พร้อมกันและมีจำนวนของผู้ใช้งาน(UE) 8 เครื่อง ซึ่งการทดสอบจะเป็นแบบระยะเดียว การทดสอบการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR โดยมีคุณลักษณะตามตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่าย LTE

การทดสอบ	จำนวน UE	QCI	MBR	GBR	ระยะ UE : eNodeB
5	UE 1	Video (GBR)	15 Mbps	15 Mbps	500 เมตร
	UE 2	Video (GBR)	15 Mbps	15 Mbps	500 เมตร
	UE 3	Video (GBR)	15 Mbps	15 Mbps	500 เมตร
	UE 4	Video (GBR)	15 Mbps	15 Mbps	500 เมตร
	UE 5	Data (non-GBR)	15 Mbps	-	500 เมตร
	UE 6	Data (non-GBR)	15 Mbps	-	500 เมตร
	UE 7	Data (non-GBR)	15 Mbps	-	500 เมตร
	UE 8	Data (non-GBR)	15 Mbps	-	500 เมตร

จากตารางที่ 4.5 เป็นการทดสอบครั้งที่ 5 เป็นการทดสอบระยะ 500 เมตร และมีการส่งข้อมูลประเภท Video และ Data พร้อมกัน ซึ่งการทดสอบนี้จะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR และ non-GBR พร้อมกัน ในการทดสอบนี้จะส่งข้อมูลแบบ Greedy Source Traffic โดย Greedy Source Traffic จะเป็นการส่งข้อมูลในโครงข่ายอย่างต่อเนื่อง และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาในโครงข่าย LTE ด้วยอัลกอริทึม Round Robin (RR) และ Channel and QoS Aware (CQA)

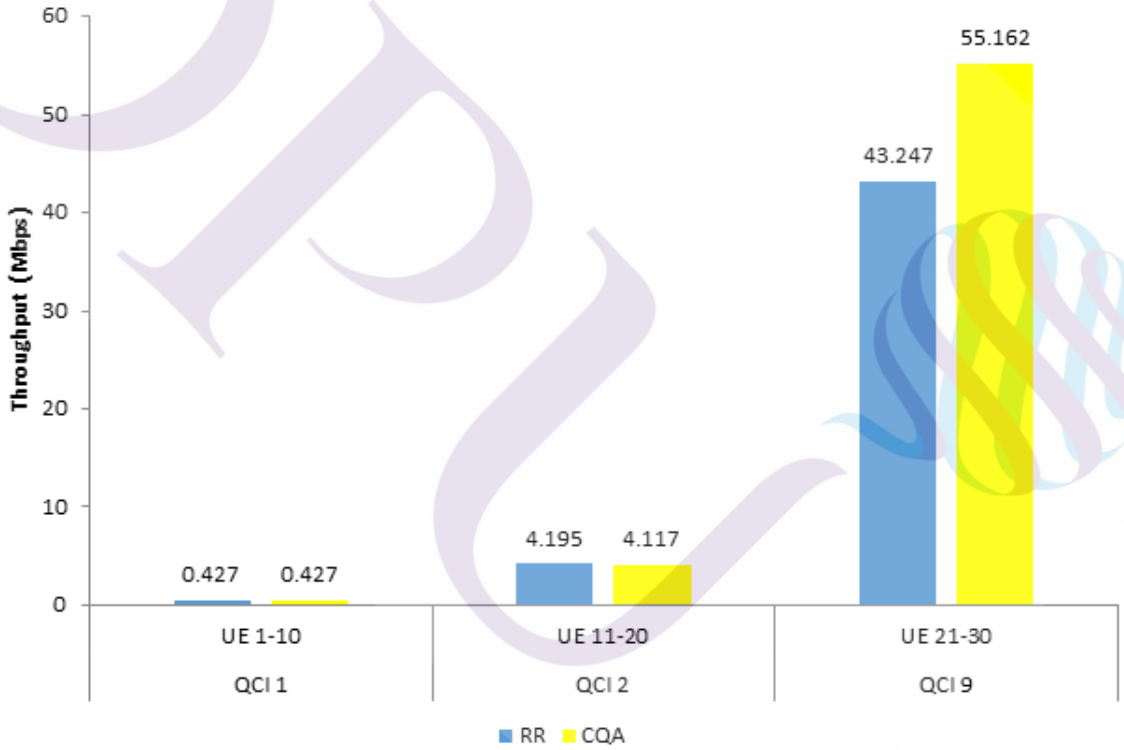
4.1 การทดสอบ

ในการทดสอบโครงข่าย LTE มีการส่งข้อมูล (Packet) จากเครื่องแม่ข่าย(Server) มายังอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน(UE) โดยนำอัลกอริทึมการจัดตารางเวลามาใช้ที่สถานีฐาน(eNodeB) และพิจารณาค่าการส่งข้อมูลจากเครื่องแม่ข่ายมายังอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน

โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 5 การทดสอบ ดังนี้

การทดสอบที่ 1 : โครงข่าย LTE มีการส่งข้อมูล Voice, Video และ Data พร้อมกัน ซึ่งการทดสอบนี้จะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแบบ GBR และ Non-GBR พร้อมกันโดย Packet Voice จะเป็นการส่งข้อมูลของด้วยรูปแบบ On/Off Source Traffic ส่วน Packet Video และ Data จะเป็นการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบ Greedy Source Traffic

ผลการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ในการทดสอบที่ 1 เป็นดังนี้



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR และ NGBR

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ อัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1-10 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.427 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.427 Mbps
- UE ที่ 11-20 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 4.195 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 4.117 Mbps
- UE ที่ 21-30 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 43.247 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 55.162 Mbps

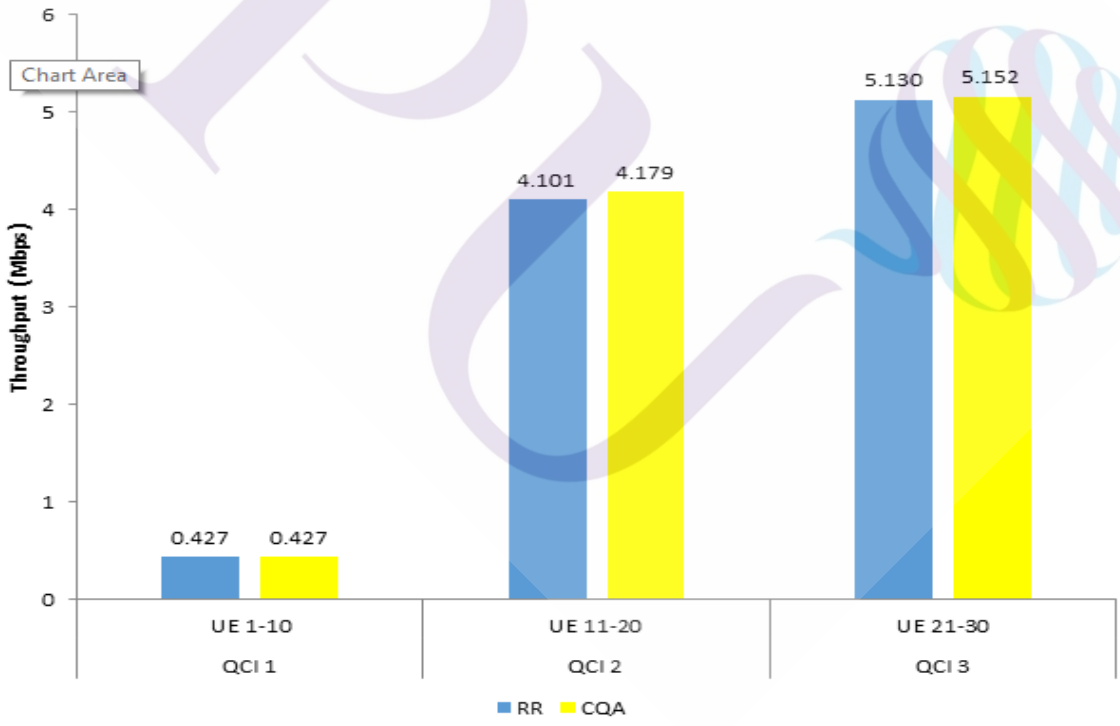
ตารางที่ 4.6 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR และ NGBR

UE	QCI	Average Delay (ms)	Average Jitter (ms)
Round Robin (RR)			
1 - 10	1 (Voice)	3	0
11 - 20	2 (Video)	3.252	0.82124
21 - 30	9 (Data)	3.041	0.30429
Channel and QoS Aware (CQA)			
1 - 10	1 (Voice)	3	0
11 - 20	2 (Video)	3.474	2.05854
21 - 30	9 (Data)	3.171	1.18046

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ ของอัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1-10 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 11-20 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.252 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3.474 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0.82124 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 2.05854 ms
- UE ที่ 21-30 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.041 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3.171 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0.30429 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 1.18046 ms

ผลการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ในการทดสอบที่ 2 เป็นดังนี้



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ อัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1-10 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.427 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.427 Mbps
- UE ที่ 11-20 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 4.101 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 4.179 Mbps
- UE ที่ 21-30 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Gaming(QCI 3) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 5.130 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 5.152 Mbps

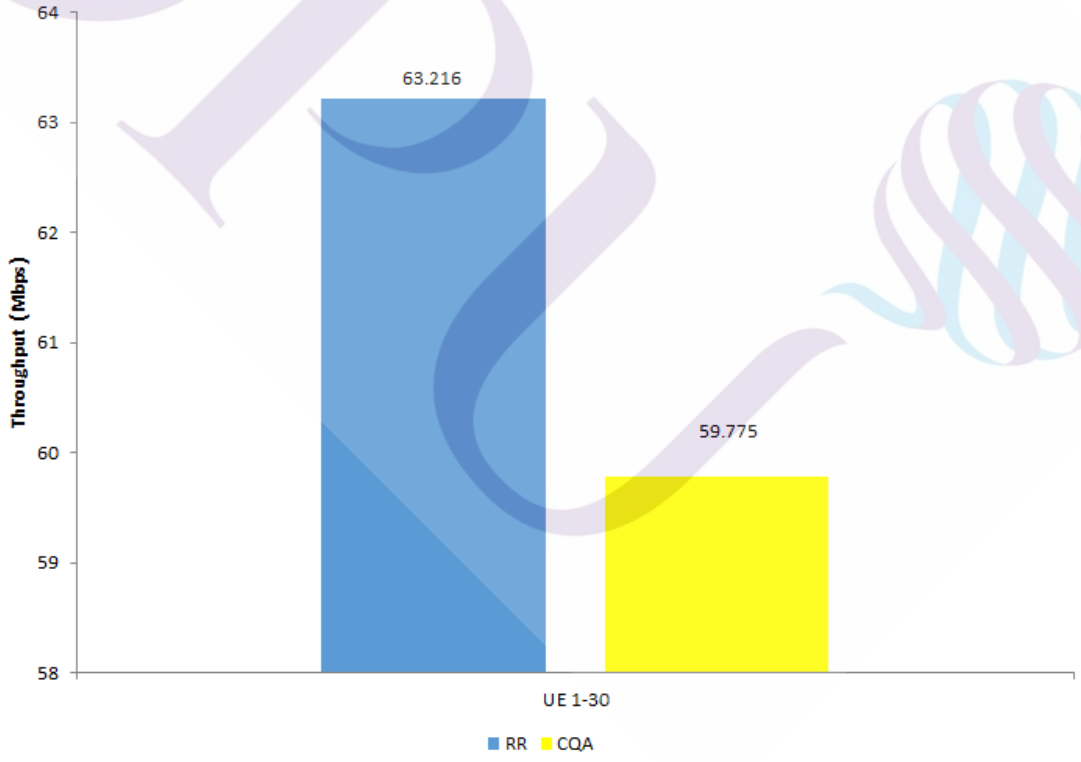
ตารางที่ 4.7 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR

UE	QCI	**Average Delay (ms)**	**Average Jitter (ms)**
Round Robin (RR)			
1 - 10	1 (Voice)	3	0
11 - 20	2 (Video)	3.288	1.21327
21 - 30	3 (Gaming)	3	0
Channel and QoS Aware (CQA)			
1 - 10	1 (Voice)	3	0
11 - 20	2 (Video)	3.007	0.12585
21 - 30	3 (Gaming)	3	0

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ ของอัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1-10 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 11-20 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.288 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3.007 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 1.21327 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0.12585 ms
- UE ที่ 21-30 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Gaming(QCI 3) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms

ผลการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ในการทดสอบที่ 3 เป็นดังนี้



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ Non-GBR

จากภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ อัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1-30 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 63.216 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 59.775 Mbps

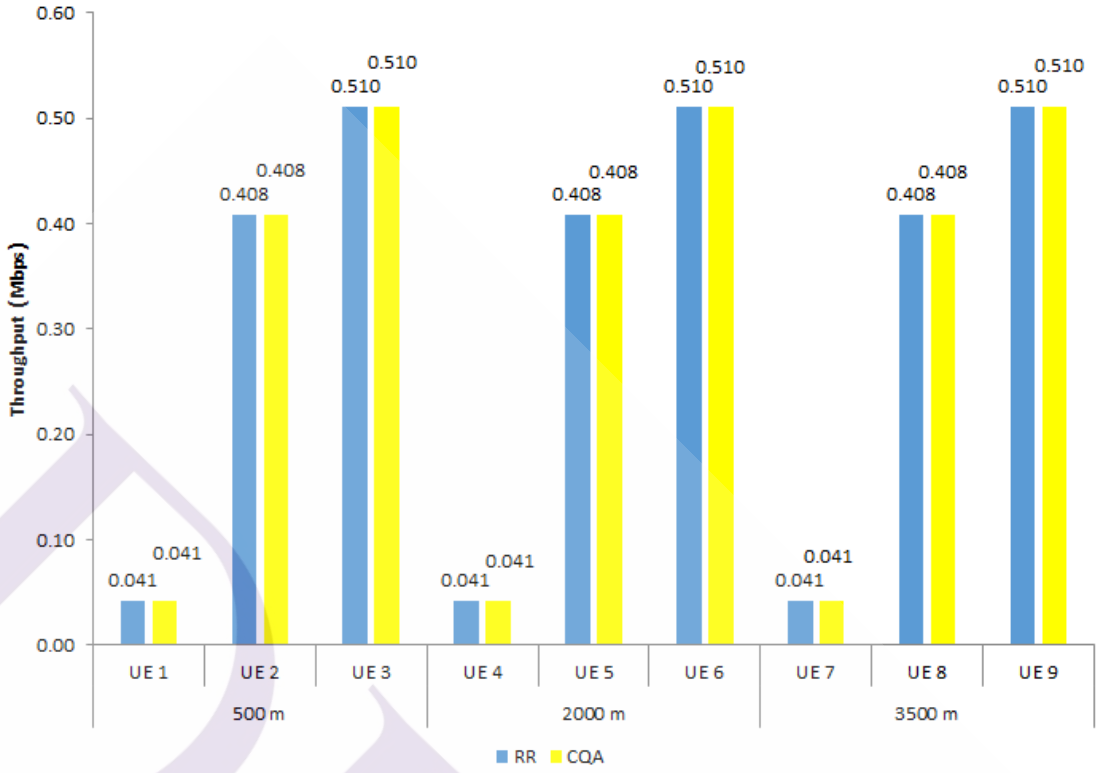
ตารางที่ 4.8 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ Non-GBR

UE	**QCI**	**Average Delay (ms)**	**Average Jitter (ms)**
Round Robin (RR)			
1 – 30	9 (Data)	3.06	0.36697
Channel and QoS Aware (CQA)			
1 – 30	9 (Data)	3.344	4.7415

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ ของอัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1-30 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.06 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3.344 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0.36697 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 4.7415 ms

ผลการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ในการทดสอบที่ 4 เป็นดังนี้



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR โดยกำหนดระยะห่างหลายระยะ

จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ ของอัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 500 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.41 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.41 Mbps
- UE ที่ 2 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 500 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.408 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.408 Mbps
- UE ที่ 3 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 500 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.510 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.510 Mbps

- UE ที่ 4 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 2,000 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.41 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.41 Mbps
- UE ที่ 5 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 2,000 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.408 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.408 Mbps
- UE ที่ 6 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 2,000 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.510 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.510 Mbps
- UE ที่ 7 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 3,500 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.41 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.41 Mbps
- UE ที่ 8 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 3,500 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.408 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.408 Mbps
- UE ที่ 9 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 3,500 เมตร มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 0.510 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0.510 Mbps

ตารางที่ 4.9 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR โดยกำหนดระยะห่างหลายระยะ

UE	QCI	Average Delay (ms)	Average Jitter (ms)
Round Robin (RR)			
1	1 (Voice)	3.551	1.118
2	2 (Video)	3	0
3	3 (Gaming)	3	0
4	1 (Voice)	3.551	1.118

5	2 (Video)	3	0
6	3 (Gaming)	3	0
7	1 (Voice)	3.551	1.118
8	2 (Video)	3	0
9	3 (Gaming)	3	0
Channel and QoS Aware (CQA)			
1	1 (Voice)	3.551	1.118
2	2 (Video)	3	0
3	3 (Gaming)	3	0
4	1 (Voice)	3.551	1.118
5	2 (Video)	3	0
6	3 (Gaming)	3	0
7	1 (Voice)	3.551	1.118
8	2 (Video)	3	0
9	3 (Gaming)	3	0

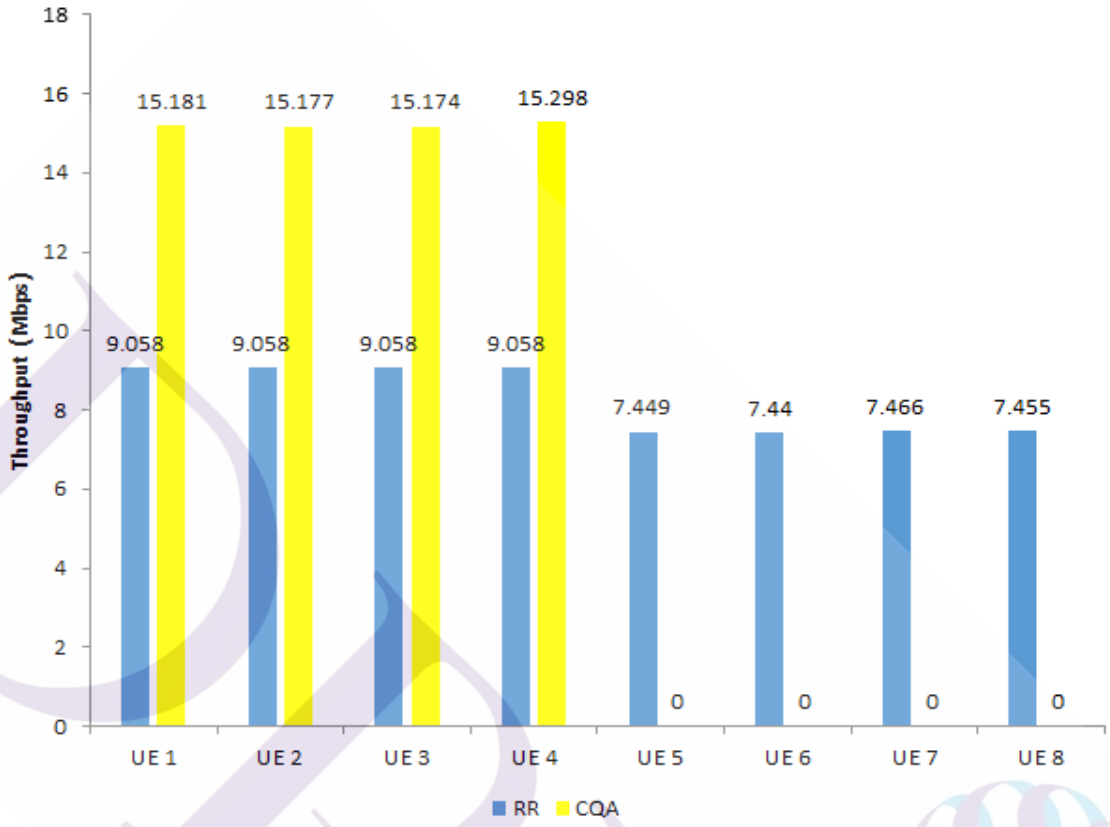
จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ ของอัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 500 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.551 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3.551 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 1.118 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 1.118 ms
- UE ที่ 2 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 500 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 3 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 500 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA

เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms

- UE ที่ 4 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 2,000 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.551 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3.551 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 1.118 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 1.118 ms
- UE ที่ 5 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 2,000 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 6 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 2,000 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 7 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Voice(QCI 1) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 3,500 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.551 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3.551 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 1.118 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 1.118 ms
- UE ที่ 8 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 3,500 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 9 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีระยะห่างระหว่าง UE และ eNodeB 3,500 เมตร มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms

ผลการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ในการทดสอบที่ 5 เป็นดังนี้



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่า Throughput รวมของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR และ non-GBR

จากภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ ของอัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 15.181 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 9.058 Mbps
- UE ที่ 2 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 15.177 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 9.058 Mbps
- UE ที่ 3 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 15.174 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 9.058 Mbps

- UE ที่ 4 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 15.298 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 9.058 Mbps
- UE ที่ 5 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 7.449 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0 Mbps
- UE ที่ 6 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 7.44 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0 Mbps
- UE ที่ 7 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 7.466 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0 Mbps
- UE ที่ 8 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่งของอัลกอริทึม RR รวมอยู่ที่ 7.455 Mbps และของ CQA รวมอยู่ที่ 0 Mbps

ตารางที่ 4.10 ผลเฉลี่ยของการทดสอบของอัลกอริทึม RR และ CQA ที่มีการทำงานแบบ GBR และ NGBR

UE	QCI	Average Delay (ms)	Average Jitter (ms)
Round Robin (RR)			
1	2 (Video)	3	0
2	2 (Video)	3	0
3	2 (Video)	3	0
4	2 (Video)	3	0
5	9 (Data)	3.159	0.547
6	9 (Data)	3.032	0.262
7	9 (Data)	3.089	0.294
8	9 (Data)	3.064	0.266
Channel and QoS Aware (CQA)			
1	2 (Video)	3	0
2	2 (Video)	3	0

3	2 (Video)	3	0
4	2 (Video)	3	0
5	9 (Data)	-	-
6	9 (Data)	-	-
7	9 (Data)	-	-
8	9 (Data)	-	-

จากตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นความแตกต่างของการส่งแพ็กเก็ตประเภทต่างๆ ของอัลกอริทึม RR และ CQA ดังนี้

- UE ที่ 1 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 2 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 3 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 4 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Video(QCI 2) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms
- UE ที่ 5 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.159 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0.547 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ - ms
- UE ที่ 6 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.032 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0.262 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ - ms
- UE ที่ 7 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.089 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0.294 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ - ms

- UE ที่ 6 เป็นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลประเภท Data(QCI 9) มีค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 3.064 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ - ms ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลาของอัลกอริทึม RR เฉลี่ยอยู่ที่ 0.266 ms และของ CQA เฉลี่ยอยู่ที่ 0 ms

4.2 อภิปรายผลการทดสอบ

จากการทดสอบกรณีที่โครงข่าย LTE ที่มีการส่งข้อมูล Voice, Video, Gaming, Data พร้อมกัน และมีการกำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน(UE) และสถานีฐาน(eNodeB) เป็นระยะห่างเดียวและหลายระยะ ส่งข้อมูลทั้งรูปแบบ Greedy Source Traffic และ On/Off Source Traffic พบว่า

- กรณีในการส่งข้อมูลแบบ non-GBR อย่างเดียว อัลกอริทึม RR มีค่า Throughput รวมมากกว่า อัลกอริทึม CQA เนื่องจาก อัลกอริทึม CQA ได้มีการ ตรวจสอบว่ามี CQI ตลอดเวลา ทำให้มีคำนวนและถึงส่งข้อมูลออกมาทำให้มีช่วงเวลาในการตรวจสอบว่าช่วงเวลาดังกล่าวมี CQI ที่มี Priority ที่ดีกว่าเข้ามาหรือไม่ทำให้ มีช่วงเวลาในการตรวจสอบ ส่วน RR ไม่สนใจว่าจะมี CQI แบบไหนและทำการส่งวนไปจนกว่าข้อมูลที่ให้จะหมดการส่ง ในส่วน ของ Delay และ Jitter ของ RR มีค่าต่ำกว่า CQA เนื่องมาจาก ไม่ต้องมีการนำค่า ของ CQI มาคำนวณทำให้ค่า Delay และ Jitter น้อยกว่า

- กรณีในการส่งข้อมูลแบบ GBR อย่างเดียวและแบบ GBR และ non-GBR ผสมกัน อัลกอริทึม CQA มีค่า Throughput รวมมากกว่า อัลกอริทึม RR เนื่องจาก CQA สามารถจัดการ Priority ได้ดีกว่าจึงสามารถส่งข้อมูลทั้ง 2 แบบ ในส่วนของ Delay และ Jitter ของ CQA มีค่าสูงกว่า RR เนื่องจาก CQA ได้มีการนำค่า CQI มาคำนวนในการที่จะส่งข้อมูลที่มี CQI ว่าอยู่ CQI ที่เป็น GBR หรือ non-GBR และถ้าเป็น GBR จะอยู่ใน Voice, Video, Real time Gameing, Non-Converational Video ตามลำดับในการส่ง ทำให้มี ค่า Delay ที่สูงกว่า RR ในบางกรณี

บทที่ 5
สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นสรุปผลที่ได้จากการทดสอบงานวิจัย รวมทั้งอธิบายข้อจำกัดของระบบที่พบจากการทดสอบระบบ และข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป เพื่อปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จำลองการใช้งานของอัลกอริทึม RR และ CQA บนโครงข่าย LTE ผลการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานสำหรับข้อมูลประเภท Real time เช่น Voice, Video, Gaming และ Non-Real time เช่น Data โดยแต่ละ UE มีค่า QoS หรือค่า QCI ที่แตกต่างกัน

ผลจำลองการทำงานด้วยการกำหนดรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าอัลกอริทึม RR ที่ผู้ให้บริการส่วนใหญ่เลือกใช้ ถึงแม้จะให้ค่า Throughput กับผู้ใช้งานได้สูง แต่ยังพบข้อจำกัด ดังนี้

- อัลกอริทึม RR ถึงแม้จะให้ค่า Throughput กับผู้ใช้งานได้สูง แต่เฉพาะที่มีการใช้งาน Data เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นข้อมูลประเภท Non-Real time
- อัลกอริทึม RR มีค่า Delay และ Jitter สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ ในหลายกรณีที่โครงข่ายมีผู้ใช้งานมากขึ้น จะทำให้ค่า Delay และ Jitter สูงยิ่งขึ้น
- อัลกอริทึม RR ไม่มีการคำนึงถึงคุณภาพของข้อมูล ซึ่งไม่เหมาะสมกับโครงข่าย LTE ในปัจจุบันที่มีการใช้ข้อมูลทั้งประเภท Real time และ Non-Real time พร้อมกัน

ผลจำลองการทำงานด้วยการกำหนดรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าอัลกอริทึม CQA เป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับรูปแบบโครงข่าย LTE ที่ใช้งานในปัจจุบัน เนื่องจาก

- อัลกอริทึม CQA มีการคำนึงถึงคุณภาพของข้อมูล ทำให้ข้อมูลทั้งประเภท Real time และ Non-Real time สามารถใช้ควบคู่กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- อัลกอริทึม CQA มีค่า Delay และ Jitter ส่วนใหญ่ต่ำกว่า

ผลจำลองการทำงานด้วยการกำหนดรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าอัลกอริทึม CQA ยังมีข้อจำกัด ดังนี้

- อัลกอริทึม CQA ถึงแม้จะให้ค่า Throughput ที่สูงที่สุด ในการใช้ข้อมูลทั้งประเภท Real time และ Non-Real time พร้อมกัน หรือ ประเภท Real time แบบเดียว แต่ในกรณีที่มีการใช้ข้อมูลทั้งประเภท Non-Real time เพียงอย่างเดียว ให้ค่า Throughput น้อยกว่า RR
- อัลกอริทึม CQA เมื่อมีการส่ง Data Rate ประเภท GBR รวมในโครงข่ายตั้งแต่ 3 Mbps ขึ้นไป จะส่งผลกระทบต่อข้อมูลประเภท Non-GBR(Non-Real time) ส่งข้อมูลได้น้อยถึงส่งไม่ได้เลย

5.1.1 สรุปผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

5.1.1.1 สามารถเข้าใจหลักการทำงานของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาแบบ Round Robin (RR) และ Channel and QoS Aware (CQA) และสามารถจำลองการนำอัลกอริทึมที่กล่าวมามาใช้ในโครงข่าย LTE

5.1.1.2 ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาการส่งข้อมูล 2 แบบ โดยประเมินประสิทธิภาพการทำงานจาก ค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput), ค่าความล่าช้าทางเวลา (Delay) และ ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลา (Jitter)

5.1.2 สรุปผลตามขอบเขตของงานวิจัย สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.2.1 ทำการจำลองการทำงานโครงข่าย LTE และนำอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาแบบ Round Robin (RR) และ Channel and QoS Aware (CQA) มาประยุกต์ใช้งาน ด้วยโปรแกรม NS3 ได้

5.1.2.2 ดำเนินการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางเวลา โดยมีเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ส่งข้อมูล ได้แก่ การกำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) และสถานีฐาน (eNodeB) , ประเภทของข้อมูลที่ใช้ส่งที่มีค่า QCI ที่แตกต่างกัน และ มีการกำหนดประเภทของการส่งข้อมูลเป็นรูปแบบ Greedy Source Traffic และ On/Off Source Traffic

5.1.2.3 ประเมินเปรียบเทียบอัลกอริทึมจากค่าปริมาณข้อมูลที่รับส่งในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput), ค่าความล่าช้าทางเวลา (Delay) และ ค่าความแปรปรวนของค่าความล่าช้าทางเวลา (Jitter)

5.2 ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของงานวิจัย

ข้อจำกัดของงานวิจัย สามารถแยกออกเป็นข้อๆ ได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 โปรแกรม NS3 สามารถใช้งานได้เฉพาะในระบบปฏิบัติการ Linux เท่านั้น ทำให้เวลาที่ต้องการใช้งานต้องทำการติดตั้งระบบปฏิบัติการ Linux หรือต้องทำงานผ่าน Virtual Machine ผู้ใช้ต้องมีความรู้พื้นฐานในการใช้งาน Linux ระดับดี จึงจะสามารถใช้งานหรือทำงานวิจัยได้

5.2.2 โปรแกรม NS3 ไม่สามารถส่งข้อมูลประเภท Video Streaming ได้

5.2.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม NS3 ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในทันที แต่ผลจะออกมาเป็นไฟล์ชื่อ DlRlcStats.txt และจะต้องคำนวณด้วยโปรแกรม Libre Office Calc หรือ MS Excel

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ สามารถแยกออกเป็นข้อๆได้ดังต่อไปนี้

5.3.1 ควรมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการจัดตารางเวลา บนโครงข่าย LTE ที่มีความหลากหลายของระยะทาง ประเภทของการใช้งานข้อมูลหลากหลาย และจำนวนอุปกรณ์ของผู้ใช้งานมากขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงในปัจจุบัน

5.3.2 ควรมีการทำการวิจัยเพิ่มในอัลกอริทึม CQA เมื่อมีการส่ง Data Rate ประเภท GBR รวมในโครงข่ายตั้งแต่ 3 Mbps ขึ้นไป จะส่งผลกระทบต่อข้อมูลประเภท non-GBR(non-Real time) ส่งข้อมูลได้น้อยถึงส่งไม่ได้เลย เพื่อหาข้อแก้ไขในการพัฒนาอัลกอริทึม CQA ให้ดียิ่งขึ้น

5.3.3 เนื่องจากอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาที่นำมาทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน ยังมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน จึงควรมีการศึกษาอัลกอริทึมการจัดตารางเวลาอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อนำข้อดีของแต่ละอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้รวมกัน

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

ความดัชนีของ MCS ของ LTE. สืบค้น 8 เมษายน 2561, จาก http://anisimoff.org/eng-/lte_throughput.html

รูปแบบการจราจรในโครงข่าย LTE. สืบค้น 7 เมษายน 2561, จาก http://www.rfwireless-world.com/ Tutorials/LTE-QoS.html

สถาปัตยกรรมโครงข่าย LTE. สืบค้น 4 เมษายน 2561, จาก https://www.tutorialspoint.com/ lte/lte_network_architecture.html

ภาษาต่างประเทศ

Adi S.M.Y.,Kuokkwee Wee,Ee Mae A.,Mohd. F.A.A. Melaka,Malaysia. (2015). *Performance Study of Channel-Qos Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3.*

Biljana Bojovic.,Nicola BaldoMohd. Spain. (2014). *A new Channel and QoS Aware Scheduler to enhance the capacity of Voice over LTE systems.*

Find Delays with TCP "Calculate Conversation Timestamps". Retrieved April 28, 2018, from https://www.youtube.com/ watch?v=QqKAnZnHss0

NS3 documentation. Retrieved April 15, 2018, from https://www.nsnam.org/doxygen/index.html

NS3 Module. Retrieved April 15, 2018, from https://www.nsnam.org/doxygen/index.html

NURULANIS M.,DARMAWATY MOHD ALI.,Mohd.,AZLINA IDRIS. Malaysia. (2018). *Performance Analysis of Quality of Service and Energy Efficient Aware (QEEA) Scheduling Algorithm for Long Term Evolution (LTE).*

The femtoforum MAC scheduler Interface. Retrieved April 13, 2018, from https://www.nsnam.org /docs/models/html/lte-design.html#the-femtoforum-mac-scheduler-interface

Tshiteya Dikamba.(2011).*Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution (LTE).* (Master of Science Thsis,Delft University of Technology)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	จ่าสิบเอก ไกรฤกษ์ ราชพิทักษ์
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม แขนงเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยครูวิชาช่าง แผนกไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ กองการฝึกและศึกษา โรงเรียนช่างฝีมือทหาร สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ