ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)

ปริญญา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง นโยบายการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของแบนด์วิดท์

Gateway Association Policy for Two-Tier Wireless Sensor Networks on Bandwidth Constraints

นามผู้วิจัย นายอมรเดช แจ่มสว่าง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพร ใจแก้ว, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(รองศาสตราจารย์อนันต์ ผลเพิ่ม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เขมะทัต วิภาตะวนิช, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

นโยบายการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของแบนด์วิดท์

Gateway Association Policy for Two-Tier Wireless Sensor Networks on Bandwidth Constraints

โดย

นายอมรเดช แจ่มสว่าง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)
พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อมรเดช แจ่มสว่าง 2553: นโยบายการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของแบนด์วิดท์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพร ใจแก้ว, Ph.D. 92 หน้า

ระบบเครือข่ายเซ็นเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นระบบที่ใช้เก็บข้อมูลจากสิ่งแวดล้อม ประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ สองส่วนคือ เซ็นเซอร์โหนด และ สถานีฐาน โดยสถาปัตยกรรมแบบหลายลำดับชั้นถูกนำเสนอขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงในด้านพลังงานและการนำไปใช้งานในพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยมีเกทเวย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีข้อจำกัดในด้านพลังงานน้อยกว่าเซ็นเซอร์โหนดปกติ จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างเซ็นเซอร์โหนดและสถานีฐาน การเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์โดยปกติแล้วจะพิจารณาจากระยะทาง พลังงานที่ใช้โดยรวมของทั้งระบบ หรือ จำนวนของเซ็นเซอร์โหนดที่เชื่อมต่ออยู่กับเกทเวย์ ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลในปริมาณมากมายังเกทเวย์ในระยะเวลาเดียวกัน จะทำให้เกทเวย์มีอัตราการรับข้อมูลในระดับสูง ส่งผลให้เกิดปัญหาความล่าช้าหรือการสูญหายของข้อมูล

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนานโยบายการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ของระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้น ให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลในปริมาณมาก โดยที่มีอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด ซึ่งขั้นตอนวิธีที่นำเสนอแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ ขั้นตอนวิธีการเข้าร่วมใช้งานสำหรับเครือข่ายที่มีการส่งข้อมูลฮ็อปเดียว และขั้นตอนวิธีการเข้าร่วมใช้งานสำหรับเครือข่ายที่มีการส่งข้อมูลหลายฮ็อป โดยทั้งสองขั้นตอนวิธีมีแนวคิดที่คล้ายคลึงกันคือ การย้ายเซ็นเซอร์โหนดบางตัวที่เข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่มีอัตราการรับข้อมูลในระดับสูง ไปเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์รอบข้าง โดยคาดหวังว่าการย้ายเซ็นเซอร์โหนดบางตัวนั้นจะทำให้ปัญหาความล่าช้าหรือการสูญหายของข้อมูลในเครือข่ายส่วนบุคคลเดิมลดลง

ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอได้รับการทดสอบในซอฟต์แวร์จำลองเครือข่าย Network Simulator รุ่น 2.33 (NS-2) โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนตามขั้นตอนวิธีที่ใช้กับฮ็อปเดียวกับขั้นตอนวิธีที่ใช้หลายฮ็อป เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการเข้าร่วมใช้งานแบบอื่น ในด้านของอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล ร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล และอัตราการใช้พลังงานต่อความสำเร็จในการส่งข้อมูลหนึ่งบิต ซึ่งผลทดสอบพบว่า ขั้นตอนวิธีสำหรับการเข้าร่วมใช้งานสำหรับเครือข่ายที่มีการส่งข้อมูลฮ็อปเดียวมีประสิทธิภาพเหนือกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับการเข้าร่วมใช้งานแบบอื่นในด้านการรับส่งข้อมูล และยังคงมีการใช้พลังงานที่ไม่ต่างกัน ขณะที่ขั้นตอนวิธีสำหรับการเข้าร่วมใช้งานสำหรับเครือข่ายที่มีการส่งข้อมูลหลายฮ็อปจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการเข้าร่วมใช้งานแบบอื่น และจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าในสถานการณ์ที่ผลรวมของอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์มีค่ามาก

________________ ____________________________ ____ / ____ / ____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Amorndej Chamswarng 2010: Gateway Association Policy for Two-Tier Wireless Sensor Networks on Bandwidth Constraints. Master of Engineering (Computer Engineering), Major Field: Computer Engineering, Department of Computer Engineering. Thesis Advisor:
Assistant Professor Chaiporn Jaikaeo, Ph.D. 92 pages.

Wireless sensor networks are system to gather physical information from the environment. They consist of two kinds of components, sensor nodes and base stations. Multi-tier architecture has been proposed to avoid the issue of power consumptions and scalability. Less energy-constraint nodes, called gateways, are introduced as intermediate nodes between sensor nodes and a base station. Gateway association policy is typically based on distance, overall power consumption, or number of associated sensor nodes. However, situations where these sensors produce huge amount of data will cause some gateways to be occasionally overwhelmed, leading to higher packet drops and delay.

The objective of this research is to study and improve gateway association policy in multi-tier wireless sensor networks in order to minimize energy consumption of sensor nodes while still meeting bandwidth constraint. The proposed algorithms were divided into two approaches, algorithm for single-hop wireless sensor networks and multi-hop networks. Both algorithms have similar concept. They both attempt to relocate some sensor nodes from overloaded gateways to others, expecting these relocations will reduce packet drops and delay in the overloaded personal area networks.

The proposed protocols were tested with the Network Simulator version 2.33 (NS-2). Experiments were divided into single-hop networks and multi-hop networks for evaluating performance with other schemes in terms of base station's throughput, delays, delivery ratio, and energy consumption per useful bit. The experimental results reveal that the algorithm for single-hop networks outperforms other approaches in terms of data delivery while still keeping energy efficiency on par. Furthermore, the performance of the algorithm for multi-hop networks is similar to that of other approaches in most cases, and better when sum of sensor nodes' datarate is going up.

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยดูแลและให้กำลังใจในการเรียนเสมอมา ด้วยความรักและห่วงใยยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ใจแก้ว ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน คอยชี้แนะ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ อาจารย์อภิรักษ์ จันทร์สร้าง ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับการนำเสนองานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครือข่ายไร้สาย สำหรับคำแนะนำและกำลังใจที่ดีเสมอมา

อมรเดช แจ่มสว่าง

กุมภาพันธ์ 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	56
ผล	56
วิจารณ์	83
สรุปและข้อเสนอแนะ	85
สรุป	85
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	92

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	แถบความถี่และอัตราการส่งข้อมูล	14
2	ตัวแปรควบคุมในการทดลองส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว	29
3	ตัวแปรต้นในการส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว	30
4	ความหมายของตัวแปรและค่าคงที่ของแบบจำลองการใช้พลังงาน	38
5	ตัวแปรควบคุมในการทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-S	59
6	ค่าของตัวแปรในขั้นตอนวิธี GAME-BC-S	59
7	ตัวแปรควบคุมในการทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-M	70
8	ค่าของตัวแปรในขั้นตอนวิธี GAME-BC-M	70

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ส่งข้อมูลภายในหนึ่งฮ็อป	5
2	เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ส่งข้อมูลหลายฮ็อป	6
3	เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบสองลำดับชั้น	7
4	ART-WiSe Two-tire architecture	9
5	ลำดับชั้นของการส่งข้อมูลภายในอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4	11
6	เครือข่ายรูปแบบดาว	12
7	เครือข่ายแบบเพียร์-ทู-เพียร์	12
8	เครือข่ายลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้	13
9	แถบความถี่ของมาตรฐาน IEEE802.15.4	14
10	การส่งข้อมูลจากดีไวซ์ไปยังโคออร์ดิเนเตอร์	16
11	การส่งข้อมูลจากโคออร์ดิเนเตอร์ไปยังดีไวซ์	16
12	ลักษณะของเฟรมบีคอน	18
13	ลักษณะของ MAC frame control fields	19
14	การหาเส้นทางตามลำดับชั้นบนเครือข่ายลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้	21
15	เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียว	21
16	เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด	22
17	รูปแบบการทดลองส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว	29
18	ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์และ อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และจำนวนดีไวซ์ทั้งหมด	31
19	ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์และ อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และมีจำนวนดีไวซ์= 1	31
20	ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์และ อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และมีจำนวนดีไวซ์= 3	32
21	ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาดและจำนวนดีไวซ์ทั้งหมด	33

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
22	ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์และร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาดและจำนวนดีไวซ์ทั้งหมด	33
23	เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายแนวคิดในการออกแบบขั้นตอนวิธีในการทดสอบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี GAME-BC-S	35
24	เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายการเข้าร่วมใช้งานตามมาตรฐาน IEEE802.15.4	35
25	เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายการเข้าร่วมใช้งานแบบที่แต่ละโหนดเลือกเกทเวย์ที่มีระยะทางที่ใกล้ที่สุด	36
26	ขั้นตอนวิธีของ GAME-BC-S	43
27	เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายแนวคิดในการออกแบบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M	45
28	การเปลี่ยนสถานะเซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการรับข้อมูลสูง ในขั้นตอนวิธี GAME-BC-M	45
29	การส่งเฟรมบีคอนพร้อมข้อความเพิ่มเติม ในขั้นตอนวิธี GAME-BC-M	46
30	รูปแบบการเข้าร่วมใช้งานหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนวิธี GAME-BC-M	46
31	แผนภาพสถานะการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ที่เป็นโหนดใบ	48
32	แผนภาพสถานะการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ที่ไม่ใช่โหนดใบ	49
33	การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างข้อมูลที่ถูกทิ้งแบบ LQI โดยใช้ ES และไม่ใช้ ES	51
34	ผังงานอธิบายการทำงานของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ในอุปกรณ์ที่ไม่ใช่โหนดใบ	52
35	ผังงานอธิบายการทำงานของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ในอุปกรณ์ที่เป็นโหนดใบ	55
36	ตัวอย่างการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์	58

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	ตัวอย่างการเข้าร่วมใช้งานด้วยมาตรฐาน IEEE802.15.4 เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์ โดยวงกลมขนาดใหญ่แทนรัศมีในการรับส่งสัญญาณของเกทเวย์	61
38	ตัวอย่าการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี MINDIST เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์	62
39	ตัวอย่างการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์ โดยลูกศรชี้แสดงถึงกลุ่มของเซ็นเซอร์โหนดที่ย้ายไปเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ใช้ช่องสัญญาณที่ 12	63
40	เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S MINDIST และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	65
41	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และ MINDIST ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	65
42	เปรียบเทียบร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S MINDIST และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	66
43	เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งบิต ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และ MINDIST ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	67
44	รูปแบบเครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M	69
45	ลำดับการเกิดเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงของการทดลองที่บังคับลำดับการเพิ่มเหตุการณ์	69
46	อัตรกาการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด	72

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
47	เหตุการณ์เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด จำนวนสามเหตุการณ์ ในการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 โดยตัวเลขแสดงลำดับของเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียง	73
48	ร้อยละของข้อมูลที่สูญหายที่ฮ็อปแรกและฮ็อปที่สอง โดยเริ่มนับจากเซ็นเซอร์โหนดที่เป็นเป็นโหนดใบ เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนดในการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4	74
49	เหตุการณ์เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด จำนวนหกเหตุการณ์ ในการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4	75
50	เหตุการณ์เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด จำนวนสามเหตุการณ์ ในการเข้าร่วมใช้งานแบบ GAME-BC-M	76
51	เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนดจำนวนสามเหตุการณ์ ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4	77
52	เปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4	78
53	เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับแบบสุ่ม ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	79
54	ส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์ ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 8 เหตุการณ์ ภายในช่วงเวลา 400-410 วินาทีหลังจากเริ่มการทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ในแต่ละเหตุการณ์ที่สุ่มขึ้น	79

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
55	ส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์ ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 14 เหตุการณ์ ภายในช่วงเวลา 400-410 วินาทีหลังจากเริ่มการทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ในแต่ละเหตุการณ์ที่สุ่มขึ้น	80
56	เปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับแบบสุ่ม ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BIP	=	Binary integer program
BS	=	Base Station
BSN	=	Beacon sequence number
CBR	=	Constant bitrate
CH	=	Channel
CSMA/CA	=	Carrier sense multiple access with collision avoidance
DEPR	=	Distributed Event-driven Partitioning and Routing
DSSS	=	Direct sequence spread spectrum
ED	=	Energy detection
ES	=	Exponential Smoothing
FFD	=	Full-function device
GAME-BC	=	Gateway Association policy for Minimum Energy with Bandwidth Constraint
GAME-BC-M	=	Gateway Association policy for Minimum Energy with Bandwidth Constraint on Multi-hop network
GAME-BC-S	=	Gateway Association policy for Minimum Energy with Bandwidth Constraint on Single-hop network
GA-STATE	=	Gateway alert state
GHz	=	Gigahertz
GW	=	Gateway
IEEE	=	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	=	Integer Program
kb/s kbps	=	Kilo bit per second
kHz	=	Kilehertz
LLC	=	Logical link control
LQI	=	Link Quality Indication
LR-WPANs	=	Low-rate wireless personal area networks
MAC	=	Media access control
MFR	=	MAC footer

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MHR	=	MAC header
MHz	=	Megahertz
MINDIST	=	Minimum-distance-based association
MPDU	=	MAC protocol data units
MSDU	=	MAC service data unit
NS-2	=	Network Simulator 2
PAN	=	Personal area network
PAN ID	=	PAN identification
PCM	=	Pulse-code modulation
PHR	=	PHY header
PoE	=	Power over ethernet
PPDU	=	PHY beacon packet, Physical protocol data units
PSDU	=	PHY service data unit,
RAM	=	Random access memory
RFD	=	Reduced-function device
SFD	=	Start-of-frame delimiter
SHR	=	Synchronization header
SN	=	Sensor node
SSCS	=	Service specific convergence sublayer
μJ	=	Microjoules
WLAN	=	Wireless local area network
WPAN	=	Wireless personal area network
WSN	=	Wireless sensor network

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นโยบายการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของแบนด์วิดท์

Gateway Association Policy for Two-Tier Wireless Sensor Networks on Bandwidth Constraints

คำนำ

ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย เป็นระบบที่ใช้เก็บข้อมูลจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ แสง เสียงหรือแม้แต่การสั่นสะเทือน ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในด้านการทหาร ภาคอุตสาหกรรม หรือแม้แต่นักวิจัยสาขาต่างๆ ที่ต้องการศึกษาข้อมูลของสิ่งแวดล้อมภายในระบบ

หลักการการทำงานโดยทั่วไปของระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ สองส่วนคือ เซ็นเซอร์โหนด และ สถานีฐาน โดยเซ็นเซอร์โหนดจะถูกจัดวางไว้ในบริเวณที่ต้องการเก็บข้อมูล ข้อมูลที่ตรวจจับได้จะถูกส่งไปยังสถานีฐานด้วยตัวมันเอง ในรูปแบบของการส่งข้อมูลฮ็อปเดียว ซึ่งการส่งข้อมูลในรูปแบบนี้เซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ไกลจากสถานีฐานจะต้องใช้พลังงานมากกว่าเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ใกล้ มีผลทำให้เซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ไกลแบตเตอรี่หมดอย่างรวดเร็ว นอกจากการส่งข้อมูลทอดเดียวยังมีการส่งข้อมูลหลายฮ็อป ซึ่งส่งข้อมูลเป็นทอดๆ ผ่านเซ็นเซอร์โหนดตัวอื่นๆ ไปยังสถานีฐาน ซึ่งการส่งข้อมูลหลายทอดนี้ต้องมีการเตรียมเส้นทาง และมีค่าใช้จ่ายในการส่ง พิ่มขึ้นจากการส่งข้อมูลทอดเดียว และนอกจากนั้นเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานจะต้องรับภาระในการส่งต่อข้อมูลจากเซ็นเซอร์ที่อยู่ไกลกว่า ทำให้แบตเตอรี่หมดอย่างรวดเร็วเช่นกัน

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นกับการส่งข้อมูลทั้งสองแบบที่กล่าวมานั้น สถาปัตยกรรมแบบหลายลำดับชั้น (Multi-tier Architecture) จึงถูกนำมาใช้งานในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยมีส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาชื่อว่า เกทเวย์ (Gateway) ซึ่งเป็นโหนดที่มีพลังในการคำนวณรูปแบบและระยะทางในการส่งสัญญาณ และปัจจัยด้านพลังงานที่ดีกว่าเซ็นเซอร์โหนดปกติ วางตัวอย่างกระจายอยู่ในเน็ตเวิร์ค และทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดที่อยู่รอบๆ ตัว หลังจากที่เกทเวย์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ได้รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนด เกทเวย์อาจจะประมวลผลข้อมูลต่างๆ เช่นการรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล ก่อนส่งต่อไปยังผู้ใช้ หรือส่งเข้าไปยังฐานข้อมูลต่อไป

การเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ของแต่ละเซ็นเซอร์โหนด โดยปกติแล้วในระบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียว งานวิจัยส่วนมากได้เสนอให้พิจารณาเข้าร่วมใช้งานจากระยะทาง พลังงานที่ใช้โดยรวมของทั้งระบบ หรือ จำนวนของเซ็นเซอร์โหนดที่เชื่อมต่ออยู่กับเกทเวย์ซึ่งสามารถใช้งานได้โดยไม่มีปัญหา แต่ถ้าระบบประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด เช่น บางโหนดสามารถตรวจจับอุณหภูมิ แต่บางโหนดอาจจะตรวจจับภาพเคลื่อนไหว และส่งภาพเคลื่อนไหวที่มีปริมาณข้อมูลสูงนั้นมาให้กับเกทเวย์ ซึ่งถ้ามีการส่งข้อมูลปริมาณมากๆ มาให้กับเกทเวย์เพียงตัวเดียว อาจจะทำให้เกิดปัญหาเกทเวย์มีอัตราการรับข้อมูลในระดับสูง ทำให้มีการสูญเสียข้อมูลที่ส่งในบางช่วงเวลา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ ในระบบที่เซ็นเซอร์โหนดที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมากดังที่กล่าวมา โดยนอกจากจะพิจารณาเรื่องระยะทาง พลังงาน ยังพิจารณาถึงความสมดุลของอัตราการรับข้อมูลของแต่ละเกทเวย์ประกอบไปด้วย เพื่อแก้ปัญหาปริมาณข้อมูลที่มีจำนวนมากในเกทเวย์ตัวใดตัวหนึ่ง โดยมีเทคนิควิธีการคือ มีขั้นตอนวิธีในการเลือกย้ายเซ็นเซอร์โหนดบางตัวในเครือข่ายส่วนบุคคลที่เกทเวย์มีอัตราการรับข้อมูลสูง ไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลที่อยู่รอบข้าง โดยคาดหวังว่าการย้ายเซ็นเซอร์โหนดบางตัวจะทำให้อัตราการรับข้อมูลในเครือข่ายส่วนบุคคลเดิมลดลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและพัฒนาเทคนิควิธีการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ของระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในระบบที่เซ็นเซอร์โหนดที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมาก

2. เสนอแนวทางปรับปรุงการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ เพื่อให้เครือข่ายสามารถรองรับข้อมูลที่มีปริมาณแบนด์วิดท์สูง ได้พร้อมกันอย่างราบรื่น และ มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network , WSN) คือ การใช้อุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีจำนวนมาก ไว้คอยสังเกต หรือ ตรวจสอบคุณสมบัติของสภาพแวดล้อม อาทิ เสียง แสง อุณหภูมิ ความดัน การสั่นสะเทือน หรือแม้กระทั่งการเคลื่อนไหว โดยอุปกรณ์แต่ละตัวจะมีเครื่องรับรู้ (Sensor) อยู่ภายใน ตามชนิดของเหตุการณ์

ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเดิมนั้นได้คิดค้นขึ้น เพื่อใช้สำหรับการทหาร เช่น การนำไปใช้ในสมรภูมิเพื่อการสอดส่องระวังภัย แต่ปัจจุบันได้ถูกใช้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและหน่วยงานวิจัยเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างการประยุกต์เช่น การเฝ้าสังเกตและควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงาน (Tomasz *et al*., 2009) การเฝ้าสังเกตสภาพร่างกายองผู้ป่วย (Kottapalli *et al*., 2003) การเฝ้าสังเกตพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต (Cerpa *et al*., 2001) ระบบบ้านอัจฉริยะ (Michal and Miloš, 2007) ระบบจราจรอัจฉริยะ (Duarte and Hu, 2004)

ภายในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็ก โดยอุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกเรียกว่า เซ็นเซอร์โหนด (Sensor nodes, SN) ภายในแต่ละเซ็นเซอร์โหนดจะประกอบด้วย เครื่องรับส่งคลื่นวิทยุ (Radio transceiver) หรืออุปกรณ์ส่งสัญญาณชนิดอื่น แหล่งพลังงาน หน่วยประมวลผลขนาดเล็ก(Microcontroller) อยู่ในตัวอุปกรณ์เอง โดยขนาดของเซ็นเซอร์โหนดนั้นจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กเท่าเม็ดฝุ่น ไปจนถึงกล่องรองเท้าขนาดใหญ่ ราคาของเซ็นเซอร์โหนดแต่ละโหนดนั้นเริ่มตั้งแต่ไม่กี่ร้อยบาท ไปจนถึงหลักหมื่น ขึ้นอยู่กับขนาด ความสามารถในการประมวลผล อุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ

1.2 รูปแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

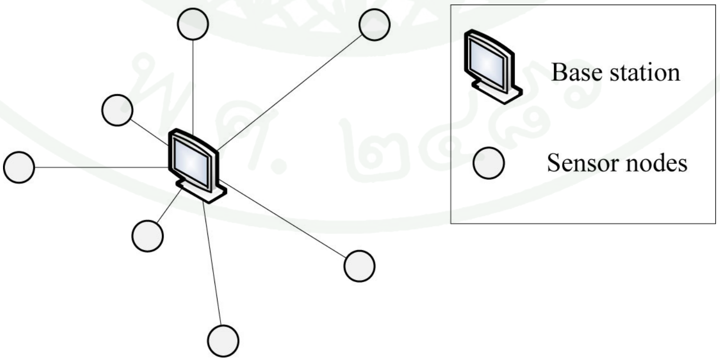
เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

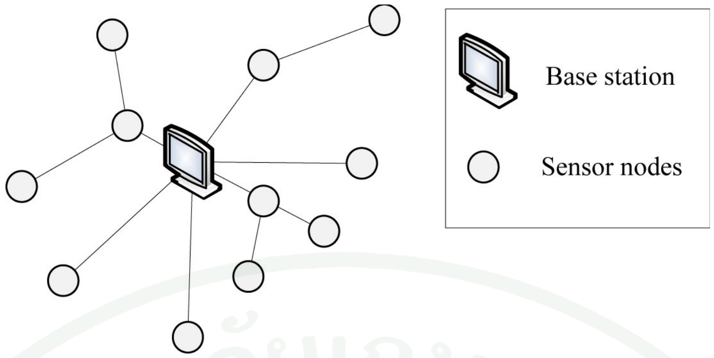
1.2.1 สถานีฐาน (Base station, BS) เป็นส่วนที่รองรับข้อมูลที่สังเกตได้ทั้งหมดภายในระบบ และติดต่อกับผู้ใช้งานโดยผู้ใช้งานนี้อาจจะเป็นผู้ใช้งานที่เรียกดูข้อมูลอยู่จริง ๆ หรือเป็นเซิร์ฟเวอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลเท่านั้น

1.2.2 เซ็นเซอร์โหนด ทำหน้าที่เฝ้าสังเกตสภาพแวดล้อม และแปลงผลที่ได้เป็นข้อมูล และส่งต่อข้อมูลที่ได้ไปยังสถานีฐาน โดยทั่วไปจะมีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ หรือใช้พลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ ดังนั้นเซ็นเซอร์โหนดจึงถือเป็นอุปกรณ์ที่มีข้อจำกัดในด้านพลังงาน

การส่งต่อข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานนั้น สัญญาณจะถูกส่งในรูปแบบของการส่งภายในหนึ่งฮ็อป (Single hop) หรือหลายฮ็อป (Multi hops) ก็ได้ ซึ่งถ้าข้อมูลถูกส่งภายในหนึ่งฮ็อป โดยมีความคล้ายคลึงกับลักษณะเครือข่ายของแลนไร้สาย ดังภาพที่ 1 แต่ถ้าข้อมูลถูกส่งภายในหลายฮ็อป ดังภาพที่ 2 จะพบว่าเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน ต้องส่งต่อข้อมูลให้ระหว่างเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ห่างออกไปและสถานีฐาน ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานจำนวนมากในเซ็นเซอร์โหนดดังกล่าว มีผลให้มีระยะเวลาการใช้งานที่สั้นกว่าเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ห่างออกไป เมื่อเวลาผ่านไปจนเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ใกล้กับสถานีพลังงานหมด เซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ห่างออกไป แม้จะมีพลังงานเหลืออยู่ ก็ไม่สามารถส่งข้อมูลกลับมายังสถานีฐานได้ เนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดที่ส่งต่อข้อมูลนั้นได้หยุดให้บริการไปแล้ว ปัญหาดังกล่าวถือเป็นปัญหาในด้านความสมดุลของการใช้พลังงาน



ภาพที่ 1 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ส่งข้อมูลภายในหนึ่งฮ็อป



ภาพที่ 2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ส่งข้อมูลหลายฮ็อป

1.3 รูปแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้น

เนื่องจากปัญหาในด้านความสมดุลของการใช้พลังงาน สถาปัตยกรรมแบบหลายลำดับชั้นจึงถูกนำมาใช้ในระบบเครือข่ายไร้สาย โดยมีจุดประสงค์หลักคือ ช่วยในเรื่องการประหยัดพลังงานของระบบโดยรวม และช่วยในเรื่องการบริหารจัดการ ในกรณีที่ระบบมีขนาดใหญ่ มีเซ็นเซอร์โหนดเป็นจำนวนมาก (Ye *et al*., 2002) โดยโหนดที่ถูกเรียกว่าเกทเวย์ (Gateways, GW) ซึ่งเป็นโหนดที่มีข้อจำกัดในด้านพลังงานน้อย จะถูกจัดวางระหว่างสถานีฐาน และกลุ่มของเซ็นเซอร์โหนด โดยระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยทั่วไป จะมีสองลำดับชั้น (Two-tier architecture) ถึงสามลำดับชั้น (Three-tier architecture) ขึ้นอยู่กับขนาดและจุดประสงค์ในการออกแบบระบบ

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบสองลำดับชั้น ดังภาพที่ 3 เป็นรูปแบบที่เราสนใจศึกษา เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยที่สุด ทำให้ง่ายต่อการใช้งานจริง โดยมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ

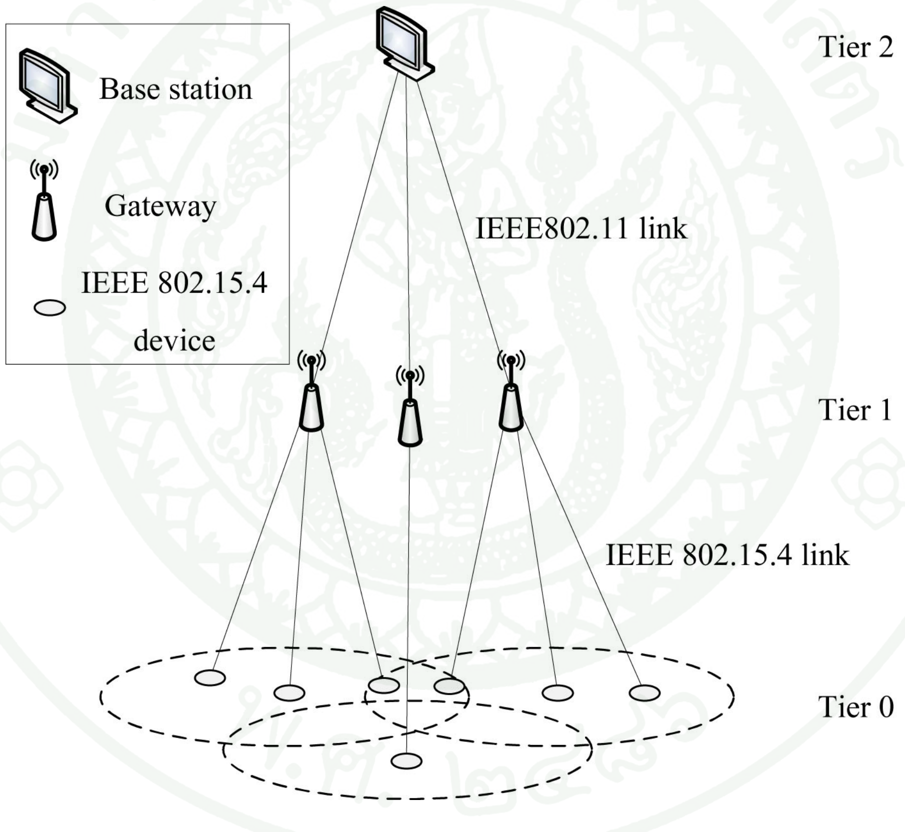
1.3.1 สถานีฐาน เป็นส่วนที่อยู่เหนือสุดของระบบ ปกติสถานีฐานจะติดต่อกับเกทเวย์ผ่านทางระบบแลน ซึ่งมีประสิทธิภาพกว่าการส่งผ่านคลื่นวิทยุ

1.3.2 เกทเวย์ หรือ แอคเซสพอยต์ เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงระหว่างเครือข่ายทั่วไป เช่น แลน แลนไร้สาย กับระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยมีเกทเวย์ที่วางขายอยู่ทั่วไป เช่น Tmote Connect Intel Stargate โดยแต่ละชนิดก็จะรองรับเซ็นเซอร์โหนดเฉพาะของบริษัทตัวเองเท่านั้น ถ้าเกทเวย์ที่เชื่อมต่ออยู่กับแลน จะสามารถใช้พลังงานจากสายสัญญาณได้ (PoE) หรือถ้ามีแต่ระบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แลนไร้สายเพียงอย่างเดียวก็อาจจะมีการใช้พลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (Corke *et al.*, 2007)

นอกจากเกทเวย์จะทำหน้าที่เชื่อมโยงระบบเน็ตเวิร์คแล้ว ยังอาจจะมีการออกแบบให้ทำหน้าที่ต่าง ๆ เช่นเป็นเว็บเซิร์ฟเวอร์ หรือระบบอื่น ๆ ที่สามารถกระจายข่าวสารเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเรียกดูข้อมูลที่เก็บมาได้จากเซ็นเซอร์โหนด ทำหน้าที่เป็นพร็อกซี่ที่สามารถตัดสินใจว่าจะร้องขอข้อมูลใดบ้างจากเซ็นเซอร์โหนด (Li *et al.*, 2006)



ภาพที่ 3 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบสองลำดับชั้น

1.3.3 เซ็นเซอร์โหนด เป็นส่วนที่อยู่ล่างสุดของระบบ มีปริมาณมากเมื่อเทียบกับเกทเวย์ คอยเก็บข้อมูลจากสิ่งแวดล้อม และส่งต่อให้เกทเวย์

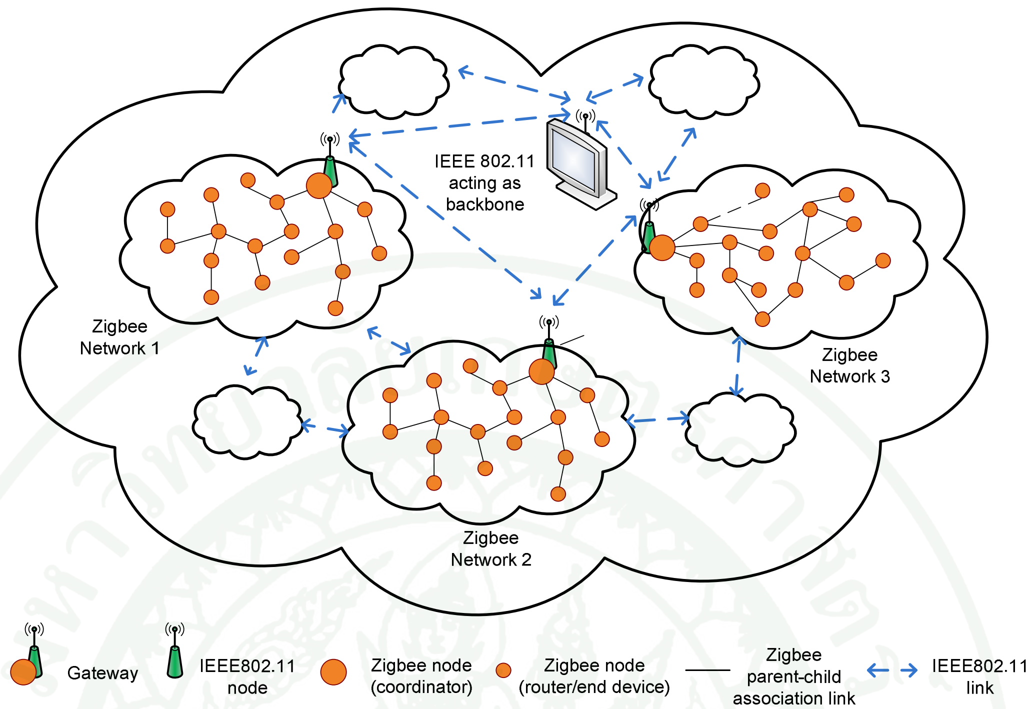
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อดีจากการจัดวางเกทเวย์ไว้ระหว่างสถานีฐานและเซ็นเซอร์โหนดคือ เกทเวย์ซึ่งเป็นโหนดที่มีข้อจำกัดในด้านพลังงานน้อย จะทำหน้าที่เสมือนเป็นสถานีฐานคอยรับและส่งข้อมูลระหว่างเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย และเครือข่ายแลนที่ต่อกับสถานีฐาน เซ็นเซอร์โหนดไม่ต้องรับภาระในการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐาน เพียงแค่ส่งข้อมูลให้ถึงเกทเวย์ก็เปรียบเสมือนว่าส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานเรียบร้อยแล้ว ทำให้มีอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าการส่งกลับไปหาสถานีฐานโดยตรง นอกจากนี้ยังมีข้อดีในการเพิ่มขยายขนาดของระบบ เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดในเรื่องระยะทางของการส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โหนดกลับมายังสถานีฐาน เซ็นเซอร์โหนดเพียงแต่ส่งข้อมูลให้กับเกทเวย์ และเกทเวย์จะติดต่อกับสถานีฐานผ่านโครงข่ายแลน ซึ่งจะมีระยะทางเท่าใดก็ได้

ART-WiSe (Koubâa *et al*., 2007) เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบสองลำดับ ประกอบด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายอยู่ระหว่างขั้นที่ 0 กับขั้นที่ 1 และเครือข่ายแบบแลน (IEEE802.3) หรือ แลนไร้สาย (IEEE802.11) อยู่ระหว่างขั้นที่ 1 กับขั้นที่ 2 ดังภาพที่ 4 โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลแบบเวลาจริงกับข้อมูลที่มีความสำคัญสูง ช่วยเพิ่มความน่าไว้วางใจของระบบ โดยอุปกรณ์ในขั้นที่ 2 นั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีข้อจำกัดด้านพลังงาน แบนด์วิดท์ และโอกาสเกิดข้อผิดพลาดน้อยกว่าอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สาย นอกจากนี้ยังมีความสะดวกในการเพิ่มหรือลดขนาดของระบบ และสะดวกสำหรับการเคลื่อนย้ายระบบ

จะเห็นได้ว่าเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่ Koubâa และคณะเสนอมานั้น แต่ละเน็ตเวิร์คแบบ IEEE 802.15.4/zigbee นั้นมีเกทเวย์เพียงแค่ตัวเดียว ซึ่งจากงานวิจัยในปี ค.ศ. 2007 Cipollone และคณะ ได้กล่าวถึงเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีเกทเวย์มากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไปจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในด้านพลังงานและจำนวนข้อมูลที่เกทเวย์ได้รับ เมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีเกทเวย์เพียงแค่ตัวเดียว เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีเกทเวย์มากกว่า 1 ตัวจะช่วยในการกระจายข้อมูลไปยังเกทเวย์หลาย ๆ ตัว ทำให้เซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ติดกับเกทเวย์ไม่ต้องรับภาระหนักในการส่งต่อข้อมูล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 ART-WiSe Two-tire architecture

1.4 มาตรฐาน IEEE802.15.4 และหน้าที่ของอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4

มาตรฐาน IEEE802.15.4 (Jose, 2007) เป็นมาตรฐานที่กำหนดรูปแบบและหน้าที่การทำงาน ในชั้นกายภาพ (Physical layer) และชั้นแมค (MAC layer) สำหรับเครือข่ายส่วนบุคคลที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำ (Low-rate wireless personal area networks, LR-WPANs) ซึ่งเซ็นเซอร์โหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่ม LR-WPANs เช่นเดียวกัน หน้าที่ของอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4 แบ่งตามความสามารถออกเป็นสามชนิด

1.4.1 แพนโคออร์ดิเนเตอร์ ทำหน้าที่สร้างเครือข่ายส่วนบุคคล พร้อมทั้งอนุญาตให้โคออร์ดิเนเตอร์หรือดีไวซ์สามารถเข้าร่วมใช้งานได้ โดยเครือข่ายส่วนบุคคลแต่ละเครือข่ายจะมีเลขประจำเครือข่าย (PAN ID) ที่ไม่ซ้ำกัน โดยจะมีการกระจายเฟรมที่เรียกว่าบีคอน (Beacon) เพื่อให้โคออร์ดิเนเตอร์หรือดีไวซ์ที่ได้ยินบีคอนทราบว่า มีแพนโคออร์ดิเนเตอร์อยู่ในรัศมีการรับสัญญาณของตัวเอง แต่ละเครือข่ายจะทำงานเป็นอิสระต่อกัน อาจจทำงานอยู่ที่คลื่นความถี่เดียวกันหรือคนละคลื่นความถี่ก็ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4.2 โคออร์ดิเนเตอร์ ทำหน้าที่อนุญาตให้ดีไวซ์เข้าร่วมใช้งานได้ โดยจะมีการกระจายเฟรมบีคอนเช่นเดียวกันแพนโคออร์ดิเนเตอร์ แต่ว่าไม่สามารถสร้างเครือข่ายขึ้นมาใหม่ได้เหมือนแพนโคออร์ดิเนเตอร์

1.4.3 ดีไวซ์ ทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังแพนโคออร์ดิเนเตอร์หรือโคออร์ดิเนเตอร์เท่านั้น ไม่สามารถส่งบีคอน หรืออนุญาตให้มีการเข้าร่วมใช้งานได้

1.5 ชนิดของอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4

อุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4 แบ่งออกเป็นสองชนิด

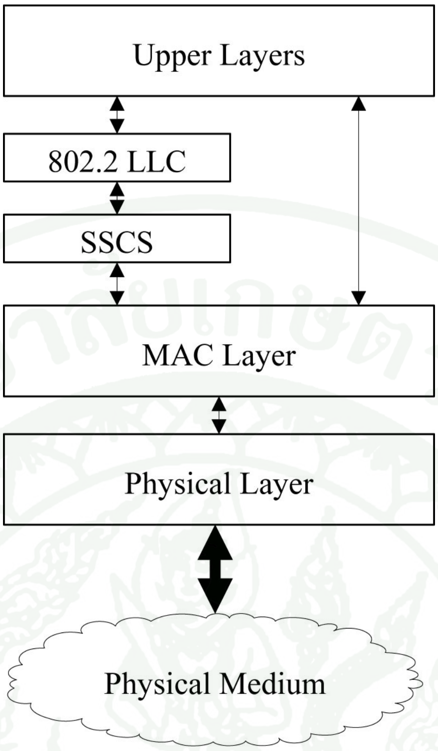
1.5.1 Full-function device (FFD) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำหน้าที่ได้ทุกอย่าง ทั้งแพนโคออร์ดิเนเตอร์ โคออร์ดิเนเตอร์ และดีไวซ์ สามารถติดต่อได้ทั้ง FFD และ RFD

1.5.2 Reduced-function device (RFD) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกลดความสามารถลงจาก FFD สามารถติดต่อได้กับ FFD เท่านั้น ไม่สามารถติดต่อกับ RFD ด้วยกันเองได้

1.6 สถาปัตยกรรมของอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4

ภาพที่ 5 แสดงถึงลำดับชั้นของการส่งข้อมูลภายในอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4 โดยประกอบด้วยชั้นกายภาพ ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ และควบคุมกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณ ถัดมาคือชั้นแมค ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับชั้นกายภาพเพื่อส่งผ่านข้อมูลจากชั้นที่เหนือกว่าลงมา นอกจากนี้ชั้นแมคยังทำหน้าที่จัดการการเข้าใช้สื่อร่วมกัน เช่นการทำกระบวนการซีเอสเอ็มเอ/ซีเอ (Carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) ทำหน้าที่ขอเข้าร่วมใช้งาน (Associate) ยกเลิกการร่วมเข้าใช้งาน (Disassociate) หรือแม้กระทั่งการส่งสัญญาณบีคอน ระหว่างชั้นแมคกับชั้นถัดไปจะมีชั้นย่อยอยู่คือ ชั้น IEEE802.2 logical link control (LLC) โดยชั้นย่อย LLC จะติดต่อกับชั้นแมคผ่านชั้นย่อย Service specific convergence sublayer (SSCS) ชั้นถัดมาคือชั้นเครือข่าย (Network layer) ทำหน้าที่สร้างเครือข่ายขึ้นมาใหม่ การหาเส้นทางให้กับข้อมูล ซึ่งชั้นเครือข่ายนี้ไม่ได้กำหนดข้อตกลงไว้ในมาตรฐาน IEEE802.15.4 แต่จะมีการกำหนดไว้ในมาตรฐานซิกส์บี (Zigbee) (Gislason, 2008) แทน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 ลำดับชั้นของการส่งข้อมูลภายในอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE802.15.4

1.7 รูปแบบเครือข่ายของมาตรฐาน IEEE802.15.4

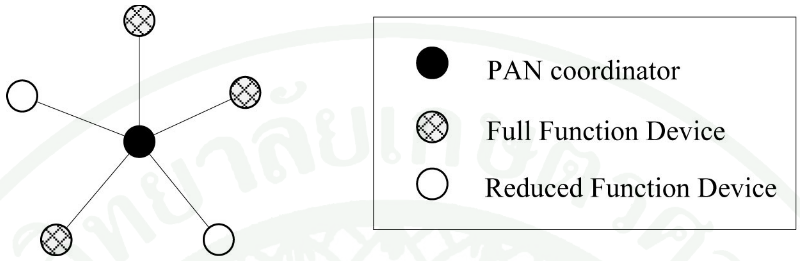
มาตรฐาน IEEE802.15.4 สามารถสร้างเครือข่ายได้สามรูปแบบดังนี้

1.7.1 เครือข่ายรูปแบบดาว (Star topology) ในเครือข่ายรูปแบบนี้จะมีแค่การติดต่อสื่อสารระหว่างเซ็นเซอร์โหนดซึ่งเป็นดีไวซ์ กับส่วนควบคุมกลางซึ่งเป็นแพนโคออร์ดิเนเตอร์เท่านั้น โดยแพนโคออร์ดิเนเตอร์อาจจะต่อกับแหล่งพลังงานหลักเช่น ปลั๊กไฟ และเซ็นเซอร์โหนดที่เป็นดีไวซ์อาจจะใช้งานโดยใช้แบตเตอรี่ ดังภาพที่ 6 ลักษณะของงานประยุกต์ที่นำไปใช้ได้แก่ ระบบบ้านอัจฉริยะ (home automation) อุปกรณ์รอบข้างของคอมพิวเตอร์ (Personal computer peripheral) ของเล่นและเกมส์

หลังจากเซ็นเซอร์โหนดชนิด FFD เริ่มทำงานในครั้งแรก เซ็นเซอร์โหนดนั้นอาจจะสร้างเครือข่ายของตัวเองและทำหน้าที่เป็นแพนโคออร์ดิเนเตอร์ ในขั้นตอนการสร้างเครือข่าย

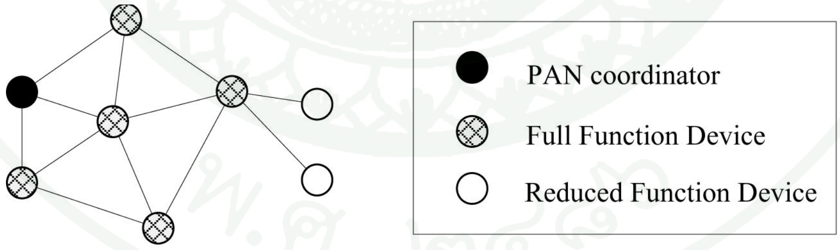
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เซ็นเซอร์โหนดที่เป็นแพนโคออร์ดิเนเตอร์จะเลือกเลขประจำเครือข่ายที่ยังไม่ถูกใช้โดยเครือข่ายอื่นที่อยู่ในระยะการรับส่งสัญญาณของเซ็นเซอร์โหนดที่เริ่มสร้างเครือข่าย การเริ่มสร้างเครือข่ายลักษณะนี้ทำให้สามารถสร้างเครือข่ายที่ไม่ขึ้นต่อกันเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 6 เครือข่ายรูปแบบดาว

1.7.2 เครือข่ายแบบเพียร์-ทู-เพียร์ (Peer-to-peer Topology) ในเครือข่ายแบบเพียร์-ทู-เพียร์นี้จะมีความแตกต่างกับเครือข่ายรูปแบบดาวตรงที่มีแพนโคออร์ดิเนเตอร์เพียงแค่ตัวเดียวเท่านั้น เซ็นเซอร์โหนดแต่ละโหนดสามารถติดต่อระหว่างกันเองได้ ถ้าทั้งคู่อยู่ในระยะการรับส่งสัญญาณของกันและกัน มีข้อจำกัดเพียงแต่เซ็นเซอร์โหนดทั้งคู่ต้องไม่ใช่อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นดีไวซ์ลักษณะของงานประยุกต์ที่นำไปใช้ได้แก่ การเฝ้าสังเกตและควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงาน การติดตามสิ่งของ



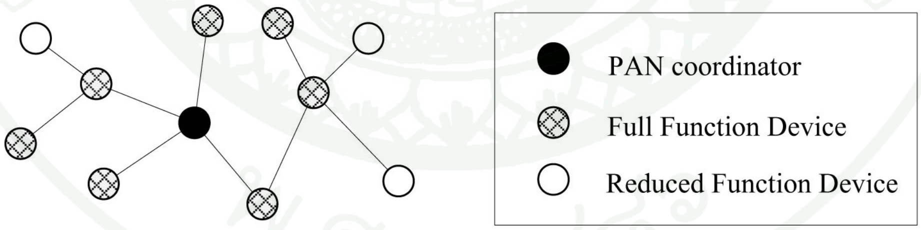
ภาพที่ 7 เครือข่ายแบบเพียร์-ทู-เพียร์

1.7.3 เครือข่ายลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้ (Cluster-tree topology) เครือข่ายลักษณะนี้เป็นเครือข่ายกรณีพิเศษของเครือข่ายแบบเพียร์-ทู-เพียร์ซึ่งเซ็นเซอร์โหนดส่วนมากเป็นอุปกรณ์แบบ FFD และอาจจะมีอุปกรณ์แบบ RFD ต่ออยู่เป็นโหนดใบ (Leave node) ของเครือข่ายกลุ่มของต้นไม้ โดยที่อุปกรณ์ FFD ตัวใดก็ได้สามารถทำตัวเป็นโคออร์ดิเนเตอร์เพื่อประสานเวลา (Synchronization) ระหว่างโคออร์ดิเนเตอร์ด้วยกันเองหรือดีไวซ์อื่น ๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การสร้างเครือข่ายเริ่มต้นขึ้นที่แพนโคออร์ดิเนเตอร์จะเริ่มต้นสร้างกลุ่ม (Cluster) ขึ้นมาใหม่ โดยที่กำหนดให้ตัวเองเป็นหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head) มีหมายเลขกลุ่ม (Cluster identifier) ซึ่งเลือกมาจาก PAN ID หลังจากนั้นแพนโคออร์ดิเนเตอร์จะแพร่สัญญาณ (Broadcast) เฟรมบีคอน ไปยังเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่รอบข้าง หลังจากเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่รอบข้างได้รับเฟรมบีคอน เซ็นเซอร์โหนดรอบข้างนั้นจะร้องขอเพื่อเข้าร่วมกลุ่ม ถ้าหัวหน้ากลุ่มอนุญาตให้เซ็นเซอร์โหนดรอบข้างสามารถเข้าร่วมกลุ่มได้ การเชื่อมต่อจะเริ่มต้นขึ้น โดยหัวหน้ากลุ่มจะเปลี่ยนสถานะของเซ็นเซอร์โหนดที่เชื่อมต่อเป็นโหนดลูก (Child node) แล้วเก็บไว้ในรายชื่อ และเซ็นเซอร์โหนดที่เริ่มเชื่อมต่อก็จะเปลี่ยนสถานะของหัวหน้ากลุ่มเป็นโหนดแม่ (Parent node) แล้วเก็บไว้ในรายชื่อเช่นกัน หลังจากโหนดลูกเชื่อมต่อเสร็จสิ้น ถ้าโหนดลูกนั้นเป็นอุปกรณ์ชนิดโคออร์ดิเนเตอร์จะมีการแพร่สัญญาณเฟรมบีคอน ภายในทุก ๆ ช่วงระยะเวลา เซ็นเซอร์โหนดรอบข้างที่ได้รับเฟรมบีคอนจากโหนดลูกนี้ จะสามารถขอเข้าร่วมกลุ่มได้ต่อไป

เมื่อมีความจำเป็นทางด้านงานประยุกต์หรือทางด้านเครือข่าย ผู้ใช้งานสามารถกำหนดให้มีกลุ่มได้มากกว่าหนึ่งกลุ่ม โดยมีหมายเลขกลุ่มที่แตกต่างไปจากกลุ่มที่มีการใช้งานอยู่ ข้อดีของเครือข่ายลักษณะกลุ่มของต้นไม้คือ เครือข่ายมีพื้นที่ครอบคลุมขนาดใหญ่กว่าเครือข่ายลักษณะอื่น แต่มีข้อเสียคือมีเวลาแฝง (Latency) ที่สูงกว่าเครือข่ายลักษณะอื่น



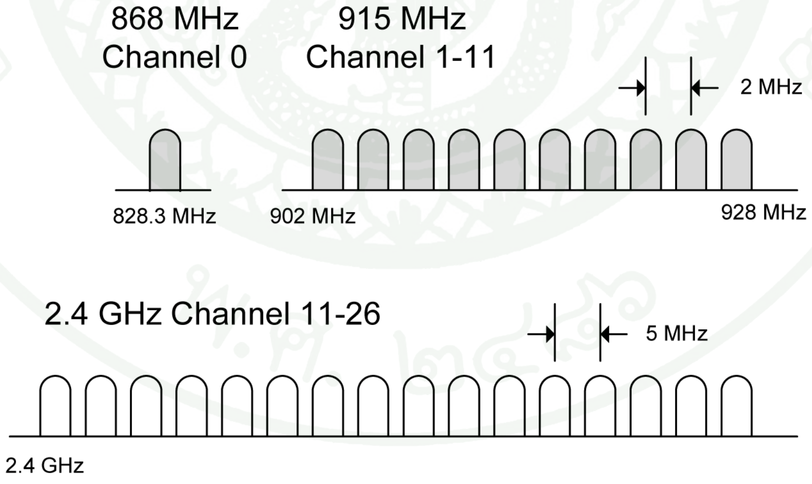
ภาพที่ 8 เครือข่ายลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้

1.8 แถบความถี่ของมาตรฐาน IEEE802.15.4

ตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 ได้กำหนดช่องสัญญาณไว้สามช่วง โดยทั้งสามช่วงใช้วิธีการแพร่สัญญาณด้วยวิธี Direct sequence spread spectrum (DSSS) ดังตารางที่ 1 และแต่ละแถบความถี่จะมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณไม่เท่ากัน ดังภาพที่ 9 โดยพบกว่าทุก ๆ ช่องสัญญาณจะไม่มีการเหลื่อมล้ำกันเหมือนในแลนไร้สาย มีข้อดีคือไม่มีการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกัน เมื่อมีการแพร่สัญญาณภายในช่วงเวลาเดียวกัน

ตารางที่ 1 แถบความถี่และอัตราการส่งข้อมูล

ชื่อเรียกความถี่ (MHz)	แถบความถี่ (MHz)	อัตราการส่งข้อมูล (kb/s)
868	868-868.6	20
915	902-928	40
2450	2400-2485	250



ภาพที่ 9 แถบความถี่ของมาตรฐาน IEEE802.15.4

1.9. การตรวจจับพลังงานในการรับสัญญาณ (The receiver energy detection, ED)

พลังงานในการรับสัญญาณ จะใช้เป็นส่วนประกอบในกระบวนการเลือกช่องสัญญาณ โดยจะประมาณกำลังส่งในทุก ๆ ช่องสัญญาณของมาตรฐาน IEEE802.15.4 เพียงอย่างเดียว ไม่มีการถอดรหัสข้อความใด ๆ จากสัญญาณที่ได้รับ โดยค่าพลังงานในการรับสัญญาณจะถูกเก็บไว้ในรูปของตัวเลขจำนวน 8 บิต

1.10 Link Quality Indication (LQI)

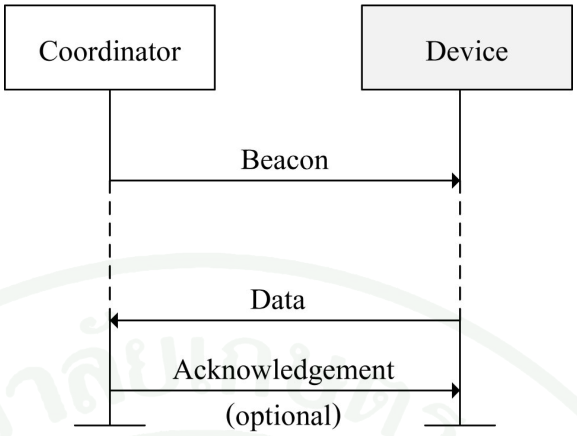
Link quality indication คือค่าที่ใช้บ่งชี้ลักษณะของความแรงสัญญาณ หรือคุณภาพของสัญญาณ การประมาณค่า LQI จะใช้การประมาณจากค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise) โดยค่า LQI จะใช้ประกอบการพิจารณาในการทิ้งข้อมูลที่ได้รับมาในชั้นแมค

1.11 แบบจำลองการส่งข้อมูลภายในเครือข่าย

การส่งข้อมูลภายในเครือข่ายแบ่งออกเป็นสามประเภทคือ การส่งข้อมูลจากโคออร์ดิเนเตอร์ไปยังดีไวซ์ การส่งข้อมูลจากดีไวซ์ไปยังโคออร์ดิเนเตอร์ และการส่งข้อมูลระหว่างดีไวซ์กระบวนการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับการสนับสนุนโดยรูปแบบของเครือข่ายที่สร้างขึ้นด้วย

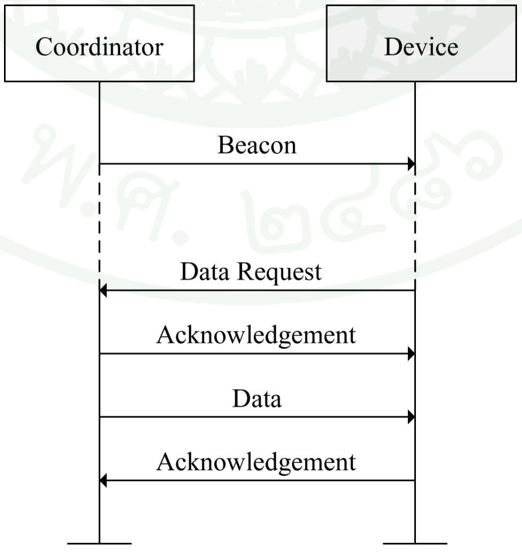
เมื่อดีไวซ์ต้องการส่งข้อมูลไปยังโคออร์ดิเนเตอร์ เซ็นเซอร์โหนดที่เป็นดีไวซ์จะรอบีคอน เมื่อได้รับเฟรมบีคอน เซ็นเซอร์โหนดจะประสานเวลาและส่งข้อมูล โดยที่โคออร์ดิเนเตอร์จะส่งเฟรม acknowledgement กลับไปยังดีไวซ์หรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ ดังภาพที่ 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 การส่งข้อมูลจากดีไวซ์ไปยังโคออร์ดิเนเตอร์

ส่วนการส่งข้อมูลจากโคออร์ดิเนเตอร์กลับไปยังดีไวซ์นั้นจะมีขั้นตอนมากกว่า โดยเริ่มต้นจากโคออร์ดิเนเตอร์จะใส่ข้อความลงไปในบีคอน ว่ามีข้อมูลพร้อมที่จะส่งให้ดีไวซ์ เมื่อดีไวซ์ได้รับบีคอนซึ่งมีการส่งออกมาเป็นระยะ จะตรวจสอบว่ามีข้อมูลสำหรับตนเองอยู่ที่โคออร์ดิเนเตอร์หรือไม่ ถ้าตรวจพบดีไวซ์จะส่งคำสั่งร้องขอกลับไปยังโคออร์ดิเนเตอร์ เมื่อโคออร์ดิเนเตอร์ได้รับคำสั่งร้องขอ จะมีการส่ง acknowledgement กลับไปยังดีไวซ์หรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ หลังจากนั้นจะส่งข้อมูลที่ต้องการส่งให้ ดีไวซ์ เมื่อดีไวซ์ได้รับจะส่ง acknowledgement กลับไปยังโคออร์ดิเนเตอร์ เป็นอันสิ้นสุดการส่งข้อมูล ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การส่งข้อมูลจากโคออร์ดิเนเตอร์ไปยังดีไวซ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.12. การสร้างเครือข่ายส่วนบุคคล

เมื่อแพนโคออร์ดิเนเตอร์ต้องการที่จะสร้างเครือข่ายส่วนบุคคลขึ้นมาใหม่ จะต้องกำหนด PAN ID และเลือกช่องสัญญาณให้กับตัวเอง ซึ่งการเลือกช่องสัญญาณนี้จะกระทำโดยใช้กระบวนการตรวจจับพลังงานในการรับสัญญาณในการตัดสินใจ โดยจะดูจากค่าพลังงานที่สูงที่สุดที่แต่ละช่องสัญญาณส่งมา ซึ่งค่า ED นี้จะสามารถบ่งบอกได้ว่าช่องสัญญาณนั้นมีสัญญาณรบกวนอยู่มากน้อยเพียงใด

1.13 การแพร่สัญญาณบีคอน และลักษณะของเฟรมบีคอน

ภายหลังจากแพนโคออร์ดิเนเตอร์สร้างเครือข่ายส่วนบุคคลสำเร็จแล้ว ตามมาตรฐานกำหนดให้มีวิธีการส่งบีคอนสองวิธีการคือ beacon-enabled และ nonbeacon-enabled ในวิธีการแบบ beacon-enabled นั้นโคออร์ดิเนเตอร์จะส่งเฟรมบีคอนในแต่ละช่วงเวลาอย่างสม่ำเสมอ โดยเซ็นเซอร์โหนดสามารถที่จะดักฟังเฟรมบีคอน ที่ส่งออกมาเพื่อหาข้อมูลของแต่ละเครือข่ายส่วนบุคคลรอบ ๆ ตัว โดยวิธีการดักฟังนี้เรียกว่า passive scan ส่วนวิธี nonbeacon-enabled จะไม่ส่งเฟรมบีคอนออกมา เซ็นเซอร์โหนดแต่ละโหนดต้องส่งคำสั่งร้องขอบีคอนเฟรม (beacon request command frame) ไปก่อน ซึ่งเรียกว่า active scan

ใน beacon-enabled mode ช่วงเวลาระหว่างการส่งเฟรมบีคอนแต่ละครั้งจะถูกแบ่งออกเป็น superframe เพื่อแบ่งให้แต่ละเซ็นเซอร์โหนดประสานเวลากัน โดย superframe จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงเวลาในการส่งเฟรมบีคอน ช่วงเวลาที่ให้มีการแข่งขันกันส่งข้อมูล และช่วงเวลาที่ไม่มีการแข่งขันกันส่งข้อมูล ซึ่งกำหนดให้กับการใช้งานที่แตกต่างกัน

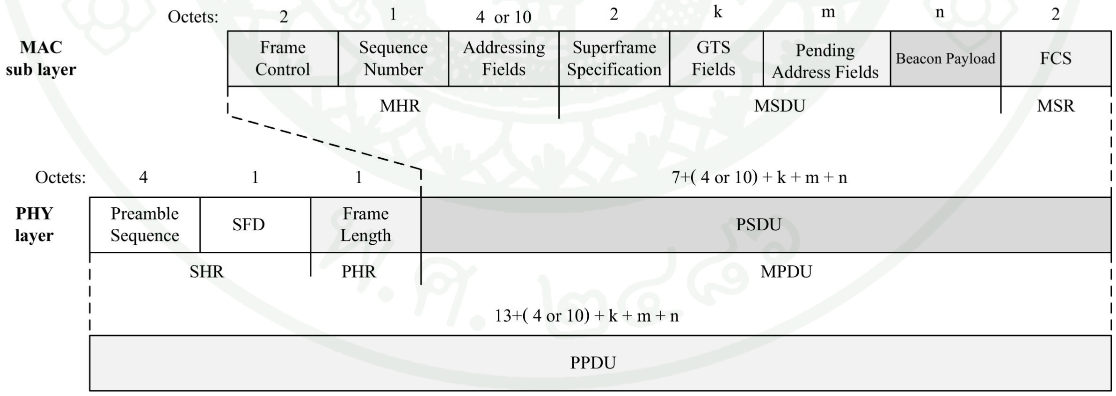
ภาพที่ 12 แสดงถึงลักษณะของเฟรมบีคอนโดย MAC service data unit (MSDU) ประกอบไปด้วย superframe specification, pending address specification, address list และ beacon payload fields ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บข้อมูลอื่น ๆ ของบีคอน

MSDU มีส่วนที่อยู่ก่อนหน้าคือส่วนหัวของชั้นแมค (MAC header, MHR) และส่วนที่อยู่ข้างหลังคือส่วนท้ายของชั้นแมค (MAC footer, MFR) โดย MHR ประกอบไปด้วย MAC

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

frame control fields มีหน้าที่เก็บชนิดของเฟรม ภายใน MAC frame control fields นี้มีส่วนที่ถูกจองไว้ (Reserved) ดังภาพที่ 13 สามารถนำมาใช้งานในภายหลังได้ เลขลำดับบีคอน (Beacon sequence number, BSN) ทำหน้าที่เก็บลำดับของบีคอน ส่วนเก็บข้อมูลที่อยู่ (Addressing information fields) ทำหน้าที่เก็บที่อยู่ของผู้รับและผู้ส่ง โดยจะมีขนาด 4 หรือ 10 ไบต์ก็ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของที่อยู่ที่เลือกใช้งาน ส่วน MFR ที่อยู่หลังจาก MSDU จะมีหน้าที่เก็บตัวเลข 16 บิต ซึ่งเป็นตัวเลขที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของเฟรมหลังจากถูกส่งไปถึงที่หมาย ส่วนประกอบทั้งสามส่วน MHR MSDU และ MFR เมื่อนำประกอบรวมกันจะถูกเรียกว่าแมคเฟรมบีคอน (MAC beacon frame) หรือ MAC protocol data units (MPDU)

เมื่อ MPDU ถูกส่งผ่านมายังชั้นกายภาพ ในลักษณะของข้อมูลบีคอนในชั้นกายภาพ (PHY beacon packet payload, PHY service data unit, PSDU) จะถูกเพิ่มส่วนที่อยู่ข้างหน้าเข้าไปด้วยส่วนหัวที่ทำการประสานเวลา (Synchronization header, SHR) ซึ่งประกอบไปด้วย Preamble sequence และ Start-of-frame delimiter (SFD) ทำหน้าที่เกี่ยวกับการประสานเวลาของเฟรม ถัดมาคือส่วนหัวของชั้นกายภาพ (PHY header, PHR) เก็บค่าความยาวของ PSDU ว่ามีความยาวกี่บิต ทั้งสามส่วน SHR PHR และ PSDU เมื่อนำประกอบรวมกันจะถูกเรียกว่าข้อมูลบีคอนชั้นกายภาพ (PHY beacon packet, Physical protocol data units, PPDU)



ภาพที่ 12 ลักษณะของเฟรมบีคอน

Bits:	0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
	Frame type	Security enabled	Frame pending	Ack. request	Intra-PAN	Reserved	Dest. Addressing mode	Reserved	Source addressing mode

ภาพที่ 13 ลักษณะของ MAC frame control fields

1.14 การขอเข้าร่วมใช้งานและการยกเลิกการเข้าร่วมใช้งาน

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นได้พัฒนาตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 ซึ่งในแต่ละเครือข่ายส่วนบุคคลหนึ่ง ๆ จะประกอบด้วยแพนโคออร์ดิเนเตอร์จำนวน 1 ตัวและเซ็นเซอร์โหนดต่าง ๆ ซึ่งแพนโคออร์ดิเนเตอร์นี้เองจะทำหน้าที่หลักคือเริ่มสร้างและควบคุมเครือข่าย ภายในเครือข่ายส่วนบุคคลโดยหลังจากแพนโคออร์ดิเนเตอร์สร้างเครือข่ายส่วนบุคคลเสร็จเรียบร้อยแล้ว เซ็นเซอร์โหนดรอบข้างที่เริ่มทำงาน จะมีวิธีการเข้าร่วมเครือข่ายส่วนบุคคล (Association procedure) เพื่อที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเซ็นเซอร์โหนดนั้น ๆ กับเครือข่ายส่วนบุคคลที่ขอเข้าร่วม ซึ่ง association procedure นี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1.14.1 เซ็นเซอร์โหนดค้นหาเครือข่ายส่วนบุคคลทั้งหมดที่สามารถติดต่อได้

1.14.2 เซ็นเซอร์โหนดจะเลือกเครือข่ายส่วนบุคคลที่ต้องการจะเข้าร่วมด้วย ซึ่งวิธีการตัดสินใจไม่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ หลังจากนั้นจะร้องขอเข้าร่วมใช้งานไปยังแพนโคออร์ดิเนเตอร์ที่ถูกเลือกขึ้นมา

1.14.3 หลังจากขอเข้าร่วมเครือข่ายส่วนบุคคลได้ เซ็นเซอร์โหนดจะเริ่มแลกเปลี่ยนข้อมูลกับแพนโคออร์ดิเนเตอร์ต่อไป

การค้นหา WPAN ในขั้นตอนที่ 1 นั้นกระทำโดย การค้นหาเฟรมบีคอนที่ส่งออกมาจากโคออร์ดิเนเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าเครือข่ายส่วนบุคคลทำงานแบบ beacon-enabled หรือ nonbeacon-enabled การค้นหาเฟรมบีคอนก็จะแตกต่างกันดังในหัวข้อที่ 1.13 ในบทการตรวจเอกสาร ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะให้ความสนใจกับการค้นหาแบบ passive scan ซึ่งจะค้นหา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เฟรมบีคอนเริ่มจากช่องสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่มีการใช้งาน โดยในฮ็อปหนึ่ง ๆ ถ้ามีการพบบีคอนเฟรม จะมีการจดจำช่องสัญญาณ PAN ID และรายละเอียดอื่น ๆ ลงในรายชื่อที่เรียกว่า PAN descriptors

ขั้นตอนการเลือกเครือข่ายส่วนบุคคลยังไม่มีมาตรฐานระบุไว้แน่นอนเกี่ยวกับวิธีการตัดสินใจเลือกเครือข่าย โดยในโปรแกรมจำลองเช่น The Network Simulator 2 (NS-2) จะเลือกเครือข่ายส่วนบุคคลรายชื่อแรกจาก PAN descriptors ซึ่งโดยส่วนมากก็จะเป็นเครือข่ายส่วนบุคคลที่มีช่องสัญญาณต่ำที่สุดเสมอ

หลังจากที่เซ็นเซอร์โหนดเลือกเครือข่ายส่วนบุคคลที่ต้องการจะเชื่อมต่อได้ (ขั้นตอนที่ 2) เซ็นเซอร์โหนดจะส่ง association request ไปยังโคออร์ดิเนเตอร์ เพื่อให้โคออร์ดิเนเตอร์ตัดสินใจว่าจะให้เข้าร่วมหรือไม่ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะส่งกลับมาด้วย response command frame ข้อมูลที่ได้จากการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ทั้งหมด จะถูกเก็บไว้ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบ parent-child ระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งจะถูกเก็บไว้ที่แพนโคออร์ดิเนเตอร์

1.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเกทเวย์และแพนโคออร์ดิเนเตอร์ของเครือข่าย IEEE802.15.4

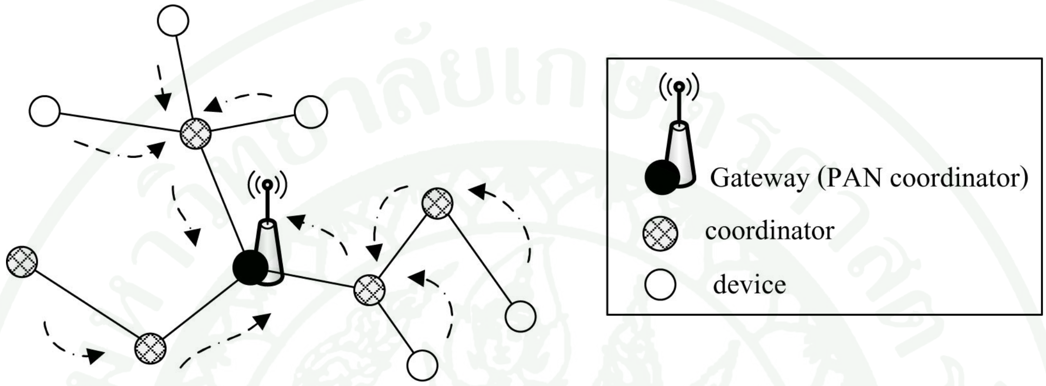
เกทเวย์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายมาตรฐาน IEEE802.15.4 กับเครือข่ายที่อยู่ในลำดับชั้นถัดไป เช่น IEEE802.11 WLAN โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีที่ลำดับชั้นที่ 1 ของเกทเวย์เชื่อมต่อกับเครือข่ายมาตรฐาน IEEE802.15.4 ที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้ (cluster-tree topology)

เกทเวย์จะเชื่อมอยู่เป็นอุปกรณ์เดียวกับแพนโคออร์ดิเนเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นหัวหน้ากลุ่มของเครือข่ายส่วนบุคคล โดยในเครือข่ายส่วนบุคคลหนึ่ง ๆ จะมีแพนโคออร์ดิเนเตอร์เพียงตัวเดียว และแพนโคออร์ดิเนเตอร์นี้จะเชื่อมต่อกับโคออร์ดิเนเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อของโคออร์ดิเนเตอร์ตัวอื่น ๆ หรือดีไวซ์ ดังภาพที่ 13

รูปแบบการส่งข้อมูลจะเป็นการส่งข้อมูลจากดีไวซ์หรือโคออร์ดิเนเตอร์กลับสถานีฐาน ซึ่งเป็นรูปแบบการใช้งานส่วนมากของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยภายในเครือข่ายส่วนบุคคลหนึ่ง ๆ การส่งข้อมูลกลับมายังสถานีฐานคือการส่งข้อมูลกลับมายังแพนโคออร์ดิเนเตอร์ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเกทเวย์ การหาเส้นทางจึงสามารถเลือกใช้การหาเส้นทางแบบง่าย เช่น การหา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

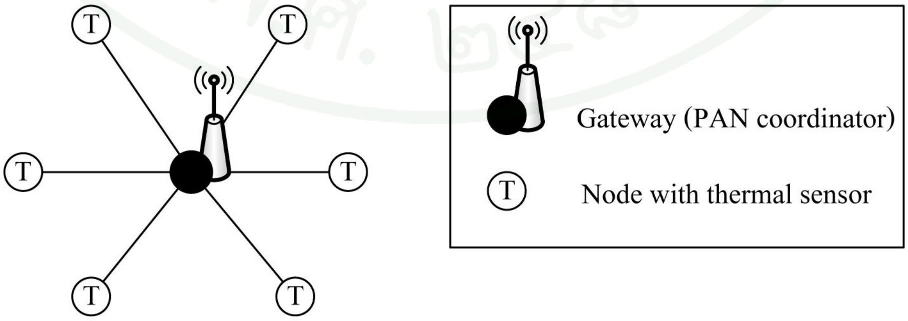
เส้นทางตามลำดับชั้น (Hierarchical routing) ที่เซ็นเซอร์โหนดแต่ละโหนด เมื่อมีข้อมูลที่ต้องการส่งก็จะส่งไปยังโหนดแม่ของตนเองตามลำดับ โดยปลายทางของทุกเซ็นเซอร์โหนดจะเป็นแพนโคออร์ดิเนเตอร์เสมอ ดังภาพที่ 14 การหาเส้นทางตามลำดับชั้นมีข้อดีคือ แต่ละโหนดไม่ต้องเก็บตารางการหาเส้นทาง (routing table) ทำให้มีที่ว่างในหน่วยความจำของแต่ละโหนดเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 14 การหาเส้นทางตามลำดับชั้นบนเครือข่ายลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้

1.16 การเปรียบเทียบเครือข่ายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียว (Homogeneous Network) กับเครือข่ายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด (Heterogeneous Network)

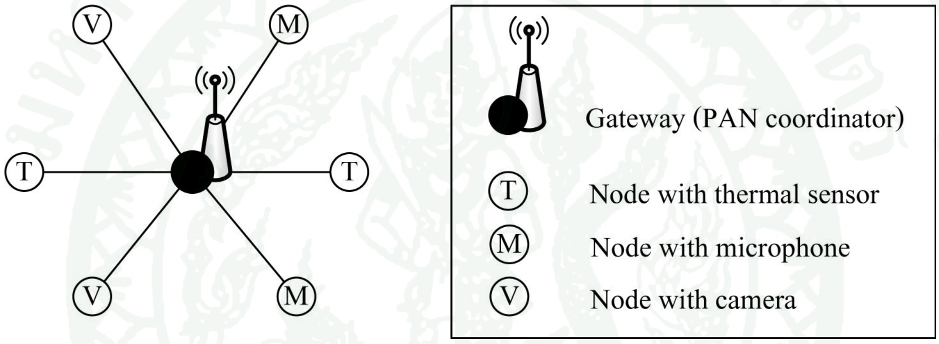
เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียว คือเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่อุปกรณ์เป็นแบบเดียวกันทั้งระบบ มีคุณสมบัติต่าง ๆ เหมือนกัน เช่น ระยะการส่งข้อมูล เซ็นเซอร์ที่ติดตั้ง ขนาดของแบตเตอรี่ ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ส่วนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิดดังภาพที่ 16 นั้น เป็นระบบที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากตัวการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายในปัจจุบันไม่ได้ประกอบด้วยเซ็นเซอร์โหนดที่ทำหน้าที่เหมือน ๆ กันอย่างเดียวทั้งระบบ ทำให้ระบบโดยรวมเป็นแบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่แตกต่างกันในด้านคุณสมบัติต่าง ๆ ทำให้ยากต่อการตัดสินใจว่าเซ็นเซอร์โหนดตัวไหนควรเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวใด เพื่อที่ให้มีความสมดุลในด้านพลังงาน จำนวนข้อมูล ความล่าช้าของการส่งข้อมูล (Mhatre and Rosenberg, 2004)



ภาพที่ 16 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด

2. ปัญหาในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2.1 ปัญหาจากความไม่สมดุลของการใช้แบนด์วิดท์

โดยส่วนมากระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียวจะไม่พบปัญหาในการแบ่งกลุ่มในการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ เนื่องจากอุปกรณ์ทุก ๆ ตัวในระบบเป็นชนิดเดียวกัน ทำให้มีความต้องการในการใช้แบนด์วิดท์ที่ไม่แตกต่างกันมาก จึงสามารถแบ่งกลุ่มให้มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ภายในการแบ่งกลุ่มครั้งแรก

แต่ถ้าระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์หลาย ๆ ชนิด ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวนั้นมีความต้องการใช้งานแบนด์วิดท์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ถ้ามีอุปกรณ์ชิ้นใด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชิ้นหนึ่งกำลังส่งข้อมูลที่มีการใช้แบนด์วิดท์จำนวนมาก เช่น ภาพจากกล้องถ่ายรูป หรือ เสียงที่ได้จากไมโครโฟน ไปยังเกทเวย์ที่สามารถรองรับแบนด์วิดท์สูงสุดได้ 250 กิโลบิตต่อวินาที เมื่อใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นแบนด์วิดท์ที่ค่อนข้างน้อย อาจจะสามารถส่งข้อมูลพร้อม ๆ กันได้เพียงสี่ถึงห้าชุดข้อมูลเท่านั้น ข้อมูลที่เกินมาจากนี้อาจจะสูญหาย หรือ ใช้ระยะเวลานานมากกว่าจะส่งถึงปลายทาง

อีกกรณีคือกรณีที่เกิดเหตุการณ์เร่งด่วนที่ต้องส่งข้อมูลขึ้น เช่น ตัวเซ็นเซอร์โหนดตรวจจับสิ่งผิดปกติได้ (event trigger) เซ็นเซอร์โหนดที่อยู่รอบ ๆ บริเวณที่เกิดเหตุนั้นจะส่งข้อมูลที่ตัวเองตรวจจับได้ไปยังสถานีฐานทันที ถึงแม้ว่าจะเป็นอุปกรณ์ชนิดเดียวกัน แต่มีเหตุให้ต้องส่งข้อมูลพร้อมกัน ภายในช่วงเวลาเดียวกัน ก็จะก่อให้เกิดการใช้แบนด์วิดท์ในปริมาณที่สูงกว่าปกติ ส่งผลให้พบปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีความล่าช้ากับข้อมูลที่มาทีหลัง ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขโดยการเพิ่มเกทเวย์ลงไปในระบบให้มีมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะนำพาไปสู่ปัญหาการตัดสินใจเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์

2.2 ปัญหาการตัดสินใจเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์

เมื่อมีการเพิ่มจำนวนเกทเวย์ในระบบให้มีมากกว่า 1 ตัว ทำให้เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวมีทางเลือกที่หลากหลายในการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐาน ดังนั้นควรจะมีวิธีการในการตัดสินใจว่า ควรจะเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวใดและภายในระยะเวลาใดบ้าง เพื่อให้การส่งข้อมูลที่มีแบนด์วิดท์สูงพร้อม ๆ กันทั้งระบบเป็นไปอย่างราบรื่น และ มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนมากจะพูดถึงการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ในรูปแบบของการแบ่งกลุ่มของเซ็นเซอร์โหนดเป็นคลัสเตอร์ และตัดสินใจว่าแต่ละเซ็นเซอร์โหนดควรจะเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวใด ในกรณีที่มีเกทเวย์มากกว่า 1 ตัวในบริเวณนั้น โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ กัน โพรโทคอลแบบคลัสเตอร์ทั่วไป เช่น LEACH (Heinzelman *et al*., 2000) ซึ่งเป็นวิธีการจัดกลุ่มของคลัสเตอร์ โดยมีหลักเกณฑ์ว่าสามารถเลือกเซ็นเซอร์โหนดตัวใดก็ได้ขึ้นมาเป็นหัวหน้ากลุ่ม จะพบว่ามีข้อแตกต่างกับรูปแบบของเครือข่ายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตรงที่เซ็นเซอร์โหนดที่จะเป็นหัวหน้ากลุ่มได้นั้นต้องเป็น PAN โคออร์ดิเนเตอร์เท่านั้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในปีค.ศ. 2006 Aoun และ Boutaba ได้พูดถึงการแบ่งกลุ่มของเซ็นเซอร์โดยพิจารณาเรื่องพลังงาน และ ความล่าช้าของข้อมูล (Latency) เป็นปัจจัยหลัก ในปีค.ศ. 2007 Lee และคณะ ได้พูดถึงการแบ่งกลุ่มของเซ็นเซอร์โดยใช้ เจเนติค อัลกอริทึม (Genetic Algorithm) ในการลดและกระจายพลังงานของระบบเพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้นานที่สุด ต่อมาในปีเดียวกัน Wang *et al.* (2007) ได้เสนอขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการแบ่งกลุ่มของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบสองลำดับชั้น เพื่อเพิ่มช่วงเวลาการทำงานของเซ็นเซอร์โหนดทั้งหมดให้มีระยะเวลานานที่สุด ในขณะที่เซ็นเซอร์โหนดทุกตัวมีการใช้แบนด์วิดท์ตามที่ต้องการ โดยแบ่งผลการนำเสนอออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือในกรณีที่ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียว วิธีการของ Wang จะสามารถหารูปแบบเครือข่ายที่ดีที่สุดออกมาได้ ส่วนที่สองคือในกรณีที่ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด Wang ได้เสนอขั้นตอนวิธีการแบบประมาณ (Approximation algorithms) ที่สามารถหารูปแบบเครือข่ายที่ทำให้ช่วงเวลาการทำงานของเซ็นเซอร์โหนด มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานที่สุด ซึ่งการนำเสนอทั้งสองส่วนนี้ถูกสมมุติว่า เกทเวย์จะมีการใช้พลังงานขึ้นกับจำนวนของเซ็นเซอร์โหนดที่เข้าร่วมใช้งานด้วย ซึ่งข้อสมมุตินี้แตกต่างจากในวิทยานิพนธ์นี้ตรงที่เกทเวย์จะเป็นโหนดที่มีข้อจำกัดในด้านพลังงานน้อยมาก จนสามารถละทิ้งการคำนวณพลังงานของเกทเวย์ออกไปได้

งานวิจัยที่ใกล้เคียงกับปัญหาที่เราสนใจคือ งานวิจัยของ Gupta and Younis (2003) ได้เสนอการแบ่งกลุ่มของเซ็นเซอร์โหนดเพื่อเข้าใช้งานเกทเวย์ ในกรณีที่เป็นการใช้งานเกทเวย์หลายตัวร่วมกันโดยมีปัจจัยที่พิจารณาสองอย่างคือ พลังงานที่ใช้ในการส่งและรับข้อมูลโดยรวมของระบบ ซึ่งดูจากระยะทางในการส่งข้อมูล โดยสามารถคำนวณได้ตามสูตร

$$E_{tx} = (\alpha_t + \alpha_{amp} d^2) * r \tag{1}$$

$$E_{rx} = \alpha_r * r \tag{2}$$

โดย E_{tx} คือ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล มีหน่วยเป็นจูล

E_{rx} คือ พลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล มีหน่วยเป็นจูล

α_t , α_r คือ พลังงานที่ใช้ในวงจรภาคส่ง/รับสัญญาณต่อบิต มีหน่วยเป็น จูล/บิต

(ปกติให้เท่ากับ 50 นาโนจูล/บิต)

α_{amp} คือ พลังงานที่ใช้ในวงจรภาคขยายสัญญาณ มีหน่วยเป็น จูล/บิต/ตารางเมตร (ปกติให้เท่ากับ 100 พิโคจูล/บิต/ตารางเมตร)

r คือ จำนวนบิตในแมสเซจ

d คือ ระยะทางในการส่ง มีหน่วยเป็นเมตร

สมการที่ (1) และ (2) ให้ข้อกำหนดไว้ว่าเราทราบพิกัดที่อยู่ของแต่ละเซ็นเซอร์โหนดและเกทเวย์อย่างแน่นอน ปัจจัยที่พิจารณาเป็นอันดับที่สองคือโหลดของเกทเวย์ โดยให้ข้อกำหนดว่าทุก ๆ เซ็นเซอร์โหนดสร้างโหลดขึ้นมาในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ดังนั้นโหลดของเกทเวย์สามารถคำนวณได้จากจำนวนเซ็นเซอร์โหนดที่เข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวนั้น ซึ่งงานวิจัยนี้เสนอว่าควรจะแบ่งโหลดของเกทเวย์ ทุก ๆ ตัว ให้เท่ากันทั้งระบบ แม้ว่าการใช้พลังงานโดยรวมจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีบางเซ็นเซอร์โหนดต้องส่งข้อมูลไปยังเกทเวย์ ที่อยู่ไกลกว่าระยะทางที่สั้นที่สุดที่สามารถส่งข้อมูลได้

ซึ่งการแบ่งโหลดของเกทเวย์ ให้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งระบบเป็นเรื่องที่ทำได้ไม่ยาก ในกรณีที่เซ็นเซอร์โหนดทุกตัวสร้างโหลดขึ้นมาในปริมาณเท่า ๆ กัน แต่ในกรณีที่เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวมีความแตกต่างของโหลดที่สร้างขึ้นมาสูง การแบ่งโหลดของ เกทเวย์ ให้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งระบบอาจจะไม่ใช่วิธีการที่ดี เนื่องจากถ้าเซ็นเซอร์โหนดที่มีปริมาณโหลดมากต้องส่งข้อมูลไปยังเกทเวย์ที่ไม่ใช่เกทเวย์ตัวที่อยู่ใกล้ที่สุด จะทำให้การใช้พลังงานโดยรวมของระบบสูงขึ้นมาก เนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดตัวที่อยู่ระหว่างทางต้องใช้พลังงานสูงในการรับและส่งข้อมูลที่มีโหลดขนาดใหญ่

งานวิจัยที่กล่าวมาจะเป็นในลักษณะที่มีการคำนวณที่ศูนย์กลาง (centralized algorithm) ซึ่งเซ็นเซอร์โหนดที่คำนวณจะต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลกันจนมีข้อมูลที่เพียงพอกับการตัดสินใจ Melodia *et al.* (2007) ได้นำเสนอ DEPR (Distributed Event-driven Partitioning and Routing) ซึ่งวิธีการคำนวณแบบกระจาย (distributed algorithm) สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อให้ลดเวลาแฝง (latency) ของระบบ และยังใช้พลังงานต่ำอยู่เช่นเดิมโดยจุดเด่นของ DEPR ก็คือจะมีการปรับปรุงรูปแบบตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นอยู่เสมอ โดย DEPR ในแต่ละเซ็นเซอร์โหนดถูกแบ่งออกเป็น 4 สถานะ การเปลี่ยนสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งจะถูกกำหนดโดยค่าความน่าเชื่อถือซึ่งอาศัยค่าเวลาแฝงในการคำนวณ ถ้าค่าความน่าเชื่อถือต่ำซึ่งเกิดมาจากเวลาแฝงของข้อมูลมีค่าสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เซ็นเซอร์โหนดจะเปลี่ยนสถานะของตัวเอง และเริ่มทำขั้นตอนวิธีที่จะลดเวลาแฝงของข้อมูลให้ลดต่ำลง เช่นการส่งข้อมูลไปยังเซ็นเซอร์โหนดที่ไกลที่สุดที่สามารถส่งกลับไปยังเกทเวย์ได้ เพื่อลดจำนวนฮ็อปในการส่ง แต่การกระทำเช่นนี้ก็ต้องแลกมาซึ่งการใช้พลังงานที่สูงขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากระยะทางให้การส่งเพิ่มขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหานี้ DEPR จึงถูกออกแบบให้มีอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งจะมีการเปลี่ยนมายังสถานะนี้ต่อเมื่อค่าความน่าเชื่อถือของเซ็นเซอร์โหนดมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำขั้นตอนวิธีที่จะลดการใช้พลังงานของเซ็นเซอร์โหนด เช่นการพยายามส่งข้อมูลไปยังต้นไม้ (tree) ต้นเดียวกันและรวมกลุ่มข้อมูลเข้าด้วยกัน (aggregation) เพื่อลดจำนวนของกลุ่มข้อมูลที่ต้องส่งกลับไปยังสถานีฐาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์

    1.1 หน่วยประมวลผล Intel Core 2 Quad Q6600 มีสัญญาณนาฬิกา 2.4 กิกะเฮิรตซ์

    1.2 หน่วยความจำปฐมภูมิ (RAM) ขนาด 4 GB

    1.3 หน่วยความจำทุติยภูมิ (Harddisk) ขนาด 500 GB

2. ซอฟต์แวร์

    2.1 ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu รุ่น 8.10 Intrepid Ibex

    2.2 ซอฟต์แวร์จำลองเครือข่าย Network Simulator รุ่น 2.33 (NS-2)

    2.3 ซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณ MATLAB รุ่น R2008b

งานวิจัยนี้อาศัยการจำลองเหตุการณ์บนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายผ่านทางซอฟต์แวร์ NS-2 โดยการคำนวณบางขั้นตอนจะต้องอาศัยการคำนวณจากซอฟต์แวร์ MATLAB และนำผลการคำนวณที่ได้กลับมาจำลองในซอฟต์แวร์อีกทีหนึ่ง

วิธีการ

เพื่อแก้ปัญหาการสูญเสียข้อมูล หรือได้รับข้อมูลล่าช้าในช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมากในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้ ซึ่งมีเกท-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เวย์มากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอขั้นตอนวิธีใหม่ที่มีชื่อว่า *นโยบายการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ สำหรับลดการใช้พลังงาน โดยคำนึงถึงข้อจำกัดของแบนด์วิดท์ (Gateway Association policy for Minimum Energy with Bandwidth Constraint, GAME- BC)* (Chamswarng and Jaikaeo, 2009) เพื่อปรับปรุงการเข้าร่วมใช้งานของเซ็นเซอร์โหนด ให้สามารถปรับตัวต่อเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมาก ส่งผลให้ส่งข้อมูลได้อย่างราบรื่น และยังมีอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอแบ่งออกเป็น ขั้นตอนวิธีสำหรับเครือข่ายที่มีฮ็อปเดียว มีชื่อว่า Gateway Association policy for Minimum Energy with Bandwidth Constraint on Single-hop network เรียกโดยย่อว่า “GAME-BC-S” และ ขั้นตอนวิธีสำหรับเครือข่ายแบบหลายฮ็อป มีชื่อว่า Gateway Association policy for Minimum Energy with Bandwidth Constraint on Multi-hop network เรียกโดยย่อว่า “GAME-BC-M” โดยขั้นตอนวิธีทั้งสองแบบนี้ไม่ต้องอาศัยการสื่อสารเพิ่มเติมจากการสื่อสารทั่วไปของมาตรฐาน IEEE802.15.4 เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน

โดยก่อนจะเริ่มทำการทดลองทั้งสองขั้นตอนนี้ จะต้องมีการทดลองเพื่อหาจุดอิ่มตัวของข้อมูล โดยวิธีการทดลองการส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว และนำข้อสรุปที่ได้นำไปใช้ในการทดลองต่อไป

1. การทดลองการส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว

1.1 สมมุติฐานการทดลอง

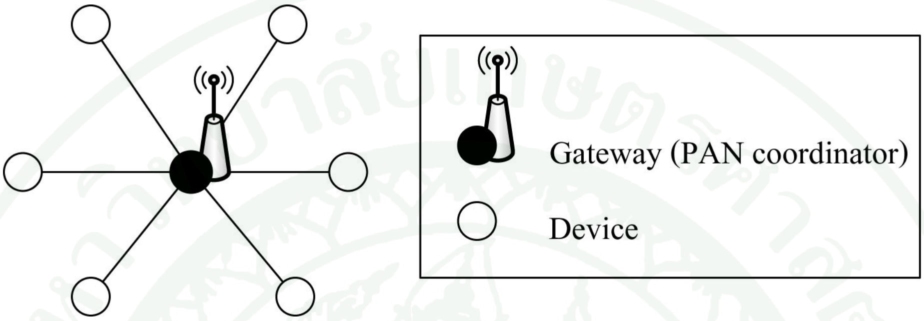
เมื่อมีการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลไปยังเกทเวย์ จะพบจุดอิ่มตัวของการส่งข้อมูล

1.2 รูปแบบการทดลอง

การทดลองนี้จะอาศัยคำสั่งที่เขียนโดย Rao (2006) เพื่อเพิ่มความสะดวกในการสร้างเครือข่ายจำลอง เพื่อทดสอบว่าจะมีการสูญเสียข้อมูล และหาจุดอิ่มตัว (Saturation point) เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว รูปแบบของทอพอโลยี จะมีลักษณะเป็นรูปดาว ดังภาพที่ 17 โดยมีแพนโคออร์ดิเนเตอร์เพียงตัวเดียว อุปกรณ์ตัวที่เหลือจะเป็นดีไวซ์ทั้งหมด ซึ่งดีไวซ์แต่ละตัวจะส่งข้อมูลในรูปแบบบิตเรตคงที่ (Constant bitrate, CBR) ไปยังแพนโคออร์ดิเนเตอร์ โดยแพนโคออร์ดิเนเตอร์จะไม่ตอบรับข้อมูล (Acknowledgement)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดลองจะมีตัวแปรควบคุมดังตารางที่ 2 และมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรดังตารางที่ 3 เพื่อศึกษาผลจากการเพิ่มปริมาณข้อมูลที่ส่งไปยังเกทเวย์ ไม่ว่าจะเป็นทั้งการเพิ่มจำนวนเซ็นเซอร์โหนดที่ส่งข้อมูล อัตราการส่งข้อมูล และขนาดของกลุ่มข้อมูล



***ภาพที่* 17** รูปแบบการทดลองส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว

ตารางที่ 2 ตัวแปรควบคุมในการทดลองส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว

ชื่อตัวแปรควบคุม	ค่าตัวแปร
ความถี่สัญญาณวิทยุ	2.4 GHz
จำนวนแพนโคออร์ดิเนเตอร์	1 ตัว
ชนิดการส่งข้อมูล	CBR
ทิศทางการส่งข้อมูล	จากดีไวซ์ไปยังแพนโคออร์ดิเนเตอร์
ระยะห่างระหว่างแพนโคออร์ดิเนเตอร์กับดีไวซ์	9 เมตร
เวลาในการทดลอง	1000 วินาที
ขนาดของพื้นที่ทดลอง	250 ตารางเมตร
เวลาเริ่มการทำงานของแพนโคออร์ดิเนเตอร์	วินาทีที่ 0
เวลาเริ่มการทำงานของดีไวซ์	วินาทีที่ 3
เวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูล	วินาทีที่ 60
ระยะห่างการเริ่มทำงานของดีไวซ์	1 วินาที
ระยะห่างการเริ่มต้นส่งข้อมูลของแต่ละโหนด	5 วินาที
กระบวนการหาเส้นทาง	ไม่มี
การตอบรับข้อมูล	ไม่มี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ตัวแปรต้นในการส่งข้อมูลปริมาณมากไปยังเกทเวย์เพียงตัวเดียว

ชื่อตัวแปรต้น	หน่วย	ค่าตัวแปร		
		ต่ำที่สุด	สูงที่สุด	ระยะห่าง
จำนวนดีไวซ์	ตัว	1	9	1
ขนาดของกลุ่มข้อมูล	ไบต์	52	127	15
อัตราการส่งข้อมูล	กิโลบิตต่อวินาที	5	280	5

การวัดผลจะวัดอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล (delay) และร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูลผล (packet delivery ratio) ที่ได้จะนำมาใช้พิจารณาเพื่อหาจุดอิ่มตัวโดยประมาณของเครือข่าย

2.3 ผลและการวิเคราะห์ผล

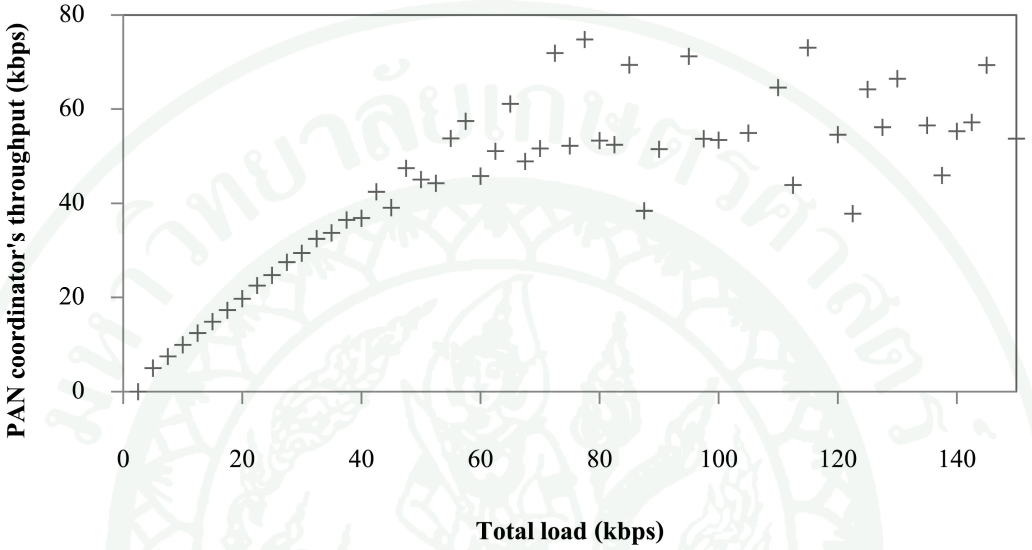
2.3.1 อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์

ภาพที่ 18 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ (Total load) และ อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ได้สำเร็จ (PAN coordinator’s throughput) โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และจำนวนดีไวซ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน และวาดลงบนกราฟแบบกระจัดกระจาย (Scatter graph) สามารถสังเกตได้ว่า ในช่วงผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์เพิ่มขึ้นระหว่าง 0-40 กิโลบิตต่อวินาที อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ได้สำเร็จจะแปรผันตาม และมีค่าใกล้เคียงกัน และตั้งแต่ผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 40 กิโลบิตต่อวินาที เป็นต้นไป อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ได้สำเร็จจะมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งอาจจะถือว่าเป็นจุดอิ่มตัวของเครือข่าย

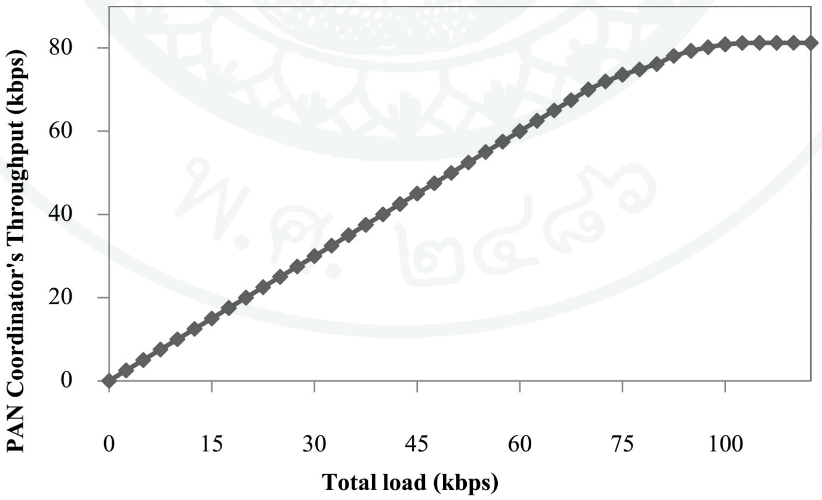
การที่ผลลัพธ์ของอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์หลังจากจุดที่มีอัตราการส่งข้อมูลมากกว่า 40 กิโลบิตต่อวินาที มีค่าแกว่งไปมา เนื่องจากจุดจุดหนึ่งบนแกน x เกิดจากค่าเฉลี่ยของเหตุการณ์ที่มีโหลดเท่ากับอัตราการส่งข้อมูลบนแกน y ซึ่งบางจุดอาจจะเกิดจากเหตุการณ์ที่มีจำนวนดีไวซ์ตัวเดียวบ้าง หรือมีดีไวซ์เฉลี่ยกันหลายตัวบ้าง ซึ่งจุดที่เกิดจากการเฉลี่ยกับดีไวซ์ที่มีจำนวนมากจะมีค่าต่ำ เนื่องจากการรบกวนของสัญญาณจากการส่งข้อมูลของดีไวซ์รอบข้าง ดังการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เปรียบเทียบเหตุการณ์ที่มีจำนวนดีไวซ์เพียงตัวเดียวในภาพที่ 19 และเหตุการณ์ที่มีจำนวนดีไวซ์ 3 ตัว ในภาพที่ 20 จะพบว่าเหตุการณ์ที่มีจำนวนดีไวซ์มากกว่าจะมีจุดอิ่มตัวที่อัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่า และอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ได้สำเร็จ จะมีค่าน้อยกว่าด้วย

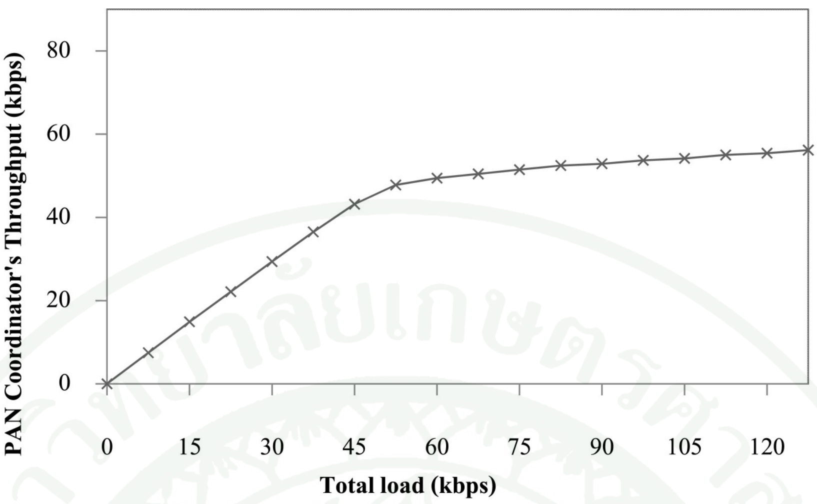


ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ และอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และจำนวนดีไวซ์ทั้งหมด



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ และอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และมีจำนวนดีไวซ์= 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ และอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และมีจำนวนดีไวซ์= 3

1.3.2 เวลาหน่วงของข้อมูล

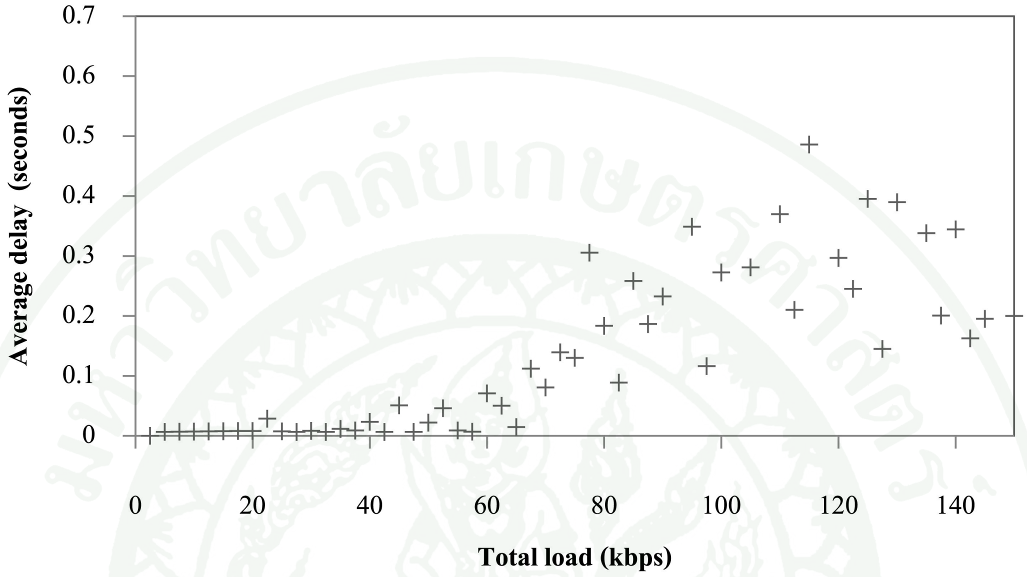
ภาพที่ 21 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และจำนวนดีไวซ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน และวาดลงบนกราฟแบบกระจัดกระจาย (Scattered graph) โดยสามารถสังเกตได้ว่า ในช่วงผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ เพิ่มขึ้นระหว่าง 0-60 กิโลบิตต่อวินาที ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลจะมีค่าใกล้เคียง 0 และตั้งแต่ผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 60 กิโลบิตต่อวินาทีเป็นต้นไป ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

1.3.3 ร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล

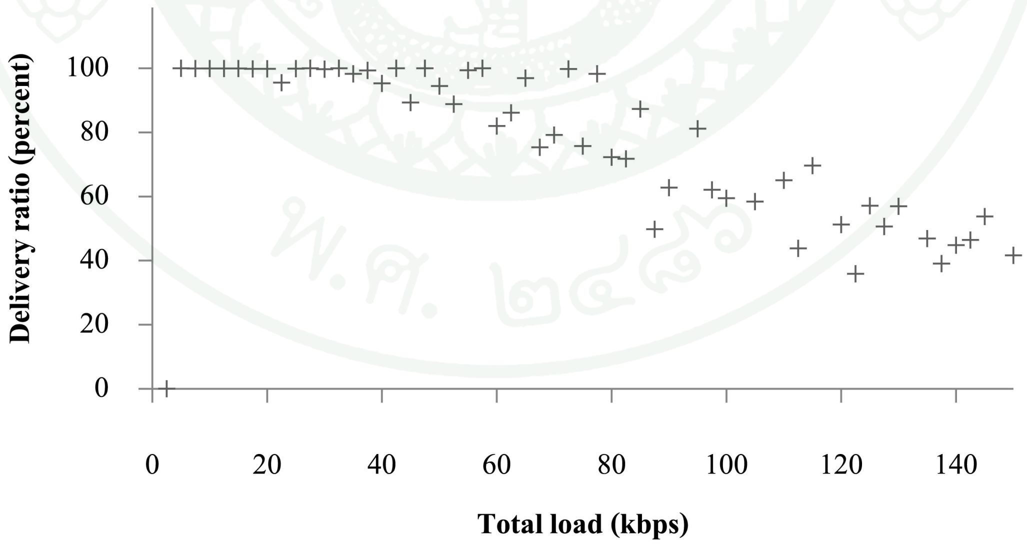
ภาพที่ 22 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ และร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาด และจำนวนดีไวซ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน และวาดลงบนกราฟแบบกระจัดกระจาย (Scattered graph) โดยสามารถสังเกตได้ว่า ในช่วงผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ เพิ่มขึ้นระหว่าง 0-40 กิโลบิตต่อวินาที ร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูลจะยังมีค่าใกล้เคียง 100 แต่เมื่อผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดีไวซ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 40 กิโลบิตต่อวินาทีเป็นต้นไป ร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูลจะลดลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาดและจำนวนดีไวซ์ทั้งหมด



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ และร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล โดยเฉลี่ยขนาดของกลุ่มข้อมูลทุกขนาดและจำนวนดีไวซ์ทั้งหมด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.3.4 การวิเคราะห์ผล

จากผลการทดลองในหัวข้อ 1.3.1 – 1.3.3 พบว่าจะสามารถประมาณจุดอิ่มตัวของเครือข่ายได้ โดยการเพิ่มผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ที่เพิ่มขึ้น และสังเกตผลกระทบของตัวแปรตามในรูปแบบของ อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล และร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล โดยจุดอิ่มตัวนั้นจะเป็นจุดที่กราฟเปลี่ยนแปลงความชันไปจากเดิมอย่างรวดเร็ว เช่นในกราฟของค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล จะพบว่า ณ บริเวณจุดอิ่มซึ่งมีผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์ประมาณ 60 กิโลบิตต่อวินาที ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลจะเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างรวดเร็ว

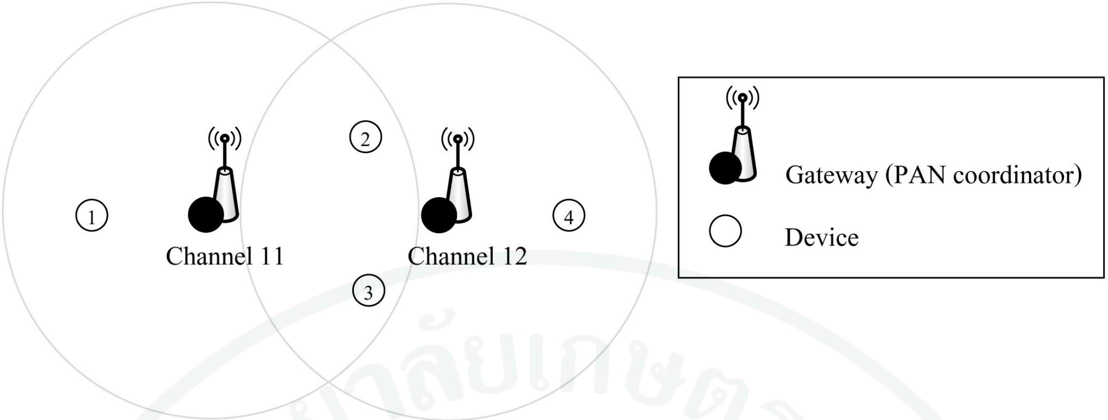
จุดอิ่มตัวของทั้งสามการทดลองจะอยู่ที่บริเวณที่ผลรวมอัตราการส่งข้อมูลจากดีไวซ์อยู่ที่ประมาณ 40-60 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองหาจุดอิ่มตัวของ Park *et al.* (2005) โดยผลที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

2. การจำลองเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบฮ็อปเดียว เพื่อทดสอบขั้นตอนวิธี GAME-BC-S

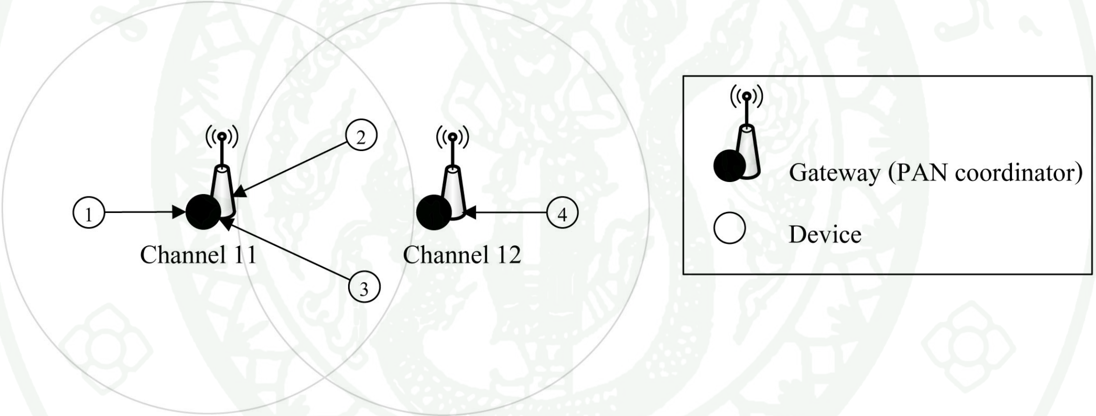
2.1 แนวคิดในการออกแบบขั้นตอนวิธี

จากปัญหาที่กล่าวในหัวข้อ 2.2 ของการตรวจเอกสาร เมื่อเครือข่ายเป็นเครือข่ายที่มีเกทเวย์มากกว่า 1 ตัว เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวที่อยู่ในรัศมีการใช้งานของเกทเวย์ทั้งสองตัว เช่น เซ็นเซอร์โหนดเบอร์ 2 และ 3 ในภาพที่ 23 จะต้องมีการตัดสินใจในการขอเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ ซึ่งวิธีการตัดสินใจก็จะแตกต่างกันออกไป เช่นการเข้าร่วมใช้งานตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 เซ็นเซอร์โหนดแต่ละโหนดก่อนเข้าร่วมใช้งานก็จะค้นหาเครือข่ายส่วนบุคคล ดังในหัวข้อที่ 1.14 ของการตรวจเอกสาร ซึ่งจะค้นหาไล่จากช่องสัญญาณต่ำที่สุด และเมื่อพบเฟรมบีคอนก็จะบันทึกลงไว้ใน PAN descriptors ตามลำดับ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการค้นหาช่องสัญญาณ เซ็นเซอร์โหนดจะเลือกเกทเวย์ตัวแรกซึ่งอยู่ใน PAN descriptors ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นเกทเวย์ที่มีช่องสัญญาณต่ำที่สุดเสมอ ดังนั้นการเข้าร่วมใช้งานแบบ IEEE802.15.4 เซ็นเซอร์โหนดที่ 2 และ 3 จะขอเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ channel 11 เสมอ ดังรูปที่ 24 ส่วนการเข้าร่วมใช้งานแบบที่แต่ละโหนดเลือกเกทเวย์ที่มีระยะทางที่ใกล้ที่สุด ผลจะออกมาดังรูปที่ 25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



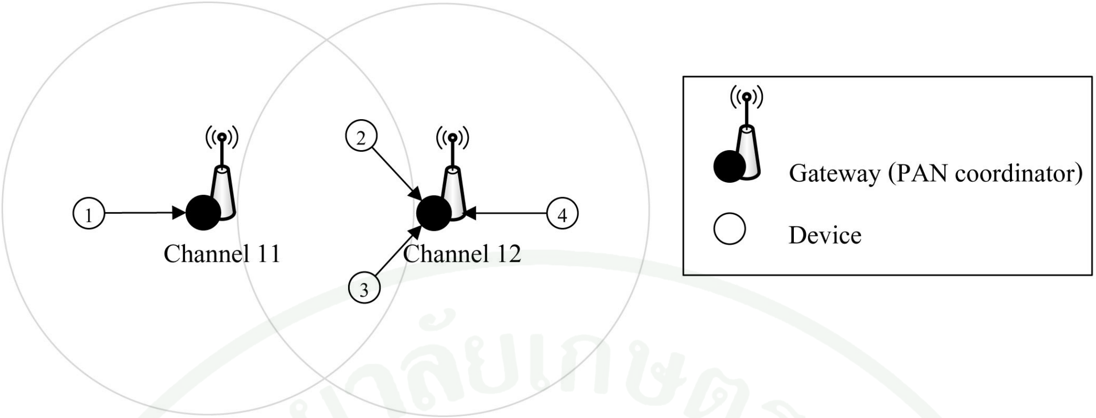
ภาพที่ 23 เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายแนวคิดในการออกแบบขั้นตอนวิธีในการทดสอบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี GAME-BC-S



ภาพที่ 24 เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายการเข้าร่วมใช้งานตามมาตรฐาน IEEE802.15.4

การเข้าร่วมใช้งานแบบที่แต่ละโหนดเลือกเกทเวย์ที่มีระยะทางใกล้ที่สุด (MINDIST) เป็นวิธีที่สามารถประหยัดพลังงานของแต่ละโหนดได้ดีที่สุด แต่ถ้าเกิดปัญหาที่มีเซ็นเซอร์โหนดส่งข้อมูลเป็นปริมาณมากไปยังเกทเวย์ตัวเดียวกันดังในหัวข้อที่ 2.1 ของการตรวจเอกสาร หากอัตราการส่งข้อมูลมากกว่าจุดอิ่มตัวของเครือข่าย จะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลในปริมาณที่เพิ่มขึ้นดังในการทดลองที่ 1.3.3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 25 เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายการเข้าร่วมใช้งานแบบที่แต่ละโหนดเลือกเกทเวย์ที่มีระยะทางที่ใกล้ที่สุด

จากปัญหาที่กล่าวมาทำให้เกิดแนวคิดว่า ถ้าในกรณีที่เกทเวย์มีการรับข้อมูลที่เกินจุดอิ่มตัวของเครือข่าย ควรจะมีการปรังปรุงให้เซ็นเซอร์โหนดบางโหนดในเกทเวย์ที่มีปัญหา และมีโอกาสเลือกเกทเวย์มากกว่าสองตัวขึ้นไป เปลี่ยนการเข้าร่วมใช้งานไปยังอีกเกทเวย์หนึ่งซึ่งมีอัตราการรับข้อมูลที่น้อยกว่า ถึงแม้ว่าจะมีระยะการส่งข้อมูลที่ไกลขึ้นกว่าเดิมก็ตาม เพื่อลดปัญหาให้กับเกทเวย์ที่เดิมเคยขอเข้าร่วมใช้งานอยู่

การตัดสินใจว่าเซ็นเซอร์โหนดตัวใดควรย้ายเกทเวย์ และเกทเวย์ที่ย้ายไปควรเป็นเกทเวย์ใด สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการคำนวณแบบ Integer Program (IP)

2.2 รูปแบบการทดลอง

2.2.1 รูปแบบของเครือข่าย

เครือข่ายที่ทดลองเป็นเครือข่ายแบบสองลำดับชั้นดังภาพที่ 3 โดยชั้นที่ 0 กับชั้นที่ 1 ติดต่อกันด้วยมาตรฐาน IEEE802.15.4 ภายในฮ็อปเดียว และเกทเวย์ที่อยู่ในชั้นที่ 1 จะส่งต่อข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนดกลับไปยังสถานีฐาน ผ่านเครือข่ายแลน ซึ่งถือว่าการติดต่อสื่อสารในชั้นนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าชั้น IEEE802.15.4 มาก และเกทเวย์มีข้อจำกัดในเรื่องของพลังงานที่ต่ำมากจนสามารถละทิ้งได้ เกทเวย์ตัวที่อยู่ใกล้เคียงกันจะถูกเลือกช่องสัญญาณให้ไม่ตรงกัน เพื่อให้มั่นใจว่าเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวจะไม่ถูกรบกวนจากการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนดที่ต่ออยู่กับเกทเวย์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในช่องสัญญาณอื่น เซ็นเซอร์โหนดประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดเดียวดังภาพที่ 5 แต่เมื่อเซ็นเซอร์โหนดตรวจจับเหตุการณ์ได้ อาจจะมีการส่งข้อมูลปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเหตุการณ์ ตัวอย่างเช่นเหตุการณ์ที่มีการตรวจจับเสียง จะมีปริมาณข้อมูลมากกว่าเหตุการณ์ที่มีการตรวจจับอุณหภูมิ เครือข่ายที่สร้างขึ้นนี้สมมุติว่าเซ็นเซอร์โหนดทุกตัวจะต้องอยู่ในรัศมีของเกทเวย์อย่างน้อยหนึ่งตัว ทั้งเกทเวย์และเซ็นเซอร์โหนดไม่มีการเคลื่อนที่และทราบตำแหน่งของกันและกัน การสื่อสารเป็นแบบสมมาตร คือถ้าเซ็นเซอร์โหนดสามารถติดต่อกับเกทเวย์ได้ เกทเวย์ก็จะสามารถติดต่อกลับมายังเซ็นเซอร์โหนดได้เสมอ

2.2.2 มาตรฐาน IEEE802.15.4

การทดลองนี้เป็นการจำลองเครือข่ายมาตรฐาน IEEE802.15.4 ที่แถบความถี่ 2.4 GHz ช่องสัญญาณที่ 11-26 แต่ละเกทเวย์จะทำหน้าที่เป็นแพนโคออร์ดิเนเตอร์และสร้างเครือข่ายส่วนบุคคลขึ้นมาในแต่ละเกทเวย์ โดยเกทเวย์จะเลือกช่องสัญญาณที่ไม่เหมือนกับเกทเวย์ที่อยู่รอบข้าง และกระจายเฟรมบีคอนหลังจากเริ่มต้นสร้างเครือข่ายส่วนบุคคลเสร็จสิ้น เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ชนิด RFD และไม่มีการกระจายเฟรมบีคอน เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวสามารถเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่อนุญาตให้เข้าร่วมใช้งานได้เพียงครั้งละตัวเดียว

2.2.3 แบบจำลองการใช้พลังงาน

แบบจำลองการใช้พลังงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเทียบเคียงกับแบบจำลองพลังงานของ Gupta and Younis (2003) แต่จะสมมุติว่าพลังงานที่ใช้ในการรอสัญญาณวิทยุ (idle listening) พลังงานที่ใช้ในการคำนวณ และพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล สามารถละทิ้งได้ เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐาน มากกว่าการส่งข้อมูลกลับมายังตัวเซ็นเซอร์โหนด และโดยข้อสมมุติที่ว่าเกทเวย์จะไม่มีข้อจำกัดในด้านพลังงาน การคำนวณพลังงานของระบบจะเป็นพลังงานของเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวเท่านั้น โดยสมการที่ (3) แสดงแบบจำลอง E_{tx} คือพลังงานที่ต่ำที่สุดของการส่งข้อมูลจำนวน 1 บิต ในระยะทาง d เมตรซึ่งตารางที่ 4 จะสรุปความหมายของตัวแปรและค่าคงที่ในสมการ

$$E_{tx}(d) = (\alpha_t + \alpha_{amp} d^2) \quad (3)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 ความหมายของตัวแปรและค่าคงที่ของแบบจำลองการใช้พลังงาน

คำ	ความหมาย
E_{tx}	พลังงานต่ำที่สุดที่ใช้ในการส่งข้อมูล 1 บิต มีหน่วยเป็นจูล (J)
α_t	พลังงานที่สูญเสียไปในวงจรอิเลคทรอนิกส์ของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ โดยปกติแล้วจะมีค่า 50 นาโนจูล/บิต
α_{amp}	พลังงานที่สูญเสียไปในภาคส่งของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ โดยปกติแล้วจะมีค่า 100 พิโคจูล/บิต/ตารางเมตร
d	ระยะทางที่ส่งข้อมูล มีหน่วยเป็นเมตร (m)

2.3 วิธีการ

2.3.1 การแปลงปัญหา

ในขั้นตอนนี้จะแสดงวิธีการแปลงปัญหาในการตัดสินใจว่าเซ็นเซอร์โหนดตัวใดควรย้ายเกทเวย์ และเกทเวย์ที่ย้ายไปควรเป็นเกทเวย์ใด ไปเป็นคำนวณแบบ Integer Program โดยมีจุดประสงค์เพื่อค้นหาการเข้าร่วมใช้งานที่มีการใช้พลังงานโดยรวมน้อยที่สุด และแต่ละเกทเวย์มีการรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนดไม่เกินค่าจำกัดค่าหนึ่ง

กำหนดให้มีเซต v แทนเซตของเกทเวย์ที่มีขนาด m เซต s แทนเซตของเซ็นเซอร์โหนดมีขนาด n แต่ละเซ็นเซอร์โหนด s_j มีอัตราการส่งข้อมูล r_j (เฉพาะการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานเท่านั้น) และมีระยะห่างจากเกทเวย์ v_i เท่ากับ $d_{i,j}$ การที่เซ็นเซอร์โหนด s_j และเกทเวย์ v_i จะสามารถสื่อสารกันได้ต้องมีระยะห่างไม่เกินระยะทาง $d_{\max}$ เกทเวย์ทุกตัวจะมีค่าจำกัดของอัตราการรับข้อมูลคือ $r_{\max}$ เพื่อรองรับข้อมูลที่ส่งมาจากเซ็นเซอร์โหนดทุกตัวจากเครือข่ายส่วนบุคคลที่สร้างขึ้นมา

กำหนดให้ $z_{i,j}$ เป็นเมทริกซ์ขนาด $m \times n$ ซึ่งเก็บผลลัพธ์จากการคำนวณการเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ โดยถ้า $z_{i,j} = 1$ ในกรณีที่เซ็นเซอร์โหนด s_j ต้องเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ v_i และ $z_{i,j} = 0$ ในกรณีตรงกันข้าม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$E_{i,j} = \left(\alpha_t + \alpha_{amp} d_{i,j}^2\right) \tag{4}$$

จากแบบจำลองการใช้พลังงานตาม (3) เราสามารถหาพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งบิต จากเซ็นเซอร์โหนด s_j ไปยังเกทเวย์ v_i ได้ดัง (4) โดยพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะแปรผันตรงกับกำลังสองของระยะทางในการส่งข้อมูล จึงสามารถทดแทนได้ว่าการหาค่าที่ต่ำสุดของ $d_{i,j}$ ก็จะให้ผลเช่นเดียวกับการหาพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ต่ำที่สุด ทำให้สามารถแปลงปัญหาการเข้าร่วมใช้งานของเซ็นเซอร์โหนดที่มีการใช้พลังงานโดยรวมน้อยที่สุด และแต่ละเกทเวย์มีการรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนดไม่เกินค่าจำกัด $r_{\max}$ ได้ดัง integer program โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายเป็น

$$\min_z \sum_{s_j \in S, v_i \in V} d_{i,j} \times z_{i,j} \tag{5}$$

โดยมีข้อจำกัด

$$\sum_{i=1}^{m} z_{i,j} = 1, \forall s_j \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{n} z_{i,j} \times r_j \le r_{\max}, \forall v_i \tag{7}$$

$$z_{i,j} \in \{0,1\} \tag{8}$$

$$z_{i,j} = 0, \forall v_i, \forall s_j : d_{i,j} > d_{\max} \tag{9}$$

(5) เป็นสมการเป้าหมาย ของ integer program มีความหมายว่าเมื่อรวมระยะทางจากเซ็นเซอร์โหนดทุกตัวไปยังเกทเวย์ของแต่ละตัวที่เข้าร่วมใช้งานแล้ว ค่าที่หาได้ต้องมีค่าต่ำที่สุด ส่วน (6) ถึง (9) เป็นฟังก์ชันข้อจำกัดของ integer program โดย (6) มีความหมายว่าเซ็นเซอร์โหนดทุกตัวจะต้องเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์เพียงตัวเดียวเสมอ (7) มีความหมายว่าแต่ละเกทเวย์จะต้องมีอัตราการรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนดรวมแล้วไม่เกินค่าจำกัด $r_{\max}$ (8) มีความหมายว่าเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวจะมีทางเลือกในการตัดสินใจในการเลือกเกทเวย์ หรือไม่เลือกเกทเวย์เท่านั้น และ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(9) มีความหมายว่าถ้าระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์โหนดกับเกทเวย์ตัวใดก็ตาม มีระยะทางมากกว่า $d_{\max}$ เซ็นเซอร์โหนดจะไม่มีสิทธิขอเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวนั้น

2.3.2 การแก้ไขปัญหา

หลังจากแปลงปัญหาเป็น integer program เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะต้องเปลี่ยนรูปปัญหาให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการแก้ปัญหา จึงต้องมีการเปลี่ยน integer program เป็นปัญหาอีกชนิดคือ Binary integer program (BIP) ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยขั้นตอนวิธีแบบ branch and bound (Land and Doig, 1960) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยในขั้นตอนนี้จะแปลง (5) ถึง (9) ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์รูปแบบใหม่ เพื่อความสะดวกในการหาคำตอบด้วยซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณ MATLAB ดังนี้

$$\min_{x} \boldsymbol{f}^{t}\boldsymbol{x} \text{ such that } \begin{cases} \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{b}, \\ \boldsymbol{A}_{eq}\cdot\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}_{eq,} \\ \boldsymbol{x} \text{ is binary.} \end{cases} \tag{10}$$

$\boldsymbol{x}$ เป็นเวคเตอร์ที่มีขนาด $mn\times 1$ ซึ่งเก็บการตัดสินใจในการเลือกเกทเวย์เพื่อเข้าร่วมใช้งาน ซึ่งเป็นคำตอบของ (10)

$\boldsymbol{f}$ เป็นเวคเตอร์ที่มีขนาด $mn\times 1$ ซึ่งเก็บค่าสัมประสิทธิ์ของ $\boldsymbol{x}$ โดยแทนระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวไปยังเกทเวย์แต่ละจุด

$\boldsymbol{A}$ เป็นเมทริกซ์ขนาด $m\times mn$ ซึ่งเก็บค่าสัมประสิทธิ์ของอสมการ $\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{x}\le\boldsymbol{b}$ ทำหน้าที่แทนอัตราการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด

$\boldsymbol{b}$ เป็นเวคเตอร์ขนาด $m\times 1$ ซึ่งทำหน้าที่แทนค่าจำกัดของอัตราการรับข้อมูลในแต่ละเกทเวย์

$\boldsymbol{A}_{eq}$ เป็นเมทริกซ์ขนาด $(n+1)\times mn$ ซึ่งเก็บค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ $\boldsymbol{A}_{eq}\cdot\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}_{eq}$ โดย $\boldsymbol{A}_{eq}$ ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกมีขนาด $n\times mn$ ใช้เพื่อตรวจสอบว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวต้องเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์เพียงตัวเดียว และส่วนที่สองมีขนาด $1 \times mn$ ใช้เพื่อตรวจสอบว่าเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวต้องเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่อยู่ในระยะการส่งข้อมูล (มีระยะทางน้อยกว่า $d_{\max}$)

$\boldsymbol{b}_{eq}$ เป็นเวคเตอร์ขนาด $(n+1)\times 1$ ซึ่งเก็บเงื่อนไขบังคับของสมการ $\boldsymbol{A}_{eq} \cdot \boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}_{eq}$ โดย $\boldsymbol{b}_{eq}$ ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเช่นเดียวกับ $\boldsymbol{A}_{eq}$ คือส่วนแรกมีขนาด $n \times 1$ ทำหน้าที่เก็บจำนวนเกทเวย์ที่เซ็นเซอร์โหนดเข้าร่วมใช้งานได้ภายในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งก็คือค่า 1 ส่วนที่สองมีขนาด 1×1 ทำหน้าที่เก็บจำนวนของเซ็นเซอร์โหนดทั้งหมด เพื่อตรวจสอบว่าเซ็นเซอร์โหนดทั้งหมดต้องเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่อยู่ภายในระยะการส่งข้อมูล

เวคเตอร์และเมทริกซ์ทั้งหมดสามารถแปลงจาก integer program ในข้อที่แล้วได้ดังนี้

$$\boldsymbol{f}_{m(j-1)+i,1} = d_{i,j} \quad \text{where } i = 1,2,...,m,\ \ j = 1,2,...n. \tag{11}$$

$$\boldsymbol{A}_{k,l} = \begin{cases} r_j & \text{if } l-k = m(j-1), \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \text{where } k = 1,2,...m,\ \ l = 1,2,...mn. \tag{12}$$

$$\boldsymbol{b}_{k,1} = r_{\max}, \quad \text{where } k = 1,2,...,m. \tag{13}$$

$$\boldsymbol{A}_{eq_{k,l}} = \begin{cases} 1 & \text{if } m(k-1)+1 \le l \le mk, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \text{where } k = 1,2,...,n\ \ ,l = 1,2,...,mn. \tag{14}$$

$$\boldsymbol{A}_{eq_{n+1,m(j-1)+i}} = \begin{cases} 1 & \text{if } d_{i,j} \le d_{\max}, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \text{where } i = 1,2,...,m,\ \ j = 1,2,...,mn. \tag{15}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\boldsymbol{b}_{eq_{l,1}} = \begin{cases} 1 & \text{if } l \le n, \\ n & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (16)$$
$$\text{where } l = 1, 2, ..., n+1.$$

คำตอบที่เหมาะสม (feasible solution) ของ binary integer program จะอยู่ในรูปเวคเตอร์ $\boldsymbol{x}$ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

$$\boldsymbol{x}_{m(j-1)+i,1} = \begin{cases} 1 & \text{if sensor node } j \text{ have to associate with gateway } i, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$
$$\text{where } i = 1, 2, ..., m, \;\; j = 1, 2, ...n.$$

แต่เวคเตอร์ $\boldsymbol{x}$ ยังยากต่อการวิเคราะห์จึงแปลงเวคเตอร์ $\boldsymbol{x}$ ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ $\boldsymbol{z}$ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

$$\boldsymbol{z}_{i,j} = \boldsymbol{x}_{m(j-1)+i,1} \quad (18)$$
$$\text{where } i = 1, 2, ..., m, \;\; j = 1, 2, ..., n.$$

2.3.3 ขั้นตอนวิธี GAME-BC-S

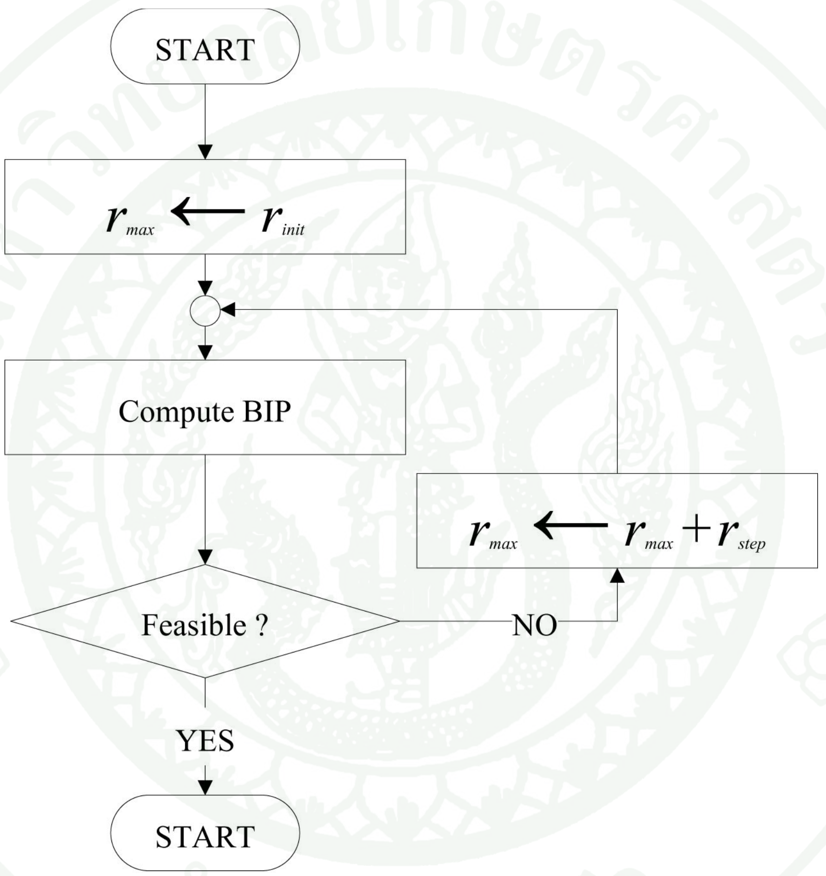
เมตริกซ์ $\boldsymbol{z}$ จะถูกคำนวณที่ศูนย์กลางทุก ๆ ช่วงเวลา ข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการคำนวณ เช่นอัตราการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด และตำแหน่งของแต่ละโหนด จะถูกส่งแบบ piggy back มากับข้อมูลกลับมายังเกทเวย์ ดังนั้นการส่งข้อมูลที่จำเป็นต่อการคำนวณจึงไม่ต้องอาศัยการสื่อสารเพิ่มเติมจากมาตรฐาน IEEE802.15.4

ปัญหาที่เกิดขึ้นคือเมื่อใดก็ตามที่ค่าของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์มีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าค่าจำกัด $r_{\max}$ จะไม่สามารถคำนวณหาเมตริกซ์ $\boldsymbol{z}$ ออกมาได้ เนื่องจาก binary integer program ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้ ดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนวิธีการในการประมาณค่าเริ่มต้น $r_{\max}$ และปรับค่า $r_{\max}$ ให้เหมาะสมอยู่เสมอ

การประมาณค่า $r_{\max}$ ในตอนเริ่มต้นนี้มีผลต่อประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S โดยตรง ซึ่งถ้ามีการกำหนดค่า $r_{\max}$ สูงเกินไป เซ็นเซอร์โหนดก็จะเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวที่ใกล้ที่สุด คล้ายคลึงกับวิธีการแบบ MINDIST ซึ่งอาจจะเป็นจุดที่เกทเวย์แต่ละตัวมีการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รับข้อมูลที่เกินจุดอิ่มตัวมาแล้ว ทำให้เกิดการสูญหายของข้อมูล หรือมีความล่าช้าของข้อมูล ในอีกกรณีหนึ่งถ้าประมาณค่า $r_{\max}$ ในตอนเริ่มต้นต่ำเกินไป อาจจะทำให้ binary integer program ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้ หรือถ้าสามารถหาค่าที่เหมาะสมได้ เซ็นเซอร์โหนดบางตัวก็จะถูกบังคับให้เข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่อยู่ไกลออกไป เพื่อรักษาอัตรารับข้อมูลของเกทเวย์ตัวที่อยู่ใกล้กับเซ็นเซอร์โหนดไม่ให้เกินค่า $r_{\max}$ ซึ่งก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยรวมของระบบ



ภาพที่ 26 ขั้นตอนวิธีของ GAME-BC-S

ขั้นตอนวิธี GAME-BC-S ดังภาพที่ 26 ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ ได้อาศัยผลการทดลองจากหัวข้อที่ 2 ว่าจุดอิ่มตัวของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์โดยประมาณของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะอยู่ที่ 40-60 กิโลบิตต่อวินาที นำมาเป็นค่าเริ่มต้นหรือ r_{init} ของขั้นตอนวิธี นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มค่า $r_{\max}$ เมื่อ binary integer program ไม่สามารถคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมได้ ซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นจะถูกเรียกว่า r_{step}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การจำลองเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายฮ็อป เพื่อทดสอบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M

3.1 แนวคิดในการออกแบบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M

เดิมขั้นตอนวิธี GAME-BC-S สำหรับเครือข่ายที่มีการส่งข้อมูลภายในฮ็อปเดียวนั้น จะต้องมีการเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนดทุก ๆ ตัวในเครือข่าย ซึ่งถ้าเครือข่ายมีขนาดใหญ่ และมีการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นหลายฮ็อป จะทำให้การเก็บข้อมูลต้องใช้เวลานาน และใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดนานขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการอีกวิธีการหนึ่งที่ลดข้อจำกัดในการใช้งานกับเครือข่ายแบบหลายฮ็อปของวิธีการ GAME-BC-S โดยมีชื่อเรียกว่า GAME-BC-M

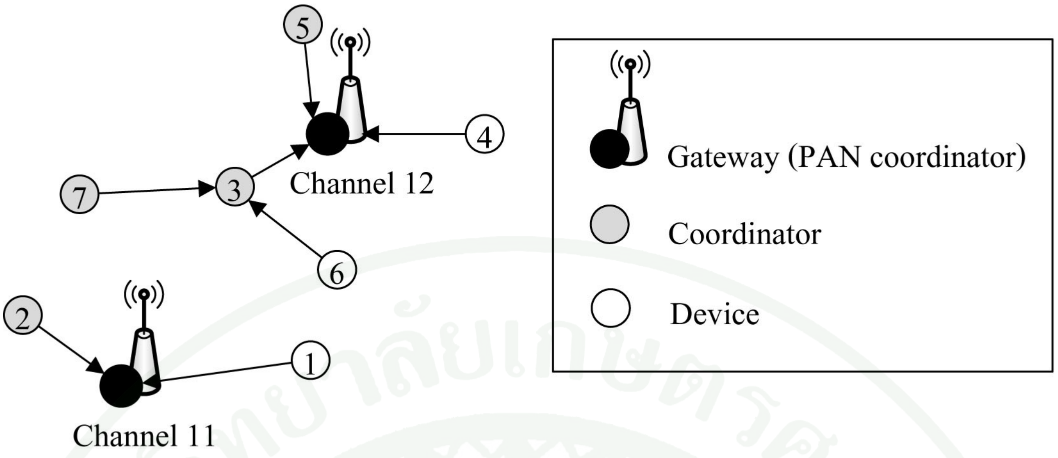
GAME-BC-M มีความแตกต่างกับ GAME-BC-S ตรงที่จะย้ายอำนาจในการตัดสินใจและการคำนวณที่ศูนย์กลาง ไปยังแต่ละโหนด ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณการส่งข้อมูลกลับไปยังศูนย์กลาง และช่วยลดเวลาในการคำนวณที่ศูนย์กลางได้ เพียงแต่ว่าคำตอบที่ได้จากการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธี GAME-BC-M อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเหมือนกับการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธี GAME-BC-S

ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M สามารถอธิบายแบบสังเขป โดยใช้ภาพที่ 27 ประกอบการอธิบายได้ดังนี้

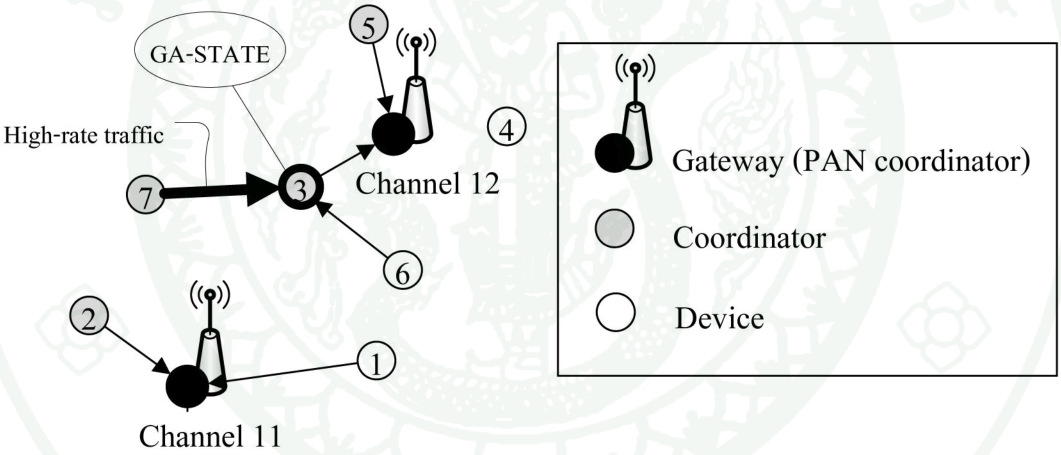
เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายฮ็อป จะมีความแตกต่างกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีการส่งข้อมูลเพียงฮ็อปเดียวคือ เซ็นเซอร์โหนดที่ส่งต่อข้อมูลจะต้องเป็นอุปกรณ์ชนิดโคออร์ดิเนเตอร์เท่านั้น ส่วนเซ็นเซอร์โหนดที่มีการส่งข้อมูลเพียงอย่างเดียวจะเป็นอุปกรณ์ชนิดโคออร์ดิเนเตอร์หรือดีไวซ์ก็ได้

ในกรณีที่มีเซ็นเซอร์โหนดที่ส่งข้อมูลด้วยอัตราที่สูงขึ้น จนทำให้เกทเวย์หรือโคออร์ดิเนเตอร์ระหว่างทาง มีอัตราการรับข้อมูลถึงจุดที่กำหนด ดังเช่นเซ็นเซอร์โหนด 7 ในภาพที่ 28 เพื่อป้องกันการเกิดการสูญหายของข้อมูล เกทเวย์หรือโคออร์ดิเนเตอร์จะเปลี่ยนสถานะของตัวเองให้อยู่ในสถานะที่สร้างขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่า Gateway alert state (GA-STATE)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 เครือข่ายตัวอย่างสำหรับอธิบายแนวคิดในการออกแบบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M

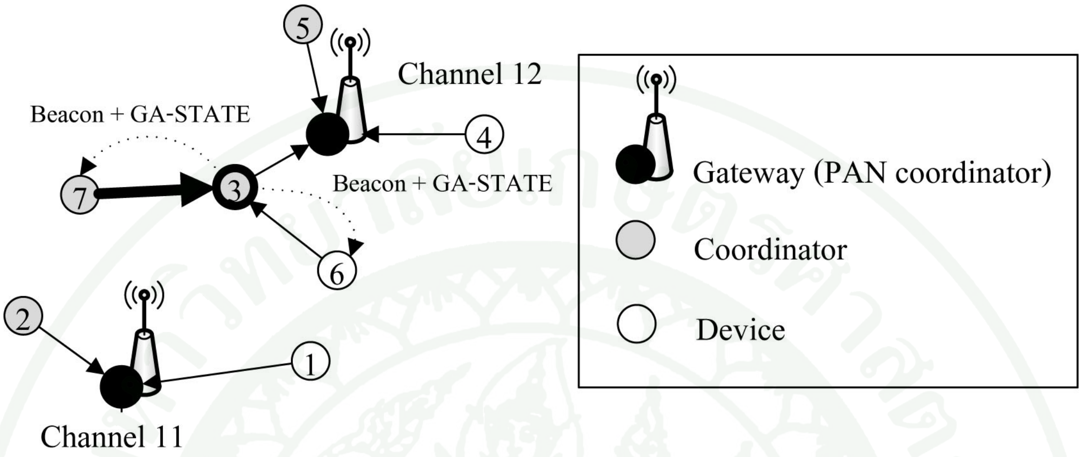


ภาพที่ 28 การเปลี่ยนสถานะเซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการรับข้อมูลสูง ในขั้นตอนวิธี GAME-BC-M

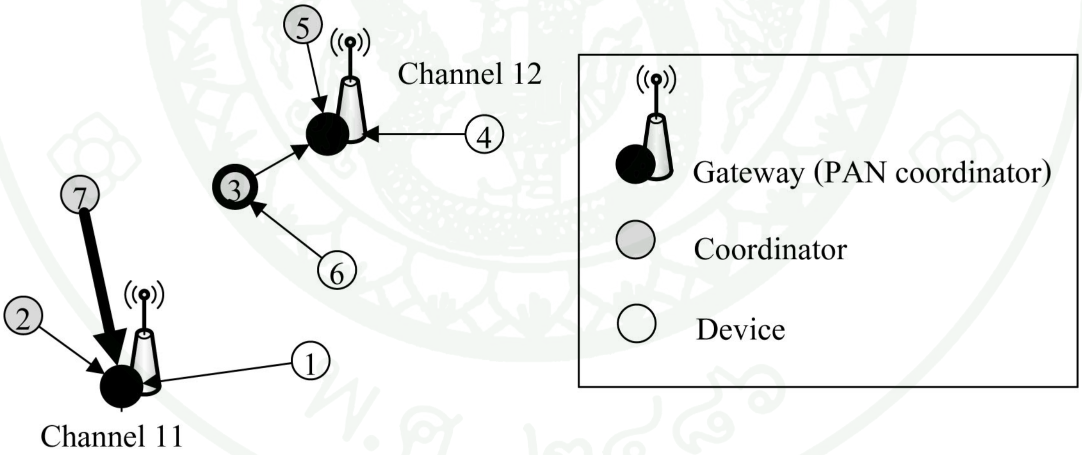
ซึ่งเกทเวย์หรือโคออร์ดิเนเตอร์ที่อยู่ในสถานะนี้จะแปะข้อความเพื่อแจ้งสถานะไปกับเฟรมบีคอน ดังภาพที่ 29

เมื่อเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวได้รับเฟรมบีคอนที่มีข้อความแจ้งสถานะจะมีขั้นตอนวิธีในการตัดสินใจ คือถ้าเซ็นเซอร์โหนดที่ได้รับเฟรมบีคอนนี้ไม่ใช่เซ็นเซอร์โหนดที่เป็นโหนดใบ (leaf node) จะเปลี่ยนสถานะตัวเองแล้วส่งเฟรมบีคอนที่มีข้อความแจ้งสถานะต่อไป แต่ถ้าเซ็นเซอร์

โหนดที่ได้รับเฟรมบีคอนนี้เป็นโหนดใบ เซ็นเซอร์โหนดจะเปลี่ยนสถานะของตัวเองเป็นสถานะ GA-STATE และเริ่มขั้นตอนวิธีในการตัดสินใจเพื่อออกจากเครือข่ายส่วนบุคคลที่เข้าร่วมใช้งานอยู่



ภาพที่ 29 การส่งเฟรมบีคอนพร้อมข้อความเพิ่มเติม ในขั้นตอนวิธี GAME-BC-M



ภาพที่ 30 รูปแบบการเข้าร่วมใช้งานหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนวิธี GAME-BC-M

ถ้ามีเซ็นเซอร์โหนดที่ตัดสินใจออกจากเครือข่ายส่วนบุคคลที่ใช้งาน ก็จะมีขั้นตอนวิธีในการเลือกเครือข่ายส่วนบุคคลที่จะเข้าร่วมใช้งานใหม่ ถ้าขั้นตอนวิธีในการเลือกเครือข่ายสำเร็จ เซ็นเซอร์โหนดที่ออกมาจากเครือข่ายเดิม ก็จะขอเข้าร่วมใช้งานกับเครือข่ายส่วนบุคคลใหม่ ซึ่งจะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ช่วยลดการสูญเสียข้อมูลในเครือข่ายส่วนบุคคลเดิมได้ เพราะได้มีเซ็นเซอร์โหนดบางส่วนย้ายออกไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลใหม่ ดังภาพที่ 30

3.2 ส่วนประกอบของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M

จากหัวข้อที่ 3.1 ได้อธิบายถึงขั้นตอนวิธี GAME-BC-M โดยสังเขปแล้ว ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงส่วนประกอบแต่ละส่วน รวมถึงวิธีการทำงานในส่วนประกอบแต่ละส่วนอย่างละเอียด โดยสามารถแบ่งออกเป็น

3.2.1 สถานะของเซ็นเซอร์โหนด

ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ได้แบ่งสถานะของเซ็นเซอร์โหนดออกเป็น 2 สถานะ คือ

ก. สถานะปกติ (Normal-STATE) เป็นสถานะปกติของอุปกรณ์ มีความหมายว่าเซ็นเซอร์โหนดในลำดับชั้นที่สูงขึ้นของต้นไม้ (upper tree) ไม่มีอัตราการรับข้อมูลที่สูงกว่าจุดที่กำหนด ในสถานะนี้มีการกำหนดค่าลงตัวแปร GA-STATE = 0

ข. สถานะ Gateway alert state (GA-STATE) สถานะนี้จะมีการกำหนดค่าลงตัวแปร GA-STATE = 1 ถ้าอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดใบเมื่ออยู่ในสถานะนี้ จะ ขอยกเลิกการเข้าร่วมใช้งานกับเครือข่ายส่วนบุคคลที่เข้าร่วมใช้งานอยู่ และย้ายไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลข้างเคียง ส่วนที่ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโหนดใบ จะส่งเฟรมบีคอนที่มีข้อความแจ้งสถานะแนบไปด้วย

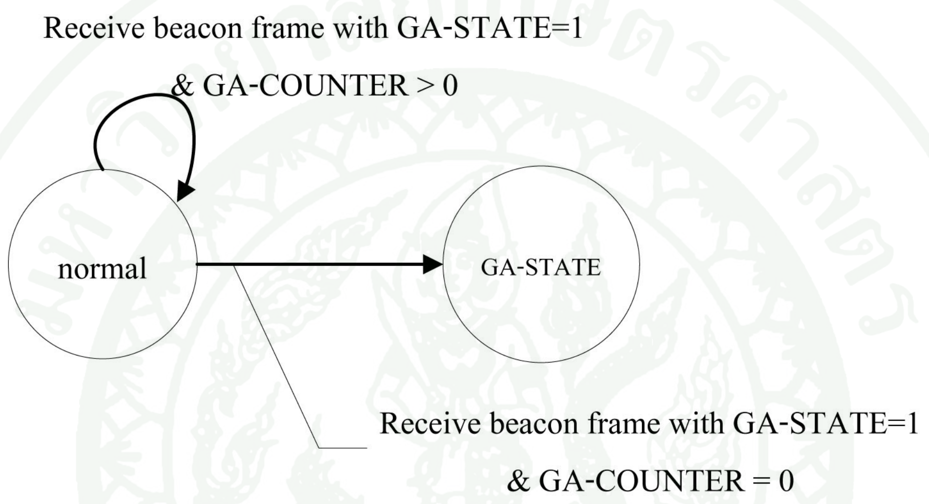
3.2.2 การเปลี่ยนสถานะของเซ็นเซอร์โหนด

การเปลี่ยนสถานะของเซ็นเซอร์โหนดจะมีวิธีการเปลี่ยนสถานะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ โดยแบ่งตามหน้าที่ของอุปกรณ์ออกเป็น 2 ประเภท

ก. อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดใบซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ไม่สามารถอนุญาตให้อุปกรณ์อื่นเข้าใช้งานได้ จะมีการเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะ GA-STATE ได้ จากการรับข้อความ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

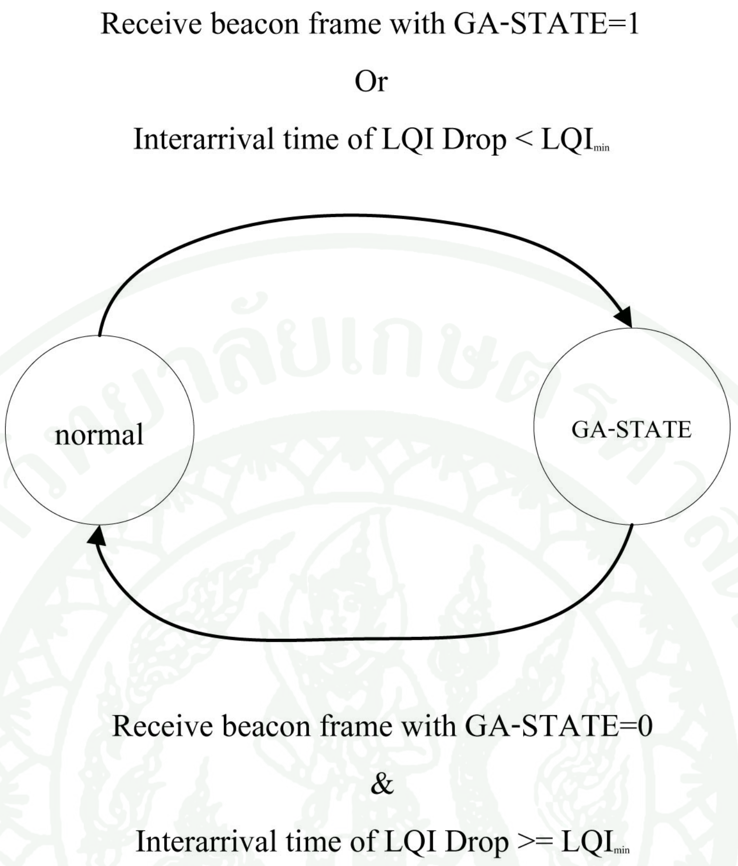
แจ้งสถานะ (GA-STATE =1) มากับเฟรมบีคอน โดยจะมีค่า GA-COUNTER ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อนับจำนวนครั้งที่ได้รับเฟรมบีคอนที่มีสถานะดังกล่าว โดยทุกครั้งที่ได้รับเฟรมบีคอนที่ GA-STATE = 1 GA-COUNTER ที่กำหนดจะลดลงทีละ 1 และเมื่อ GA-COUNTER ลดลงจนถึงศูนย์ จะเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ GA-STATE โดยวิธีการกำหนดค่า GA-COUNTER จะอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.6 โดยสามารถเขียนแผนภาพสถานะได้ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 แผนภาพสถานะการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ที่เป็นโหนดใบ

ข. อุปกรณ์ที่ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโหนดใบ จะมีการเปลี่ยนสถานะได้สองกรณีคือ ได้จากการรับข้อความแจ้งสถานะมากับเฟรมบีคอน เหมือนกับอุปกรณ์ชนิดดีไวซ์ และอีกกรณีหนึ่งคือจากการตัดสินใจเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์เอง ซึ่งอาศัยช่วงระยะห่างระหว่างการทิ้งข้อมูลแบบ LQI เปรียบเทียบกับค่า LQI_{min} ที่กำหนดขึ้น การเปลี่ยนสถานะไปยัง GA-STATE จะต้องประกอบด้วย การที่เซ็นเซอร์โหนดได้รับเฟรมบีคอนที่มีข้อความแจ้งสถานะ GA-STATE = 1 หรือ ระยะห่างระหว่างการทิ้งข้อมูลแบบ LQI มีค่าน้อยกว่า LQI_{min} และจะเปลี่ยนกลับมายังสถานะปกติด้วยการที่เซ็นเซอร์โหนดได้รับเฟรมบีคอนที่มีข้อความแจ้งสถานะ GA-STATE = 0 และ ระยะห่างระหว่างการทิ้งข้อมูลแบบ LQI มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ LQI_{min} ดังภาพที่ 32 โดยการเปลี่ยนสถานะในกรณีนี้จะเกิดในช่วงจังหวะที่มีการส่งเฟรมบีคอนออกไป ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 3.2.5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 32 แผนภาพสถานะการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ที่ไม่ใช่โหนดใบ

3.2.3 การเพิ่มข้อความแจ้งสถานะร่วมกับเฟรมบีคอน

เมื่อเซ็นเซอร์โหนดที่ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโหนดใบ มีการเปลี่ยนสถานะไปยัง GA-STATE จะต้องมีการแจ้งโหนดลูกที่เข้าร่วมใช้งานทั้งหมดว่าได้มีการเปลี่ยนสถานะแล้ว ซึ่งการแจ้งสถานะนี้สามารถรวมเข้ากับเฟรมบีคอน เพื่อลดจำนวนข้อมูลที่มีการสื่อสารกันภายในเครือข่าย โดยภายในบีคอนเฟรมนั้น จะยังมีบิตสำรอง (reserved bit) อยู่ใน MAC frame control fields 2 แห่ง คือบิตที่ 7-9 และบิตที่ 12-13 โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกบิตที่ 13 นำมาใช้เก็บบิตสำหรับแจ้งสถานะไปยังโหนดลูก โดยกำหนดว่าถ้าบิตที่ 13 ของ MAC frame control fields มีค่าเท่ากับ 0 มีความหมายว่าสถานะปกติ และถ้ามีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าเซ็นเซอร์โหนดที่ส่งเฟรมบีคอนอยู่ในสถานะ GA-STATE

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.5 ขั้นตอนวิธีในเซ็นเซอร์โหนดที่ไม่ใช่โหนดใบ

ในทุกๆ รอบของกระบวนการส่งเฟรมบีคอนของเซ็นเซอร์โหนดที่ไม่ใช่โหนดใบ จะต้องมีการตรวจสอบว่าอัตราการรับข้อมูลนั้นเกินจุดอิ่มตัวหรือไม่ ซึ่งขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ถูกออกแบบให้วิธีการตรวจสอบจุดอิ่มตัวนั้นจะใช้วิธีการแบบใดก็ได้ และนำเสนอวิธีการตรวจสอบจุดอิ่มตัวโดยใช้ระยะห่างระหว่างข้อมูลที่ถูกทิ้งด้วยสาเหตุ LQI ต่ำกว่าขีดจำกัดของการรับข้อมูลในมาตรฐาน IEEE802.15.4

เมื่อลองตรวจสอบระยะห่างระหว่างข้อมูลที่ถูกทิ้งด้วย LQI ที่เกิดขึ้น (interarrival time) พบว่าระยะห่างระหว่างข้อมูลนั้นมีค่าอยู่ในช่วงที่กว้างมาก การตัดสินใจภายในระยะเวลาเดียว อาจจะได้ค่าที่ต่ำหรือสูงไป ดังนั้นจึงอาศัยการพยากรณ์ข้อมูลด้วยวิธีการแบบ Exponential Smoothing (ES) โดยใช้ข้อมูลที่ผ่านมาในอดีตเพียงเล็กน้อย ร่วมกับข้อมูลในปัจจุบัน ดังสมการที่ 19

$$\begin{aligned} \overline{\tau_0} &= \tau_0 \\ \overline{\tau_t} &= \alpha\tau_t + (1-\alpha)\overline{\tau_{t-1}} \end{aligned} \tag{19}$$

ซึ่ง $\overline{\tau_t}$ คือ ข้อมูลที่ต้องพยากรณ์ใหม่

$\overline{\tau_{t-1}}$ คือ ข้อมูลที่พยากรณ์ในช่วงเวลาที่ผ่านมา

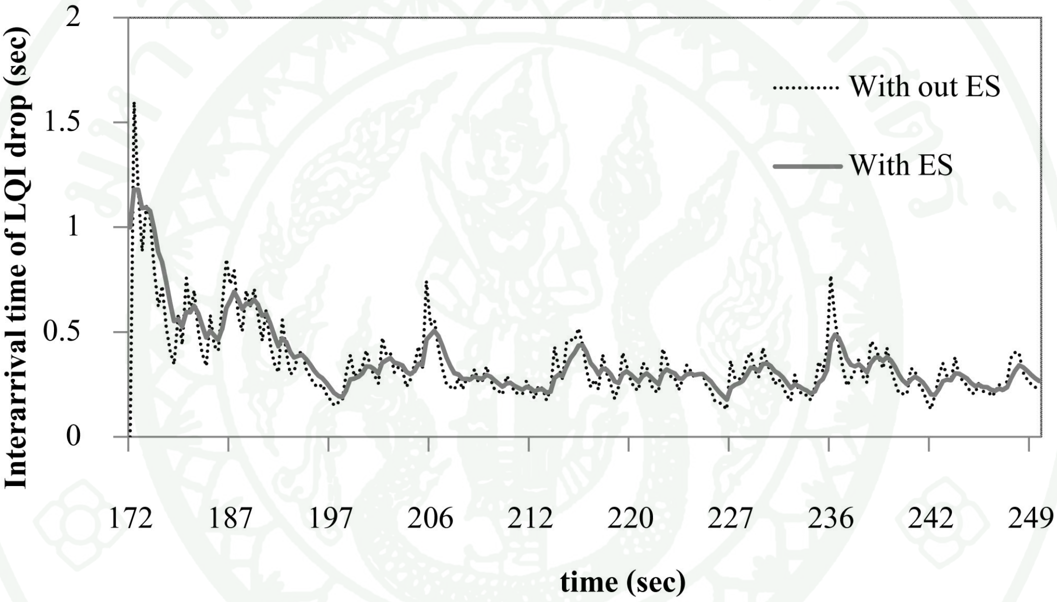
τ_t คือ ข้อมูลจริงในช่วงเวลาปัจจุบัน

α คือ น้ำหนักในการใช้ข้อมูลในปัจจุบัน มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1

จากสมการที่ 19 ถ้า α มีค่ามากจะเป็นการให้ความสำคัญกับข้อมูลในปัจจุบันมากกว่าข้อมูลในอดีต ข้อมูลที่พยากรณ์ใหม่จะมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจริง แต่ในทางตรงกันข้ามถ้า α มีค่าน้อยจะเป็นการให้ความสำคัญกับข้อมูลในอดีต ข้อมูลที่พยากรณ์ใหม่จะมีการเฉลี่ยกับข้อมูลในอดีตมาก ทำให้กราฟที่ได้เรียบกว่าการวาดด้วยข้อมูลจริง ดังภาพที่ 33 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการใช้ ES และไม่ใช้ ES กับค่าระยะห่างระหว่างการทิ้งข้อมูลแบบ LQI ในสถานการณ์จำลองแบบหนึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่า $\overline{\tau_t}$ ที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาก็จะนำมาเทียบกับค่า $\tau_{\min}$ ซึ่งเป็นตัวแปรแทนระยะห่างระหว่างการทิ้งข้อมูลแบบ LQI ที่ต่ำที่สุด ถ้าค่า $\overline{\tau_t}$ ต่ำกว่าค่า $\tau_{\min}$ เซ็นเซอร์โหนดก็จะเปลี่ยนสถานะไปยัง GA-STATE ซึ่งบีคอนที่ถูกส่งออกมาจากเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ใน GA-STATE นี้จะถูกกำหนดค่า GA-STATE = 1 แต่ถ้าค่า $\overline{\tau_t}$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $\tau_{\min}$ จะตรวจสอบว่าบีคอนที่ได้รับมาจากโหนดแม่นั้น มีค่า GA-STATE = 1 หรือไม่ ถ้า GA-STATE = 1 เซ็นเซอร์โหนดจะก็จะเปลี่ยนสถานะไปยัง GA-STATE แต่ถ้า GA-STATE = 0 เซ็นเซอร์โหนดจะยังคงอยู่ที่สถานะปกติ โดยขั้นตอนการทำงานทั้งหมดสามารถเขียนเป็นผังงานได้ดังภาพที่ 34

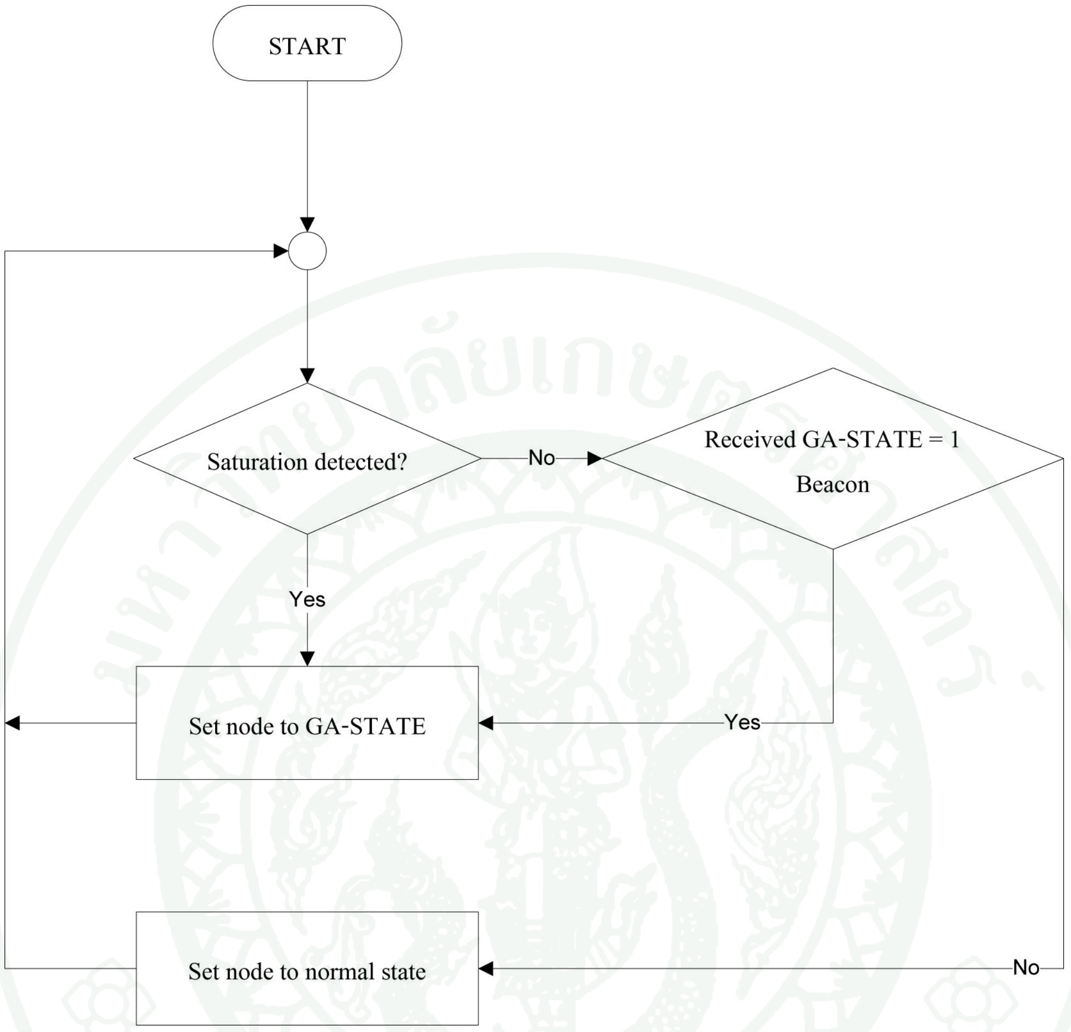


ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างข้อมูลที่ถูกทิ้งแบบ LQI โดยใช้ ES และไม่ใช้ ES

3.2.6 ขั้นตอนวิธีในเซ็นเซอร์โหนดที่เป็นโหนดใบ

เซ็นเซอร์โหนดที่เป็นโหนดใบจะไม่มีเซ็นเซอร์โหนดใด ๆ เข้าร่วมใช้งานหรือใช้เป็นทางผ่านในการส่งข้อมูล ดังนั้นจึงไม่ต้องตรวจสอบว่ามีอัตราการรับข้อมูลเพื่อนำผลที่ได้ไปตัดสินใจในการเปลี่ยนสถานะ แต่เซ็นเซอร์โหนดที่เป็นโหนดใบจะอาศัยข้อความแจ้งสถานะภายในบีคอนจากโหนดแม่ โดยถ้าเป็นการได้รับข้อความแจ้งสถานะ GA-STATE = 1 เป็นครั้งแรก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 34 ผังงานอธิบายการทำงานของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ในอุปกรณ์ที่ไม่ใช่โหนดใบ

โหนดใบจะสุ่มตัวเลขเพื่อกำหนดค่าให้กับตัวแปรที่มีชื่อว่า GA-COUNTER ซึ่งการสุ่มจะมีสมการเป็นดังต่อไปนี้

$$\text{GA-COUNTER} = \mathbf{ROUND}\left(\frac{(floor + (\mathbf{rand()}\% width))}{numCH}\right) \qquad (20)$$

ซึ่ง GA-COUNTER คือ ค่าหน่วงเวลาสำหรับการเปลี่ยนสถานะในอุปกรณ์ที่เป็นโหนดใบ

floor คือ ค่าต่ำสุดของ GA-COUNTER ที่ต้องการ

rand() คือ ฟังก์ชันในการสุ่มตัวเลขมีช่วงอยู่ระหว่างศูนย์ถึงอนันต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

width	คือ ช่วงกว้างของตัวเลขที่สุ่ม
numCH	คือ จำนวนเกทเวย์ที่เซ็นเซอร์โหนดสามารถติดต่อสื่อสารได้
ROUND()	คือ ฟังก์ชันในการแปลงเลขเป็นจำนวนเต็ม

หลักการทำงานของสมการที่ (20) จะเป็นเหมือนการสุ่มเลขธรรมดาที่มีการกำหนดขอบเขตบนล่างของค่าที่ต้องการ เพียงแต่ว่ามีการหารด้วย *numCH* หรือจำนวนเกทเวย์ที่แก้ไขให้เซ็นเซอร์โหนดจดจำตั้งแต่การสแกนครั้งแรก ซึ่งในสมการนี้มีความหมายว่าถ้าเซ็นเซอร์โหนดตัวใดมีจำนวนเกทเวย์ที่สามารถส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานให้เลือกมาก ก็จะมีค่า GA-COUNTER ที่ต่ำกว่าเซ็นเซอร์โหนดตัวที่มีเกทเวย์รอบข้างน้อย ทำให้เซ็นเซอร์โหนดตัวที่มีเกทเวย์รอบข้างมากกว่าขอยกเลิกการใช้งานกับเครือข่ายส่วนบุคคลที่ใช้งานอยู่ก่อนเซ็นเซอร์โหนดตัวที่มีเกทเวย์รอบข้างน้อยกว่า ส่วนการสุ่มตัวเลขนั้นกระทำเพื่อให้เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวขอยกเลิกการเข้าร่วมใช้งานกับเครือข่ายส่วนบุคคลในเวลาที่แตกต่างกัน ค่า *floor* เป็นตัวแปรที่กำหนดจำนวนครั้งที่ต่ำที่สุดของ GA-COUNTER ซึ่งถ้าค่า *floor* มีค่าน้อยเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวก็จะใช้เวลาที่น้อยลงในตัดสินใจออกจากเครือข่ายส่วนบุคคล ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า *floor* มีค่ามากเซ็นเซอร์โหนดก็จะต้องรอให้มีเหตุการณ์ที่โหนดแม่มีอัตราการรับข้อมูลสูง เกิดขึ้นเป็นระยะเวลานาน จึงจะตัดสินใจย้ายออกจากเครือข่ายส่วนบุคคล ส่วนค่า *width* จะเป็นตัวแปรที่กำหนดช่วงระยะเวลาที่แต่ละโหนดย้ายออกจากเครือข่ายส่วนบุคคล ถ้าค่า *width* มีค่ามากเลขที่สุ่มมาจะมีความแตกต่างกันมาก ทำให้แต่ละโหนดได้ค่า GA-COUNTER ที่ห่างกัน ทำให้มีการย้ายออกจากเครือข่ายส่วนบุคคลในเวลาที่ต่างกันมาก

จากหลักการของการใช้ตัวแปร *numCH* เพื่อเพิ่มน้ำหนักในการตัดสินใจเลือกเซ็นเซอร์โหนดที่มีจำนวนเกทเวย์รอบข้าง ให้ขอยกเลิกการเข้าร่วมใช้งานก่อนเซ็นเซอร์โหนดอื่น ๆ สามารถประยุกต์ใช้กับตัวแปรอื่น ๆ เช่น อัตราการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด ถ้าต้องการให้เซ็นเซอร์โหนดที่มีการส่งข้อมูลด้วยอัตราสูง ขอยกเลิกการเข้าร่วมใช้งานก่อนเซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำ สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มตัวแปรเกี่ยวกับอัตราการส่งข้อมูล บวกเข้าไปกับตัวแปร *numCH* เดิม

หลังจากโหนดใบสุ่มตัวเลขเสร็จสิ้นแล้ว เซ็นเซอร์โหนดจะลดค่า GA-COUNTER ทุกครั้งที่ได้รับข้อความแจ้งสถานะ GA-STATE = 1 จากเฟรมบีคอน จนกระทั่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

GA-COUNTER มีค่าเป็นศูนย์ เซ็นเซอร์โหนดจะขอยกเลิกการเข้าร่วมใช้งานกับเครือข่ายส่วนบุคคลที่ใช้งานอยู่ และหาเครือข่ายส่วนบุคคลใหม่เพื่อขอเข้าร่วมใช้งานต่อไป ดังภาพที่ 35

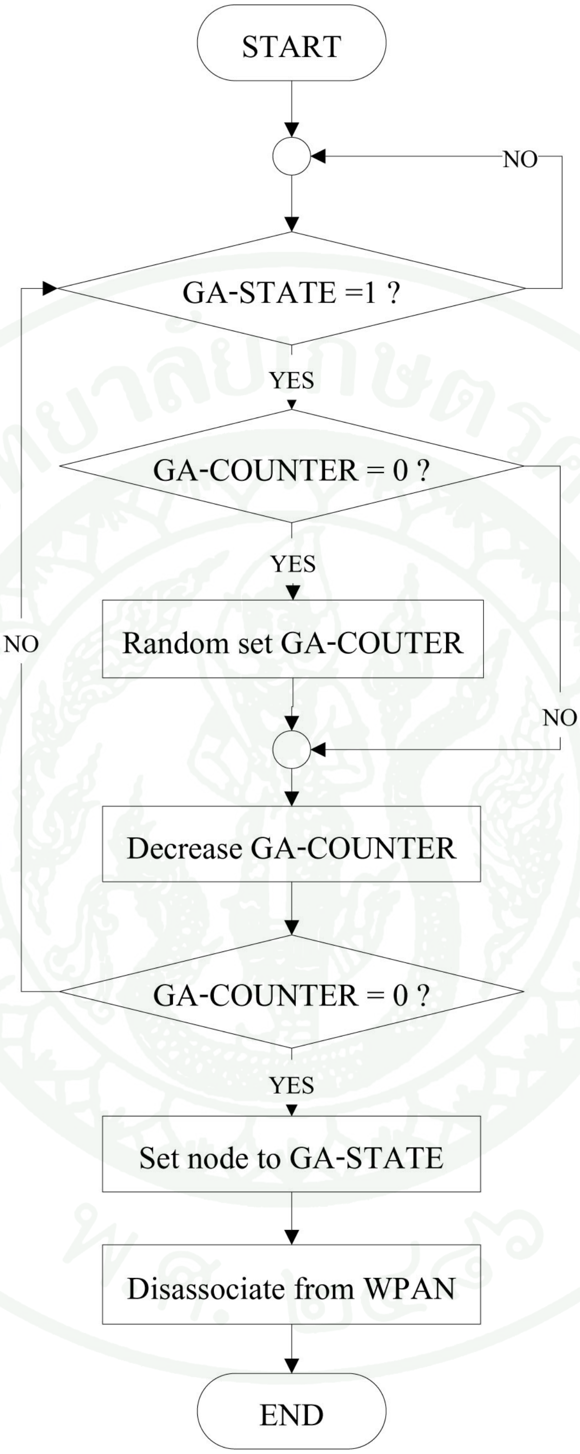
3.2.7 ขั้นตอนวิธีในการเข้าร่วมใช้งานเครือข่ายส่วนบุคคลเครือข่ายใหม่

ในการเข้าร่วมใช้งานเครือข่ายส่วนบุคคลเครือข่ายใหม่ หลังจากยกเลิกการเข้าร่วมใช้งานกับเครือข่ายบุคคลเครือข่ายเดิมแล้ว จะมีการปรับปรุงเพิ่มเติมจากการเข้าร่วมเครือข่ายแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 อยู่สองจุดคือ

ก. ในการตัดสินใจเลือกเครือข่ายส่วนบุคคลเครือข่ายใหม่จะใช้ข้อความแจ้งสถานะ GA-STATE เข้าร่วมในการตัดสินใจด้วย ถ้าเครือข่ายส่วนบุคคลเครือข่ายใหม่มีค่า GA-STATE = 1 ก็จะไม่ถูกนำมาพิจารณาในการเลือกเครือข่าย ขั้นตอนวิธีนี้กระทำเพื่อหลีกเลี่ยงการย้ายไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลที่มีการรับส่งข้อมูลจำนวนมากอยู่ก่อนแล้ว

ข. ในการตัดสินใจเลือกเครือข่ายส่วนบุคคลจะไม่นำเครือข่ายที่เคยเข้าร่วมใช้งานแล้วมาพิจารณา เพื่อป้องกันกรณีที่เซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง ย้ายเครือข่ายส่วนบุคคลไปยังเครือข่ายใหม่แล้ว ทำให้เครือข่ายส่วนบุคคลเครือข่ายใหม่มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงขึ้นกว่าเดิม ในขณะที่เครือข่ายส่วนบุคคลเก่ามีอัตราการรับส่งข้อมูลเป็นปกติ เซ็นเซอร์โหนดที่ย้ายไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลใหม่จึงอาจจะมีการย้ายกลับมายังเครือข่ายส่วนบุคคลเก่า เป็นเช่นนี้เรื่อยไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 ผังงานอธิบายการทำงานของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ในอุปกรณ์ที่เป็นโหนดใบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. การแบ่งขั้นตอนวิธีในการทดลอง

ขั้นตอนวิธีในการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นดังนี้

1.1 การจำลองเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบฮ็อปเดียว เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S เปรียบเทียบกับเครือข่ายมาตรฐาน IEEE802.15.4 ที่ไม่มีการปรับปรุงและเครือข่ายที่แต่ละเซ็นเซอร์โหนดมีการตัดสินใจเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่มีระยะทางใกล้ที่สุด (Minimum-distance-based association, MINDIST)

1.2 การจำลองเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายฮ็อป เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M เปรียบเทียบกับเครือข่ายแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4

2. การทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-S

การทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี ที่ชื่อว่า GAME-BC-S ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงการเข้าร่วมใช้งาน ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้ ที่มีการส่งข้อมูลเพียงฮ็อปเดียว กับขั้นตอนวิธีการเข้าร่วมใช้งานตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 และแบบ MINDIST

2.1 วิธีการทดลอง

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-S เปรียบเทียบกับเครือข่ายมาตรฐาน IEEE802.15.4 ที่ไม่มีการปรับปรุง และเครือข่ายแบบ MINDIST จึงได้ออกแบบการทดลองซึ่งมีอุปกรณ์จำนวน 100 ตัว โดย 96 ตัวเป็นดีไวซ์และอีก 4 ตัวที่เหลือเป็นเกทเวย์ โดยดีไวซ์จะถูกวางสุ่มในพื้นที่ย่อยละ 1 ตัว ซึ่งมีขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 10 เมตร โดยพื้นที่ย่อยจะอยู่ในพื้นที่ใหญ่

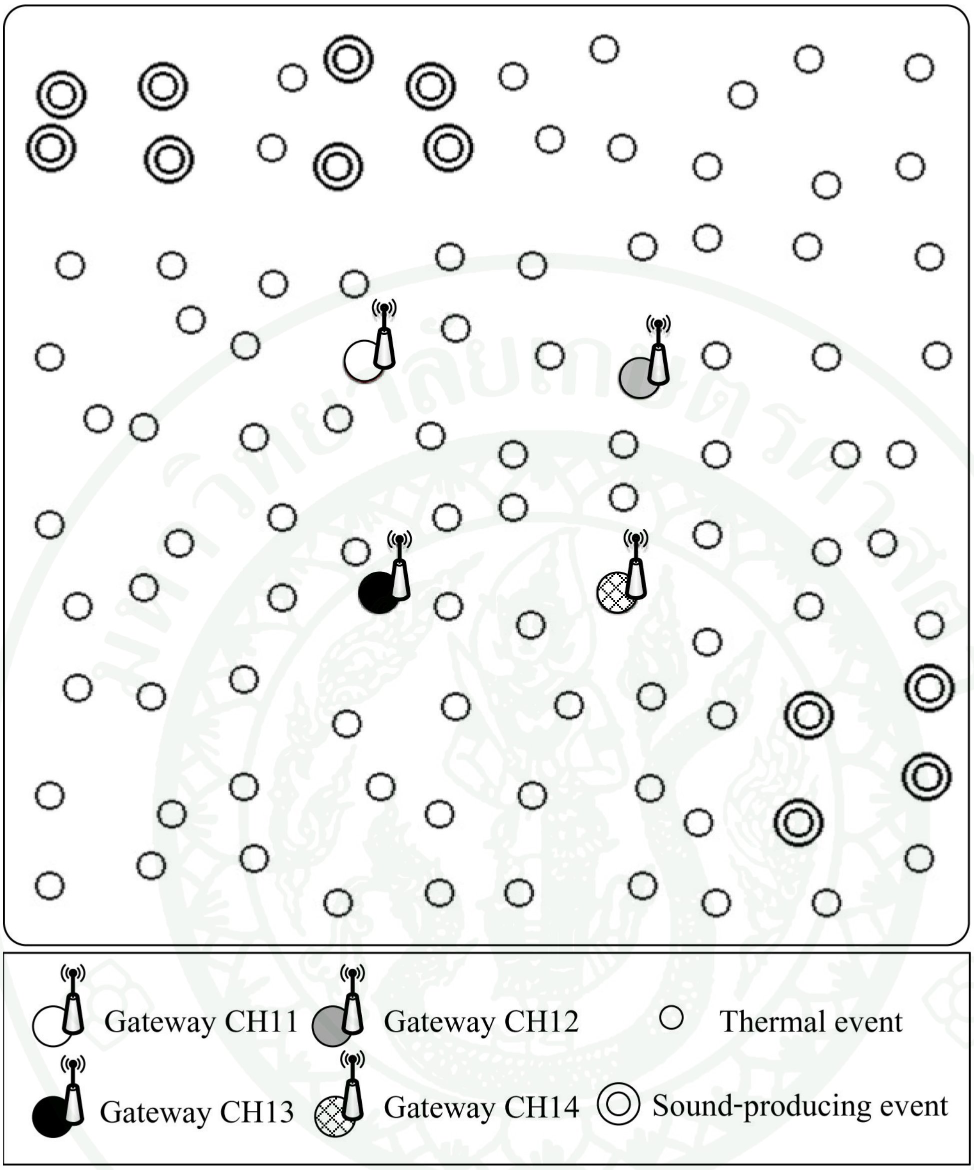
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยรวมทั้งหมดขนาดกว้าง 100 เมตร ยาว 100 เมตร โดยเกทเวย์จะถูกวางอยู่ที่พิกัด (33,33), (33,66), (66,33), 66,66) ซึ่งมีช่องสัญญาณที่ 11,12,13,14 ตามลำดับ กำลังส่งของแต่ละโหนดถูกตั้งให้สามารถส่งได้ภายในระยะทางประมาณ 60 เมตร ดีไวซ์แต่ละตัวถูกติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับความร้อน และ ไมโครโฟน โดยเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนมีจะการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐาน ผ่านเกทเวย์ในรูปแบบ CBR ที่มีอัตรา 0.2 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที โดยปกติเซ็นเซอร์ทุกตัวจะตรวจจับความร้อน แต่ถ้ามีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นดีไวซ์ที่อยู่ใกล้เคียงกับที่เกิดเหตุการณ์จะใช้ไมโครโฟน เก็บข้อมูลเสียงส่งกลับไปยังสถานีฐาน ซึ่งสัญญาณเสียงนี้ สมมุติว่าถูกเข้ารหัสแบบ mono PCM ความถี่ 8000 kHz, 16 bit ซึ่งจะมีอัตราการส่งข้อมูลประมาณ 15 กิโลบิตต่อวินาที หรือประมาณ 27 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที ถ้ากลุ่มข้อมูลมีขนาด 70 ไบต์ ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง

การทดลองจะมีการสุ่มบริเวณที่เกิดเหตุการณ์ที่ต้องมีการบันทึกเสียงขึ้น และเพิ่มเหตุการณ์ไปจนถึง 6 เหตุการณ์ โดยการสุ่มนี้จะถูกสร้างจาก 10 seeds ที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง ถ้ามีเหตุการณ์เกิดขึ้นจำนวน 3 เหตุการณ์ การทดลองทุกการทดลองมีตัวแปรควบคุมดังตารางที่ 5 ขั้นตอนวิธี GAME-BC-S จะมีการตั้งค่าตัวแปรตามตารางที่ 6 ตัวอย่างของการทดลองจะมีลักษณะดังภาพที่ 36

ผลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S เปรียบเทียบกับวิธีการเข้าร่วมใช้งานอื่น ๆ มีด้วยกัน 4 ค่าคือ (1) อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน, (2) ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล, (3) ร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูลผล และ (4) พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลหนึ่งบิต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 36 ตัวอย่างการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 ตัวแปรควบคุมในการทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-S

ชื่อตัวแปรควบคุม	ค่าตัวแปร
ความถี่สัญญาณวิทยุ	2.4 GHz
จำนวน แพนโคออร์ดิเนเตอร์/ เกทเวย์	4 ตัว
จำนวน device	96
ชนิดการส่งข้อมูล	CBR
อัตราการส่งข้อมูลของข้อมูลความร้อน	0.2 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที
อัตราการส่งข้อมูลของข้อมูลเสียง	27 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที
จำนวนดีไวซ์ที่ส่งข้อมูลเสียงเมื่อตรวจพบเหตุการณ์	4 ตัว
ทิศทางการส่งข้อมูล	จากดีไวซ์ ไปยังแพนโคออร์ดิเนเตอร์
ระห่างระหว่างแพนโคออร์ดิเนเตอร์กับดีไวซ์	9 เมตร
เวลาในการทดลอง	800 วินาที
ขนาดของพื้นที่ทดลอง	1000 ตารางเมตร
เวลาเริ่มการทำงานแพนโคออร์ดิเนเตอร์	วินาทีที่ 1 เป็นต้นไป
เวลาเริ่มการทำงานดีไวซ์	วินาทีที่ 7 เป็นต้นไป
เวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูล	วินาทีที่ 250 เป็นต้นไป
กระบวนการหาเส้นทาง	ไม่มี
การตอบรับข้อมูล	ไม่มี

ตารางที่ 6 ค่าของตัวแปรในขั้นตอนวิธี GAME-BC-S

ชื่อตัวแปร	ค่าตัวแปร
r_{init}	60 กิโลบิตต่อวินาที
r_{step}	2 กิโลบิตต่อวินาที

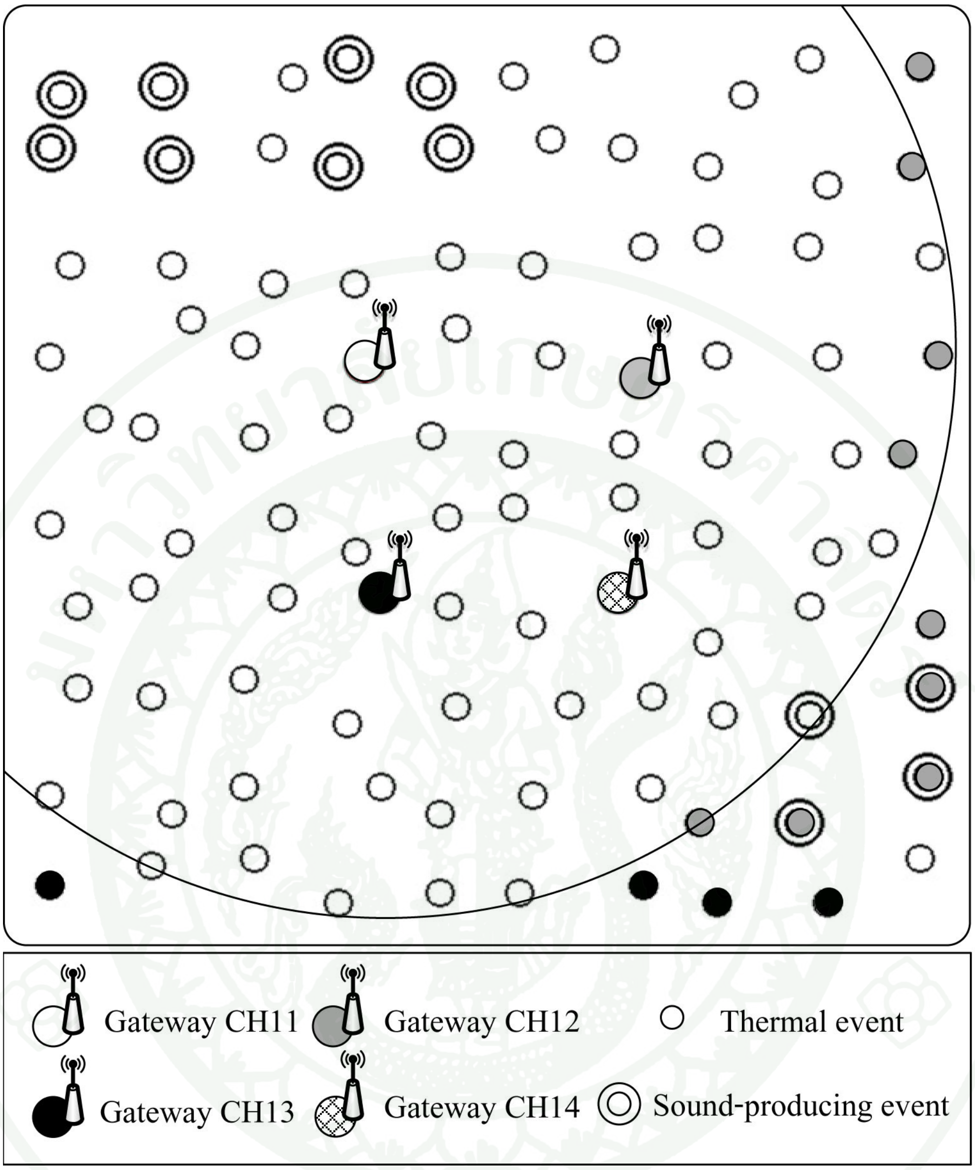
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 ผลการทดลอง

เพื่อให้เห็นภาพรวมของผลการทดลองจากขั้นตอนวิธีทั้งสามที่ทดสอบ จะยกตัวอย่าง โดยใช้สถานการณ์ที่มีเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวนสามเหตุการณ์ ใน seed ที่ 3 โดยจะสังเกตได้ว่าในการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 นั้นเซ็นเซอร์โหนดจะเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ใช้ช่องสัญญาณที่ต่ำที่สุดเสมอ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1 บทอุปกรณ์และวิธีการ ซึ่งผลลัพธ์จะได้ดังภาพที่ 37 หากเซ็นเซอร์โหนดเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวใดจะมีสีเดียวกับเกทเวย์ตัวนั้น พบว่าเซ็นเซอร์โหนดส่วนมากจะเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ช่องสัญญาณที่ 11 (สีขาว) เนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดจำนวนนั้นอยู่ในรัศมีที่ได้รับเฟรมบีคอนจากเกทเวย์ช่องสัญญาณที่ 11 เมื่อถึงขั้นตอนที่ต้องตัดสินใจเลือกเกทเวย์ จึงเลือกเกทเวย์นั้น เนื่องจากเป็นช่องสัญญาณที่ต่ำสุด ส่วนเซ็นเซอร์โหนดตัวอื่นที่ไม่ได้รับเฟรมบีคอนจากช่องสัญญาณที่ 11 จะเลือกช่องสัญญาณถัดไปที่ต่ำที่สุดแทน การเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธี MinDist จะให้ผลการทดลองในสถานการณ์เดียวกันดังภาพที่ 38 จะสังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์โหนดทุกตัวจะเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ระยะทางใกล้ที่สุดเสมอ

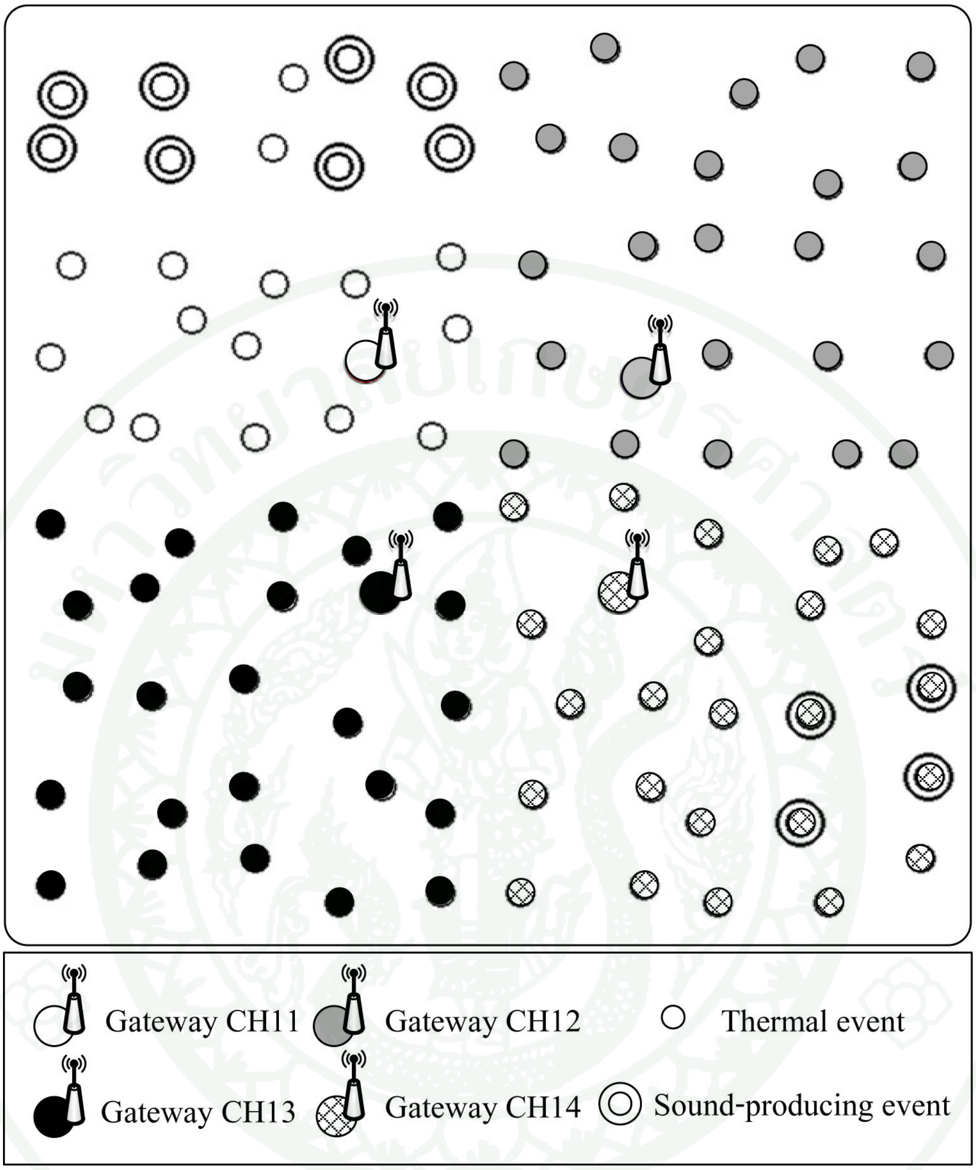
ส่วนการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธี GAME-BC นั้นจะมีความคล้ายคลึงกับขั้นตอนวิธี MinDist โดยจะมีจุดที่แตกต่างคือจะมีเซ็นเซอร์โหนดบางตัวเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่อยู่ไกลออกไปจากเกทเวย์ที่มีระยะทางใกล้ที่สุด เนื่องจากอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์ตัวที่อยู่ใกล้ที่สุดมีค่าเกิน r_{max} ดังเช่นในภาพที่ 39 กลุ่มของเซ็นเซอร์โหนดที่มีลูกศรชี้เดิมในขั้นตอนวิธีแบบ MinDist จะเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ใช้ช่องสัญญาณที่ 11 แต่ในขั้นตอนวิธีแบบ GAME-BC-S กลุ่มของเซ็นเซอร์โหนดกลุ่มนี้จะย้ายไปเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ใช้ช่องสัญญาณที่ 12 เพื่อช่วยลดอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์ที่ใช้ช่องสัญญาณที่ 11 ซึ่งขั้นตอน GAME-BC-S จะเลือกโหนดที่ย้ายไปยังเกทเวย์ตัวใหม่เท่าที่จำเป็น และมีการใช้พลังงานต่างจากเดิมน้อยที่สุด เพื่อประหยัดพลังงานให้กับแต่ละโหนด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



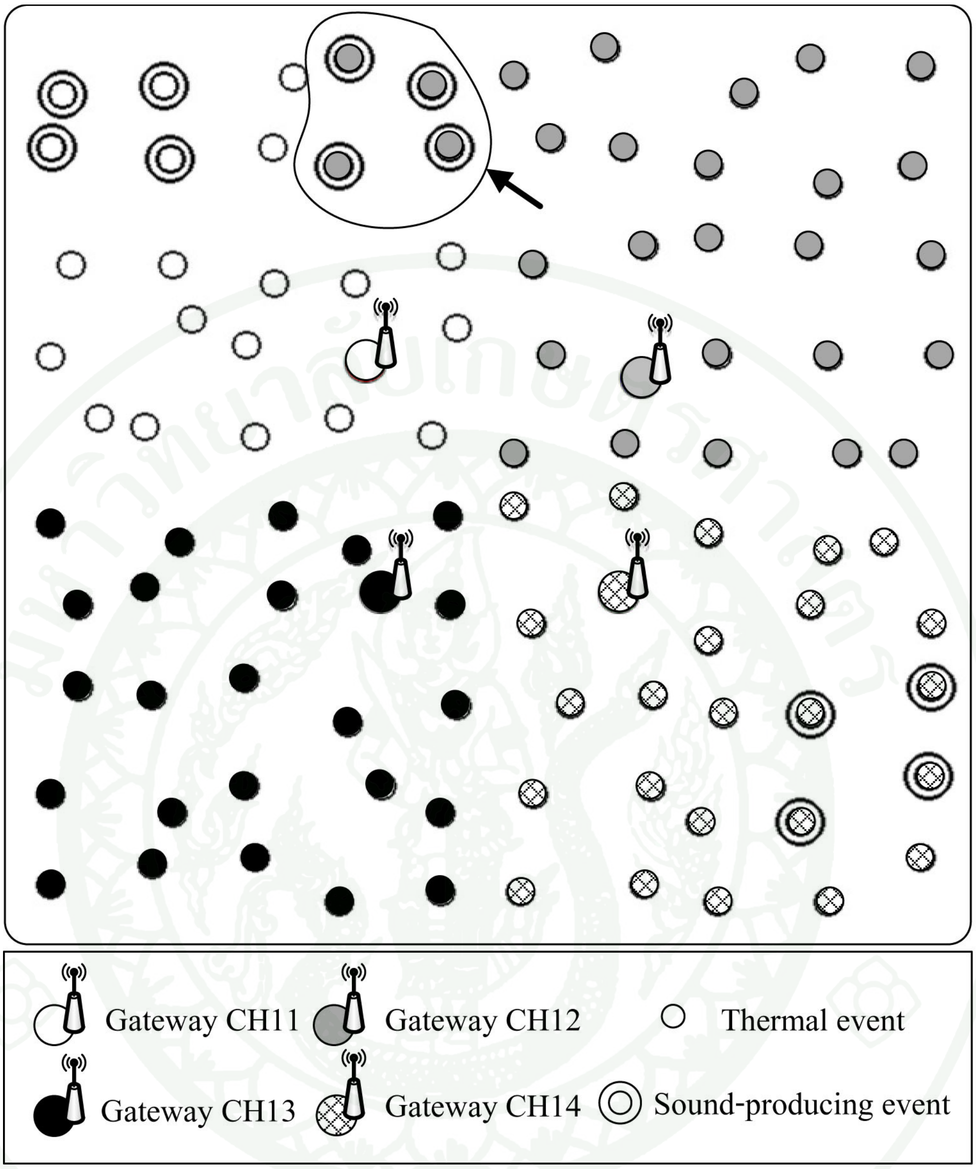
ภาพที่ 37 ตัวอย่างการเข้าร่วมใช้งานด้วยมาตรฐาน IEEE802.15.4 เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์ โดยวงกลมขนาดใหญ่แทนรัศมีในการรับส่งสัญญาณของเกทเวย์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 38 ตัวอย่างการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี MinDist เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 39 ตัวอย่างการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S เมื่อมีเหตุการณ์ที่ต้องมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 3 เหตุการณ์ โดยลูกศรชี้แสดงถึงกลุ่มของเซ็นเซอร์โหนดที่ย้ายไปเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ที่ใช้ช่องสัญญาณที่ 12

2.2.1 เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน

ภาพที่ 40 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S กับขั้นตอนวิธี MinDist และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ที่มีช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ที่ 95 เปอร์เซ็นต์โดยเมื่อจำนวนเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงเพิ่ม

มากขึ้น อัตราการรับข้อมูลของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และขั้นตอนวิธีแบบ MinDist จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ขั้นตอนวิธีแบบ GAME-BC-S จะมีอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานสูงกว่าตลอดช่วงการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ขั้นตอนวิธีแบบ GAME-BC-S จะหลีกเลี่ยงสถานการณ์ที่เกทเวย์มีอัตราการรับข้อมูลมากกว่าหรือใกล้เคียงกับจุดอิ่มตัว ทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลน้อยกว่าขั้นตอนวิธีแบบ MinDist ในทางตรงกับข้ามขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 ไม่สามารถที่จะรองรับเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงมากกว่า 1 เหตุการณ์กลับไปยังสถานีฐานได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เซ็นเซอร์โหนดส่วนมากตัดสินใจเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวที่ใช้ช่องสัญญาณที่ต่ำที่สุด ทำให้เกทเวย์ตัวนั้นมีจำนวนเซ็นเซอร์โหนดเข้าร่วมใช้งานมากกว่าเกทเวย์ตัวอื่น ซึ่งเมื่อเกทเวย์ได้รับข้อมูลจำนวนมาก จากการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนดภายในเครือข่ายส่วนบุคคล จะก่อให้เกิดการสูญเสียข้อมูลจำนวนมาก ณ เครือข่ายส่วนบุคคลนั้น ๆ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทั้งสอง ขั้นตอนวิธีแบบ GAME-BC-S ยังมีความแน่นอนของข้อมูลมากกว่า เนื่องจากมีช่วงความเชื่อมั่นที่แคบกว่าวิธีการทั้งสอง

2.2.2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล

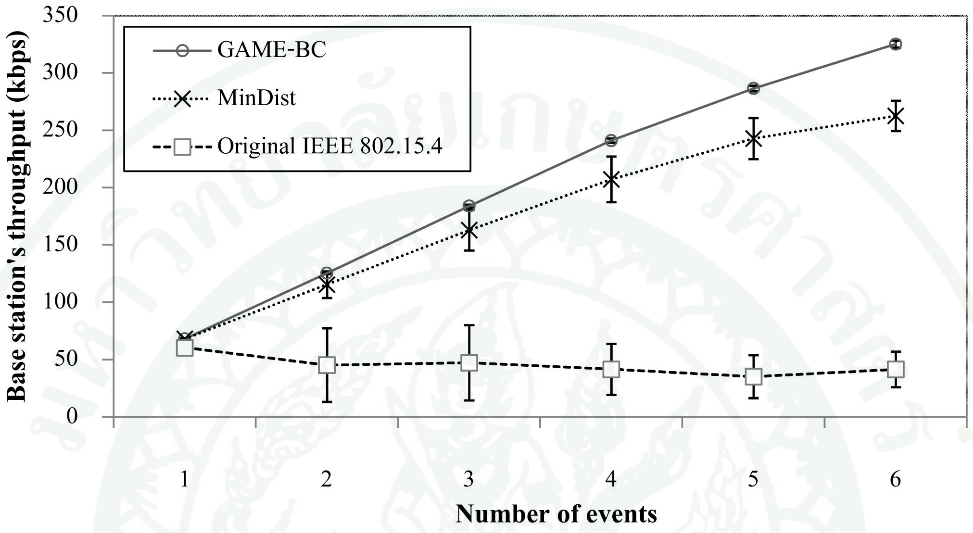
ภาพที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลระหว่างขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และ MinDist โดยละทิ้งผลจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เนื่องจากค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลมีค่าสูงเกินเปรียบเทียบ (100-400 มิลลิวินาที) เมื่อจำนวนเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงเพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของทั้งสองขั้นตอนวิธีจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ขั้นตอนวิธีแบบ GAME-BC-S จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8 มิลลิวินาที และเพิ่มขึ้นหลังจากมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงมากกว่าสี่เหตุการณ์เป็นต้นไป ในทางตรงกันข้ามขั้นตอนวิธีแบบ MinDist จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่มีเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงเพียงหนึ่งเหตุการณ์เท่านั้น เนื่องมาจากเครือข่ายส่วนบุคคลบางเครือข่ายเริ่มมีการรับข้อมูลถึงจุดอิ่มตัว แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธี GAME-BC-S มีการปรับตัวเพื่อหลีกเลี่ยงสถานการณ์ดังกล่าว

2.2.3 เปรียบเทียบร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล

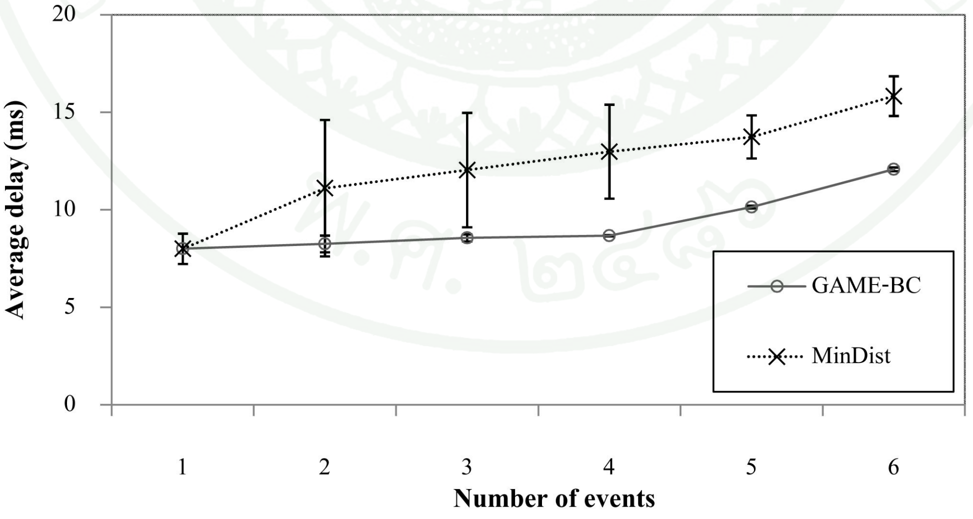
ภาพที่ 42 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูลของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S ขั้นตอนวิธี MinDist และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 โดยขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE 802.15.4 นั้น ความสำเร็จในการส่งข้อมูลลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือเพียง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ร้อยละ 37 ภายในสถานะการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงเพียงสองเหตุการณ์ และลดลงอย่างต่อเนื่อง หลังจากมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่ามีการสูญหายของข้อมูลจำนวนมากเกิดขึ้นในขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4

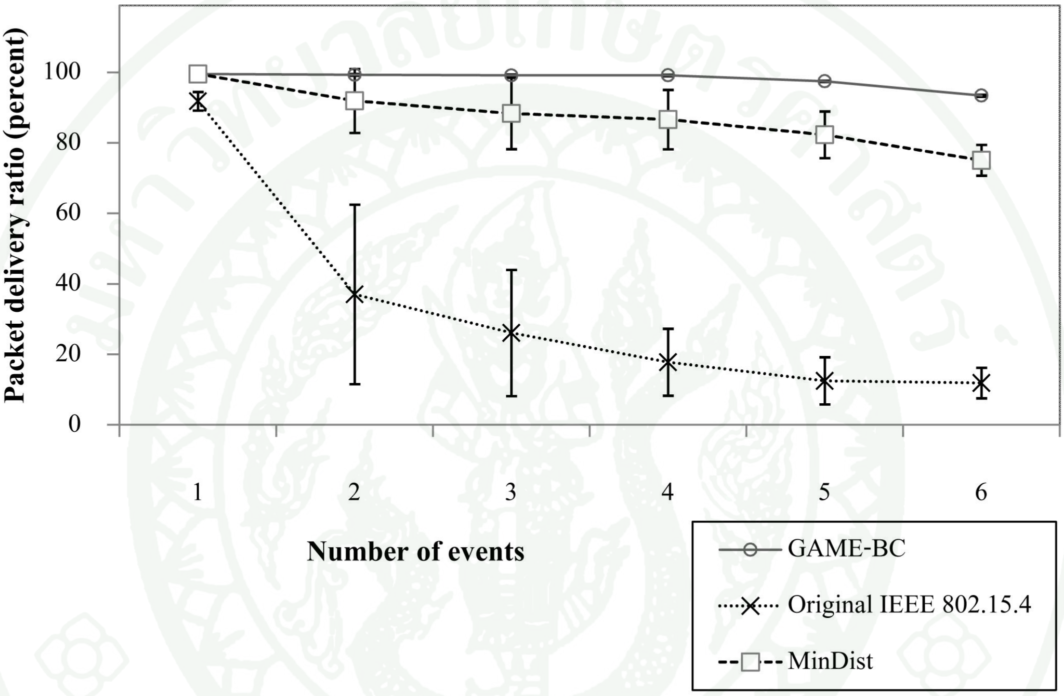


ภาพที่ 40 เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S MINDIST และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 41 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และ MINDIST ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และขั้นตอนวิธี MINDIST จะมีร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูลใกล้เคียงกัน เมื่อมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงเพียงหนึ่งเหตุการณ์ แต่เมื่อมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้น ร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูลของขั้นตอนวิธี MINDIST จะลดลงมากกว่าขั้นตอนวิธี GAME-BC-S ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลที่ว่าเกิดเหตุการณ์ที่บางเกทเวย์มีอัตราการรับข้อมูลที่เกินจุดอิ่มตัว ดังเช่นหัวข้อที่ 2.2.2



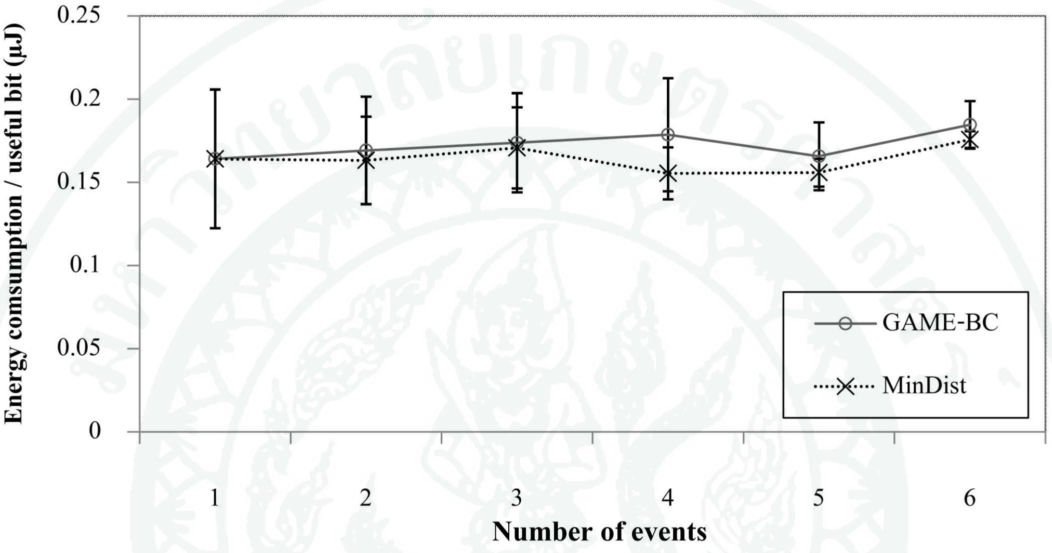
ภาพที่ 42 เปรียบเทียบร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S MINDIST และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งบิต

ภาพที่ 43 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งบิตของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และขั้นตอนวิธี MINDIST ด้วยแบบจำลองการใช้พลังงานในสมการที่ 3 และคำนวณพลังงานที่ใช้ทั้งหมดต่อการส่งข้อมูลที่ประสบความสำเร็จจำนวนหนึ่งบิต โดยผลจากการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีการมีการใช้พลังงานที่ไม่แตกต่างกันในนัยสำคัญ โดยขั้นตอนวิธี GAME-BC-S มีการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งบิตมากกว่าขั้นตอนวิธี MINDIST

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เนื่องจากมีเซ็นเซอร์โหนดบางตัวไม่ได้เข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวที่ใกล้ที่สุด ส่วนผลการทดลองจากขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 จะไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบ เนื่องจากมีการใช้พลังงานต่อการส่งข้อมูลหนึ่งบิตที่สูงมาก (2-7 ไมโครจูลต่อหนึ่งบิต) แสดงถึงการสิ้นเปลืองพลังงานจำนวนมาก กับการส่งข้อมูลที่ไม่ประสบผลสำเร็จ



ภาพที่ 43 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งบิต ของการเข้าร่วมใช้งานขั้นตอนวิธี GAME-BC-S และ MinDist ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดในหัวข้อ 2.2 สามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนวิธี GAME-BC-S จะมีความคล้ายคลึงกับขั้นตอนวิธี MinDist เมื่อยังมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงจำนวนน้อย แต่เมื่อใดก็ตามที่มีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้น คุณสมบัติในการปรับตัวของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S จะช่วยรักษาประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสาร โดยที่ยังมีระดับการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกับขั้นตอนวิธี MinDist

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-M

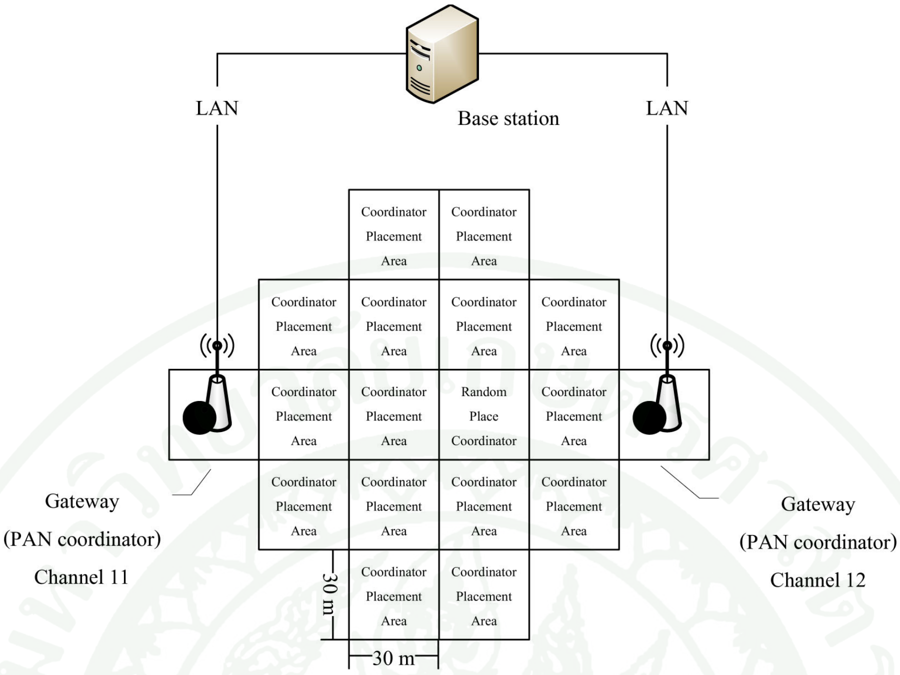
การทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงการเข้าร่วมใช้งาน ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้แบบที่มีการส่งข้อมูลหลายฮ็อป กับการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4

3.1 วิธีการทดลอง

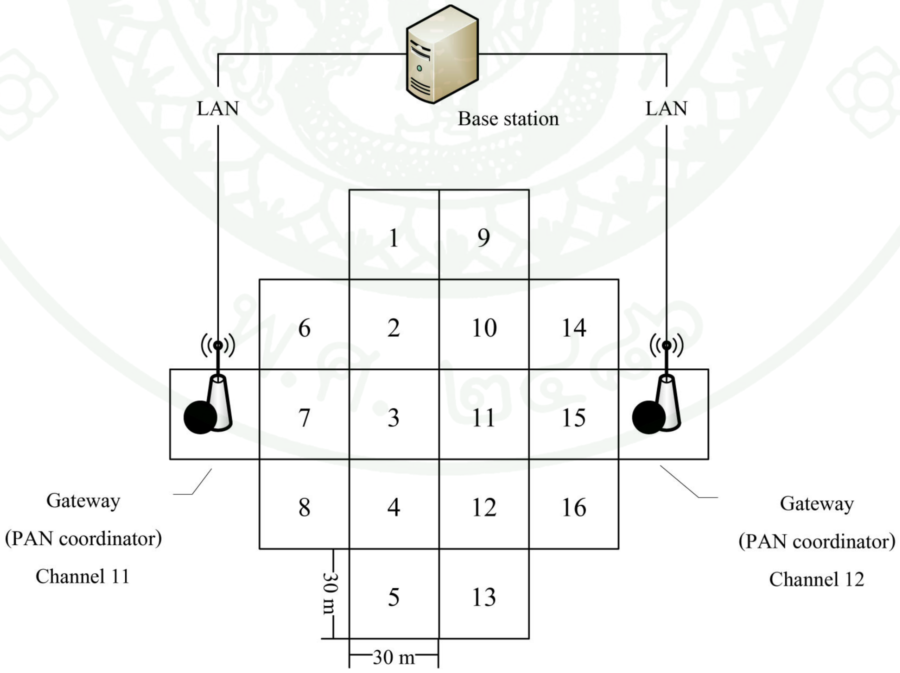
เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-M เปรียบเทียบกับเครือข่ายแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 จึงได้ออกแบบการทดลองซึ่งมีอุปกรณ์จำนวน 18 ตัว โดย 16 ตัวเป็นโคออร์ดิเนเตอร์และอีก 2 ตัวที่เหลือเป็นเกทเวย์ โดยเกทเวย์จะถูกวางไว้ที่พิกัด (15,75), (165,75) มีช่องสัญญาณที่ 11 และ 12 ตามลำดับ และโคออร์ดิเนเตอร์ถูกวางสุ่มอยู่ในพื้นที่ย่อยละ 1 ตัวซึ่งมีขนาดกว้าง 30 เมตร ยาว 30 เมตร ดังภาพที่ 44 กำลังส่งของแต่ละโหนดถูกตั้งให้สามารถส่งได้ภายในระยะทางประมาณ 60 เมตร โคออร์ดิเนเตอร์แต่ละตัวถูกติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับความร้อน และ ไมโครโฟน โดยเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจะมีการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานผ่านเกทเวย์ในรูปแบบ CBR ที่มีอัตรา 0.2 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที โดยปกติเซ็นเซอร์ทุกตัวจะตรวจจับความร้อน แต่ถ้ามีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นโคออร์ดิเนเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกับที่เกิดเหตุการณ์จะใช้ไมโครโฟน เก็บข้อมูลเสียงส่งกลับไปยังสถานีฐาน ซึ่งสัญญาณเสียงนี้ สมมุติว่าถูกเข้ารหัสแบบ mono PCM ความถี่ 8000 kHz, 16 bit ซึ่งจะมีอัตราการส่งข้อมูลประมาณ 15 กิโลบิตต่อวินาที หรือประมาณ 27 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที ถ้ากลุ่มข้อมูลมีขนาด 70 ไบต์ ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง

การทดลองจะมีการสุ่มบริเวณที่เกิดเหตุการณ์ที่ต้องมีการบันทึกเสียงขึ้น และเพิ่มเหตุการณ์ไปจนถึง 16 เหตุการณ์ โดยการสุ่มนี้จะถูกสร้างจาก 10 seeds ที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง และอีก 1 การทดลองที่ควบคุมการเพิ่มเหตุการณ์ตามลำดับที่กำหนด ดังภาพที่ 45 การทดลองทุกการทดลองมีตัวแปรควบคุม ดังตารางที่ 7 และขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีการตั้งค่าตัวแปรตามตารางที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 44 รูปแบบเครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M



ภาพที่ 45 ลำดับการเกิดเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงของการทดลองที่บังคับลำดับการเพิ่มเหตุการณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ตัวแปรควบคุมในการทดสอบประสิทธิภาพของ GAME-BC-M

ชื่อตัวแปรควบคุม	ค่าตัวแปร
ความถี่สัญญาณวิทยุ	2.4 GHz
จำนวน แพนโคออร์ดิเนเตอร์/ เกทเวย์	2 ตัว
จำนวนโคออร์ดิเนเตอร์	16
ชนิดการส่งข้อมูล	CBR
อัตราการส่งข้อมูลของข้อมูลความร้อน	0.2 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที
อัตราการส่งข้อมูลของข้อมูลเสียง	27 กลุ่มข้อมูลต่อวินาที
จำนวนโคออร์ดิเนเตอร์ที่ส่งข้อมูลเสียงเมื่อตรวจพบเหตุการณ์	1 ตัว
ทิศทางการส่งข้อมูล	จากโหนดที่พบเหตุการณ์ ไปยังแพนโคออร์ดิเนเตอร์
เวลาในการทดลอง	500 วินาที
ขนาดของพื้นที่ทดลอง	180×150 เมตร
เวลาเริ่มการทำงานแพนโคออร์ดิเนเตอร์	ภายในวินาทีที่ 1
เวลาเริ่มการทำงานดีไวซ์	วินาทีที่ 10 เป็นต้นไป
เวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูล	วินาทีที่ 100 เป็นต้นไป
กระบวนการหาเส้นทาง	การหาเส้นทางตามลำดับชั้น
การตอบรับข้อมูล	ไม่มี

ตารางที่ 8 ค่าของตัวแปรในขั้นตอนวิธี GAME-BC-M

ชื่อตัวแปร	ค่าตัวแปร
$LQI_{\min}$	0.1 วินาที
α	0.3
floor	20
width	100

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M เปรียบเทียบกับวิธีการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 จะมี 2 ค่าคือ อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน และพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลต่อข้อมูลหนึ่งบิต

3.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การทดลองที่บังคับการเพิ่มเหตุการณ์ตามลำดับที่กำหนด และการทดลองการเพิ่มเหตุการณ์ด้วยวิธีการสุ่ม โดยจะอธิบายในการทดลองแรกก่อน เพื่อให้เห็นภาพรวมของขั้นตอนวิธี และเห็นผลต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 หลังจากนั้นจะวิเคราะห์ผลในการทดลองที่มีการเพิ่มเหตุการณ์ด้วยวิธีการสุ่ม

3.2.1 ผลการทดลองที่บังคับการเพิ่มเหตุการณ์ตามลำดับที่กำหนด

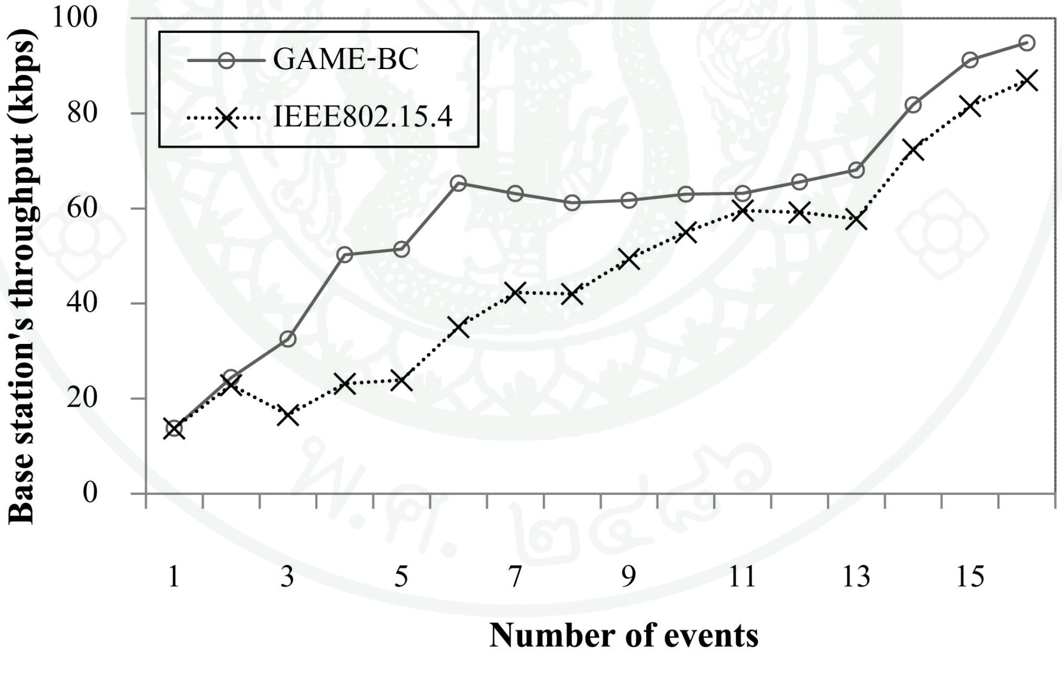
ก. เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน

ภาพที่ 46 แสดงผลอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียง ตามลำดับที่กำหนด ซึ่งพบว่าอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานในขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4 นั้นมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงจำนวนไม่เกินสองเหตุการณ์ เมื่อเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงเพิ่มมากขึ้น ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีอัตราการรับข้อมูลมากกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 โดยขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 จะให้ผลการทดลองที่มีลักษณะคล้ายขั้นบันได

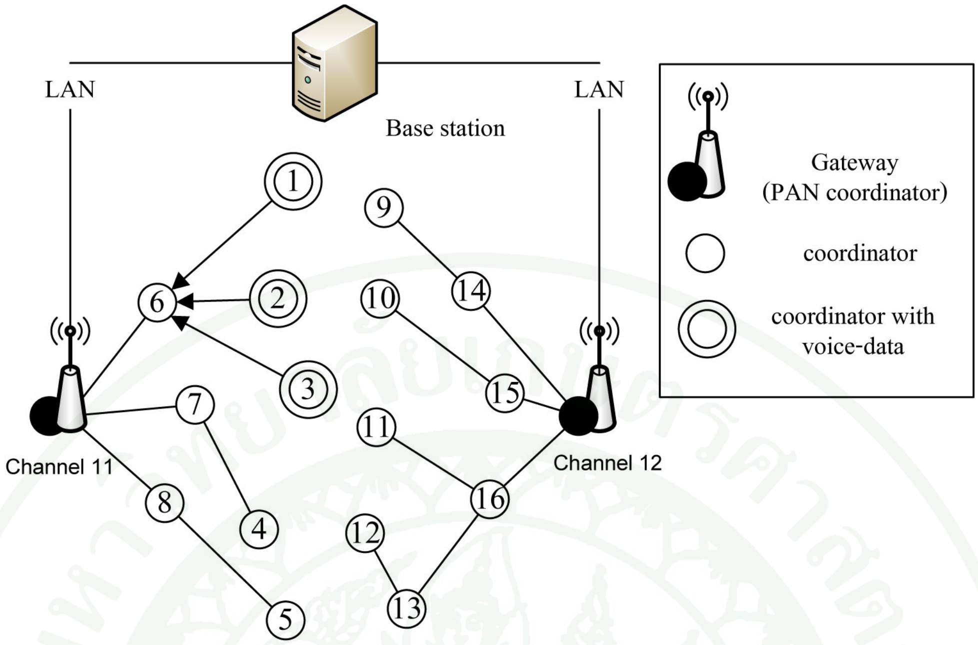
การที่ผลการทดลองของขั้นตอนวิธีแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 มีลักษณะคล้ายขั้นบันไดจำนวนหลายขั้นนี้ เนื่องมาจากการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด ก่อให้เกิดอัตราการรับข้อมูลปริมาณมากที่โคออร์ดิเนเตอร์บางตัว ดังเช่นเมื่อสังเกตผลการทดลองจากภาพที่ 46 จะพบว่าจุดที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวนสามเหตุการณ์ จะมีอัตราการรับข้อมูลที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับจุดที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวนสองเหตุการณ์ สามารถอธิบายได้ด้วยภาพที่ 47 ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวนสามเหตุการณ์ ในโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 1, 4 และ 8 ตามลำดับ โดยโคออร์ดิเนเตอร์ทั้งสามตัวจะมีการส่งข้อมูลเสียงไปยังโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 ซึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เป็นโหนดที่โคออร์ดิเนเตอร์ทั้งสามตัวขอเข้าร่วมใช้งานด้วย ทำให้เกิดเหตุการณ์ที่มีอัตราการรับข้อมูลถึงจุดอิ่มตัวในโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 ส่งผลให้เกิดการสูญหายของข้อมูลจำนวนมากดังภาพที่ 48 ซึ่งเป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสูญหายเฉลี่ยของข้อมูลระหว่างการส่งข้อมูลจากต้นทางมายังฮ็อปถัดไป ตัวอย่างเช่น ระหว่างโคออร์ดิเนเตอร์ต้นทางเบอร์ 1, 4 และ 8 กับโคออร์ดิเนเตอร์ปลายทางเบอร์ 3 หรือระหว่างโคออร์ดิเนเตอร์ต้นทางเบอร์ 12 กับโคออร์ดิเนเตอร์ปลายทางเบอร์ 7 ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า มีการสูญหายของข้อมูลเฉลี่ยถึง 61.3 เปอร์เซ็นต์เมื่อโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 1, 4 และ 8 ส่งข้อมูลเสียงมายังโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 พร้อมกัน แต่เมื่อมีโคออร์ดิเนเตอร์ที่ส่งข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้นมา (เบอร์ 12) จะสังเกตเห็นได้ว่าการสูญหายของข้อมูลโดยเฉลี่ยมีค่าลดลง เนื่องจากโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 12 ส่งข้อมูลเสียงไปยังโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 7 ซึ่งเป็นคนละส่วนกับโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 การสูญหายของข้อมูลจึงน้อยกว่าโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 ส่งผลให้ผลการทดลองในภาพที่ 46 ณ จุดที่มีเหตุการณ์การส่งข้อมูลเสียงจำนวน 4 เหตุการณ์มีอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานสูงกว่าจุดที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวณ 3 ตัว



ภาพที่ 46 อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียง ตามลำดับที่กำหนด

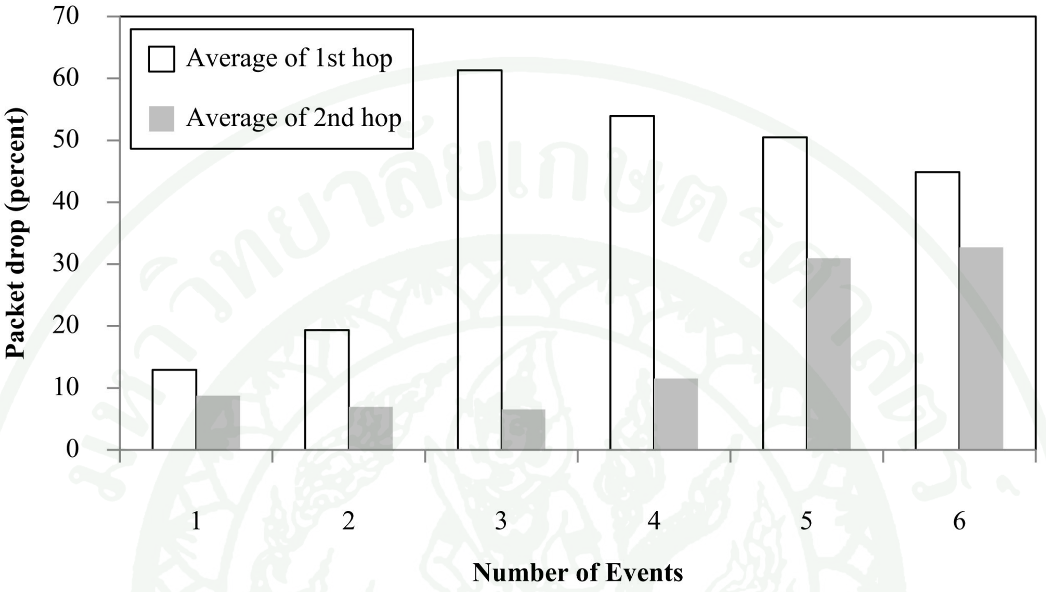


ภาพที่ 47 เหตุการณ์เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด จำนวนสามเหตุการณ์ ในการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 โดยตัวเลขแสดงลำดับของเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียง

แต่เมื่อมีเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้นเป็น 5 เหตุการณ์ โดยมีโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 15 ส่งข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้นมา พบว่าแม้ว่าเปอร์เซ็นต์การสูญหายเฉลี่ยของข้อมูลในฮ็อปที่ 1 จะลดลงดังภาพที่ 48 แต่อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานในภาพที่ 46 ไม่เพิ่มมากขึ้นกว่าจุดที่มีเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 4 เหตุการณ์ ทั้งนี้เนื่องจากการสูญหายของข้อมูลจะเกิดขึ้นที่ฮ็อปที่สองแทน ดังภาพที่ 48 ซึ่งภาพนี้สามารถตั้งข้อสังเกตได้สองประการคือ ประการแรกคือการที่เปอร์เซ็นต์การสูญเสียข้อมูลในฮ็อปที่สองมีค่าลดลงในระหว่างเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 1 ถึง 3 เหตุการณ์ เนื่องจากการส่งข้อมูลที่มีอัตราการส่งสูงจากโคออดิเตอร์เบอร์ 1, 4, และ 8 ส่วนใหญ่ได้สูญหายไปในฮ็อปที่หนึ่งแล้ว เมื่อโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 ส่งต่อข้อมูลให้กับโคออร์ดิเนเตอร์ทั้งสาม จึงเป็นการส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่าอัตราการส่งข้อมูลจากต้นทาง ทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลน้อย ประการที่สองคือ เมื่อเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงเพิ่มจาก 4 ถึง 6 เหตุการณ์ เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูลในฮ็อปที่สองจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเมื่อโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 12 และ 15 เริ่มส่งข้อมูลเสียงโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 7 และ 11 จะส่งต่อข้อมูลให้ในอัตราที่ใกล้เคียงกับอัตราการส่งจากต้นทาง ดังนั้นเมื่อโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3, 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

และ 11 มีการส่งต่อข้อมูลพร้อมๆ กัน จึงเกิดเหตุการณ์ที่เกทเวย์มีอัตราการรับข้อมูลสูง และเกิดการสูญหายของข้อมูลตามมา



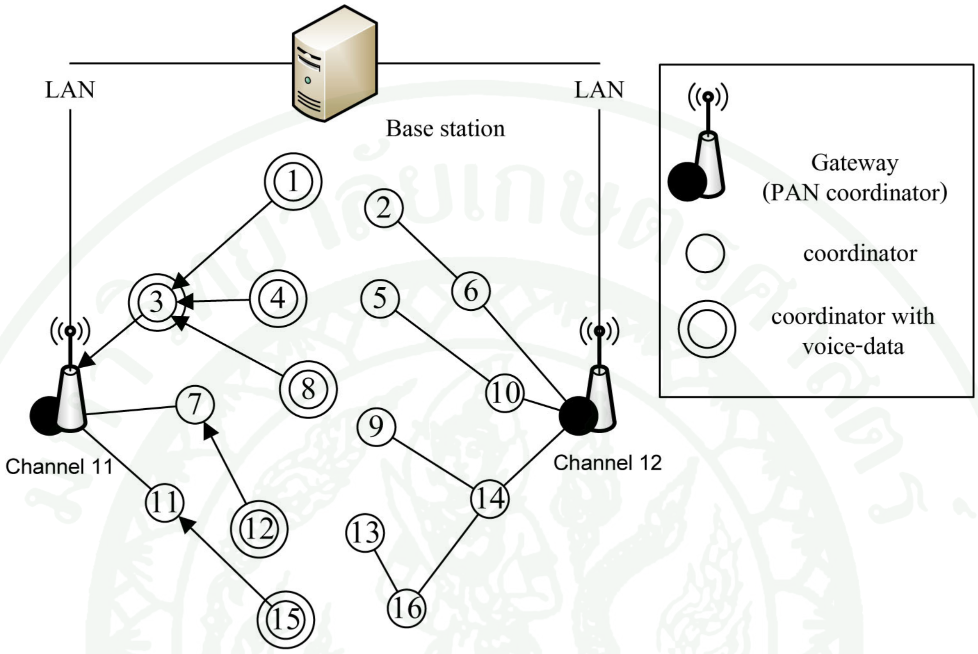
ภาพที่ 48 ร้อยละของข้อมูลที่สูญหายที่ฮ็อปแรกและฮ็อปที่สอง โดยเริ่มนับจากเซ็นเซอร์โหนดที่เป็นเป็นโหนดใบ เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนดในการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4

ภาพที่ 49 แสดงเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 6 เหตุการณ์ จะสังเกตในภาพที่ 46 ได้ว่าอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับช่วงที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 5 เหตุการณ์ เนื่องจากโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 ซึ่งเป็นโหนดที่อยู่ใกล้เกทเวย์เริ่มส่งข้อมูลเสียงไปยังเกทเวย์ ซึ่งมีระยะทางเพียงฮ็อปเดียว ข้อมูลจึงมีโอกาสสูญหายน้อยกว่าการส่งหลายฮ็อป ดังนั้นอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 3 7 และ 11 เริ่มส่งข้อมูล

อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานหลังจากมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงตั้งแต่ 9 ถึง 16 เหตุการณ์ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับช่วงระหว่าง 1 ถึง 8 เหตุการณ์ คือมีการเพิ่มอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงที่โคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 2 5 9 13 และ 16 เริ่มส่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

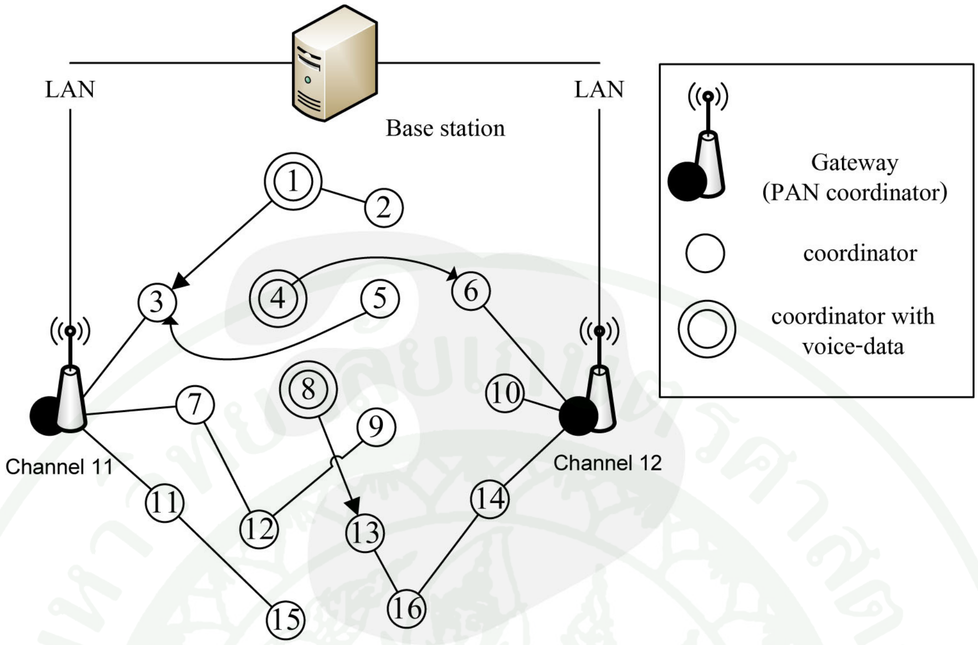
ข้อมูลเสียง จะมีอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 6 10 และ 14 เริ่มส่งข้อมูลเสียง จะมีอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 49 เหตุการณ์เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด จำนวนหกเหตุการณ์ ในการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4

การที่ผลการทดลองของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ในขณะที่มีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงมากกว่าสามเหตุการณ์ขึ้นมีอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานมากกว่าการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธีมาตรฐาน เนื่องจากการปรับเปลี่ยนเครือข่ายส่วนบุคคลที่เข้าร่วมใช้งาน ดังภาพที่ 50 คือผลการเข้าร่วมใช้งานหลังจากมีการย้ายเครือข่ายส่วนบุคคลด้วยขั้นตอนวิธี GAME-BC-M เรียบร้อยแล้ว พบว่าโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 4 และ 8 มีการย้ายไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลที่มีช่องสัญญาณที่ 12 โดยเข้าร่วมใช้งานกับโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 6 และ 13 ตามลำดับ หลังจากโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 4 และ 8 ย้ายเครือข่ายส่วนบุคคล มีผลให้เครือข่ายส่วนบุคคลที่ย้ายไปใหม่มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น จึงมีการย้ายโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 2 5 และ 9 มายังเครือข่ายบุคคลที่ใช้ช่องสัญญาณที่ 11 เพื่อเป็นการลดอัตราการรับ-ส่งข้อมูลในเครือข่ายส่วนบุคคลที่ใช้ช่องสัญญาณที่ 12

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

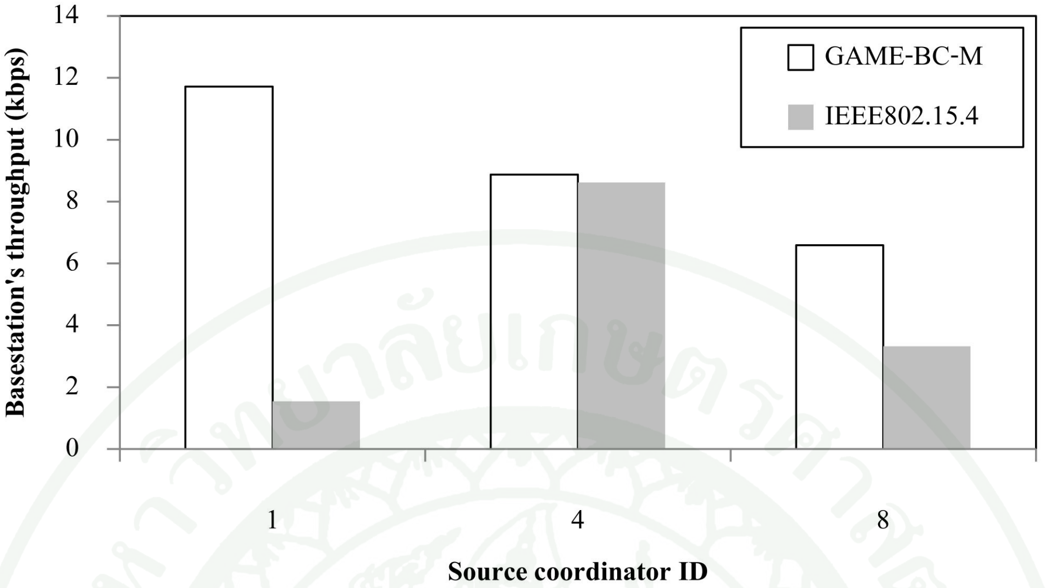


ภาพที่ 50 เหตุการณ์เมื่อมีการเพิ่มเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด จำนวนสามเหตุการณ์ ในการเข้าร่วมใช้งานแบบ GAME-BC-M

เมื่อพิจารณาอัตราการรับข้อมูลของโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 1 4 และ 8 ที่สถานีฐาน เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวนสามเหตุการณ์ เปรียบเทียบระหว่างการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ดังภาพที่ 51 พบว่าเมื่อมีการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธี GAME-BC-M อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานของโคออร์ดิเนเตอร์เบอร์ 1 และ 8 เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธี IEEE802.15.4 อย่างเห็นได้ชัด เป็นผลให้อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานเมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวนสามเหตุการณ์ในภาพที่ 46 ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M สูงกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4

การอธิบายดังกล่าวสามารถใช้อธิบายว่าการเข้าร่วมใช้งานด้วยวิธี GAME-BC-M จะมีอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานมากกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 เมื่อมีเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงตั้งแต่สามเหตุการณ์ขึ้นไป ในภาพที่ 46 ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

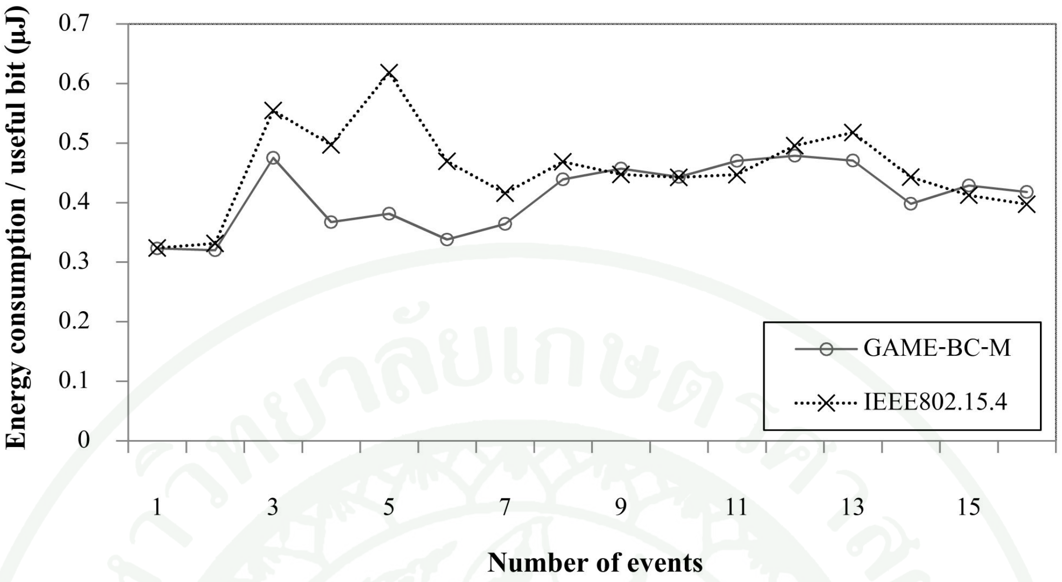


ภาพที่ 51 เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด จำนวนสามเหตุการณ์ ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4

ข. เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งบิต

ภาพที่ 52 แสดงการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด เปรียบเทียบกันระหว่างการเข้าร่วมใช้งาน GAME-BC-M และการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 โดยเฉลี่ยการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิตของทั้งสองขั้นตอนวิธีจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นแต่ในช่วงที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวนสามถึงเจ็ดเหตุการณ์ที่ขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 มีค่าสูงกว่าการเข้าร่วมใช้งานแบบ GAME-BC-M ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการใช้พลังงานที่มากกว่านี้ เป็นผลมาจากการสูญหายของข้อมูลจำนวนมากในช่วงเหตุการณ์ดังกล่าว ทำให้ข้อมูลที่ประสบความสำเร็จมีจำนวนลดลง มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



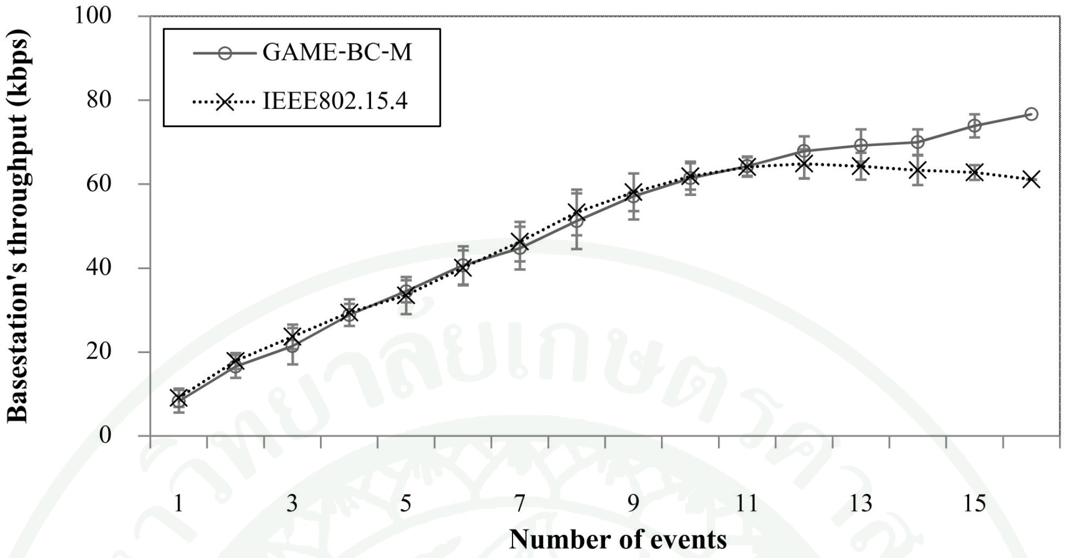
ภาพที่ 52 เปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับที่กำหนด ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4

3.2.2 ผลการทดลองที่มีการสุ่มบริเวณที่เกิดเหตุการณ์

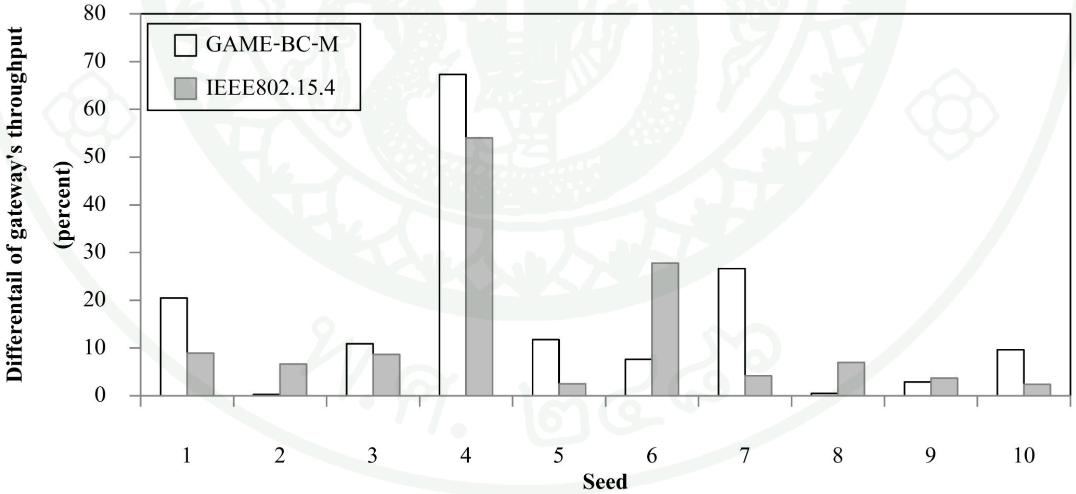
ก. เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน

ภาพที่ 53 แสดงอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีเการสุ่มเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียง โดยเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 จากการสังเกตพบว่าช่วงที่มีการส่งข้อมูลจำนวน 1-12 เหตุการณ์ อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานจะมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองขั้นตอนวิธี แต่เมื่อจำนวนเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงมากกว่าสิบสองเหตุการณ์ขึ้นไป จะพบว่าขั้นตอนวิธี GAME-BC-M มีอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 จะมีอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 53 เปรียบเทียบอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับแบบสุ่มของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

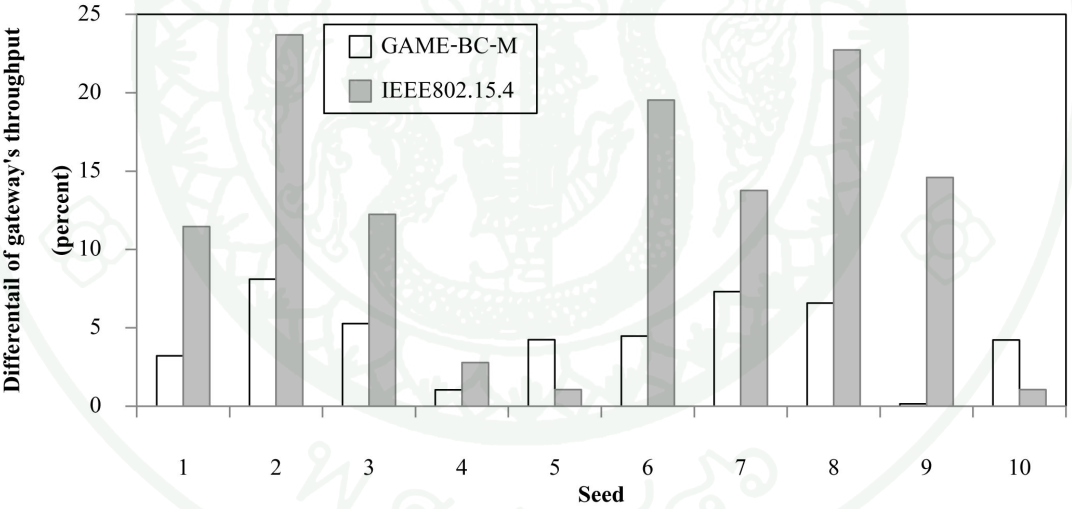


ภาพที่ 54 ส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์ ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 8 เหตุการณ์ ภายในช่วงเวลา 400-410 วินาทีหลังจากเริ่มการทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ในแต่ละเหตุการณ์ที่สุ่มขึ้น

การที่อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานของทั้งสองขั้นตอนวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงที่มีการส่งข้อมูลเสียง 1-12 เหตุการณ์ สามารถอธิบายได้ด้วยภาพที่ 54 ซึ่งเป็นผลการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการหาค่าส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์แต่ละตัวของเหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 8 เหตุการณ์ ภายในช่วงเวลา 400-410 วินาทีหลังจากเริ่มการทดลอง ซึ่งเป็นเวลาที่โคออดิเนเตอร์แต่ละตัวเข้าร่วมใช้งานกับเครือข่ายส่วนบุคคลเรียบร้อยแล้ว โดยเปรียบเทียบกันระหว่างขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ในแต่ละเหตุการณ์ที่สุ่มขึ้น ซึ่งพบว่าในบางเหตุการณ์ที่สุ่มขึ้นเช่นเหตุการณ์ที่ 1 6 8 และ 9 ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีค่าส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์แต่ละตัวต่ำกว่าขั้นตอนวิธี IEEE802.15.4 แสดงว่าขั้นตอนวิธี GAME-BC-M สามารถทำให้อัตราข้อมูลของทั้งสองเกทเวย์มีความสมดุลกัน แต่ในบางเหตุการณ์ ขั้นตอน GAME-BC-M กลับทำให้เกทเวย์ทั้งสองมีอัตราการรับข้อมูลไม่สมดุลกัน เนื่องจากมีการย้ายโคออร์ดิเนเตอร์บางตัวไปยังเกทเวย์รอบข้างทั้งๆ ที่อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ผลจึงทำให้ความสมดุลของอัตราการรับข้อมูลในแต่ละเกทเวย์ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ไม่แสดงออกถึงความแตกต่างกับขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 เมื่อมีการสุ่มเหตุการณ์การส่งข้อมูลเสียงอย่างกระจายทั่วไปในพื้นที่ทดลอง



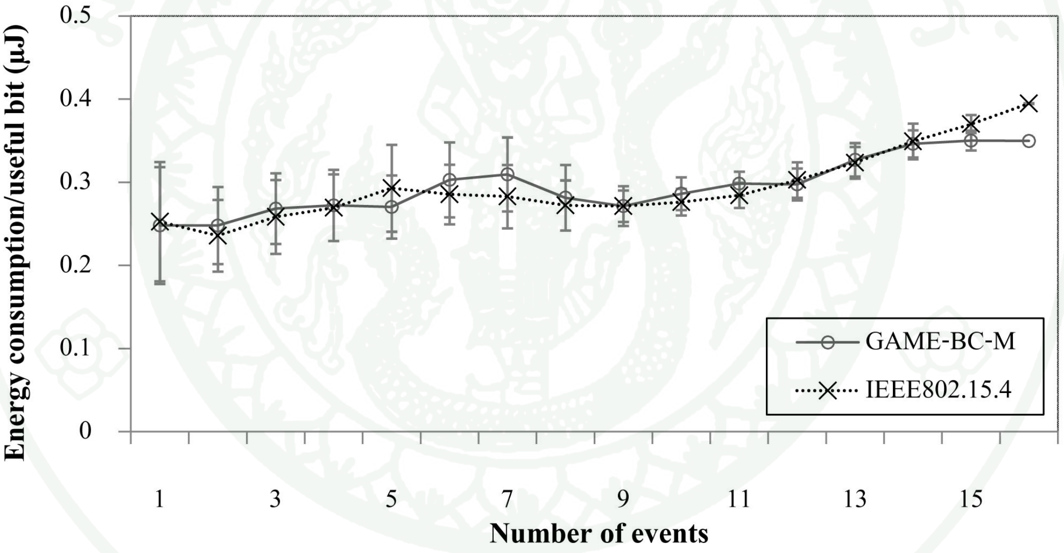
ภาพที่ 55 ส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์ ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 14 เหตุการณ์ ภายในช่วงเวลา 400-410 วินาทีหลังจากเริ่มการทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ในแต่ละเหตุการณ์ที่สุ่มขึ้น

ส่วนการที่อัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานของทั้งสองขั้นตอนวิธีเริ่มมีค่าแตกต่างกัน ในช่วงที่มีการส่งข้อมูลเสียงสิบสองเหตุการณ์ขึ้นไป สามารถอธิบายได้ด้วยภาพที่ 55 ซึ่งเป็นผลการทดลองจากการหาค่าส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลของเกทเวย์แต่ละตัวของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เหตุการณ์ที่มีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 14 เหตุการณ์ ภายในช่วงเวลา 400-410 วินาทีหลังจากเริ่มการทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ในแต่ละเหตุการณ์ที่สุ่มขึ้น ซึ่งพบว่าในเหตุการณ์ส่วนมาก ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีค่าส่วนต่างของอัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์แต่ละตัวต่ำกว่าขั้นตอนวิธี IEEE802.15.4 แสดงว่าส่วนมากแล้วขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะช่วยปรับอัตราการรับข้อมูลของแต่ละเกทเวย์ให้มีความสมดุลกัน ผลจึงทำให้ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M มีอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานสูงกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 เมื่อมีการสุ่มเหตุการณ์การส่งข้อมูลเสียงเป็นจำนวนมากกว่า 12 เหตุการณ์ขึ้นไป

ข. เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต



ภาพที่ 56 เปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับแบบสุ่ม ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M และมาตรฐาน IEEE802.15.4 ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 56 แสดงการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงตามลำดับแบบสุ่ม เปรียบเทียบกันระหว่างการเข้าร่วมใช้งาน GAME-BC-M และการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 เมื่อมีการส่งข้อมูลเสียงจำนวน 1-12 เหตุการณ์ใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิตของทั้งสองขั้นตอนวิธีจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่

ในช่วงที่มีการส่งข้อมูลเสียงเหตุการณ์ที่ขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 มีค่าสูงกว่าการเข้าร่วมใช้งานแบบ GAME-BC-M ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการใช้พลังงานที่มากกว่านี้ เป็นผลมาจากการสูญหายของข้อมูลจำนวนมากในช่วงเหตุการณ์ดังกล่าว ทำให้ข้อมูลที่ประสบความสำเร็จมีจำนวนลดลง มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต

3.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดในหัวข้อ 3.2 สามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีประสิทธิภาพกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ทั้งในด้านอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานและในด้านการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต ในกรณีที่เซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง เข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวใดตัวหนึ่งเป็นจำนวนมาก ดังเช่นผลการทดลองจากการกำหนดลำดับการเกิดเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงในหัวข้อที่ 3.2.1 แต่ถ้าเซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงถูกจัดวางอย่างกระจายทั่วทั้งระบบ ขั้นตอน GAME-BC-M จะให้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกับขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 แต่เมื่อใดก็ตามที่เซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงมีการเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์อย่างไม่สมดุล ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะช่วยปรับปรุงการเข้าร่วมใช้งาน เพื่อรักษาอัตราการรับข้อมูลในแต่ละเกทเวย์ให้มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ผลรวมของอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยลดพลังงานที่ใช้ต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิตลงด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

จากผลการทดลองทั้งหมดในหัวข้อ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S ที่เป็นวิธีการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำ เสนอเพื่อแก้ไขปัญหาการสูญเสียข้อมูลหรือได้รับข้อมูลล่าช้า ภายในช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมาก ในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้ ซึ่งมีเกทเวย์มากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไป และการส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โหนดกับเกทเวย์มีระยะทางฮ็อปเดียว เปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 และขั้นตอนวิธี MINDIST ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธี GAME-BC-S มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธีทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบ โดยจะมีการทำงานที่คล้ายคลึงกับขั้นตอนวิธี MINDIST เมื่อยังมีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงจำนวนน้อย แต่เมื่อใดก็ตามที่มีเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้น คุณสมบัติในการปรับตัวของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S ที่มีการย้ายการเข้าร่วมใช้งานของเซ็นเซอร์โหนดบางตัวไปยังเกทเวย์ที่อยู่ไกลกว่าเกทเวย์เดิมที่เข้าร่วมใช้งานอยู่ เพื่อช่วยรักษาประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสาร โดยที่ยังมีระดับการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกับขั้นตอนวิธี MINDIST

การคำนวณ integer program ในขั้นตอนวิธี GAME-BC-S นั้นจะมีตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณคือ $r_{\max}$ มาจากการกำหนดค่าเริ่มต้น r_{init} จากการทดลองเลือกให้มีค่าเท่ากับ 60 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าประมาณที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 1.3.4 บทอุปกรณ์และวิธีการ โดยค่าที่เลือกมานี้อาจจะไม่เหมาะสมกับทุกเครือข่าย จะต้องมีการเลือกเฟ้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการปรับค่า r_{init} ให้มีค่าน้อยจะทำให้มีการย้ายเซ็นเซอร์โหนดไปยังเกทเวย์รอบข้าง เมื่อมีอัตราการส่งข้อมูลไม่มากนัก โดยอาจจะยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวของเกทเวย์ที่สามารถรองรับได้ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานของเซ็นเซอร์โหนดที่ต้องส่งข้อมูลไปยังเกทเวย์ที่อยู่ไกลอย่างไม่จำเป็น แต่ถ้า r_{init} มีค่ามาก การย้ายเซ็นเซอร์โหนดไปยังเกทเวย์รอบข้างจะเริ่มกระทำเมื่อมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงมากขึ้น ซึ่งในบางทีอาจจะเลยจุดอิ่มตัวของเกทเวย์ไปแล้วก็ได้ ทำให้มีการสูญหายของข้อมูลจำนวนมากก่อนการปรับเปลี่ยนการเข้าร่วมใช้งาน นอกจากนี้ค่า r_{step} ยังมีผลต่อการทำงานของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ด้วย โดยจะเป็นการค่อยๆ เพิ่มค่า $r_{\max}$ เพื่อหาคำตอบ ถ้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดไม่ได้ ก็จะต้องเสียเวลาในการเพิ่มค่า $r_{\max}$ และคำนวณหาคำตอบใหม่ ถ้า r_{step} มีค่าต่ำไปก็จะมีการคำนวณหลายครั้งเกิดขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ที่เป็นวิธีการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ เพื่อแก้ไขปัญหาการสูญเสียข้อมูล หรือได้รับข้อมูลล่าช้าภายในช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมาก ในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้ ซึ่งมีเกทเวย์มากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไป และการส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โหนดกับเกทเวย์มีระยะทางหลายฮ็อป จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเข้าร่วมใช้งานด้วยขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ต่อเมื่อมีอัตราการรับส่งข้อมูลในเครือข่ายในระดับสูง หรือแต่ละโหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงมีการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์อย่างไม่สมดุล เป็นกลุ่มก้อนอยู่กับเกทเวย์ตัวเดียว ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ก็จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ทั้งด้านอัตราการรับข้อมูลของสถานีฐาน และการใช้พลังงานต่อข้อมูลที่ประสบความสำเร็จหนึ่งบิต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีในการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ ที่มีชื่อว่านโยบายการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ สำหรับลดการใช้พลังงาน โดยคำนึงถึงข้อจำกัดของแบนด์วิดท์ (Gateway Association policy for Minimum Energy with Bandwidth Constraint, GAME- BC) เพื่อแก้ไขปัญหาการสูญเสียข้อมูลหรือได้รับข้อมูลล่าช้าภายในช่วงเวลาที่มีการส่งข้อมูลปริมาณมาก ในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายลำดับชั้นที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของต้นไม้ และมีเกทเวย์มากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไป โดยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอได้แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนวิธีคือ ขั้นตอนวิธีสำหรับเครือข่ายที่มีการส่งข้อมูลเพียงฮ็อปเดียว (GAME-BC-S) และขั้นตอนวิธีสำหรับเครือข่ายที่มีการส่งข้อมูลหลายฮ็อป (GAME-BC-M) โดยทั้งสองวิธีมีเทคนิคคือการปรับปรุงการเข้าร่วมใช้งานของเซ็นเซอร์โหนดในแต่ละเกทเวย์ให้มีอัตราการรับข้อมูลในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เพื่อลดปัญหาอัตราการรับข้อมูลในเกทเวย์ตัวใดตัวหนึ่งมีค่ามากเกินไป

การออกแบบขั้นตอนวิธี GAME-BC-S จะมีขั้นตอนในการตัดสินใจเลือกย้ายเซ็นเซอร์โหนดบางตัวในเครือข่ายส่วนบุคคลที่เกทเวย์มีอัตราการรับข้อมูลสูง ไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลที่อยู่รอบข้าง โดยคาดหวังว่าการย้ายเซ็นเซอร์โหนดบางตัวจะทำให้อัตราการรับข้อมูลในเครือข่ายส่วนบุคคลเดิมลดลง โดยการตัดสินใจทั้งหมดจะเป็นการคำนวณที่ศูนย์กลาง คือที่สถานีฐาน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธี GAME-BC-S มีประสิทธิภาพเหนือว่าขั้นตอนวิธีการเข้าร่วมใช้งานแบบมาตรฐาน IEEE802.15.4 และขั้นตอนวิธีแบบ MINDIST ทั้งในด้านอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐาน, ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูล, ร้อยละของความสำเร็จในการส่งข้อมูล โดยมีอัตราการใช้พลังงานต่อความสำเร็จในการส่งข้อมูลหนึ่งบิตที่ใกล้เคียงกัน

ข้อจำกัดของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S มีสองประการ ประการแรกคือการคำนวณผลการเข้าร่วมใช้งานต้องมีการกระทำที่ศูนย์กลาง ดังนั้นจึงต้องมีการเก็บข้อมูลที่จำเป็น เช่นตำแหน่งของเซ็นเซอร์โหนด ถ้าระบบมีขนาดเล็กอาจจะใช้วิธีการบันทึกและป้อนให้เป็นพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธี GAME-BC-S หรืออีกวิธีหนึ่งถ้าระบบมีขนาดใหญ่ อาจจะให้เซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัวมีการติดอุปกรณ์ระบบจีพีเอส ซึ่งสามารถระบุตำแหน่งของตนเอง และส่งตำแหน่งของตัวเองกลับไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยังสถานีฐาน ข้อจำกัดประการที่สองคือการคำนวณที่ศูนย์กลางเป็นการคำนวณ integer program ซึ่งต้องใช้พลังในการประมวลผลที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงไม่สมควรใช้เซ็นเซอร์โหนดที่มีพลังในการประมวลผลต่ำทำหน้าที่ในการคำนวณนี้ โดยสามารถแก้ไขได้โดยออกแบบให้ส่วนที่ทำหน้าที่ในการคำนวณอยู่ที่สถานีฐานแทน

ส่วนการออกแบบขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในเครือข่ายส่วนบุคคลที่มีการส่งข้อมูลหลายฮ็อป และแยกการคำนวณที่ศูนย์กลางไปยังเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัว โดยอาศัยเทคนิคในการส่งข้อความเตือนผ่านมากับบีคอนเฟรม ที่ต้องส่งในทุกระยะเวลาอยู่แล้ว โดยข้อความเตือนจะถูกส่งจากโคออร์ดิเนเตอร์ที่ตรวจพบว่าช่วงระยะห่างระหว่างการทิ้งข้อมูลด้วยสาเหตุที่ค่า LQI ต่ำเกินไป มีค่าน้อยเกินค่ากำหนด จะส่งข้อความเตือนไปยังโหนดลูกทั้งหมดที่ร่วมใช้งาน เมื่อโหนดลูกซึ่งเป็นโหนดใบได้รับข้อความ จะมีกระบวนการในการตัดสินใจสำหรับย้ายเครือข่ายส่วนบุคคลไปยังเครือข่ายรอบข้าง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ในกรณีที่อัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์มีจำนวนน้อย แต่เมื่ออัตราการรับข้อมูลที่เกทเวย์มีค่าเพิ่มขึ้น หรือเซ็นเซอร์โหนดที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงเข้าร่วมใช้งานกับเกทเวย์ตัวเดียวกันมากขึ้น ขั้นตอนวิธี GAME-BC-M จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีมาตรฐาน IEEE802.15.4 ทั้งในด้านอัตราการรับข้อมูลที่สถานีฐานและการใช้พลังงานต่อความสำเร็จในการส่งข้อมูลหนึ่งบิต

ข้อจำกัดของขั้นตอนวิธี GAME-BC-M คือขั้นตอนที่โหนดใบตัดสินใจย้ายไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลเครือข่ายใหม่ โหนดใบโหนดนั้นไม่สามารถทราบได้เลยว่าเครือข่ายส่วนบุคคลเครือข่ายใหม่นั้นมีสถานะของเครือข่ายเป็นอย่างไรบ้าง ดังนั้นจึงอาจจะเกิดเหตุการณ์ที่โหนดใบย้ายไปยังเครือข่ายบุคคลเครือข่ายใหม่แล้วพบว่าอัตราการรับข้อมูลของโคออร์ดิเนเตอร์ที่ขอเข้าร่วมใช้งานอยู่ในระดับที่สูงเช่นเดียวกับเครือข่ายเก่า ทำให้โหนดใบตัดสินใจย้ายไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลอื่นซึ่งในกรณีที่เลวร้ายที่สุดก็คือกลับไปยังเครือข่ายส่วนบุคคลแรกที่ย้ายออกมา ทำให้เกิดเหตุการณ์ย้ายกลับไปกลับมา (ping-pong effect) เกิดขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

ขั้นตอนวิธีการเข้าร่วมใช้งานเกทเวย์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี ตัวอย่างเช่นตัวแปร r_{init} และ r_{step} ในขั้นตอนวิธี GAME-BC-S ซึ่งในการทดลองต่างๆ จะมีการทดลองโดยเลือกตัวแปรเหล่านี้ทำการทดลองเพียงค่าเดียว ดังนั้นควรจะมีการศึกษาต่อไปเกี่ยวกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเหล่านี้

นอกจากนี้ในขั้นตอนวิธีแบบ GAME-BC-M ควรทดสอบวิธีการสำหรับตรวจสอบจุดอิ่มตัว และวิธีการสุ่มค่า GA-COUNTER แบบอื่นๆ เพื่อเป็นผลศึกษาเพิ่มเติม และขั้นตอนวิธี GAME-BC-M ยังมีข้อจำกัดที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่าปิงปองเกิดขึ้น ซึ่งในการทดลองจะแก้ไขโดยกำหนดว่าโหนดจะย้ายเครือข่ายส่วนบุคคลได้เพียงครั้งเดียวเพื่อแก้ไขปัญหานี้ชั่วคราว ดังนั้นอาจจะมีการพัฒนาต่อให้เซ็นเซอร์โหนดสามารถรู้สถานการณ์ของเครือข่ายส่วนบุคคลรอบข้าง เพื่อประกอบการตัดสินใจในการย้ายเครือข่าย เพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์แบบปิงปองดังที่กล่าวมาได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Aoun, B. and R. Boutaba. 2006. Clustering in WSN with Latency and Energy Consumption Constraints**. J. Netw. Syst. Manage**. 14, 3: 415-439.

Cerpa, A., J. Elson, M. Hamilton, J. Zhao, D. Estrin, and L. Girod. 2001. Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology, pp. 20-41. *In* **Workshop on Data Communication in Latin America and the Caribbean** (San Jose, Costa Rica). SIGCOMM LA '01. ACM, New York, NY.

Chamswarng, A., and C. Jaikaeo. 2009. Gateway Association Policy for Minimum Energy in Two-Tier Wireless Sensor Networks with Bandwidth Constraint, pp. 144-149. *In* **The 6^{th} International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering 2009**, vol. 1. (Phuket, Thailand, May 13-15, 2009).

Cipollone, E., F. Cuomo, S. Della Luna, U. Monaco, and F. Vacirca. 2007. Topology Characterization and Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Multi-Sink Wireless Sensor Networks, pp. 13-15. *In* **Med-Hoc-Net** (Corfu, Greece, June 13–15, 2007). n.p.

Corke, P., P. Valencia, P. Sikka, T. Wark, and L. Overs. 2007. Long-duration solar-powered wireless sensor networks, pp. 33-37. *In* **Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors** (Cork, Ireland, June 25 - 26, 2007). EmNets '07. ACM, New York, NY.

Duarte, M. F. and Y.H. Hu. 2004. Vehicle classification in distributed sensor networks. *In* **J. Parallel Distrib. Comput**. No. 7, Vol. 64, (July, 2004). Academic Press, Inc, Orlando, FL, USA.

Gislason, D. 2008**. Zigbee Wireless Networking**. Newnes; Pap/Pas edition, Oxford, UK.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Gupta, G., and M. Younis. 2003. Load-balanced clustering of wireless sensor networks, pp. 1848-1852. *In* **Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference on** , vol.3, (May 11-15, 2003). IEEE, New York, NY.

Heinzelman, W. R., A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. 2000. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. *In* **Proceedings of the 33rd Hawaii international Conference on System Sciences-Volume 8 - Volume 8** (January 04 - 07, 2000). HICSS. IEEE Computer Society, Washington, DC.

José A. Gutiérrez., E. Callaway, and R. Barrett. 2007. **Low-Rate Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4 (Paperback)**. 2nd ed. IEEE Standards Information Network/IEEE Press, New York, NY.

Kottapalli, V.A., A.S. Kiremidjian, J.P. Lynch, E.K. Carryer, W.L. Thomas, H. Kincho, and Y. Lei. 2003. Two-tiered wireless sensor network architecture for structural health monitoring, pp. 8-19. *In* Liu, Shih-Chi**.** **Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures** (03 March, 2003). SPIE--The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA.

Koubâa A., M. Alves., and E. Tovar. 2007. IEEE 802.15.4: a Federating Communication Protocol for Time-Sensitive Wireless Sensor Networks, pp. 19-49. *In* M. P. Mahalik**.** **Sensor Networks and Configurations: Fundamentals, Techniques, Platforms, and Experiments**. Springer, Verlag.

Lee, D., W. Lee, and J. Kim. 2007. Genetic Algorithmic Topology Control for Two-Tiered Wireless Sensor Networks, pp. 385-392. *In* **Proceedings of the 7th international Conference on Computational Science**, Part Iv: ICCS 2007 (Beijing, China, May 27 - 30, 2007). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Li, M., D. Ganesan, and P. Shenoy. 2006. PRESTO: feedback-driven data management in sensor networks, pp. 23-23. *In* **Proceedings of the 3rd Conference on Networked Systems Design & Implementation**, Vol. 3, (San Jose, CA, May 08 - 10, 2006). USENIX Association, Berkeley, CA.

Melodia, T., D. Pompili, V.C. Gungor, and I.F. Akyildiz. 2007. Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**. 6, 10: 1116-1129.

Mhatre, V., and C. Rosenberg. 2004. Homogeneous vs heterogeneous clustered sensor networks: a comparative study, pp. 3646-3651. *In* **Communications, 2004 IEEE International Conference On**, vol.6, (June 20-24, 2004). IEEE, New York, NY.

Naumowicz, T., B.Schröter, and J. Schiller. 2009. Prototyping a software factory for wireless sensor networks, pp. 369-370. *In* **Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems** (Berkeley, California, November 04 - 06, 2009). SenSys '09. ACM, New York, NY.

Park, T.R., T.H. Kim, J.Y. Choi, S. Choi, and W.H. Kwon. 2005. Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA. **IEEE Electronics Letters**. 41: 1017-1019.

Rao V.P. 2006. **Simulation of IEEE 802.15.4/ZigBee with Network Simulator-2 (ns-2)**. Dresden University of Technology. Available Source: http://www.ifn.et.tu-dresden.de/~marandin/ZigBee/ZigBeeSimulation.html, Jan 24, 2009.

Varchola , M., and M. Drutarovský. 2007. Zigbee based home automation wireless sensor network. *In* **Acta Electrotechnica et Informatica**, No. 4, Vol. 7. Technical University of Košice, Slovak Republic.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

WeiZhao, W., W. Song, X. Li, and K. Nejad. 2007. Optimal Cluster Association in Two-Tiered Wireless Sensor Networks, pp 110-123. *In* **Distributed Computing in Sensor Systems**, vol. 4549. Springer, Berlin, Heidelberg.

Ye, F., H. Luo, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang. 2002. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks, pp. 148-159. *In* **Proceedings of the 8th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking** (Atlanta, Georgia, USA, September 23 - 28, 2002). MobiCom '02. ACM, New York, NY.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	อมรเดช แจ่มสว่าง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	11 สิงหาคม 2528
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลตำรวจ กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) เกียรตินิยมอันดับสอง ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรคอมพิวเตอร์ ระดับ 4
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์