วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่าย
ตัวรับรู้ไร้สาย

นายธนาภูมิ แดนมณี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LOW POWER MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL FOR INTERNET PROTOCOLS IN WIRELESS SENSOR

Mr. Tanapoom Danmanee

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Computer Engineering
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2016
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย
โดย	นายธนาภูมิ แดนมณี
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกริก ภิรมย์โสภา)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ ผลเพิ่ม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ธนาภูมิ แดนมณี : วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (LOW POWER MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL FOR INTERNET PROTOCOLS IN WIRELESS SENSOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย, 56 หน้า.

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีที่ถูกล่าวถึงอย่างมากได้แก่ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) หรือที่เรียกกันว่า ไอโอที (IoT) หลายๆระบบมักจะมีการเชื่อมโยงเข้ากับระบบอินเตอร์เน็ตผ่านทางระบบไอโอที เครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ก็เป็นอีกหนึ่งระบบ ที่ได้ถูกนำมาเชื่อมโยงโดยผ่านระบบไอโอที ซึ่งในการออกแบบครั้งแรกของระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายได้มีการออกแบบการรับส่งข้อมูลเป็นลักษณะเฉพาะตัว เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเรื่องการประหยัดพลังงานมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลมีขนาดเล็ก แต่จากการเชื่อมโยงเข้าระบบไอโอที (IoT) จึงได้มีองค์กรต่างๆได้กำหนดมาตราฐานโพรโทคอลที่ใช้ในอินเตอร์เน็ตมาใช้ เพื่อเชื่อมโยงเครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สายเข้ากับระบบไอโอที ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอ วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ที่ชื่อว่า CU-MAC ที่ออกแบบมาเพื่อใช้การเชื่อมต่อเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเข้ากับระบบไอโอที ได้อย่างมีประสิทธภาพ ซึ่งจากผลการทดลองในงานวิจัยจะโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถนำมาใช้กับระบบไอโอที ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สูง โดยสามารถรับส่งข้อมูลได้ถึง 98.7% เมือมีอัตราการส่งของข้อมูลทุกๆ 3 วินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2559		

5471407221 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING
KEYWORDS: WIRELESS SENSOR NETWORKS / INTERNET OF THING / MAC LAYER PROTOCOL / DUTY-CYCLE / WSNS / IOT

TANAPOOM DANMANEE: LOW POWER MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL FOR INTERNET PROTOCOLS IN WIRELESS SENSOR. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. KULTIDA ROJVIBOONCHAI, 56 pp.

Nowadays “Internet of Things” as it known as IoT become the most of the popular technology in the Internet system. Wireless Sensor Networks (WSNs) is another system integrated with IoT systems, as sensor data from WSNs can be transmitted to IoT systems. The major scope of the Internet of Things is the ability of machines to communicate with other systems outside the immediate network that is a reason why organizations are trying to set standards for using IoT in WSNs. The organizations as IEEE, IETF, ITU-T and ISO/IET use the internet protocol standard such as CoAP, IP, UDP in their standards. This is one of the problems because researchers in that era think internet protocol has so many redundancy data and make a lot of power consumption. The first design of WSNs is to avoid using internet protocol in their system. In this paper, we propose a new MAC protocol named CU-MAC that is an asynchronous duty-cycle MAC protocol and suitable for integrating WSNs to IoT systems efficiently. CU-MAC uses multi-channel to perform continuous and bi-directional data transfer. It also has a mechanism to deal with the hidden terminal problem. CU-MAC can perform reliable data transfer at low duty-cycle. Moreover, in high-density IoT traffic load, it can achieve high data transfer rate and low end-to-end delay. We have implemented CU-MAC in the Contiki OS and tested it by using both simulation and real testbed. Our result shows that CU-MAC can achieve 98.7% delivery ratio and timely delivery packet when it performs sending sensors data in every 3second.

Department:	Computer Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Computer Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2016		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ รศ. ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมระบบสารสนเทศทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

1.บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 ขั้นตอนการทำวิจัย 3

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 Low Duty Cycle Concepts 4

3.งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

3.1 CoAP (Constrained Application Protocol) 5

3.2 6LowPAN 6

3.3 RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Network) 6

3.4 MAC Layer 6

4.แนวคิดและวิธีการดำเนินงาน 15

4.1 วัตถุประสงค์ และคุณสมบัติของ CU-MAC 15

5.ขั้นตอนการออกแบบการทำงานของ CU-MAC 17

5.1 ขั้นตอนการเพิ่มช่องทางการสื่อสาร 17

5.2 ขั้นตอนการรับส่งข้อมูลสองทิศทางใน CU-MAC 22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

5.3 ขั้นตอนการรับส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องของ CU-MAC 23

5.4 ขั้นตอนป้องกันปัญหา Hidden Terminal Problem ใน CU-MAC 26

6.ขั้นตอนการพัฒนา CU-MAC บนระบบปฏิบัติการ Contiki OS 27

7.ผลการทดลองและการวัดผล CU-MAC โพรโทคอล........ 29

7.1 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลสำเร็จ (Transmission Success Rate)........ 29

7.2 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลสองทิศทาง และความเท่าเทียมการส่ง (Fairness)........ 31

7.3 ผลการทดลองวัดผลการแก้ปัญหา Hidden Terminal Problem ใน CU-MAC........ 35

7.4 ผลการทดลองการเชื่อมเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เข้ากับระบบไอโอที........ 36

8.สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 48

8.1 สรุปผลการวิจัย 48

8.2 ปัญหาที่พบจากการวิจัย........ 48

8.3 ข้อเสนอแนะ 49

8.4 งานวิจัยในอนาคต........ 49

รายการอ้างอิง 50

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network) เป็นเครื่อข่ายที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของตัวรับรู้ที่ได้รับจากสภาวะแวดล้อม เช่น ข้อมูลอุณหภูมิ ข้อมูลความชื้น ข้อมูลแสงสว่าง เป็นต้น ซึ่งการทำงานของตัวรับรู้ (Sensor Mote) ได้ถูกออกแบบให้ทำงานลักษณะประหยัดพลังงาน สามารถทำงานรับส่งข้อมูลได้เป็นระยะเวลายาวนานเป็นปี โดยใช้พลังงานจากแบตเตอร์รี่ทั่วไปธรรมดา ซึ่งเครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สาย จึงมีความสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการทำงานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น การตรวจจับแผ่นดินไหว [1] การใช้ในการตรวจและช่วยเหลือผู้ประสบภัยจากภัยธรรมชาติ [2] การนำไปใช้ในงานทางการเกษตร [3] การตรวจจับโลกร้อน [4] ฯลฯ ซึ่งจะเห็นได้ว่าประโยชน์ของ เครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สายมีประโยชน์มากมาย แต่การใช้งานและการทำงานในลักษณะดังกล่าวนี้ นักวิจัยส่วนมากจึงได้ออกแบบโพรโทคอลต่างๆ ที่ใช้เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเอง โดยมิได้อ้างอิงกับโพรโทคอลที่ใช้แพร่หลายในอินเทอร์เน็ตปัจจุบัน ทำให้การเชื่อมระบบต่างๆเข้าหากัน เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลจึงเป็นการยาก และต้องมีการเรียนรู้ในระบบต่างๆก่อนที่จะนำมาใช้งานรวมกัน

ในสภาวะกรณ์ปัจุบัน เป็นการเข้ายุคของ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) หรือที่เรียกกัน ไอโอที (IoT) ซึ่งเครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สาย สามารถถูกนำเข้ามารวมใช้กับระบบไอโอที [5, 6] เพราะข้อมูลจาก การทำงานของตัวรับรู้ สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ประมวลผลได้อย่างมากมายในระบบไอโอที อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของระบบเครื่อข่ายตัวรับไร้สาย ออกไปให้ผู้ใช้งานทั่วไปสามารถเข้าถึงข้อมูลได้โดยง่าย จากที่กล่าวมาข้างต้นการที่จะทำให้เครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สายเชื่อมโยงเข้ากับระบบไอโอทีและผู้ใช้ทั่วไปหรือนักพัฒนาระบบสามารถเข้าถึงข้อมูลของเครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สาย จึงมีข้อจำกัด เนื่องจาก ผู้ใช้ทั่วไปหรือนัพัฒนาระบบจะต้องทำความเข้าใจ และเรียนรู้ลักษณะการทำงานของ โพรโทคอลต่างๆ ที่ทำงานอยู่บน เครื่อข่ายตัวรับรู้ไร้สาย แล้วทำการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเข้าสู่ระบบไอโอที ซึ่งในปัจจุบันนี้ จึงได้มีองค์กรต่างๆ อาทิเช่น IEEE IETF มีแนวความคิดที่จะนำโพรโทคอลต่างๆที่มีใช้อยู่แล้วในอินเทอร์เน็ต มาทำงานบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย และกำหนดเป็นมาตราฐานเพื่อเป็นการลดเวลาที่ต้องใช้ในการเรียนรู้ โพรโทคอล ต่างๆในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย [7] และเพื่อให้การขยายตัวของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เชื่อมต่อกับระบบไอโอทีได้โดยง่าย

ข้อจำกัดหนึ่งอย่างที่ไม่สามารถทำให้การนำโพรโทคอลที่ถูกกำหนดโดยองค์กรต่างๆถูกนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือการรับส่งข้อมูลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายตามมาตราฐานของ IEEE 802.15.4 [8, 9] แตกต่างจากเครือข่ายไร้สายแบบปกติที่ใช้มาตราฐาน IEEE 802.11a/b/g/n โดยมี

ข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์ไร้สายที่ออกแบบแตกต่างกัน เพราะใน IEEE 802.15.4 ได้ถูกออกแบบให้มีการประหยัดพลังงานในการรับส่งข้อมูล จึงทำให้ไม่ว่าจะเป็น ขนาดของเฟรมที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล ระยะทางในการรับส่งข้อมูล ความเร็วสูงสุดในการโอนถ่ายข้อมูล จึงแตกต่างจาก IEEE 802.11a/b/g/n เป็นอย่างมาก

ขนาดของเฟรมที่ใช้ในการรับส่งของอุปกรณ์ไร้สายใน IEEE 802.15.4 [10] จะมีขนาดเฟรมเพียง 150 ไบท์ (Byte) ซึ่งถ้าเรานำโพรโทคอลที่ใช้ในอินเทอร์เน็ตซึ่งใช้ในการรับส่งข้อมูลของระบบไอโอที เช่น ทีซีพี (TCP) [11] ซึ่งมีขนาดส่วนหัวข้อมูล 20 ไบท์ มาทำงานใน IEEE 802.15.4 จะเห็นได้ว่าเรามีการสูญเสียพื้นที่การจะเก็บข้อมูลไปประมาณ 13% อีกทั้งถ้ามองในกรณีของเฟรมที่ใช้ใน Ethernet ทั่วไปจะมีขนาดของ MTU 1500 Byte นั้นหมายความว่า ถ้าจะให้มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลของอินเทอร์เน็ตที่ใช้กับระบบไอโอทีโดยตรงกับ เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย จำนวนข้อมูลที่ทำงานอยู่บนเครือข่ายไร้สายจะมีจำนวนมากกว่า 10 เท่า ของจำนวนข้อมูลที่ทำงานอยู่บนไอโอทีที่มีขนาดที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายไม่ได้ออกแบบให้มีการรับส่งข้อมูลปริมาณมากๆในเครือข่าย ซึ่งปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนจะส่งผลกระทบต่อเครือข่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลกระทบการเชื่อมโยงเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เข้ากับระบบไอโอที เพื่อหาผลกระทบจากเชื่อมโยงที่ส่งผลกระทบกับการควบคุมการใช้งานสื่อกลาง และออกแบบวิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย โดยให้สามารถนำระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้ไปเชื่อมต่อกับระบบอินเตอร์เน็ต หรือระบบไอโอที ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. งานวิจัยเป็นการมุ่งเน้นไปที่วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงาน (IEEE 802.15.4) ซึ่งในอุปกรณ์การทดลองเป็นแบบโปรแกรมแก้ไขเปลี่ยนแปลงได้

2. ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ออกแบบโพรโทคอลการรับส่งข้อมูลแบบพิเศษ อย่างอื่นใดเพื่อให้ทำงานวิธีการควบคุมสื่อกลางที่ออกแบบ แต่จะใช้โพรโทคอลที่เป็นมตราฐานนเช่น ทีซีพี หรือ ยูดีพี เท่านั้น

3. การวัดผลการรับส่งข้อมูลจะทำกับวัดในแง่ของ การประหยัดพลังงานที่ใช้ในการรับส่ง ความเร็วที่ใช้การรับ ปริมาณข้อมูลที่รับส่งสำเร็จ ในขั้นตอนวิธีการควบคุมเท่านั้น

4. งานวิจัยได้ทดสอบบนอุปกรณ์จริงเพื่อหาความสามารถในการรับส่ง และใช้วิธีการจำลอง (Simulation) เพื่อหาปริมาณการใช้พลังงานเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่สามารถทำงานจริง อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เพื่อเชิ่มโยงเข้ากับระบบไอโอทีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 ขั้นตอนการทำวิจัย

1. ทำการวิเคราะห์ พิสูจน์และทดสอบ MAC Layer Protocol ในงานวิจัยอื่นๆก่อนหน้านี้ เพื่อหาจุดเด่น และจุดอ่อน เมื่อนำอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลมาทำงานบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย หรือทำการเชื่อมโยงเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเข้ากับระบบไอโอที

2. ออกแบบแนวคิดสำหรับการทำงานของ MAC Layer Protocol สำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย และสอดคล้องกับมาตราฐานที่ใช้ในการเชื่อมโยงกับระบบไอโอที

3. การสร้าง MAC Layer Protocol ตามที่ได้วางแนวคิดไว้ เพื่อนำไปทดสอบการใช้งานจริง

4. ทำการทดลอง MAC Layer Protocol ที่ได้สร้างไว้โดยทดสอบบนสถานะกรณ์ต่างๆ ที่อ้างอิงจากพฤติกรรมของอินเทอร์เน็ตโพรโทคอล และในระบบไอโอทีจริง

5. หาข้อสรุปที่ได้ เพื่อให้ได้วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่สามารถทำงานได้จริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

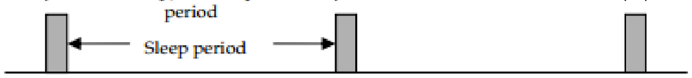
2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แนวคิดการลดใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น (Low Duty Cycle Concepts)

2.1 Low Duty Cycle Concepts

เนื่องจากตัวรับรู้ไร้สาย (Mote) ได้ถูกออกแบบให้มีการใช้พลังงานที่ต่ำ เพื่อยืดระยะเวลาในการใช้งานโดยผ่านแบตเตอร์รี่ให้ได้ยาวนานที่สุด จึงมีการออกแบบตัวรับรู้ไร้สายให้ใช้ processor ที่กินพลังงานต่ำเช่น MSP430 โดยการทำงานของตัวตัวรับรู้ไร้สายได้มีการพิสูจน์ให้เห็นแล้วว่า การกินพลังงานในตัว mote มากกว่า 80% จะเกิดขึ้นจากการรับส่งข้อมูลในการทำงานของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย (Wireless module) [12]

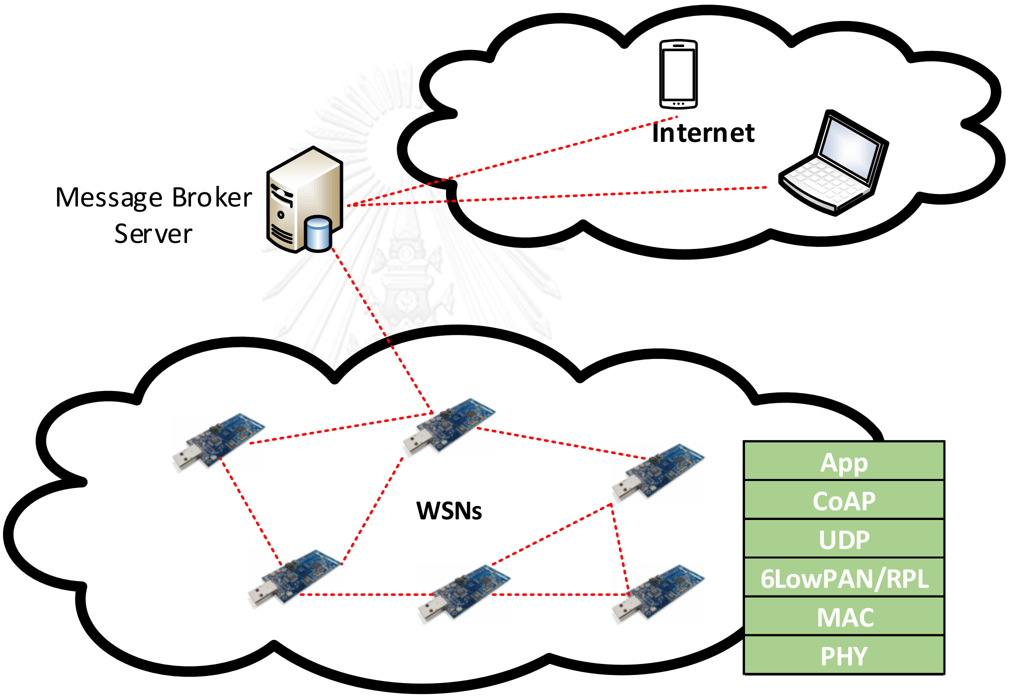
ซึ่งจากสาเหตุที่การกินพลังงานส่วนมากเกิดขึ้นในส่วนของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย จึงได้มีแนวคิดที่จะลดการกินพลังงานในส่วนนี้ลง จากงานวิจัย[12, 13] ได้ศึกษาและแสดงให้เห็น ว่าช่วงเวลาที่โมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย ทำงานและกินพลังงานจะเป็นส่วน ที่โมดูลการส่งข้อมูลไร้สายเปิดตัวเองรอรับข้อมูลถึงแม้ว่าจะไม่มีข้อมูลส่งมาหาตัวรับรู้ไร้สายตัวนั้นเลย จึงเป็นที่มาของแนวคิด Low Duty Cycle ที่เป็นแนวคิดที่จะให้ตัวรับรู้ไร้สายทำงานในส่วนของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย โดยเปิดและปิดเป็นช่วงๆ โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า A periodic wake-up scheme ซึ่งจะประกอบไปด้วยคาบของเวลาที่คงที่ เพื่อให้ mote เปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายเพื่อรับฟังว่ามีข้อมูลส่งมาหาหรือไหม ถ้าไม่มี ตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่นแจ้งว่ามีข้อมูลที่ต้องการจะส่งมา ก็จะทำการโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย แล้วรอคาบเวลาถัดไปเพื่อตื่นมารับฟังใหม่ แต่ถ้ามีข้อมูลส่งมาก็จะทำการรับข้อมูลแล้วปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย ลงเมื่อรับข้อมูลเสร็จเรียบร้อย แล้วรอคาบเวลาถัดไปเพื่อเปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายมารับฟังใหม่ ดังรูปที่ 1 [14]



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการทำงานหลับตื่นโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายใน ตัวรับรู้ไร้สาย

3.งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ โดยส่วนแรกจะเกี่ยวข้องกับมาตราฐานที่กำหนดโดย องค์กร IEEE และ IETF ได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับการนำ เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายนำไปเชื่อมต่อกับระบบไอโอที ซึ่งมาตราฐานที่กำหนดการใช้ เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 และส่วนที่สองเป็นส่วนของ วิธีการควบคุมการใช้สื่อตัวกลางที่ใช้อยู่ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย



รูปที่ 1 แสดงมาตราฐานที่ใช้ในการเชื่อมต่อเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเข้ากับระบบไอโอที

3.1 CoAP (Constrained Application Protocol)

[15] เป็นโพรโทคอลที่พัฒนาจาก IETF Standard โดยเป็นแอปพิเคชั่นโพรโทคอลที่ใช้ถ่ายโอนเอกสารคล้ายกับ http protocol แต่แตกต่างโดยการออกแบบให้มี อุปกรณ์ embeded ขนาดเล็ก และทำงานบน UDP โดยการทำงานจะเป็นลักษณะ Client/Server ซึ่งจะมีการส่ง method เช่น GET, PUT, POST และ Delete resource แล้ว Server จะตอบกลับซึ่งการทำงานลักษณะนี้จะทำให้มีการส่งทั้งเข้าและออกจากเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

3.2 6LowPAN

6LowPAN [16] คือ IPv6 ที่ถูกบีบอัดและตัดส่วนที่ซ้ำซ้อนออกโดยถูกพัฒนาจาก IEEE เพื่อนำมาใช้ใน IEEE802.15.4 เนื่องจากขนาดของ Data frame บน IEEE802.15.4 มีขนาดเล็กเพียง 150 Byte ซึ่งเล็กเกินกว่าที่ใช้ IPv6 แบบเต็ม จึงได้มีการตัดส่วนซ้ำซ้อนหรือที่ไม่ต้องใช้งานบน เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายออก เพื่อให้ขนาดของส่วนที่ประกาศมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

3.3 RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Network)

RPL[17] เป็น Routing Protocol ที่ใช้วิธีการสร้าง destination orientated directed acyclic graph (DODAG) ซึ่งการสร้าง graph เส้นทางการเดินทางของข้อมูลให้เหมาะสมที่สุด โดยจะมีการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆเพิ่มเข้าไปในระบบเพิ่มเติม เช่น ค่าพลังงานที่เหลืออยู่ ค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูล และอื่นๆ เพื่อให้ได้เส้นทางที่เหมาะที่เหมาะสมมากที่สุด

3.4 MAC Layer

มีงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้ทำการออกแบบวิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (MAC Layer protocol for WSN) ซึ่งในที่นี้สามารถแบ่งออกไปได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ โดยจำแนกได้จากขั้นตอนวิธีการที่ใช้ในการประกาศการเชื่อมต่อข้อมูล ดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.1 Synchronous Low Duty Cycle MAC Protocols [14]

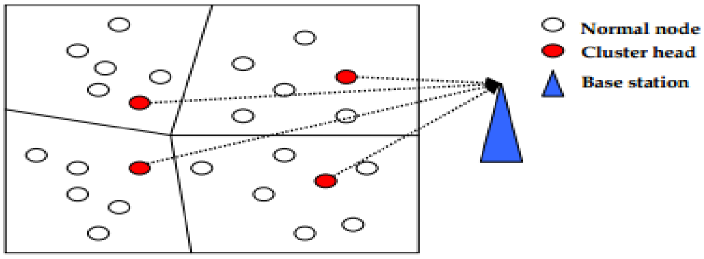
ในงานวิจัยในกลุ่มนี้จะเป็นการออกแบบ MAC Layer protocol ที่เน้นไปที่ตัวiyรับรู้ไร้สายต้องมีการแลกเปลี่ยนตารางเวลาในการตื่นหลับของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย ในตัวเองกับเพื่อนบ้านตัวอื่นด้วย ตัวอย่างการทำงานของโพรโทคอลทำงานในลักษณะนี้ได้แก่

3.4.1.1 Power Aware Clustered TDMA (PACT) [18]

PACT เป็น MAC Layer protocol ที่ออกแบบโดยมีการแบ่งตัวรับรู้ไร้สาย ออกเป็นกลุ่มๆตามแนวคิดเรื่องPassive clustering (Gerla et al., 2000) โดยที่แต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้าของกลุ่ม ซึ่งจะเก็บตารางเวลาการทำงานของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย ในตัวรับรู้ไร้สาย ของสมาชิกในกลุ่มไว้ ซึ่งการส่งข้อมูลทั้งหมดจะต้องทำผ่านหัวหน้ากลุ่ม ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะทำให้ระยะเวลาการทำงานของหัวหน้ากลุ่มจะสั้นกว่าสมาชิกเนื่องจากต้องเปิดปิดโมดูลรับส่งข้อมูลไร้สาย เป็นจำนวนมาก และสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมาก

3.4.1.2 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [19]

Leach เป็นการทำงานแบบ TDMA Base เหมือนกับ PACT การทำงานคล้ายกับ PACT แต่แตกต่างที่ตัวรับรู้ไร้สาย ที่เป็นหัวหน้าของกลุ่มใน Leach จะมี 802.11a/b/g/n โมดูลรับส่งข้อมูลไร้สาย อีกหนึ่งชุดคอยทำหน้าที่ส่งข้อมูลข้ามกลุ่ม โดยมี Base Station ของ 802.11a/b/g/n คอยเป็นตัวเชื่อมข้อมูลระหว่างกลุ่ม ดังรูปที่ 2 ซึ่งปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นก็ยังพบได้เช่นเดียวกับ PACT



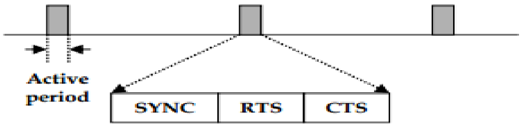
รูปที่ 3 แสดงการทำงานของ LEACH [19]

3.4.1.3 Self-Organizing Slot Allocation (SRSA) [20]

SRSA เป็นโพรโทคอลที่ได้ปรับปรุงจาก LEACH ที่มีเพียงแค่ Base Station ชุดเดียว แต่ SRSA ได้ออกแบบให้มี Base Station จำนวนหลายชุดที่มากขึ้น และการสามารถปรับเปลี่ยนหัวหน้าของปรับเปลี่ยนหัวหน้าของตัวรับรู้ไร้สายในกลุ่มได้ โดยเลือกจากจำนวนพลังงานที่ยังเหลืออยู่ภายในตัวรับรู้ไร้สาย เพื่อให้การทำงานของตัวรับรู้ไร้สาย ทั้งหมดใช้พลังงานที่เฉลี่ยใกล้กันทั้งหมด

3.4.1.4 Sensor-MAC (S-MAC) [21]

S-MAC ใช้เทคนิค Periodic sleep กับ Virtual cluster โดยจะให้กลุ่มของ Virtual cluster ตื่นขึ้นมาพร้อมๆกัน และมีการแบ่งคาบเวลาการทำงานของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายแบบคงที่ แล้วใช้เทคนิคการรับส่งข้อมูลแบบ CSMA โดยแบ่งคาบเวลาเป็น 3 ส่วนคือ SYNC RTS และ CTS ซึ่งถ้ามีการรับส่งที่พร้อมกันจะใช้วิธีการสุ่มเวลาการเปิดทำงาน (Random back-off) เช่นเดียวกับ CSMA ซึ่งในการทำงานลักษณะนี้ อาจจะมีบางตัวรับรู้ไร้สาย ที่ทำงานอยู่ใน Virtual cluster หลายๆอัน จะทำให้ตัวรับรู้ไร้สาย ตำแหน่งนั้นมีการใช้พลังงานที่มากกว่าตัวรับรู้ไร้สายอื่นๆ รูปที่ 4 แสดงการทำงานของ S-MAC



รูปที่ 4 แสดงการแบ่งคาบเวลาการทำงานของ S-MAC

3.4.1.5 Traffic-Adaptive Medium Access (TRAMA) [22]

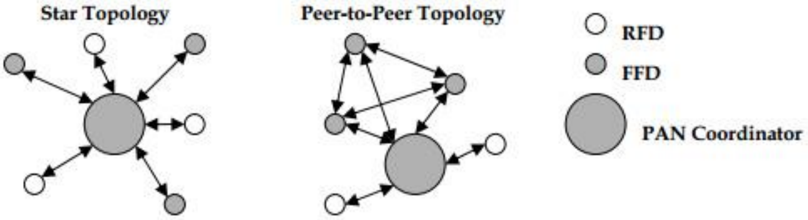
TRAMA เป็น TDMA-based MAC โดยจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลการตื่นหลับของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สาย ใน 2 hop ของเพื่อนบ้าน เพื่อที่จะมีการพยายามตั้งเวลาการหลับตื่นของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายทั้งระบบ และเมื่อต้องมีการส่งข้อมูลไปยังเพื่อนบ้านก็จะตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของเพื่อนบ้านที่ได้ทำการแลกเปลี่ยนกัน ซึ่งข้อเสียของ TRAMA คือการที่จะต้องมีการแลกเปลี่ยน ตารางการทำงานของเพื่อนบ้านทั้งหมด ซึ่งถ้ามีการปรับตารางการทำงานใหม่ก็จำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนใหม่ทั้งระบบ

3.4.1.6 Synchronous IEEE 802.15.4 MAC [23]

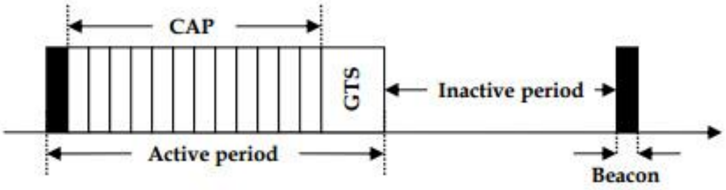
IEEE 805.15.4 MAC มีรูปแบบการทำงานทั้ง Synchronous และ Asynchronous ซึ่งตรงส่วนนี้ขอกล่าวในส่วนของ Synchronous ก่อน ในส่วนการทำงานของ IEEE 802.15.4 MAC จะแบ่งการทำงานตาม Topology ได้สองรูปแบบคือ Star Topology และ Peer Topology ซึ่งตัวรับรู้ไร้สายในกลุ่มจะถูกแบ่งออกเป็น Full function device (FFD) และ Reduce function device (RFD)

FFD จะสามารถทำงานได้ใน 3 รูปแบบ คือ PAN Coordinator, A Coordinator และ device ธรรมดา ส่วน RFD จะสามารถทำงานได้เฉพาะ device ธรรมดา ความแตกต่างของแต่ละรูปแบบ คือ PAN Coordinator จะเป็นตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้ในการควบคุมการรับส่งข้อมูลของกลุ่มเพื่อข้ามกลุ่ม ส่วน Coordinator เป็นตัวรับรู้ไร้สายที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มเข้ากับกลุ่มอื่น ตัวรับรู้ไร้สายธรรมดาจะเป็นตัวรับรู้ไร้สายที่สามารถส่งข้อมูลได้เฉพาะในกลุ่มได้เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 5

การรับส่งใน IEEE 802.15.4 จะให้ตัวรับรู้ไร้สายตื่นมาพร้อมกัน แล้วเริ่มทำการรับส่งข้อมูลโดยแบ่งการรับส่งข้อมูลเป็น สองรูปแบบพร้อมกัน คือ Contention Access Period (CAP) และ Guaranteed Time Slots (GTS) ซึ่งการทำงานในส่วน CAP จะเป็นการทำงานเหมือน CSMA-CA โดยมีจำนวน 16 Slots เพื่อแย่งช่องการรับส่งข้อมูล และมี 7 Slots ในส่วน GTS ที่กำหนดการรับส่งจาก PAN Coordinator ดังรูปแสดงการทำงานที่ 6



รูปที่ 5 แสดง Topology ของ IEEE 802.15.4 MAC [23]



รูปที่ 6 แสดงการแบ่งคาบเวลาการทำงานใน IEEE 802.15.4 MAC [23]

3.4.1.7 An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks (T-MAC) [24]

T-MAC เป็น MAC protocol ที่ถูกพัฒนาต่อจาก S-MAC โดยมีการปรับเป็นการใช้แบบ Dynamic Duty-Cycle แทนการกำหนดค่าแบบของเดิม ซึ่งการทำลักษณะจะให้มีค่าคาบการส่งข้อมูลได้มากกว่าที่ S-MAC ทำ แต่ T-MAC ก็ยังพบปัญหาเรื่องหลับของเพื่อนบ้าน เมื่อมีอุปกรณ์บางตัวที่ต้องการส่ง เพราะคาบเวลาที่ไม่เท่ากัน

3.4.1.8 Reservation Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks (R-MAC) [25]

R-MAC เป็น MAC protocol ที่ทำงานคล้ายกับ S-MAC โดยมีการขั้นตอนการำงานเป็น SYNC DATA และ SLEEP โดยจุที่แตกต่างจาก S-MAC คือการเพิ่ม Pioneer Frame ลงไปในขั้นตอนที่ส่ง DATA ซึ่งจะทำให้สามารถจองช่องการทำงานในช่วงที่หลับได้ ซึ่งเป็นเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการส่งข้อมูลลักษณะ Broadcast ได้

3.4.1.9 A Cross-Layer Duty Cycle MAC Protocol Towards Pipelining for Wireless Sensor Networks (P-MAC) [26]

P-MAC เป็น MAC protocol ที่ออกแบบให้สามารถส่งข้อมูลต่อเนื่องได้โดยการประกาศการเชื่อมต่อภายในครั้งเดียว ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ดีกว่า R-MAC และมีการชนกันของข้อมูลที่น้อย แต่ภาย P-MAC ก็ยังมีจุดอ่อนที่ไม่สามารถส่งข้อมูลในลักษณะเส้นตรงได้ สามารถส่งข้อมูลไดในลักษณะที่ Topology เป็นแบบต้นไม้เพียงเท่านั้น

3.4.2 Asynchronous Low Duty Cycle MAC Protocols [14]

ในงานวิจัยกลุ่มนี้จะแตกต่างจากกลุ่ม Synchronous โดยไม่จำเป็นที่ต้องแลกเปลี่ยน ตารางการทำงานของโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายของตัวเองกับเพื่อนบ้าน ไม่จำเป็นต้องมีตัวควบคุมเวลาตัวกลาง (Global time) และไม่มีการแบ่งตัวรับรู้ไร้สายออกเป็นกลุ่มๆ ตัวอย่างงานวิจัยในกลุ่มนี้ได้แก่

3.4.2.1 RF Wake-up Protocol [21]

RF Wake-up Protocol เป็นงานวิจัยตัวแรกสุดของการทำ Asynchronous โดย 9 ตัวรับรู้ไร้สายจะทำการเปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายขึ้นมาทุก 4 วินาที แล้วตรวจสอบช่องสัญญาญว่ามีการทำงานอยู่หรือไหม ถ้ามีก็จะทำการเปิดตัวเองต่อไปจนกว่าจะได้ Fame ที่บอกการส่งข้อมูล เมื่อรับข้อมูลเสร็จก็จะทำการปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายแล้วรอเวลาเปิดอีกครั้งใน 4 วินาทีถัดมา สำหรับผู้ที่ต้องส่งข้อมูลสามารถเปิดตัวเองขึ้นมาแล้วส่งพลังงานเข้าไปใน Wireless channel เพื่อให้ตัวรับรู้ไร้สาย ผู้รับข้อมูลเปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายรอรับข้อมูล ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการส่งพลังงานของ Wireless Channel ต่อไปนี้ขอเรียกว่า Preamble ขั้นตอนการทำงานของ RF Wake-up Protocol จะมีความล่าช้าในการส่งข้อมูลเนื่องจากการเปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายทุกๆ 4 วินาที อีกทั้งตัวรับรู้ไร้สายที่ไม่ได้เป็นผู้รับข้อมูลก็ยังจำเป็นต้องเปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายเพื่อรอรับข้อมูลด้วยทำให้สูญเสียพลังงานเกินความจำเป็น

3.4.2.2 Wireless Sensor MAC (WiseMAC) [27]

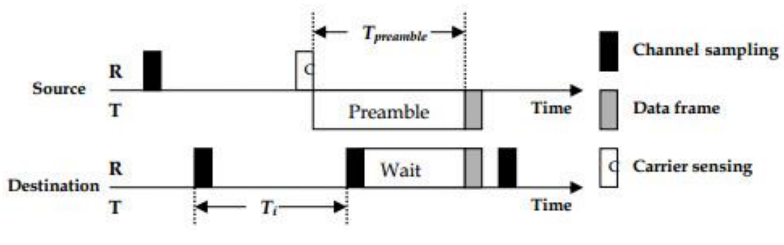
WiseMAC จะมีการทำงานแบบ Star Topology โดยการรับส่งข้อมูลทั้งหมดจะทำผ่านตัวกลางทั้งหมดโดยตัวรับรู้ไร้สายตัวกลางจะเรียนรู้และประมาณเวลาตื่นของเพื่อนบ้านแล้วคอยส่ง Preamble ขนาดสั้นๆเพื่อให้เพื่อนบ้านที่ต้องส่งข้อมูลเปิดโมดูลการส่งข้อมูลไร้สายเพื่อรอรับข้อมูล แต่วิธีการแบบ Star Topology พบว่าตัวรับรู้ไร้สายที่เป็นตัวกลางจะใช้พลังงานมากกว่าตัวอื่นและระยะเวลาการใช้งานตัวรับรู้ไร้สายจะน้อยที่สุด

3.4.2.3 Asynchronous IEEE 802.15.4 MAC [23]

ในส่วนนี้ Asynchronous จะทำงานแทบจะเหมือนกับ Synchronous IEEE 802.15.4 MAC แต่จะแตกต่าง ที่ไม่จำเป็นต้องมี PAN Coordinator และยกเลิกในส่วนของ GTS ในคาบเวลาออก โดยให้ทุก Slot การทำงานเป็นแบบ CAP ทั้งหมด และมีการควบคุมการทำงานแบบ CSMA-CA ทั้งหมด ซึ่งการทำงานลักษณะนี้จะพบว่าเมื่อเกิดชนกันของการส่งข้อมูลอาจจะทำให้ Slot ในช่วง CAP บ้างช่วงไม่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.4.2.4 Berkeley MAC (B-MAC) [28]

B-MAC จะมีขั้นตอนการทำงานโดยให้ทุกตัวรับรู้ไร้สายมีคาบเวลาที่คงที่ในการเปิดโมดูลการรับส่งข้อมูลไร้สายขึ้นมา โดยเมื่อเปิดขึ้นมาจะทำการตรวจสอบว่ามีพลังงานในช่องสื่อสารนั้นหรือไหม ซึ่งค่าพลังงานจะเป็นพลังงานของ Preamble ที่ถูกปล่อยออกมาจากตัวรับรู้ไร้สายที่ต้องการส่งข้อมูล โดย Preamble ที่ส่งจะมีระยะเวลาเท่ากับคาบเวลาที่ใช้ในการเปิดโมดูลการรับส่งข้อมูลไร้สายของทุกตัวรับรู้ไร้สายเพื่อเป็นการยื่นยันว่าทุกตัวรับรู้ไร้สายจะได้ยิน preamble นั้น หลังครบคาบเวลา ตัวรับรู้ไร้สายผู้ส่งถึงจะทำการส่งข้อมูล กรณีที่ ตัวรับรู้ไร้สายที่ได้รับข้อมูลไม่ใช่ผู้รับก็จะยกเลิก ข้อมูลการส่งนั้นออกไป ซึ่งรูปแบบการทำงานของ B-MAC ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงการทำงานของ B-MAC

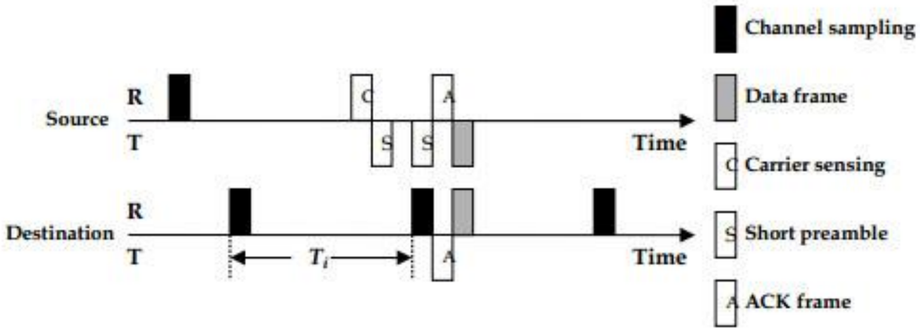
3.4.2.5 RI-MAC [29]

RI-MAC เป็นโพรโทคอลทำงานโดยให้ผู้รับข้อมูลเป็นผู้เริ่มการเชื่อมต่อ โดยขั้นตอนการทำงานจะเริ่มจากเมือผู้รับข้อมูลตื่นขึ้นมาจากคาบเวลาการหลับจะทำการประกาศออกไปในช่องสัญญาญ ถ้ามีผู้ส่งที่ตื่นขึ้นมาและต้องการส่งข้อมูลหาผู้รับนั้น จะใช้วิธีการของ CSMA ในการตรวจสอบว่าผู้อื่นส่งข้อมูลอยู่หรือไหม ถ้าไม่มีก็จะทำการส่งข้อมูลให้ผู้รับ การทำงาน RI-MAC มีข้อดีที่ประหยัดพลังงานได้มาก เนื่องจากผู้ส่งไม่จำเป็นต้องประกาศ preamble เหมือนกับวิธีการที่ให้ผู้ส่งเป็นผู้ประกาศการเชื่อมต่อ แต่วิธีการนี้อาจจะมีความล่าช้าในการส่งข้อมูลมากกว่า การที่ให้ผู้ส่งเป็นผู้เริ่มการเชื่อมต่อ

3.4.2.6 X-MAC [30]

X-MAC เป็น MAC Layer protocol ที่มีการพัฒนาต่อออกมาจาก B-MAC โดยแก้ปัญหาเรื่องที่ เมื่อมีการส่ง preamble ออกมาจากตัวรับรู้ไร้สายที่ต้องการส่งข้อมูล ตัวรับรู้ไร้สายที่ไม่ได้เป็นตัวรับข้อมูลจะต้องเปิดโมดูลการรับส่งข้อมูลไร้สายไว้จนกว่าจะมีการส่ง data frame ออกมา ถึงจะรู้ว่าข้อมูลที่ส่งไม่ได้เป็นของตัวเอง แล้วถึงปิดโมดูลการรับส่งข้อมูลไร้สายออกไปซึ่งเป็นสูญเสียพลังงานเกินความจำเป็น X-MAC ได้ทำการแบ่ง preamble ออกเป็น data frame ขนาดเล็กๆ โดยภายใน frame จะมีการบรรจุ ID ของ mote ปลายทางของผู้รับข้อมูลเอาไว้ เมื่อตัวรับรู้ไร้สายได้รับ preamble นั้น จะทำการตรวจสอบ ID ที่บรรจุภายใน frame ถ้าไม่ใช่เป็นผู้รับข้อมูลก็สามารถปิดโมดูลการรับส่งข้อมูลไร้สาย ได้ภายในทันที อีกทั้งยังสามารถลด latency ของการรับส่งข้อมูลได้โดยการเพิ่ม acknowledgement เพื่อลดจำนวนการส่ง preamble ในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายผู้รับตื่นขึ้นมาก่อนครบคาบเวลา ซึ่งวิธีการของ X-MAC สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 8

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย [31] ที่นำ X-MAC ไปวิเคราะห์หาจุดเด่น และจุดอ่อนของโพรโทคอล เมื่อถูกนำมาใช้เชื่อมต่อกับระบบไอโอที ที่ใช้อินเตอร์เน็ตโพรโทคอลเป็นมาตราฐาน ซึ่งจากงานวิจัยนี้ จะพบว่า X-MAC ยังมีปัญหาเรื่องการออกแบบที่งานวิจัยนี้เรียกว่า back spot algorithm ซึ่งเกิดจากการทำงานที่คาบเวลาการส่งข้อมูลในการประกาศข้อมูลสิ้นสุด ทับกับเวลบาที่ผู้รับข้อมูลประกาศ อีกทั้งยังพบปัญหาเรื่อง Hidden Terminal Problem ที่เกิดขึ้นปริมาณมากเมื่อมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง



รูปที่ 8 แสดงการทำงานของ X-MAC

3.4.2.6 Proposal of Receiver Initiated MAC Protocol for WSN in urban environment using IoT [32]

เป็น MAC Layer protocol ที่นำ RI-MAC ไปพัฒนาต่อเพื่อนำไปเชื่อมต่อกับระบบไอโอที ที่เป็นการใช้งานส่งข้อมูลในเมือง โดยขั้นตอนการพัฒนา ได้มีการออกแบบให้ RI-MAC ทำงานโดยใช้ช่องสัญญาณในการรับข้อมูลหลายๆช่องสัญญาณ เพื่อหลบผลกระทบจากสัญญาณอุปกรณ์สื่อสารไร้สารต่างๆ ที่ส่งผลกระทบกับการชนกันของสัญญาณการส่งข้อมูลของ IEEE 802.15.4

3.4.3 QoS-aware MAC Protocols [33]

ในงานวิจัยกลุ่มนี้จะแตกต่างจากกลุ่มทุกกลุ่มที่กล่าวมา ซึ่งงานวิจัยในกลุ่มนี้จะเป็นการออก MAC layer protocol ที่เน้นไปที่งานเฉพาะด้านไม่ว่างจะเป็นการรับส่งข้อมมูลภาพ เสียง หรือ ข้อมูลที่สำคัญที่ต้องที่ต้องมีการระดับความสำคัญในการส่งข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยกลุ่มจะเป็นการใช้พื้นฐานของ MAC layer protocol ที่กล่าวมาข้างต้นนำมาพัฒนาต่อ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างในการรับส่งข้อมูล ตัวอย่างเช่น RL-MAC [34] ซึ่งเป็นพัฒนาต่อจาก R-MAC โดยมีการปรับการทำงานของ Duty-Cycle ที่ใช้ใน RL-MAC ให้ทำงานแบบ Dynamic โดยเรียนรู้จากพฤติกรรมการส่ง หรือ Q-MAC [35] ซึ่งเป็น MAC layer protocol ที่ทำงานเช่นเดียวกับ S-MAC โดยได้เพิ่มความสามารถในการจัดระดับความสำคัญจากอุปกรณ์การส่ง เข้าไปในช่วงการแลกเปลี่ยนข้อมูลการส่ง ซึ่งงานในกลุ่มนี้สามารถสรุปคุณสมบัติข้อดีข้อเสียได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของ MAC layer protocol ในกลุ่ม QoS

Protocol	Type	Duty-Cycle	Traffic adaptive	Energy awareness	Complexity	Scalability
PSIFT [36]	CSMA	Dynamic	No	No	Low	Good
Saxena [37]	CSMA	Static	Yes	Yes	High	Good
PR-MAC [38]	CSMA	Static	No	No	Low	Weak
RL-MAC [34]	CSMA	Static	Yes	Yes	High	Good
Q-MAC [33]	CSMA	Hybrid	No	Yes	Moderate	Good
PQ-MAC [39]	TDMA	Static	No	Yes	High	Weak
QoMOR [40]	ALOHA	Static	No	No	Low	Weak
I-MAC [41]	TDMA	Dynamic	Yes	No	Moderate	Weak
Diff-MAC [42]	CSMA	Hybrid	Yes	Yes	High	Good
SASW-CR [42]	ALOHA	Static	No	No	Moderate	Weak
EQ-MAC [43]	TDMA	Static	Yes	Yes	High	Weak
EQoSA [44]	TDMA	-	Yes	Yes	Moderate	Weak

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.แนวคิดและวิธีการดำเนินงาน

จากปัญหาที่พบจากการนำโพรโทคอลในอินเทอร์เน็ตมาทำงานบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย หรือการเชื่อเครือข่ายไร้สายเข้ากับระบบไอโอที จะพบว่าไม่ว่าจะเป็นการนำ TCP UDP หรือการใช้ CoAP ที่ใช้ในอินเตอร์เน็ตมาทำงานจะพบปัญหาที่เกิดจากการทำงานในชั้น MAC Layer ของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายทั้งนี้สาเหตุเกิดมาจาก เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ไม่ได้ถูกออกแบบมาให้มีการรับส่งข้อมูลปริมาณที่เยอะ และหลายๆทิศทางพร้อมๆกัน อีกทั้งเพื่อเป็นการที่จะให้เกิดการประหยัดพลังงานให้ได้มากที่สุดจึงได้ลดความเร็วที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งแนวคิดนี้ขัดกับขั้นตอนการทำงานของ TCP UDP หรือ CoAP ที่ต้องการรองรับผู้ใช้งานจำนวนมาก อีกทั้งขนาดของ MTU ที่ใช้ใน IEEE802.15.4 ก็มีขนาดที่เล็กกว่า 10 เท่าบน Ethernet และ IEEE802.11a/b/g/n ซึ่งทำให้จำนวนข้อมูลที่ใช้รับส่งบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายต้องมีปริมาณมากกว่า ในกรณีที่ขนาดข้อมูลที่ส่งมากกว่า 150 ไบท์ และถูกนามาใช้ในระบบ IoT จึงเป็นที่มาของแนวคิดที่จะออกแบบ วิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางแบบประหยัดพลังงานสำหรับอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายใหม่ทั้งหมดโดยมีแนวคิดที่จะนำพฤติกรรมที่ลักษณะเฉพาะของ TCP UDP หรือ CoAP ที่ใช้ในอินเทอร์เน็ตโดยเฉพาะ IoT มาออกแบบ MAC Layer ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ซึ่งต่อไปไปนี้ขอเรียกโพรโทคอลของงานวิจัยนี้ว่า CU-MAC

4.1 วัตถุประสงค์ และคุณสมบัติของ CU-MAC

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

CU-MAC มีวัตถุประสงค์ที่จะทำ MAC Layer Protocol ที่สามารถทำงานได้ดี เมื่อมีการนำอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลมาทำงานบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย หรือทำการเชื่อมต่อเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเข้ากับระบบ IoT หรือการปรับเปลี่ยนการทำงานจากเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายไปเป็น เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายแบบสื่อประสม อีกทั้งยังต้องสามารถทำงานได้ดีเมื่อใช้กับโพรโทคอลการรับส่งข้อมูลที่มีอยู่ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเดิม โดยการออกแบบมุ่งเน้นที่จะให้เป็น MAC Layer แบบประหยัดพลังงานโดยใช้ แนวคิด Low Duty Cycle เหมือนเดิม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่า การทำงานของ MAC Layer แบบ Asynchronous บนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายมีข้อจำกัดที่น้อยกว่าแบบ Synchronous ไม่ว่าจะเป็นเรื่อง Topology หรือ Overhead ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนตารางการทำงานของ Wireless module ดังนั้น CU-MAC จึงได้เลือกที่จะทำงานแบบ Asynchronous โดยคุณสมบัติของ CU-MAC ที่ตั้งไว้ในการออกแบบมีดังต่อไปนี้

• ความสามารถที่ต้องส่งข้อมูลมากกว่าหนึ่งคู่ส่งในเวลาพร้อมกัน

• ความสามารถรับส่งข้อมูลพร้อมๆกัน ในกรณีที่มีความต้องการส่งข้อมูลผ่านหากันจากผู้ส่งไปหาผู้รับ และจากผู้รับไปหาผู้ส่ง (Piggyback)

• ความสามารถในการรับส่งข้อมูลแบบต่อเนื่อง ในกรณีที่มีข้อมูลส่งไปในทิศทางเดียวกัน และปริมาณข้อมูลจำนวนมาก

• ความสามารถในการแก้ปัญหาเรื่องการชนกันของข้อมุล (Hidden Terminal Problem)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.ขั้นตอนการออกแบบการทำงานของ CU-MAC

จากคุณสมบัติที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบ CU-MAC ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ จึงสามารถสรุปขั้นตอนต่างๆที่ในการออกแบบวิธีการควบคุมการใช้งานสื่อกลางของ CU-MAC ได้ดังต่อไปนี้

5.1 ขั้นตอนการเพิ่มช่องทางการสื่อสาร

จากปัญหาที่พบว่าเมื่อต้องการมีการรับส่งข้อมูลมากกว่า 1 ชุดข้อมูลพร้อมๆกัน สิ่งที่ MAC Layer จะเกิดปัญหาคือการเข้าแย่งช่องสัญญาญเพื่อการรับส่งข้อมูล จากปัญหาตรงจุดนี้จึงได้ออกแบบ CU-MAC ให้มีการแยกช่องการทำงานของการประกาศการรับส่งข้อมูล (Control Channel) ออกจากช่องสัญญาญการส่งข้อมูล (Data Channel) เนื่องจากในช่องข้อมูลสื่อสารของ IEEE802.15.4 มีจำนวน 9 ช่องสัญญาญที่ใช้งานได้ อีกทั้งเมื่อต้องการที่จะส่งข้อมูลการประกาศการรับส่งหรือที่เรียกว่า Preamble ซึ่งแบ่งเป็น Short Preamble เหมือนกับ X-MAC จึงสามารถที่จะออกแบบให้ประกาศการรับส่งข้อมูลได้พร้อมๆกัน ถึง 2 ชุดข้อมูลซึ่งในขั้นตอนนี้ Preamble ของ CU-MAC ได้ใส่ค่า ID หรือที่เรียกว่า Target Address (TA) ของตัวรับรู้ไร้สายปลายทางที่ข้อมูลต้องการจะส่งถึง และหมายเลขช่องสื่อสารข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูล ลงไปใน Preamble ซึ่งวิธีการนี้เป็นการเพิ่มความสามารถที่ต้องส่งข้อมูลมากกว่าหนึ่งคู่ส่งในเวลาพร้อมกัน ซึ่งการทำงานการประกาศการรับส่งของผู้ส่ง และการรับข้อมูลผู้รับ รหัสเทียมอย่างย่อของ CU-MAC สามารถแสดงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Pseudocode *CU-MAC protocol*

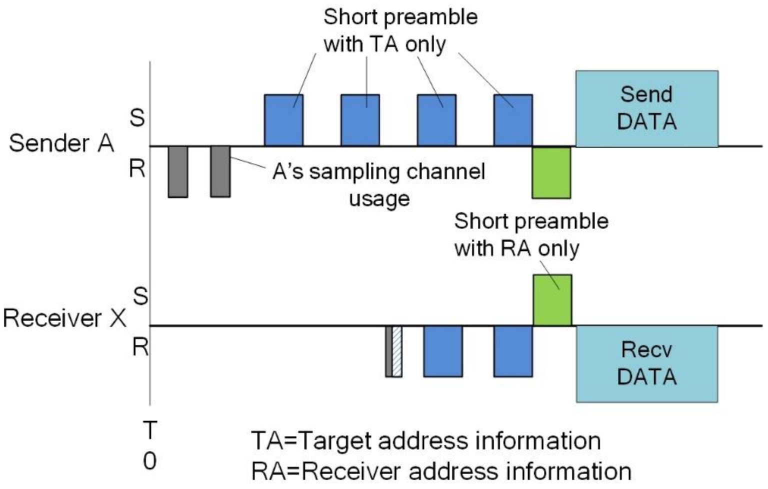
```
function SEND(target.address)
    set slot.sample to 2;
    set slot.usage to 0;
    for (i=1;i<slot.sample;i++) do
        CCA;                //Clear Channel Assessment
        if (CCA is possitive) then
         slot.usage++;
        end if
    end for
    switch slot.usage do
        case 0:
            send preamble embed with target.address;
            wait for acknowledgement;
            send data;
            break;
        case 1:
            learning timing of preamble;
            send preamble embed with target.address and data.transfer.channel;
            move to data channel;
            wait for acknowledgement;
            send data;
            break;
        case 2:
            set back-off timer;
            sleep;
            break;
        end switch
end function

function RECEIVE (this.address)
    set sample to 2;
    for (i=1;i<sample;i++) do
        CCA;
        if (CCA is possitive) then
          get target.address from preamble;
          if (target.address=this.address) then
            get data.transfer.chanel from preamble;
            if (!data.tranfser.channel) then
              move to data transfer channel;
            end if
            repeat
              send acknowledgement embed with ready.to.receive;
            until received data or time equal duty cycle
            sleep;
            break;
          end if
        end if
    end for
    sleep;
    break;
end function

start
    node.wakeup;
    if (node have data to send) then
        SEND(target.address);
    else
        RECEIVE (this.address);
    end if
end
```

รูปที่ 9 แสดงรหัสเทียมของ CU-MAC protocol

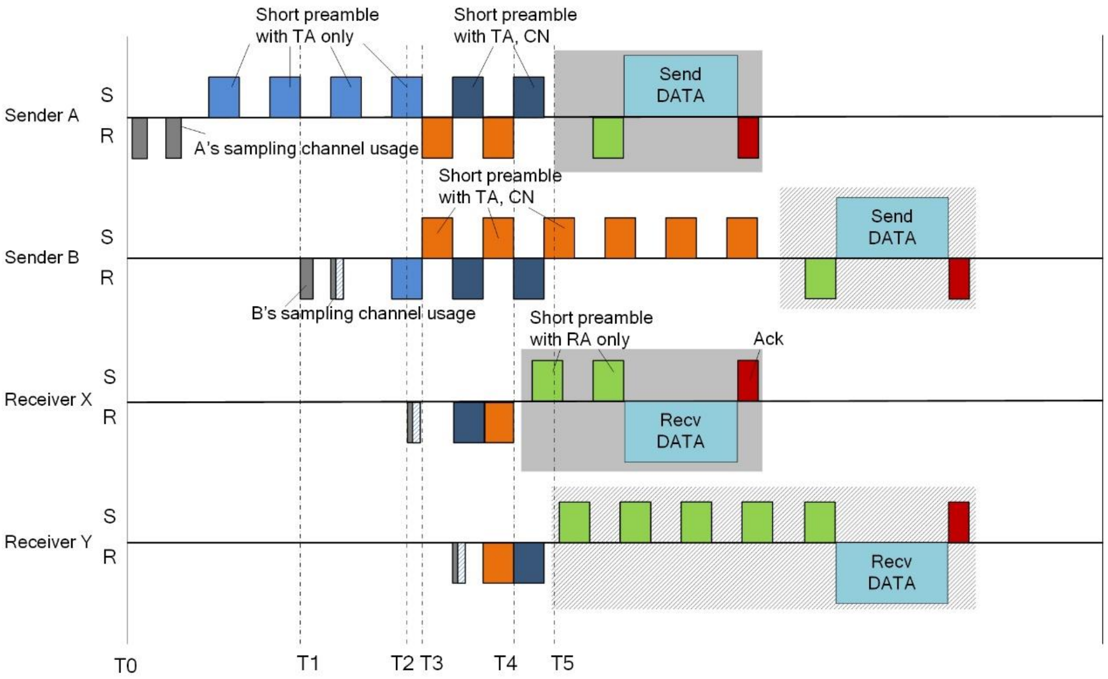
รูปที่ 10 แสดงขั้นตอนการทำงานของ CU-MAC ขั้นตอนการทำงานเมื่อมีผู้รับและผู้ส่ง เพียงหนึ่งคู่ ซึ่งสามารถแยกขั้นตอนการทำงานของ CU-MAC เป็นฝั่งผู้ส่ง และฝั่งผู้รับ โดยอธิบายได้ดังนี้ เมื่อผู้ส่ง A มีข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังผู้รับ ผู้ส่ง A ต้องทำการประกาศการส่งลงไปในช่องสื่อสารข้อมูล โดยขั้นตอนการประกาศจะเริ่มจาก ผู้ส่ง A จะเริ่มรับในช่องสื่อสารข้อมูลที่เป็นส่วนการประกาศการรับส่งข้อมูล โดยใช้วิธีการ Clear Channel Assessment (CCA) สองครั้ง ซึ่งวิธีการของ CCA จะเป็นตรวจสอบพลังงานในช่องสื่อสารข้อมูล ถ้ามีพลังงานในช่องสื่อสาร แสดงว่ามีผู้ส่งข้อมูลอยู่ในช่องสื่อสารข้อมูลนั้น ถ้าผู้ส่ง A ไม่พบผู้ส่งข้อมูลในช่องสื่อสารข้อมูลนั้น จะเริ่มทำการประกาศการส่งข้อมูลโดยการ ส่งข้อมูลลงไปในช่องการทำงานของการประกาศการสื่อสารข้อมูล โดยส่งข้อมูลออกไปเป็นช่วงๆในระยะเวลาขนาดที่เท่ากัน โดยข้อมูลที่ส่งจะการใส่ค่า ID ของผู้รับข้อมูลลงไปในข้อมูลที่ส่ง (TA) ถ้าผู้รับ X ตื่นขึ้นมาจากช่วงเวลาที่หลับ และได้ยินว่ามีคนต้องการส่งข้อมูลหา จะทำการตอบรับการส่งให้ผู้ส่ง A ส่งข้อมูลหาในช่องการทำงานการประกาศการส่งในทันที ขั้นตอนนี้เหมือนการทำงานของ X-MAC เพื่อลดพลังงานในการทำการส่งข้อมูล



รูปที่ 10 แสดงขั้นตอนการประกาศการรับส่งข้อมูลของ CU-MAC เมื่อมีผู้รับผู้ส่งหนึ่งคู่

รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการประกาศการรับส่งข้อมูลของ CU-MAC ในกรณีที่ผู้ส่งต้องการส่งมากกว่า 1 ซึ่งเมื่อผู้ส่ง A ตื่นขึ้นมาและทำการส่ง Preamble ออกไป แต่ถ้าผู้ส่ง B ต้องการส่งให้ผู้รับ Y โดยขณะที่ ผู้รับ X ยังไม่ตื่นจากช่วงเวลาที่หลับ ผู้ส่ง B จะทำงานในตอนแรกเหมือนกับผู้ส่ง A โดยเริ่มรับฟังว่ามีผู้ส่งอื่นในช่องการทำงานการประกาศข้อมูลการรับส่ง สองครั้ง ถ้าพบว่ามีการส่งข้อมูลจะทำการเรียนรู้ว่า ผู้ส่งต้องการส่งข้อมูลไปยังผู้รับใด ถ้าผู้รับเป็นผู้รับเดียวกันจะทำการหยุดขั้นตอนการทำงานแล้วเริ่มตั้งเวลาเพื่อเมการส่งใหม่ (back off timer) แต่ถ้าไม่ใช่ผู้รับเดียวกัน จะเริ่มทำการประกาศการส่งข้อมูล ลงไปในช่องว่างของการสื่อสารที่เรียนรู้ โดยข้อมูลที่ส่ง จะมีค่า TA และค่าตัวเลขของช่องทางการสื่อสารที่ต้องการใช้ในการส่งข้อมูล (CN) เมื่อผู้ส่ง A ได้ยินข้อมูลที่ประกาศการ

ส่งจาก ผู้ส่ง B ผู้ส่ง A จะเลือกค่า CN ที่ไม่ซ้ำกับผู้ส่ง B แล้วนำค่านี้ไปใส่ในข้อมูลที่การประกาศครั้งถัดไป ซึ่งเมื่อทำการประกาศการส่งจนครบเวลาในการประกาศส่งผู้ส่งทั้งสอง จะย้ายไปทำงานในช่องการทำงานการส่งข้อมูลที่ได้ประกาศไว้ข้อมูลที่ส่ง



TA=Target address information
CN=Channel number for data transfer information
RA=Receiver address information

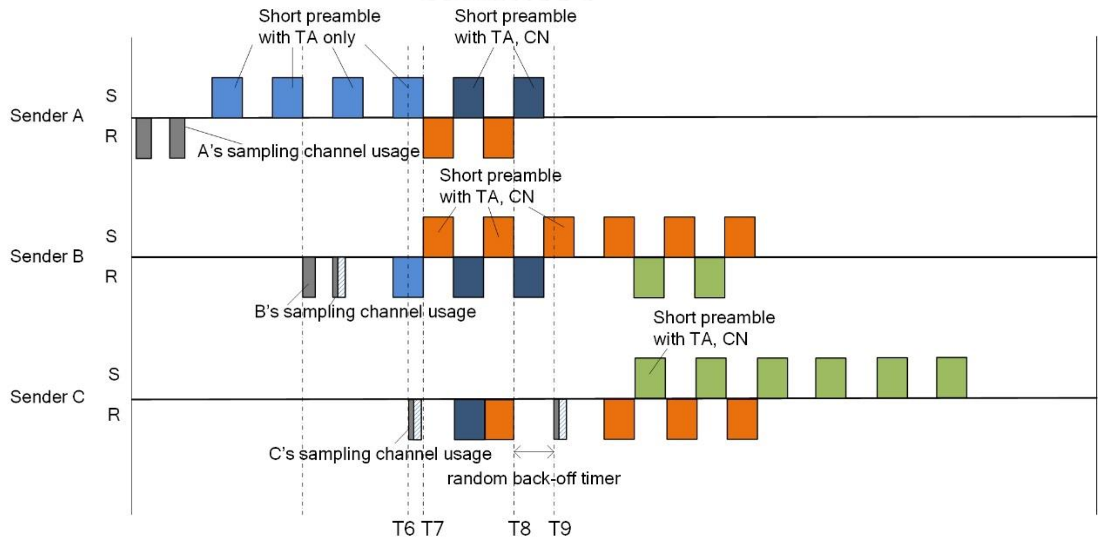
รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการประกาศการรับส่งข้อมูลของ CU-MAC เมื่อมีผู้รับส่งมากกว่า 1 คู่

Chulalongkorn University

จากรูปที่ 11 ขั้นตอนการรับข้อมูลของผู้รับสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อผู้รับ X ตื่นขึ้นจากการหลับ จะทการตตรวจสอบช่องการสื่อสารการประกาศ ถ้าพบว่ามีผู้ใช้งานอยู่ จะทำการเรียนรู้ ข้อมูลการประกาศ ถ้าพบว่าตัวเองไม่ได้เป็นผู้ต้องรับข้อมูลก็จะทำการหลับ แล้วรอตื่นอีกครั้งตามรอบเวลา แต่ถ้าตัวเองเป็นผู้รับข้อมูล ก็จะตรวจสอบว่ามีค่า CN ส่งมาในข้อมูลการประกาศหรือไหม ถ้าพบว่าไม่มีก็จะทำการประกาศความพร้อมในการรับข้อมูลในช่องการสื่อสารนั้นทันที แล้วรองรับข้อมูลจากผู้ส่ง แต่ถ้าพบว่ามีค่า CN มาในการประกาศข้อมูลก็จะทำการย้ายการทำงานไปยังช่องสื่อสารที่กำหนดไว้ตามค่า CN แล้วทำประกาศความพร้อมในการรับข้อมูลแล้วรอรับข้อมูล ซึ่งทุกครั้งการประกาศความพร้อมถ้าไม่ได้รับข้อมูลในเวลาที่กำหนด ก็จะส่งประกาศความพร้อมในการรับข้อมูลในรอบถัดไป ถ้าเมื่อผู้รับข้อมูลจากผู้ส่ง และสามารถถอดข้อมูลนั้นได้ ก็จะทำการส่งข้อมูลบอกว่าได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้วทำการปิดการเชื่อมต่อ แล้ว ย้ายการทำงานไปยังช่องสื่อสารการประกาศแทน ซึ่งการทำงานของ

ผู้รับ Y ที่ต้องรับข้อมูลจากผู้ส่ง B ก็จะทำงานเช่นเดียวกับผู้รับ X ดังแสดงในภาพการทำงานตัวอย่างดังรูปที่ 11

สำหรับ CU-MAC จะสามารถมีการประกาศการส่งข้อมูลได้เพียง 2 คู่ที่ต้องการส่งข้อมูล ดังนั้น ถ้าเมื่อมีผู้ส่งที่มากกว่า 2 จึงต้องมีการตั้งสุ่มคาบเวลาในการส่งในกรณีที่ตรวจสอบแล้ว มีผู้ส่งใช้ช่องการสื่อสารการประกาศเต็มช่องสัญญาญ ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งจะพบว่าเมื่อผู้ส่ง C มีข้อมูลที่ต้องการส่งจะทำการเช็คช่องสื่อสาร พบว่ามีผู้ใช้งานอยู่ จะทำการเรียนรู้ และพบว่ามีผู้ใช้งานอยู่เต็มก็จะทำการสุ่มคาบเวลาขึ้นมาใหม่ เพื่อกำหนดเวลาในการเริ่มทำกระบวนการนี้ใหม่อีกครั้ง ซึ่งกระบวนการประกาศจะกินคาบเวลาเท่ากับคาบเวลาการหลับตื่น ดังนั้นจึงมีโอกาศที่ในรอบถัดไปสามารถประกาศการส่งในช่องข้อมูลสื่อสารได้

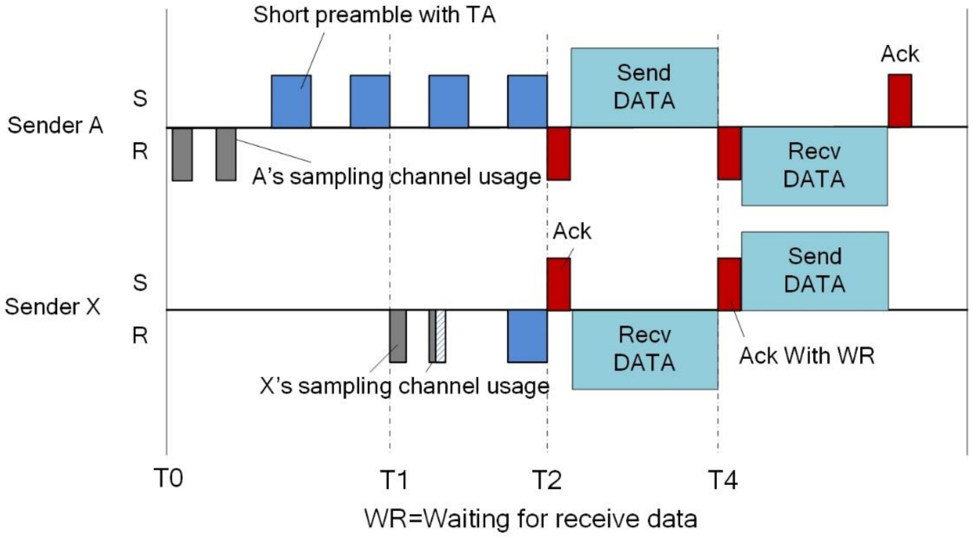


รูปที่ 12 ขั้นตอนการประกาศการส่งข้อมูลกรณีที่มีผู้ส่งข้อมูลในช่องสื่อสารจำนวน 3 ผู้ส่ง

สำหรับกรณีที่การส่งเป็นแบบ broadcast ข้อมูลจะมีจุดที่แตกต่างในการประกาศการส่งโดยค่า TA ที่ส่งจะเป็นค่าที่ระบุเป็นทุกผู้รับ เมื่อผู้รับได้ยิน จะไม่มีการประกาศความพร้อมในการรับแต่จะรอรับข้อมูลทันทีโดยมีระยะเวลาการรอรับข้อมูลเท่ากับหนึ่งคาบเวลาของกาหลับตื่นเท่านั้น

5.2 ขั้นตอนการรับส่งข้อมูลสองทิศทางใน CU-MAC

เนื่องจากโพรโทคอลในอินเตอร์เน็ตเช่น TCP หรือ โพรโทคอลใน IoT เช่น CoAP MQTT การส่งข้อมูลออกมามักจะไม่ได้เป็นทิศทางเดียวเนื่องจากอาจจะมีข้อมูลของ Acknowledgement (ACK) หรือการส่งค่ากลับ ออกจากถ้าผู้รับข้อมูลด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วข้อมูลที่ส่งไปและที่รับกลับมักจะทำงานอยู่บนเส้นทางการเดินทางข้อมูลเดียวกัน (Route Path) ซึ่งการที่จะให้เปิดการเชื่อมต่อใหม่ทุกครั้งจากการส่งข้อมูล จะเป็นการสิ่งเปลืองพลังงานและสูญเสียเวลาในการรับส่งข้อมูล CU-MAC จึงได้ออกแบบที่จะให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ทั้งสองทิศทาง ไม่ว่าจะเป็นการส่งข้อมูลไปยังผู้รับและจากผู้รับกลับมาที่ผู้ส่ง โดยการส่งจะเป็นการทำงานผู้ส่งไปผู้รับเสร็จสิ้น แล้วส่งข้อมูลจากผู้รับไปหาผู้ส่งสลับกันไป (Piggyback) โดยจากแนวคิดดังกล่าวจึงได้มีการเพิ่มเติมกระบวนการในขั้นตอนการรับข้อมูล โดยผู้รับข้อมูลหลังจากรับข้อมูลจากผู้ส่งที่เป็นผู้ประกาศการเชื่อมต่อก่อนเสร็จสิ้นแล้วก็จะประกาศว่าได้รับข้อมูลแล้ว และจะมีการแจ้งเพิ่มเติมว่ามีข้อมูลที่ต้องการส่งหาผู้ส่งด้วย ให้ผู้ส่งเปิดรอรับข้อมูลจากผู้รับด้วย หลังจากส่งข้อมูลกันสำเร็จเป็นที่เรียบร้อยจึงมีการส่งประกาศเพื่อเป็นการแจ้งย้ายกลับไปทำงานที่ช่องสื่อสารการประกาศ ซึ่งขั้นตอนการทำงานนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13

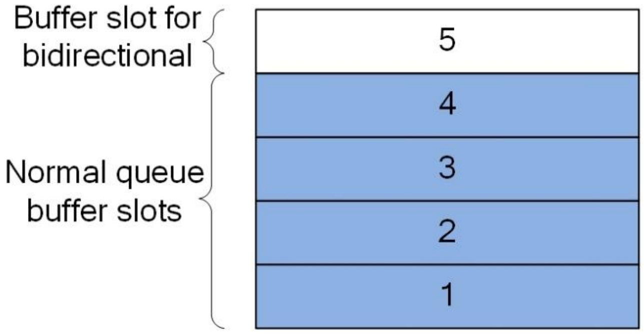


รูปที่ 13 แสดงการทำงานการรับส่งข้อมูลสองทิศทางแบบส่งไปส่งกลับใน CU-MAC

5.3 ขั้นตอนการรับส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องของ CU-MAC

นอกจากจะให้ CU-MAC รับส่งได้ในสองทิศทาง ยังให้ CU-MAC สามารถรับส่งข้อมูลจำนวนหลายๆข้อมูลภายในการประกาศการเชื่อมต่อเพียงครั้งเดียว เพื่อเป็นการเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูล อีกทั้งยังสามารถลดความล้าช่าในการส่งข้อมูล (latency) ที่เกิดขึ้นจากการรับส่งข้อมูลปริมาณมากๆ ได้ จากที่ต้องการส่งข้อมูลออกได้เป็นชุดและการรับส่งสองทิศทาง นี้ยังมีปัญหาที่ต้องพิจารณาและแก้ไขก่อน เนื่องจากตัวอุปกรณ์เครื่อข่ายไร้สายถูกออกแบบให้มีทรัพยากรที่จำกัด [45] โดยเฉพาะหน่วยความจำที่ถูกนำมาใช้ในส่วนของที่พักรับส่งข้อมูลหรือที่เรียกว่าบัฟเฟอร์ (Buffer) ซึ่งถ้าส่งข้อมูลปริมาณเยอะเกินไปอาจจะทำให้ข้อมูลล้นขนาดของบัฟเฟอร์ที่จัดเก็บและทำให้ข้อมูลสูญหาย ซึ่งเหตุกรณ์ที่กล่าวมาเป็นผลกระทบที่ร้ายแรงมากในกรณีที่ใช้โพรโตคอลในอินเตอร์เช่น TCP หรือ CoAP ในการรับส่งข้อมูล เพราะจะต้องมีการส่งข้อมูลใหม่ อีกทั้งถ้าบัฟเฟอร์ในตัวผู้ส่งและผู้รับเต็มทั้งคู่ก็ไม่สามารถที่จะส่งข้อมูลแบบสองทิศทางได้รวมทั้งให้ข้อมูลที่ส่งเกิดการล้นแล้วสูญหายเช่นเดียวกัน CU-MAC จึงได้ทำการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการรับส่งข้อมูลใน CU-MAC โดยให้คำนึงถึงขนาดของบัฟเฟอร์ที่เหลืออยู่ เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 14 แสดงรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลของบัฟเฟอร์ที่ CU-MAC ใช้งาน ซึ่งขั้นตอนการทำงานของ CU-MAC ในส่วนนี้จะทำการเพิ่มพื้นที่บัฟเฟอร์เข้าไปในส่วนบัฟเฟอร์ปกติโดย ให้ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์สำหรับการรับส่งข้อมูลแบบสองทิศทางเท่านั้น ไม่สามารถนำบัฟเฟอร์ส่วนนี้มาใช้งานร่วมกับส่วนอื่นๆได้ และทุกๆครั้งที่สิ้นสุดการเชื่อมต่อพื้นที่บัฟเฟอร์ส่วนนี้จำเป็นต้องว่างทุกครั้ง สาเหตุที่มีข้อกำหนดการออกแบบเช่นนี้ เพราะว่าเมื่อพื้นที่บัฟเฟอร์ของตัวอุปกรณ์ที่ต้องมีการรับส่งหากันเต็มทั้งคู่ ข้อมูลที่มีลักษณะการส่งแบบสองทิศทาง ก็สามารถนำบัฟเฟอร์นี้ออกมาใช้ในการรับส่งแบบสองทิศทางโดยเฉพาะ เพื่อป้องกันการที่อุปกรณ์ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ทั้งคู่ทำให้ข้อมูลล้น และการกำจัดหรือการนำข้อมูลออกจากบัฟเฟอร์สามารถทำได้เฉพาะในกรณีที่ข้อมูลในบัฟเฟอร์นั้นหมดอายุแล้วเพียงเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากเมื่อก่อนถ้าเกิดกรณีนี้ตัวอุปกรณ์จะทำการทิ้งข้อมูลที่ค้างในบัฟเฟอร์ของตัวอุปกรณ์ออกไปโดยทันที อีกทั้งวิธีการนี้ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลให้เป็นแบบต่อเนื่องหรือส่งเป็นชุดต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพได้มากที่สุดด้วย



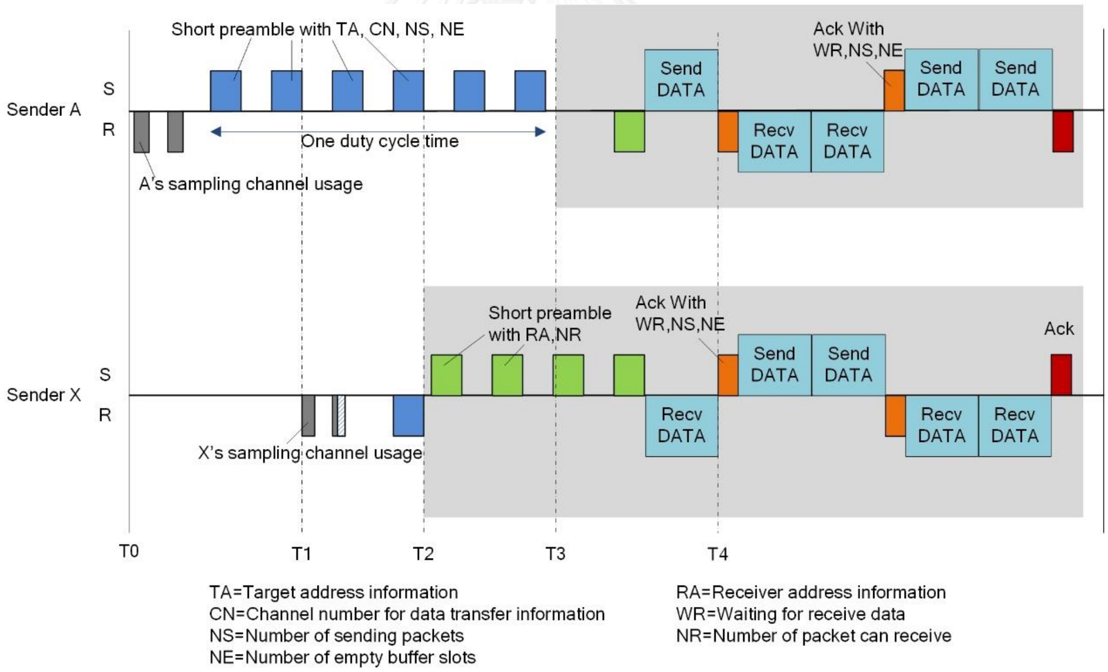
รูปที่ 14 แสดงการจัดการบัฟเฟอร์สำหรับการรับส่งข้อมูลใน CU-MAC

จากวิธีการจัดการบัฟเฟอร์ในการรับส่งข้อมูลของ CU-MAC จึงทำให้ CU-MAC สามารถส่งข้อมูลต่อเนื่องได้ อีกทั้งยังส่งแบบต่อเนื่องสองทิศทางได้ด้วย การเพิ่มความสามารถนี้ใน CU-MAC ทำให้ต้องเพิ่มค่าบางค่าลงไปในการประกาศการส่งข้อมูล และประการการับข้อมูล ซึ่งค่าตัวแปรที่ได้ใส่เข้าไปในการประกาศข้อมูลจะประกอบไปด้วย

- ค่าเลขหมายปลายทางที่ต้องการส่งข้อมูลให้ (TA)
- ค่าหมายเลขช่องสื่อสารที่ใช้ในการส่งข้อมูล (CN)
- จำนวนข้อมูลที่ต้องการส่งให้ (NS)
- จำนวนพื้นที่ว่างในบัฟเฟอร์ (NE)
- จำนวนข้อมูลที่สามารถรับได้ขนาดนั้น (NR)
- ค่าบอกพร้อมการรับข้อมูล (RA)
- ค่าบอกให้คู่รับส่งรอรับข้อมูล (WR)

ซึ่งวิธีการส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องแบบสองทิศทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15 เมื่อผู้ส่ง A ตื่นจากช่วงเวลาการหลับ (T0) และต้องการส่งข้อมูลในลักษณะการส่งข้อมูลต่อเนื่อง ผู้ส่ง A จะทำการตรวจสอบช่องสื่อสารข้อมูลการประกาศว่าผู้อื่นใช้งานอยู่หรือเปล่า เมื่อไม่พบจะทำการส่งข้อมูลการประกาศออกไป โดยข้อมูลการประกาศ จะมีข้อมูลที่ประกอบด้วยค่า TA ซึ่งเลขหมายของผู้รับ ค่า CN ซึ่งเป็นเลขหมายช่องสัญญาณที่ใช้ในการรับข้อมูล (ในกรณีนี้ถึงแม้ไม่มีผู้อื่นใช้ช่องสัญญาณของการประกาศ ก็จำเป็นต้องย้ายการส่งไปที่ช่องสัญญาณอื่น เพื่อป้องกันใช้ช่องสัญญาณการประกาศ เกินกว่าที่จำเป็น) ค่า NS ซึ่งบอกถึงจำนวนข้อมูลที่ต้องการส่ง เพื่อให้ผู้รับได้ตัดสินใจว่าจะรับข้อมูลนี้อย่างไร และค่า NE เพื่อเป็นการประกาศให้ผู้รับทราบถ้ามีข้อมูลที่การส่งจะได้ทราบว่าสามารถส่งข้อมูลได้หรือไหม เมื่อผู้ส่ง X ตื่นจากการหลับ (T1) จะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณ และพบว่ามีผู้อื่นใช้ช่องสัญญาณอยู่ จะทำการเรียนรู้ข้อมูลการประกาศ ซึ่งจะพบว่าตัวเองเป็นผู้รับข้อมูล และ

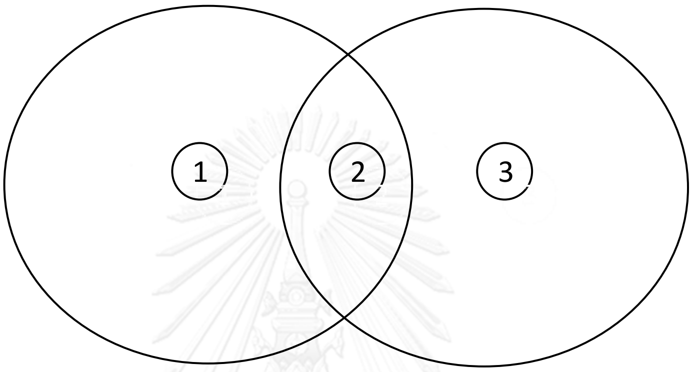
ตัวเองมีข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังผู้ส่ง A ด้วยจะทำการย้ายไปทำงานที่ช่องสัญญาญที่อยู่ในค่าตัวแปร CN เมือย้ายช่องสัญญาญการทำงานเสร็จเรียบร้อย (T2) จะทำการประกาศใช้ช่องสัญญาญว่าพร้อมรับข้อมูล RA โดยการประกาศจะมีการบอก จำนวนข้อมูลที่รับได้ได้วย NR ซึ่งในกรณีจะนำค่าบัฟเฟอร์ที่สำรองไว้สำหรับการส่งสองทิศทางนำมาใช้ด้วย เมื่อผู้ส่ง A ทำการประกาศจนครบรอบการทำงานจพทำการย้ายมาทำงานที่ช่องสัญญาญตามที่ตัวเองประกาศไว้ แล้วรอรับฟัง RA จากผู้ส่ง X ซึ่งค่าที่ผู้ส่ง X จะทำให้ผู้ส่ง A สามารถทราบว่าส่งข้อมูลให้ผู้ส่ง X เป็นจำนวนเท่าไร ตามขนาดของบัฟเฟอร์ที่ว่างที่มาการประกาศมา เมื่อผู้ส่ง A ส่งข้อมูลให้ผู้ส่ง X เสร็จเรียบร้อยจะต้องรอการรับฟังการตอบกลับจากผู้ส่ง X เพือยื่นยันว่าข้อมูลได้ถูกส่งถึง แต่ในกรณีนี้เป็นการส่งข้อมูลแบบสองทิศทาง การตอบกลับจากผู้ส่ง X จะเป็นค่า WR จำนวนข้อมูลที่ส่ง NS และขนาดของบัฟเฟอร์ที่เหลืออยู่ NE ซึ่งค่า NS ที่ส่งจะสามารถคำนวณได้จากการรับข้อมูลก่อนหน้าและจำนวนบัฟเฟอร์ที่เหลืออยู่ของการประกาศการส่งครั้งแรก CU-MAC จะทำขั้นตอนการส่งในลักษณะวนไปเรื่อยจนข้อมูถูกแลกเปลี่ยนกันจนหมด หรือไม่มีพื้นในบัฟเฟอร์ผู้รับให้จัดเก็บข้อมูล จึงทำการหยุดส่งข้อมูล



รูปที่ 15 แสดงขั้นตอนการรับข้อมูลแบบต่อเนื่องใน CU-MAC

5.4 ขั้นตอนป้องกันปัญหา Hidden Terminal Problem ใน CU-MAC

ปัญหา Hidden Terminal Problem เป็นปัญหาที่ตัวผู้ส่งข้อมูลที่ไม่ได้ยินการส่งของผู้ส่งอื่นที่ได้ส่งข้อมูลออกมาในช่องสัญญาณ ซึ่งในบางครั้งจะกระทบกับผุ้รับที่อยู่ตรงกลางซึ่งได้ยินการส่งข้อมูลทั้งหมดในช่องสัญญาณ โดยตัวผู้รับข้อมูลที่อยู่ตรงกลางทั้งหมดอาจจะถอดข้อมูลเหล่านั้นได้ หรืออาจจะถอดข้อมูลเหล่านั้นไม่ได้เลย ดังรูปที่ 16 ที่ผู้ส่งที่ 1 และ 3 ส่งข้อมูลออกมาแต่ทั้งสองไม่สามารถไม่สามารถได้ยินของแต่ละคนที่ส่งเพราะอยู่ห่างกัน แต่ผู้รับที่ 2 สามารถได้ยินที่ผู้ส่ง 1 และ 3



รูปที่ 16 แสดงปัญหา Hidden Terminal Problemใน CU-MAC

ซึ่งการที่จะบอกได้ว่าสามารถถอดข้อมูลได้หรือไม่ได้ในมาตราฐานของ IEEE802.15.4 ข้อมูลที่ส่งออกมาจะต้องมีระยะห่างกัน 12 Symbol หรือโดยประมาณที่ 0.4 ถึง 0.5 มิลลิวินาที ซึ่งในกรณีของ CU-MAC ปัญหานี้อาจเกิดได้เช่นเดียวกับโพรโทคอลตัวอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถเกิดได้มากกว่าจากคุณสมบัติที่ต้องการส่งมากกว่าหนึ่งคู่พร้อมๆกัน ขั้นตอนในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ CU-MAC ได้ออกแบบให้ในขั้นตอนการประกาศข้อมูลของผู้รับทำงานเพิ่มเติมโดยขั้นตอนต่อไปนี้

- ถ้าได้รับข้อมูลที่ไม่สามารถถอดข้อมูลในช่องสัญญาณการประกาศการส่งก็จะ ส่งการประกาศที่เป็นการบอกให้หยุดการส่งออกไป ผู้ส่งที่ส่งอยู่ ถ้าได้รับประกาศนี้จะหยุดการส่งโดย สุ่มตั้งเวลาในขั้นตอนการส่งประกาศใหม่ เวลาที่สุ่มจะแปรผกผันจากจำนวนประกาศที่ส่งออกไปแล้วแต่ไม่เกิน Duty-Cycle ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ผู้รับที่ได้ยินประกาศที่ชนกันช่วยรับประกาศที่มาใหม่ได้
- แต่ถ้าได้ทำตามวิธีที่กล่าวมาขั้นต้นแล้ว ผู้รับก็ยังไม่สามารถถอดข้อมูลการประกาศได้ ผู้รับจะตื่นรอไว้ 1 คาบเวลา duty cycle เพื่อรอข้อมูลที่ถอดได้ แต่ถ้าไม่สามารถถอดได้ภายในคาบเวลาก็จะทำการหลับและรอตื่นในคาบเวลาใหม่

6.ขั้นตอนการพัฒนา CU-MAC บนระบบปฏิบัติการ Contiki OS

โพรโทคอล CU-MAC ได้ถูกพัฒนาบนระบบปฏิบัติการ Contiki OS [46] ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการสำหรับเครือข่ายรับรู้ไร้สาย และ Internet of Thing ซึ่งได้ใช้ระบบส่งสัญญาณไร้สายตามมาตราฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งการที่จะให้ CU-MAC ทำงานได้บนระบบปฏิบัติการดังกล่าว CU-MAC ได้ใช้วิธีการ Clear Channel Assessment (CCA) เป็นวิธีการตรวจสอบการใช้งานของช่องส่งสัญญาณไร้สาย วิธีการทำงานของ CCA จะใช้วิธีการรับค่า Received Signal Strength Indicator (RSSI) จากสัญญาณวิทยุเป็นตัวชี้วัด ซึ่งค่า RSSI ที่วัดได้น้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ CCA จากแจ้งกลับมาว่าช่องสัญญาณว่างไม่มีคนใช้งาน แต่ค่าวัดสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้แสดงว่ามีคนใช้งานอยู่

ปัจจัยที่สำคัญที่ให้ โพรโทคอล CU-MAC ทำงานได้คือ ค่าคาบเวลาที่ในอุปกรณ์แต่ละตัวที่ต้องใช้ เพื่อให้วิธีการ CCA วัดค่าได้ถูกต้อง และ CU-MAC สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ได้กำหนดไว้ ค่าคาบเวลาที่สำคัญคือคาบเวลาที่ระยะห่างแต่ละตัวที่ต้องส่งข้อมูลการประกาศออกมา รูปที่ 15 แสดงคาบเวลาที่ต้องใช้ในการส่งค่าประกาศออกมาตามเวลาต่างๆ ค่าของเวลาต่างๆที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของ CU-MAC ที่แสดงในรูปที่ 17 ประกอบด้วยค่าต่างๆดังนี้

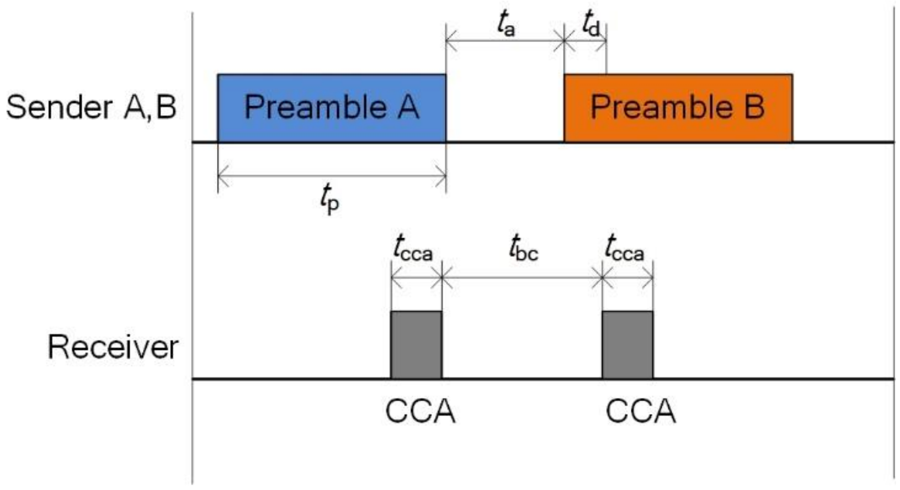
t_p: คือเวลาที่ใช้ในการส่งการประกาศการส่งข้อมูลแต่ละครั้ง

t_a: คือคาบเวลาที่ต้องใช้ก่อนที่ผู้ส่งอีกตัวจะต้องใช้ในการประกาศการส่ง

t_d: คือเวลาที่อุปกรณ์ใช้ในการทำงานเพื่อใช้ในการตรวจจับการใช้ช่องสัญญาณ

t_{cca}: คือเวลาที่ใช้ในการทำงานของขั้นตอนการทำ CCA

t_{bc}:คือระยะเวลาที่จะทำขั้นตอน CCA แต่ละครั้ง



รูปที่ 17 แสดงคาบเวลาที่ต้องใช้ใน CU-MAC

สมการที่ (1) คือสมการที่ใช้ในการคำนวณหาคาบเวลาที่ใช้ใน CU-MAC เพื่อที่จะให้ CU-MAC สามารถตรวจจับการประกาศของผู้ส่งที่ใช้ช่องสัญญาญการประกาศข้อมูลได้ในขณะที่ มีการประกาศเต็มช่องสัญญาญ เพื่อบอกว่าช่องสัญญาญไม่ว่างขณะที่จะใช้งาน t_{bc} ต้องมีค่ามากกว่า t_a ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างการประกาศการส่งในแต่ละครั้ง และต้องมีค่าน้อยกว่า t_a+t_d เพื่อให้การตรวจจับได้สมบูรณ์ ซึ่งถ้าการตรวจจับ CCA ในครั้งแรกไม่สามารถตรวจจับการประการได้ ซึ่งหมายความว่า CCA ในครั้งแรกทำงานในช่วงของ t_a+t_d การทำงานของ CCA ครั้งที่สองจะต้องทำการตรวจจับได้ เพื่อให้ได้ลักษณะนั้น ดังนั้นค่าของ t_p จะต้องมีค่ามากกว่า $t_{bc}+2t_{cca}$

$$t_a < t_{bc} < t_a + t_d < t_{bc} + 2t_{cca} < t_p \quad (1)$$

ค่าเวลาระหว่างการส่งข้อมูลการประกาศแต่ละครั้ง เพื่อให้ข้อมูลไม่ถูกทับซ้อนกันถูกกำหนดโดยมาตราฐานของอุปกรณีไร้สายที่ใช้ ซึ่งในงานนี้ใน IEEE 802.15.4 [47] ซึ่งมีการกำหนดไว้ให้มีการความห่างไม่น้อยกว่า 12 symbols ซึ่งเวลาการส่งในแต่ละ symbol จะกินเวลาเท่ากับ 4/250 มิลลิวินาที ดังนั้นจะสรุปได้ว่า ค่า t_a ต้องมีการไม่น้อยกว่า 12 symbols x 4/250 มิลลิวินาที หรือเท่ากับ 0.192 มิลลิวินาที ซึ่งใน CU-MAC ค่าต่างที่เราส่งขนาด 5 ไบต์ ซึ่ง 4 ไบต์ เป็นค่าว่างในการประกาศเพื่อให้เกิดสัญญาญในช่องสัญญาญ และ1 ไบต์ถัดมาเป็นการส่งการประกาศว่าเป็นข้อมูลการประกาศเพื่อการให้อุปกรณ์ตรวจจับได้ ซึ่งความเร็วในการส่งสูดส่งที่ IEEE 802.15.14 ใช้คือ 250 กิโลบิทต่อวินาที (kbps) ดังนั้น ค่าของ td จะเท่ากับ 5x8/250 ซึ่งเท่ากับ 0.160 มิลลิวินาที ซึ่งตามมาตราฐานของชิบ Cjipcon CC2420 [48] ซึ่งเป็นอุปกร์ที่ใช้การทดลองจะพบว่า เวลาที่ใช้การทำงาน CCA แต่ละครังจะอยู่ที่ 0.192 มิลลิวินาทีจากค่าต่างๆที่กล่าวสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2)

$$0.192 < t_{bc} < 0.352 < t_{bc} + 0.384 < t_p \quad (2)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2) เราจะพบว่า t_p ต้องมีค่ามากกว่า 0.384+0.352 หรือเท่ากับ 0.736 มิลลิวินาที ซึ่ง CU-MAC จึงออกแบบการประกาศแต่ละครั้งมีขนาด 25 ไบต์ เพื่อให้ระยะเวลาในการส่งอยู่ที่ 0.8 มิลลิวินาที ดั้งนั้นสามารถกำหนดค่าเวลาต่างๆที่ใช้การทำงานของ CU-MAC ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Contiki OS และอุปกรณีไร้สาย IEEE 802.15.4 บนชิป CC2420 ได้ดังนี้

- t_a = 0.2 มิลลิวินาที
- t_{bc} = 0.4 มิลลิวินาที
- t_p = 0.8 มิลลิวินาที

7.ผลการทดลองและการวัดผล CU-MAC โพรโทคอล

ในการวัดผลของ CU-MAC ได้มีการออกแบบการทดลองเป็นสองส่วนหลักคือ ส่วนที่ต้องวัดประสิทธิภาพของ CU-MAC ตามขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอล และส่วนการวัดผลประสิทธิภพของ CU-MAC ในการนำไปใช้ร่วมกับงานทั่วไป ซึ่งทั้งสองกรณีได้ทำการทดลองบนอุปกรณ์จริงและการจำลอง (Simulation)

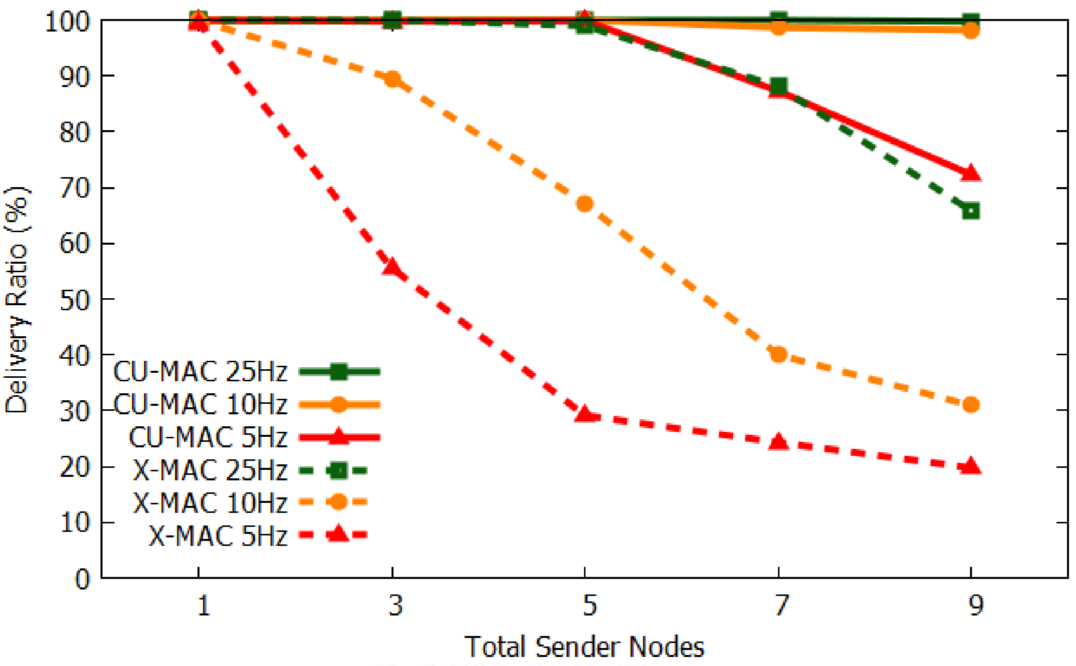
7.1 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลสำเร็จ (Transmission Success Rate)

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบความสามารถในการส่งข้อมูลได้สำเร็จ โดยการทดลองจะเริ่มจากการกำหนดให้มีผู้รับข้อมูลเพียงตัวเดียวและเพิ่มจำนวนผู้ส่งข้อมูลไปยังหาผู้รับนั้นจาก ผู้ส่ง 1 ตัวไปยังผู้ส่ง 9 ตัว โดยทั้งหมดสามารถได้ยินการรับฟังสัญญายในช่องสัญญาญทั้งหมดเพื่อป้องงกันปัญหาการเกิด Hidden Terminal Problem ในการทดลองได้ใช้อุปกรณ์จริง โดยมีค่ากำหนดการทดลองดังตารางที่ 2 การส่งที่ใช้ในการทดลองเป้นการส่งข้อมูลแบบ UDP โดยมีอัตราการส่ง 4 ข้อมูลต่อวินาที โดยมีขนาด 120 ไบต์ เวลาที่ใช้ในการส่งคือ 180 วินาที โดยการวัดผลจะทำการวัด ข้อมูลที่รับได้ ที่ผู้รับ เทียบกับข้อมูลที่ส่ง เพื่อเป็นวัดความสามารถของ CU-MAC ในเรื่องความสามารถในการย้ายช่องข้อมูล การรับข้อมูล ว่าสามารถทำได้ทันเวลา ก่อนที่ข้อมูลจะเต็มบัฟเฟอร์ การทดลองจะมีคาบการหลับตื่น ที่ 25Hz 10Hz และ 5Hz (40 100 200 มิลิวินาที) ตามลำดับ โดยผลการทดลองได้เทียบกับ X-MAC โพรโทคอล ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2 แสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 7.1 ของ CU-MAC

Device	tmote sky
MAC Layer	CU-MAC
OS	Contiki 2.7
Transport Protocol	UDP
Topology	Star Topology
Wireless module	CC2420 (IEEE 802.15.4)
Packet Size	120 Byte
Buffer Memory	4 Packet
Duty Cycle	5Hz, 10Hz, 25Hz

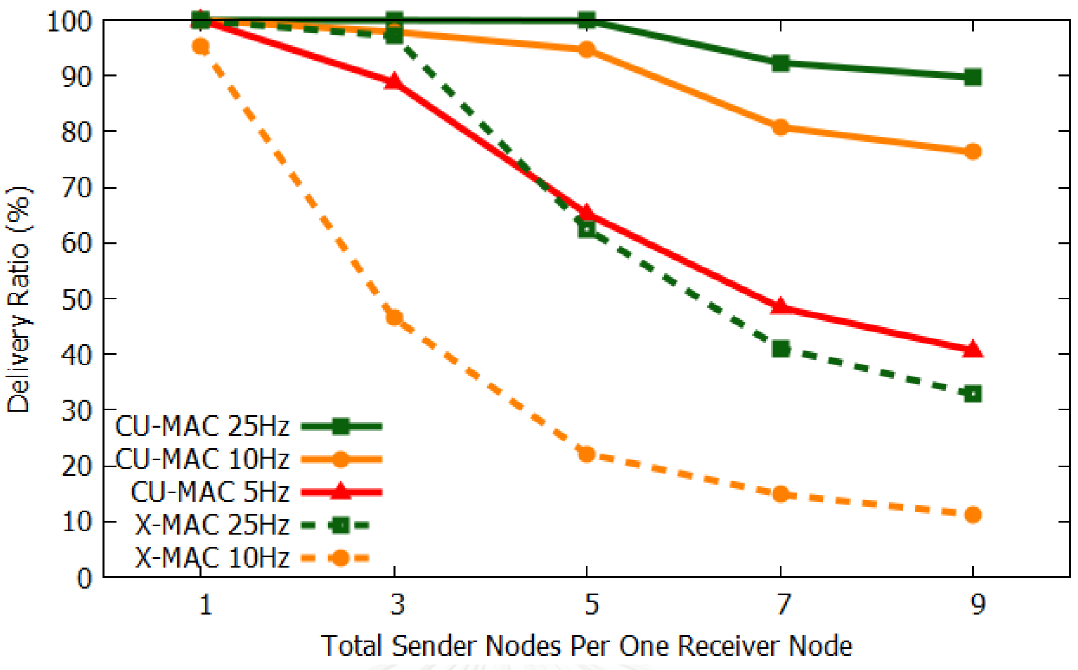


รูปที่ 18 แสดงผลการรับข้อมูลสำเร็จในกรณีมีผู้รับคนเดียวในพื้นที่ CU-MAC

จากผลการทดลองนี้จะพบว่า การส่งข้อมูลโดยคาบการหลับตื่นที่สูง จะให้ความสามารถการรับส่งข้อมูลได้สูงกว่า คาบการหลับที่ต่ำกว่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะจะมีอัตตราความถี่ในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น แต่จากกราฟจะพบว่า CU-MAC ที่ความถี่ต่ำสามารถทำได้งานได้ดีกว่า X-MAC สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมี กลไกในการป้องข้อมูลสูญหายในบัฟเฟอร์ โดยจากผลทดลองจะพบว่า CU-MAC ที่ทำงานที่ 5Hz สามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงเท่ากับ X-MAC ที่ 25Hz

สำหรับการทดลองถัดมาได้ทำการทดลองที่ค่ากำหนดเหมือนการทดลองที่แล้ว แต่ได้มีการเพิ่ม จำนวนคู่รับส่งโดยปรับผู้รับข้อมูลเป็น 2 ผู้รับ และในแต่ละผู้รับมีผู้ส่งจาก 1 ถึง 9 ผู้ส่ง การทดลองจะเป็นการหาความสามารถของ CU-MAC ว่าจะมีความสามารถการใช้ช่องสัญญาญในการรับส่งข้อมูลได้ขนาดไหน โดยผลการทดแสดงในรูปที่ 19

จากการทดลองจะพบ ว่า CU-MAC ยังสามารถทำงานได้ดีกว่า X-MAC โพรโทคอล แต่จะพบว่า เมื่อใช้ CU-MAC ที่คาบการหลับตื่นที่ต่ำ 5Hz จะพบว่า ค่าความสามารถในการรับข้อมูลสำเร็จจะลดอย่างรวดเร็วเมื่อมีผู้ส่ง 5 ผู้ส่ง สาเหตุนี้เกิดจากมีการพยายามแย่งใช้ช่องสื่อสารการประกาศและทำให้เกิดความล่าช้าในการส่ง อีกทั้งข้อมูลที่สร้างมีความเร็วสูงกว่าข้อมูลที่ส่งออกได้ จึงทำจำนวนข้อมูลที่ค้างมากกว่าจำนวนบัฟเฟอร์ จำนวนมาก แต่ในปัญหากรณีสามารถลดลงได้โดยการเพิ่มคาบเวลาการส่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลให้สูงขึ้น



รูปที่ 19 แสดงผลการรับข้อมูลสำเร็จในกรณีมีสองผู้รับในพื้นที่ของ CU-MAC

7.2 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลสองทิศทาง และความเท่าเทียมการส่ง (Fairness)

เพื่อแสดงความสามารถในการส่งข้อมูลสองทิศทางของ CU-MAC และความเท่าเทียมกันในการส่งข้อมูล จึงได้ออกแบบการทดลองในอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายของจริง 2 การทดลอง โดยการทดลองแรก เป็นการทดลองที่ใช้อุปกรณ์การส่งเป็นเส้นตรง โดยใช้อุปกรณ์การส่ง 3 อุปกรณ์ โดยให้ผู้ส่งอยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง ส่งผ่านอุปกรณ์ตัวกลางและมีการกำหนดให้อุปกรณ์ได้ยินข้อมูลการส่งซึ่งกันและกัน แต่บังคับให้ต้องส่งผ่านตัวกลางเท่านั้น โดยผู้ส่ง 1 จะส่งข้อมูลหาผู้ส่งที่ 3 โดยมีการส่งโดยใช้ UDP 300 ข้อมูล ขนาด 60 ไบท์ และผู้ส่งที่ 3 จะส่งข้อมูลหาผู้ส่งที่ 1 โดยการส่งแบบ UDP เช่นเดียวกัน แต่มีการส่ง 250 ข้อมูลขนาด 120 ไบท์ ค่ากำหนดการตั้งค่าอุปกรณ์ แสดงในตารางที่ 3 และรูปแบบการวางอุปกรณ์ แสดงในรูปที่ 20

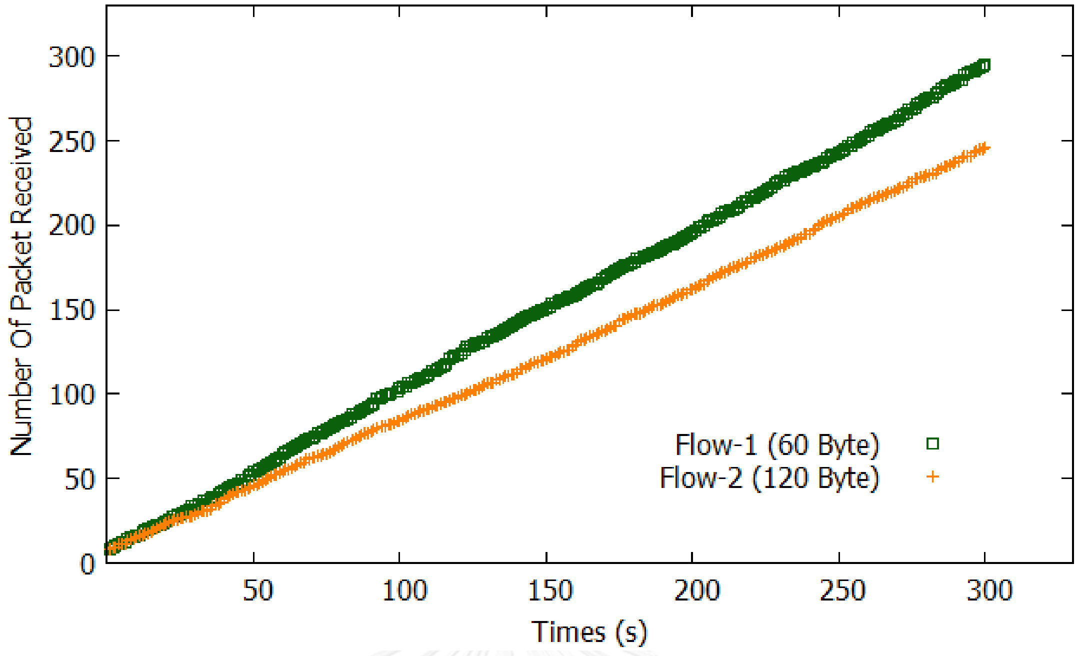
ตารางที่ 3 แสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 7.2 ของ CU-MAC

Device	tmote sky
MAC Layer	CU-MAC
OS	Contiki 2.7
Transport Protocol	UDP
Topology	Line Topology
Wireless module	CC2420 (IEEE 802.15.4)
Packet Size	60, 120 Byte
Buffer Memory	480 Byte, 120 Byte
Duty Cycle	5Hz

รูปที่ 20 รูปแบบการวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 7.2

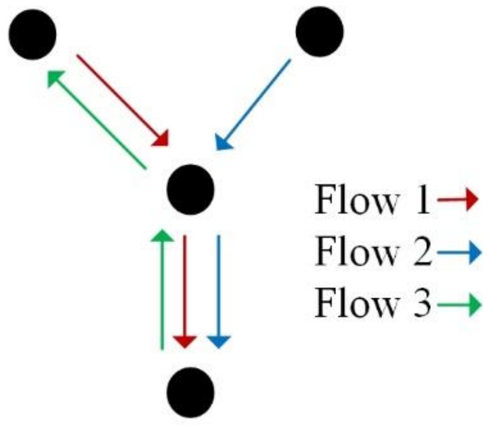
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 21 แสดงผลการทดลอง โดยเป็นผลการทดลองของเลขข้อมูลการส่งเทียบกับ เวลาที่ส่งถึงปลายทาง จะพบว่า CU-MAC สามารถทำงานได้ดีในการส่งแบบสองทิศทาง และข้อมูลทั้งสองการส่งสามารถส่งถึงเป้าหมายที่รับได้ถึง 99.3%



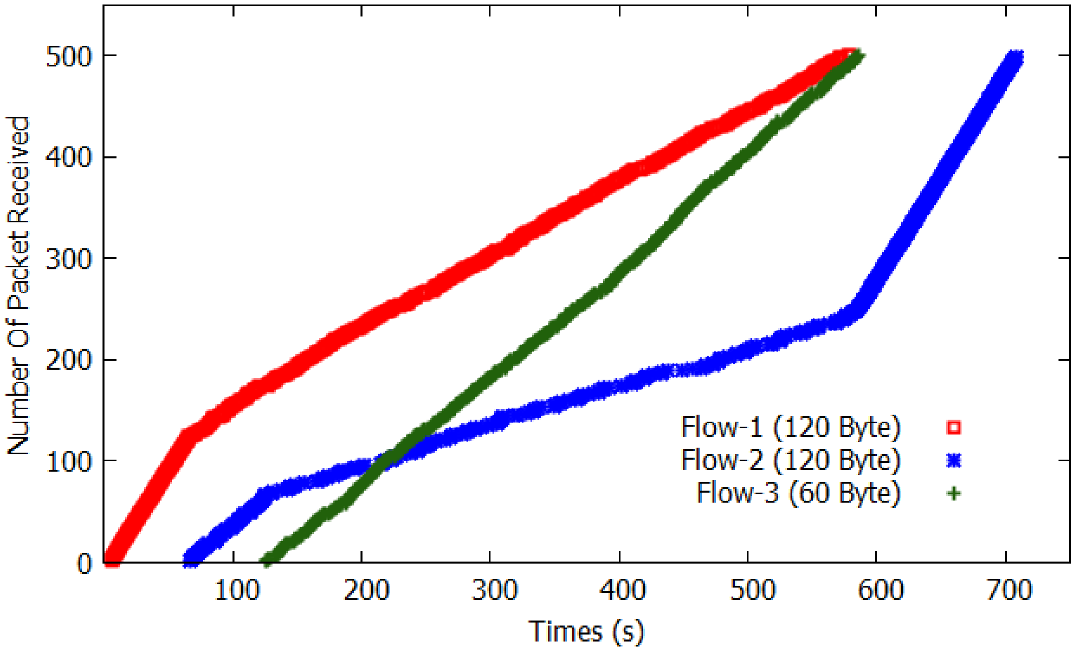
รูปที่ 21 แสดงผลการรับข้อมูลเทียบกับเวลาในการทดลองที่ 7.2 ของ CU-MAC

การทดลองถัดมาได้ปรับเปลี่ยนรูปแบบการวางอุปกรณ์การส่งและวิธีการส่งใหม่ โดยรูปแบบการวางอุปกรณ์จะเป็นตัววาย และข้อมูลการส่งจะเป็นการส่งจากด้านปลายรูปแบบการวางอุปกรณ์ โดยข้อมูลการส่งที่ 1 เป็นการส่ง UDP ขนาด 120 ไบท์ เริ่มส่งที่วินาทีที่ 5 ข้อมูลการส่งที่ 2 เป็น UDP ขนาด 60 ไบท์ เริ่มส่งวินาทีที่ 65 และข้อมูลการส่งที่ 3 ขนาด 65 ไบท์ เริ่มส่งวินาทีที่ 125 โดยข้อมูลทั้งหมดที่ส่งมีขนาด 500 ข้อมูล ข้อมูลการตั้งค่าอุปกรณ์ยังเหมือนกับการทดลองที่ผ่านตามตารางที่ 4 และรูปแบบการวางอุปกรณีข้อมูลการส่งแสดงในรูปที่ 22

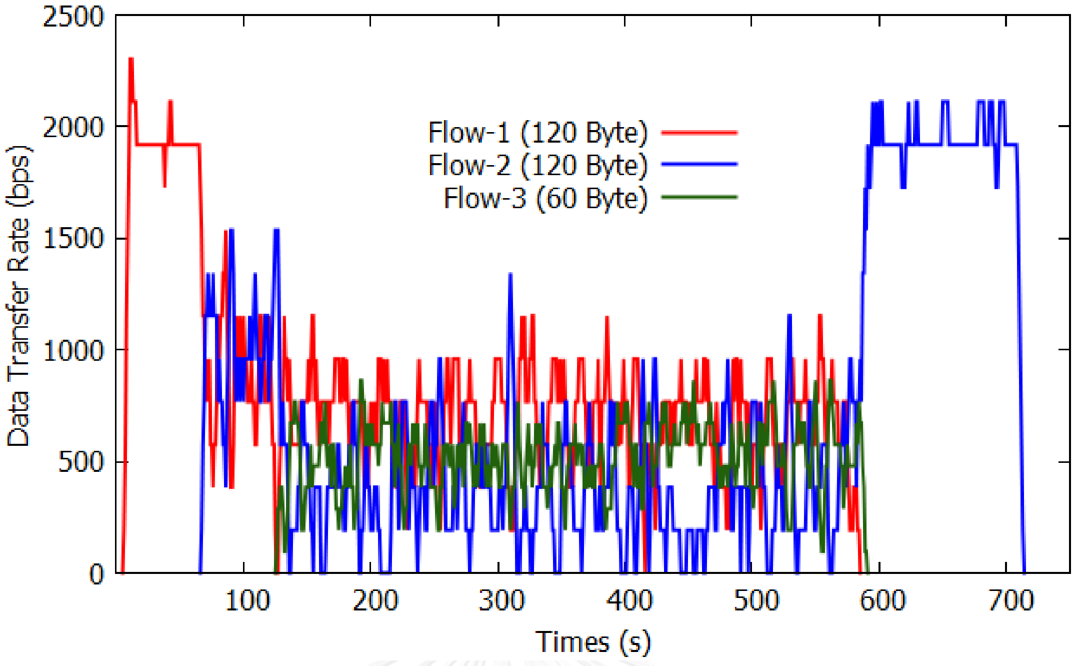


รูปที่ 22 รูปแบบการวางอุปกรณ์ตัววายที่ใช้ในการทดลองที่ 7.2

ซึ่งข้อมูลดิบในการส่งข้อมูลที่ถึงปลายทางเทียบกับเวลาได้แสดงอยู่ในรูปที่ 23 จะพบว่าเมื่อข้อมูลชุดที่ 1 เริ่มส่งข้อมูลในขณะนั้นไม่มีผู้ใช้งานอื่นอยู่ในช่องสื่อสารข้อมูลจะทำให้การส่งทำงานได้อย่างรวดเร็ว โดยดูได้จากความชันของกราฟการส่งเทียบเวลา เมื่อถึงวินาทีที่ 65 ข้อมูลชุดที่สองได้เริ่มการส่งออก จะพบว่าเกิดการส่งจากสองทางไปยังเป้าหมายเดียวกัน จะทำให้เกิดการแบ่งการใช้งานเกิดขึ้นซึ่งจะพบว่า ความชันของกราฟข้อมูลที่ 1 จะลดลงและจะเริ่มใกล้เคียงกับข้อมูลชุดที่สองที่เริ่มส่งออก และเวลาที่การทดลองเดินมาถึงที่ 125 ซึ่งเป็นเวลาที่ข้อมูลชุดที่ 3 เริ่มส่งจะพบว่า การเดินทางของข้อมูลชุดที่ 3 ได้อยู่บนเส้นทางเดียวกับข้อมูลชุดที่ 1 จะได้อาศัยความสามารถการส่ง 2 ทิศทางของ CU-MAC จึงทำให้ส่งออกรับกับข้อมูลชุดที่ 1 อย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลต่อข้อมูลชุดที่ 2 ที่ส่งอยู่ก่อนหน้าเพราะต้องเกิดการแบ่งการส่งข้อมูลออกมาให้ชุดที่ 3 และ 1 โดยดูจากความความชันของกราฟข้อมูลชุดที่สองลดลง และเมื่อข้อมูลชุดที่ 1 และ 3 สิ้นสุดการส่ง ข้อมูลชุดที่ 2 ก็สามารถเพิ่มความเร็วในการส่งได้อย่างเร็วจากกราฟที่ชันขึ้น เพราะไม่มีผู้ส่งอื่นแย่งใช้ช่องสื่อสารสัญญาณอยู่ จากข้อมูลการทดลองสามารถแสดงในรูปกราฟปริมาณงาน (throughput) ได้ดังรูปที่ 24



รูปที่ 23 ผลการทดลองเลขข้อมูลที่ถึงปลายทางเทียบกับเวลา ในการทดลองแบบตัววาย



รูปที่ 24 ผลการทดลองวัดค่าปริมาณข้อมูลการรส่งเทียบกับเวลา ในการทดลองแบบตัววาย

7.3 ผลการทดลองวัดผลการแก้ปัญหา Hidden Terminal Problem ใน CU-MAC

ปัญหา Hidden Terminal Problem เป็นหนึ่งปัญหาที่สำคัญที่จะลดความสามารถของ MAC โพรโทคอลลดอย่างมาก เพราะจะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลในระบบ ซึ่งส่วนมาก MAC โพรโทคอลในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย จะแก้ปัญหานี้โดยวิธีการใช้ สุ่มเวลาการเริ่มส่งใหม่ (Radom Back-off Timer) ซึ่ง CU-MAC ก็แก้ปัญหานี้โดยเลือกแนวทางนี้เหมือนกัน โดยให้ตัวรับรู้ไร้สายที่อยู่ในช่วงรับฟังข้อมูล ที่ไม่สามารถถอดข้อมูล จะประเมินว่าเกิด Hidden Terminal Problem ขึ้น โดยจะส่งข้อมูลการประกาศว่าเกิดปัญหานี้ขึ้นไปในระบบ ซึ่งถ้าผู้ส่งคนไหนที่ได้ยินการประกาศครั้งนี้ จะเริ่มทำการหยุดการส่งข้อมูล แล้วเริ่มสุ่มเวลาการเริ่มทำงานใหม่ แต่เมื่อประกาศส่งออกไปแล้วแต่ไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ ตัวรับรู้ไร้สายผู้รับจะเป็นคนสุ่มเวลาเริ่มทำงานใหม่แทน

สำหรับการทดสอบ ได้เลือกการวางอปุกรณ์การทดสอบตัวรูปที่ 18 โดยมีการกำหนดให้ตัวรับรู้ไร้สาย 1 และ 3 ไม่สามารถได้ยินข้อมูลที่ส่งกัน แต่สามารถรับส่งข้อมูลผ่าน ตัวรับรู้ไร้สายตัวที่ 2 ค่าการหลับตื่นของตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้ในการทดลองที่ 5Hz ซึ่งจากการวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะทำให้ปัญหา Hidden Terminal Problem ที่ตัวรับรู้ไร้สายตัวที่ 2 ซึ่งการทดลองจะส่งข้อมูลจากตัวรับรู้ไรสายตัวที่ 1 ไปหาตัวที่ 3 และตัวที่ 3 ไปหาตัวที่ 1 โดยอัตราการส่งที่ 4 ข้อมูลต่อวินาที โดยมีขนาดข้อมูล 120 ไบท์ การทดลองนี้ทำการทดลอง โดยการส่ง 100 วินาที ทำการทดลอง 20 รอบเพื่อ

หาค่าเฉลี่ย ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองของการรับข้อมูลสำเร็จโดย CU-MAC โพรโทคอลที่มีกลไกลแก้ปัญหา Hidden Terminal Problem และไม่มีกลไกลนี้ ซึ่งจะพบว่า โพรโทคอล CU-MAC ที่มีกลไกลสามารถทำงานได้ดีกว่า ที่ไม่มีกลไกลในการแก้ปัญหานี้ถึง 31.7%

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองการแก้ปัญหา Hidden Terminal Problem ของ CU-MAC

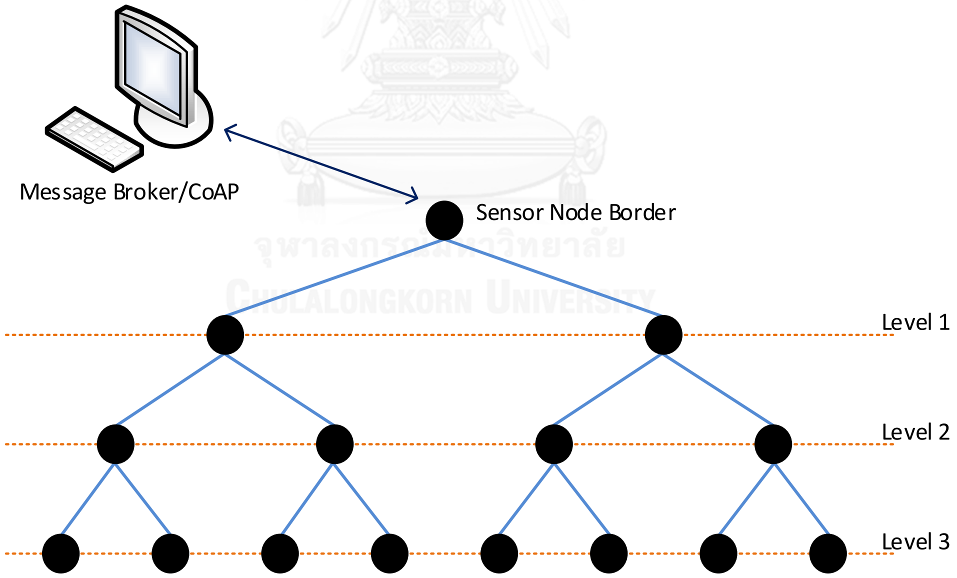
Protocol	Minimun	Maximum	Average
CU-MAC (without the alert Ack)	35.4%	93.7%	**64.6%**
CU-MAC (with the alert Ack)	89.6%	98.2%	**96.3%**

7.4 ผลการทดลองการเชื่อมเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เข้ากับระบบไอโอที

ในการทดลองนี้จะเป็นการนำโพรโทคอล CU-MAC ไปใช้ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบไอโอที โดยเลือกใช้การวางอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายแบบต้นไม้ ตามรูปที่ 25 เพื่อใช้ในการทดสอบ CU-MAC ในการใช้งานเชื่อมส่งข้อมูลผ่านระหว่างเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายกับระบบไอโอที โดยที่การทดลองนี้จะกำหนดเส้นทางการเดินทางของข้อมูล สาเหตุที่ไม่ใช้ RPL Protocol ที่เป็นมาตราฐานที่องค์กรต่างๆ แนะนำเนื่องจาก RPL มีการทำค้นหาเพื่อนบ้านเป็นช่วงๆเพื่อคำนวณหาเส้นทาง ซึ่งจะส่งผลกระทบโดยรวมกับผลการทดลอง เพราะจะมีข้อมูลที่ไม่ได้ใช้ในการรับส่งข้อมูลเข้าในการทดลองเป็นจำนวนมาก ในการทดลองนี้ใช้การส่งข้อมูลออกจากทุกตัวรับรู้ไร้สายในเครือข่ายโดยใช้ UDP โดยการจำลองขั้นตอนการทำงานของ CoAP โดยข้อมูลที่ส่งจะถูกส่งไป Message Broker Server และจะมีการตอบกลับทุกการส่ง โดยการทดลองจะแบ่งการส่งทุกๆ 10s 5s และ 3s ตามคุณสมบัติของระบบไอโอทีที่ใช้ โดยการทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง CU-MAC เทียบกับ X-MAC ที่เป็นตัวแทนของ Asynchronous protocol แบบ Sender Initiate Connection และ RI-MAC ที่เป็นตัวแทนของ Receiver Initiate Connection โดยค่าที่วัดจะเป็นค่าการวัดการส่งสำเร็จ (Packet Delivery Ratio Rate) ที่ระดับชั้นของต้นไม้ที่ต่างกัน และการวัดความล่าช้าที่ส่ง (Delay) ถึง Message Broker Server โดยการทดลองใช้ เวลาในการส่งข้อมูล 30 นาทีจำนวน 10 ครั้งการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ย และมีการการหลับตื่นของอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายที่ 10Hz เท่ากันทุกโพรโทคอล ตารางที่ 4 แสดงค่าตั้งค่าอุปกรณ์ในการทดสอบ

ตารางที่ 4 แสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 7.3 ของ CU-MAC

Device	tmote sky
MAC Layer	CU-MAC
OS	Contiki 2.7
Transport Protocol	UDP/CoAP
Transfer Rate	1 Packet/10s , 5s, 3s
Topology	Tree Topology
Wireless module	CC2420 (IEEE 802.15.4)
Packet Size	120 Byte
Buffer Memory	480 Byte, 120 Byte
Duty Cycle	10Hz

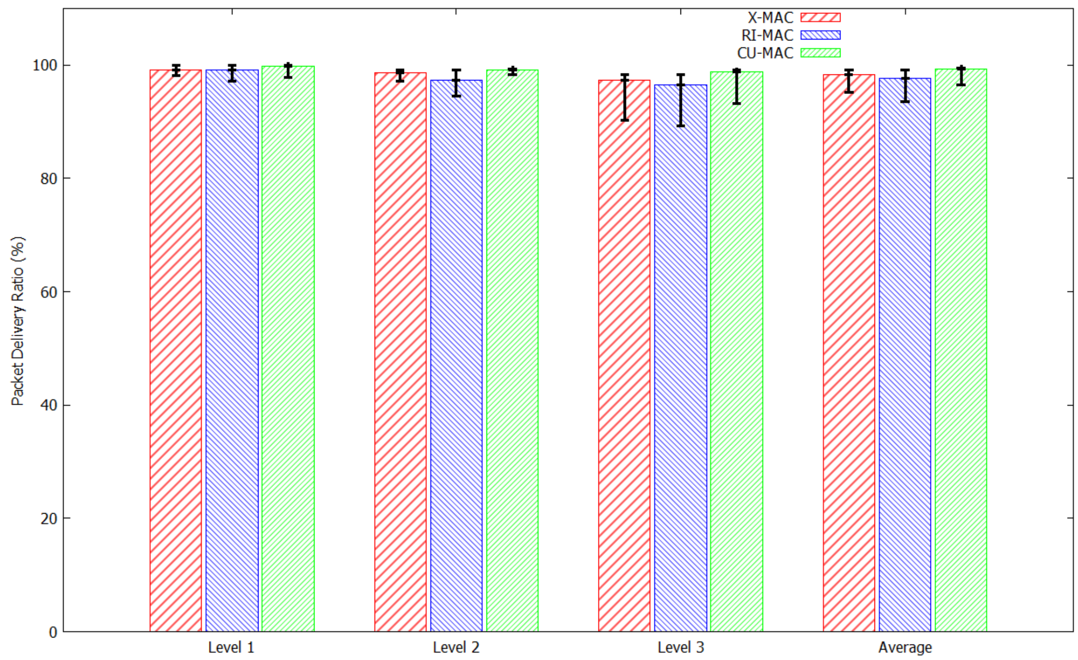


รูปที่ 25 การวางอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายแบบต้นไม้ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบไอโอที

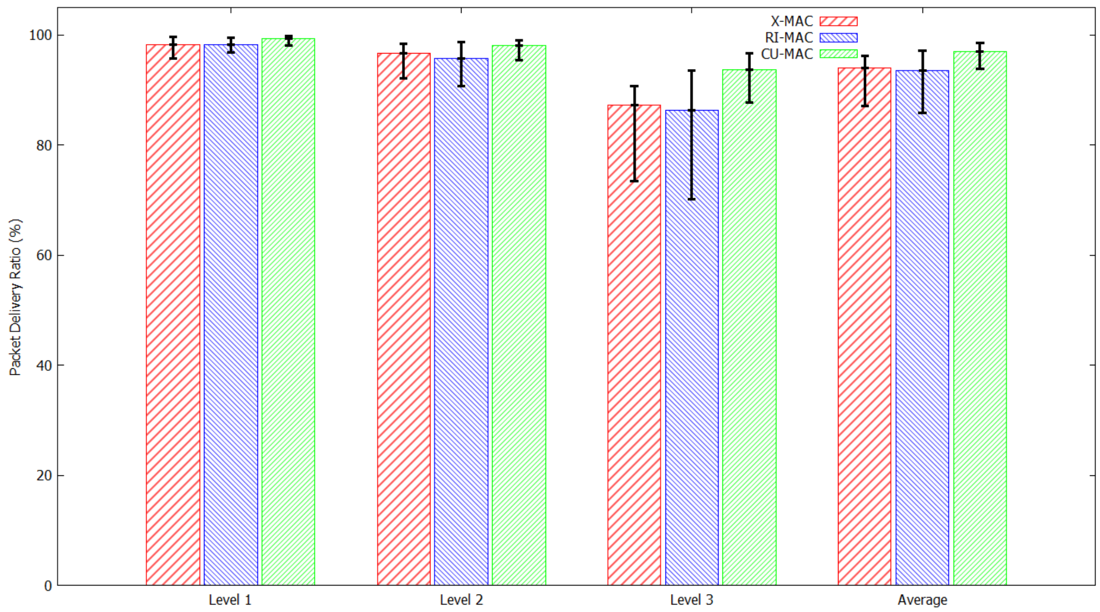
รูปที่ 26 แสดงผลของ Packet Delivery Rate (PDR) ที่ใช้วิธีการส่งทุก 10 วินาที จะพบว่าค่าเฉลี่ย PDR ในทุกระดับชั้นการส่งของ CU-MAC จะอยู่ 99.3% ตามมาด้วย X-MAC ที่ 98.4% และ RI-MAC ที่ 97.6% ตามลำดับ แต่ในทุกระดับชั้นของต้นไม้จะพบว่าการส่งแบบแบบผู้ส่งเป็นคน

ประกาศการส่งจะให้ผลที่ดีกว่าแบบผู้รับเป็นคนเริ่มประกาศการส่ง เพราะการส่งเมื่อมีการส่งจาก สองผู้ส่งไปยังปลายทางเดียวกัน การทำงานของ RI-MAC จะต้องรอผู้รับว่างจากการใช้การรับส่งครั้งก่อนและทำการประการศการรับส่งใหม่การรอรอบการรับส่งในบางครั้งจะทำให้ข้อมูลหมดอายุของการส่งก่อนที่ข้อมูลส่งถึงปลายทาง แตกต่างจาก X-MAC และ CU-MAC โพรโทคอลที่ผู้ส่งเมือรู้ว่ามีผู้ส่งแรกส่งข้อมูลอยู่ จะรอฟังการส่งของผู้ส่งคนแรกเสร็จแล้วผู้ส่งคนที่สองจะทำการส่งข้อมูลให้ผู้รับทันที ส่วนที่ PDR ของ CU-MAC สูงกว่า X-MAC เพราะจะมีข้อมูลตอบกลับเป็นการบอกผู้ส่งว่าได้รับข้อมูลแล้ว ในขณะที่ X-MAC ส่งแล้วแล้วจะหยุดการทำงานในทันที รูปที่ 27 และ 28 แสดงผล PDR ที่ความถี่การส่ง 5 วินาที และ 3 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าให้คล้ายกับ 10 วินาที โดยค่า PDR ที่ดีสุดจะเป็น CU-MAC X-MAC และ RI-MAC ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความถี่ในการส่งข้อมลูจะพบว่าในระดับชั้นล่างๆของต้นไม้ จะพบการสูญหายของข้อมูลเยอะขึ้น สาเหตุเป็นเพราะจำนวนอุปกรณ์ไร้สายที่อยู่ในระดับชั้นที่ 3 มีจำนวนเยอะ ทำให้ต้องแย่งชิงการส่งข้อมูลโดยเฉพาะ RI-MAC อีกทั้งเมื่อข้อมูลใหม่ถูกส่งออกมาแต่ข้อมูลเก่ายังไม่สามารถถูกส่งออกไปได้จึงทำให้ข้อมูลถูกตัดออกจากบัฟเฟร์ ส่วนที่ X-MAC ไม่สามารถส่งได้ดีเท่า CU-MAC เป็นเพราะ X-MAC ใช้ช่องสื่อสารข้อมูลเดียวกับในการรับส่งข้อมูล ในกรณีที่ตัวรับรู้ไร้สายได้ยินการรับส่งจากหลายตัวรับรู้ไร้สายพร้อมๆกัน อาจทำให้ไม่สามารถถอดข้อความจากข้อมูลการประกาศซึ่งแตกต่างจาก CU-MAC ที่แยกช่องส่งระหว่าง Control และ Data ออกจากกันทำให้ จะทำให้ช่อง Control มีที่ว่างสำหรับตัวอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายตัวอื่นๆ ที่ต้องการส่งข้อมูลได้พร้อมๆกัน

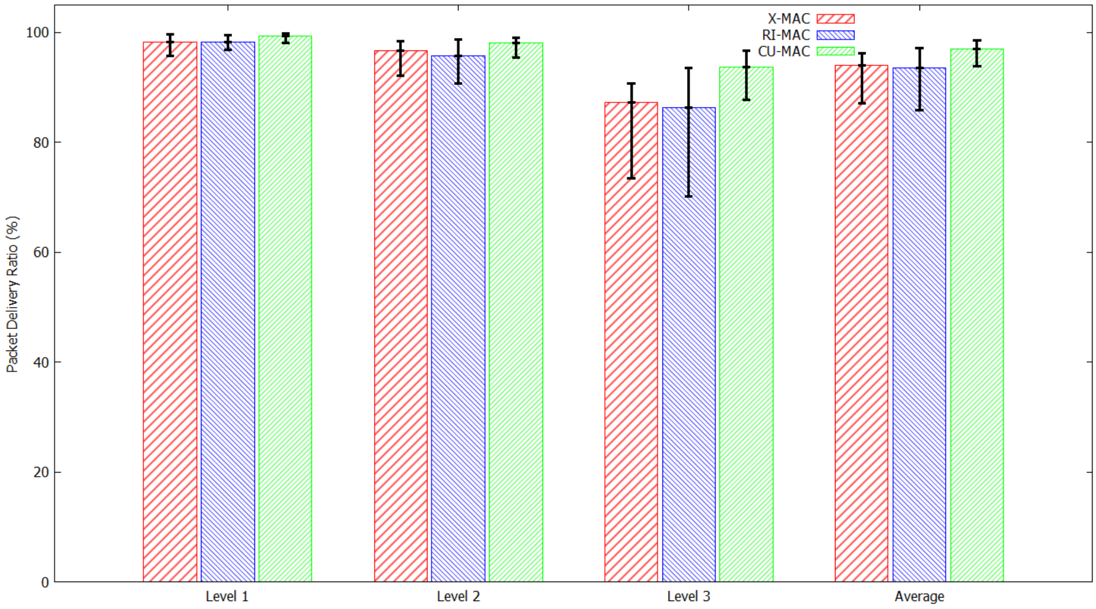
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 26 ผลการทดลองวัดการส่งข้อมูลสำเร็จในระดับชั้นต้นไม้ ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอที ที่อัตราการส่งทุกๆ 10 วินาที

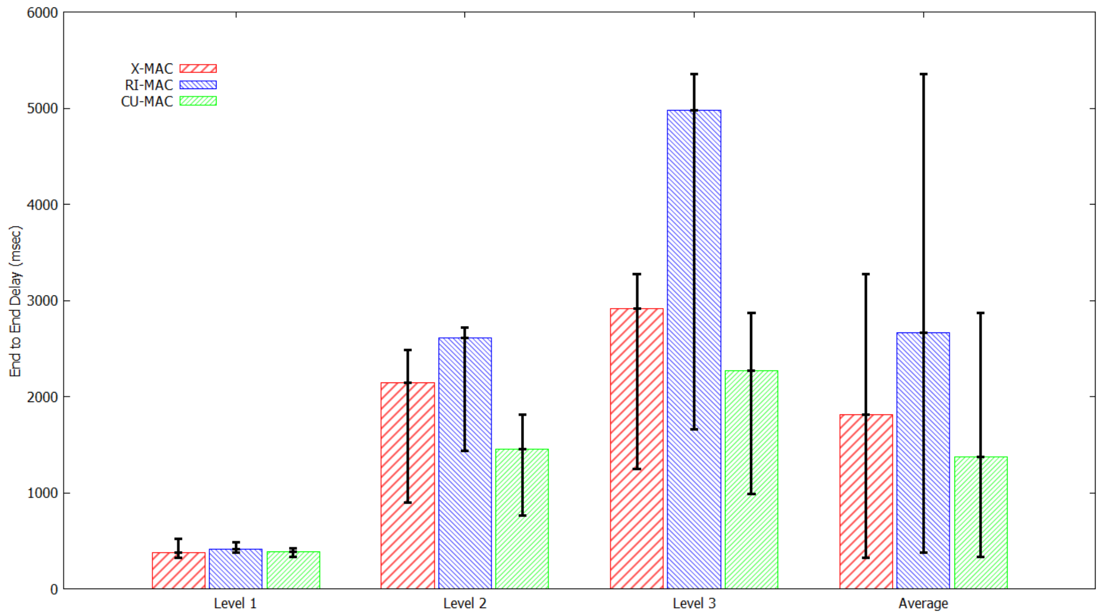


รูปที่ 27 ผลการทดลองวัดการส่งข้อมูลสำเร็จในระดับชั้นต้นไม้ ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอที ที่อัตราการส่งทุกๆ 5 วินาที



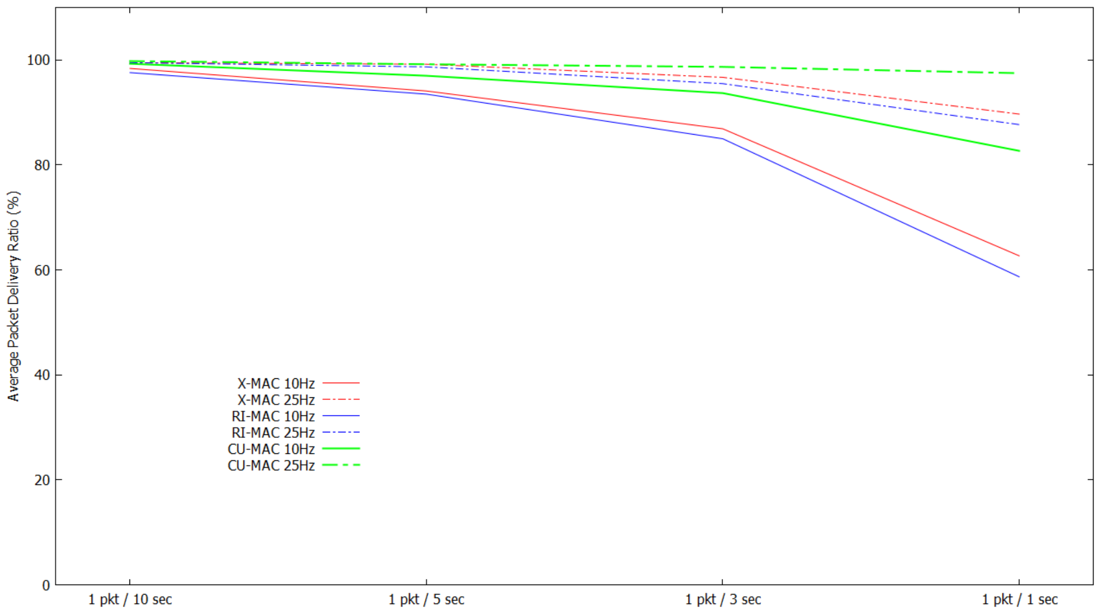
รูปที่ 28 ผลการทดลองวัดการส่งข้อมูลสำเร็จในระดับชั้นต้นไม้ ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอที ที่อัตราการส่งทุกๆ 3 วินาที

รูปที่ 29 แสดงผลการทดลองหาค่าความล่าช้าในการข้อมูลที่ส่งถึง (end to end delay) ของข้อมูลที่ส่งทุกๆ 3 วินาที ในแต่ละระดับชั้นการส่งของต้นไม้ต่างๆ จะพบว่าที่ระดับชั้นที่ 1 และระดับชั้นที่ 2 ทุกๆ โพรโทคอลสามารถส่งข้อมูลได้ทันใน 3 วินาที แต่ที่ระดับชั้นที่ 3 จะพบว่า RI-MAC ค่าเฉลี่ยการส่งสูงกว่า 3 วินาที และ X-MAC ค่าเฉี่ลยใกล้เคียง 3 วินาที แต่ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นเกินกว่า 3 วินาที ในขณะที่ CU-MAC ต่ำกว่า 3 วินาที หมายความว่าการที่ end to end delay เกินกว่า คาบเวลาที่ใช้ในการส่ง หมายความว่า จะมีข้อมูลอยู่ในระบบสะสมไปเรื่อยๆ ผลสุดท้ายจะทำให้ข้อมูลเกิดดารสูญหายเนื่องจาก ข้อมูลสะสะมในระบบเกินขนาดบัฟเฟอร์ อีกทั้งข้อมูลที่ส่งไม่ทันในช่วงที่กำหนด เมือไปถึง message broker server ก็จะถูกกำจัดออกเพราะ ไม่อยู่ในเงื่อนไขในการนำข้อมูลไปใช้งาน



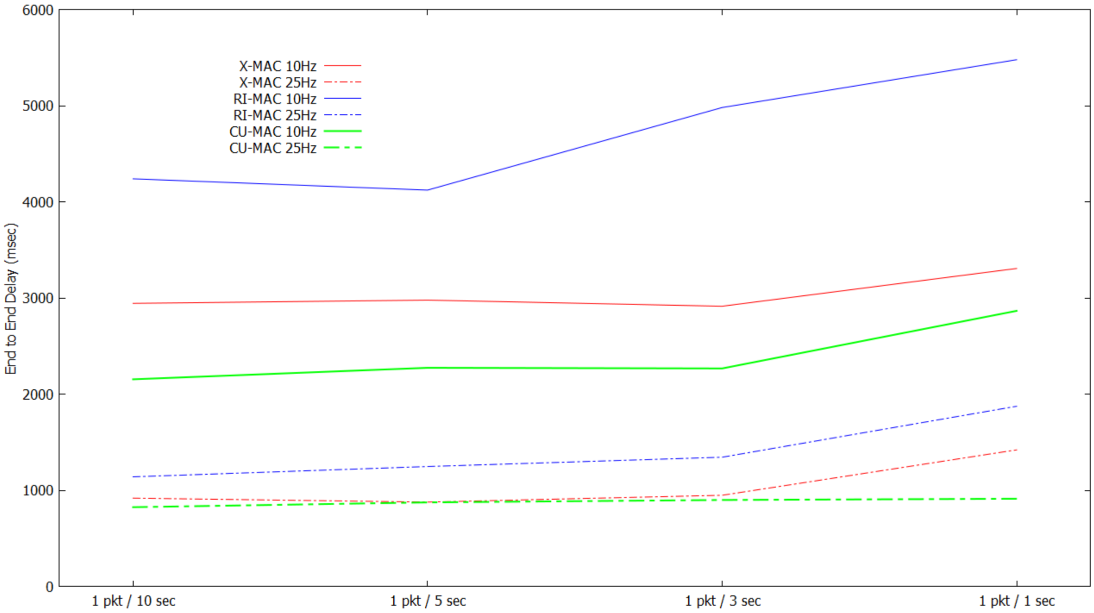
รูปที่ 29 ผลการทดลองวัดความล่าช้าการส่งข้อมูลสำเร็จในระดับชั้นต้นไม้ ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอที ที่อัตราการส่งทุกๆ 3 วินาที

จากการทดลองที่ผ่านมาเราได้ทำการทดลองโดยใช้ค่าการหลับตื่น (Duty cycle) ที่ 10Hz เพื่อในการวัดความสามารถการส่งข้อมูล การทดลองนี้ได้ทำการปรับค่าการหลับตื่นไปที่ 25Hz เพื่อตรวจสอบความสามารถ PDR และ End to End Delay ของทุกๆโพรโทคอลเทียบกันอีกครั้ง โดยการทดลองครั้งนี้เพิ่มคาบเวลาการส่งที่ 1 วินาทีด้วย รูปที่ 30 แสดง PDR ของการทดลองจากการทดลองจะพบเมื่อเพิ่มค่าการหลับตื่นของโพรโทคอล จะทำให้การรับส่งข้อมูลทำได้เร็วขึ้น ข้อมูลที่เกิดการสูญหายจะน้อยลง แต่จากการทดลองจะพบว่า PDR เฉลี่ยของ CU-MAC ที่ 10Hz มีค่าที่ใกล้เคียงกับ X-MAC และ RI-MAC ที่ 25Hz สาเหตุที่เป็นเช่นนั้น เพราะ CU-MAC มีขั้นตอนการส่งข้อมูลเป็นลักษณะต่อเนื่องเมื่อทำการเปิดเชื่อมต่อแล้วสามารถส่งข้อมูลที่มีทิศทางเดียวกันได้เป็นชุด และยังมีการยืนยันการส่งว่าผู้รับได้รับแล้วยัง (Ack) อีกทั้งยังแยกช่องสื่อสารที่ใช้ส่งข้อมูล ออกจากช่องสื่อสารการประกาศ ซึ่งแตกต่างจาก X-MAC ที่ไม่มีประกาศหลังจากการส่งข้อมูลสำเร็จ ซึ่งในกรณีที่มีการส่งจำนวนเยอะอาจทำให้ เกิดการรบกวนของสัญญาญ ส่วน RI-MAC ที่การเปิดเชื่อมต่อขึ้นอยู่ว่าผู้รับพร้อมในการรับข้อมูลหรือไม่ ซึ่งในการที่การส่งข้อมูลปริมาณเยอะ จะทำให้เกิดการแย่งส่งที่ผู้รับ และอาจทำให้ข้อมูลสูญหายได้เยอะซึ่งเป็นข้อจำกัดของ RI-MAC



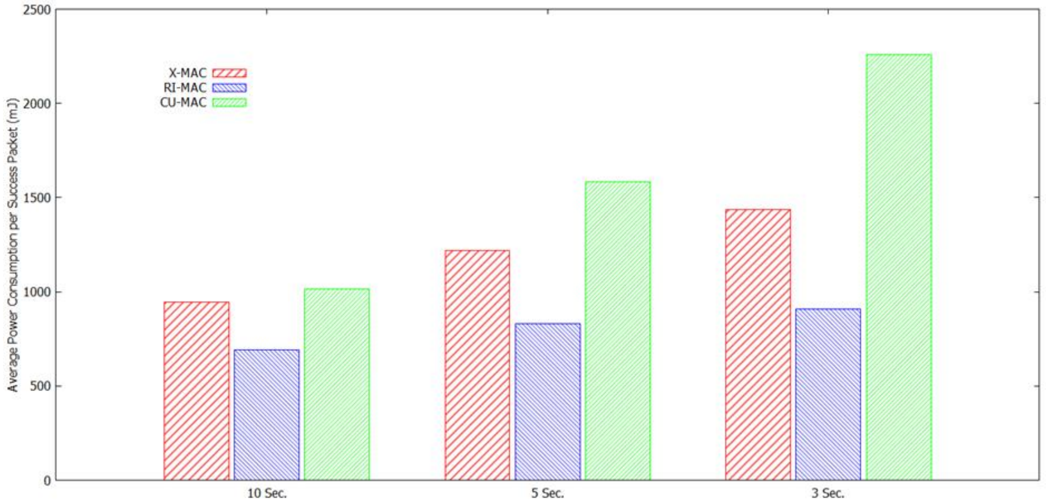
รูปที่ 30 ผลการทดลองวัดความสำเร็จการส่งข้อมูลสำเร็จในระดับชั้นต้นไม้ ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอที ที่อัตราการส่งต่างๆ และคาบเวลาการหลับตื่นที่ 10Hz และ 25Hz

รูปที่ 31 แสดงถึง end to end delay ที่ข้อมูลส่งจากระดับชั้นที่ 3 ของต้นไม้ ซึ่งจะพบว่าที่คาบเวลาการหลับตื่น มีผลทำให้ end to delay คงที่ ถ้าในกรณีที่ค่า PDR มีค่าในช่วง 90-100% ซึ่งเมื่อมีการส่งที่เยอะขึ้นจะทำให้ข้อมูลเข้าไปค้างอยู่ในบัฟเฟอร์ และเกิดการรอและแย่งกันส่งข้อมูล อีกทั้งเมื่อข้อมูลถูกกำจัดหรือโยนทิ้ง จะทำให้ข้อมูลต้องเริ่มการส่งใหม่ เป็นผลให้ ค่า end to end delay มีค่าที่สูงขึ้น จากกราฟจะพบว่า 10Hz ที่ระดับชั้นที่ 3 ของต้นไม้ X-MAC และ CU-MAC สามารถส่งข้อมูลได้ทันที่ความเร็วการส่งทุก 3 วินาที แต่ CU-MAC มีค่า PDR ที่ 93.7% ซึ่งสูงกว่า X-MAC ที่มีค่า PDR 86.9% และเมื่อเปลี่ยนมาใช้คาบเวลาการหลับตื่นที่ 25Hz ที่ความเร็วในการส่งทุกๆ 1 วินาที จะพบว่า CU-MAC ก็ยังสามารถส่งทัน ในขณะที่ RI-MAC และ X-MAC ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ทัน เนื่องจากการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นทั้งสองโพรโทคอลใช้เพียงช่องสื่อสารเดียวจึงทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลทำให้ต้องทำการประกาศการเชื่อมต่อใหม่หลายครั้งจนสำเร็จ



รูปที่ 31 ผลการทดลองวัดความล่าช้าการส่งข้อมูลในระดับชั้นต้นไม้ที่ 3 ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอที ที่อัตราการส่งต่างๆ และคาบเวลาการหลับตื่นที่ 10Hz และ 25Hz

รูปที่ 32 แสดงผลการใช้พลังงานของทั้งสามโพรโทคอล โดยทำการทดลองการส่งข้อมูลทุก 10 5 และ 3 วินาทีตามลำดับ โดยการทดลองการใช้พลังงานนี้ทำบน Cooja Simulation ซึ่งเป็นแบบจำลองการทำงานบน Contiki OS ของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย โดยมีการจัดวางอุปกร์เหมือนการทดลองที่ผ่านมาตามรูปที่ 26 จากการทดลองนี้จะพบว่า เมื่อเทียบการใช้พลังงานกับการส่งข้อมูลที่ส่งสำเร็จ จะพบ RI-MAC X-MAC และ CU-MAC มีการใช้พลังงานจากน้อยไปหามากตามลำดับ สาเหตุที่ CU-MAC ใช้พลังงานมากกว่า เนื่องจากในโพรโทคอลของ CU-MAC มีการเพิ่มการส่งให้ส่งได้พร้อมๆกัน มีการแยกช่องสื่อสารของการส่งข้อมูล ออกจากข้อมูลการส่งการประกาศ อีกทั้งยังมีการประกาศความสำเร็จในการส่งข้อมูล ที่ใช้ในการยืนยันการส่งสำเร็จของข้อมูลอีกด้วย ซึ่งขั้นตอนการทำงานจะซับซ้อนกว่า X-MAC และ RI-MAC จะทำให้ใช้พลังงานมากกว่า แต่ก็สามารถทำให้ส่งข้อมูลจำนวนมากได้เร็วกว่า และสูญเสียข้อมูลที่น้อยกว่า

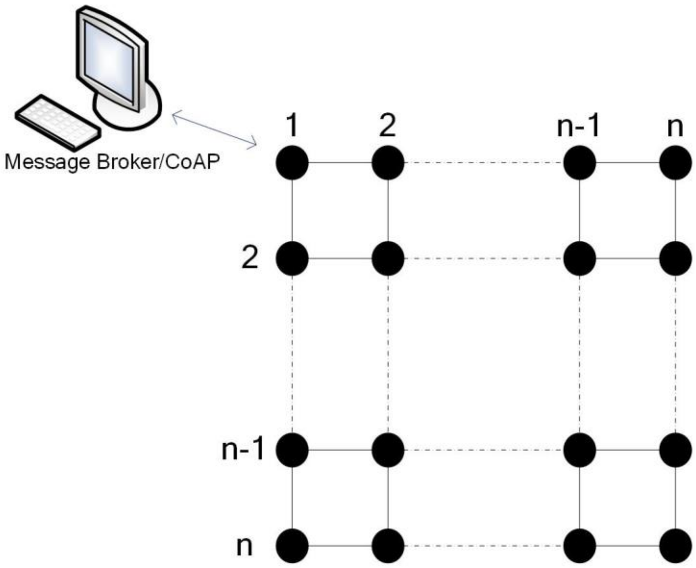


รูปที่ 32 แสดงการใช้พลังงานของโพรโทคอล ที่อัตราการส่งต่างๆ

ถัดมาจะเป็นการทดลองเพื่อวัดความสามารถการรองรับการขยายตัวของ CU-MAC โดยทำการทดลองจะเป็นการทดลองบน Cooja Simulation โดยในการทดลองมีการออกแบบพื้นที่ในวางตัวอุปกรณีไร้สายแบบ ตารางขนาด 10x10 15x15 และ 20x20 จำนวนอุปกรณ์ 100 225 และ 400 อุปกรณ์ตามลำดับ โดยการส่งข้อมูลจะเป็น UDP CoAP ทุก 5 วินาที โดยมีการจัดวางอุปกร์การทดลองได้แสดงอยู่ในตารางที่ 5 และรูปที่ 33

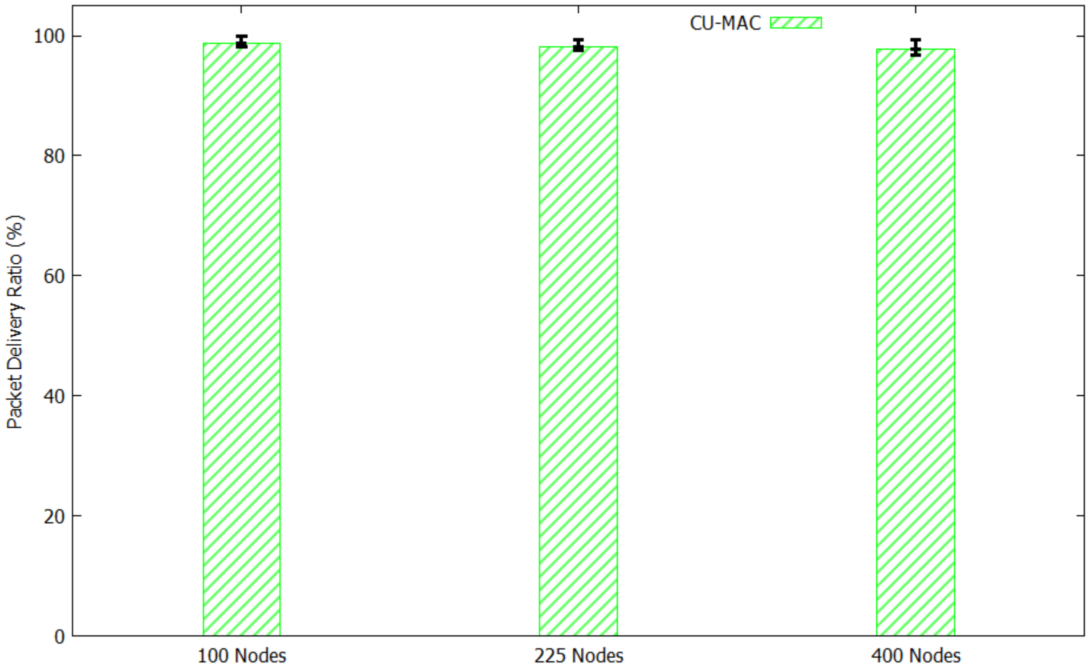
ตารางที่ 5 แสดงการตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความสามารถการขยายตัวของ CU-MAC

Device	tmote sky (Simulation)
MAC Layer	CU-MAC
OS	Cooja Simulation
Transport Protocol	UDP/CoAP
Transfer Rate	1 Packet/5s
Topology	Grid Topology
Grid Size	10x10, 15x15, 20x20
Total Node	100, 225, 400
Wireless module	CC2420 (IEEE 802.15.4)
Packet Size	120 Byte
Buffer Memory	480 Byte, 120 Byte
Duty Cycle	25Hz

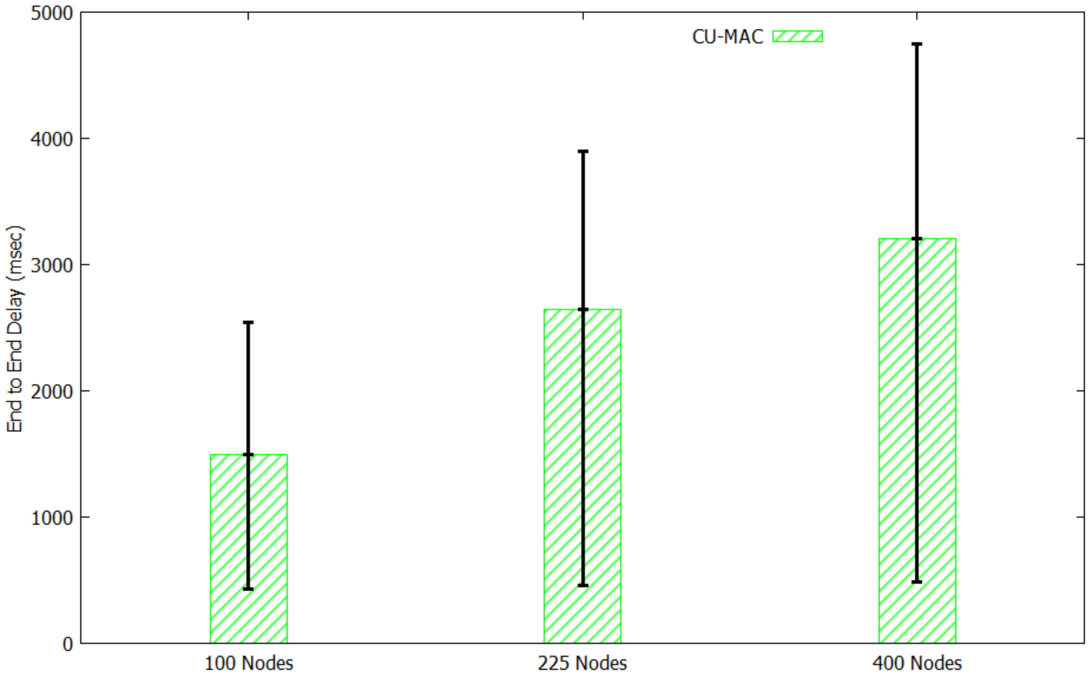


รูปที่ 33 การวางอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายแบบตารางที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการรองรับการขยายตัวในการเชื่อมต่อระบบไอโอที

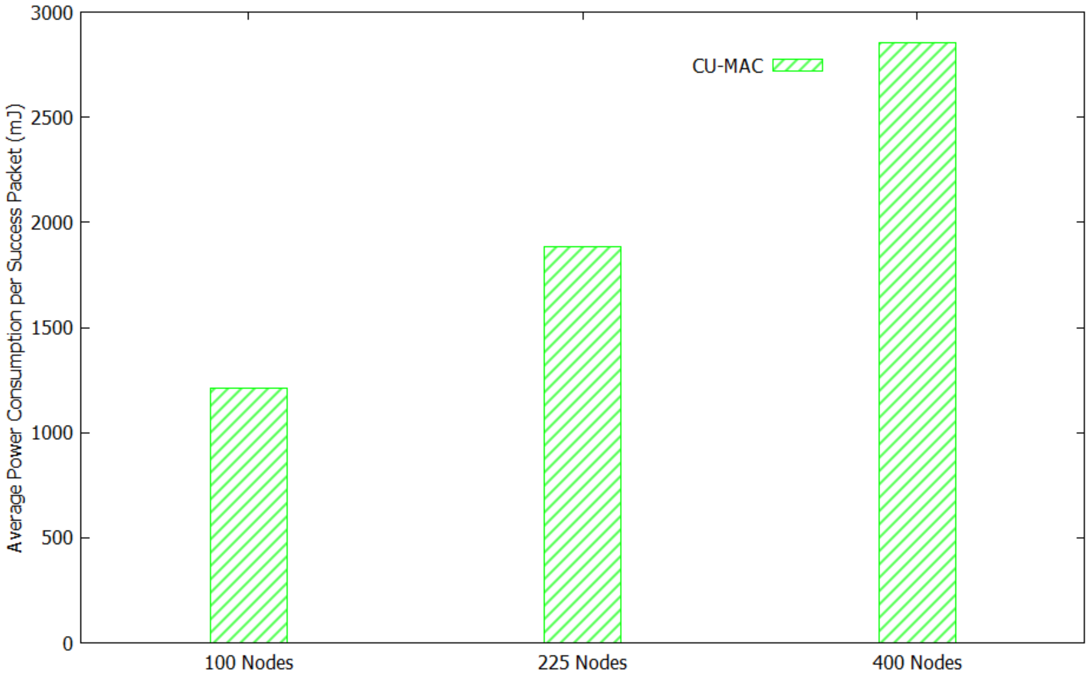
จากการทดลองนี้ รูปที่ 34 แสดงผลการทดลองโดยวัดค่า PDR จะพบว่าค่าเฉลี่ย PDR ของ CU-MAC เมือเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายเข้าไประบบ ไม่ได้ลดลงมากเมือเทียบกับสัดส่วนของจำนวนอุปกรณีที่เพิ่มเข้าไป โดยที่ 100 อุปกรณ์ ค่า PDR อยู่ที่ 98.7% ที่ 225 อุปกรณ์ ค่า PDR 98.2% และที่ 400 อุปกรณ์ค่า PDR อยู่ 97.7% และเมื่อเทียบกับค่า End to End Delay จะพบว่าค่าของ End to End Delay มีการเพิ่มขึ้นจากที่มีจำนวนอุปกณ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุปกรณ์เข้าไปในระบบ จะทำให้ระยะทางที่ใช้ในการส่งไกลขึ้น ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 35 สำหรับการใช้พลังงานกับการส่งข้อมูลที่ส่งสำเร็จ จะพบว่า CU-MAC มีการใช้พลังงานมากขึ้นตามลำดับของจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้าไป สาเหตุที่ CU-MAC ใช้พลังงานมากขึ้นเป็นเหตุผลผลเช่นเดียวกับค่าความล่าช้าที่เพิ่มขึ้นจากระยะทางที่ส่งข้อมูลไกลขึ้นจากเดิม ซึ่งผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 36



รูปที่ 34 ผลการทดลองวัดการส่งข้อมูลสำเร็จในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอทีแบบตาราง ที่อัตราการส่งทุกๆ 5 วินาที



รูปที่ 35 ผลการทดลองวัดความล่าช้าในการส่งข้อมูล ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอที แบบตาราง ที่อัตราการส่งทุกๆ 5 วินาที



รูปที่ 36 แสดงการใช้พลังงานของโพรโทคอล ในการทดลองเชื่อมต่อระบบไอโอทีแบบตาราง ที่อัตราการส่งทุกๆ 5 วินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

8.สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการวัดผลการทำงานของโพรโทคอล CU-MAC จะพบในการทำของเครือข่ายตัวรับไร้สายปกติ โพรโทคอลที่นำเสนองานวิจัยสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบที่ให้แยกช่องข้อมูลสื่อสารของการการประกาศการเชื่อมต่อออกจากช่อสื่อสารที่ส่งข้อมูล การรับส่งสองทิศทางในคู่อุปกรณ์ที่ต้องรับส่งข้อมูลถึงกัน การรับส่งข้อมูลที่สามารถส่งข้อมูลได้ต่อเนื่อง และการป้องกันปัญหา Hidden Terminal Problem ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้ความสำเร็จในการรับข้อมูลของการส่งถึง 99.8% ที่คาบการหลับตื่น 5Hz และจำนวนผู้ส่งถึง 5 ผู้ส่งในผู้รับเดียวกัน ซึ่งสูงกว่าโพรโทคอลที่นำมาเปรียบเทียบถึง 62.8%

อีกทั้งผลการทดลองที่นำโพรโทคอลในอินเตอร์เน็ตมาใช้กับ CU-MAC ที่เชื่อมโยงเข้าระบบไอโอที จะพบที่อัตราการส่งข้อมูลเข้าระบบไอโอทีทุกๆ 3 วินาที CU-MAC ก็สามารถทำงานได้ดีกว่าโพรโทคอลที่นำมาเปรียบเทียบ โดยค่าความสำเร็จในการรับข้อมูลของ CU-MAC สามารถทำค่าเฉลี่ยได้ 93.7% อีกทั้งค่าความล่าช้าในการส่งข้อมูลถึงยังมีค่าเฉลี่ย 1.37 วินาที ซึ่งต่ำกว่าอัตราการส่งที่คงที่ สำหรับการใช้พลังงานของโพรโทคอลที่นำเสนอ จะพบว่ามีการใช้พลังงานที่สูงกว่า โพรโทคอลที่ถูกนำมาเปรียบเทียบทุกตัว สาเหตุที่เป็นเช่นนั้น เพราะ CU-MAC โพรโทคอลมีขั้นตอนวิธีการทำงานที่มากว่าโพรโทคอลในการเปรียบเทียบ แต่จะพบว่าค่าการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นตรงเมื่อเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งแลกเปลี่ยนการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในโพรโทคอล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8.2 ปัญหาที่พบจากการวิจัย

ระหว่างการดำเนินงานวิจัยได้พบปัญหา อุปสรรคและข้อจำกัดดังต่อไปนี้

การทำงานโพรโทคอลที่นำเสนอ มีการแยกช่องสัญญาญสื่อสาร ของการประกาศการเชื่อมต่อออกจากช่องสัญญาญสื่อสารข้อมูล ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ IEEE 802.15.4 จะต้องย้ายช่องสื่อสารการทำงาน ซึ่งในอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบไม่สามารถย้ายช่องสัญญาญสื่อสารได้ในขณะที่โมดูลการสื่อสารไร้สายทำงานอยู่ จึงจำเป็นต้องปิดโมดูลการสื่อสารไร้สายก่อนทำการย้ายช่องสัญญาญ ซึ่งทำให้สูญเสียเวลาในการเปิดปิดโมดูลการสื่อสารไร้สาย โดยค่าเวลาที่เปิดปิดไม่คงที่ทำให้ในบางครั้งผู้รับข้อมูล อาจจะย้ายช่องสัญญาญสื่อสารไปได้ช้ากว่าผู้ส่งข้อมูล

นอกจากนี้การย้ายช่องสัญญาญสื่อสารในการเลือกเป็นการสุ่มค่าช่องสัญญาญขึ้นมา ซึ่งอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย IEEE 802.15.4 ทำงานที่ความถี่ 2.4GHz ซึ่งทับซ้อนกับ IEEE802.11 a/b/g/n

ทั่วไป ซึ่งในบางครั้งการทดลองจะปัญหาการถูกรบกวนจากสัญญาญไร้สายของอุปกรณ์อื่น ทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล

8.3 ข้อเสนอแนะ

การนำโพรโทคอล CU-MAC ไปใช้งานสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงทุกครั้งคือการกำหนดคาบเวลาการหลับตื่นในตัวอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สาย เพราะการที่กำหนดค่าการหลับตื่นให้มีค่าสูง (ตื่นขึ้นมารับฟังข้อมูลบ่อยๆ) จะทำให้การรับส่งข้อมูลทำได้เร็ว แล้วปริมาณการส่งที่สูง แต่การกำหนดค่าในลักษณะนั้นจะทำให้การใช้พลังงานของตัวอุปกรณ์เองก็สูงอย่างมากเช่น ดังนั้นการกำหนดค่าการหลับตื่นของอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายยังต้องคำนึง หรือคาดกรณ์ปริมาณข้อมูล หรืออัตราการส่งข้อมูลที่ต้องการในระบบด้วย เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการรับส่ง เช่นถ้าต้องการส่งข้อมูลจากระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเข้าระบบไอโอที ทุกๆ 10 วินาที อาจจะเลือกค่าการหลับตื่นที่ 5Hz ก็เพียงพอแล้ว หรือถ้าต้องการส่งทุกๆ 3 วินาที อาจจะต้องปรับค่าการหลับตื่นไปที่ 10Hz

8.4 งานวิจัยในอนาคต

จากงานวิจัยนี้ยังมีประเด็นที่สามารถไปนำทำการวิจัยต่อได้อีกดังต่อไปนี้

1. การหาคาบเวลาการหลับตื่นของอุปกรณ์ ในโพรโทคอลที่นำเสนอเป็นการกำหนดค่าแบบตายตัวซึ่งค่านี้ จากการวิจัยจะพบว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูล อีกทั้งยังเป็นค่าที่ทำให้เกิดการใช้พลังงานเป็นปริมาณมาก ซึ่งจากการวิจัยพบว่าน่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถปรับเปลี่ยนค่านี้แบบทันทีขนาดที่ใช้งานได้โดยเลือกค่าที่เหมาะสมกับสถานกรณ์ที่เครือข่ายเป็นอยู่ในขณะนั้น

2. การนำโพรโทคอลที่นำเสนอไปใช้งานในงานลักษณะอื่นๆ เช่นในเครือข่ายตัวรับรู้มัลติมีเดียไร้สาย ที่สามารถปรับเปลี่ยนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายไปทำงานแบบมัลติมีเดีย ที่มีลักษณะการรับส่งข้อมูลคล้ายกับโพรโทคอในอินเตอร์เน็ตทั่วไป

รายการอ้างอิง

1. Chandrakant, N., et al. *Middleware service oriented earthquake detection in advance using WSNs*. in *2012 Fourth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*. 2012.
2. Benkhelifa, I., N. Nouali-Taboudjemat, and S. Moussaoui. *Disaster Management Projects Using Wireless Sensor Networks: An Overview*. in *2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. 2014.
3. Bhosale, T., M. Patil, and V. Wadhai. *A smart farming alternative for small Pomegranate farms of India*. in *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*. 2015.
4. Mirabella, O. and M. Brischetto, *A Hybrid Wired/Wireless Networking Infrastructure for Greenhouse Management.* IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011. **60**(2): p. 398-407.
5. Al-Fuqaha, A., et al., *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications.* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015. **17**(4): p. 2347-2376.
6. Mainetti, L., L. Patrono, and A. Vilei. *Evolution of wireless sensor networks towards the Internet of Things: A survey*. in *SoftCOM 2011, 19th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*. 2011.
7. Meddeb, A., *Internet of things standards: who stands out from the crowd?* IEEE Communications Magazine, 2016. **54**(7): p. 40-47.
8. Xiaohui, C., L. Qiliang, and H. Junquan. *Analysis of IEEE802.15.4 network performance comprehensive evaluation and prediction*. in *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*. 2013.

9. Gigl, T., et al. *Experimental characterization of ranging in IEEE802.15.4a using a coherent reference receiver*. in *2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. 2009.
10. Marcoen, L., B.V.d. Bergh, and S. Pollin. *On the performance of 802.15.4e in the real world*. in *2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. 2015.
11. Colitti, W., et al. *Evaluation of constrained application protocol for wireless sensor networks*. in *2011 18th IEEE Workshop on Local & Metropolitan Area Networks (LANMAN)*. 2011.
12. Kohvakka, M., et al. *Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications*. in *PE-WASUN 2006: Proceedings of the Third ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks*. 2006.
13. Gehlaut, S., J. Koti, and K. Sakhardande. *To improve the lifetime of wireless sensor network*. in *2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*. 2016.
14. Wong, K.J. and D.K. Arvind. *A hybrid wakeup signalling mechanism for periodic-listening MAC algorithms*. in *ICON 2007 - Proceedings of the 2007 15th IEEE International Conference on Networks*. 2007.
15. Shelby, Z., K. Hartke, and C. Bormann, *RFC 7252 - The Constrained Application Protocol (CoAP).* Internet Engineering Task Force (IETF), 2014.
16. Montenegro, G., et al., *RFC 4944 -Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.4* Internet Engineering Task Force (IETF), 2007.
17. Palattella, M.R., et al., *Standardized protocol stack for the internet of (important) things.* IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013. **15**(3): p. 1389-1406.
18. Pei, G. and C. Chien. *Low power TDMA in large wireless sensor networks*. in *Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM*. 2001.
19. Heinzelman, W.B., A.P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, *An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks.* IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002. **1**(4): p. 660-670.

20. Callaway, E.H., *The Wireless Sensor Network MAC*, in *Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures*. 2005. p. 239-276.

21. Hill, J.L. and D.E. Culler, *Mica: A wireless platform for deeply embedded networks.* IEEE Micro, 2002. **22**(6): p. 12-24.

22. Rajendran, V., K. Obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves. *Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks*. in *SenSys'03: Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. 2003.

23. 15.4:, I.S.-I.S.f.I.T.-P., *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless PersonalArea Networks (LR-WPANs).* 2006.

24. Dam, T.v. and K. Langendoen, *An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*, in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. 2003, ACM: Los Angeles, California, USA. p. 171-180.

25. Yessad, S., et al. *R-MAC: Reservation Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks*. in *32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007)*. 2007.

26. Tong, F., et al. *P-MAC: A Cross-Layer Duty Cycle MAC Protocol Towards Pipelining for Wireless Sensor Networks*. in *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2011.

27. El-Hoiydi, A. and J.D. Decotignie. *WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure Wireless Sensor networks*. in *Proceedings - International Symposium on Computers and Communications*. 2004.

28. Polastre, J., J. Hill, and D. Culler. *Versatile low power media access for wireless sensor networks*. in *SenSys'04 - Proceedings of the Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. 2004.

29. Vigneshwar, G. and T. Senthil. *Life time maximization analysis with application to LL MAC & RI-MAC protocol in wireless sensor networks*. in *2013 IEEE Conference on Information and Communication Technologies, ICT 2013*. 2013.

30. Buettner, M., et al. *X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks*. in *SenSys'06: Proceedings of the Fourth International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. 2006.
31. Beaudaux, J., et al., *Thorough empirical analysis of X-MAC over a large scale internet of things testbed.* IEEE Sensors Journal, 2014. **14**(2): p. 383-392.
32. Fernandes, R.F. and D. Brandão, *Proposal of Receiver Initiated MAC Protocol for WSN in urban environment using IoT.* IFAC-PapersOnLine, 2016. **49**(30): p. 102-107.
33. Yigitel, M.A., O.D. Incel, and C. Ersoy, *QoS-aware MAC protocols for wireless sensor networks: A survey.* Computer Networks, 2011. **55**(8): p. 1982-2004.
34. Zhenzhen, L. and I. Elhanany. *RL-MAC: A QoS-Aware Reinforcement Learning based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks*. in *2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. 2006.
35. Yang, L., I. Elhanany, and Q. Hairong. *An energy-efficient QoS-aware media access control protocol for wireless sensor networks*. in *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005.* 2005.
36. Nguyen, K., et al. *A Prioritized MAC Protocol for Multihop, Event-driven Wireless Sensor Networks*. in *2006 First International Conference on Communications and Electronics*. 2006.
37. Saxena, N., A. Roy, and J. Shin, *Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS-MAC protocol for wireless multimedia sensor networks.* Computer Networks, 2008. **52**(13): p. 2532-2542.
38. Firoze, A.M., L.Y. Jun, and L.M. Kwong. *PR-MAC A Priority Reservation MAC Protocol For Wireless Sensor Networks*. in *2007 International Conference on Electrical Engineering*. 2007.
39. Hoon, K. and M. Sung-Gi. *Priority-based QoS MAC protocol for wireless sensor networks*. in *2009 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing*. 2009.
40. Yoon*, S., et al. *QoMOR: A QoS-aware MAC protocol using Optimal Retransmission for Wireless Intra-Vehicular Sensor Networks*. in *2007 Mobile Networking for Vehicular Environments*. 2007.

41. Slama, I., et al. *A hybrid MAC with prioritization for wireless sensor networks*. in *2008 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*. 2008.

42. Yigitel, M.A., O.D. Incel, and C. Ersoy, *Diff-MAC: a QoS-aware MAC protocol with differentiated services and hybrid prioritization for wireless multimedia sensor networks*, in *Proceedings of the 6th ACM workshop on QoS and security for wireless and mobile networks*. 2010, ACM: Bodrum, Turkey. p. 62-69.

43. Yahya, B. and J. Ben-Othman, *Energy efficient and QoS aware medium access control for wireless sensor networks.* Concurr. Comput. : Pract. Exper., 2010. **22**(10): p. 1252-1266.

44. Baroudi, U. *EQoSA: Energy and QoS aware MAC for wireless sensor networks*. in *2007 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications*. 2007.

45. Paul, T. and G.S. Kumar. *Safe Contiki OS: Type and Memory Safety for Contiki OS*. in *2009 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*. 2009.

46. OS, C., http://www.contiki-os.org.

47. ASSOCIATION, I.S., *IEEE802.15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Network (WPAN).* 2006.

48. Chipcon cc2240, http://www.chipcon.com.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ธนาภูมิ แดนมณี เกิดวันที่ 2 ตุลาคม 2516 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศกรรมศาตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2540 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University