http://journal.rmutp.ac.th/

การประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายภายใต้สภาพแวดล้อมจริง

ชาญวิช สุวรรณพงศ์*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
214 ถนนนิตโย ตำบลหนองญาติ อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

รับบทความ 10 ธันวาคม 2016; ตอบรับบทความ 10 เมษายน 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็กภายใต้สภาพแวดล้อมจริง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการส่งข้อมูลและประเมินประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ผู้วิจัยได้ทำการจัดตั้งเครือข่ายข่ายไร้สายจำนวน 4 โนดและสร้างสถานการณ์ของการสื่อสารกันระหว่างโนดในรูปแบบชิงเกิ้ลฮอปและมัลติฮอป เพื่อทำการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจากเครือข่ายตามตัวชี้วัดประสิทธิภาพการส่งข้อมูล ผลการวิจัยพบว่าจำนวนฮอปของการสื่อสารและสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำโพรโทคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมาประยุกต์ใช้งานจริง

คำสำคัญ : เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย; ประเมินประสิทธิภาพ; โพรโทคอลอาร์พีแอล

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 2848 8802, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: schanwit@npu.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

Performance Evaluation of Data Transmission in RPL Protocol of Wireless Sensor Network under Real Environment

Chanwit Suwannapong*

Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University
214 Nityo Road, Nongyat, Muang Nakhon Phanom, Nakhon Phanom 48000

Received 10 December 2016; accepted 10 April 2017

Abstract

This research is aimed to establish the small wireless sensor network under the real environment. The objectives this research is aimed to study the data transmission and evaluate the data transmission performance of RPL protocol in wireless sensor network. Four nodes of wireless sensor network have been installation and transmissions between nodes in single-hop and multi-hop have been simulation for testing and analyzing data from the network following the transmission performance index. The research found that the number of hop and building environment are the principle factor to the performance of RPL protocol this might be the major limit to implement the RPL protocol in wireless sensor network.

Keywords : Wireless Sensor Network; Performance Evaluation; RPL Protocol

** Corresponding Author. Tel.: +668 2848 8802, E-mail Address: schanwit@npu.ac.th*

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ เซ็นเซอร์และวงจรสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว อีกทั้งมีแนวโน้มของราคาต้นทุนในการผลิตต่ำลงมากเมื่อเทียบกับในอดีต จนสามารถนำอุปกรณ์เหล่านี้มาประยุกต์ใช้และพัฒนาขึ้นเป็นเซ็นเซอร์โนด (Sensor Node) ที่มีความสามารถในการตรวจวัดข้อมูล ประมวลผลและสามารถรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ภายในเซ็นเซอร์โนดตัวเดียวกัน [1] ในความสามารถของเซ็นเซอร์โนดที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้มีการนำเซ็นเซอร์โนดมาทำงานร่วมกันและสร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) เพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการนำมาใช้กับงานตรวจวัดสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ความชื้น แสงสว่าง เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในงานต่างๆ นั้น หากจะให้เครือข่ายมีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นจะต้องมีการประเมินประสิทธิภาพของส่วนโพรโทคอลในการส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

การประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลที่ใช้ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ส่วนใหญ่มีการประเมินประสิทธิภาพด้วยการทำการทดสอบผ่านการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ [2] ซึ่งรายงานในการประเมินประสิทธิภาพด้วยสภาวะแวดล้อมจริงยังมีอยู่น้อย [3] เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ สถานที่และงบประมาณในทดลองการที่มีราคาค่อนข้างสูง แต่การจำลองด้วยซอฟต์แวร์นั้นไม่สามารถกำหนดสภาพแวดล้อมจริงได้ทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ในการทดลองภายในอาคารที่มีห้องทำงานหลายห้อง มีสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้ในระหว่างการส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โนด และที่สำคัญมากอีกอย่างหนึ่ง ก็คือสัญญาณของการสื่อสารไร้สายที่ใช้คลื่นความถี่เป็นพาหะในการส่งข้อมูลนั้น ในการจำลองด้วยซอฟต์แวร์โดยส่วนใหญ่ เป็นสัญญาณที่ไม่มีลักษณะของความบกพร่องของสัญญาณ เช่น การลดทอนสัญญาณตามสภาพแวดล้อมจริง (Attenuation) การจางหายของสัญญาณ (Fading) และการผิดเพี้ยนของสัญญาณ (Distortion) [4] ซึ่งในสภาพแวดล้อมจริงของฮาร์ดแวร์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายไม่เป็นเช่นนั้น ดังนั้นการที่จะให้เครือข่ายมีการทำงานและส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง จึงจำเป็นจะต้องมีการจัดตั้งและทดลองเครือข่ายภายใต้สภาพแวดล้อมจริง

สำหรับงานวิจัยนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลของโพรโทคอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จึงได้นำโพรโทคอลอาร์พีแอล (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) ที่ถูกออกแบบมาสำหรับการค้นหาเส้นทางในการรับ-ส่งข้อมูลทั้งในรูปแบบการสื่อสารแบบซิงเกิ้ลฮอป (Single-hop) และมัลติฮอป (Multi-hop) ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมาใช้ในการทดลอง โดยการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง เพื่อสะท้อนให้เห็นประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลโดยใช้โพรโทคอลอาร์พีแอล และช่วยให้จะทราบถึงข้อจำกัดของการใช้งานเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการนำเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ ในอนาคต

1.1 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) คือ เครือข่ายที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์โนดขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก โดยเซ็นเซอร์โนดที่อยู่ภายในเครือข่ายมีการสื่อสารกันโดยไม่ใช้สาย และทำหน้าที่ตรวจวัดคุณสมบัติของสิ่งแวดล้อมที่สนใจ พร้อมทั้งส่งข้อมูลคุณสมบัติเหล่านั้นกลับไปยังโนดที่ต้องการข้อมูล โดยให้เซ็นเซอร์โนดระหว่างทางช่วยส่งข้อมูลต่อๆ กัน เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปประมวลผลและสร้างองค์ความรู้ใหม่ [5] ในการส่งข้อมูลจากโนดต้นทางที่ทำหน้าที่ตรวจวัดไปยังโนดปลายทางที่ต้องการข้อมูล

นั้น จำเป็นจะต้องมีวิธีการและหลักเกณฑ์ในการสื่อสารกันระหว่างโนด สำหรับส่วนที่ควบคุมการทำงานดังกล่าวเรียกว่า โพรโทคอล [6] ซึ่งจะเป็นส่วนที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

1.2 การประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูล

ในการประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จะใช้ตัวชี้วัดเช่นเดียวกับการประเมินประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการทำงานและการส่งข้อมูลของเครือข่ายว่าทำงานได้ดีเพียงใด โดยเทคนิคที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพแบ่ง ออกเป็น 3 เทคนิค คือ การวัดจากระบบจริง (Measurement) การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation) และการวิเคราะห์ (Analysis) [7] สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการประเมินประสิทธิภาพด้วยการวัดจากระบบจริง เนื่องจากสามารถครอบคลุมข้อจำกัดทั้งหมดของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายซึ่งการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์ไม่สามารถกำหนดได้ ยกตัวอย่างเช่น ข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ที่เชื่อมต่อ ระบบปฏิบัติการ และคุณสมบัติทางกายภาพของคลื่นวิทยุ ในการประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลในเครือข่าย จะประเมินตามตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่กำหนดโดยตัวชี้วัดที่สำคัญ ได้แก่

1.2.1 อัตราการส่งข้อมูล (Throughput)

เป็นอัตราส่วนของผลรวมของขนาดของแพ็กเก็ตที่ส่งไปยังปลายทางได้สำเร็จอย่างถูกต้องครบถ้วนต่อช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตนั้นตั้งแต่เริ่มทำการสื่อสารจบกระทั่งจบการสื่อสาร [8] ในการวัดจะใช้การวัดเทียบกับหนึ่งหน่วยของเวลา ซึ่งจะมีหน่วยเป็นกิโลบิตต่อวินาที (kbps) ค่าอัตราการส่งข้อมูลนี้ไม่ใช่ค่าสูงสุดที่การส่งข้อมูลสามารถรับ-ส่งได้ (Bandwidth) แต่จะหมายถึงการรับประกันอัตราการส่งข้อมูลขนาดน้อยสุดที่การสื่อสารจะมีได้ (Minimum Throughput Guarantee)

1.2.2 ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนอง (Response time)

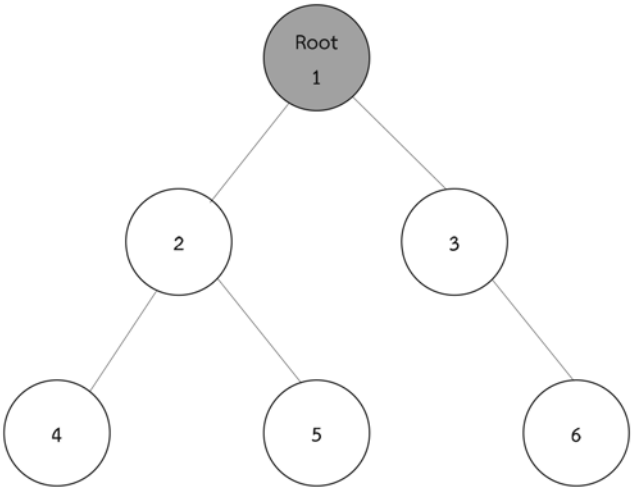
เป็นระยะเวลาเฉลี่ยตั้งแต่แพ็กเก็ตถูกสร้างขึ้นและถูกส่งจากต้นทางไปยังปลายทางแต่ละแพ็กเก็ตได้อย่างถูกต้องครบถ้วน ซึ่งจะมีหน่วยเป็นมิลลิวินาที (ms) [7]

1.2.3 อัตราการความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet Delivery Ratio)

เป็นอัตราส่วนของแพ็กเก็ตที่ปลายทางได้รับเทียบกับแพ็กเก็ตที่ถูกส่งจากต้นทาง [7] โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 หากค่าอัตราการความสำเร็จในการส่งข้อมูลเป็น 1 นั่นแสดงว่าโพรโทคอลที่ทำการประเมินอยู่นั้นมีประสิทธิภาพสูง

1.3 โพรโทคอลอาร์พีแอล

IETF ROLL working group ได้พัฒนาโพรโทคอลอาร์พีแอล (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) สำหรับการใช้งานกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ถูกออกแบบมาสำหรับการค้นหาเส้นทางในการรับ-ส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ที่มีการลดขนาดของข้อมูล มีแบนด์-วิดท์และการใช้พลังงานต่ำ [9] ซึ่งเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดไม่มากและมีการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป โดยใช้อัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางแบบ Distance Vector ที่เลือกใช้เส้นทางที่ดีที่สุดและมีจำนวนฮอป (Hop) ของการสื่อสารจากต้นทางไปยังปลายทางน้อยกว่าเส้นทางอื่น โครงสร้างของเครือข่าย (Network Topology) จึงมีลักษณะเครือข่ายที่มีการเชื่อมต่อเป็นแบบระดับชั้น (Hierarchical Network) ลักษณะคล้ายโครงสร้างต้นไม้ซึ่งแตกออกเป็นกิ่งก้านสาขา ซึ่งมีโนดหลัก (Root Node) 1 โนด เพื่อสร้างกราฟและหาเส้นทางการส่งข้อมูลของโนดในเครือข่าย แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายที่ใช้โพรโทคอลอาร์พีแอล

จุดเด่นของโพรโทคอลอาร์พีแอล คือ หากเกิดปัญหาเส้นทางในการส่งข้อมูลปัจจุบันใช้งานไม่ได้ เครือข่ายจะเข้าสู่การทำงานในส่วนของการซ่อมเส้นทาง โดยโนดที่ตรวจสอบพบปัญหาจะทำการเลือกโนดแม่ใหม่ โดยการส่งข้อความ DIS (DODAG Information Solicitation) ออกไปยังโนดข้างเคียง หลังจากนั้นก็จะรอรับการตอบกลับจากโนดแม่ใหม่เพื่อสร้างเส้นทางการเชื่อมต่อ เมื่อสร้างเส้นทางการเชื่อมต่อเสร็จสิ้นแล้ว เครือข่ายจะกลับมาทำงานปกติ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็ก ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงนั้น จะทำการทดสอบการส่งข้อมูลในบริเวณพื้นที่ชั้น 4 อาคารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 โครงสร้างหลักที่นำมาใช้จัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็กในสภาพแวดล้อมจริง

อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลอง ใช้เซ็นเซอร์โนดซึ่งเป็นโมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สาย รุ่น CC2530EM ที่เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่บอร์ดจำนวน 2 ชุด บอร์ดเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ รุ่น SmartRF05EB ที่เชื่อมต่อกับโมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สาย รุ่น CC2530EM จำนวน 2 ชุดและเชื่อมต่อเครื่องคอมพิวเตอร์จำนวน 2 เครื่อง เพื่อทำหน้าที่เป็นโนดส่งข้อมูล โนดรับข้อมูล และโนดส่งต่อข้อมูล [10]

ซอฟต์แวร์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง มีการใช้โปรแกรม Sensniff และ Foren6 บนระบบปฏิบัติการคอนติกิ (Contiki Operating System) โดย Sensniff เป็นเครื่องมือดักจับแพ็กเก็ตข้อมูล ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่อยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ทำหน้าที่ดักจับเฟรมข้อมูล (Data Frame) และส่วนของการให้บริการของตัวโปรแกรมที่ทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ต่อพ่วงและแปลงข้อมูลเหล่านั้นไปอยู่ในรูปไฟล์ที่มีนามสกุล Pcap เพื่อให้สามารถนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรม Foren6 ได้ ในส่วนของโปรแกรม Foren6 เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ทำงานบนมาตรฐาน 6LoWPAN

โดยไม่เข้าไปเกี่ยวข้องและรบกวนการทำงานของเครือข่าย การทำงานของซอฟต์แวร์จะใช้แพ็กเก็ตภายในเครือข่ายมาประมวลผลและแสดงภาพสัญลักษณ์ของสถานะของโนดในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์การเชื่อมต่อของโนดภายในเครือข่ายได้สะดวกยิ่งขึ้น

หน้าที่ของเซ็นเซอร์โนดในงานวิจัยครั้งนี้ถูกแบ่งตามหน้าที่การทำงานออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. เซ็นเซอร์โนดซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูล ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบเซ็นเซอร์โนดในการทำหน้าที่ส่งข้อมูลให้ใช้พลังงานจากถ่านอัลคาไลน์ขนาด AA จากแบตเตอรี่บอร์ดและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยใช้การสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Port) หน้าที่ของเซ็นเซอร์โนดซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูล คือ จะทำการส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูล เพื่อทำการทดลองในสถานการณ์ในช่วงเวลาต่างๆ

2. เซ็นเซอร์โนดซึ่งทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล (โนดตัวกลาง) จะใช้พลังงานจากถ่านอัลคาไลน์ขนาด AA จากแบตเตอรี่บอร์ดเช่นเดียวกับกับเซ็นเซอร์โนดซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูลและรับข้อมูล หน้าที่ของเซ็นเซอร์โนดซึ่งทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล คือ จะทำการส่งต่อข้อมูลซึ่งได้รับจากโนดส่งข้อมูลไปยังโนดรับข้อมูลซึ่งเป็นโนดปลายทาง เพื่อทำการทดลองตามสถานการณ์ในช่วงเวลาต่างๆ

3. เซ็นเซอร์โนดซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูล (โนดเชื่อมต่อ) จะทำหน้าที่รับข้อมูลโดยถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และใช้การสื่อสารแบบอนุกรมเช่นเดียวกับเซ็นเซอร์โนดส่งข้อมูล อีกทั้งยังออกแบบให้ใช้พลังงานจากถ่านอัลคาไลน์ขนาด AA ในการทำงานเซ็นเซอร์โนดที่รับข้อมูล จะรอรับค่าขนาดแพ็กเก็ต ตัวเลขลำดับของแพ็กเก็ตและเวลาที่ได้รับแพ็กเก็ตข้อมูลจากโนดส่งข้อมูลเพื่อที่จะนำไปประเมินประสิทธิภาพในลำดับถัดไป

2.2 การสื่อสารระหว่างเซ็นเซอร์โนด

สำหรับการสื่อสารระหว่างโนด จะใช้การส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โดยอาศัยโพรโทคอลการนำส่งข้อมูล UDP (User Datagram Protocol) ไปยังโนดปลายทาง ซึ่งโนดปลายทางจะได้รับค่าขนาดแพ็กเก็ต ตัวเลขลำดับและเวลาของแต่ละแพ็กเก็ตที่ได้รับ ในการทดลองทำการกำหนดขนาดข้อมูลในแพ็กเก็ตเท่ากับ 80 ไบต์ อีกทั้งมีการปรับช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ตเป็น 3 ค่า คือ 0.1, 0.15 และ 0.5 วินาที ภายในระยะเวลา 180 วินาทีทำให้การส่งข้อมูลมีการส่งแพ็กเก็ตสูงสุดเท่ากับ 1,800 1,200 และ 360 แพ็กเก็ตตามลำดับ

2.3 ข้อกำหนดการทดลอง

1. ชิปของโมดูลเซ็นเซอร์ไร้สายต้องเป็นชิป CC2530 เนื่องจากชิปสามารถรองรับการทำงานโพรโทคอลอาร์พีแอลได้

2. เซ็นเซอร์โนดส่งข้อมูลระหว่างกันในเครือข่ายไร้สายแบบชิงเกิ้ลฮอปและแบบมัลติฮอป ด้วยไอพีเวอร์ชั่นหก (IPv6)

3. เสาอากาศของเซ็นเซอร์โนดต้องเป็นเสาอากาศ SMA Antenna

4. เซ็นเซอร์โนดต้นทางสามารถส่งข้อมูลไปยังเซ็นเซอร์โนดปลายทางที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งมีหน้าที่บันทึกข้อมูลได้

5. ทำการเก็บข้อมูลขนาดแพ็กเก็ต ตัวเลขลำดับของแพ็กเก็ต ระยะเวลาที่ส่งแพ็กเก็ตจากเซ็นเซอร์โนดส่งข้อมูลและระยะเวลาที่ได้รับแพ็กเก็ตของเซ็นเซอร์โนดรับข้อมูล

6. อุปกรณ์โมดูล เสาอากาศ และบอร์ดเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ ต้องไม่ได้อยู่ภายใต้กล่องใดๆ

การกำหนดค่าตัวแปรของเซ็นเซอร์โนดแต่ละชนิดในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรภายในเซ็นเซอร์โนดแต่ละประเภท

ตัวแปร	โนดส่งข้อมูล	โนดส่งต่อข้อมูล	โนดเชื่อมต่อหรือสถานีฐาน
Chanel (CH)	15 (0x0F)	15 (0x0F)	15 (0x0F)
PAN ID (ID)	0x5448	0x5448	0x5448
Tx Power (dBm)	4.5 (0xF5)	4.5 (0xF5)	4.5 (0xF5)
UIP_CONF_IPV6_RPL	1	1	1
UIP_CONF_ROUTER	1	1	1
SERVER_REPLY	0	0	1
Destination IP Address (Unicast)	aaaa::212:4b00:1c1:1fb9	aaaa::212:4b00:1c1:1fb9	aaaa::1

2.4 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง

จากงานวิจัยเรื่อง การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเน็ตเวิร์คไร้สายแบบเฉพาะกิจโดยการสร้างการจำลองและจัดตั้งเน็ตเวิร์คในสภาวะแวดล้อมจริง ได้ทำการทดลองสร้างเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจเพื่อประเมินประสิทธิภาพของโพรโทคอล AODV ในสถานที่จริง โดยในส่วนของการทดลองได้มีการจัดเตรียมการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากปัจจัยกายภาพของพื้นที่และรวมไปถึงอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานจริง [11] ผู้ทำวิจัยได้นำข้อมูลเหล่านั้นมาเป็นแนวทางในการจัดเตรียมการทดลองในการประยุกต์ใช้กับโพรโทคอลอาร์พีแอลเพื่อประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของงานวิจัยนี้ให้ดียิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนการทำงานในแต่ละการทดลองคือ เริ่มต้นออกแบบการใช้งานเพื่อทำการจัดตั้งเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งของโนดและการส่งข้อมูลของโนดในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นไปสร้างสถานการณ์เพื่อกำหนดหน้าที่ของโนดในเครือข่าย

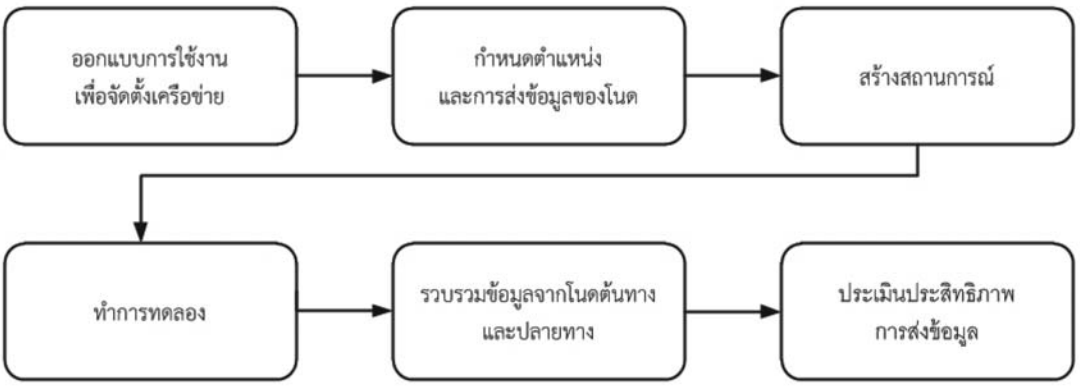
เมื่อการทดลองในแต่ละครั้งสิ้นสุดลง จะรวบรวมข้อมูลที่ได้จากโนดส่งข้อมูลและโนดรับข้อมูลในแต่ละการทดสอบ เพื่อทำการประเมินการส่งข้อมูลและวัดประสิทธิภาพต่างๆ ของโพรโทคอลอาร์พีแอล ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2

2.5 การออกแบบสถานการณ์เพื่อจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็กในสถานที่จริง

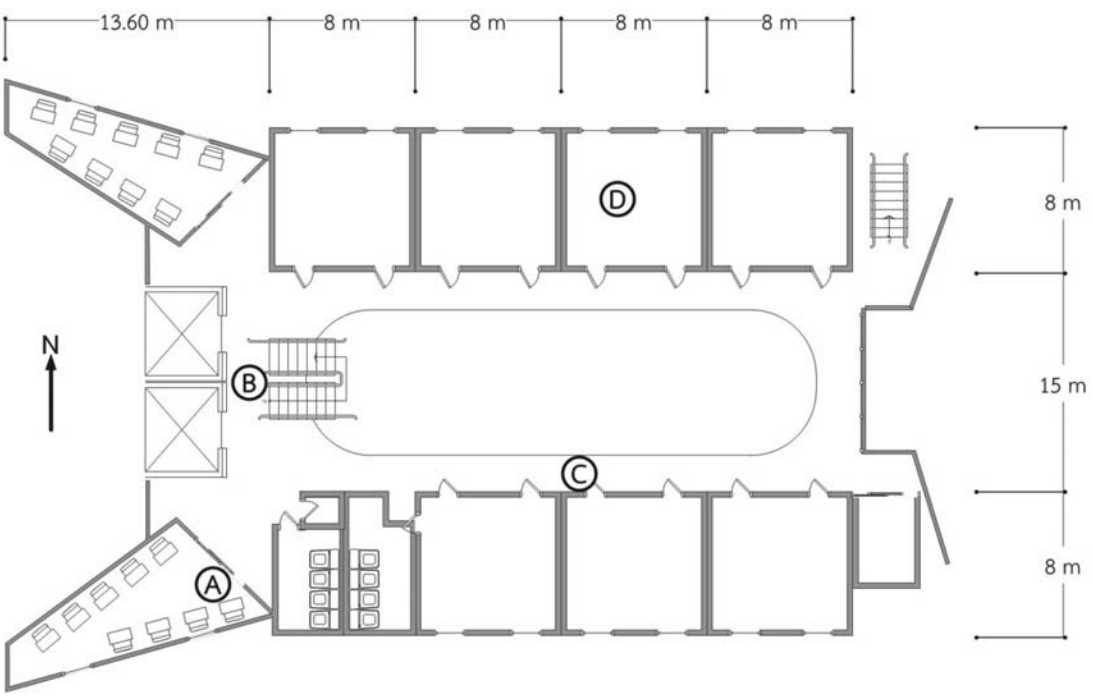
การทดลองเพื่อศึกษาและประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในสถานที่จริงนั้น จะทดสอบการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็ก ที่จัดตั้งขึ้นในบริเวณพื้นที่ชั้น 4 อาคารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม ซึ่งภายในบริเวณที่ทำการทดลองได้ทำการปิดการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Lan) ทุกเครือข่าย ในการทดลองนี้เพื่อให้เครือข่ายสามารถครอบคลุมพื้นที่การใช้งานในการส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โนดได้ทั้งหมด จึงได้ทำการกำหนดตำแหน่งของโนดเพื่อนำมาใช้ในสถานการณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3 ซึ่งจากภาพโนดที่อยู่ในตำแหน่ง A จะไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับโนดที่อยู่ตำแหน่ง C และ D ได้โดยตรง และรวมไปถึงโนด B ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับโนดที่อยู่ในตำแหน่ง D

สถานการณ์ในการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็กที่จัดตั้งขึ้นในสถานที่จริง เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของเครือข่ายใน

สถานที่จริง เป็นการศึกษาการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งรวมไปถึงศึกษาการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลที่ใช้บนระบบ จึงทำการทดลองด้วยสถานการณ์ต่อไปนี้



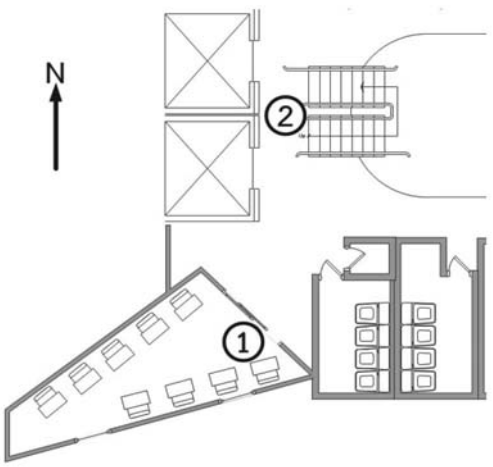
รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการทำงานในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงการกำหนดตำแหน่งของโนดในพื้นที่ทดลอง

2.5.1. สถานการณ์ที่ 1

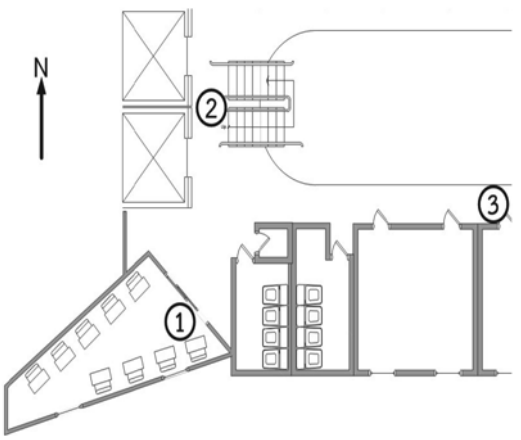
ทำการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีจำนวน 2 โนด ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดสถานการณ์ให้มีการสื่อสารกันระหว่างโนด 1 ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง A และโนด 2 ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง B โดยในสถานการณ์นี้ไม่มีการเคลื่อนที่ของโนดใดๆ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของการส่งข้อมูล สำหรับในการสื่อสารนี้ใช้ระยะเวลา 180 วินาที เป็นการสร้างสถานการณ์ที่มีการสื่อสารไร้สายในรูปแบบซิงเกิ้ลฮอป ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบโดยตรง (Direct Communication) โดยข้อมูลจะถูกส่งไปยังโนดรับข้อมูลโดยตรงไม่ผ่านโนดอื่นๆ



รูปที่ 4 แสดงการกำหนดตำแหน่งของโนดในพื้นที่ทดลองของสถานการณ์ที่ 1

2.5.2 สถานการณ์ที่ 2

ทำการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีจำนวน 3 โนด ดังรูปที่ 5 โดยกำหนดสถานการณ์ให้มีการสื่อสารกันระหว่างโนด 1 และโนด 3 โดยโนด 1 อยู่ที่ตำแหน่ง A โนด 2 อยู่ที่ตำแหน่ง B และโนด 3 อยู่ที่ตำแหน่ง C ในการสื่อสารนั้นโนด 1 ไม่สามารถสื่อสารกับโนด 3 ได้โดยตรง เนื่องจากอยู่นอกระยะการส่งข้อมูลไร้สาย จึงจำเป็นต้องอาศัยการส่งต่อข้อมูลจากโนด 2 ในการทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล โดยใน



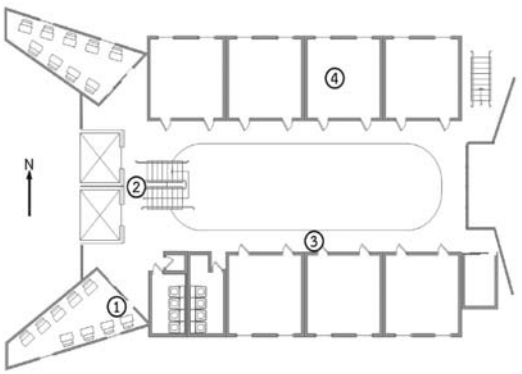
รูปที่ 5 แสดงการกำหนดตำแหน่งของโนดในพื้นที่ทดลองของสถานการณ์ที่ 2

สถานการณ์นี้ไม่มีการเคลื่อนที่ของโนดใดๆ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของการส่งข้อมูล สำหรับในการสื่อสารนี้ใช้ระยะเวลา 180 วินาที เป็นการสร้างสถานการณ์ที่มีการสื่อสารไร้สายในรูปแบบมัลติฮอป ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบทางอ้อม (Indirect Communication) โดยข้อมูลจะถูกส่งไปยังโนดปลายทางจะถูกส่งไปยังโนดอื่นก่อนจึงส่งไปยังปลายทาง ซึ่งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนิยมทำการส่งข้อมูลในรูปแบบนี้ เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางที่อยู่ในระยะทางไกลได้ การสื่อสารในสถานการณ์นี้มีจำนวนฮอปของการสื่อสาร 2 ฮอป เพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลเมื่อมีการใช้เส้นทางที่มีจำนวนฮอปเพิ่มมากขึ้น

2.5.3 สถานการณ์ที่ 3

สถานการณ์ที่ 3 คือ จัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีจำนวน 4 โนด ดังรูปที่ 6 โดยกำหนดสถานการณ์ให้มีการสื่อสารกันระหว่างโนด 1 และโนด 4 โดยโนด 1 อยู่ที่ตำแหน่ง A โนด 2 อยู่ที่ตำแหน่ง B โนด 3 อยู่ที่ตำแหน่ง C และโนด 4 อยู่ที่ตำแหน่ง D ในการสื่อสารนั้นโนด 1 ไม่สามารถสื่อสารกับโนด 4 ได้โดยตรง เนื่องจากอยู่นอกระยะการส่งข้อมูลไร้สาย จึง

จำเป็นต้องอาศัยการส่งต่อข้อมูลจากโนด 2 และโนด 3 ในการทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล โดยในสถานการณ์นี้ไม่มีการเคลื่อนที่ของโนดใดๆ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของการส่งข้อมูล โดยในการสื่อสารนี้ใช้ระยะเวลา 180 วินาที เพื่อสร้างสถานการณ์ที่มีการสื่อสารไร้สายในรูปแบบมัลติฮอป เช่นเดียวกันกับสถานการณ์ที่ 2 แต่การสื่อสารในสถานการณ์นี้มีจำนวนฮอปของการสื่อสาร 3 ฮอป เพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลเมื่อมีการใช้เส้นทางที่มีจำนวนฮอปที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 6 แสดงการกำหนดตำแหน่งของโนดในพื้นที่ทดลองของสถานการณ์ที่ 3

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลจากการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในบริเวณพื้นที่ชั้น 4 อาคารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม เป็นการใช้งานเครือข่ายภายในอาคารที่มีปัจจัยทางกายภาพเฉพาะ ซึ่งรวมไปถึงการแพร่กระจายสัญญาณของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่อาจกระทบกับวัตถุหลายชนิด เช่น อาคาร เพดาน ผนัง เป็นต้น จึงเป็นที่น่าสนใจในการทดลองการส่งข้อมูลเพื่อประเมินประสิทธิภาพของโพรโทคอลในเครือข่ายภายใต้ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายในอาคารที่ได้กล่าวมาข้างต้น

3.1 ผลการทดลองของการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็กในสถานที่จริง

3.1.1 ผลการทดลองสถานการณ์ที่ 1

จากการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีจำนวน 2 โนด ให้มีสถานการณ์ของการสื่อสารไร้สายระหว่างโนดในรูปแบบซิงเกิ้ลฮอป ภายในระยะเวลา 180 วินาที โดยตลอดระยะเวลาของการสื่อสารไม่มีการเคลื่อนที่ของโนดใดๆ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของการส่งข้อมูล ผลการทดลองการสื่อสารระหว่างโนดด้วยการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เป็นไปตามตารางที่ 2 ซึ่งแสดงค่าอัตราการส่งข้อมูล ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนองและอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากสถานการณ์ที่ 1

จำนวนฮอปของการสื่อสาร 1 ฮอป				
ส่งแพ็กเก็ต (จำนวน)	**ระยะเวลาการส่งแต่ละแพ็กเก็ต (วินาที)**	**อัตราการส่งข้อมูล (กิโลบิตต่อวินาที)**	**ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนอง (มิลลิวินาที)**	**อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล**
1800	0.10	4.52	1.53	0.72
1200	0.15	4.01	5.79	0.96
360	0.50	1.25	6.03	1.00

3.1.2 ผลการทดลองสถานการณ์ที่ 2

จากการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีจำนวน 3 โนด กำหนดการสื่อสารไร้สายระหว่างโนดในรูปแบบมัลติฮอป ภายในระยะเวลา 180 วินาที โดยให้มีสถานการณ์โนดต้นทางและโนดปลายทางไม่สามารถสื่อสารกันโดยตรง ต้องอาศัยการส่งต่อข้อมูลจากโนดตัวกลางในการทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล ตลอดระยะเวลาของการสื่อสารไม่มีการเคลื่อนที่ของโนดใดๆ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของการส่งข้อมูล ผลการทดลองการสื่อสารระหว่างโนดด้วยการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นไปตามตารางที่ 3 ซึ่งแสดงค่าอัตราการส่งข้อมูล ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนองและค่าอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากสถานการณ์ที่ 2

จำนวนฮอปของการสื่อสาร 2 ฮอป				
ส่งแพ็กเก็ต (จำนวน)	**ระยะเวลาการส่งแต่ละแพ็กเก็ต (วินาที)**	**อัตราการส่งข้อมูล (กิโลบิตต่อวินาที)**	**ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนอง (มิลลิวินาที)**	**อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล**
1800	0.10	4.34	2.11	0.69
1200	0.15	3.76	5.94	0.90
360	0.50	1.25	7.15	1.00

ตารางที่ 4 ผลการทดลองการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากสถานการณ์ที่ 3

จำนวนฮอปของการสื่อสาร 3 ฮอป				
ส่งแพ็กเก็ต (จำนวน)	**ระยะเวลาการส่งแต่ละแพ็กเก็ต (วินาที)**	**อัตราการส่งข้อมูล (กิโลบิตต่อวินาที)**	**ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนอง (มิลลิวินาที)**	**อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล**
1800	0.10	1.81	8.76	0.28
1200	0.15	1.46	10.61	0.35
360	0.50	1.06	12.42	0.85

3.1.3 ผลการทดลองสถานการณ์ที่ 3

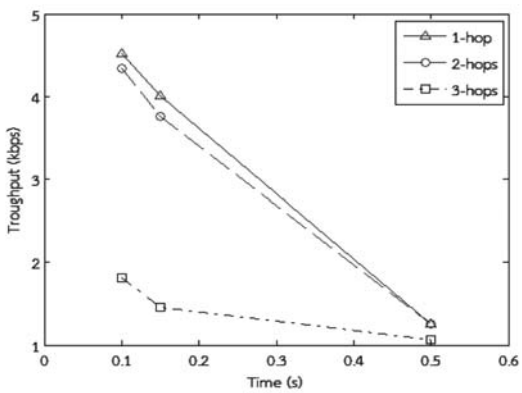
จากการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีจำนวน 4 โนด กำหนดการสื่อสารไร้สายระหว่างโนดในรูปแบบมัลติฮอป ภายในระยะเวลา 180 วินาที โดยให้มีสถานการณ์โนดต้นทางและโนดปลายทางไม่สามารถสื่อสารกันโดยตรง ต้องอาศัยการส่งต่อข้อมูลจากโนดตัวกลางจำนวน 2 โนดในการทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล ตลอดระยะเวลาของการสื่อสารไม่มีการเคลื่อนที่ของโนดใดๆ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของการส่งข้อมูล ผลการทดลองการสื่อสารระหว่างโนดด้วยการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นไปตามตารางที่ 4 ซึ่งแสดงค่าอัตราการส่งข้อมูล ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนองและค่าอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลตามลำดับ

3.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองในแต่ละตัวชี้วัดประสิทธิภาพ

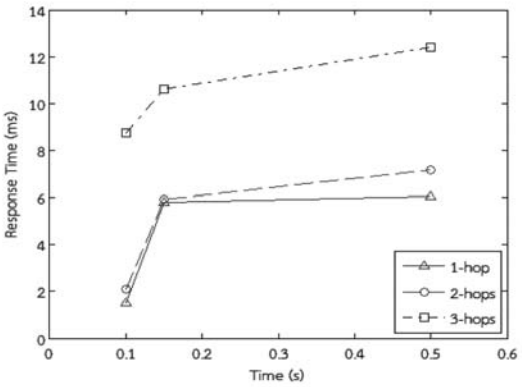
เมื่อนำผลการทดลองในสถานการณ์ที่ 1 2 และ 3 ในแต่ละตัวชี้วัดประสิทธิภาพมาเปรียบเทียบกับระยะเวลาการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ต เพื่อให้สามารถเห็นถึงแนวโน้มของตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ถูกจัดตั้งขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ระหว่างการทดลอง จะได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้

3.2.1 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่งข้อมูล

ซึ่งอัตราการส่งข้อมูลวัดจากอัตราส่วนของปริมาณข้อมูลที่ส่งได้สำเร็จต่อเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการส่งข้อมูลนั้น โดยในการทดลองในแต่ละจำนวนฮอปของการสื่อสาร มีแนวโน้มให้ค่าที่น้อยลงเมื่อมีช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากหากช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของการสัญจรข้อมูลในเครือข่ายลดลง ซึ่งหมายถึงจะมีปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งไปยังปลายทางน้อย ค่าอัตราการส่งข้อมูลจึงลดลงด้วย ซึ่งการลดลงนี้จะเห็นได้ชัดเจนในทุกเส้นทางการสื่อสาร เมื่อมีช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.5 วินาที ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการส่งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละจำนวนฮอปของการสื่อสาร



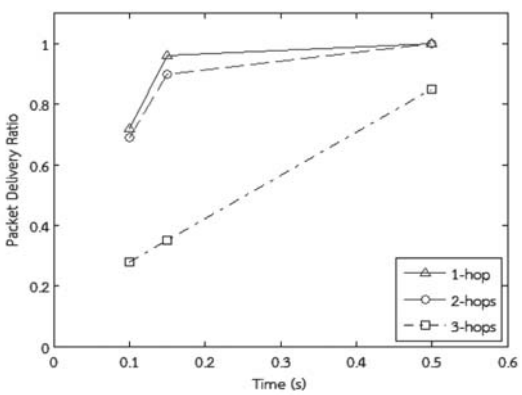
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนองของแต่ละจำนวนฮอปของการสื่อสาร

3.2.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนอง

โดยผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนองในแต่ละจำนวนฮอปของการสื่อสาร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8 มีแนวโน้มให้ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบของเส้นทางการสื่อสาร 1 ฮอป มีภาพรวมของค่าหน่วยเฉลี่ยน้อยที่สุด แต่ในช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ตที่เพิ่มขึ้นจะให้ค่าการหน่วงเฉลี่ยที่มีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของเส้นทางการสื่อสาร 2 ฮอป ในส่วนของรูปแบบของเส้นทางการสื่อสาร 3 ฮอป ที่มีค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนองที่มากกว่า 2 รูปแบบแรกอย่างชัดเจนนั้น เนื่องจากต้องผ่านจำนวนโนดที่เป็นตัวกลาง (Intermediate Node) มากกว่ารูปแบบอื่น อีกทั้งมีระยะทางของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังปลายทางมีระยะทางที่ไกลกว่า แสดงให้เห็นว่าเมื่อรูปแบบของเส้นทางการสื่อสารมีจำนวนฮอปและระยะทางของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนองเพิ่มขึ้นด้วย

3.3.3 การเปรียบเทียบค่าอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล

โดยผลการเปรียบเทียบค่าอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอล ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่ถูกออกแบบมาสำหรับการค้นหาเส้นทางในการรับ-ส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ดังรูปที่ 9 มีอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลในสถานการณ์ที่มีการใช้เส้นทางของการสื่อสาร 1 ฮอป ที่ระยะเวลาการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ต 0.1 วินาที มีค่าประมาณ 0.72 และค่าอัตราความสำเร็จจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ตมีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับสถานการณ์ที่มีการใช้เส้นทางของการสื่อสารจำนวน 2 และ 3 ฮอป จะเห็นได้ว่า อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลจะมีค่าลดลง และการลดลงของอัตราความสำเร็จจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีจำนวนฮอปเพิ่มจาก 2 ฮอปเป็น 3 ฮอป เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโนดปลายทาง ซึ่งสาเหตุเกิดจากความบกพร่องของสัญญาณในการสื่อสารไร้สายในลักษณะ การถูกลดทอนสัญญาณตามสภาพแวดล้อมภายในอาคาร รวมไปถึงลักษณะการจางหายของสัญญาณที่ถูกส่งมาจากโนดต้นทางกระทบกับสิ่งกีดขวางทำให้เกิดการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทาง (Multipath Propagation) เมื่อไปถึงปลายทางจึงทำให้โนดปลายทางได้รับสัญญาณเดียวกันได้หลายชุด ซึ่งส่งผลให้เกิดการหักล้างกัน



รูปที่ 9 อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลของแต่ละจำนวนฮอปของการสื่อสาร

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอล ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยการจัดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง ซึ่งตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่สำคัญ ได้แก่ อัตราการส่งข้อมูล ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าในการตอบสนอง และอัตราการความสำเร็จในการส่งข้อมูล สำหรับการทดลองการส่งข้อมูลของเครือข่ายที่อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงนั้น เป็นการทดลองเพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลโดยใช้โพรโทคอลอาร์พีแอล โดยมีผลกระทบจากปัจจัยทางกายภาพของพื้นที่และอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานจริงเข้ามาเกี่ยวข้อง

การเปรียบเทียบผลการทดลองจากการนำตัวชี้วัดประสิทธิภาพมาเปรียบเทียบกับระยะเวลาการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ต พบว่าจำนวนฮอปของการสื่อสารเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโพรโทคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายไร้สายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อจำนวนฮอปของการสื่อสารมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลลดลง ซึ่งส่งผลถึงข้อจำกัดของขนาดเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นกับประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลที่ลดลง อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูล คือ สภาพแวดล้อมภายในอาคาร ที่มีสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้ในระหว่างการส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โนด ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโนดปลายทาง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Karukanan, "Packet Drop Avoidance In Energy Efficient Routing Of Wireless sensor Network," M.Eng. thesis, Dept. Elect. Eng., King Mongkut's Univ., Bangkok, Thailand, 2005.

[2] M. R. Khan, "Performance and route stability analysis of RPL protocol," M.Eng. Project, Dept. Elect. Eng., KTH School of Electrical Eng., Stockholm, Sweden, 2012.

[3] W. Xie, M. Goyal, H. Hosseini, J. Martocci, Y. Bashir, E. Baccelli and A. Durresi, "A Performance Analysis of Point-to-Point Routing along a Directed Acyclic Graph in Low Power and Lossy Networks," in *Proceedings of the 13th international Conference on Network-Based Information Systems (NBiS)*, takayama, Japan, 2010, pp. 111-11.

[4] K. Warasub, T. Tangmunkong, P. Siripongwutikorn, K. Chamnongthai, K. Kritpolviman, T. Pearsai and P. Sonthikorn, "Wireless Communication and Network," in *Antenna, 1st ed. Nonthaburi, The Office of the University Press Sukhothai Thammathirat Open University,* 2013, pp. 1-54.

[5] D. Thaweewannaboon, "Vehicle detection, speed measurement and classification using wireless magnetic sensor networke," M.Eng. thesis, Dept. Comp. Eng., Khon Kaen Univ., Khon Kaen, Thailand, 2010.

[6] S. Kosumwongwiwat, "The Development of Wireless Sensor Network for Fire Detecting System," M.S. thesis, Dept. Inf. Tech., King Mongkut's Univ., Bangkok, Thailand, 2006.

[7] I. Samana, "Performance Evaluation for Security Protocol in Routing Protocols for Military-Based MANETs," M.Eng. thesis, Dept. Elect. Eng., King Mongkut's Univ., Bangkok, Thailand, 2006.

[8] W. Chanei, "Cross Layer Energy Aware for AODV Routing Protocol," M.Eng. thesis, Dept. Comp. Eng., Prince of Songkla Univ., Songkla, Thailand, 2013.

[9] T. Prasansri, "Multi-hop Location Estimation in Wireless Sensor Networks Using Spring-Relaxation Technique," M.Eng. thesis, Dept. Comp. Eng., Khon Kaen Univ., Khon Kaen, Thailand, 2013.

[10] Texas Instruments. (2011, February 1). A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4. and ZigBee Applications. [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2530.pdf

[11] W. Suriyanyong, "Simulation and Real World Evaluation of Ad-hoc Wireless Network," M.S. thesis, Dept. Inf. Tech., King Mongkut's Univ., Bangkok, Thailand, 2004.