

การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi
ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต

ประภาวดี อินทรเทพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ปีการศึกษา 2564

**PERFORMANCE EVALUATION OF MULTEFIRE AND WI-FI
COEXISTENCE IN UNLICENSED SPECTRUM WITH NS-3**

PREPHARWADEE INTHARATHEP

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

Department of Computer and Telecommunication Engineering

College of Innovative Technology and Engineering,


Dhurakij Pundit University

Academic 2021



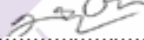
ใบรับรองวิทยานิพนธ์
วิทยาลัยวิศวกรรมค่านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกับ Multicast Fire กับ Wi-Fi ในย่าน
ความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต
เสนอ โดย นางประภาวดี อินทรเทพ
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ธัญญา จารุวิทย์โควิท
ได้พิจารณาเห็นชอบ โดยคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์แล้ว


.....ประธานกรรมการ
(รองคณบดี อาจารย์ ดร.ดิเรก จรุงกิจกุล)


.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(อาจารย์ ดร.ธัญญา จารุวิทย์โควิท)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธัญพร เขมระภาคะพันธ์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยคณบดี อาจารย์ ดร.มัทธนา อ่องแสง)

วิทยาลัยวิศวกรรมค่านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


.....คณบดีวิทยาลัยวิศวกรรมค่านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
(อาจารย์ ดร.ธัญพร เขมระภาคะพันธ์)
วันที่ ...30...เดือน ...กรกฎาคม... พ.ศ. ...2565.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต
ชื่อผู้เขียน	ประภาวดี อินทรเทพ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ธนัญ จารุวิทย์โกวิท
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเกตพฤติกรรม ศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G แบบภายในอาคาร (indoor) สำหรับย่านความถี่ 5 GHz ในย่าน UNII I (Unlicensed National Information Infrastructure (UNII)) โดยใช้ MulteFire ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต (Unlicensed band) เพื่อสังเกตพฤติกรรมและวิเคราะห์ประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นศึกษาเรื่องประสิทธิภาพ throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เมื่อระบบเครือข่ายมีการใช้งานในพื้นที่เดียวกันร่วมกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในย่าน UNII I

วิธีการวิจัยนี้ใช้การสร้างแบบจำลองระบบเครือข่ายด้วยโปรแกรมจำลองเครือข่าย Network Simulation (ns-3) เพื่อสร้างระบบเครือข่ายจำลอง กำหนดให้มีการรับส่งข้อมูลแบบหนึ่งผู้ให้บริการ (Operator) ต่อหนึ่งผู้รับด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณ (User Equipment (UE)) ใช้ความกว้างช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) 20 MHz จำลองการใช้งานร่วมกันภายในอาคารในพื้นที่เดียวกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เป็น 3 รูปแบบ คือ 1) ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน 2) ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค Listen Before Talk (LBT) ร่วมด้วย และ 3) ใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน โดยใช้เทคนิค Dynamic Frequency Selection (DFS) ย้ายช่องสัญญาณ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การใช้งานร่วมกันของ Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน เมื่อใช้เทคนิค LBT และใช้เทคนิค DFS ทำให้ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม คิดเป็น 44.72% และ 174.30 % ตามลำดับ ซึ่งการนำเทคนิคต่างๆมาใช้งานนอกจากจะทำให้เกิดการใช้งานร่วมกันได้อย่างเท่าเทียม (Fairly coexistence) แล้ว ยังเป็นการเพิ่มความจุ (Capacity) และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอีกด้วย

คำสำคัญ: MulteFire, Unlicensed Spectrum, LBT, Wi-Fi

Thesis Title	PERFORMANCE EVALUATION OF MULTEFIRE AND WI-FI COEXISTENCE IN UNLICENSED SPECTRUM WITH NS-3
Author	Prapharwadee Intharathep
Thesis Advisor	Dr. Tanun Jaruvitayakovit
Department	Computer and Telecommunications Technology Engineering
Academic Year	2021

ABSTRACT

The aim of this research is to analyze the 5G communication networks, the downlink performance improvements of MulteFire and Wi-Fi coexistence in the 5 GHz unlicensed band UNII I (Unlicensed National Information Infrastructure (UNII)) for indoor deployment, in terms of downlink user throughput.

The simulation scenario defined in 3 scenarios with one operator to one user equipment (UE) using Network Simulation (ns-3) simulation platform. First, Wi-Fi has to coexist with MulteFire on same channel, Second, Wi-Fi and MulteFire coexistence on same channel with Listen Before Talk (LBT) techniques Finally Wi-Fi and MulteFire coexistence on different channel. The simulation results show that Wi-Fi and MulteFire coexistence performance on same channel with LBT techniques and on different channel increases performance of total downlink user throughput to be 44.72% and 174.30% presents, therefore respectively and yet, Wi-Fi coexisting fairly with MulteFire for indoor scenarios have helped to improvements to the network capacity, and for a friendly coexistence.

Key words: MulteFire, Unlicensed Spectrum, LBT, Wi-Fi

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัย รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่ ดร.ธัญ จารุวิทย์โกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา การดำเนินงานวิจัย ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งได้กรุณาช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รศ.ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์, ผศ.ดร.มัชฌิมา อ่องแดง, ผศ.ดร.เนืองวงศ์ ทวยเจริญ และ ผศ.ดร.ณรงค์เดช กิรติพรานนท์ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ดร.วุฒิชัย เกษรปทุมานันท์ และ นายชญานิน ขวงโย ที่ช่วยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลาระหว่างการศึกษา รวมถึงผู้บังคับบัญชาและเพื่อนร่วมงานที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ในด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรัก ความอบอุ่น ความเข้าใจ ความห่วงใย และให้การสนับสนุนด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด คุณค่าและประโยชน์ใด ๆ ที่อาจมิได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณของบิดามารดาที่ให้กำเนิดและเลี้ยงดูให้การศึกษา ตลอดจนครูบาอาจารย์และผู้ที่มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนในการวางรากฐานการศึกษาให้แก่ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ฉ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	6
2. แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 MulteFire.....	7
2.2 LBT.....	11
2.3 เทคโนโลยี Wi-Fi.....	13
2.4 DFS.....	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	24
3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบเครือข่ายจำลอง.....	24
3.2 สมมติฐานของงานวิจัย.....	26
3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และรูปแบบข้อมูลของระบบเครือข่ายจำลองในย่าน UNII I.....	27
3.4 การออกแบบการทดสอบแบบจำลอง.....	30
3.5 ขั้นตอนการทำงานและการบันทึกผลแบบจำลอง.....	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	38
4.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบตามที่กำหนดไว้.....	38
4.2 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ.....	44
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2 ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของงานวิจัย.....	56
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	56
บรรณานุกรม.....	58
ภาคผนวก.....	60
ก บทความวิชาการเรื่อง การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulleFire กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตด้วยโปรแกรม ns-3	61
ประวัติผู้เขียน.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	6
2.1 Channel Access Priority Class สำหรับ LAA (3GPP LBT CAT4 Priority classes).....	12
2.2 ค่าช่วงระยะเวลา TxOP ที่เลือกตามขนาดของ LAA CW สำหรับวิธีการเลือก TxOP แบบ ไดนามิก.....	20
2.3 เปรียบเทียบบทความงานวิจัย.....	21
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	28
3.2 ค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรคงที่ที่ใช้ในการจำลองทั้ง 3 รูปแบบ.....	29
3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปแบบที่ 1.....	30
3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปแบบที่ 2.....	31
3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปแบบที่ 3.....	34
4.1 ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ตามรูปแบบที่ 1.....	39
4.2 ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ตามรูปแบบที่ 2.....	40
4.3 ค่า throughput ของผู้รับ แต่ละตำแหน่งและระยะเวลาการใช้งานของ LBT ตามรูปแบบที่ 2.....	41
4.4 ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ตามรูปแบบที่ 3.....	43
4.5 ค่า throughput ของผู้รับ ในแต่ละตำแหน่ง ตามรูปแบบที่ 3.....	44

สารบัญภาพ

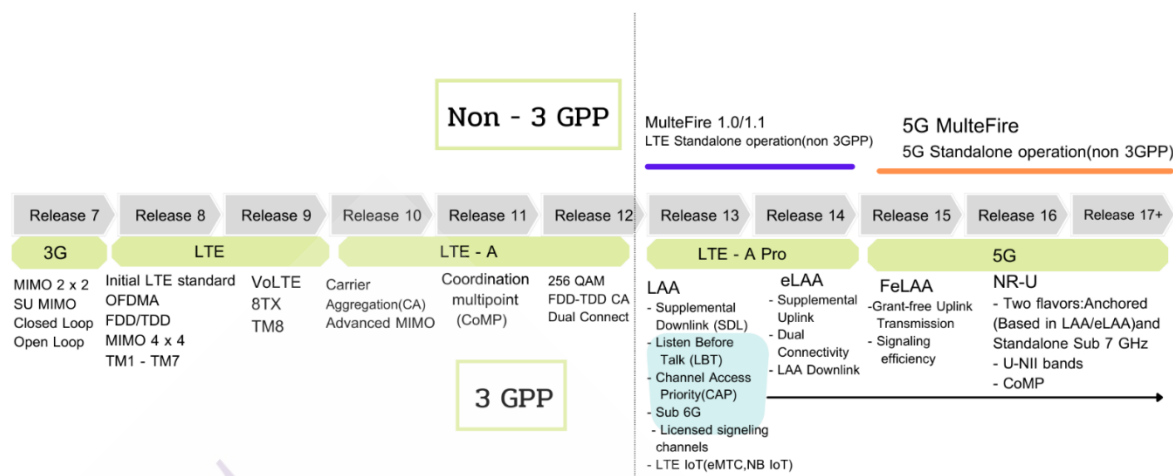
ภาพที่	หน้า
1.1 วิวัฒนาการของมาตรฐานในย่าน unlicensed band พัฒนาโดย 3GPP.....	2
1.2 Worldwide 5GHz ที่อนุญาตให้ใช้งานในย่าน unlicensed spectrum.....	3
2.1 เทคโนโลยีในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต คือ Wi-Fi และ MulteFire.....	8
2.2 เทคโนโลยี MulteFire อ้างอิงบนมาตรฐาน 3GPP Release 13 และ 14 ไม่จำเป็นต้องใช้ความถี่ที่มีใบอนุญาต (Licensed band).....	8
2.3 โครงสร้างการส่งข้อมูลแบบยืดหยุ่นสำหรับการส่งข้อมูล Uplink / Downlink ของ MulteFire.....	9
2.4 โครงสร้างการส่งข้อมูล (Frame structures) แบบยืดหยุ่นที่มีประสิทธิภาพของ LBT.....	9
2.5 ช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูล (Periodic TX opportunities) ของ LBT.....	10
2.6 Listen Before Talk mechanism.....	11
2.7 MulteFire ใช้ LBT ในย่าน share spectrum.....	12
2.8 ผังแสดงการรับส่งข้อมูลของ Wi-Fi.....	14
2.9 เปรียบเทียบกลไกของ Wi-Fi กับ LBT ในย่าน unlicensed band.....	14
3.1 แผนภาพระบบเครือข่ายจำลองที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.2 รูปแสดงตำแหน่งผู้รับ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐาน.....	32
3.3 รูปแสดงตำแหน่งผู้รับ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานแต่ UE_B อยู่ไกลกว่า.....	33
3.4 รูปแสดงตำแหน่งผู้รับ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันและไกลจากสถานีฐาน.....	33
4.1 ค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับ เมื่อผู้รับ UE_A และ UE_B อยู่จุดเดียวกันแบบใกล้และไกลสถานีฐานตามตำแหน่งแบบที่ 1 และ แบบที่ 3.....	46
4.2 ค่า throughput ข้อมูลขาของ (Downlink) ของผู้รับ เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานแต่ UE_B อยู่ไกลกว่า ตามตำแหน่งแบบที่ 2.....	47
4.3 ค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับเมื่อผู้รับ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานแต่ UE_A อยู่ไกลกว่า ตามตำแหน่งแบบที่ 4.....	48
4.4 ค่า throughput ของข้อมูลขาของ (Downlink) ของผู้รับในแต่ละ Operator.....	51
4.5 ค่า throughput ของข้อมูลขาของ (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบ.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในหลายปีที่ผ่านมา การเติบโตอย่างต่อเนื่องของการใช้งานโทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์พกพาแบบเคลื่อนที่ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วโลก รวมทั้งความก้าวหน้าของระบบสื่อสารโทรคมนาคมที่มีความต้องการการใช้งานอัตราข้อมูลปริมาณสูง (High Data Rate) เช่น การใช้งานเนื้อหาวิดีโอ การรับชมภาพยนตร์ สื่อบันเทิงผ่านอินเทอร์เน็ต การใช้งานแอปพลิเคชันต่างๆ และการใช้งานของ (Internet of thing : IOT) เป็นต้น เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้มีความต้องการใช้งานปริมาณข้อมูลสูงขึ้น ดังนั้น ระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือจึงต้องมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งระบบเครือข่าย 4G ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันถูกใช้งานจนใกล้เต็มความจุแล้ว ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องสนใจเสาะหาย่านสเปกตรัมในระบบเครือข่าย LTE เพื่อนำมาใช้งานให้เต็มประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การขาดแคลนย่านความถี่ที่ต้องได้รับใบอนุญาต ซึ่งมีอยู่จำกัดและมีราคาสูงมาก จากข้อมูลการประมูลคลื่นความถี่ที่ต้องมีใบอนุญาตครั้งที่ผ่านมาในประเทศไทย ดำเนินการโดยสำนักงาน กสทช. ได้จัดประมูลคลื่นความถี่ในย่าน 700 MHz 2600 MHz และ 26 MHz รวม 3 คลื่นความถี่ เป็นเงินประมูลรวมทั้งสิ้น 100,521 ล้านบาท จากปัญหาต่างๆข้างต้นจึงผลักดันให้ผู้ให้บริการระบบโทรศัพท์มือถือเร่งพัฒนาการนำย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต มาใช้งานโดยใช้เทคโนโลยี LTE ในย่านความถี่ 5 GHz การวิเคราะห์การปรับปรุงประสิทธิภาพของการรับข้อมูล (Downlink) ช่วงความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต พิจารณาจาก Throughput ของผู้ใช้ (UE) โดยผู้ให้บริการระบบโทรศัพท์มือถือ รองรับการใช้งานปริมาณข้อมูลสูงด้วยเทคโนโลยี LTE-Advanced ที่มีการเพิ่มประสิทธิภาพและแบนด์วิธด้วยเทคโนโลยี MIMO และ Carrier Aggregation ซึ่งหัวใจหลักที่จะเพิ่มขนาดของระบบเครือข่าย คือ การเพิ่มย่านความถี่ที่นำมาใช้งานได้ จากเหตุผลดังกล่าว ผู้ให้บริการระบบโทรศัพท์มือถือจึงนำย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาตซึ่งมีความถี่สูงมาพัฒนาเป็นเทคโนโลยี Licensed-Assisted Access (LAA) ใน 3GPP Release 13 และ 5G MulteFire ใน Non 3GPP Release 15 [1]



ภาพที่ 1.1 วิวัฒนาการของมาตรฐานในย่าน unlicensed band พัฒนาโดย 3GPP

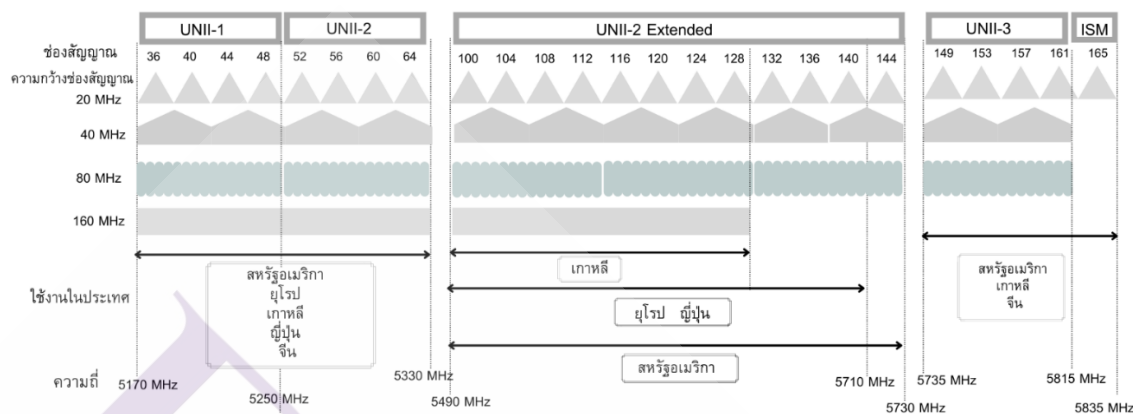
ที่มา: KQI Performance Evaluation of 3GPP LBT Priorities for Indoor Unlicensed Coexistence Scenarios Oct.2020, pp.2, doi:10.3390/electronics9101701

อย่างไรก็ตามย่านความถี่นี้มีการใช้งานใน Wi-Fi และระบบเรดาร์อยู่แล้ว ดังนั้น ประเด็นการใช้งานร่วมกัน (Coexistence) ยังต้องคำนึงถึงเพื่อให้ LAA และ MulteFire มีการใช้งานร่วมกันอย่างเท่าเทียม (Fairly Coexistence) กับอุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่

การแสวงหาย่านความถี่ใหม่ๆ ที่มีความถี่สูงให้ระบบสื่อสาร 5G เช่น ความถี่ millimeter-wave ในย่านความถี่ 24 GHz- 30GHz การใช้เทคโนโลยี LTE Licensed-Assisted Access (LAA) ด้วยการผสมคลื่นในย่านความถี่ที่ต้องได้รับใบอนุญาตอย่างน้อย 1 คลื่นกับคลื่นในย่านความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต หรือการใช้เทคโนโลยี MulteFire เป็นสิ่งที่ต้องทำเพื่อให้เกิดระบบสื่อสาร 5G ต่อไป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เมื่อมีการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ดังนั้นผู้วิจัยต้องการสังเกตพฤติกรรมและประสิทธิภาพของ MulteFire ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร วิเคราะห์ค่า throughput ของผู้ใช้งานตอนรับข้อมูลขาลง (Downlink) และวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพการใช้งานในย่าน UNII I [2] การทำงานร่วมกันของ MulteFire และ Wi-Fi ในย่าน UNII I ที่มีผลต่อการเพิ่มความจุของระบบ ด้วยการใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3 สร้างระบบเครือข่ายจำลอง 3 รูปแบบ การจำลองระบบเครือข่ายนี้เลือกใช้ความถี่ 5.180 GHz และ 5.24 GHz

ย่าน UNII I กำหนดให้มีการรับส่งข้อมูลแบบหนึ่งผู้ให้บริการต่อหนึ่งผู้รับด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณ (UE) ใช้ความกว้างช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) เป็น 20 MHz



ภาพที่ 1.2 Worldwide 5GHz ที่อนุญาตให้ใช้งานในย่าน unlicensed spectrum

ที่มา: Unified access in licensed and unlicensed bands in LTE-A Pro and 5G, June 2017, pp.2, doi:10.1017/ATSIP.2017.7

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับ โดยรวมทั้งระบบ เมื่อมีการใช้งานร่วมกันในพื้นที่เดียวกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

2. เพื่อวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในย่าน UNII I ในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มความจุของระบบ ด้วยการใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3 ทั้งในกรณีการใช้งานร่วมกันในช่องสัญญาณเดียวกัน โดยใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย และการใช้ช่องสัญญาณต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi บนระบบเครือข่ายจำลอง ซึ่งงานวิจัยมีขอบเขต ดังนี้

1. การสร้างระบบเครือข่ายจำลอง สร้างระบบเครือข่ายจำลองด้วยโปรแกรม ns-3 เพื่อจำลองระบบเครือข่าย 3 รูปแบบในย่าน UNII I คือ

- รูปแบบที่ 1 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน กำหนดให้ผู้ให้บริการ Operator A เป็น Wi-Fi ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz กำลังส่งเป็น 20 dBm และความกว้างของช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) เป็น 20 MHz และผู้ให้บริการ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz กำลังส่งเป็น 43 dBm และความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz โดยให้ใช้ช่องสัญญาณ (Channel) 36 ทั้งสองผู้ให้บริการ

- รูปแบบที่ 2 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน แต่ใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย กำหนดให้ผู้ให้บริการ Operator A เป็น Wi-Fi ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz กำลังส่งเป็น 20 dBm และความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz และผู้ให้บริการ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz กำลังส่งเป็น 43 dBm และความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz โดยให้ใช้ช่องสัญญาณ 36 ทั้งสองผู้ให้บริการ แต่ใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย

- รูปแบบที่ 3 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน โดยใช้เทคนิค DFS ย้ายช่องสัญญาณ กำหนดให้ผู้ให้บริการ Operator A เป็น Wi-Fi ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz กำลังส่งเป็น 20 dBm ความกว้างของช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) เป็น 20 MHz และใช้ช่องสัญญาณ (Channel) 36 ส่วนผู้ให้บริการ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.24 GHz กำลังส่งเป็น 43 dBm ความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz และใช้ช่องสัญญาณ 48

2. กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญในการจำลองระบบเครือข่าย เมื่อ Wi-Fi และ MulteFire ใช้งานร่วมกันในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ได้แก่ ค่ากำลังส่ง ย่านความถี่ ความกว้างของช่องสัญญาณ ขนาดและชนิดการส่งข้อมูลระยะเวลาการจำลองระบบค่า Priority Class ค่า Energy Detection Threshold และระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับอุปกรณ์ของผู้รับ

3. วิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในย่าน UNII I ที่มีผลต่อการเพิ่มความจุของระบบ โดยวัดประสิทธิภาพ throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบจากรูปแบบที่กำหนด 3 รูปแบบข้างต้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

1. สืบค้นข้อมูลและข้อกำหนดของระบบในการสร้างระบบเครือข่ายจำลองด้วยโปรแกรม ns-3
2. กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญในการจำลองระบบเครือข่ายในย่าน UNII I ในรูปแบบต่าง ๆ
3. ออกแบบระบบ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพ throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เมื่อมีการใช้งานร่วมกันในพื้นที่เดียวกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารในรูปแบบต่างๆตามที่กำหนด
4. จำลองระบบ และวิเคราะห์ผลการจำลอง
5. สรุปผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เรียนรู้พฤติกรรมและประสิทธิภาพของการใช้งานระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร
2. สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพ throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เมื่อมีการใช้งานร่วมกันในพื้นที่เดียวกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร
3. เสนอรูปแบบการใช้งานที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายในย่าน UNII I จากรูปแบบต่าง ๆ ตามที่กำหนดในแง่ของการเพิ่มความจุ (Capacity) และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

1.6 แผนการดำเนินงาน

ในการดำเนินการวิจัยมีแผนการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)						
	ต.ค. 63	พ.ย. 63	ธ.ค. 63	ม.ค. 64	ก.พ. 64	มี.ค. 64	เม.ย. 64
1. ศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูล							
2. ออกแบบภาพรวมของระบบ สร้างระบบเครือข่ายจำลอง							
แบบภายในอาคาร ในย่าน UNII I ด้วยโปรแกรม ns-3							
3. กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญและเขียนโปรแกรมจำลองระบบ							
4. จำลองระบบเครือข่าย Wi-Fi กับ MultiFire แบบภายในอาคาร							
ทดลองการรับ-ส่งข้อมูล วัดค่า Throughput ที่ UE							
5. ปรับปรุงโปรแกรมและสร้างระบบเครือข่ายใน 3 รูปแบบ คือ							
- รูปแบบที่ 1 Wi-Fi กับ MultiFire ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน							
- รูปแบบที่ 2 Wi-Fi กับ MultiFire ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน							
และใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย							
- รูปแบบที่ 3 Wi-Fi กับ MultiFire เมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน							
วัด throughput ของข้อมูลขาหลัง (Downlink) ของผู้รับรวมทั้งระบบ							
6. จำลองระบบตามรูปแบบที่กำหนดไว้และบันทึกผลการจำลองระบบ							
7. วิเคราะห์ข้อมูลและประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ							
8. ปรับปรุงโปรแกรมกรณีเพิ่มการใช้ระยะเวลาของ LBT ที่แตกต่างกัน							
และระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับอุปกรณ์ของผู้รับในตำแหน่งต่างๆ							
9. สรุปการดำเนินงานและจัดทำรูปเล่มรายงาน							

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่อง การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต สำหรับสภาพแวดล้อมภายในอาคาร จำเป็นที่จะต้องศึกษาข้อมูลจากหลากหลายเทคโนโลยี เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพการใช้งานในบทนี้ จะกล่าวถึงประเด็นที่สำคัญในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบดังต่อไปนี้

2.1 MulteFire

2.2 LBT

2.3 เทคโนโลยี Wi-Fi

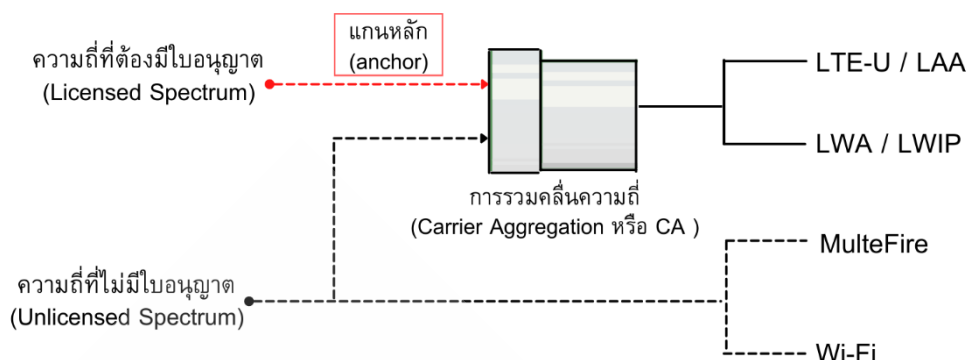
2.4 DFS

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 MulteFire

MulteFire [3] เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาจากเทคโนโลยี LTE ใช้งานในย่าน unlicensed band ที่ทำงานได้ลำพัง (standalone) ในย่านความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตและในย่านความถี่ที่ใช้งานร่วมกันได้ (Shared Spectrum) รวมถึงความถี่ย่าน 5 GHz อ้างอิงบน 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Release 13 และ 14 โดยเทคโนโลยี MulteFire รองรับเทคนิค LBT เพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างเท่าเทียมกัน (fair co-existence) กับ Wi-Fi หรือเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่ใช้งานอยู่ในย่านสเปกตรัมเดียวกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ใน private LTE และ Neutral host [4]

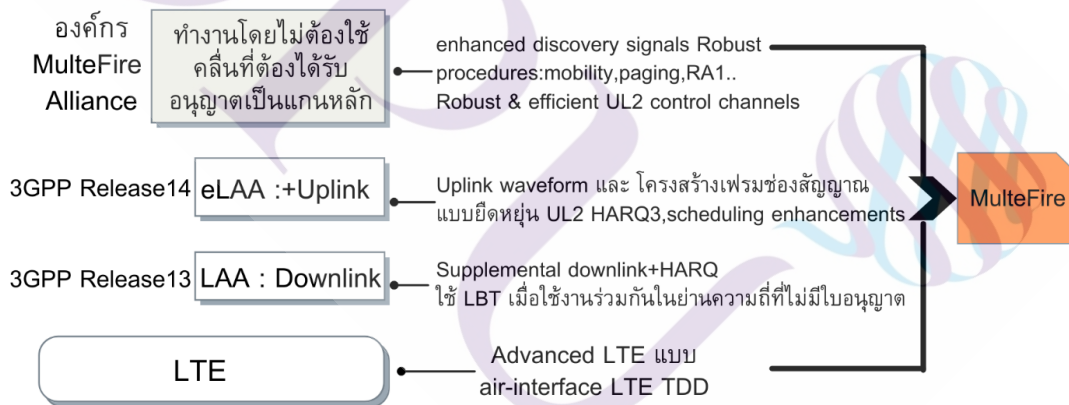
เทคโนโลยี MulteFire ไม่จำเป็นต้องใช้ความถี่ที่ต้องมีใบอนุญาต (Licensed band) [4] เป็นแกนหลัก ดังแสดงในภาพที่ 2.1 – 2.2 มีการจัดทำมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ โดย MulteFire Alliance ซึ่งเป็นองค์กรที่เปิดกว้างให้บริษัทต่างๆและผู้สนใจเทคโนโลยี LTE และ Cellular ในย่าน unlicensed และ ย่าน shared spectrum เข้าร่วมเป็นสมาชิก



ภาพที่ 2.1 เทคโนโลยีในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต คือ Wi-Fi และ MulteFire

ที่มา: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/multefire-technology.pdf>, pp.4

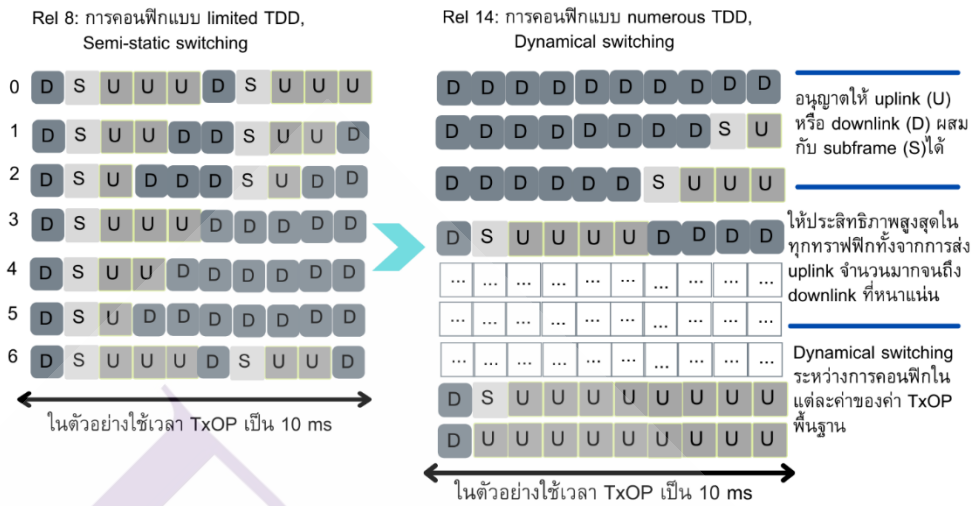
เทคโนโลยี MulteFire อ้างอิงกับ 3GPP LAA และ eLAA



ภาพที่ 2.2 เทคโนโลยี MulteFire อ้างอิงบนมาตรฐาน 3GPP Release 13 และ 14 ไม่จำเป็นต้องใช้ความถี่ที่มีใบอนุญาต (Licensed band)[4]

ที่มา: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/multefire-technology.pdf>, pp.13

โครงสร้างการส่งข้อมูลแบบยืดหยุ่นรองรับการส่งข้อมูล Uplink / Downlink ของ MulteFire

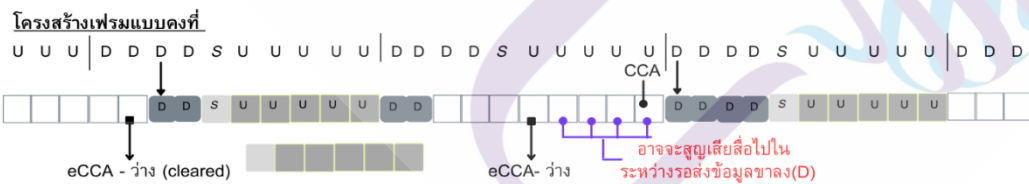


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างการส่งข้อมูลแบบยืดหยุ่นสำหรับการส่งข้อมูล Uplink / Downlink ของ MulteFire [5]

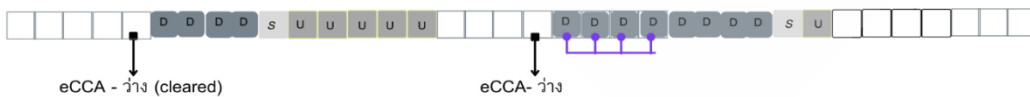
ที่มา: https://www.mfa-tech.org/wp-content/uploads/2016/10/MulteFire_Radio-Link.pdf, pp.6

โครงสร้างเฟรมของข้อมูล (Frame structures) แบบยืดหยุ่นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของ LBT

โครงสร้างเฟรมแบบคงที่ (Fixed structure) เป็นการรอ การรับข้อมูลของครั้งต่อไป (downlink sub-frame (D)) ด้วยค่าคงที่



โครงสร้างเฟรมแบบยืดหยุ่น (Flexible Frame structure) โครงสร้างเฟรมแบบนี้ sub-frame ของใดๆ สามารถรับข้อมูลขาลง(downlink)ได้ โดยไม่ต้องรอให้ถึงช่วงเวลา (ต่างจากโครงสร้างเฟรมแบบคงที่)

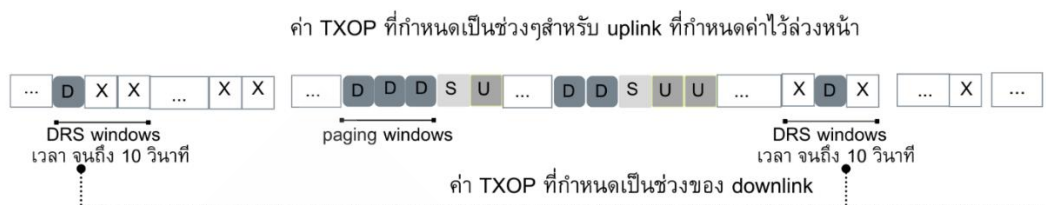


โดย LBT ใช้ enhanced Clear Channel Assessment (eCCA) : D = ข้อมูลขาลง(Downlink: DL), U=ข้อมูลขาขึ้น(Uplink:UL), S= Special sub-frame (ผสมกันทั้ง DL,UL และ guard period)

ภาพที่ 2.4 โครงสร้างการส่งข้อมูล (Frame structures) แบบยืดหยุ่นที่มีประสิทธิภาพของ LBT

ที่มา: https://www.mfa-tech.org/wp-content/uploads/2016/10/MulteFire_Radio-Link.pdf, pp.7

ระยะเวลาของค่า TXOP ที่กำหนดเป็นช่วงๆเพื่อช่วยในการจัดการ LBT



ภาพที่ 2.5 ช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูล (Periodic TX opportunities) ของ LBT

ที่มา: https://www.mfa-tech.org/wp-content/uploads/2016/10/MulteFire_Radio-Link.pdf, pp.12

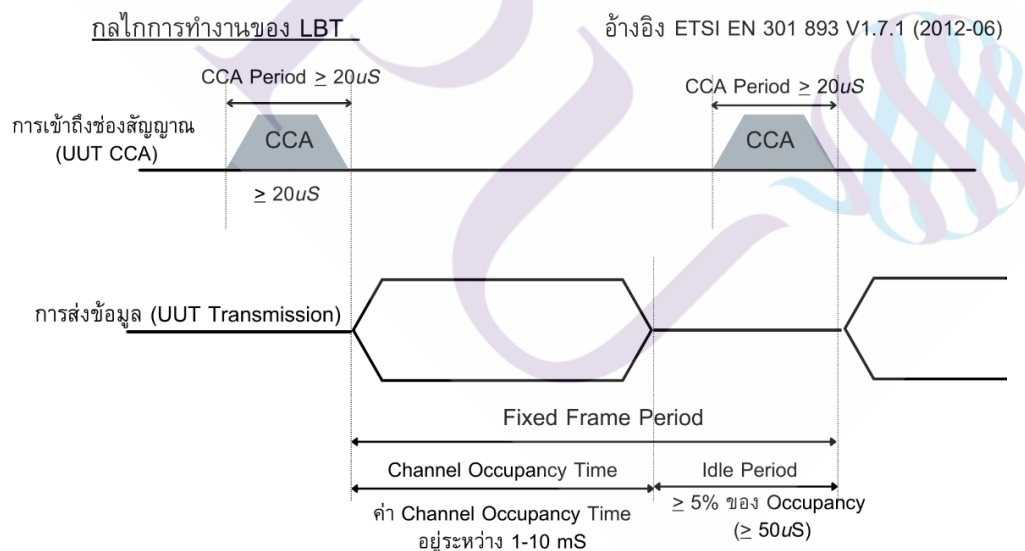
จากภาพที่ 2.3-2.5 แสดงโครงสร้างการส่งข้อมูล (Frame structures) สำหรับการส่งข้อมูลทั้งแบบ Uplink และ Downlink ของ MulteFire [5] โดยเปรียบเทียบวิธีการส่งแบบ Semi-static switching ใน Release 8 กับการส่งแบบไดนามิก (Dynamical switching) ใน Release 14 โดยการกำหนดค่าที่ใช้ในการทดสอบ ค่า Transmit opportunity (TxOP) เป็น 10 ms ในปริมาณกราฟฟิกของข้อมูลที่ค้ำคั่งต่างกันซึ่งการใช้โครงสร้างการส่งข้อมูล (Frame structures) แบบยืดหยุ่นทำให้ได้ประสิทธิภาพของ LBT ที่ดีกว่า

MulteFire มีข้อดีด้านประสิทธิภาพเหมือน LTE ในด้านความจุ รองรับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ สร้างประสบการณ์ใช้งานที่ดีให้ผู้ใช้ มีระบบรักษาความปลอดภัย (security) VoLTE เป็นต้น และมีข้อดีด้านความง่ายในการนำมาใช้งานเหมือน Wi-Fi ติดตั้งระบบได้ง่าย ใช้ความถี่ที่ไม่ต้องได้รับอนุญาต (unlicensed band) เหมาะกับผู้ให้บริการกลาง (Neutral host) ใช้ใน small cell ได้ เป็นต้น ดังนั้น MulteFire จึงเป็นการขยายโอกาสสำหรับผู้ให้บริการกลางที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตสามารถใช้ unlicensed spectrum วางระบบแบบเซลล์ขนาดเล็ก (small cell) ในพื้นที่ที่มีการใช้งานหนาแน่นหรือพื้นที่ภายในอาคารโดยผู้ให้บริการกลาง เช่น เจ้าของธุรกิจ หรือเจ้าของอาคารสถานที่ ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต หรือบริษัทเคเบิล รวมถึงผู้ประกอบการเครือข่ายโทรศัพท์มือถือที่สามารถใช้รูปแบบการวางระบบต่างๆ ทั้ง node แบบ single access พื้นที่ครอบคลุมแบบเป็นเกาะ (coverage island) หรือคลัสเตอร์ขนาดใหญ่ เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน นอกจากนี้ MulteFire สามารถอินเตอร์เฟซเข้ากับระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือเพื่อให้บริการด้าน data offload ให้กับผู้ประกอบการโทรศัพท์มือถือ (แบบต้องใช้ SIM) โดยมีความยืดหยุ่นในการทำ authentication ที่รองรับทั้งการ authentication แบบใช้ SIM สำหรับ authenticate กับเครือข่าย

โทรศัพท์มือถือที่เป็นคู่ค้าพันธมิตรและแบบไม่ใช่ SIM ในลักษณะของ neutral host รวมถึงสามารถให้บริการแบบ enterprise service นับเป็นการสร้างโอกาสใหม่ในการใช้ LTE ที่มีประสิทธิภาพสูงในย่านความถี่ unlicensed spectrum อย่างแท้จริง

2.2 LBT

Listen before talk (LBT) [1] คือ เทคนิคการตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณก่อนทำการรับส่งข้อมูล เป็นกลไกที่ผู้ส่งข้อมูลใช้เพื่อตรวจสอบสถานะการว่าง (idle) ของช่องสัญญาณ (channel) ก่อนใช้งาน มี 2 กระบวนการพื้นฐาน คือ กระบวนการที่ 1 ขั้นตอนการส่งสัญญาณ clear channel assessment (CCA) ด้วยการวัดค่า energy detection (ED) threshold เพื่อให้รู้สถานะของช่องสัญญาณ หากพบว่า ว่าง ก็จะอนุญาตให้ส่งข้อมูลได้สูงสุดเป็นระยะเวลาหนึ่ง ตามค่า Maximum Channel Occupancy Time (MCOT) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และกระบวนการที่ 2 ขั้นตอนการรอสัญญาณ หากมีสัญญาณตอบกลับมาว่าช่องสัญญาณไม่ว่าง (busy) ผู้ส่งจะรอสัญญาณด้วยระยะเวลาหนึ่งตามค่า backoff period of time ซึ่งขึ้นอยู่กับ Contention Window (CW) กลไกของ LBT [6] ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 Listen Before Talk mechanism [6]

ที่มา: Performance evaluation of LTE in unlicensed bands for indoor deployment of ultra broadband mobile network, 2017, pp.2, DOI: 10.23919/AEIT.2017.8240562

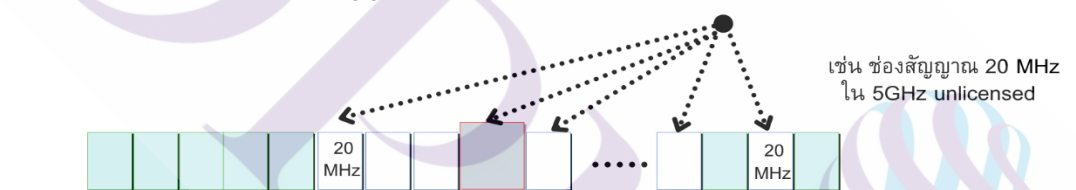
ตารางที่ 2.1 Channel Access Priority Class สำหรับ LAA (3GPP LBT CAT4 Priority classes)

Channel Access Priority Class (P)	m_p	CW_{min}	CW_{max}	T_{mcot}	allowed CW sizes
1	1	3	7	2 ms	{3,7}
2	1	7	15	3 ms	{7,15}
3	3	15	63	8 or 10 ms	{15,31,63}
4	7	15	1023	8 or 10 ms	{15,31,63,127,255,511,1023}

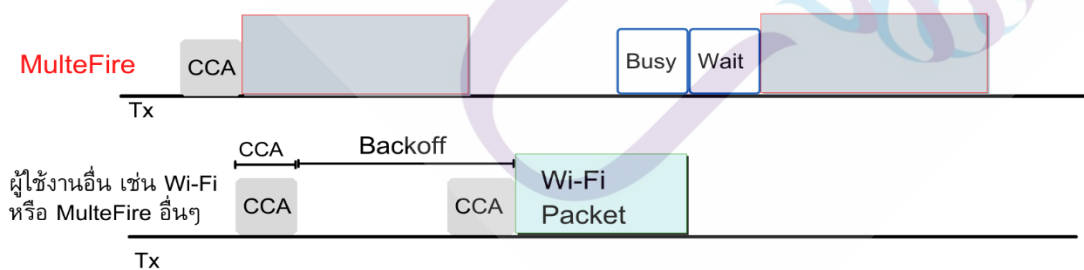
ที่มา: Performance evaluation of LTE in unlicensed bands for indoor deployment of ultra broadband mobile network, 2017, pp.3, DOI: 10.23919/AEIT.2017.8240562

การใช้งานร่วมกันอย่างเท่าเทียมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในย่าน share spectrum
MulteFire ใช้ LBT เพื่อให้ใช้งานได้อย่างเท่าเทียมกัน

ตัวเลือกแรก: MulteFire เลือกช่องสัญญาณแบบไดนามิกเพื่อหลีกเลี่ยง Wi-Fi หรือ LTE-U/LAA หรือ MulteFire อื่นๆ



ตัวเลือกที่ 2: ถ้าช่องสัญญาณไม่ว่าง จะใช้งานได้อย่างเท่าเทียมด้วยการใช้ LBT



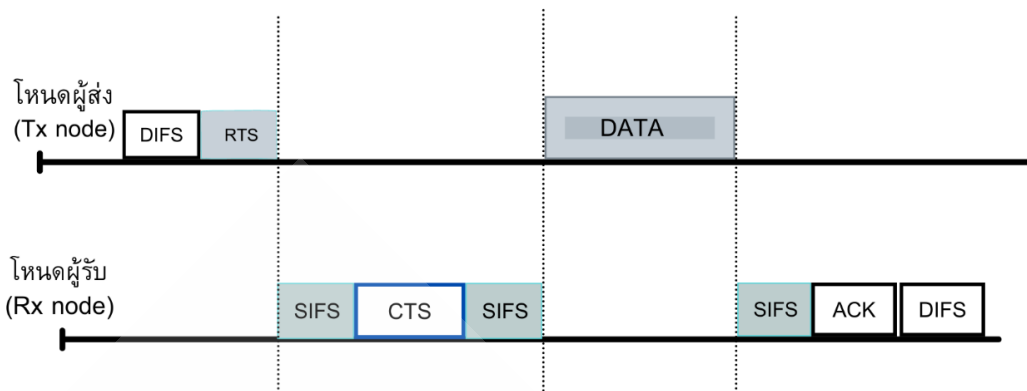
ภาพที่ 2.7 MulteFire ใช้ LBT ในย่าน share spectrum[4]

ที่มา: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/multefire-technology.pdf>, pp.15

จากภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี MulteFire ถูกออกแบบมาเพื่อให้การใช้งานในพื้นที่เดียวกันร่วมกับเทคโนโลยีอื่น ๆ เช่น Wi-Fi หรือ MulteFire ของผู้ให้บริการรายอื่น เป็นต้น ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาตให้สามารถใช้งานได้อย่างเท่าเทียมกันโดยใช้กลไกการเลือกใช้งานช่องสัญญาณที่ว่างด้วยเทคนิค LBT เพื่อหลีกเลี่ยงผู้ใช้งานอื่น เช่น Wi-Fi

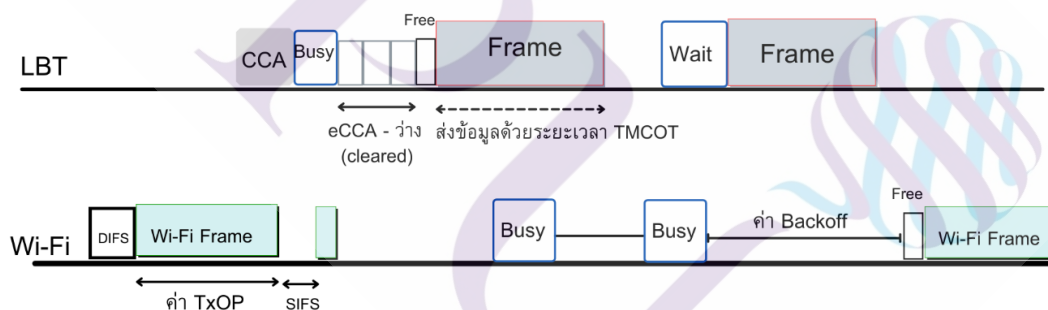
2.3 เทคโนโลยี Wi-Fi

เทคโนโลยี Wi-Fi [1] ตามมาตรฐาน 802.11 เข้าถึงการใช้งานของช่องสัญญาณ (primary channel access) ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต โดยใช้โปรโตคอล Distributed Coordination Function (DCF) ซึ่งใช้การตรวจจับสัญญาณเพื่อเพิ่มค่า throughput ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในขณะที่มีการป้องกันการชนกันของแพ็คเก็ต โดย DCF ทำงานอิงบนโปรโตคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) โดยเมื่อโหนด Wi-Fi มีข้อมูลที่จะส่ง จำเป็นต้องส่งสัญญาณไปยังช่องสัญญาณที่ต้องการจะส่งข้อมูลก่อนเป็นลำดับแรก เพื่อตรวจสอบสถานะการว่างของช่องสัญญาณด้วยช่วงเวลา DCF Inter-frame Space (DIFS) หากช่องสัญญาณว่าง มันจะส่ง Request-To-Send (RTS) ไปยังโหนดปลายทาง จากนั้นโหนดปลายทางจะส่ง Clear-To-Send (CTS) หากพร้อมที่จะรับข้อมูลแล้ว โหนด Wi-Fi จะส่งข้อมูลไปปลายทางเมื่อได้รับข้อความ CTS จากนั้นปลายทางจะส่ง Acknowledgment (ACK) กลับไปที่โหนดผู้ส่งสำหรับยืนยันการรับข้อมูลที่สำเร็จหลังจากช่วงเวลา Short Inter-frame Space (SIFS) ในทางกลับกัน ถ้าช่องสัญญาณไม่ว่าง โหนดจะคอยติดตามตรวจสอบจนกว่าสถานะจะว่าง ด้วยเวลา DIFS จากนั้นจะเลือกเวลา backoff time แบบสุ่มและนับถอยหลัง (โดยเฉพาะจำนวนครั้งแบบสุ่มของสล็อตเวลาที่อยู่ใน CW ที่มีขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามที่กำหนดค่าไว้ตามตาราง) เมื่อเวลา backoff มีค่าเข้าใกล้ 0 โหนด Wi-Fi จะสร้างการส่งสัญญาณให้ได้ระยะเวลาสูงสุดด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ TxOP ซึ่งกระบวนการนี้ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งแสดงโปรโตคอลของ Wi-Fi MAC ทั้งนี้ โหนด Wi-Fi อาจจะไม่สามารถเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้หากมีการใช้งานอย่างคับคั่งและอย่างเห็นแก่ตัว (selfishly) โดยเทคโนโลยีอื่นที่ใช้งานอยู่ในช่องสัญญาณเดียวกัน



ภาพที่ 2.8 ผังแสดงการรับส่งข้อมูลของ Wi-Fi

ที่มา: Novel LAA Waiting and Transmission Time Configuration Methods for Improved LTE LAA/Wi-Fi Coexistence Over Unlicensed Band September 17, 2020, pp.4, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3021511



ภาพที่ 2.9 เปรียบเทียบกลไกของ Wi-Fi กับ LBT ในย่าน unlicensed band [1]

ที่มา: KQI Performance Evaluation of 3GPP LBT Priorities for Indoor Unlicensed Coexistence Scenarios Oct.2020, pp.4, doi:10.3390/electronics9101701

จากภาพที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการรับส่งข้อมูลของ Wi-Fi กับ LBT ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต [1] ซึ่งจะเห็นได้ว่ากลไกของ LBT จะใช้การส่งสัญญาณ clear channel assessment (CCA) เพื่อตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณ หากไม่ว่าง (busy) ก็จะรอด้วยช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงส่งเฟรมข้อมูลตามค่าเวลา Maximum Channel Occupancy Time (MCOT) ในขณะที่ Wi-Fi จะเริ่มกระบวนการส่งข้อมูลโดยการตรวจสอบสถานะการว่างของช่องสัญญาณด้วยช่วงเวลา DCF Inter-frame Space (DIFS) แล้วจึงส่งเฟรมข้อมูลของ Wi-Fi เป็นระยะเวลา TxOP ซึ่งช่วงเวลาที่ Wi-Fi ใช้ส่งข้อมูลนี้คือ สถานะไม่ว่าง ของ LBT และในทางกลับกัน หาก LBT ส่งเฟรมข้อมูลอยู่ Wi-Fi ก็จะพบสถานะ ไม่ว่าง และรอการส่งข้อมูลด้วยช่วงระยะเวลา backoff จนกว่าช่องสัญญาณจะว่างเพื่อส่งข้อมูลอีกครั้ง

2.4 DFS

DFS [7] เป็นกลไกที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อหลีกเลี่ยงการก่อให้เกิดการรบกวนอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารชนิดไม่เคลื่อนที่ (non-IMT (International Mobile Telecommunications)) เช่น ระบบเรดาร์ โดยปกติอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายจะค้นหาและเลือกช่องสัญญาณที่มีความคับคั่งน้อยที่สุดแล้วเซตค่าช่องสัญญาณ ความถี่นั้นให้กับอุปกรณ์ของตัวเอง ตัวอย่างเช่น ในบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา กำหนดให้ต้องขออนุญาตใช้ช่องสัญญาณก่อนการนำอุปกรณ์ไปใช้งานเพื่อไม่ให้เป็นช่องสัญญาณเดียวกันกับระบบเรดาร์ โดยหากสัญญาณเรดาร์ตรวจพบ เช่น ค่า received power มีค่าสูงกว่าค่า threshold ที่กำหนดไว้ ก็จะย้ายช่องสัญญาณที่กำลังใช้งานอยู่ออกไป อุปกรณ์จะไม่ใช้ช่องสัญญาณนั้นช่วงเวลาหนึ่ง (non occupancy period) เป็นเวลา 30 นาที ในภูมิภาคยุโรป European Telecommunication Standard Institute (ETSI) เป็นผู้ออกกฎและข้อกำหนดไม่อนุญาตให้ผู้ใช้งานทั่วไปใช้ช่องสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz (802.11a/b) ซึ่งจะบล็อกล็อก (blocked) กลุ่มของช่องสัญญาณดังกล่าวไว้ใน ETSI images เพื่อไม่ให้อุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายเข้ามาใช้งานได้ เมื่ออุปกรณ์ไร้สายเปิดใช้งาน (boots) จาก ETSI images ก็จะเลือกช่องสัญญาณที่มีความคับคั่งน้อยที่สุดโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะช่องสัญญาณนี้จะไม่ถูกตรวจพบโดยระบบเรดาร์ เป็นต้น วิธีการดังกล่าว คือ Dynamic Frequency Selection นอกจากนี้ยังใช้ค่า Transmission Power Control (TPC) เพื่อใช้ในการปรับระดับค่ากำลังส่งโดยอัตโนมัติ ในย่านคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกัน (Interfering) กับระบบเรดาร์

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 Performance evaluation of LTE in unlicensed bands for indoor deployment of ultra .broadband mobile networks

งานวิจัย [6] ศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ LTE LAA แบบภายในอาคารโดยวิเคราะห์จากการรับข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้ใช้งาน โดยมีความเท่าเทียมกัน (fair coexistence) กับ Wi-Fi ศึกษาการเพิ่มขนาดของระบบเครือข่ายด้วยเทคโนโลยี LTE ในย่าน unlicensed band 5 GHz Licensed-Assisted Access (LAA) ใน 3GPP Release 13 ซึ่งเป็นการผสมคลื่นในย่านความถี่ที่ได้รับใบอนุญาตอย่างน้อย 1 ความถี่ เป็น Primary cell กับ คลื่นในย่านความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาต เป็น Secondary cell โดยใช้เทคนิค LBT เป็นกลไกในการทำให้เท่าเทียมกัน จำลองระบบด้วยโปรแกรม ns-3 โดยใช้ย่านความถี่ LTE Band 1 (2100 MHz) และ Band 7 (2600 MHz) ในย่าน Licensed band ในส่วนของ LTE LAA ใช้ Band 1 กับ 5 GHz เปรียบเทียบในกรณีเพิ่มแบนด์วิธเป็น 40 MHz โดยใช้ Licensed spectrum ซึ่งทำได้ยากเพราะมีราคาสูงและมีอยู่จำกัด กับ กรณีใช้ MIMO 4x4 ทั้งในย่าน Licensed และ unlicensed spectrum พบว่า throughput ของผู้ใช้งานตอนรับข้อมูลขาลง มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญในการจำลองคือ ค่า energy detection ของ LBT ที่มีค่าระหว่าง -62 dBm, -72 dBm และ -82 dBm ในที่นี้ งานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า -72 dBm ทำการปรับแก้โค้ดของ ns-3 มีการใช้สายอากาศร่วมกันหลายตัว จำลองเป็น MIMO 2X2 ได้ค่าอัตราส่วน Transport Block Size [TBS] เป็น 2 เท่า และเมื่อใช้ MIMO 4X4 ได้ค่าอัตราส่วน TBS เป็น 4 เท่า ผลของงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าสามารถปรับเพิ่มขนาดแบนด์วิธเป็น 60 MHz ได้โดยใช้ unlicensed spectrum ดังนั้น LTE LAA เป็นการนำย่านความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาต (unlicensed spectrum) มาเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการเพิ่มขนาดของระบบเครือข่าย โดยใช้ LBT เป็นกลไกในการจัดการช่องสัญญาณเพื่อให้ทำงานได้อย่างเท่าเทียมกันกับ Wi-Fi

2.5.2 Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3

งานวิจัย [8] จำลองการใช้งานร่วมกันในพื้นที่เดียวกันของ LTE กับ Wi-Fi แบบภายในอาคาร (indoor) ในย่าน Unlicensed spectrum ด้วยโปรแกรม ns-3 ตามมาตรฐาน 3GPP RAN1 TR 36.889 โดยใช้ ns-3 model ใหม่สำหรับ Release 13 LTE ซึ่งใช้ LBT เป็นเทคนิคในการจัดการเพื่อให้ทำงานร่วมกันได้อย่างเท่าเทียมกัน (fair coexistence) กับ Wi-Fi ในระดับ Link layer และ Physical layer เมื่อใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน โดยผู้วิจัยทำการปรับแต่ง (Tune) Scenario รูปแบบต่างๆ ปรับค่าพารามิเตอร์ แสดงผลประสิทธิภาพของระบบจำลอง ผู้วิจัยสนใจขยายขอบเขตการจำลองระบบด้วยการเพิ่มการรับส่งไฟล์แบบ TCP ชนิด FTP Model 1 เพื่อสังเกตพฤติกรรมที่

แตกต่างกันของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ LBT ในการใช้งานร่วมกัน (Coexistence) โดยผู้วิจัยใช้ Wi-Fi model เป็น 802.11n 2x2 MIMO 20 MHz ทดลองปรับแต่ง (Tune) ค่า (Energy Detection : ED) ED Threshold และใช้ LAA Model ตาม 3GPP RAN1 ทดลองปรับแต่ง (Tune) ค่า ED Threshold นอกจากนี้ ผู้วิจัยทดลองใช้ FTP Model 1 Over UDP และ FTP Model 1 Over TCP จำลองระบบด้วยค่าแรมด้าที่แตกต่างกันในช่วงระหว่าง 0.5 และ 2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบในการใช้งานร่วมกัน พบว่า FTP Model 1 Over UDP ส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อ LAA และ Wi-Fi ในขณะที่เมื่อใช้ FTP Model 1 Over TCP ส่งผลให้ค่า (Round Trip Time: RTT) ใน LAA เป็น 15 msec หรือนานกว่านั้น ซึ่งทำให้ค่า Throughput ลดต่ำลงเหลือ 20 Mbps

2.5.3 Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants

งานวิจัย [7] การใช้ LTE ในย่าน Unlicensed spectrum เป็นการช่วยลดปริมาณทราฟฟิกของผู้ให้บริการ โครงข่ายโทรศัพท์มือถือ งานวิจัยนี้ ศึกษา 3 Variant ของ LTE ในย่าน Unlicensed spectrum คือ LTE-U, LAA และ MulteFire โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบแต่ละ Variant ในช่วงความถี่ 5 GHz ที่ใช้งานปัจจุบันอยู่ในแต่ละภูมิภาคทั่วโลก เปรียบเทียบในด้านคุณสมบัติการทำงาน ความสามารถในการทำงานร่วมกันได้อย่างเท่าเทียมกันกับอุปกรณ์อื่น (Coexistence) เป็นต้น โดย Variant ที่ 1 LTE-U เป็น LTE ในย่าน Unlicensed spectrum ที่พัฒนาโดย LTE-U Forum ตามมาตรฐาน 3 GPP Releases 10/11/12 ใช้งานในหลายประเทศ แต่หากใช้งานในอเมริกาและจีนจะไม่ใช้เทคนิค LBT ส่วน Variant ที่ 2 LAA พัฒนาตามมาตรฐาน 3GPP Releases 13 มีการใช้เทคนิค LBT ในโซนยุโรปและญี่ปุ่น โดยทั้ง LTE-U และ LAA ใช้ความถี่ที่ต้องมีใบอนุญาต Licensed spectrum เป็น Primary carrier ในการรวมคลื่นความถี่ (Carrier Aggregation) และเพิ่ม Unlicensed spectrum เป็น Secondary carrier ส่วน Variant ที่ 3 MulteFire เป็น LTE ในย่าน Unlicensed spectrum ที่ทำงานได้ทั้งใน small cells โดย MulteFire จะใช้เฉพาะความถี่ในย่าน Unlicensed spectrum จึงเป็นการเปิดโอกาสให้ผู้ให้บริการโฮสต์กลาง (Neutral Hosts) เข้ามาใช้งาน LTE ได้ในอนาคต

2.5.4 Novel LAA Waiting and Transmission Time Configuration Methods for Improved LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence Over Unlicensed Bands

งานวิจัย [9] ซึ่งให้เห็นว่า LTE-LAA เป็นกุญแจสำคัญที่ใช้รับมือกับปริมาณการรับส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นและการขาดแคลนความถี่ที่มีใบอนุญาต 3GPP ได้กำหนดมาตรฐานของ LAA สำหรับการใช้งานบนย่านความถี่ 5GHz ที่ไม่มีใบอนุญาตซึ่งส่วนใหญ่มีการใช้งานอยู่แล้วในย่านความถี่นี้โดย Wi-Fi ปัญหาที่ท้าทายคือการใช้งานร่วมกันอย่างเท่าเทียมกัน (fair coexistence) ของ 2

เทคโนโลยีนี้ งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการต่าง ๆ เพื่อใช้ในการปรับ/เลือก ระยะเวลาการรอส่งสัญญาณของ LAA ตามสถิติพฤติกรรมการใช้งานของ Wi-Fi ที่มีอยู่เดิมในระบบเครือข่าย เนื้อหาสำคัญของงานวิจัยนี้คือ การนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมการใช้งานของ Wi-Fi ที่มีอยู่มาใช้เพื่อปรับแต่ง (Tune) ขอบเขต (boundaries) ของ Contention Window (CW) ของ LAA และเพื่อใช้เลือกระยะเวลาการรอส่งสัญญาณแบบคงที่ (fixed) ของ LAA นอกจากนี้ยังมีการเสนอวิธีการแบบไดนามิก เพื่อปรับระยะเวลาของการส่งข้อมูล Transmission Opportunity (TxOP) ของ LAA ตามค่าการตอบกลับค่าขอซ้ำอัตโนมัติแบบไฮบริด (Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) feedbacks) วิธีการนี้ได้รับการประเมินโดยใช้โปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย ns-3 ตามคำจำกัดความการเท่าเทียมกันของ 3GPP งานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าการเลือกระยะเวลาการรอแบบคงที่ของ LAA ตามกิจกรรม Wi-Fi ที่ใช้งานอยู่นั้นเป็นมิตรกับ Wi-Fi ที่มีอยู่และให้บริการที่ดีกว่าโดยได้ค่าผลรวม throughputs รวมทั้งหมดของทั้ง 2 ระบบเครือข่ายเมื่อใช้งานร่วมกันดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การเลือกระยะเวลาการรอด้วยการใช้อัลกอริทึมของ 3GPP Category 4 Listen Before Talk (Cat 4 LBT) ยิ่งไปกว่านั้น วิธีการใช้ระยะเวลาส่งข้อมูล TxOP แบบไดนามิกที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นมิตรกับ Wi-Fi ที่ใช้งานอยู่และให้ค่าผลรวม throughputs รวมทั้งหมดดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ระยะเวลา TxOP แบบคงที่ตามที่กำหนดของ 3GPP Cat 4 LBT

วิธีการปรับระยะเวลาการส่งข้อมูลของ LTE โดยปกติจะมีหน่วยงานกำกับดูแลการใช้งานสเปกตรัม กำหนดค่าของระยะเวลาการส่งข้อมูลสูงสุดสำหรับระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ ที่ใช้งานในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องทำการกำหนดช่วงระยะเวลาของการส่งข้อมูล (TxOP) ไว้ก่อนล่วงหน้าสำหรับ LAA eNB เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลในย่านความถี่นี้ ซึ่งกำหนดให้ช่วงเวลาการส่งข้อมูล LTE-LAA ส่งข้อมูลได้นานเท่าไรหลังจากนั้นการส่งข้อมูลต้องเสร็จสิ้น (แม้ว่ายังมีข้อมูลที่ต้องการส่งอยู่อีก) เพื่ออนุญาตให้ผู้ใช้งานอื่น ๆ เข้าถึงการใช้งานในย่านนี้ได้ อัลกอริทึม Cat 4 LBT ตามมาตรฐานของ 3GPP กำหนดให้คอนฟิกราคาพารามิเตอร์ TxOP เป็นแบบคงที่ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่า channel access priority class ที่เลือกใช้ โดยระยะเวลาของ TxOP เมื่อเลือกแล้วจะคงที่ตลอดในช่วงการใช้งานของ LAA eNB ซึ่งการเลือกค่าการส่งข้อมูล LAA แบบคงที่อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากค่า TxOP แบบคงที่ ไม่ได้เป็นการใช้งานคลื่นความถี่อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อช่องสัญญาณของความถี่ในย่าน unlicensed ประสบกับปัญหาปริมาณทราฟฟิกที่ติดขัดแตกต่างกัน โดยการกำหนดการส่ง TxOP แบบไดนามิกจะมีประสิทธิภาพดีกว่าในการใช้งานคลื่นความถี่ของย่านสเปกตรัมสำหรับการใช้งานระบบเครือข่ายที่อยู่ร่วมกันให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยเฉพาะเมื่อ Wi-Fi มีปริมาณการใช้งานต่ำ ช่องสัญญาณก็จะว่าง ไม่ได้ถูกใช้งานเป็นช่วงระยะเวลานานขึ้นและช่วงเวลาเหล่านี้สามารถช่วยโอกาสสำหรับการส่งข้อมูลของ

LAA ได้เป็นระยะเวลาที่นานมากขึ้นจึงให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น (เช่น ใช้ระยะเวลา TxOP นานขึ้น) ในทางกลับกัน ระยะเวลา TxOP ที่สั้นลงของ LAA จะเหมาะสมมากกว่าเมื่อ Wi-Fi มีปริมาณการใช้งานสูงซึ่งหากใช้ช่วงเวลา TxOP ที่ยาวนานในกรณีเช่นนี้จะทำให้เกิดการชนกันในช่วงสัญญาณและลดประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายที่อยู่ใช้งานอยู่ร่วมกัน เป็นผลให้ช่วงเวลา TxOP แบบคงที่อาจไม่ใช่รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประสิทธิภาพการอยู่ร่วมกันของเครือข่าย LTE-LAA กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอการปรับช่วงเวลา TxOP สำหรับ LAA แบบไดนามิกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเครือข่ายที่อยู่ร่วมกันตามลำดับขั้นตอนเพิ่มเติมในอัลกอริทึมของ 3GPP Cat 4 LBTที่จะแก้ไขเป็นใช้วิธีส่ง TxOP แบบไดนามิกสำหรับ LAA

วิธีการใหม่ที่เสนอนี้จะเลือก TxOP สำหรับ LAA ตามขนาดปัจจุบันของ CW ของ LAA ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่พร้อมใช้ในการใช้งานจริงของ LAA อัลกอริทึม 3GPP Cat 4 LBT ทำการปรับขนาดของ CW สำหรับ LAA ตามการตอบกลับ HARQ ซึ่งแสดงถึงการส่งข้อมูลที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากความคับคั่งหรือการชนกันในช่วงสัญญาณ ดังนั้น ขนาด CW ปัจจุบัน สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าเป็นตัวบ่งชี้ระดับความคับคั่ง (congestion) ในช่วงสัญญาณที่ไม่มีใบอนุญาตที่เป็นปัจจุบันและใช้เพื่อปรับ TxOP ตามนั้น วิธีการที่นำเสนอจะพิจารณา 2 ประเด็น เพื่อใช้ปรับค่าระยะเวลา TxOP สูงสุดของ LAA ดังที่แสดงในตารางที่ 2.2 โดยที่ค่า TxOP อยู่ในช่วงแบบไดนามิกตั้งแต่ 4 ms ถึง 20 ms ซึ่งช่วงของค่า TxOP ที่เลือกนี้เป็นช่วงที่ให้ประโยชน์ตามวิธีการที่เสนอแต่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความจำเป็นตามข้อบังคับเกี่ยวกับสเปกตรัมในแต่ละพื้นที่หรือปรับให้เหมาะสมสำหรับช่วงปริมาณทราฟฟิก จากตารางที่ 2.2 เมื่อขนาด CW ของ LAA เท่ากับ 15 (เช่น ค่าขั้นต่ำที่สุดขนาด CW ของ LAA) พารามิเตอร์ TxOP ถูกตั้งค่าเป็นค่าสูงสุดค่า 20 ms มิฉะนั้นจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ช่วงเวลา TxOP เป็น 4 ms ซึ่งเป็นระยะเวลา TxOP ขั้นต่ำ เหตุผลที่เลือกระยะเวลา TxOP สูงสุด (20 ms) สำหรับค่าที่ต่ำกว่าของขนาด CW คือ ขนาด CW ที่ต่ำกว่านี้เชื่อมโยงกับปริมาณการรับส่งข้อมูลของ Wi-Fi มีปริมาณที่ต่ำกว่า ดังนั้น การส่งข้อมูลของ LAA ที่ยาวนาน จึงเป็นเหตุผลในกรณีนี้ เนื่องจากปริมาณการใช้งาน Wi-Fi ที่ต่ำนี้ หมายถึง เวลาว่างที่มากขึ้นในช่วงสัญญาณซึ่งสามารถใช้ให้เป็นประโยชน์สำหรับการส่งข้อมูลของ LAA ได้โดยการตั้งค่าระยะเวลา TxOP เป็นค่าสูงสุด ดังนั้น จึงเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของ LAA โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของ Wi-Fi ลดลง

ตารางที่ 2.2 ค่าช่วงระยะเวลา TxOP ที่เลือกตามขนาดของ LAA CW สำหรับวิธีการเลือก TxOP แบบไดนามิก

CW Size	TxOP Period
15	20 ms
31	4 ms
63	4 ms

ในทางกลับกันขนาด CW ของ LAA เพิ่มขึ้นเป็น 31 หรือ 63 ในอัลกอริทึม 3GPP Cat 4 LBT เนื่องจากความคับคั่งของช่องสัญญาณหรือการชนกันของการส่งสัญญาณ ดังนั้นระยะเวลา TxOP จึงถูกตั้งค่าให้ป็นค่าต่ำสุด (4 ms)ตามลำดับ เพื่อลดความคับคั่ง/การชนกันนี้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าสำหรับ LAA และไม่ลดประสิทธิภาพของเครือข่ายที่มีอยู่ (เช่น Wi-Fi) กล่าวได้ว่า แนวทางแบบไดนามิกที่เสนอสำหรับช่วงเวลา TxOP ของ LAA นั้นอิงตามสถิติปริมาณทราฟฟิกการรับส่งข้อมูลของเครือข่ายที่ใช้งานอยู่ร่วมกันผ่าน HARQ ที่ได้รับการตอบกลับ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญระหว่างมาตรฐาน 3GPP กับ แนวทางที่เสนอคือการใช้ระยะเวลา TxOP แบบไดนามิกมาแทนที่การใช้แบบคงที่ โดยการปรับค่าระยะเวลา TxOP ของ LAA แบบไดนามิกนี้สามารถทำให้การจัดตำแหน่งที่ดีขึ้นระหว่างเวลาที่ไม่ได้ใช้งานของ Wi-Fi และระยะเวลาส่งข้อมูลของ LTE-LAA ดังนั้น การลดจำนวนครั้งของการชนกันและการทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นสำหรับเครือข่ายที่มีอยู่ร่วมกันเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม 3GPP Cat 4 LBT ซึ่งพิจารณาค่าระยะเวลา TxOP แบบคงที่สำหรับการส่งสัญญาณ LTE-LAA โดยไม่คำนึงถึงความคับคั่ง/การชนกันของช่องสัญญาณที่ไม่มีใบอนุญาต นอกจากนี้ แนวทางที่เสนอมานี้สามารถนำไปปฏิบัติได้อย่างง่ายดายจริงในระบบโดยไม่ต้องเพิ่มการปรับเปลี่ยนใด ๆ ที่สำคัญในผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ที่ใช้งานอยู่เนื่องจากวิธีการนี้เป็นหลักการที่ใช้ตามค่าพารามิเตอร์ CW ของ LAA ซึ่งมีอยู่แล้วในทุกการนำ LAA ไปปฏิบัติจริง

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบบทความงานวิจัย

งานวิจัย	การจำลองระบบ	สภาพแวดล้อมการทดสอบ	การใช้งานร่วมกัน (Fair Coexistence)	ย่านความถี่ที่ใช้ (Carrier Frequency)	System Bandwidth
งานวิจัยที่นำเสนอ	โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3	ภายในอาคาร	Wi-Fi กับ MulteFire (ใช้ LBT)	-Wi-Fi ใช้ 5.18 GHz Channel 36 -MulteFire ใช้ 5.18 GHz Channel 36 และ 5.24 GHz Channel 48	20 MHz
Performance evaluation of LTE in unlicensed bands for indoor deployment of ultra-broadband mobile networks	โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3	ภายในอาคาร	Wi-Fi กับ LTE LAA (ใช้ LBT)	-Wi-Fi ใช้ 5.18 GHz ย่าน Unlicensed -LTE LAA ใช้ Licensed band 1 ที่ 2100 MHz และ band 7 ที่ 2600 MHz	15 MHz 20 MHz 35 MHz 40 MHz
Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3	โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3	ภายในอาคาร	-Wi-Fi กับ Wi-Fi (ใช้ DCF) -Wi-Fi กับ LTE LAA (ใช้ LBT)	-Wi-Fi ใช้ 5 GHz Channel 36 -LTE LAA ตามมาตรฐาน 3GPP RAN1 TR 36.889	20 MHz
Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants	โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3	ภายในอาคาร	-Wi-Fi (ใช้ CSMA/CA) -LAA (ใช้ LBT) LTE-U(ใช้ CSAT)	Wi-Fi / LAA /LTE-U ใช้ความถี่ตามมาตรฐาน 3 GPP	20 MHz
Novel LAA Waiting and Transmission Time Configuration Methods for Improved LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence Over Unlicensed Bands	โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3	ภายในอาคาร	Wi-Fi กับ LTE LAA (ใช้ LBT)	Wi-Fi และ LTE LAA ใช้ 5 GHz ย่าน Unlicensed ตามมาตรฐาน 3 GPP TR 36.889	20 MHz

งานวิจัย	ตำแหน่ง สถานีฐาน	ตำแหน่งผู้รับ (UE)	Traffic Model	ระยะเวลาที่ใช้งานของ เทคนิค LBT
งานวิจัยที่นำเสนอ	ระบุ ตำแหน่ง คงที่	-แบบเคลื่อนที่อิสระ -แบบกำหนดจุด ระยะห่างระหว่าง สถานีฐานกับผู้รับ	FTP Model 1 over UDP	- แบบ Class 4 Tmcot,p = 8 ms -ปรับค่า Tmcot,p เป็น 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms
Performance evaluation of LTE in unlicensed bands for indoor deployment of ultra-broadband mobile networks	ระบุ ตำแหน่ง คงที่	อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่	FTP Model 1	Class 4 Tmcot,p = 8 ms
Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3	ระบุ ตำแหน่ง คงที่	เคลื่อนที่อิสระ	FTP Model 1 over UDP และ over TCP	Class 4 Tmcot,p = 8 ms
Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	Full Buffer	Class 2 Tmcot,p = 3 ms
Novel LAA Waiting and Transmission Time Configuration Methods for Improved LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence Over Unlicensed Bands	ระบุ ตำแหน่ง คงที่	เคลื่อนที่อิสระ	FTP Model 1 over UDP	- แบบ TxOP คงที่ ใช้ Class 4 Tmcot,p = 8 ms - แบบไดนามิก TxOP ปรับค่า Tmcot,p เป็น แบบไดนามิกอยู่ในช่วง ตั้งแต่ 4 ms ถึง 20 ms

จากตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานที่นำเสนอ จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ วิจัยการใช้งานร่วมกันภายในอาคารระหว่าง Wi-Fi กับ LTE LAA ซึ่งเป็นการผสมคลื่นในย่านความถี่ที่ต้องได้รับใบอนุญาตอย่างน้อย 1 คลื่นกับคลื่นในย่านความถี่ที่

ไม่ต้องมีใบอนุญาตใน band ต่างๆตามแต่ละประเทศของผู้วิจัย มีการกำหนดตำแหน่งสถานีฐานอยู่กับที่โดยให้ตำแหน่งอุปกรณ์ของผู้รับ (UE) เคลื่อนที่อิสระและมีค่าระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT เป็น class 2 หรือ class 4 ตามมาตรฐานของ 3GPP ในขณะที่งานวิจัยนี้ นำเสนอการใช้งานร่วมกันภายในอาคารระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาตใน band UNII I มีการกำหนดตำแหน่งสถานีฐานอยู่กับที่เช่นกัน แต่กำหนดให้ตำแหน่งอุปกรณ์ของผู้รับ (UE) เคลื่อนที่ทั้งในรูปแบบอิสระและแบบอยู่กับที่ กำหนดค่าระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT เป็นระยะเวลาต่างกันหลายช่วงเวลาซึ่งครอบคลุมทุก class ตามมาตรฐาน 3GPP วัดและวิเคราะห์ค่า throughput ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต



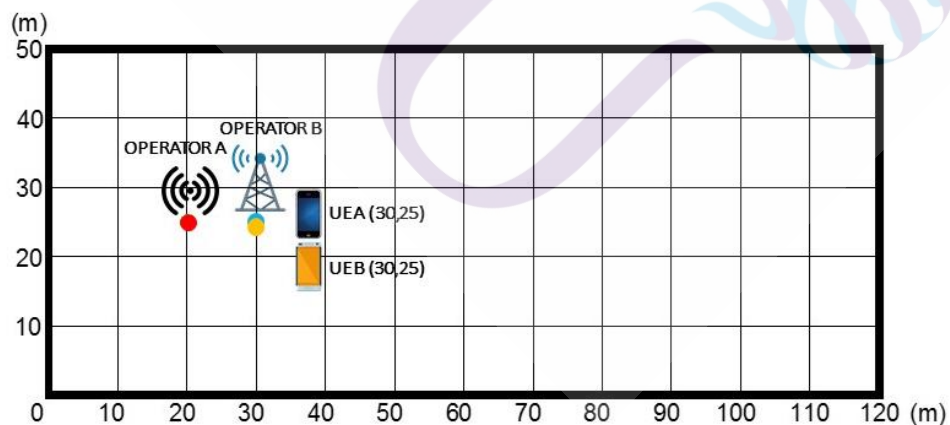
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบภาพรวมการทำงานของแบบจำลองการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต โดยใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3 จำลองระบบ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ การออกแบบการทดสอบการทำงานของแบบจำลอง และการบันทึกผลการการทำงานของแบบจำลอง โดยมีหัวข้อดังต่อไปนี้

3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบเครือข่ายจำลอง

การทำงานของระบบเครือข่ายจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในสภาพแวดล้อมแบบภายในอาคารย่าน UNII-1 ความถี่ 5 GHz ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนของระบบเครือข่ายของผู้ให้บริการ ส่วนอุปกรณ์ของผู้รับ (UE) เชื่อมต่อกับสถานีฐาน และ ส่วนการรับส่งข้อมูลของระบบจำลอง ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพระบบเครือข่ายจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

จากภาพที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงระบบเครือข่ายจำลองที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยเป็นการจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในสถานการณ์แบบภายในอาคาร (Indoor scenario) ย่านความถี่ 5 GHz UNII I ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต (unlicensed band) บนพื้นราบของอาคาร [8] ซึ่งเป็นไปตามที่ระบุของ 3 GPP มีรายละเอียดการจำลองอุปกรณ์และการทำงานในส่วนต่างๆของแบบจำลอง ดังต่อไปนี้

3.1.1 แบบจำลองเครือข่ายของผู้ให้บริการ

ทำการจำลองเครือข่ายผู้ให้บริการเป็น 2 ราย คือ จำลองสถานีฐานของผู้ให้บริการ Operator A กำหนดเป็น Wi-Fi ตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง (20,25) ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz และ จำลองสถานีฐานของผู้ให้บริการ Operator B กำหนดให้เป็น MulteFire ตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง (30,25) ใช้ความถี่ 5.18 GHz เช่นเดียวกันกับ Operator A และกำหนดให้มีการให้บริการร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ภายในอาคารพื้นที่ขนาดกว้าง 50 เมตร และ ยาว 120 เมตร

3.1.2 อุปกรณ์ของผู้รับ (UE)

ทำการจำลอง UE ขึ้นในพื้นที่จำนวน 2 UE คือ UE_A และ UE_B โดยกำหนดให้ UE_A เชื่อมต่อกับผู้ให้บริการ Wi-Fi และ UE_B เชื่อมต่อกับผู้ให้บริการ MulteFire และกำหนดการเคลื่อนที่ของแต่ละ UE เป็น 2 รูปแบบ คือ กำหนดให้มีการใช้งานเคลื่อนที่อิสระด้วยความเร็ว 3 กม.ต่อ ชม. กับ การกำหนดตำแหน่งระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับอุปกรณ์ของผู้รับ UE_A และ UE_B ให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกัน (fair coexistence) ดังนี้

- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) กับ (30,25) ตามลำดับ
- เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_B อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45)
- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันไกลจากสถานีฐานทั้งคู่ ที่ตำแหน่ง (110,25) กับ (110,45)
- เมื่อ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_A อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45)

3.1.3 การรับส่งข้อมูลของระบบเครือข่ายจำลอง

กำหนดการรับส่งข้อมูลเป็นแบบหนึ่งผู้ให้บริการ (Operator) ต่อหนึ่งผู้รับ (UE) เป็นแบบ Single Input Single Output (SISO) รับส่งข้อมูลในโมเดล File Transfer Protocol (FTP) Model 1 over User Datagram Protocol (UDP)

3.2 สมมติฐานของงานวิจัย

3.2.1 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi และ MulteFire ภายในอาคารในช่องสัญญาณเดียวกัน

เมื่อ Wi-Fi และ MulteFire ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน Wi-Fi จะได้รับผลกระทบจาก MulteFire เป็นอย่างมาก ทำให้สามารถลดประสิทธิภาพการทำงานของ Wi-Fi ได้ เนื่องจากเมื่อใช้งานจริง MulteFire จะเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้ดีกว่าและเร็วกว่า ทำให้โหนด Wi-Fi มักจะพบว่าช่องสัญญาณไม่ว่างก่อนที่จะพยายามส่งข้อมูล ทั้งนี้ โหนด Wi-Fi อาจจะไม่สามารถเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้เลย หาก MulteFire มีการใช้งานอย่างคับคั่ง

3.2.2 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi และ MulteFire ภายในอาคารในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการกรณีที่ใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานของ LBT เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่า throughput ของ UE_A ที่ใช้งานเครือข่าย Wi-Fi มีค่าลดลง เนื่องจากจะตรวจพบสถานะ ไม่ว่าง บ่อยขึ้น แต่ในทางกลับกัน จะได้ค่า throughput ของ UE_B ที่ใช้งานเครือข่าย MulteFire มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของ MulteFire ที่สามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้น เนื่องจากช่วยลดจำนวนครั้งของการชนกันของข้อมูล จึงทำให้ผลรวมค่า throughput รวมทั้ง 2 UE มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบแบบจำลอง และออกแบบการทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบสมมติฐานข้างต้น โดยการจำลองระบบ ดังนี้

1) ทดสอบการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi และ MulteFire ภายในอาคาร เมื่อใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน ในย่านความถี่ 5.18 GHz UNII I โดยกำหนดให้ใช้ช่องสัญญาณเป็น Channel 36 จากนั้น วัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire และ Wi-Fi โดยงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่า Wi-Fi จะได้รับผลกระทบจาก MulteFire เมื่อมีการใช้งานร่วมกันโดยไม่มีกลไกใดๆในการจัดการ โดย MulteFire จะครอบครองสัญญาณได้ดีกว่าและเร็วกว่า ทำให้ Wi-Fi มักจะพบว่าช่องสัญญาณไม่ว่างหรืออาจจะทำให้ไม่สามารถเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้เลย

2) ทดสอบการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi และ MulteFire ภายในอาคาร เมื่อใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันโดยกำหนดให้ใช้ช่องสัญญาณ Channel 36 ความถี่ 5.18 GHz ในย่าน UNII I และใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการ โดยทดลองกำหนดค่าระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT เป็นระยะเวลาต่างกันเพื่อวิเคราะห์ผลที่มีต่อค่า throughput ของผู้รับ และทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งอุปกรณ์ของผู้รับ (UE) เพื่อทดสอบประเด็นการใช้งานร่วมกัน (Coexistence) จากนั้นวัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire และ Wi-Fi โดยงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่า

โดยหลักการการทำงานของเทคนิค LBT ซึ่งเป็นกลไกที่ผู้ส่งข้อมูลใช้เพื่อตรวจสอบสถานะการว่าง (idle) ของช่องสัญญาณ (channel) ก่อนใช้งานจึงทำให้เทคนิค LBT เป็นกลไกที่ใช้ในการจัดการ การเข้าใช้งานช่องสัญญาณระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ให้สามารถใช้งานได้อย่างเท่าเทียมกัน (Fairly Coexistence) และการกำหนดให้ค่าระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT เป็นระยะเวลานาน ขึ้น จะส่งผลให้ค่า throughput ของผู้รับที่ UE_A (Wi-Fi) จะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ค่า throughput ของผู้รับที่ UE_B (MulteFire) จะเพิ่มขึ้นมากกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของ MulteFire ที่เมื่อมี ระยะเวลาการส่งข้อมูลที่ยาวนานขึ้น จะทำให้สามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้น ตามโครงสร้างการส่ง ข้อมูล (frame structures ของ UL/DL traffic ส่งผลให้ค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวม ทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น

3) ทดสอบการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi และ MulteFire ภายในอาคาร เมื่อใช้งาน ต่างช่องสัญญาณกัน ในย่าน UNII I โดยกำหนดให้ Wi-Fi ใช้ช่องสัญญาณ Channel 36 ความถี่ 5.18 GHz และ MulteFire ใช้ช่องสัญญาณ Channel 48 ความถี่ 5.24 GHz จากนั้น วัดค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ผลของ ประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire และ Wi-Fi โดยงานวิจัยนี้มีสมมุติฐานว่า การใช้งาน ร่วมกันระหว่าง Wi-Fi และ MulteFire ในช่องสัญญาณที่ต่างกัน โดย Wi-Fi ใช้ช่องสัญญาณ 36 และ MulteFire ใช้ช่องสัญญาณ 48 เพียงลำพัง โดยไม่อุปกรณ์อื่นใดมารบกวน เป็นการใช้นโยบาย DFS ในการย้ายช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นกลไกที่ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการอินเตอร์เฟรกันกับระบบอื่น จะ ส่งผลให้ Wi-Fi กับ MulteFire สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพและให้ค่า throughput ข้อมูลขา ลงของผู้รับโดยรวมทั้งระบบสูงสุด เมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน

3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และรูปแบบข้อมูลของระบบเครือข่ายจำลองในย่าน UNII I

แบบจำลองระบบเครือข่าย ภายในอาคาร สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบการใช้งาน ร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ด้วยการใช้โมดูล LBT Wi-Fi Coexistence ในโปรแกรม จำลองเครือข่าย ns-3 โดยจำลองสถานการณ์ แบ่งเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

- รูปแบบที่ 1 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน
- รูปแบบที่ 2 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน

และใช้เทคนิค LBT

- รูปแบบที่ 3 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานต่าง ช่องสัญญาณกัน

การวัดค่า throughput ของข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานภายในระบบเครือข่ายและประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการ รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มความจุของระบบ โดยแบบจำลองระบบเครือข่ายนี้สามารถกำหนดค่ากำลังส่งของสถานีฐาน ค่าความถี่ที่ใช้งานช่องสัญญาณที่ใช้ตำแหน่งของสถานีฐาน และตำแหน่งของผู้รับ ระยะเวลาการใช้งานของเทคนิค LBT ขนาดและประเภทของข้อมูลที่ใช้ในการส่ง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

Parameter	Wi-Fi	MulteFire
Network layout	Indoor scenario	Indoor scenario
BS Tx Power	20 dBm	43 dBm / 20 dBm
Carrier Frequency	5.18 GHz (channel 36)	5.18 GHz (channel 36) / 5.24 GHz (channel 48)
Channel Bandwidth	20 MHz	20 MHz
Packet Size	1000 Bytes	1000 Bytes
Protocol	UDP	UDP
Simulation time	2 Sec	2 Sec
Priority Class	4	4
Energy Detection Threshold	-72 dBm	-72 dBm

ออกแบบการทดสอบค่ากำลังส่งของสถานีฐานของ Wi-Fi และ MulteFire เป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 20 dBm

กรณีที่ 2 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 43 dBm

แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A และ UE_B

การออกแบบและทดสอบแบบจำลองระบบเครือข่าย การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire สภาพแวดล้อมภายในอาคาร ทั้ง 3 รูปแบบนั้น มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์และ

รูปแบบของข้อมูลเพื่อใช้ในการทดสอบแบบจำลอง เป็นแบบค่าตัวแปรคงที่และค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนตามรูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับทดสอบแบบจำลองระบบเครือข่ายที่มีค่าคงที่ โดยทั้ง 3 รูปแบบ ใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันเพื่อให้สามารถนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งได้แก่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบแบบค่าตัวแปรคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรคงที่ ที่ใช้ในการจำลองทั้ง 3 รูปแบบ

Parameter	Wi-Fi	MulteFire
Network layout	Indoor scenario	Indoor scenario
Channel Bandwidth	20 MHz	20 MHz
Packet Size	1000 Bytes	1000 Bytes
Protocol	UDP	UDP
Simulation time	2 Sec	2 Sec
Priority Class	4	4
Energy Detection Threshold	-72 dBm	-72 dBm

และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบแบบค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนตามรูปแบบ เช่น ค่ากำลังส่งของสถานีฐาน ค่าความถี่ที่ใช้งาน ช่องสัญญาณที่ใช้ ตำแหน่งของสถานีฐานและตำแหน่งของผู้รับ ระยะเวลาการใช้งานของเทคนิค LBT เป็นต้น

2) รูปแบบข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง

ในการทดสอบแบบจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire สภาพแวดล้อมภายในอาคาร ทั้ง 3 รูปแบบนั้น จะใช้รูปแบบระบบเครือข่ายจำลองเป็นแบบ SISO มีค่า Channel Bandwidth 20 MHz กำหนดการรับส่งข้อมูล เป็น FTP Model 1 over UDP มีค่า Energy Detection Threshold เป็น -72 dBm และมีขนาดของข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยงานวิจัยนี้ ใช้โมดูล LBT Wi-Fi Coexistence ในโปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3 มาใช้ในการทดสอบการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ที่แตกต่างกันตามรูปแบบที่กำหนด แล้วทำ

การวัดค่า throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับ (UE) โดยรวมทั้งระบบบันทึกผลการทำงานของแบบจำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลองตามสมมติฐานของงานวิจัย

3.4 การออกแบบการทดสอบแบบจำลอง

3.4.1 การออกแบบแบบจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน

การออกแบบตามรูปแบบที่ 1 กำหนดให้ Operator A เป็น Wi-Fi และ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz และใช้ช่องสัญญาณ 36 ทั้งสองผู้ให้บริการและออกแบบการทดสอบ ค่ากำลังส่งของสถานีฐานของ Wi-Fi และ MulteFire เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 20 dBm

กรณีที่ 2 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 43 dBm

แล้ววัดค่า throughput ของข้อมูลขาลงของผู้รับที่ UE_A และ UE_B โดยรายละเอียดค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนเป็นไปตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปแบบที่ 1

Parameter	Wi-Fi	MulteFire
Channel ใน UNII I	channel 36	channel 36
Frequency	5.18 GHz	5.18 GHz
BS Tx Power กรณีที่ 1	20 dBm	20 dBm
BS Tx Power กรณีที่ 2	20 dBm	43 dBm

3.4.2 การออกแบบแบบจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย

การออกแบบตามรูปแบบที่ 2 กำหนดให้ Operator A เป็น Wi-Fi และ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz ช่องสัญญาณ 36 ทั้งสองผู้ให้บริการและใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย และออกแบบการทดสอบ ค่ากำลังส่งของสถานีฐานของ Wi-Fi และ MulteFire เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 20 dBm

กรณีที่ 2 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 43 dBm ออกแบบการทดสอบโดยกำหนดช่วงระยะเวลาที่ใช้งาน LBT และตำแหน่งของผู้รับ (UE_A, UE_B) ที่ต่างกัน แล้ววัดค่า throughput ของข้อมูลขาของ ผู้รับที่ UE_A และ UE_B โดยรายละเอียดค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนเป็นไปตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปแบบที่ 2

Parameter	Wi-Fi	MulteFire
Channel ใน UNII I	channel 36	channel 36
Frequency	5.18 GHz	5.18 GHz
เทคนิค	Lbt	Lbt
BS Tx Power กรณีที่ 1	20 dBm	20 dBm
BS Tx Power กรณีที่ 2	20 dBm	43 dBm
LbtTxOp	5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms	5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms
ตำแหน่งของผู้รับ UE_A และ UE_B	$UE_{A(30,25)}$	$UE_{B(30,25)}$
	$UE_{A(30,25)}$	$UE_{B(110,25)}$ และ $UE_{B(110,45)}$
	$UE_{A(110,25)} / UE_{A(110,45)}$	$UE_{B(110,25)} / UE_{B(110,45)}$
	$UE_{A(110,25)}$ และ $UE_{A(110,45)}$	$UE_{B(30,25)}$

โดยงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของการใช้งานระหว่าง Wi-Fi และ MulteFire ในกรณีใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการ จึงทดลองปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระยะเวลาการใช้งานเทคนิค LBT ที่มีผลต่อค่า throughput ข้อมูลขา โดยรวมทั้งระบบ

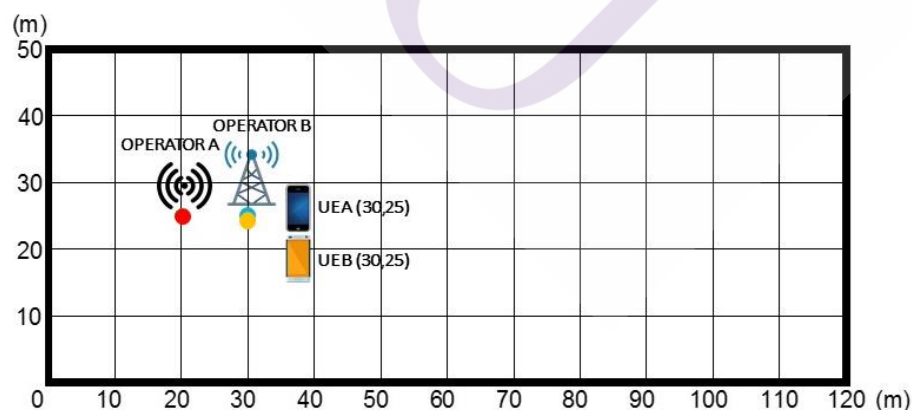
นอกจากนี้ ยังทดลองระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้รับกับสถานีฐานในตำแหน่งต่างๆ เพื่อศึกษาประเด็นการใช้งานร่วมกัน รายละเอียดมีดังนี้

3.4.2.1 ทดลองปรับเปลี่ยนค่าของระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT จำนวน 4 ค่า คือ

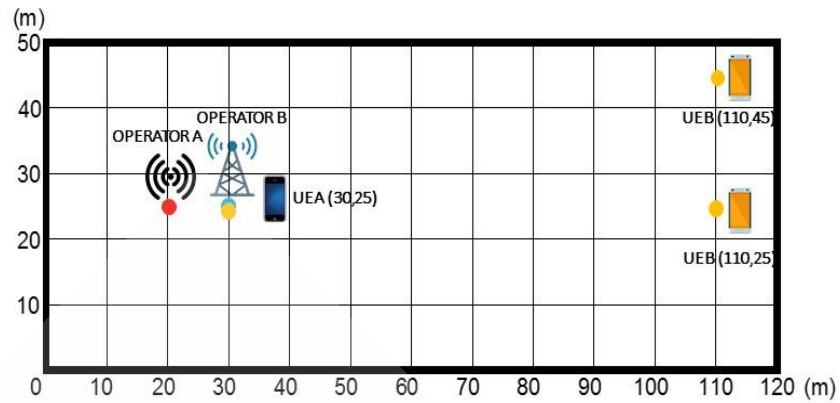
- ทดลองใช้ระยะเวลาเทคนิค LBT เป็นเวลา 5 ms แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- ทดลองใช้ระยะเวลาเทคนิค LBT เป็นเวลา 8 ms แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- ทดลองใช้ระยะเวลาเทคนิค LBT เป็นเวลา 10 ms แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- ทดลองใช้ระยะเวลาเทคนิค LBT เป็นเวลา 20 ms แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B

3.4.2.2 ทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งของผู้รับ ทั้ง UE_A และ UE_B เป็น 4 แบบ คือ

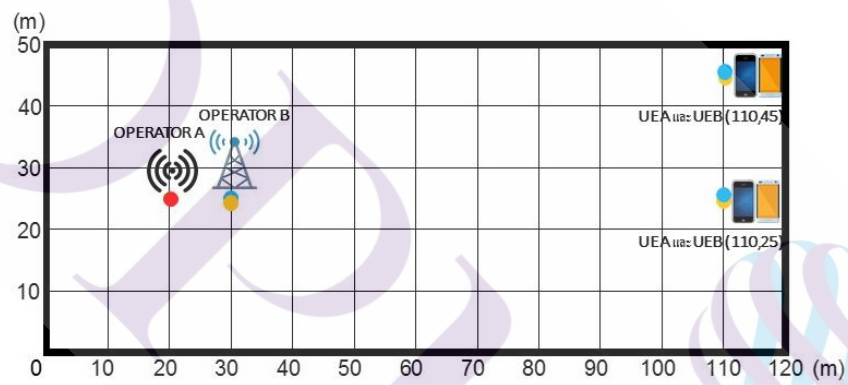
- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) กับ (30,25) ตามลำดับ แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_B อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45) แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันไกลจากสถานีฐานทั้งคู่ ที่ตำแหน่ง (110,25) กับ (110,45) แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- เมื่อ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_A อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45) แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.2-3.5



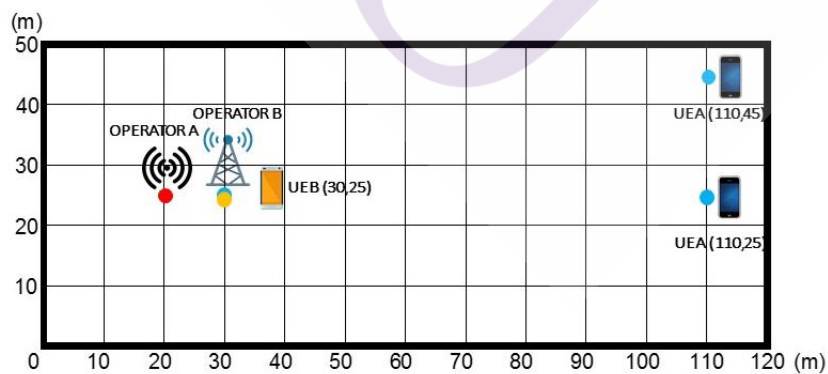
ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงตำแหน่งผู้รับ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐาน



ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงตำแหน่งผู้รับ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานแต่ UE_B อยู่ไกลกว่า



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงตำแหน่งผู้รับ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันและไกลจากสถานีฐาน



ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงตำแหน่งผู้รับ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐาน แต่ UE_A อยู่ไกลกว่า

3.4.3 การออกแบบแบบจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน

การออกแบบตามรูปแบบที่ 3 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน โดยใช้รูปแบบของเทคนิค DFS ในการย้ายช่องสัญญาณ กำหนดให้ Operator A เป็น Wi-Fi ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz ใช้ช่องสัญญาณ 36 ส่วน Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.24 GHz ใช้ช่องสัญญาณ 48 และออกแบบการทดสอบค่ากำลังส่งของสถานีฐานของ Wi-Fi และ MulteFire เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 20 dB

กรณีที่ 2 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 43 dBm

ออกแบบการทดลองปรับเปลี่ยนกำหนดตำแหน่งของผู้รับ (UE_A , UE_B) เพื่อทดสอบประเด็นการใช้งานร่วมกัน โดยรายละเอียดค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์แบบค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนเป็นไปตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองรูปแบบที่ 3

Parameter	Wi-Fi	MulteFire
Channel ใน UNII I	channel 36	channel 48
Frequency	5.18 GHz	5.24 GHz
BS Tx Power กรณีที่ 1	20 dBm	20 dBm
BS Tx Power กรณีที่ 2	20 dBm	43 dBm
ตำแหน่งของผู้รับ UE_A และ UE_B	$UE_{A(30,25)}$	$UE_{B(30,25)}$
	$UE_{A(30,25)}$	$UE_{B(110,25)}$ และ $UE_{B(110,45)}$
	$UE_{A(110,25)} / UE_{A(110,45)}$	$UE_{B(110,25)} / UE_{B(110,45)}$
	$UE_{A(110,25)}$ และ $UE_{A(110,45)}$	$UE_{B(30,25)}$

การทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งของผู้รับ ทั้ง UE_A และ UE_B เป็น 4 แบบ คือ ข

- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) กับ (30,25) ตามลำดับ แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลกลางของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_B อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45) แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลกลางของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกัน ไกลจากสถานีฐานทั้งคู่ ที่ตำแหน่ง (110,25) กับ (110,45) แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลกลางของผู้รับที่ UE_A และ UE_B
- เมื่อ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_A อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45) แล้ววัดค่า throughput ข้อมูลกลางของผู้รับที่ UE_A และ UE_B ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.2-3.5

การออกแบบแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบนี้เป็นการจำลองการใช้งานร่วมกันของ Wi-Fi กับ MulteFire แบบภายในอาคาร ย่านความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาต

การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำมาแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดจากการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire กับ Wi-Fi โดยสามารถใช้เทคนิค LBT และเทคนิค DFS งานวิจัยนี้ นำเสนอการใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการ การเข้าใช้งานช่องสัญญาณ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้บริการและผู้ให้บริการ MulteFire ในการเลือกใช้กลไกที่เหมาะสมเข้ามาจัดการการใช้งานของ 2 เทคโนโลยีเมื่อมีการใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันเพื่อให้เกิดการใช้งานร่วมกันได้อย่างเท่าเทียมกัน

3.5 ขั้นตอนการทำงาน และการบันทึกผลแบบจำลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นการจำลองสถานการณ์การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire แบบภายในอาคาร ย่านความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาตใน band UNII I บนสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันใน 3 รูปแบบ คือ การใช้งานร่วมกันกรณีใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน กับ การใช้งานร่วมกันในช่องสัญญาณเดียวกัน โดยใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย และการใช้งานร่วมกันในช่องสัญญาณต่างกัน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ค่า throughput ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองระบบมาทำการเปรียบเทียบกัน โดยนำมาเปรียบเทียบเป็นร้อยละ เทียบกับรูปแบบที่ 1 สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire กับ Wi-Fi ทั้ง 3 รูปแบบ ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมจำลองเครือข่าย ns-3 ในการจำลองระบบเพื่อทำการทดสอบตามสมมติฐานของงานวิจัยนี้

3.5.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง

การทำงานของแบบจำลองได้ทำการจำลองระบบเครือข่าย การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ภายในอาคาร ใน 3 รูปแบบ แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนของการจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน ส่วนของการจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT ส่วนของการจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณต่างกัน และส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบมาทำการเปรียบเทียบกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1.1 จำลองและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของแบบจำลอง การใช้งานร่วมกันภายในอาคารระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire กรณีใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน ทำการวัดค่าและบันทึกผลการดำเนินงานของแบบจำลอง เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลและใช้ในการเปรียบเทียบ

3.5.1.2 จำลองและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของแบบจำลอง การใช้งานร่วมกันภายในอาคารระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire กรณีใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันโดยใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย ทำการวัดค่าและบันทึกผลการดำเนินงานของแบบจำลอง เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลและใช้ในการเปรียบเทียบ

3.5.1.3 จำลองและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของแบบจำลอง การใช้งานร่วมกันภายในอาคารระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire กรณีใช้งานในช่องสัญญาณต่างกัน ทำการวัดค่าและบันทึกผลการดำเนินงานของแบบจำลอง เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลและใช้ในการเปรียบเทียบ

3.5.1.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกผลการดำเนินงานของแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาตในรูปแบบที่แตกต่างกัน

3.5.2 การบันทึกผลแบบจำลอง

การบันทึกผลการดำเนินงานของแบบจำลองการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire แบบภายในอาคารในรูปแบบที่แตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ โดยเมื่อจำลองระบบเครือข่ายด้วยโปรแกรม ns-3 ได้ทำการปรับแต่งโปรแกรมในโมดูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง กำหนดค่าผลการทดสอบที่ได้ให้แสดงผลเป็นตัวเลข บันทึกค่าผลการดำเนินงานของแบบจำลอง โดยทำการวัดค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับในระบบที่ผู้รับ UE_A และ UE_B ที่ละตำแหน่ง ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ จากนั้น นำค่า throughput ของผู้รับ UE_A และ UE_B มาบวกรวมกันเพื่อใช้เป็นค่า throughput ของข้อมูลขา (Downlink) ของผู้รับ โดยรวมทั้งระบบ แล้วนำมาเปรียบเทียบเป็นร้อยละเทียบกับรูปแบบที่ 1 สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire กับ Wi-Fi

ทั้ง 3 รูปแบบ เพื่อที่จะสรุปผลการจำลองในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในแง่ของ การเพิ่มความจุของระบบ และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ



บทที่ 4

ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

ในบทนี้จะแสดงผลของการจำลองระบบตามที่ได้ออกแบบไว้ ทำการวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย ซึ่งมีหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบตามที่กำหนดไว้

4.2 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

4.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบตามที่กำหนดไว้

เมื่อดำเนินการจำลองการทำงานของระบบตามที่ออกแบบไว้ด้วยการสร้างระบบเครือข่ายจำลองโดยใช้โปรแกรม ns-3 ตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดไว้ในแต่ละรูปแบบ ผลการจำลอง เป็นดังนี้

4.1.1 รูปแบบที่ 1 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน เมื่อกำหนดให้ผู้ให้บริการ Operator A เป็น Wi-Fi ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz และความกว้างของช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) เป็น 20 MHz และ ผู้ให้บริการ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz ความกว้างของช่องสัญญาณ 20 MHz โดยให้ใช้ช่องสัญญาณ 36 ทั้งสองผู้ให้บริการ โดยมีรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ผลจากการจำลองระบบ ปรากฏว่า

กรณีที่ 1 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 20 dBm วัดค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A เป็น 0 Mbps และ ที่ UE_B เป็น 25.3521Mbps

กรณีที่ 2 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 43 dBm ได้ค่า throughput ของข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A เป็น 0 Mbps และ UE_B เป็น 75.1164 Mbps ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ตามรูปแบบที่ 1

รูปแบบที่ 1	กำลังส่ง (dBm)	ค่า throughput ที่ UE (Mbps)		ค่า throughput รวมทั้งระบบ (Mbps)
		UE _A	UE _B	
กรณีที่ 1 Operator A	20	0		
Operator B	20		25.3521	25.3521
กรณีที่ 2 Operator A	20	0		
Operator B	43		75.1164	75.1164

ผลจากการจำลองระบบตามรูปแบบนี้ พบว่า ผลรวม throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ มีค่าเป็น 75.1164 Mbps

4.1.2 รูปแบบที่ 2 การใช้งาน Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วยการออกแบบตามรูปแบบที่ 2 กำหนดให้ผู้ให้บริการ Operator A เป็น Wi-Fi ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz ความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz และผู้ให้บริการ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz ความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz โดยใช้ช่องสัญญาณ 36 ทั้งสองผู้ให้บริการและใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย โดยมีรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ผลจากการจำลองระบบ พบว่า

กรณีที่ 1 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 20 dBm วัดค่า throughput ข้อมูลขาลงของผู้รับที่ UE_A เป็น 50.2184 Mbps และที่ UE_B เป็น 16.2814 Mbps

กรณีที่ 2 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 43 dBm ปรากฏว่า ได้ค่า throughput ของข้อมูลขาลงของผู้รับที่ UE_A เป็น 57.8742 Mbps และ UE_B เป็น 50.8308 Mbps ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ตามรูปแบบที่ 2

รูปแบบที่ 2	กำลังส่ง (dBm)	ค่า throughput ที่ UE (Mbps)		ค่า throughput รวมทั้งระบบ (Mbps)
		UE_A	UE_B	
กรณีที่ 1 Operator A	20	50.2184		66.4998
Operator B	20		16.2814	
กรณีที่ 2 Operator A	20	57.8742		108.705
Operator B	43		50.8308	

ผลจากการจำลองระบบตามรูปแบบนี้ พบว่า ผลรวม throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ มีค่าเป็น 108.705 Mbps

จากนั้น ทำการจำลองระบบที่ออกแบบให้มีช่วงระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT ที่แตกต่างกันและระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับสถานีฐานในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

4.1.2.1 ทดลองปรับเปลี่ยนค่าระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT เป็น 4 ค่า คือ 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms

4.1.2.2 ทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งของผู้รับทั้ง UE_A และ UE_B เป็น 4 แบบ คือ

- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) กับ (30,25) ตามลำดับ

- เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_B อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45)

- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐาน ที่ตำแหน่ง (110,25) กับ (110,45)

- เมื่อ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_A อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45) เมื่อจำลองระบบ พบว่า ผลจากการจำลองระบบโดยการวัดค่า throughput ข้อมูลขาลงของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ปรากฏว่า ได้ค่า throughput แต่ละช่วงระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT ในตำแหน่งจุดรับสัญญาณของ UE แต่ละจุด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่า throughput ของผู้รับ แต่ละตำแหน่งและระยะเวลาการใช้งานของ LBT ตามรูปแบบ

ที่ 2

แบบที่	ตำแหน่งผู้รับ UE _A	ตำแหน่งผู้รับ UE _B	ค่า throughput ที่ UE (Mbps)	ระยะเวลาที่ใช้งานของเทคนิค LBT (LbtTxOp)			
				5 ms	8 ms	10 ms	20 ms
1	UE _A (30,25)	UE _B (30,25)	UE _A	59.0714	57.8742	57.604	53.0458
			UE _B	37.5021	50.8308	54.0231	64.249
2	UE _A (30,25)	UE _B (110,25)	UE _A	63.3167	60.3024	59.7533	55.7843
			UE _B	29.6442	38.4928	47.7019	59.0756
	UE _A (30,25)	UE _B (110,45)	UE _A	63.3167	60.3024	59.7533	55.7843
			UE _B	29.6442	38.4928	47.7019	59.0756
3	UE _A (110,25)	UE _B (110,25)	UE _A	59.0714	57.8742	57.604	53.0458
			UE _B	37.5021	50.8308	54.0231	64.249
	UE _A (110,45)	UE _B (110,45)	UE _A	59.0714	57.8742	57.604	53.0458
			UE _B	37.5021	50.8308	54.0231	64.249
4	UE _A (110,25)	UE _B (30,25)	UE _A	58.8978	58.2223	57.8371	53.0458
			UE _B	43.0522	53.2324	57.5156	64.877
	UE _A (110,45)	UE _B (30,25)	UE _A	58.8978	58.2223	57.8371	53.0458
			UE _B	43.0522	53.2324	57.5156	64.877

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลาการใช้งานของ LBT เพิ่มขึ้นจาก 5 ms เป็น 8ms, 10 ms และ 20 ms ในแต่ละตำแหน่งของผู้รับ ทำให้ค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B เป็นดังนี้

- ตำแหน่งแบบที่ 1 UE_A กับ UE_B อยู่จุด(30,25) ระยะเวลาใช้งาน LBT 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms ให้ค่า throughput ที่ UE_A เป็น 59.0714, 57.8742, 57.604, 53.0458 และ ที่ UE_B เป็น 37.5021, 50.8308, 54.0231, 64.249 ตามลำดับ

- ตำแหน่งแบบที่ 2 UE_A (30,25) กับ UE_B (110,25) ระยะเวลาใช้งาน LBT 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms ค่า throughput ที่ UE_A เป็น 63.316, 60.3024, 59.7533, 55.7843 และ ที่ UE_B เป็น 29.6442, 38.4928, 47.7019, 59.0756 ตามลำดับ

- ตำแหน่งแบบที่ 3 UE_A กับ UE_B อยู่จุด(110,25) ระยะเวลาใช้งาน LBT 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms ให้ค่า throughput ที่ UE_A เป็น 59.0714, 57.8742, 57.604, 53.0458 และ ที่ UE_B เป็น 37.5021, 50.8308, 54.0231, 64.249 ตามลำดับ

- ตำแหน่งแบบที่ 4 UE_A (110,25) กับ UE_B (30,25) ระยะเวลาใช้งาน LBT 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms ค่า throughput ที่ UE_A เป็น 58.8978, 58.2223, 57.8371, 53.0458 และที่ UE_B เป็น 43.0522, 53.2324, 57.5156, 64.877 ตามลำดับจะเห็นได้ว่า ผลรวมค่า throughput ข้อมูลขาของ ผู้รับ โดยรวมทั้งระบบใน

- ตำแหน่งแบบที่ 1 UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่(30,25) กับ ตำแหน่งแบบที่ 3 UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ (110,25) มีค่าเท่ากัน คือ 117.2984 Mbps

- ตำแหน่งแบบที่ 2 UE_A (30,25) กับ UE_B (110,25) มีค่าเป็น 114.8599 Mbps ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด

- ตำแหน่งแบบที่ 4 UE_A (110,25) กับ UE_B (30,25) มีค่าเป็น 117.9228 Mbps ซึ่งมีค่ามากที่สุด

4.1.3 รูปแบบที่ 3 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน การออกแบบตามรูปแบบที่ 3 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน โดยใช้รูปแบบของเทคนิค DFS ในการย้ายช่องสัญญาณ กำหนดให้ผู้ให้บริการ Operator A เป็น Wi-Fi ใช้ย่านความถี่ 5.18 GHz ความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz และใช้ช่องสัญญาณ 36 ส่วนผู้ให้บริการ Operator B เป็น MulteFire ใช้ย่านความถี่ 5.24 GHz ความกว้างของช่องสัญญาณ เป็น 20 MHz และใช้ช่องสัญญาณ 48 โดยมีรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ผลจากการจำลองระบบ พบว่า

กรณีที่ 1 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 20 dBm วัดค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A เป็น 130.928 Mbps และ ที่ UE_B เป็น 22.1878 Mbps

กรณีที่ 2 กำหนดให้กำลังส่งของ Operator A Wi-Fi เป็น 20 dBm และ Operator B MulteFire เป็น 43 dBm ปรากฏว่า ได้ค่า throughput ของข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A เป็น 130.928 Mbps และ UE_B เป็น 75.1164 Mbps ดังแสดงผลในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ตามรูปแบบที่ 3

รูปแบบที่ 3	กำลังส่ง (dBm)	ค่า throughput ที่ UE (Mbps)		ค่า throughput รวมทั้งระบบ (Mbps)
		UE_A	UE_B	
กรณีที่ 1 Operator A Operator B	20	130.928		153.1158
	20		22.1878	
กรณีที่ 2 Operator A Operator B	20	130.928		206.0444
	43		75.1164	

ผลจากการจำลองระบบตาม รูปแบบที่ 3 นี้ พบว่า ผลรวม throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับ โดยรวมทั้งระบบมีค่าเป็น 206.0444 Mbps

จากนั้น เมื่อจำลองระบบโดยทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งของผู้รับ ทั้ง UE_A และ UE_B เป็น 4 แบบ คือ

- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) กับ (30,25) ตามลำดับ

- เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_B อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45)

- เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่ไกลสถานีฐาน ที่ตำแหน่ง (110,25) กับ (110,45)

- เมื่อ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_A อยู่ไกลกว่า ที่ตำแหน่ง (110,25) และ (110,45)

ผลการจำลองระบบ เมื่อวัดค่า throughput ข้อมูลขาลงของผู้รับ ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า throughput ของผู้รับ ในแต่ละตำแหน่งตามรูปแบบที่ 3

แบบที่	ตำแหน่งของผู้รับ	ตำแหน่งของผู้รับ	ค่า throughput ที่ UE (Mbps)	
	UE _A	UE _B	UE _A	UE _B
1	UE _A (30,25)	UE _B (30,25)	130.928	75.1164
2	UE _A (30,25)	UE _B (110,25)	130.928	75.1164
	UE _A (30,25)	UE _B (110,45)	130.928	75.1164
3	UE _A (110,25)	UE _B (110,25)	130.928	75.1164
	UE _A (110,45)	UE _B (110,45)	130.928	75.1164
4	UE _A (110,25)	UE _B (30,25)	130.928	75.1164
	UE _A (110,45)	UE _B (30,25)	130.928	75.1164

ผลจากการจำลองระบบตามรูปแบบที่ 3 พบว่า ค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับ ที่ UE_A และ UE_B มีค่าเท่ากัน ในทุกตำแหน่ง คือ ได้ค่า throughput ที่ UE_A เป็น 130.928 Mbps และ ที่ UE_B เป็น 75.1164 Mbps ตามลำดับ

4.2 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

เมื่อทำการจำลองการทำงานของระบบตามทีออกแบบไว้โดยการสร้างระบบเครือข่าย จำลองด้วยโปรแกรม ns-3 ที่มีค่าพารามิเตอร์ตามที่กำหนดเพื่อจำลองระบบเครือข่าย 3 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่ 1 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานในช่องสัญญาณ เดียวกันคือช่องสัญญาณ 36

รูปแบบที่ 2 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานในช่องสัญญาณ เดียวกันและใช้เทคนิค LBT

รูปแบบที่ 3 การใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire เมื่อใช้งานต่าง ช่องสัญญาณกัน เมื่อทำการจำลองระบบแล้ววัดค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับในระบบที่ UE_A และ UE_B ทำให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพ throughput ของข้อมูลขา (Downlink) ของผู้รับ โดยรวมทั้งระบบ ได้ดังนี้

4.2.1 กำลังส่ง (BS TxPower)

ค่ากำลังส่ง ในกรณีที่ 1 เมื่อ Operator A (Wi-Fi) และ Operator B (MultaFire) มีค่ากำลังส่งเป็น 20 dBm และกรณีที่ 2 เมื่อ Operator A (Wi-Fi) มีค่ากำลังส่ง 20 dBm และ Operator B (MultaFire) ค่ากำลังส่งเป็น 43 dBm พบว่า

- รูปแบบที่ 1 ได้ผลรวม throughput ข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวมทั้งระบบในกรณีที่ 1 และที่ 2 มีค่าเป็น 25.3521 Mbps และ 75.1164 Mbps ตามลำดับ ซึ่งสูงขึ้นคิดเป็น 296.2926% เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1

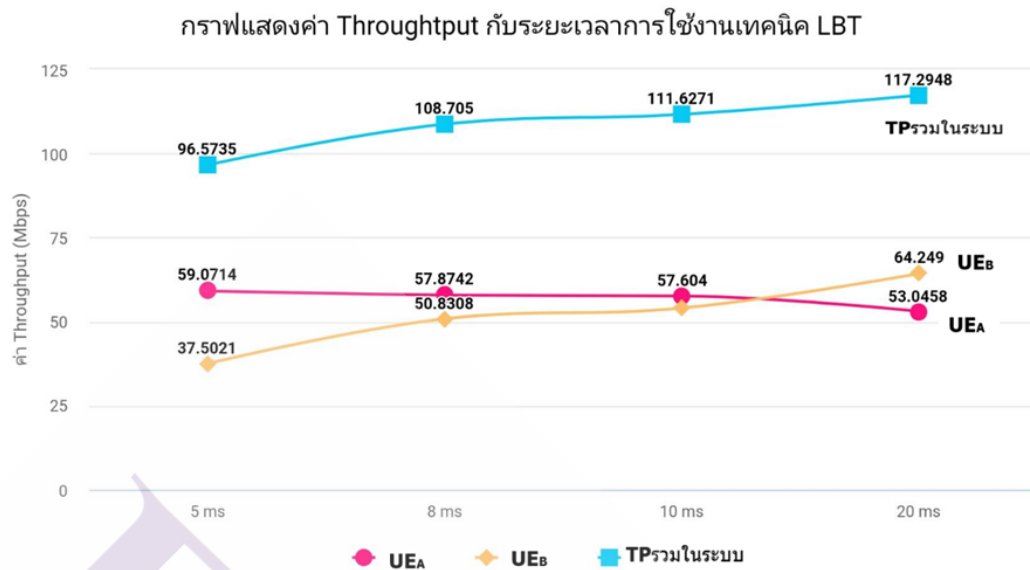
- รูปแบบที่ 2 ได้ผลรวม throughput ข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวมทั้งระบบในกรณีที่ 1 และที่ 2 มีค่าเป็น 66.4998 Mbps และ 108.705 Mbps ตามลำดับ ซึ่งสูงขึ้นคิดเป็น 163.4667% เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1

- รูปแบบที่ 3 ได้ผลรวม throughput ข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวมทั้งระบบในกรณีที่ 1 และที่ 2 มีค่าเป็น 153.1158 Mbps และ 206.0444 Mbps ตามลำดับ ซึ่งสูงขึ้นคิดเป็น 134.5677% เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำลังส่งของ Operator B (MultaFire) เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ ค่า throughput ของข้อมูลขา (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น กำลังส่งของ MultaFire จึงมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบโดยเป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบในแง่ของการเพิ่มความจุของระบบเพิ่มขึ้น

4.2.2 ระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT

ในรูปแบบที่ 2 เมื่อ Wi-Fi กับ MultaFire ใช้งานร่วมกันในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย และจากผลของกำลังส่งตามข้อ 4.2.1 จึงวิเคราะห์ผลเมื่อให้ Operator A (Wi-Fi) มีค่ากำลังส่ง 20 dBm และ Operator B (MultaFire) มีค่ากำลังส่ง 43 dBm ผลการจำลองระบบโดยเปลี่ยนค่าของระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT เป็น 4 ค่า คือ 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms แล้ววัดค่า throughput ของข้อมูลขา (Downlink) ของผู้รับที่ UE_A และ UE_B แต่ละช่วงระยะเวลาพบว่า

- ที่ตำแหน่งแบบที่ 1 UE_A และ UE_B อยู่ที่ (30,25) และ แบบที่ 3 UE_A และ UE_B อยู่ที่ (110,25) ได้ค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับที่ UE_A และ UE_B เมื่อระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT เป็น 4 ค่า คือ 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms ดังแสดงในกราฟตามภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับ เมื่อผู้รับ UE_A และ UE_B อยู่จุดเดียวกันแบบใกล้และไกลสถานีฐาน ตามตำแหน่งแบบที่ 1 และ แบบที่ 3

จากกราฟ ค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A และ UE_B เมื่อระยะเวลาการใช้งานของเทคนิค LBT ที่

เวลา 5 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 59.0714 Mbps และ 37.5021 Mbps ตามลำดับ

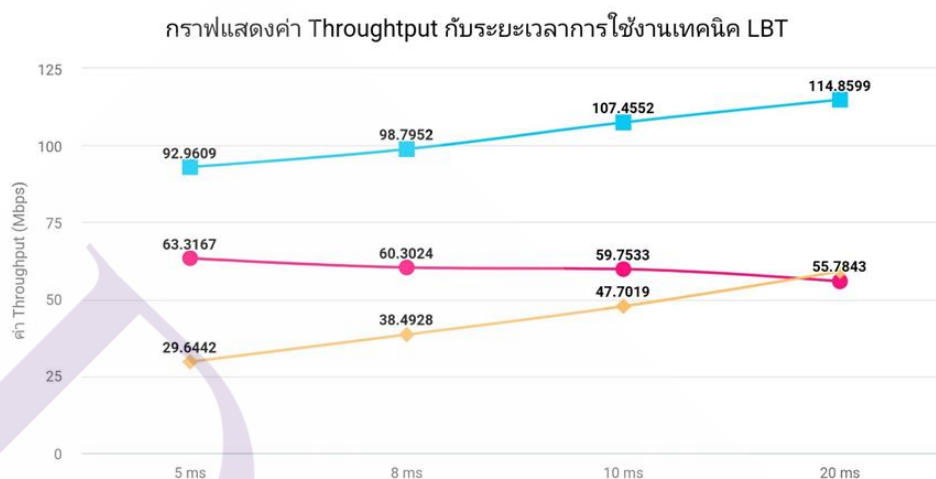
เวลา 8 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 57.8742 Mbps และ 50.8308 Mbps ตามลำดับ

เวลา 10 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 57.604 Mbps และ 54.0231 Mbps ตามลำดับ

เวลา 20 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 53.0458 Mbps และ 64.249 Mbps ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลาใช้งานของเทคนิค LBT เพิ่มขึ้นจาก 5 ms เป็น 8 ms, 10 ms และ 20 ms ทำให้กราฟเส้นสีแดงที่แสดงค่า throughput ที่ UE_A ลดลงจาก 59.0714 Mbps ลดลงไป 1.1972, 1.4674 และ 6.0256 Mbps ตามลำดับ ในขณะที่กราฟเส้นสีเหลืองที่แสดงค่า throughput ที่ UE_B มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 37.5021 Mbps เพิ่มขึ้นไป 13.3287, 16.521 และ 26.7469 Mbps ตามลำดับ จึงส่งผลให้ค่า throughput ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้นเป็น 96.5735 Mbps, 108.705 Mbps, 111.6271 Mbps และ 117.2948 Mbps ดังที่แสดงในกราฟเส้นสีฟ้า

- ที่ตำแหน่งแบบที่ 2 UE_A (30,25) กับ UE_B (110,25) ได้ค่า throughput ข้อมูลขาของ ผู้รับที่ UE_A และ UE_B เมื่อระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT เป็น 4 ค่า คือ 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms ดังแสดงในกราฟตามภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ค่า throughput ข้อมูลขา (Downlink) ของผู้รับ เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐาน แต่ UE_B อยู่ไกลกว่า ตามตำแหน่งแบบที่ 2

จากกราฟ ค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A และ UE_B เมื่อระยะเวลาการใช้งานของเทคนิค LBT ที่

เวลา 5 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 63.3167 Mbps และ 29.6442 Mbps ตามลำดับ

เวลา 8 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 60.3024 Mbps และ 38.4928 Mbps ตามลำดับ

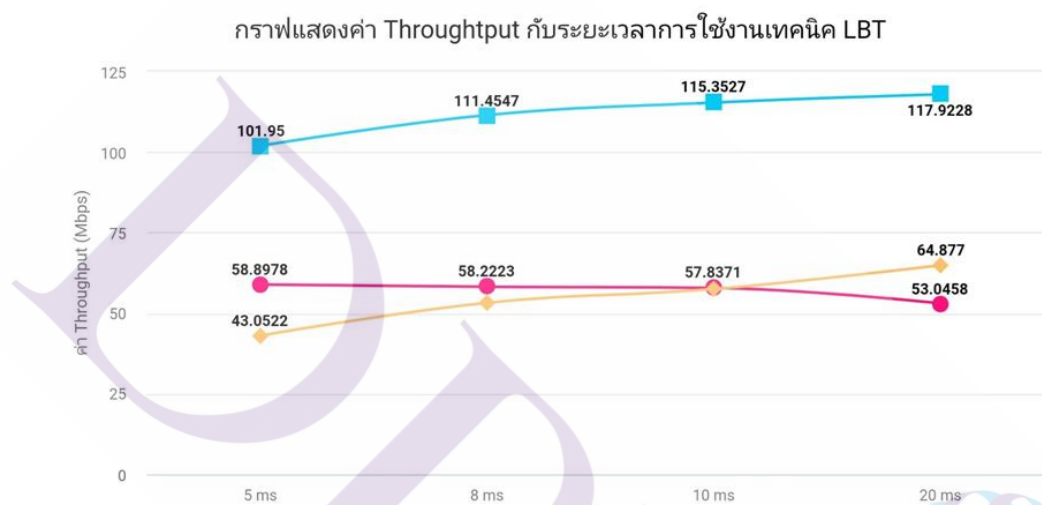
เวลา 10 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 59.7533 Mbps และ 47.7019 Mbps ตามลำดับ

เวลา 20 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 55.7843 Mbps และ 59.0756 Mbps ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลาใช้งานของเทคนิค LBT เพิ่มขึ้นจาก 5 ms เป็น 8 ms, 10 ms และ 20 ms ทำให้กราฟเส้นสีแดงที่แสดงค่า throughput ที่ UE_A ลดลงจาก 63.3167 Mbps ลดลงไป 3.0143, 3.5634 และ 7.5324 Mbps ตามลำดับ ในขณะที่กราฟเส้นสีเหลืองที่แสดงค่า throughput

ที่ UE_B มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 29.6442 Mbps เพิ่มขึ้นไป 8.8436 , 18.0577 และ 29.4314 Mbps ตามลำดับ จึงส่งผลให้ค่า throughput ของผู้รับ โดยรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้นเป็น 92.9609 Mbps, 98.7952 Mbps, 107.4552 Mbps และ 114.8599 Mbps ดังที่แสดงในกราฟเส้นสีฟ้า

- ที่ตำแหน่งแบบที่ 4 UE_A (110,25) กับ UE_B (30,25) ได้ค่า throughput ข้อมูลขาของ ผู้รับที่ UE_A และ UE_B เมื่อระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT เป็น 4 ค่า คือ 5 ms, 8 ms, 10 ms, 20 ms ดังแสดงในกราฟตามภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับเมื่อผู้รับ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานแต่ UE_A อยู่ไกลกว่า ตามตำแหน่งแบบที่ 4

จากกราฟ ค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับที่ UE_A และ UE_B เมื่อระยะเวลาการใช้งานของเทคนิค LBT ที่

เวลา 5 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 58.8978 Mbps และ 43.0522 Mbps ตามลำดับ

เวลา 8 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 58.2223 Mbps และ 53.2324 Mbps ตามลำดับ

เวลา 10 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 57.8371 Mbps และ 57.5156 Mbps ตามลำดับ

เวลา 20 ms ได้ค่า throughput ที่ UE_A และ UE_B เป็น 53.0458 Mbps และ 64.877 Mbps ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลาใช้งานของเทคนิค LBT เพิ่มขึ้นจาก 5 ms เป็น 8 ms, 10 ms และ 20 ms ทำให้กราฟเส้นสีแดงที่แสดงค่า throughput ที่ UE_A ลดลงจาก 58.8978 Mbps ลดลงไป 0.6755, 1.0607 และ 5.852 Mbps ตามลำดับ ในขณะที่กราฟเส้นสีเหลืองที่แสดงค่า throughput ที่ UE_B มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 43.0522 Mbps เพิ่มขึ้นไป 10.1802 , 14.4634 และ 21.8248 Mbps ตามลำดับ จึงส่งผลให้ค่า throughput ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้น 101.95 Mbps, 111.4547 Mbps, 115.3527 Mbps และ 117.9228 Mbps ดังที่แสดงในกราฟเส้นสีฟ้า

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ในทุกตำแหน่ง เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT เพิ่มขึ้นจาก 5 ms เป็น 8 ms, 10 ms และ 20 ms มีผลทำให้ค่า throughput ข้อมูลขาของของผู้รับของ Wi-Fi มีค่าลดลง ในทางกลับกันค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับของ MulteFire มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แม้ว่าค่า throughput ของผู้รับที่ UE_A (Wi-Fi) จะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ค่า throughput ของผู้รับที่ UE_B (MulteFire) เพิ่มขึ้นมากกว่า จึงทำให้ผลรวมค่า throughput ข้อมูลขาของผู้รับรวมในระบบ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของ MulteFire ที่สามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นตามโครงสร้างการส่งข้อมูล (frame structures ของ UL/DL traffic)

นอกจากนี้ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่า throughput ของผู้รับที่ UE รวมทั้งระบบที่เพิ่มมากขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มระยะเวลาการใช้งาน LBT โดยการตั้งค่าระยะเวลา TxOP (โดยปกติจะตั้งค่าตามอัลกอริทึม 3GPP Cat 4 LBT ตามมาตรฐานของ 3GPP ที่กำหนดให้คอนฟิกค่าพารามิเตอร์ TxOP เป็นแบบคงที่) แต่การศึกษาของงานวิจัยนี้ได้ทดลองปรับค่าเพิ่มเป็น 10 ms และ 20 ms ซึ่งเทียบได้กับการปรับค่าระยะเวลา TxOP ของ LAA แบบไดนามิก ซึ่งการปรับระยะเวลา TxOP นี้ทำให้เกิดการจัดตำแหน่งที่ดีขึ้นระหว่างระยะเวลาที่ไม่ได้ใช้งานของ Wi-Fi กับระยะเวลาส่งข้อมูลของ MulteFire ซึ่งจะลดจำนวนครั้งของการชนกันและทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นสำหรับเครือข่ายที่มีอยู่ร่วมกันเมื่อเปรียบเทียบกับแบบใช้อัลกอริทึม 3GPP Cat 4 LBT ซึ่งการส่งข้อมูลที่ยาวนานขึ้นในกรณีนี้จึงเป็นเหตุผลของการใช้ประโยชน์ของเวลาว่างในช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลได้โดยการตั้งค่าระยะเวลา TxOP เป็นค่าสูงขึ้นจึงเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของ MulteFire โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของ Wi-Fi ลดลง

ดังนั้น ระยะเวลาในการใช้งานของเทคนิค LBT จึงมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบโดยเป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบในแง่ของการเพิ่มความจุของระบบเพิ่มขึ้น

4.2.3 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้รับกับสถานีฐานในตำแหน่งต่างๆ เมื่อให้ Operator A (Wi-Fi) มีค่ากำลังส่ง 20 dBm และ Operator B (MulteFire) ค่ากำลังส่งเป็น 43 dBm ทำการจำลองระบบ โดยทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งของผู้รับทั้ง UE_A และ UE_B เป็น 4 แบบ คือ

ตำแหน่งแบบที่ 1 เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) กับ (30,25) ตามลำดับ

ตำแหน่งแบบที่ 2 เมื่อ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_B อยู่ที่ตำแหน่ง (110,25) กับ (110,45)

ตำแหน่งแบบที่ 3 เมื่อ UE_A กับ UE_B อยู่จุดเดียวกันใกล้สถานีฐานที่ (110,25) กับ (110,25) และ (110,45) กับ (110,45)

ตำแหน่งแบบที่ 4 เมื่อ UE_B อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_A อยู่ที่ตำแหน่ง (110,25) , (110,45) ปรากฏว่า

- รูปแบบที่ 2 เมื่อ Wi-Fi กับ MulteFire ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT เมื่อระยะเวลาใช้งานของเทคนิค LBT เป็น 5 ms, 8 ms, 10 ms และ 20 ms จะได้ค่า throughput ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ ตำแหน่งแบบที่ 1 และแบบที่ 3 เป็น 96.5735 Mbps, 108.705 Mbps, 111.6271 Mbps และ 117.2948 Mbps ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งแบบที่ 2 มีค่าเป็น 92.9609 Mbps, 98.7952 Mbps, 107.4552 Mbps และ 114.8599 Mbps ตามลำดับและในตำแหน่งแบบที่ 4 มีค่าเป็น 101.95 Mbps, 111.4547 Mbps, 115.3527 Mbps และ 117.9228 Mbps ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าค่า throughput ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบมีค่าสูงที่สุด เมื่อระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้รับกับสถานีฐานอยู่ในตำแหน่งแบบที่ 4 คือ UE_B ซึ่งรับสัญญาณจาก MulteFire อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) และ UE_A อยู่ไกลกว่าที่ตำแหน่ง (110,25) , (110,45) ส่วนตำแหน่งแบบที่ 1 และแบบที่ 3 ให้ค่า throughput ของผู้รับที่ UE_A และ UE_B เท่ากันทั้ง 2 แบบ แสดงว่า ระยะใกล้หรือไกลจากสถานีฐานไม่มีผลต่อค่า throughput ของผู้รับ หากผู้รับ UE_A และ UE_B อยู่ในจุดเดียวกัน และค่า throughput ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบมีค่าต่ำที่สุด เมื่ออยู่ในตำแหน่งแบบที่ 2 คือ UE_A อยู่ใกล้สถานีฐานที่ตำแหน่ง (30,25) แต่ UE_B อยู่ที่ตำแหน่ง (110,25) , (110,45)

- รูปแบบที่ 3 เมื่อ Wi-Fi กับ MulteFire ใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน ทำการจำลองระบบ และทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งของผู้รับทั้ง UE_A และ UE_B เป็น 4 แบบ แล้วพิจารณาจากค่า throughput ของผู้รับที่ UE_A และ UE_B พบว่า ทุกตำแหน่งให้ค่า throughput ข้อมูลขาลงที่ UE_A เป็น 130.928 Mbps และ ค่า throughput ที่ UE_B เป็น 75.1164 Mbps ทำให้ผลรวม throughput ของข้อมูลขาของของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ มีค่าเป็น 206.0444 Mbps ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้รับกับสถานีฐานในตำแหน่งต่าง ๆ ไม่มีผลต่อค่า throughput ของผู้รับรวมในระบบ สำหรับรูปแบบที่ 3 นี้

จากการจำลองระบบ จะเห็นได้ว่า เมื่อ Wi-Fi กับ MulteFire ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT ตามรูปแบบที่ 2 เมื่อ UE_B ซึ่งเป็นผู้รับของ MulteFire อยู่ใกล้สถานีฐาน

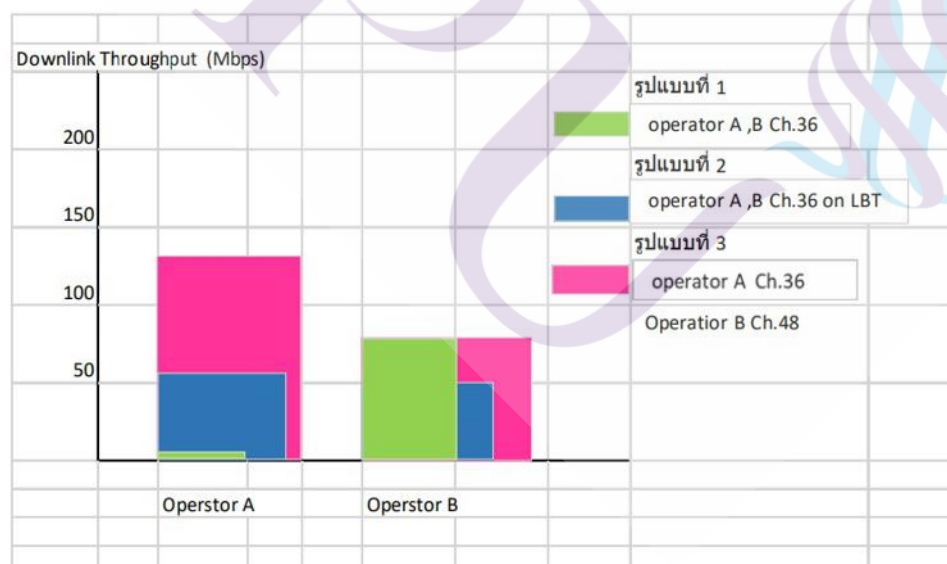
มากกว่า UE_A ที่เป็นผู้รับของ Wi-Fi มีผลทำให้ ค่า throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้รับกับสถานีฐาน จึงมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบโดยเป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบในแง่ของการเพิ่มความจุของระบบเพิ่มขึ้น

4.2.4 ประสิทธิภาพ throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เมื่อให้ Operator A (Wi-Fi) มีค่ากำลังส่ง 20 dBm และ Operator B (MulteFire) มีค่ากำลังส่ง 43 dBm ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ ตามตารางที่ 3.1 พบว่า

รูปแบบที่ 1 ได้ค่า throughput ของข้อมูลขาลงที่ UE_A เป็น 0 Mbps และ ค่า throughput ที่ UE_B เป็น 75.1164 Mbps ทำให้ค่า throughput โดยรวมของผู้รับทั้งระบบ มีค่าเป็น 75.1164 Mbps

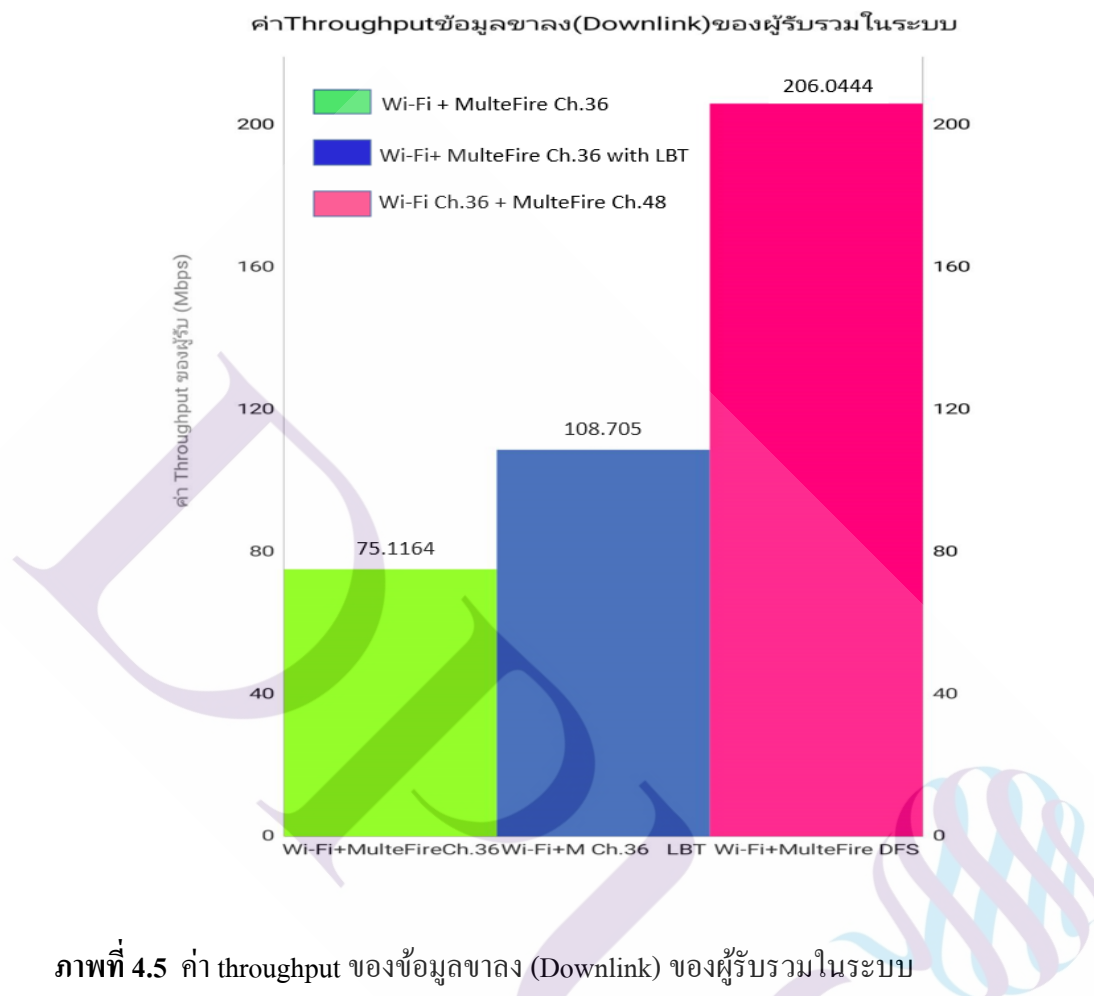
รูปแบบที่ 2 ได้ค่า throughput ของข้อมูลขาลงที่ UE_A เป็น 57.8742 Mbps และค่า throughput ที่ UE_B เป็น 50.8308 Mbps ทำให้ค่า throughput โดยรวมของผู้รับทั้งระบบ มีค่าเป็น 108.705 Mbps

รูปแบบที่ 3 ได้ค่า throughput ของข้อมูลขาลงที่ UE_A เป็น 130.928 Mbps และ ที่ UE_B เป็น 75.1164 Mbps ทำให้ค่า throughput โดยรวมของผู้รับทั้งระบบ มีค่าเป็น 206.0444 Mbps ดังแสดงค่า throughput ของข้อมูลขาลงของผู้รับในแต่ละ Operator ในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ค่า throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในแต่ละ Operator

และ ค่า throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ค่า throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบ

จากภาพที่ 4.4 และภาพที่ 4.5 พบว่า เมื่อ Operator A (Wi-Fi) กับ Operator B (MulteFire) ใช้งานร่วมกัน ในช่องสัญญาณเดียวกัน ทำให้ค่า throughput ของผู้รับรวมในระบบ เป็น 75.1164 Mbps ต่อมาเมื่อใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการเพื่อให้เกิดการใช้งานร่วมกันอย่างเท่าเทียม (Fairly coexistence) ตามเงื่อนไขของรูปแบบที่ 2 ทำให้ผลของค่า throughput ของผู้รับรวมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เป็น 108.705 Mbps คิดเป็น 44.72% เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1 และเมื่อ ย้ายช่องสัญญาณ โดยใช้เทคนิค DFS ซึ่งเป็นกลไกที่ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการอินเตอร์เฟสกับระบบอื่น โดยกำหนดให้ Operator A (Wi-Fi) ใช้ Channel 36 และ Operator B (MulteFire) ใช้ Channel 48 ซึ่งอยู่ในย่าน UNII I ส่งผลให้ ค่า throughput ข้อมูลขาลงของผู้รับรวมในระบบ มีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 206.0444 Mbps คิดเป็น 174.30 % เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1

จากผลการจำลองระบบ พบว่า ในรูปแบบที่ 1 เมื่อ Operator A (Wi-Fi) และ Operator B (MultaFire) ใช้งานร่วมกันในช่องสัญญาณเดียวกัน คือ ช่องสัญญาณ 36 ได้ค่า throughput ของข้อมูลขาตั้งที่ UE_A เป็น 0 Mbps เนื่องจาก เทคโนโลยี Wi-Fi ใช้โปรโตคอล Distributed Coordination Function (DCF) ในการตรวจจับสัญญาณเพื่อเข้าถึงการใช้งานของช่องสัญญาณเพื่อป้องกันการชนกันของแพ็คเก็ตในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต โดย DCF ทำงานอิงบนโปรโตคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ตรวจสอบสถานะการว่างของช่องสัญญาณด้วยช่วงเวลา DCF Inter-frame Space (DIFS) หากช่องสัญญาณว่าง จะส่ง Request-To-Send (RTS) ไปยังโหนดปลายทาง จากนั้นโหนดปลายทางจะส่ง Clear-To-Send (CTS) กลับมา โหนด Wi-Fi จึงจะส่งข้อมูลไปปลายทาง จากนั้นปลายทางจะส่ง Acknowledgment (ACK) กลับไปที่โหนด Wi-Fi สำหรับยืนยันการรับข้อมูลที่สำเร็จหลังจากช่วงเวลา Short Inter-frame Space (SIFS) ในทางกลับกัน ถ้าช่องสัญญาณไม่ว่าง โหนดจะคอยติดตามตรวจสอบจนกว่าสถานะจะว่างด้วยเวลา DIFS โดยใช้เวลา backoff time แบบสุ่ม ทำให้โหนด Wi-Fi อาจจะไม่สามารถเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้หากมีการใช้งานอย่างคับคั่งหรือเข้าใช้งานได้ก่อนโดยเทคโนโลยีอื่นที่ใช้งานอยู่ในช่องสัญญาณเดียวกัน

ในขณะที่ โปรโตคอล LTE MAC ไม่มีเฟรมที่ใช้สำหรับตรวจจับการชนกัน นี้คือข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างเทคโนโลยี LTE และ Wi-Fi หากมีการใช้งานร่วมกันระหว่าง LTE กับ Wi-Fi ในย่านความถี่เดียวกัน โดยไม่มีกลไกที่ทำให้เกิดการใช้งานอย่างเท่าเทียมกันสามารถลดประสิทธิภาพการทำงานของ Wi-Fi ได้ เนื่องจากขาดกลไก LBT ใน LTE ทำให้เมื่อใช้งานจริง โหนด Wi-Fi มักจะพบว่าช่องสัญญาณไม่ว่าง ก่อนที่จะพยายามส่งข้อมูล ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยี LTE MultaFire จึงใช้โปรโตคอล LBT ในการส่งข้อมูลในย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต ซึ่งอัลกอริทึม 3GPP Cat 4 LBT นั้นคล้ายกับโปรโตคอล Wi-Fi DCF โดยในอัลกอริทึมนี้ ช่วงเวลา CCA จะเป็นการตรวจสอบความพร้อมใช้งานของช่องสัญญาณก่อนการส่งข้อมูล โดยที่ eNB จะอนุญาตให้ส่งข้อมูลหลังจากตรวจพบว่าช่องสัญญาณนั้นว่าง ด้วยช่วงเวลา initial CCA (iCCA) (เช่น 34 μ s) มิฉะนั้น สเตรทจอร์ระยะเวลายาว extended CCA (eCCA) จะเริ่มต้นขึ้น แล้วเข้าสู่กระบวนการรับส่งข้อมูลซึ่งจะยอมให้ส่งข้อมูลได้สูงสุดเป็นระยะเวลาหนึ่ง ตามค่า Maximum Channel Occupancy Time (MCOT) ขึ้นอยู่กับ Channel Access Priority Class ที่เลือก เมื่อสิ้นสุดจะเข้าสู่กระบวนการรอส่งข้อมูลด้วยระยะเวลาหนึ่งตามค่าระยะเวลาเบ็คคอฟ (backoff period of time) แบบสุ่มต่อไป

จะเห็นได้ว่า เมื่อ Wi-Fi กับ MultaFire ใช้งานคนละช่องสัญญาณจะส่งผลให้สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพและให้ค่า throughput สูงสุดแต่อย่างไรก็ตามถ้ามีข้อจำกัดในแง่ของช่องสัญญาณและจำเป็นต้องใช้งาน Wi-Fi กับ MultaFire ร่วมกันในช่องสัญญาณเดียวกันจะส่งผล

ให้เกิดสัญญาณรบกวนกันจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการแก้ปัญหาดังกล่าวตามรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะมีผลทำให้ ค่า throughput ของข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1 ดังนั้น การใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการการใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน จึงมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลที่ได้จากการจำลองงานวิจัย ตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย อธิบายข้อจำกัดของระบบที่จำลองและแนวทางแก้ไขของงานวิจัย ตลอดจนข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต เพื่อปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จำลองการใช้งานร่วมกันของ Wi-Fi กับ MulteFire ในพื้นที่เดียวกัน เทคนิคที่ทำให้การใช้งานร่วมกันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นทำได้หลายวิธี โดยเทคนิค LBT และ DFS (การย้ายช่องสัญญาณ) เป็นกลไกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งาน จากผลการจำลองของงานวิจัยนี้ พบว่า การนำเทคนิค DFS ย้ายช่องสัญญาณจะให้ผลดีที่สุด แต่จะทำให้สูญเสียช่องสัญญาณการใช้งานไป กล่าวคือ อุปกรณ์ของระบบต้องใช้งาน 2 ช่องสัญญาณในย่าน UNII I เดียวกัน แต่หากนำเทคนิค LBT มาใช้งาน แม้ว่าค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบ จะลดลงเมื่อเทียบกับรูปแบบการใช้งาน 2 ช่องสัญญาณ แต่ก็ให้ค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบการใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันแบบไม่ใช้เทคนิค LBT จึงนับเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งในการเพิ่มความจุ (Capacity) ของระบบและเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งาน 1 ช่องสัญญาณซึ่งสามารถนำมาปรับใช้งานจริงได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงช่องสัญญาณที่มีอยู่อย่างจำกัด

งานวิจัยนี้ พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานของ LBT ที่เพิ่มมากขึ้นเป็นการใช้ประโยชน์ของเวลาว่างในช่องสัญญาณสำหรับส่งข้อมูล โดยการตั้งค่าระยะเวลา TxOP ให้สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาส่งข้อมูลของ MulteFire ส่งข้อมูลได้ยาวนานขึ้นจึงเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของ MulteFire โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของ Wi-Fi ลดลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในแง่ของการเพิ่มความจุของระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังพบว่า ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้รับกับสถานีฐานในตำแหน่งที่ต่างกัน เป็นผลให้ค่า throughput ของผู้รับรวมในระบบมีค่ามากที่สุดเมื่อตำแหน่งที่ผู้รับ UE_B (MulteFire) อยู่ใกล้สถานีฐานและ UE_A อยู่ไกลสถานีฐานมากกว่า ดังนั้นระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ของผู้รับกับสถานีฐานมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบด้วย

5.2 ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของงานวิจัย

ข้อจำกัดของงานวิจัย แบ่งเป็นข้อๆได้ ดังนี้

5.2.1 โปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย ns-3 ในโมดูล LBT Wi-Fi Coexistence ยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีการพัฒนาปรับปรุงโดยผู้พัฒนาโปรแกรมผู้วิจัยจึงควรติดตามและ Update ข้อมูลอยู่เสมอ

5.2.2 ปัจจุบันโปรแกรมจำลองระบบเครือข่าย ns-3 ในโมดูล LBT Wi-Fi Coexistence รองรับการทำงานของ wifi บนมาตรฐาน 802.11n โดยอนุญาตให้ใช้ความกว้างช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) อยู่ที่ 20 MHz และมีข้อจำกัดซึ่งยังไม่ support การทำงานที่ความกว้างช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) 40 MHz และ 80 MHz บนมาตรฐาน 802.11n และ 802.11ac

5.2.3 ปัจจุบันในประเทศไทย โดย กสทช. ได้มีประกาศ กสทช. เรื่อง หลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่ย่าน 5 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อกำกับ ดูแล และกำหนดหลักเกณฑ์ในการใช้งานย่านความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต ดังนั้นแม้ว่า Multefire เป็น LTE based Technology ที่อยู่ในย่าน Unlicensed spectrum ทำให้สามารถให้บริการโดยไม่ต้องรอรับการจัดสรรความถี่ผ่านการประมูล เป็นสเปกตรัมที่ไม่มีใบอนุญาตก็สามารถเป็นผู้ให้บริการหลักและผู้ให้บริการแบบ โฮสต์ที่เป็นกลางได้ก็ตามแต่ข้อกำหนดตามประกาศ กสทช. เรื่อง มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคม ซึ่งใช้คลื่นความถี่ ย่าน 2.4 กิกะเฮิรตซ์และ/หรือ 5 กิกะเฮิรตซ์ ก็เป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาในการใช้งานด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ และแนวทางการพัฒนาในอนาคต มีดังนี้

5.3.1 ควรมีการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันในพื้นที่เดียวกันระหว่าง MulteFire และ Wi-Fi ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เมื่อมีความคับคั่งของการใช้งานในแต่ละ Operator แยกต่างหาก เช่น เมื่อ Operator A เป็น Wi-Fi ผู้รับ UE_A มีการใช้งานเป็น 20% ,40% และ 80% จะส่งผลกระทบต่อผู้รับ UE_B ซึ่งเป็นผู้รับของ Operator B MulteFire เพื่อศึกษาประเด็นการใช้งานร่วมกัน (Coexistence) ให้สามารถใช้งานร่วมกันได้อย่างเท่าเทียม (Fairly Coexistence) กันระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่

5.3.2 ในอนาคตจะนิยมใช้งาน Wi-Fi อย่างหนาแน่นและแพร่หลายไปทั่วโลก ดังนั้นกลไกหรือเทคนิคที่ทำให้การใช้งานร่วมกัน (Coexistence) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นทำได้หลายวิธี โดยเทคนิค LBT และ DFS ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ก็เช่นกัน หนึ่ง จึงควรมีการศึกษากลไกอื่นๆเพิ่มเติม และนำมาใช้งานเพื่อให้อุปกรณ์ระบบสื่อสารไร้สายสามารถใช้งานได้อย่างเท่าเทียม (Fairly Coexistence) กันเมื่อใช้งานในพื้นที่เดียวกัน

5.3.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต เพื่อให้ระบบสื่อสาร 5G และ 6G เดิบโตได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ การเพิ่มขนาดของระบบเครือข่าย โดยการนำย่านความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตมาใช้งาน เป็นทางเลือกที่สำคัญหนึ่ง เทคโนโลยี MulteFire จึงเป็นการขยายโอกาสสำหรับผู้ให้บริการที่ไม่มีใบอนุญาต ดังนั้น การพัฒนามาตรฐาน การจัดทำมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ โดย MulteFire Alliance ซึ่งเป็นองค์กรที่เปิดกว้างให้ บริษัทต่างๆ นักวิจัย และผู้สนใจเทคโนโลยี LTE และ Cellular ในย่าน unlicensed และ ย่าน shared spectrum เข้าร่วมเป็นสมาชิก จึงมีความสำคัญและจำเป็นเป็นอย่างมากเพื่อเป็นมาตรฐานในการเชื่อมต่อและผลิตอุปกรณ์ เพื่อการใช้งานจริงต่อไป





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1] B. Eduardo, F. Sergio, and B. Raquel, “KQI Performance Evaluation of 3GPP LBT Priorities for Indoor Unlicensed Coexistence Scenarios,” in *Electronics* 2020, Oct.2020, pp 1-6, doi:10.3390/electronics9101701
- [2] N. Boon Loong, S. Hongbo, P. Aris, and Z. Jianzhong Charlie, “Unified access in licensed and unlicensed bands in LTE-A Pro and 5G,” in *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, Vol.6, pp.1-7, June 2017, doi:10.1017/ATSIP.2017.7
- [3] Qualcomm Technologies Inc.. (2018). “Introducing MulteFire: LTE-like performance with Wi-Fi-like simplicity | Qualcomm” . Available:<https://www.qualcomm.com/news/onq/2015/06/11/introducing-multefire-lte-performance-wi-fi-simplicity>”.
- [4] Qualcomm Technologies Inc.. (2016). *MulteFire Technology Progress and Benefits, and How It Enables A New Breed of Neutral Hosts [PowerPoint slides]*. Available:<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/multefire-technology.pdf>.
- [5] K. Tamer, “Understanding MulteFire’s Radio Link [PowerPoint slides]”, 2016. Available: https://www.mfa-tech.org/wp-content/uploads/2016/10/MulteFire_Radio-Link.pdf
- [6] R. Claudio, D. Maria-Gabriella, P. Tommaso, C. Camillo, and O. Pietro, “Performance evaluation of LTE in unlicensed bands for indoor deployment of ultra-broadband mobile network,” in *2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, Italy, 2017*
- [7] L. Mina, M. Vuk, R. Jeffrey H., and Z. Amir I., “Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants,” , Sep.2017, arXiv:1709.04458v1.
- [8] G. Lorenza, H. Thomas, B. Biljana, and M. Marco, “Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3,” arXiv 2016, arXiv:1604.068260.
- [9] A. Moawiah, L. Miguel, “Novel LAA Waiting and Transmission Time Configuration Methods

for Improved LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence Over Unlicensed Band,” September 17,
2020. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3021511



ภาคผนวก ก
บทความวิชาการเรื่อง
การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi
ในย่านความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตด้วยโปรแกรม ns-3

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)



การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของ MulteFire กับ Wi-Fi ในย่านความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตด้วย
โปรแกรม ns-3

Performance evaluation of MulteFire and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3

ประมวลลี อินทรเทพ

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

110/1-4 ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: prapharwin@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานเครือข่ายสื่อสารไร้สาย 5G แบบภายในอาคารในย่านความถี่ 5 GHz UNII I โดยมุ่งเน้นศึกษาเรื่องประสิทธิภาพ throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวมทั้งระบบ เมื่อมีการใช้งานร่วมกันระหว่าง MulteFire และ (Wireless Fidelity: Wi-Fi) โดยจำลองรูปแบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายด้วยโปรแกรมจำลองเครือข่าย (Network Simulator: ns-3) ซึ่งกำหนดให้มีการรับส่งข้อมูลแบบหนึ่งผู้ให้บริการ (Operator) คือหนึ่งผู้รับคืออุปกรณ์รับสัญญาณ (User Equipment: UE) เป็น 3 รูปแบบ คือ 1) ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน, 2) ใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค (Listen before talk: LBT) และ 3) ใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การใช้งานร่วมกันของ Wi-Fi กับ MulteFire ในช่องสัญญาณเดียวกันเมื่อใช้เทคนิค LBT และเมื่อใช้งานต่างช่องสัญญาณกัน ทำให้ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม คิดเป็น 44.72% และ 174.30% ตามลำดับ ซึ่งการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้งาน นอกจากจะทำให้เกิดการใช้งานร่วมกันได้อย่างเท่าเทียมแล้ว ยังเป็นการเพิ่มความเร็ว (Capacity) และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอีกด้วย

คำสำคัญ : MulteFire, Unlicensed Spectrum, LBT, Wi-Fi, ns-3

Abstract

The aim of this paper is to analyze the 5G communication networks, the downlink performance improvements of MulteFire and Wi-Fi coexistence in the 5 GHz unlicensed band for indoor deployment, in terms of downlink user throughput. The simulation scenario defined in 3 scenarios with one operator to one user equipment (UE) using Network Simulation (ns-3) simulation platform. First, Wi-Fi has to co-exist with MulteFire on same channel, Second, Wi-Fi and MulteFire coexistence on same channel with Listen Before Talk (LBT) techniques. Finally Wi-Fi and MulteFire coexistence on different channel. The simulation results show that Wi-Fi and MulteFire coexistence performance on same channel with LBT techniques and on different channel increases performance of total downlink user throughput to be 44.72% and 174.30% presents. Therefore, respectively and yet, Wi-Fi coexisting fairly with MulteFire for indoor scenarios have helped to improvements to the network capacity, and for a friendly coexistence.

Key words: MulteFire, Unlicensed Spectrum, LBT, Wi-Fi, ns-3

1. บทนำ

การเติบโตอย่างรวดเร็วของระบบสื่อสาร โทรคมนาคม ความต้องการใช้งานข้อมูลปริมาณสูง (High Data Rate) การขาดแคลนย่านความถี่ที่รองรับใบอนุญาต (licensed band) ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของระบบสื่อสาร 5G โดยการเพิ่มย่านความถี่ที่นำมาใช้งานได้ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาเพื่อนำย่านความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต (Unlicensed band) มาใช้งาน โดยใช้เทคโนโลยี Licensed-Assisted Access (LAA) ใน 3GPP Release 13 และ 5G MulteFire ใน Non 3GPP Release 15 [1]-[2] อย่างไรก็ตามย่านความถี่ที่มีการใช้งานใน Wi-Fi และระบบเรดาร์ อยู่แล้ว ดังนั้น งานวิจัยจึงศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับข้อมูลขาลง (Downlink) ของผู้รับโดยรวม เมื่อมีการใช้งานร่วมกันอย่างเท่าเทียม (Fairly Coexistence)



รูปที่ 1 การพัฒนามาตรฐานในย่าน unlicensed โดย 3GPP

2. งานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 MulteFire

MulteFire [3] เป็นเทคโนโลยี 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ที่พัฒนาจาก LTE ใช้งานในย่าน unlicensed สามารถใช้ร่วมกับ private LTE และ Neutral host [4] โดย MulteFire ไม่จำเป็นต้องใช้ความถี่ที่รองรับใบอนุญาต (Licensed band) [5] เป็นแกนหลัก

2.2 LBT

LBT [1] เป็นเทคนิคการตรวจเช็คสถานะความว่างของช่องสัญญาณ คือ CCA อนุญาตให้ส่งข้อมูลได้สูงสุดตามค่า Maximum Channel Occupancy Time (MCOT) และรอส่งสัญญาณด้วยเวลาตามค่า backoff period of time ซึ่งขึ้นอยู่กับ Contention Window (CW) การเว้นระยะบรรทัดทำในแนวกึ่ง ให้เลือกแบบ Exactly 12 พจนัน เนื่อเรื่องในแต่ละบรรทัดให้จัดเรียงข้อความและขวาอย่างสวยงาม

EC-202

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)

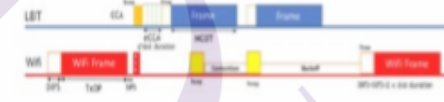


ตารางที่ 1 3GPP LBT CAT4 Priority classes

Priority Class (p)	CWmin	CWmax	MCOT
1	3	7	2 ms
2	7	15	3 ms
3	15	63	8 ms
4	15	1023	8 ms

2.3 Wi-Fi

เทคโนโลยี Wi-Fi (1) ตามมาตรฐาน 802.11 สำหรับการใช้งานของช่องสัญญาณ (primary channel access) ในย่าน unlicensed band โดยใช้กลไก Distributed Coordination function (DCF) บน CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) โดยใช้กลไกการส่ง CCA คล้ายกับ LBT ด้วย 2 ที่ตั้งขึ้นเพื่อตรวจสอบสถานะการว่างและรอส่งข้อมูลตามช่วงเวลา



รูปที่ 2 เปรียบเทียบกลไกของ Wi-Fi กับ LBT ในย่าน unlicensed band

2.4 DFS

DFS (5) เป็นกลไกที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อหลีกเลี่ยงการก่อให้เกิดการรบกวนอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารชนิดไม่เคลื่อนที่ (non-MIT (International Mobile Telecommunications)) เช่น ระบบเรดาร์ ในบางประเทศ กำหนดให้ต้องขออนุญาตใช้ช่องสัญญาณก่อนการนำอุปกรณ์ไปใช้งานเพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนต่อกันกับระบบเรดาร์ โดยหากสัญญาณเรดาร์ตรวจพบ เช่น ค่า received power มีค่าสูงกว่าค่า threshold ที่กำหนดไว้ ก็จะต้องย้ายช่องสัญญาณที่กำลังใช้งานออกไป อุปกรณ์จะไม่ใช้ช่องสัญญาณนั้นเป็นเวลาหนึ่ง (non occupancy period) เป็นเวลา 30 นาที

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย [6] ศึกษาการเพิ่มขนาดของระบบเครือข่าย ด้วยเทคโนโลยี LTE ในย่าน unlicensed band 5 GHz Licensed-Assisted Access (LAA) โดยใช้ LBT ร่วมด้วย ประเมินประสิทธิภาพของ LTE LAA ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร วิเคราะห์ค่า throughput ข้อมูลขาลง (Downlink) พบว่า การนำความถี่ในย่านความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาตมาใช้งานเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ค่า throughput ของผู้ใช้งาน

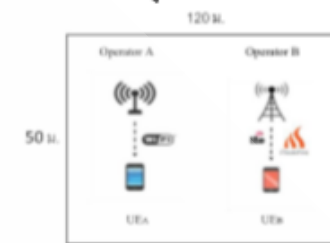
งานวิจัย [7] จำลองการทดสอบการใช้งานร่วมกันของ LTE กับ Wi-Fi ในย่าน Unlicensed spectrum โดยใช้ โปรแกรม ns-3 ตามมาตรฐาน 3GPP TR 36.889 ใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย และเพิ่มการรับส่งไฟล์แบบ TCP ทำการศึกษาและประเมิน ประสิทธิภาพของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการใช้งานร่วมกัน (Coexistence) นอกจากนี้ผู้วิจัยทดลองใช้ FTP Model 1 Over UDP และ FTP Model 1 Over TCP จำลองระบบด้วยด้านแรกที่แตกต่างกันในช่วงระหว่าง 0.5 และ 2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบในการใช้งานร่วมกัน พบว่า FTP Model 1 Over UDP ส่งผลกระหนาบเพียงเล็กน้อยต่อ LAA และ Wi-Fi ในขณะที่เมื่อใช้ FTP

Model 1 Over TCP ส่งผลให้ค่า (Round Trip Time: RTT) ใน LAA เป็น 15 msec หรือนานกว่านั้น ทำให้ค่า Throughput ลดค่าลงเหลือ 20 Mbps งานวิจัย [5] การใช้ LTE ในย่าน Unlicensed spectrum เพื่อช่วยลดปริมาณการไหลของข้อมูลให้บริการในโครงข่ายโทรศัพท์มือถือ งานวิจัยนี้ ศึกษา 3 Variant ของ LTE คือ LTE-U, LAA และ MulteFire

3. การออกแบบและดำเนินการวิจัย

3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบ (System Overview)

การประเมินประสิทธิภาพของระบบเมื่อมีการใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire ระบบออกแบบให้ผู้ใช้บริการ 2 ราย คือ Operator A เป็น Wi-Fi และ Operator B เป็น MulteFire ในย่านความถี่ 5.18 GHz UNII I ซึ่งเป็นย่าน unlicensed band ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร (indoor) ขนาด 120 ม. X 50 ม. มีผู้ใช้งาน แสดงที่ด้วยความเร็ว 3 กม.ต่อ ชม. ดึงแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพรวมการทำงานของระบบ

3.2 การออกแบบระบบ การสร้างโครงข่ายจำลองด้วยโปรแกรม ns-3 และจำลองระบบ

งานวิจัยนี้ ใช้โมดูล LBT Wi-Fi Coexistence ในโปรแกรม ns-3 ซึ่งเป็น โปรแกรมสำหรับจำลองระบบเครือข่าย (Network Simulator Software) โดยสามารถจำลอง Node ที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อต่างๆและนำมาใช้ในการจำลองระบบเครือข่ายสื่อสารแบบไร้สายได้ โดย NS-3 ถูกพัฒนาต่อออกมาจาก NS-2 ซึ่งมีการพัฒนาเพิ่ม Module ต่างๆเข้ามารองรับการใช้งานในปัจจุบันโดยภาษาที่ใช้ในการพัฒนา คือ ภาษา C++ และ Python จากนั้นทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมกระใช้งานร่วมกันระหว่าง Wi-Fi กับ MulteFire โดยการวัดค่า throughput ที่ได้รับ ซึ่งค่า throughput หาได้จาก ค่าของจำนวนข้อมูลหน่วยเป็นบิตที่ได้รับจากการส่งและการรับของ packet หารด้วยเวลาเฉลี่ย โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

Parameter	MulteFire	Wi-Fi
Tx Power	45 dBm	20 dBm
Frequency	5.18 GHz / 5.24 GHz	5.18 GHz
Channel Bandwidth	20 MHz	20 MHz
Packet Size	1000 Bytes	1000 Bytes
Protocol	UDP	UDP
Simulation time	2 Sec	2 Sec

บทความวิจัย

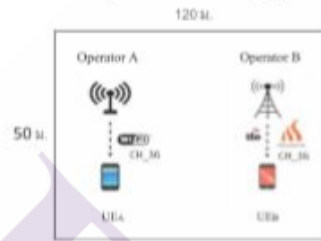
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)



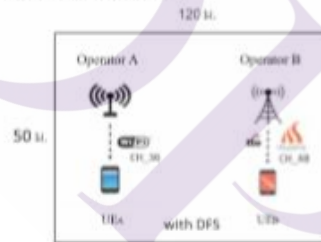
โดยจำลองสถานการณ์ แบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ

3.2.1 รูปแบบที่ 1 ใช้งาน Wi-Fi กับ MuleFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน เดี่ยวกัน กำหนดให้ Operator A และ Operator B ใช้ช่องสัญญาณ 36 และใช้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ตามตารางที่ 2 วัดค่า throughput ที่ UE ดังรูปภาพที่ 4



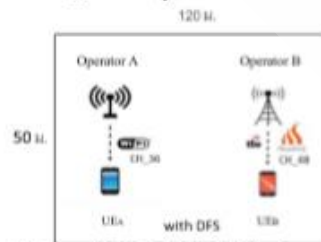
รูปที่ 4 รูปแบบที่ 1 Wi-Fi กับ MuleFire ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน

3.2.2 รูปแบบที่ 2 ใช้งาน Wi-Fi กับ MuleFire ในช่องสัญญาณเดียวกัน ใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย กำหนดให้ Operator A และ Operator B ใช้ช่องสัญญาณ 36 ใช้ LBT และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ตามตารางที่ 2 วัดค่า throughput ที่ UE ดังรูปภาพที่ 5



รูปที่ 5 รูปแบบที่ 2 Wi-Fi กับ MuleFire ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันและใช้เทคนิค LBT ร่วมด้วย

3.2.3 รูปแบบที่ 3 ใช้งาน Wi-Fi กับ MuleFire คนละช่องสัญญาณ ใน UNII I กำหนดให้ Operator A ใช้ช่องสัญญาณ 36 และ Operator B ใช้ช่องสัญญาณ 48 และใช้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ตามตารางที่ 2 วัดค่า throughput ที่ UE ดังรูปภาพที่ 6

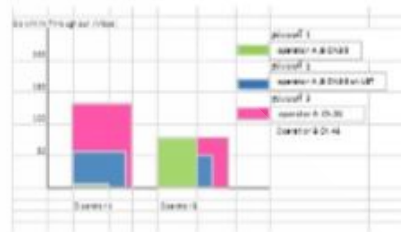


รูปที่ 6 รูปแบบที่ 3 Wi-Fi กับ MuleFire ใช้ช่องสัญญาณต่างกัน ใน UNII I

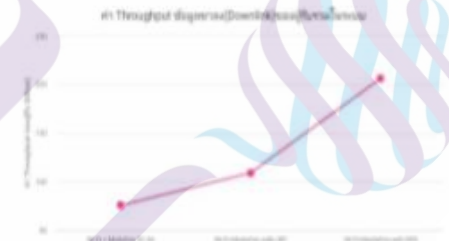
4.ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบตามที่กำหนดไว้

เมื่อทำการจำลองการทำงานของระบบตามที่ออกแบบไว้ด้วยโครงข่ายจำลองโดยใช้โปรแกรม ns-3 ที่มีค่าพารามิเตอร์ ตามตารางที่ 2 ผลการจำลองปรากฏว่า รูปแบบที่ 1 ค่า throughput ของผู้รับรวมในระบบเป็น 75.1164 Mbps เมื่อนำเทคนิค LBT มาใช้ร่วมด้วยความเร็วขึ้นใน รูปแบบที่ 2 ค่า throughput ของผู้รับรวมในระบบ มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 102.705 Mbps และเมื่อทดสอบย้ายช่องสัญญาณ โดยใช้เทคนิค DFS ซึ่งเป็นกลไกที่ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนกับระบบอื่น โดยให้ Operator A ใช้ Channel 36 และ Operator B ใช้ channel 48 ซึ่งยังคงอยู่ในย่าน UNII I พบว่า ค่า throughput ข้อมูลขาของ (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบ มีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 208.0444 Mbps ดังรูปภาพรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 ค่า throughput ข้อมูลขาของ (Downlink) ของผู้รับ ในแต่ละ Operator



รูปที่ 8 ค่า throughput ข้อมูลขาของ (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบ

4.2 วิเคราะห์ผลแบบจำลอง

จากรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 พบว่า เมื่อ Operator A (Wi-Fi) กับ Operator B (MuleFire) ใช้งานร่วมกัน ในช่องสัญญาณเดียวกัน ทำให้ throughput ของผู้รับรวมในระบบ เป็น 75.1164 Mbps คือสามารถใช้เทคนิค LBT เข้ามาจัดการเพื่อให้เกิดการใช้งานร่วมกันอย่างเท่าเทียม (Fairly coexistence) ทำให้ผลของค่า throughput ของผู้รับรวมในระบบ มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เป็น 102.705 Mbps คิดเป็น 44.72% เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1 และเมื่อย้ายช่องสัญญาณด้วยเทคนิค DFS ให้ Operator A (Wi-Fi) ใช้ Channel 36 และ Operator B (MuleFire) ใช้ Channel 48 ตามลำดับ ส่งผลให้ ค่า

EC-202

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)



throughput ข้อมูลขาด (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 206.0444 Mbps คิดเป็น 174.30 % เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1

5.สรุป

วิธีการจำลองการใช้งานร่วมกันของ Wi-Fi กับ MulteFire ในพื้นที่เดียวกันมีเทคนิคที่ทำให้การใช้งานร่วมกันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นั่นก็คือหลายวิธี โดยเทคนิค LBT และ DFS ก็เป็นกลไกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งาน จากผลการจำลองของงานวิจัยนี้ พบว่า การนำเทคนิค DFS มาใช้จะให้ผลดีที่สุด แต่จะทำให้สูญเสียช่องสัญญาณการใช้งานไป กล่าวคือ อุปกรณ์ของระบบต้องใช้งาน 2 ช่องสัญญาณใน UNII 1 เดียวกัน แต่หากนำเทคนิค LBT มาใช้งาน แม้ว่าค่า throughput ข้อมูลขาด (Downlink) ของผู้รับรวมในระบบจะลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ 2 ช่องสัญญาณ แต่ก็ยังเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งในการเพิ่มความจุ (Capacity) และประสิทธิภาพของการใช้งาน 1 ช่องสัญญาณซึ่งสามารถนำมาปรับใช้งานจริงได้อย่างง่ายดายโดยไม่ต้องคำนึงถึงช่องสัญญาณที่มีอยู่อย่างจำกัด

6.เกิดผลกระทบภาค

งานวิจัยชิ้นนี้มีส่วนช่วยได้คือความรู้จาก ดร.ณัฐ อรุณีโภาส วิศวกร อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้ ได้ให้คำแนะนำแนะแนวคิดว่าควรลดขนาดเครือข่ายของระบบต่างๆ งานวิจัยชิ้นนี้หรือสมมุติฐานของระบบ ดร.ณัฐ อรุณีโภาส วิทยานิพนธ์ และ นายชานันท์ ยงวิเชียร ได้ให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นในการจัดทำบทความงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Eduardo, F. Sergio, and B. Raquel, "KQI Performance Evaluation of 5GPP LBT Priorities for Indoor Unlicensed Coexistence Scenarios," in *Electronics* 2020, Oct.2020, pp.1-6, doi:10.3390/electronics9101701
- [2] N. Boon Loong, S. Hongbo, P. Aris, and Z. Jianzhong Charlie, "Unified access in licensed and unlicensed bands in LTE-A Pro and 5G," in *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, Vol.6, pp.1-7, June 2017, doi:10.1017/ATSIP.2017.7
- [3] Qualcomm Technologies Inc. (2018). "Introducing MulteFire: LTE-like performance with Wi-Fi-like simplicity | Qualcomm". Available: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2015/06/11/introducing-multefire-lte-performance-wi-fi-simplicity>.
- [4] Qualcomm Technologies Inc. (2016). *MulteFire Technology Progress and Benefits, and How It Enables A New Breed of Neutral Hosts* [PowerPoint slides]. Available: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/multefire-technology.pdf>.
- [5] L. Mina, M. Vuk, R. Jeffrey H., and Z. Amir I., "Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants," Sep.2017, arXiv:1709.04453v1.
- [6] R. Claudio, D. Maria-Gabriella, P. Tommaso, C. Camillo, and O. Pietro, "Performance evaluation of LTE in unlicensed bands for indoor deployment of ultra-broadband mobile network," in 2017 AET International Annual Conference, Cagliari, Italy, 2017
- [7] G. Lorenza, H. Thomas, B. Biljana, and M. Marco, "Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3," arXiv 2016, arXiv:1604.068260.



ชื่อ นามสกุล นามสกุล จินทรเทพ อายุ 46 ปี
ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง วิศวกร 7 กองก่อสร้างทั่วไป
ฝ่ายก่อสร้างทางพิเศษ

การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

โทรศัพท์ 094-938-3666

E-mail: napharin@yahoo.com

ประวัติการศึกษา :

ปริญญาตรี วศ.บ. (วิศวกรรมโทรคมนาคม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่สำเร็จ 2540

งานวิจัยที่สนใจ

ระบบขนส่งจราจรอัจฉริยะ

เทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สาย

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล

ประวัติการศึกษา

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

นางประภาวดี อินทรเทพ

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี พ.ศ.2540

วิศวกร 7 กองออกแบบและก่อสร้าง

ฝ่ายก่อสร้างทางพิเศษ

การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

