



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง กระบวนการสร้างเส้นทางระบบอาณานิคมแบบร่วมประมวลผลเพื่อรวมข้อมูล
สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

โดย นายทัสยุ สร้อยสุนทร

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

18 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศิริชัย รุจิพัฒน์พงษ์)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ กীরติวินทร)

กรรมการ

(อาจารย์ ปรัชญาพร เลี้ยงสุทธีสกันธ์)

กระบวนการสร้างเส้นทางระบบอานานิคมแบบร่วมประมวผลเพื่อรวมข้อมูล
สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

นายทัสยุ สร้อยสุนทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายทัตสุ สร้อยสุนทร
ชื่อวิทยานิพนธ์ : กระบวนการสร้างเส้นทางระบบอาณานิคมมดแบบรวมประมวลผล
เพื่อรวมข้อมูลสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.ศิริชัย รุจิพัฒน์พงศ์
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

เป้าหมายแรกของการ ออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ ไร้สายเป็น การ ลดการ ใช้พลังงาน ใน เครือข่าย ให้ น้อยที่สุด งาน วิทยานิพนธ์ นี้ มีจุดประสงค์ เพื่อ ลด ใช้พลังงาน โดยการ ปรับปรุง กระบวนการ ค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด (Ant Colony Routing) เพื่อ ใช้สร้างเส้นทางที่ เหมาะสมที่สุดในการรวมข้อมูล หนึ่งในกระบวนการลดพลังงานที่ รู้จักกันดีคือการรวมข้อมูล (Data Aggregation) กระบวนการ นี้มีจุดประสงค์ ในการ ลดจำนวน การ ส่งข้อมูล ในเครือข่าย ลง โดยอาศัยคุณลักษณะที่สัมพันธ์กันของข้อมูลเพื่อลดข้อมูลที่ซ้ำหรือ ไม่จำเป็น อย่างไรก็ตาม ระบบอาณานิคมมดแบบเดิมมีปัญหาในการใช้งาน ปัญหาแรกเป็นการ ค้นหาเส้นทางแบบสุ่มอาจ ทำให้เกิดความล่าช้าหรือ ไม่สามารถ ค้นหาเส้นทาง ได้ งานวิทยานิพนธ์ นี้ นำการ ค้นหาเส้นทาง ระบบตำแหน่ง (Position Based) ที่เรียกว่า PAGER มาร่วมทำงานกับระบบอาณานิคมมดเพื่อ ช่วยในการ ค้นหาเส้นทางเพื่อส่งถึงสถานีฐาน และปัญหาที่สองคือกระบวนการหาเส้นทางแบบ อาณานิคมมดนั้นต้องการการตอบกลับจากสถานีฐานเพื่อเสริม ฟิโรโมนตามเส้นทาง ส่งผลให้ แม้สามารถลดพลังงานที่เกิดจากการรวมข้อมูล แต่ผลรวมของการ ใช้พลังงานมีค่าสูงขึ้นเนื่องด้วย การตอบกลับ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการปรับลดจำนวนการส่งการตอบกลับลงเพื่อให้มีการ ประหยัดพลังงานมากที่สุด จากผลการทดลองด้วย ns2 พบว่าสามารถประหยัดพลังงานมากกว่า PAGER+AGG 17.2% ANT ประมาณ 27.7% และ DD 50.8% และสามารถลดจำนวนการส่งข้อมูล ได้ 26% เมื่อเทียบกับ PAGER+AGG, 68% เมื่อเทียบกับ DD และ ANT 43.96% และมีความสำเร็จ ในการส่งข้อมูลที่ดีกว่า ANT ในขณะที่ความล่าช้าของข้อมูลพอกๆกับ PAGER+AGG

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 61 หน้า)

คำสำคัญ : เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย, การรวมข้อมูล, ระบบอาณานิคมมด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Thasayu Soisoonthorn
Thesis Title : Cooperation Ant Colony Routing to Data Aggregation
for Wireless Sensor Networks
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Dr.Sirichai Rujipattanapong
Academic Year : 2006

Abstract

In this thesis, we present routing protocol for the wireless sensor network that consider the energy efficiency together with energy reduction in order to maximize network lifetime. This thesis present an improvement of ant colony routing using data aggregation to combine correlated data. However, the ant colony routing has many problems. Notably, they request long time for find base station. To solve this problem, this thesis cooperate between PAGER and ant colony protocol for discovering route to base station. Using this method, it can save sensor energy by reducing the acknowledge or backward ant. Evaluated on ns2, the performance results show that the energy used by P-ANT is less than PAGER+AGG 17%, ANT 27.7% and DD 50.8%. As the result, P-ANT can reduce data 26% when compared with PAGER+AGG, 68% with DD and ANT 43.96%. And the delivery data ratio of P-ANT is more than ANT while the data delay is the same as PAGER+AGG.

(Total 61 pages)

Keywords : Wireless Sensor Networks, Data Aggregation, Ant Colony Routing

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร.ศิริชัย รุจิพัฒน์พงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตลอดจนให้ความสะดวกในด้านตำราเอกสารที่ใช้ประกอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ และขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและเจ้าหน้าที่ของภาควิชาทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ทัสยุ สร้อยสุนทร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.4 ขอบเขตการวิจัย	6
บทที่ 2 งานที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 โครงสร้างของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	8
2.2 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สาย	10
2.3 ปัญจัยที่มีผลกระทบในการออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	12
2.4 กระบวนการเข้าใช้สื่อ (Media Access Controls)	15
2.5 กระบวนการค้นหาเส้นทาง	18
2.6 กระบวนการสร้างเส้นทางระบบอาณานิคมมด	27
บทที่ 3 กระบวนการสร้างเส้นทางแบบอาณานิคมมด	36
3.1 กระบวนการสร้างเส้นทาง PAGER	37
3.2 สภาวะแวดล้อมการทำงาน	40
3.3 องค์ประกอบของข้อมูลในอุปกรณ์การตรวจจับ	40
3.4 ชนิดและองค์ประกอบของแพ็คเกจ	40
3.5 ขั้นตอนวิธีกระบวนการสร้างเส้นทางระบบอาณานิคมมด	41
บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพ	46
4.1 การเปรียบเทียบการทำงานในหลากหลายสภาพแวดล้อม	47
4.2 ตัวแปรส่งผลกระทบต่อกระบวนการหาเส้นทาง	51
บทที่ 5 สรุป	54
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก ก	59
ความน่าจะเป็นแบบปกติมาตรฐาน (CDF)	60
ประวัติผู้วิจัย	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ตัวอย่างของการกำหนดเนมมิ่งหรือรายละเอียดข้อมูล	20
3-1 ตัวอย่างข้อมูลต่างๆของโหนดข้างเคียง	40
4-1 ค่าตัวแปรในการจำลองการทำงาน	47

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์เซ็นเซอร์โหนด MICA2DOT	2
2-1 แสดงองค์ประกอบของเซ็นเซอร์โหนด	9
2-2 แสดงการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	9
2-3 แสดงการเกิดปัญหาของ Hidden และ Exposed Terminal	17
2-4 แสดงตัวอย่างการทำงานของ GPSR ขณะเดินทางแบบ Greedy Forwarding	19
2-5 แสดงตัวอย่างการทำงานของ GPSR ขณะเกิดปัญหาช่องว่างของเครือข่าย	19
2-6 แสดงตัวอย่างการทำงานของ DD	20
2-7 แสดงปัญหาการกระจายข้อมูลซ้ำซ้อนแบบ Implosion	21
2-8 แสดงปัญหาการกระจายข้อมูลซ้ำซ้อนแบบ Overlap	22
2-9 แสดงตัวอย่างการทำงานของ SPIN	24
2-10 แสดงตัวอย่างการทำงานของ Agent ใน Rumor Routing	25
2-11 แสดงตัวอย่างการทำงานของ Rumor Routing	26
2-12 รหัสเทียมสำหรับการเดินทางของ fant	30
2-13 รหัสเทียมสำหรับการเดินทางของ bant	31
2-14 แสดงผลการทำงานของ ANT [17] ค่า <i>cost</i> ของเส้นทางต้นไม้	33
2-15 รหัสเทียมสำหรับการเดินทางของ rant	34
3-1 รหัสเทียมสำหรับ PAGER ในการตัดสินใจว่าเป็นโหนดเงาหรือไม่	37
3-2 รหัสเทียมสำหรับ PAGER ในขั้นตอนการแพร่กระจายเงา	38
3-3 รหัสเทียมสำหรับ PAGER ในขั้นตอนการแพร่กระจายค่าใช้จ่าย	38
3-4 แสดงตัวอย่างการทำงานของ PAGER	39
3-5 แสดงองค์ประกอบของแพ็คเกจ hello	41
3-6 แสดงองค์ประกอบส่วนหัวของแพ็คเกจ fant	41
3-7 แสดงองค์ประกอบข้อมูล	41
3-8 แสดงองค์ประกอบส่วนหัวของแพ็คเกจ bant	42
4-1 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะกำหนด rate 5 s/packet	48
4-2 แสดงอัตราความสำเร็จในการรับข้อมูลขณะกำหนด rate 5 s/packet	48
4-3 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูส่งทั้งหมดขณะกำหนด rate 5 s/packet	49
4-4 แสดงจำนวนแพ็คเกจที่ถูส่งทั้งหมดขณะกำหนด rate 5 s/packet	49
4-5 แสดงการความล่าช้าในการรับข้อมูลขณะกำหนด rate 5 s/packet	50
4-6 แสดงผลการทำงานของ P-ANT ค่า <i>cost</i> ของเส้นทางต้นไม้	50
4-7 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะกำหนด rate 2 s/packet	51
4-8 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะเปลี่ยนแปลงค่า Z	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-9 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะเปลี่ยนแปลงค่า k	52
4-10 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะเปลี่ยนแปลงค่า ρ	53

บทที่ 1

บทนำ

จากการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตโปรเซสเซอร์ เซ็นเซอร์ และวงจรสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย มีแนวโน้มของราคาต้นทุนในการผลิตและอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำมาก จนสามารถนำมาประยุกต์สร้างเป็นเซ็นเซอร์โหนด (Sensor Node) ที่มีความสามารถในการตรวจจับ รวบรวมข้อมูล แหล่งพลังงานและการสื่อสารแบบไร้สายภายในอุปกรณ์เดียวกัน นอกจากนี้ยังมีความสะดวกต่อการใช้งานและมีความเป็นไปได้ในการตรวจจับสภาพแวดล้อมขนาดใหญ่ซึ่งประกอบด้วยจำนวนอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สายจำนวนมากร่วมกันตรวจจับ เช่น อุณหภูมิ, แสง, เสียง, ภาพและความชื้น ข้อมูลที่เซ็นเซอร์แต่ละโหนดอ่านได้จะทำการประมวลผลและตัดสินใจเพื่อส่งบนสื่อไร้สายและส่งผ่านบนเครือข่ายไปยังผู้ที่ต้องการข้อมูลซึ่งอยู่ภายนอกหรือภายในพื้นที่ตรวจจับภายในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานและองค์ประกอบของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ปัญหากระบวนการแก้ปัญหา ประโยชน์และขอบเขตของการทำงานในวิทยานิพนธ์นี้

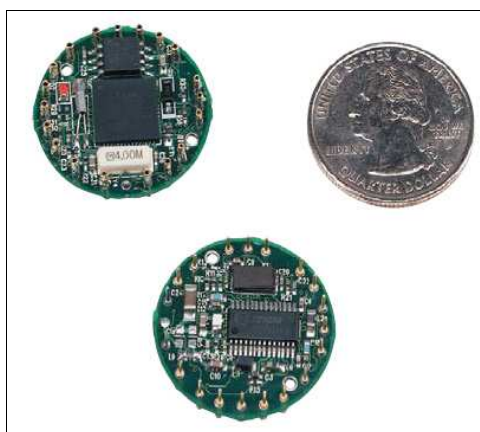
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

1.1.1 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นการพัฒนาทางเทคโนโลยีเพื่อข้ามขั้นสู่นาโนเทคโนโลยี ซึ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และราคาที่แพง ต่อการใช้อำนาจความสะดวกต่อผู้ใช้งาน ทำให้การขยายตัวของเทคโนโลยีเข้าสู่ชีวิตประจำวันยังมีข้อจำกัด ที่สามารถติดต่อสื่อสารได้กับภายในเครือข่ายใกล้เคียงหรือเครือข่ายระยะไกล ก่อให้เกิดมูลค่าทางการค้าและประโยชน์ต่างๆ ที่สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง

ในปัจจุบัน อุปกรณ์ตรวจจับที่มีการนำมาใช้บ้างแล้ว ได้แก่ อุปกรณ์ในตระกูล MICA โดย University of California, Berkeley [1] เช่น MICA2DOT มีขนาดประมาณ 1.0×0.25 นิ้ว น้ำหนักประมาณ 3 กรัม (ไม่รวมขนาดและน้ำหนักของกล่องบรรจุแบตเตอรี่) โดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 3 โวลต์ สามารถส่งสัญญาณในสถานที่กลางแจ้งได้ไกลราว 500 ถึง 1000 ฟุต หรือประมาณ 150 ถึง 300 เมตร โดยใช้กระแสสูงสุดในการส่งประมาณ 27 มิลลิแอมแปร์ และใช้กระแสสูงสุดในการรับสัญญาณประมาณ 20 มิลลิแอมแปร์ [2] แสดงในภาพที่ 1-1 บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่าง Jennic [3] ได้ผลิตอุปกรณ์ SN รุ่น JS24Z121 เป็นอุปกรณ์ชิพเดี่ยว (Single Chip) ซึ่งใช้มาตรฐาน IEEE802.15.4 มีขนาดประมาณ 8×8 มิลลิเมตร โดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 2.2 ถึง 3.6 โวลต์ สามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติภายใต้อุณหภูมิระหว่าง -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส อุปกรณ์นี้จะใช้กระแสในการส่งสัญญาณสูงสุด 50 มิลลิแอมแปร์ และใช้กระแสในการรับสัญญาณสูงสุด 40 มิลลิแอมแปร์ [3] นอกจากนี้ยังมีบริษัท Invocon [4] ซึ่งได้ผลิตอุปกรณ์ SN ที่มีชื่อว่า Extended-Life Micro-Miniature Wireless Instrumentation System (ELMWIS) โดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า

Micro-Miniature Wireless Instrumentation System (MicroWIS) และ Micro-Miniature Data Acquisition Recorder (MicroRecorder) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้อุปกรณ์สามารถติดต่อสื่อสารและเก็บข้อมูลได้ ELMWIS เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาด $7 \times 5.9 \times 3.1$ เซนติเมตร ใช้แบตเตอรี่ขนาด 2.8 ถึง 4.0 โวลต์ โดยมีอายุการใช้งานยาวนานถึงประมาณ 10 ปี และสามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติภายใต้อุณหภูมิระหว่าง -35 ถึง 85 องศาเซลเซียส [4]



ภาพที่ 1-1 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์เซ็นเซอร์โหนด MICA2DOT

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับมีขนาดเล็กและมีราคาถูก จึงทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ในพื้นที่ตรวจจับได้เป็นจำนวนมากถึงร้อยหรือพันอุปกรณ์ เพื่อให้การตรวจจับมีประสิทธิภาพและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการทำงานของระบบเครือข่ายที่มีการควบคุมจากส่วนกลาง เนื่องจากการทำงานโดยการควบคุมจากส่วนกลาง ส่งผลให้ระบบไม่สามารถขยายขนาดใหญ่ได้ อีกทั้งอุปกรณ์ตรวจจับยังเป็นที่ติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งหรือเป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ก็ได้ ซึ่งเมื่อเครือข่ายตรวจจับเป็นแบบพลวัต จึงไม่ควรมีการวางโครงสร้างพื้นฐานสำหรับระบบเครือข่ายไว้ก่อน การทำงานของระบบเครือข่ายจึงควรเป็นการจัดการระบบด้วยตนเอง [5]

อุปกรณ์ตรวจจับจะกระจายอยู่ในพื้นที่ตรวจจับอย่างหนาแน่น และแต่ละอุปกรณ์อยู่ใกล้กัน จะทำให้การติดต่อสื่อสารแบบที่เรียกว่ามัลติฮอป (Multihop Communication) ซึ่งก็คือการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์โดยผ่านอุปกรณ์ที่อยู่ในเส้นทางระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองนั้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเซ็นเซอร์โหนดที่ไม่สามารถสื่อสารได้โดยตรงถึงสถานีฐานเนื่องจากมีแหล่งพลังงานที่จำกัด

1.1.2 การทำงานสื่อสารในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

การที่เซ็นเซอร์โหนดจำนวนมากทำงานเป็นกลุ่มร่วมกันทั้งเครือข่าย ทำให้จำเป็นต้องมีวิธีการสื่อสารกันระหว่างโหนดเพื่อจะทำงานร่วมกัน ส่วนที่ควบคุมการทำงานดังกล่าวว่าการสื่อสารในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย และในส่วนการสื่อสารนี้จำเป็นต้องมีกระบวนการในการสร้างเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลสถานีฐานซึ่งเราจะเรียกว่ากระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งเป็นส่วนที่มีผลต่อการใช้พลังงานของเครือข่ายอย่างมากเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการรับส่งของอุปกรณ์

การสื่อสารมีการใช้พลังงานในสัดส่วนที่สูงกว่าส่วนอื่นๆ การส่งแพ็คเกจในการสร้างเส้นทางที่มากจะส่งผลกระทบต่อระบบมากและการเลือกเส้นทางของการส่งข้อมูลก็จะมีผลต่อระบบมากเช่นเดียวกัน เช่นการเลือกเส้นทางที่เกิดการรวมข้อมูลได้มาก ก็จะสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าเส้นทางที่ไม่สามารถรวมข้อมูลได้

ดังนั้น งาน วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้น การ ประหยัด พลังงาน ที่ ใช้ใน เครือข่าย เซ็นเซอร์ ไร้สาย ทำงานเพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ส่ง วิทยานิพนธ์นี้เป็นกระบวนการสร้างเส้นทางถึงสถานีฐานเพื่อลดจำนวนการส่งโดยใช้การรวมข้อมูลจากความสัมพันธ์ของข้อมูล

1.1.3 กระบวนการสร้างเส้นทางเพื่อรวมข้อมูล

ข้อมูลที่สะสมจากเซ็นเซอร์โหนดจะส่งถึงสถานีฐานเพื่อประมวลผล แต่การที่เซ็นเซอร์โหนดมีแหล่งพลังงานที่จำกัด ถ้าให้เซ็นเซอร์โหนดทุกโหนดส่งโดยตรงถึงสถานีฐานโดยตรงจะไม่มีประสิทธิภาพอย่างมาก ข้อมูลที่ถูกสร้างจากเซ็นเซอร์โหนดข้างเคียงโดยส่วนใหญ่แล้วมากเกินไปเกินความจำเป็นและมีข้อมูลที่คล้ายกันสูง ข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นจากเครือข่ายขนาดใหญ่โดยทั่วไปจะมีจำนวนมากที่ส่งให้สถานีฐาน ดังนั้นเราต้องการกลไกที่ใช้ในการรวมข้อมูลที่บางเซ็นเซอร์โหนดหรือโหนดในระหว่างเส้นทางเพื่อลดจำนวนการส่งถึงสถานีฐาน ส่งผลให้จำนวนการใช้พลังงานและช่องสัญญาณลดลง ซึ่งเรียกว่าการรวมข้อมูล หรือ Data Aggregation การรวมข้อมูลเป็นการนิยามถึงกระบวนการรวมข้อมูลจากหลายเซ็นเซอร์เพื่อจัดการส่งข้อมูลมีมากเกินไปและทำการผสมรวมข้อมูลที่โหนดระหว่างเส้นทางก่อนถึงสถานีฐาน

ในงานวิจัยของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการรวมข้อมูลนั้น มีหลายงานวิจัยได้ถูกพัฒนาขึ้น เช่น SPIN [6] เป็นกระบวนการทำงานสำหรับการแพร่กระจายข้อมูลโดยใช้การอธิบายข้อมูลในแพ็คเกจที่ต้องการส่งแทน การใช้การอธิบายข้อมูลเช่นนี้ส่งผลให้สามารถประหยัดพลังงานได้ดี แต่ไม่สามารถรับประกันการส่งของข้อมูลได้ เนื่องจากบางโหนดที่อยู่ไกลและโหนดในระหว่างทางอาจไม่ต้องการข้อมูลนี้ DD [7] แทนที่เซ็นเซอร์โหนดจะตัวเริ่มต้นในการส่งข้อมูล (Push) เหมือน SPIN แต่สถานีฐานจะทำการร้องขอข้อมูลกับเซ็นเซอร์โหนดก่อน จากนั้นเซ็นเซอร์โหนดจึงส่งข้อมูลหาสถานีฐาน (Pull) จากนั้นเมื่อเซ็นเซอร์โหนดตรวจจับได้จะทำการส่งข้อมูลไปตามเส้นทางที่สถานีฐานสร้างก่อนหน้าและเป็นไปได้ที่จะส่งหลายเส้นทางหรือใช้การฟLOOD (Flood) ในการส่ง จากนั้นสถานีฐานจะทำการเลือกเส้นทางที่ความล่าช้าต่ำที่สุดที่เซ็นเซอร์โหนดส่งมา จากนั้นสถานีฐานจึงส่งแพ็คเกจเพื่อเสริมในเส้นทางนั้น จากนั้นเซ็นเซอร์โหนดจึงทำการส่งข้อมูลถึงสถานีฐานโดยตรง จากกระบวนการทำงานในการค้นหาเส้นทางจากสถานีฐานถึงเซ็นเซอร์โหนดและจากเซ็นเซอร์โหนดถึงสถานีฐานทำให้เราเรียกว่า Two-Phase Pull Diffusion อย่างไรก็ตาม DD นี้มีค่าใช้จ่ายในการค้นหาเส้นทางที่สูงเมื่อมีหลายเซ็นเซอร์โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลหรือมีหลายสถานีฐาน จึงได้มีการพัฒนา One-Phase Pull Diffusion [8] ที่ใช้การสร้างเส้นทางจากสถานีฐานถึงเซ็นเซอร์โหนดเพียงครั้งเดียว เซ็นเซอร์โหนดจะทำการส่งถึงเส้นทางที่มีความล่าช้าต่ำสุด การทำงานของกระบวนการสร้างเส้นทางทั้งสามนี้เป็นพื้นฐานในการสร้างโครงสร้างการทำงานและการประมวลผลข้อมูลเพื่อช่วยในการสร้าง

เส้นทางของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ก่อให้เกิดงานวิจัยที่ใช้การรวมข้อมูลต่างๆตามมา ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายกระบวนการทำงานในบทที่ 2

ในงานวิจัย [9] ได้ทำการศึกษากระบวนการรวมข้อมูลใน DD โดยใช้กระบวนการรวมข้อมูลที่เรียกว่า Opportunistic Aggregation ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างเส้นทางแบบ DD เพื่อรวมข้อมูลและมีความล่าช้าต่ำ และทำการพัฒนาการสร้างเส้นทางแบบ Greedy Incremental Method ซึ่งทำงานเช่นเดียวกับ GIT [10] โดยเซ็นเซอร์โหนดที่ใช้ส่งข้อมูลหนึ่งที่มีระยะสั้นที่สุดถึงสถานีฐานจะทำการสร้างเส้นทางทั่วเครือข่าย จากนั้นเซ็นเซอร์โหนดอื่นๆจะทำการเชื่อมต่อกับเส้นทางที่สร้างขึ้นนี้โดยส่งถึงเซ็นเซอร์โหนดที่ระยะใกล้สถานีฐานมากที่สุดตามเส้นทางที่สั้นที่สุด อย่างไรก็ตามความมีประสิทธิภาพขึ้นบนเส้นทางแรกและอาจเป็นผลให้ไม่มีประสิทธิภาพ

ในกระบวนการทำงานที่กล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการสร้างเส้นทางแบบเท่าเทียม (Flat Based) ที่แต่ละโหนดมีกระบวนการทำงานที่เหมือนกัน ในการรวมข้อมูลนั้นมีการใช้ระบบการสร้างกลุ่มเพื่อใช้ในการรวมข้อมูลด้วย (Cluster Based) เช่น LEACH [11] เป็นกระบวนการสร้างกลุ่มซึ่งใช้การสุ่มแบบกระจายเท่ากันในการเลือกของหัวหน้ากลุ่ม การสร้างกลุ่มจะทำการสร้างเป็นรอบๆตามเวลาเพื่อสมดุลของพลังงาน โหนดที่เป็นสมาชิกของโหนดหัวหน้ากลุ่มจะทำการส่งข้อมูลถึงโหนดหัวหน้ากลุ่มที่สร้างขึ้น (โดยเลือกตามความแรงของสัญญาณมากที่สุด) จากนั้นโหนดหัวหน้ากลุ่มจะทำการรวบรวมข้อมูลจากโหนดสมาชิก LEACH มีความสำเร็จในการประหยัดพลังงานและเพิ่มระยะเวลาของเครือข่ายอย่างมากเนื่องจากการสื่อสารแบบ TDMA ที่โหนดที่ไม่มีการส่งจะทำการหลับ (Sleep) เพื่อประหยัดพลังงานและการรวมข้อมูลในโหนดหัวหน้ากลุ่ม แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทำงานของ LEACH มีข้อจำกัดที่สมมติว่าแต่ละเซ็นเซอร์โหนดสามารถส่งโดยตรงถึงสถานีฐาน ซึ่งเป็นไปได้ยากในการทำงานในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากโหนดมีแหล่งพลังงานที่จำกัด ส่งผลให้มีระยะการสื่อสารที่จำกัด จากนั้นมีการพัฒนา HEED [12] ซึ่งคล้ายกับ LEACH แต่ใช้กระบวนการเลือกโหนดหัวหน้ากลุ่มที่ต่างกันโดยมีการพิจารณาถึงพลังงานในการสร้างกลุ่ม

อย่างไรก็ตามกระบวนการสร้างกลุ่มอาจมีการใช้พลังงานที่สูงถ้าโหนดหัวหน้ากลุ่มอยู่ไกลจากสถานีฐานทำให้พลังงานที่ส่งมีจำนวนมากและการรวมข้อมูลเกิดได้ที่โหนดหัวหน้ากลุ่มเท่านั้นทำให้พลังงานที่ใช้ยังคงมาก PEGASIS [13] ได้ทำการปรับปรุงโดยทำการสร้างโซ่เส้นทางในการส่ง (Chain Based) แต่ละโหนดจะถูกสร้างเส้นทางในพฤติกรรมแบบศูนย์กลางด้วยอัลกอริทึมแบบกริดดี้ (Greedy) การสร้างโซ่เส้นทางนี้อาจใช้สถานีฐานในการคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุดในการส่งทั้งเครือข่ายซึ่งคล้ายคลึงกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) [14] เมื่อทำการคำนวณเรียบร้อยแล้วจะทำการแพร่กระจายข้อมูลนี้ถึงทุกโหนดในเครือข่าย โหนดจะรู้ลำดับของโซ่เส้นทางของตนเองและลำดับการส่งต่อไปของโซ่เส้นทาง ข้อมูลจะเริ่มต้นที่โหนดที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากที่สุดและจะทำการส่งข้อมูลถึงโหนดลำดับต่อไปของโซ่ จากนั้นโหนดจะทำการรวมข้อมูลกับภายในโหนดตัวเอง จากนั้นส่งถึงลำดับของโซ่ถัดไปเรื่อยๆจนถึงโหนดที่เป็นผู้นำเพื่อส่งถึงสถานีฐานซึ่งจะถูกเลือกแบบสุ่มเลือกตามลำดับเลขโหนดในแต่ละรอบวนกันไป ส่งผลให้ผู้นำในแต่ละรอบจะเป็นการสุ่มในตำแหน่งของโซ่เส้นทาง จากการทดลองพบว่า

PEGASIS ให้ผลดีกว่า LEACH ประมาณสองเท่า แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณหาเส้นทางโชนั้นต้องการข้อมูลของทุกโหนดในเครือข่ายในการคำนวณและความล่าช้าในการส่งสูง เนื่องจากมีการรอส่งหลายลำดับของโชน

มีงานวิจัยอีกแบบสำหรับการสร้างเส้นทางต้นไม้สำหรับการรวมข้อมูล (Tree Based) เซ็นเซอร์โหนดจะเป็นสมาชิกอยู่กับเส้นทางต้นไม้ที่ซึ่งการรวมข้อมูลจะถูกใช้ในโหนดระหว่างเส้นทางไปตามเส้นทางต้นไม้ที่จะส่งไปหารากหรือสถานีฐาน ใน [15] มีการนำเสนอ EADAT ซึ่งมีการสร้างและคงไว้เส้นทางแบบต้นไม้ กระบวนการทำงานจะเริ่มต้นโดยรากหรือสถานีฐานแพร่กระจายแพ็คเกจควบคุม แพ็คเกจควบคุมจะประกอบด้วย (Id, Parent, Power, Status, Hop) สถานะของโหนดประกอบด้วย (Leaf, Nonleaf, Undefined) หลังจากโหนดรับแพ็คเกจมาจากสถานีฐานจะทำการตั้งตัวจับเวลาเป็นเวลา T_v และจะถูกนับลงเมื่อช่องสัญญาณว่าง ขณะการรอนี้ เซ็นเซอร์จะเลือกโหนดซึ่งมีพลังงานที่สูงที่สุดและมีระยะใกล้ถึงสถานีฐานที่สุดเป็นโหนดพ่อแม่ของตนเองเมื่อตัวจับเวลาหมดอายุโหนดจะทำการบอร์เคสแพ็คเกจควบคุมโดยเพิ่มจำนวนฮอปขึ้นหนึ่ง เมื่อโหนดรับแล้วรู้ว่าตนเองเป็นโหนดพ่อแม่ของโหนดอื่นๆจะทำการกำหนดสถานะของตนเองเป็น Nonleaf แต่ถ้าไม่แล้วจะกำหนดสถานะเป็น Leaf กระบวนการทำงานจะหยุดเมื่อแต่ละโหนดมีการแพร่กระจายครั้งหนึ่งและผลคือมีการสร้างเส้นทางต้นไม้ซึ่งมีรากอยู่ที่สถานีฐาน ข้อดีของวิธีการนี้คือโหนดที่มีพลังงานที่สูงจะมีโอกาสได้เป็นโหนดพ่อแม่ ในการคงไว้ของเส้นทางต้นไม้ จะมีการกำหนดจุดตัดสินใจ (Threshold) ถ้าพลังงานของโหนดเหลืออยู่ต่ำกว่าจุดตัดสินใจแล้วโหนดจะทำการส่งแพ็คเกจช่วยเหลือและหยุดการทำงานของตนเอง ถ้าโหนดถูกมีการรับแพ็คเกจช่วยเหลือแล้วมันจะเลือกโหนดพ่อแม่ใหม่ มีการเปรียบเทียบกับโปรโตคอลที่ไม่มีการรวมข้อมูลพบว่าการใช้พลังงานในอัตราที่ลดลงมากกว่า อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่สร้างเส้นทางเพื่อรวมข้อมูลให้ได้มากที่สุด

กระบวนการสร้างเส้นทางแบบอาณานิคมมดเป็นวิธีการในการหาค่าเหมาะสมที่สุดในเชิงการจัดแบบหนึ่ง (Combinatorial Optimization) ด้วยข้อดีในการแก้ปัญหาที่คลุมเครือหรือไม่แน่นอน ซึ่งไม่สามารถกำหนดรูปแบบของเครือข่ายได้และสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็ว [16] มาใช้เพื่อหาเส้นทางเพื่อรวมข้อมูล [17, 18, 19] โดยทำการลดปัญหาการรวมข้อมูลเป็นปัญหาย่อยในรูปแบบของการหาเส้นทางต้นไม้แบบสโตนอร์ที่ต่ำที่สุด งานวิจัยทั้งสามนั้นมีการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกันโดยการปรับปรุงคุณลักษณะบางส่วนแตกต่างกัน แต่โดยหลักแล้วมีวิธีการเหมือนกัน ซึ่งผลแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการหาเส้นทางเพื่อลดค่าใช้จ่ายของเส้นทางรวมได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของระบบอาณานิคมมดทั้งสาม มีข้อจำกัดและข้อเสียอยู่หลายข้อ ตัวอย่างเช่น

การทำงานของกระบวนการนี้เป็นระบบที่ต้องเข้าจังหวะกัน (Synchronous) ระหว่าง fant (Forward Ant) และ bant (Backward Ant) ซึ่งโหนดปลายทางจะต้องรอ fant ทั้งหมดก่อนจึงส่ง bant และ fant จะไม่สามารถส่งได้ถ้ายังไม่ได้รับ bant ส่งผลให้เราไม่สามารถส่ง fant และ bant พร้อมกัน และ การค้นหาเส้นทางนี้ค้นหาการรวมข้อมูลได้ในทางแนวคิดเท่านั้น แต่จากการรวมในเครือข่ายจริงนั้น การรวมกันของข้อมูลขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความสัมพันธ์

ของข้อมูลร่วมกันและค่าความล่าช้าของการรอข้อมูลเพื่อรวม ทำให้อาจไม่สามารถรวมข้อมูลและลดค่าใช้จ่ายของเครือข่ายลงได้ตามการทำงานนี้ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้พยายามปรับปรุงสมการและตัวแปรต่างๆให้เหมาะสมและเราจะเรียกกระบวนการทำงานนี้ว่า P-ANT

การค้นหาเส้นทางเริ่มต้นนั้นเป็นแบบสุ่มทำให้ในช่วงเริ่มต้นไม่สามารถค้นหาปลายทางได้ซึ่งเป็นปัญหาพื้นฐานในกระบวนการส่งแบบอาณานิคมมด [20] ส่งผลให้มีความล่าช้ากว่าจะค้นหาปลายทาง และสูญเสียข้อมูลในช่วงเริ่มต้นของเครือข่ายเป็นช่วงที่กำหนดระดับของโหนดเพื่อเลือกในการส่ง เพื่อแก้ปัญหานี้งานวิทยานิพนธ์นี้นำกระบวนการค้นหาเส้นทางที่เรียกว่า PAGER [21, 22] ช่วยในการเลือกจำกัดโหนด การร่วมทำงานระหว่างการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดกับโปรโตคอลอื่นๆสามารถพบได้ใน [23, 24, 25, 26] จะเห็นว่าโปรโตคอลอื่นจะถูกใช้ในการหาเส้นทางและใช้ระบบอาณานิคมมดในการเลือกเส้นทาง

นอกจากนี้จากผลการทดลองใน ns2 [27] เราพบว่าไม่สามารถประหยัดพลังงานได้เนื่องจาก ไม่สามารถรวมข้อมูลได้ในจุดที่รวมข้อมูลได้จริงจากความล่าช้าในการรอของแต่ละโหนด และการตอบกลับของ bant จำนวนมากนั้นส่งผลให้แม้สามารถประหยัดพลังงานจากจำนวนข้อมูลที่ใช้ส่งลดลง แต่กลับเพิ่มจำนวนการส่งตอบกลับของ bant ขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอกลไกที่ลด bant ลงโดยเลือกส่งเฉพาะ bant ที่มีคุณภาพหรือเส้นทางที่มีการรวมสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ลดปริมาณการใช้พลังงานของเครือข่าย
- 1.2.2 ลดปริมาณการส่งภายในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเนื่องด้วยการ สร้างเส้นทางเพื่อรวมข้อมูล
- 1.2.3 สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมจริงจากการที่ระบบอาณานิคมมดแบบเดิมนั้นมีการสมมติสภาวะแวดล้อมของการทำงานเริ่มต้นที่เป็นไปได้อย่างยากในทางปฏิบัติหรือมีข้อจำกัดในการทำงาน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 สามารถใช้ในส่วนการสร้างเส้นทางของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้จริง
- 1.3.2 สามารถปรับปรุงการลดใช้พลังงานในเครือข่ายลง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 ทำการปรับปรุงกระบวนการทำงานของระบบอาณานิคมมด
- 1.4.2 สร้างการจำลองเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ภายใต้ตัวสร้างการจำลองที่ชื่อว่า Network Simulator 2 (ns2) [27] เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการทำงานโดยการสร้างโปรโตคอลของการทำงานขึ้น
- 1.4.3 ประเมินประสิทธิภาพของการทำงาน โดยการปรับเปลี่ยนจำนวนเซ็นเซอร์โหนดที่ส่งข้อมูล

1.4.4 ประเมินประสิทธิภาพการทำงานโดยการเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลในเครือข่าย

1.4.5 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการสร้างเส้นทาง

บทต่อไปของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงกระบวนการทำงานในชั้นเครือข่ายของเซ็นเซอร์ไร้สาย กระบวนการเข้าใช้สื่อ การพัฒนาวิธีการสร้างเส้นทางในระบบเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สายที่ผ่านมา ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานของระบบอาณานิคมมด ส่วนในบทที่ 3 กล่าวถึงการค้นหาเส้นทางของระบบอาณานิคมมดที่ปรับปรุงขึ้น โดยการ นิยามชนิดและองค์ประกอบของข้อมูลในอุปกรณ์ รวมถึงแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบโดยละเอียดในบทที่ 4 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทำงานของการค้นหาเส้นทางของระบบอาณานิคมมดที่ปรับปรุง ด้วยเครื่องมือสำหรับการจำลองการทำงานของเครือข่ายที่เรียกว่า ns2 และสรุปผลจากการปรับปรุงกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด ในบทที่ 5

บทที่ 2

งานที่เกี่ยวข้อง

ภายใน บทนี้ จะ อธิบายถึง องค์ประกอบ ของเซ็นเซอร์ โหนด และ เครือข่าย ในการ ทำงาน ตรวจจับเหตุการณ์ ความหลากหลายการประยุกต์ใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จากนั้นอธิบายกระบวนการทำงานของเครือข่ายของงานวิจัยที่ผ่านมาประกอบด้วยกระบวนการเข้าใช้สื่อ กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบทั่วไปและกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด

2.1 โครงสร้างของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2.1.1 เซ็นเซอร์โหนด

เซ็นเซอร์โหนดเป็นฮาร์ดแวร์ที่ถูกออกแบบมาให้มีขนาดเล็กและใช้พลังงานในการทำงาน ดำเนินหน้าที่ตรวจจับข้อมูลต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แสงสว่าง การเคลื่อนไหว เสียง และทำการประมวลผลข้อมูล โดยมีช่องทางการสื่อสารรับส่งข้อมูลแบบไร้สายอยู่ในตัวเอง เซ็นเซอร์โหนดประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนหลักและ 2 ส่วนเสริม ดังนี้

2.1.1.1 ส่วนไฟเลี้ยง (Power Unit) ถูกใช้จัดการเกี่ยวกับสำหรับการแปลงพลังงานจากแหล่งพลังงาน (Power Generator) เช่น โซลาร์เซลล์ พลังงานจากกังหันลม พลังงานจากการสั่นสะเทือนหรือแบตเตอรี่ ให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปเลี้ยงวงจรไฟฟ้าภายในโหนด

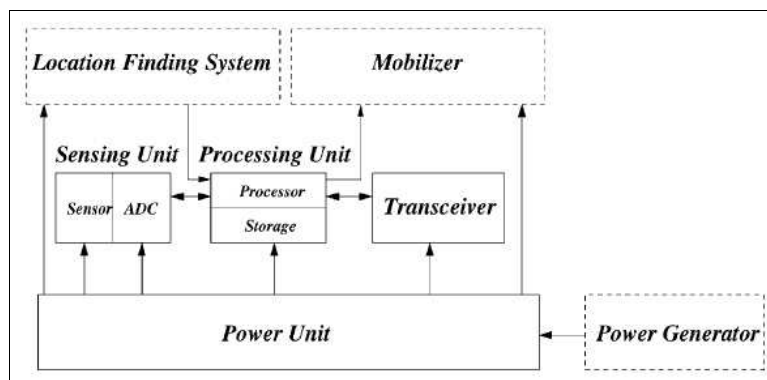
2.1.1.2 ส่วนการตรวจสอบ (Sensing Unit) ถูกใช้ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อมูลทางกายภาพต่างๆผ่านทางเซ็นเซอร์ และข้อมูลที่ได้อาจจะถูกแปลงเป็นแบบดิจิทัลโดยเอดีซีคอนเวอร์เตอร์(Analog-To-Digital Converter) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลกับโปรเซสเซอร์

2.1.1.3 ส่วนการประมวลผล (Processing Unit) เป็นส่วนที่รับข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลจากส่วนการตรวจสอบ สามารถนำมาข้อมูลประมวลผลโดยโปรเซสเซอร์ และเก็บข้อมูลในส่วนจัดเก็บ (Storage) ได้

2.1.1.4 ส่วนการสื่อสารไร้สาย (Transmission Unit) เป็นช่องทางการสื่อสารแบบไร้สายเพื่อรับ-ส่งข้อมูล จากเซ็นเซอร์โหนดอื่น

2.1.1.5 ส่วนค้นหาตำแหน่งของ (Position Finding System) กระบวนการทำงานบางส่วน of เครือข่ายอาจต้องรู้ตำแหน่งของตนเอง ดังนั้นต้องการระบบสามารถระบุแหล่งที่มาของข้อมูลได้อย่างแม่นยำ ตัวอย่างของระบบข้อมูลตำแหน่งของเซ็นเซอร์ คือ เครื่องรับจีพีเอส (GPS Receiver) ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถบอกตำแหน่งของโหนดได้ และข้อมูลตำแหน่งที่ได้สามารถส่งต่อไปให้กับ ส่วนของโปรเซสเซอร์เพื่อทำการประมวลผล

2.1.1.6 ส่วนการเคลื่อนที่ (Mobilizer) ในบางการประยุกต์ใช้งานนั้น ระบบการเคลื่อนที่ที่ต้องการเพื่อให้เซ็นเซอร์โหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดตามงานที่กำหนด

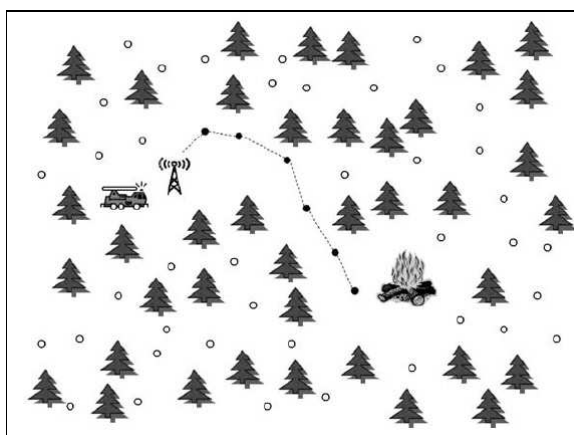


ภาพที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบของเซ็นเซอร์โหนด

ภายในหนึ่งเซ็นเซอร์โหนดจะประกอบด้วย 4 องค์ประกอบพื้นฐานแสดงในภาพที่ 2-1 ทุกองค์ประกอบเหล่านี้จะถูกจัดไว้ในกล่องที่ขนาดพอเหมาะ ขนาดที่ต้องการควรมีขนาดเล็กกว่า 1 cm^3 ซึ่ง น้ำหนักเบาเพียงพอที่จะแพร่กระจายในอากาศ อายุของเครือข่ายจะขึ้นกับแหล่งพลังงานภายในโหนด และเนื่องด้วยขนาดที่จำกัดทำให้พลังงานเป็นทรัพยากรที่ขาดแคลนอย่างมาก ในปัจจุบันพลังงานที่เก็บไว้ในโครงการ Smart Dust Mote มีปริมาณ 1 J [28] หรือในโครงการ Wireless Integrated Network Sensor (WINS) [29] สามารถให้กระแสเฉลี่ยได้น้อยกว่า $30\text{ }\mu\text{A}$ นอกจากนี้พลังงานภายในโหนดสามารถเพิ่มปริมาณพลังงานจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ

2.1.2 โครงสร้างการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายเป็นเครือข่ายของเซ็นเซอร์โหนด ที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์โหนด จำนวนเป็นหลายร้อยหรืออาจถึงหลายล้านโหนด เซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ภายในเครือข่าย จะทำหน้าที่ตรวจจับเก็บข้อมูลและส่งข้อมูลที่ได้กลับไปยังสถานีฐานที่ต้องการข้อมูลนั้น โดยอาศัยเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่เคียงข้างกัน ส่งข้อมูลต่อกันไปแบบมัลติฮอป ตัวอย่างการทำงานแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 แสดงการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2.2 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สาย

อุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สายอาจประกอบด้วยหลากหลายประเภทของเซ็นเซอร์ ซึ่งสามารถจะตรวจจับในหลากหลายสถานการณ์ [28] ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ความชื้น การเคลื่อนที่ของยานยนต์ ความดัน สัญญาณรบกวน การมีอยู่ของเป้าหมาย คุณลักษณะต่างๆของเป้าหมาย จากความหลากหลายเหล่านี้ทำให้สามารถสร้างการประยุกต์ใช้งานใหม่ๆอย่างไม่จำกัด เราสามารถแบ่งตามการประยุกต์ใช้งานเป็น ทางทหาร สถานะแวดล้อม การรักษาพยาบาล การใช้งานตามบ้านและทางการค้า

2.2.1 การประยุกต์ใช้งานทางทหาร

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสามารถเพิ่มเติมในส่วนทางทหาร (Command, Control, Communications, Computing, Intelligence, Surveillance Reconnaissance and Targeting, C4ISRT) ซึ่งมุ่งเน้นในการกระจายตัวโหนด สามารถจัดการได้ด้วยโหนดเองได้อย่างรวดเร็วและคงทนต่อความผิดพลาด จากการที่เครือข่ายเซ็นเซอร์อยู่บนพื้นฐานของการกระจายตัวอย่างหนาแน่นและมีราคาต่ำ ทำให้การสูญเสียโหนดบางโหนดภายใต้สถานะแวดล้อมร้ายแรงไม่เป็นผลกระทบต่อการปฏิบัติการทางทหารจากข้อดีนี้ทำให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเหมาะสมกับการทำงานในสนามรบ ในบางการประยุกต์ใช้งานเป็นการตรวจสอบสภาพของฝ่ายเดียวกัน โดยผู้นำหรือผู้สั่งการสามารถตรวจสอบสถานะของทหารในสังกัด สภาพและการมีอยู่ของอาวุธ เครื่องมือ พาหนะหรือเครื่องกระสุนสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อรายงานถึงสภาพต่างๆ การรายงานผลเหล่านี้จะเก็บอยู่ที่สถานีฐานและส่งถึงผู้สั่งการในแต่ละลำดับชั้น สามารถตรวจจับข้าศึกได้ภายในไม่กี่นาที ก่อนที่ข้าศึกโจมตี สภาพความเสียหาย ช่วยชีวิต และตรวจจับปริมาณสารเคมีและการแผ่รังสีของนิวเคลียร์

2.2.2 การประยุกต์ใช้งานทางสถานะแวดล้อม

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การติดตามการเคลื่อนที่ของนก สัตว์เล็กๆ แมลง, การตรวจจับสถานะแวดล้อมที่มีอิทธิพลกับพืชผลและปศุสัตว์, การชลประทาน, อุปกรณ์วัดขนาดใหญ่สำหรับตรวจจับและตรวจสอบสภาพดาวเคราะห์, การตรวจจับสารเคมีและชีวภาพ, การเกษตร, ตรวจสอบสภาพแวดล้อมของน้ำ ดิน และอากาศ, การตรวจจับไฟฟ้า, การวิจัยทางภูมิศาสตร์, การตรวจจับน้ำท่วม

การตรวจจับไฟฟ้า เซ็นเซอร์โหนดอาจถูกวางอย่างสุ่มและหนาแน่นภายในป่า เซ็นเซอร์โหนดจะส่งผ่านการตรวจจับไฟที่เกิดขึ้นถึงผู้ใช้ก่อนที่การแพร่กระจายของไฟฟ้าจะไม่สามารถควบคุมได้ เซ็นเซอร์โหนดนับล้านจะถูกวางกระจายและใช้การสื่อสารแบบไร้สายหรือแบบแสง ดังนั้นเซ็นเซอร์โหนดอาจต้องใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีกระบวนการ ในการสร้างพลังงานขึ้นเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เพราะเซ็นเซอร์จะถูกปล่อยทิ้งเป็นเดือนหรือเป็นปี เซ็นเซอร์โหนดจะร่วมกับโหนดอื่นๆในการตรวจจับและเอาชนะสิ่งกีดขวางเช่น ต้นไม้ ก้อนหิน หรือสิ่งขวางกั้นได้

การตรวจจับน้ำท่วม ตัวอย่างการตรวจจับน้ำท่วมเป็นระบบการเตือน (ALERT) [30] ที่ถูกใช้สหรัฐอเมริกา มีหลายประเภทของระบบการเตือน ปริมาณของฝน ระดับของน้ำและเซ็นเซอร์

สภาพอากาศ เซ็นเซอร์เหล่านี้จะทำการเก็บสะสมข้อมูลและส่งถึงฐานข้อมูลกลางที่กำหนดไว้เพื่อทำนายการเกิดอุทกภัยต่างๆ

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานด้านการรักษาพยาบาล

บางตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเช่นการติดเซ็นเซอร์โหนดเพื่อตรวจสภาพผู้ป่วย วินิจฉัยโรค การให้ยาในโรงพยาบาล การตรวจสภาพการเคลื่อนที่และกระบวนการภายในของแมลงหรือสัตว์ที่มีขนาดเล็ก การตรวจสภาพทางจิตวิทยาระยะไกล และการติดตาม ตรวจสภาพหมอและผู้ป่วยภายในโรงพยาบาล

การตรวจสภาพทางสรีรศาสตร์ระยะไกล ข้อมูลจะถูกรวบรวมโดยเครือข่ายเซ็นเซอร์ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้ในระยะเวลาที่ยาวนาน [31] ใช้ในการตรวจรักษาโรค [32] และสามารถศึกษาพฤติกรรมต่างๆของผู้ป่วย เซ็นเซอร์ที่เล็กเหล่านี้จะทำให้ผู้ป่วยมีอิสระในการเคลื่อนไหวและระบุความชัดเจนของอาการต่างๆได้ดีขึ้น การรักษาพยาบาลที่บ้านนี้ถูกออกแบบโดยคณะแพทย์ในจีโนเบิล ประเทศฝรั่งเศส [33] ทำให้สะดวกและสามารถยกระดับคุณภาพของการรักษาได้เมื่อเปรียบเทียบกับทำการรักษาที่โรงพยาบาล [34]

การติดตามและตรวจสภาพหมอและผู้ป่วยภายในโรงพยาบาล ในแต่ละผู้ป่วยจะติดตั้งเซ็นเซอร์ที่มีขนาดเล็กและเบา ในแต่ละเซ็นเซอร์จะมีหน้าที่ต่างกัน เช่น เซ็นเซอร์หนึ่งถูกใช้ในการวัดคลื่นหัวใจ อีกเซ็นเซอร์หนึ่งถูกใช้วัดความดันเลือด หมออาจใช้เซ็นเซอร์เพื่อให้หมอหรือพยาบาลคนอื่นๆสามารถรู้ตำแหน่งภายในโรงพยาบาล

ข้อมูลยาในการรักษา ถ้าในเซ็นเซอร์โหนดติดตั้งข้อมูลในการรักษา โอกาสในการรักษาที่ผิดพลาดจะมีน้อยลง เพราะผู้ป่วยจะมีข้อมูลการแพ้ยาและข้อมูลยา ปริมาณยาที่ต้องการ ระบบนี้อธิบายใน [35] ซึ่งช่วยลดจำนวนการแพ้ยาที่เกิดขึ้นในผู้ป่วย

2.2.4 การประยุกต์ใช้งานตามบ้าน

บ้านอัตโนมัติ ขณะการพัฒนาทางเทคโนโลยี เซ็นเซอร์ถูกพัฒนาให้มีความฉลาดและร่วมทำงานกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆและเครือข่ายภายนอกผ่านอินเทอร์เน็ตหรือดาวเทียม เซ็นเซอร์โหนดจะยินยอมให้ผู้ใช้สามารถจัดการได้จากภายในบ้านหรือระยะไกล

Smart Environment การออกแบบสภาพแวดล้อมที่ฉลาดสามารถแยกได้ 2 ด้าน ด้านแรกโดยมีคนเป็นศูนย์กลาง หรือด้านที่สองมีเทคโนโลยีเป็นศูนย์กลาง ในด้านผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง เซ็นเซอร์ โหนดจะปรับสภาพแวดล้อมตามความต้องการของผู้ใช้ กำหนดความสามารถต่างๆ ขณะที่ด้านเทคโนโลยีเป็นศูนย์กลาง เทคโนโลยีด้านอุปกรณ์ เครือข่ายและบริการจะถูกพัฒนารูปแบบการทำงานของ เซ็นเซอร์โหนดที่ใช้สร้างสภาพแวดล้อมที่ฉลาดสามารถพบใน [36] เซ็นเซอร์ โหนดเหล่านี้จะถูกฝังตัวในเฟอร์นิเจอร์หรืออุปกรณ์ต่างๆภายในบ้าน และพวกมันสามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ตัวอื่นๆ และเซิร์ฟเวอร์ภายในห้อง เซิร์ฟเวอร์ภายในห้องนี้จะติดต่อสื่อสารกับเซิร์ฟเวอร์ห้องอื่นๆ เพื่อเรียนรู้และให้บริการ เช่น การพิมพ์ สแกน และแฟกซ์

2.2.5 การประยุกต์ใช้งานด้านการค้า

ยกตัวอย่างเช่น การตรวจสภาพของวัสดุ การจัดการบัญชีสิ่งของ การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ การสร้างสำนักงานฉลาด การควบคุมสภาพต่างๆภายในตึก การควบคุมหุ่นยนต์และ

นำทางเครื่องจักรในโรงงาน ของเล่นฉลาด ตรวจสอบสภาพเครื่องจักร เครื่องมือวัดในโรงงาน การควบคุมต่างๆในเครื่องจักร การตรวจจับและติดตามยานพาหนะ การขนส่ง

การควบคุมสภาพแวดล้อมภายในตึก การควบคุมเครื่องปรับอากาศต่างๆภายในตึกจะเป็นแบบการควบคุมแบบศูนย์กลาง ดังนั้นอุณหภูมิภายในห้องหนึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายระดับ โดยที่ด้านหนึ่งอาจจะร้อนกว่าอีกห้องหนึ่ง เนื่องจากการควบคุมเพียงหนึ่งจุด สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสามารถติดตั้งกระจายตัวเพื่อควบคุมกระแสอากาศและอุณหภูมิในส่วนต่างๆของห้อง ได้มีการทำการประมาณเทคโนโลยีการกระจายนี้พบว่าสามารถลดพลังงานที่ใช้ในสหรัฐอเมริกาเป็นจำนวนเงินถึง 55 พันล้านดอลลาร์ต่อปีและลดการแพร่กระจายก๊าซคาร์บอน-ไดออกไซด์ถึง 35 ล้านตันต่อปี [37]

การสื่อสารอัตโนมัติในพิพิธภัณฑ์สถานในอนาคต เด็กสามารถที่จะสื่อสารกับวัตถุต่างๆในพิพิธภัณฑ์สถานเพื่อเรียนรู้ การตอบสนองของวัตถุเหล่านี้สามารถที่จะสัมผัสและส่งเสียงได้ เด็กๆสามารถมีส่วนร่วมในการตอบสนองต่างๆ ทำให้สามารถที่จะสอนเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างของพิพิธภัณฑ์สถานสามารถพบได้ใน [37]

การตรวจจับและตรวจสอบสภาพรถจากการขโมย เซ็นเซอร์ไหนดจะถูกวางภายในรถเพื่อตรวจจับและระบุการขโมยภายในพื้นที่ตรวจจับและทำการส่งข้อมูลเหล่านี้ถึงผู้ใช้โดยอาจผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

การใช้เพื่อจัดการบัญชีสิ่งของ แต่ละชิ้นของผลิตภัณฑ์ในโกดังอาจมีเซ็นเซอร์ถูกติดอยู่ภายใน ผู้ใช้สามารถที่จะหาตำแหน่งของผลิตภัณฑ์และจำนวนผลิตภัณฑ์ในหมวดหมู่เดียวกัน ถ้าผู้ใช้งานต้องการที่จะทำการเพิ่มเซ็นเซอร์ไหนดที่เหมาะสมในบัญชี ผู้ใช้สามารถติดตามและระบุตำแหน่งสินค้าในได้ในทุกเวลา

การตรวจจับและติดตามยานพาหนะ มีสองกระบวนการทำงานอธิบายใน [38] การทำงานในกระบวนการแรกทิศทางของยานพาหนะจะถูกประเมินตามเซ็นเซอร์ไหนดในกลุ่มย่อยและจะส่งข้อมูลถึงสถานีฐาน กระบวนการที่สองข้อมูลดิบจะถูกสะสมโดยเซ็นเซอร์ไหนดและส่งถึงสถานีฐานโดยตรง

2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบในการออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

การออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีหลายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบ ยกตัวอย่างเช่น การทนต่อความผิดพลาด (Fault Tolerance), การรองรับเครือข่ายขนาดใหญ่ (Scalability), ราคา (Product Cost), สภาพแวดล้อมในการทำงาน (Operating Environment), โครงสร้างของเครือข่ายเซ็นเซอร์ (Sensor Networks Topology), ข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ (Hardware Constraints), สื่อในการส่ง (Transmission Media), และการใช้พลังงาน (Power Consumption) หลายตัวแปรนี้สามารถพบได้ในหลายงานวิจัยแต่ไม่มีงานวิจัยไหนที่ใช้ทุกตัวแปรในการออกแบบ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีความสำคัญเพื่อใช้ช่วยในการออกแบบโปรโตคอลหรืออัลกอริทึมสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ความแตกต่างของตัวแปรเหล่านี้ถูกใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างกระบวนการทำงาน

2.3.1 การคงทนต่อความผิดพลาด

บางเซ็นเซอร์โหนดอาจเสียหรือไม่สามารถใช้งานด้วยเนื่องจาก การขาดพลังงาน อุปกรณ์ภายในโหนดเสีย หรือการรบกวนจากสภาพแวดล้อม การเสียของโหนดนี้ไม่ควรมีผลกระทบต่อเครือข่าย ซึ่งเป็นประเด็นของความน่าเชื่อถือหรือการคงทนต่อความผิดพลาด การคงทนต่อความผิดพลาดนี้เป็นความสามารถในการทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยปราศจากการหยุดเนื่องด้วยโหนดเกิดการผิดพลาด สังเกตว่า โปรโตคอลและอัลกอริทึมอาจต้องการ ระดับของความคงทนของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ระดับของความคงทนที่ต้องการ ไม่ขึ้นกับการออกแบบโปรโตคอลเท่านั้นแต่ขึ้นกับการประยุกต์ใช้งานด้วย ตัวอย่างเช่นเซ็นเซอร์โหนดที่วัดอุณหภูมิและความชื้นภายในบ้านจะมีความต้องการระดับความคงทนต่อความผิดพลาดในระดับต่ำ ในขณะที่เซ็นเซอร์โหนดที่ใช้ในสนามรบต้องการระดับความคงทนต่อการผิดพลาดที่สูงกว่า

2.3.2 การรองรับเครือข่ายขนาดใหญ่

จำนวนของเซ็นเซอร์โหนด ในการตรวจจับ สภาพแวดล้อมอาจมีจำนวนหลายร้อยจนถึงหลายล้าน โหนดขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน โปรโตคอลต้องรองรับการทำงานกับโหนดจำนวนมากนี้และสามารถใช้ประโยชน์จากความหนาแน่นนี้ โดยความหนาแน่นโหนดสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\mu(R) = (N\pi R^2)/A \quad (2-1)$$

โดยที่ N เป็นจำนวนเซ็นเซอร์โหนดในพื้นที่ A และ R เป็นระยะการส่งของโหนด โดยความหมายแล้วคือค่าเฉลี่ยจำนวน โหนดในพื้นที่การส่งของแต่ละโหนดในพื้นที่ A จำนวนของโหนดในพื้นที่หนึ่งสามารถที่จะถูกใช้เพื่อบอกถึงระดับความหนาแน่นโหนดความหนาแน่นของโหนดขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน สำหรับการประยุกต์ใช้งานเพื่อตรวจสอบสภาพเครื่องจักร ความหนาแน่นของโหนดประมาณ 300 โหนดในพื้นที่ $5 \times 5m^2$ หรือความหนาแน่นในการติดตามวัตถุประมาณ 10 โหนดต่อหนึ่งพื้นที่ [38] โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นจะสูงถึง 20 โหนด/ m^2 การประยุกต์ใช้งานภายในบ้านจะถูกใช้ประมาณ 24 โหนด [39] ในการใช้เพื่อตรวจสอบสภาพภายในบริเวณจำนวนของเซ็นเซอร์โหนดจะมีจำนวนประมาณ 25 ถึง 100 โหนดจะมีจำนวนมากเมื่อใช้ตรวจสอบของบุคคล ซึ่งเซ็นเซอร์สามารถฝังตัวในเครื่องใช้รอบตัว เช่น แว่นตา เสื้อผ้า รองเท้านาฬิกา ร่างกาย

2.3.3 ราคา

เพราะในเครือข่ายประกอบด้วยโหนดจำนวนมาก ค่าใช้จ่ายที่ใช้การสร้างแต่ละโหนดมีความสำคัญอย่างมากที่กำหนดค่าใช้จ่ายรวม ถ้าค่าใช้จ่ายของเครือข่ายมีราคาแพงกว่าการใช้เซ็นเซอร์ทั่วไปแล้วเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะไม่เหมาะสมในการทำงาน ในการพัฒนาของเทคโนโลยีสามารถสร้าง ระบบ Bluetooth ในราคาน้อยกว่า 10\$ [37] PicoNode มีเป้าหมายในราคาที่น้อยกว่า 1\$ ในการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีความเป็นไปได้เพื่อใช้งานทั่วไปแล้วเซ็นเซอร์โหนดควรมีราคาที่น้อยกว่า 1\$ ต่อโหนด จากค่าใช้จ่ายของระบบ Bluetooth ซึ่งมีราคาที่ถูกมากยังคงมีราคาเป็น 10 เท่าของเป้าหมายหนึ่งเซ็นเซอร์โหนด และในหนึ่งเซ็นเซอร์โหนดมีความต้องการอุปกรณ์เพิ่มเติมเช่น อุปกรณ์การตรวจจับและหน่วยประมวลผล

ซึ่งกล่าวถึงก่อนหน้านี้ และอาจเพิ่มเติมในระบบการหาตำแหน่ง ระบบการเคลื่อนที่ หรือระบบแหล่งพลังงาน อุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายที่ใช้สร้างในแต่ละ โหนดเป็นความท้าทายอย่างมากกับการทำงานหลากหลายและมีราคาที่สูงกว่า 1\$

2.3.4 ข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์

ในอุปกรณ์รับส่งสัญญาณของเซ็นเซอร์โหนดอาจเป็นอุปกรณ์รับส่งทางแสงแบบ Passive หรือ Active ในโครงการ Smart Dust Mote [28] หรือใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณวิทยุ แต่ในการสื่อสารแบบสัญญาณวิทยุนั้นต้องการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนหลายวงจรซึ่งทำให้มีราคาสูง และเนื่องด้วยการลดทอนพลังงานระหว่างเซ็นเซอร์สองโหนดอาจสูงเป็นกำลังสี่ตามระยะทาง เนื่องด้วยสายอากาศที่อยู่ใกล้พื้นดิน [28] แต่อย่างไรก็ตามการสื่อสารด้วยสัญญาณวิทยุยังคงถูกใช้ในงานวิจัยส่วนใหญ่ เพราะจากข้อมูลที่ถูกส่งในเครือข่ายมีขนาดเล็กและมีอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำและสามารถใช้ความถี่ซ้ำเนื่องด้วยระยะทางสั้น คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ กลไกการรับต้นของอุปกรณ์การรับส่งสัญญาณเพื่อประหยัดพลังงานซึ่งยังคงเป็นด้านที่ยังคงวิจัยอยู่ในปัจจุบัน ในเทคโนโลยีการสื่อสารในตลาดปัจจุบันเช่น Bluetooth ยังคงไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอเนื่องจากการเปิดและปิดอุปกรณ์มีการใช้พลังงานจำนวนมาก [37]

2.3.5 โครงสร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์

เนื่องจากจำนวนของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในเครือข่ายจำนวนมาก ซึ่งบ่อยครั้งเกิดการสูญเสียทำให้การคงไว้ของเครือข่ายเป็นงานหนึ่งที่จำเป็น เซ็นเซอร์โหนดตั้งแต่จำนวนหลายร้อยจนถึงหลายพันจะถูกกระจายตลอดพื้นที่แต่ละโหนดจะถูกกระจายไม่เกิน 10 ฟุตจากโหนดอื่น [7] ความหนาแน่นโหนดอาจสูงถึง 20 node/m^3 [37] การกระจายโหนดอย่างหนาแน่นในพื้นที่สามารถช่วยในการคงไว้ของเครือข่ายจากการสูญเสียของโหนดด้วย แต่ละเซ็นเซอร์โหนดสามารถวางที่ละโหนดหรือทั้งหมดภายในครั้งเดียว โดยใช้ การปล่อยจากเครื่องบิน ปืนใหญ่ มิสายล์ เครื่องยิงกระสุน วางโดยมนุษย์หรือหุ่นยนต์ ดังนั้นการกระจายตัวของเซ็นเซอร์โหนดจะคำนึงถึงการลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ขจัดความต้องการในการจัดการและวางแผนล่วงหน้า สนับสนุนการจัดการด้วยตัวเองและคงทนต่อความผิดพลาด หลังจากการแพร่กระจายโหนด โครงสร้างของเครือข่ายจะเปลี่ยนแปลงเนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงของระบบตำแหน่ง ความสามารถในการติดต่อเนื่องด้วยการรบกวนจากสัญญาณรบกวน การเคลื่อนที่ของสิ่งกีดขวาง พลังงานที่เหลืออยู่ และการเสียชีวิตของโหนดเนื่องด้วยพลังงานหมด หรือโหนดมีการเคลื่อนที่ ดังนั้นการแพร่กระจายเพิ่มเติมสามารถทำได้ตลอดเวลา เพื่อคงไว้ของเครือข่าย

2.3.6 การใช้พลังงาน

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกติดตั้งกับแหล่งพลังงานที่จำกัด ($<0.5 \text{ Ah}$, 1.2V) ในบางการประยุกต์ใช้งานการเติมหรือเปลี่ยนแหล่งพลังงานไม่สามารถเป็นไปได้ อายุการใช้งานของโหนดจะขึ้นอยู่กับอายุของแบตเตอรี่ ในระบบมัลติฮอปแต่ละโหนดจะมีสองบทบาท คือเป็นต้นกำเนิดข้อมูลและส่งผ่านข้อมูล การผิดปกติไม่ว่าโหนดสามารถทำให้โครงสร้างเส้นทางเครือข่ายเปลี่ยนและอาจต้องการการหาเส้นทางใหม่ ดังนั้นการอนุรักษ์

พลังงานและการจัดการพลังงานเป็นสิ่งจำเป็น แต่สำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่ (Mobile Ad hoc Networks) การใช้พลังงานอาจไม่เป็นปัจจัยในการออกแบบหลักเพราะผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้ แต่อาจเน้นในคุณภาพการให้บริการมากกว่าการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งที่สำคัญมากเนื่องจากกระทบต่อชีวิตของระบบโดยตรง ดังนั้นการออกแบบสามารถแลกเปลี่ยนโดยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานแล้วลดประสิทธิภาพด้านอื่นลง

งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นการตรวจจับเป้าหมายจากนั้นทำการประมวลผลและส่งให้สถานีฐาน พลังงานที่ถูกใช้สามารถแบ่งเป็นส่วนการตรวจจับ ส่วนการสื่อสาร และส่วนประมวลผล ในส่วนการตรวจจับพลังงานจะผันผวนตามการประยุกต์ใช้งาน เช่นการตรวจจับเป็นครั้งจะใช้พลังงานน้อยกว่าการตรวจจับแล้วส่งแบบต่อเนื่อง ความซับซ้อนของการตรวจจับเหตุการณ์จะเป็นส่วนที่สำคัญในการใช้ของพลังงาน และระดับสัญญาณรบกวนยิ่งอาจส่งผลให้เกิดการส่งที่ผิดพลาดและเพิ่มความซับซ้อนในการตรวจจับ

ในส่วนของ การสื่อสารจะเป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุดเพื่อใช้ในการส่งข้อมูล รับข้อมูล ช่วงว่าง และช่วงหลับ ในบางงานวิจัยมีการวัดระดับการใช้พลังงานในช่วงต่างๆ พบว่าช่วงเวลาที่อยู่ปรณรับส่งสัญญาณว่างมีการใช้พลังงานอาจมากถึง 10%-100% ของการรับ และช่วงเวลาที่ว่างของอุปกรณ์จะเป็นช่วงที่ใช้เวลามากที่สุด ทำให้มีหลายงานวิจัยพยายามลดการใช้พลังงานในส่วนนี้ ในส่วนของการประมวลผลข้อมูล พลังงานที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลจะมีการใช้พลังงานน้อยกว่าการสื่อสารอย่างมาก ตัวอย่างนี้สามารถอธิบายใน [28] สมมติว่ามีการลดทอนสัญญาณเป็นกำลังสี่ของระยะทาง ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการส่ง 1KB ในการส่ง 100 เมตรใช้พลังงานประมาณ 3 J ซึ่งใช้พลังงานพอๆกับการประมวลผล 300 ล้านคำสั่ง ผลคืออัตราส่วนเป็นการประมวลผล 30,000 คำสั่งต่อการส่งหนึ่งบิต ดังนั้นการประมวลผลแบบท้องถิ่นจะเป็นสิ่งสำคัญ โดยแทนที่โหนดต้องส่งข้อมูลถึงสถานีฐานโดยตรงโหนดจะทำการประมวลผลในเครือข่ายก่อนแล้วจึงส่งข้อมูลที่สรุปผลแล้วถึงสถานีฐาน จะเห็นได้ว่าในการออกแบบโปรโตคอลควรจะแลกเปลี่ยนในการเลือกให้มีการสื่อสารที่ต่ำแต่สามารถใช้การคำนวณสูงแทน

2.4 กระบวนการเข้าใช้สื่อ (Media Access Controls)

กระบวนการเข้าใช้สื่อ เป็นวิธีตัดสินใจเลือกโหนดให้สามารถใช้เครือข่ายได้ในกรณีมีผู้ใช้พร้อมๆ กัน ในเครือข่ายไร้สายแบบเฉพาะกิจที่ใช้อย่างแพร่หลายนั้นใช้ มาตรฐานการติดต่อที่เรียกว่า 802.11 [40] อย่างไรก็ตามการทำงานของโปรโตคอลนี้เป็นการออกแบบสำหรับเครือข่ายแบบทั่วไป อาจไม่เหมาะกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่คำนึงถึงพลังงานเป็นหลัก ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัยที่ถูกพัฒนาขึ้น ยกตัวอย่างเช่น SMAC ที่ได้รับความนิยมและสร้างขึ้นเป็นมาตรฐานในหลายงานวิจัย [41] แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของ SMAC อาจเกิดปัญหาการครอบงำของแพ็คเก็ตจำนวนมากส่งผลให้เมื่อนำมาใช้กับกระบวนการสร้างเส้นทางจะส่งผลกระทบอย่างมากเมื่อมีอัตราการส่งข้อมูลสูง ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ 802.11 ในการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงาน

2.4.1 802.11

802.11 [40] หรือเป็นระบบที่ใช้ในแอ่งชิงสื่อของระบบเครือข่ายเฉพาะกิจ (Mobile Ad hoc Networks, MANETs) แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้ทดสอบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นยังคงใช้โปรโตคอล 802.11 ในการทำงาน มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย WLAN ไว้ 2 ลักษณะคือ โหมด Infrastructure และ โหมด Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer ในงานวิทยานิพนธ์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนี้จะใช้โหมด Ad hoc หรือ Distributed Coordination Function (DCF) การทำงานของ DCF ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 หมวด คือ

2.4.1.1 Basic Access (BA) ซึ่งใช้ Two-Way Hand Shaking

2.4.1.2 Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS/CTS)

ทั้ง 2 หมวดใช้โปรโตคอล CSMA/CA มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการชนกันของเฟรมข้อมูล เนื่องจากโหนดมีการใช้สื่อร่วมกันถ้ามีการส่งเฟรมข้อมูลพร้อมกัน จะเกิดการชนกัน

สำหรับ BA มีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

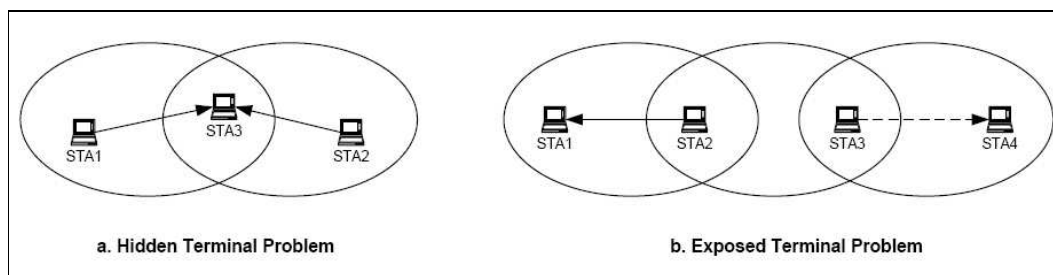
ก) โหนดที่ต้องการส่งข้อมูล ฟังช่องสัญญาณของสื่อว่าไม่มีโหนดใดใช้งานอยู่

ข) ถ้าช่องสัญญาณว่างเป็นเวลาที่มากกว่า DCF Interframe Space (DIFS) โหนดเริ่มส่งข้อมูลได้ และรอสัญญาณตอบรับ (Positive Acknowledgment: ACK) โดยมีระยะเวลาระหว่างเฟรมข้อมูลกับ ACK เป็น Short Interframe Space (SIFS)

ค) ถ้าช่องสัญญาณไม่ว่าง สถานีเริ่มใช้ขั้นตอน Backoff เพื่อรอแบบสุ่มก่อนที่จะส่งข้อมูลได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของเฟรมข้อมูล

Contention Window (CW) เป็นช่วงเวลาที่แบ่งเป็นช่องเวลา (Slot Time) เพื่อให้โหนดสามารถแข่งขันกันเพื่อใช้สิทธิ์ในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ แต่ในกรณีที่มีการแย่งใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน จะเกิดการชนขึ้น ตามมาตรฐานเมื่อเกิดการชนของเฟรมข้อมูลขึ้น ช่องสัญญาณจะต้องว่างเป็นเวลา Extended Interframe Space (EIFS) ก่อนที่โหนดต่างๆ เริ่มทำงานอีกครั้งหนึ่ง ค่า CW ของแต่ละโหนดถูกสุ่มขึ้นโดยมีค่าเป็นจำนวนเต็มอยู่ระหว่าง CW_{min} และ CW_{max} ขึ้นอยู่เทคโนโลยีใน PHY (เช่นค่า $CW_{min} = 16$ และ $CW_{max} = 1024$ สำหรับ FHSS) ในการพยายามส่งครั้งแรก สถานีจะใช้ค่า CW เท่ากับ CW_{min} และถ้าส่งไม่สำเร็จเนื่องจากการชนกันหรือ Cyclic Redundancy Check (CRC) ของเฟรมข้อมูลผิด โหนดจะเพิ่มค่า CW ครั้งละสองเท่าทุกครั้งสำหรับการส่งที่ไม่สำเร็จแต่ไม่เกินค่า CW_{max} ในมาตรฐานของ IEEE 802.11

ในระหว่าง Sender ใช้ช่องสัญญาณอยู่ โหนดอื่นจะทราบค่าว่าช่องสัญญาณนี้จะถูกใช้งานเป็นเวลาอีกนานเท่าไร และเก็บค่านี้ไว้ในตัวแปรที่ชื่อ Network Allocation Vector (NAV) ซึ่งหมายความว่า โหนดอื่นต้องรอเป็นเวลา NAV ก่อนที่สามารถเริ่มขั้นตอน Backoff ได้ ค่า NAV มีประโยชน์สำหรับการจัดการพลังงานจากแบตเตอรี่ เนื่องจากในช่วงเวลาที่ช่องสัญญาณมีการใช้งาน โหนดอื่นจะทราบว่าช่องสัญญาณนี้จะถูกใช้งานเป็นเวลานานเท่าใด ทำให้สามารถหยุดการทำงาน (Sleep) เพื่อประหยัดพลังงานและทำงานต่อ (Awake) เมื่อเวลาผ่านเท่ากับ NAV



ภาพที่ 2-3 แสดงการเกิดปัญหาของ Hidden และ Exposed Terminal

การทำงานของ DCF ในหมวดที่ 2 คือ RTS/CTS เกิดขึ้นสืบเนื่องจากปัญหาของ Hidden และ Exposed Terminal จากภาพที่ 2-3a แสดง Hidden Terminal Problem โหนด STA1 ต้องการส่งเฟรมข้อมูลไปยัง STA3 ในขณะเดียวกัน STA2 ต้องการส่งเฟรมข้อมูลไปที่ STA3 และ STA1 กับ STA2 ไม่อยู่ใน BSS เดียวกัน ส่งผลให้เกิดการชนกันของเฟรมข้อมูลที่ STA3

ปัญหาของ Exposed Terminal ในภาพที่ 2-3b คือ STA2 อยู่ในจังหวะที่ส่งข้อมูลไปที่ STA1 ทำให้ STA3 ไม่สามารถส่งข้อมูลไป STA4 ได้เนื่องจากได้ยินสัญญาณจาก STA2 ซึ่งในกรณีนี้ STA3 สามารถส่งข้อมูลไปยัง STA4 ได้เพราะสัญญาณความถี่ของ STA3 ไม่รบกวน STA1 เพราะอยู่ต่าง BSS เพื่อแก้ปัญหา Hidden Terminal ดังที่กล่าวไป DCF มีโหมดที่ใช้สัญญาณ RTS/CTS ในการบอกให้โหนดอื่นในระบบทราบถึงการส่งข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของเฟรมข้อมูล และเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูลให้มากขึ้น ดังนั้นก่อนที่ STA1 จะเริ่มส่งเฟรมข้อมูล ต้องส่งเฟรมข้อมูลสั้นๆ ที่บรรจุค่า NAV RTS ไปที่ STA3 เพื่อบอกให้ผู้รับและโหนดอื่นในเครือข่ายทราบถึงการส่งเฟรมข้อมูลที่ต้องการส่ง STA1 รอเป็นเวลา SIFS เพื่อรอรับสัญญาณ CTS (บรรจุค่า NAV CTS)

จาก STA3 การส่งเฟรมข้อมูลจึงเริ่มขึ้น ในกรณีที่ STA3 มีการติดต่อกับโหนดอื่นอยู่ซึ่ง STA1 ไม่สามารถรับสัญญาณนี้ได้ STA3 จะไม่ตอบ CTS กลับไปหา STA1 ทำให้ไม่เกิดการชนกันของเฟรมข้อมูล สำหรับการแก้ปัญหา Exposed Terminal ในภาพที่ 2-3b เมื่อ STA2 ส่ง RTS ไปหา STA1 เพื่อขอส่งข้อมูล STA1 ตอบ CTS กลับไป STA2 เพื่อแสดงว่าพร้อมที่จะรับข้อมูล STA3 ได้รับข้อมูล RTS นี้ด้วยแต่ไม่ได้ยินสัญญาณ CTS ของ STA1 และเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ SIFS ทำให้ STA3 ทราบว่า STA1 ไม่อยู่ใน BSS เดียวกับ STA3 ทำให้ STA3 สามารถส่งข้อมูลไปที่ STA4 ได้ ข้อสังเกต RTS/CTS อาจทำให้การทำงานใน BSS เดียวกันช้าลงเนื่องจากต้องใช้เวลาในการโต้ตอบของ RTS/CTS แต่อาจเพิ่มประสิทธิภาพในกรณีของ ESS

Backoff เริ่มขึ้นเมื่อโหนดพบว่า ช่องสัญญาณไม่ว่างโดยใช้วิธี BA หรือ CTS/RTS โหนดจะสุ่มค่า Backoff Time โดยใช้ค่า CW ในการหาค่า Backoff Time ซึ่งเท่ากับ $Integer(CW \times Random(0, 1)) \times SlotTime$ (ค่า Slot Time มีค่าตาม PHY สำหรับ FHSS เป็น $50 \mu s$ DSSS เป็น $20 \mu s$ และสำหรับ IR เป็น $8 \mu s$) ค่า Backoff Time มีการลดค่าลงหลังจากช่องสัญญาณว่างเป็นเวลาเท่ากับ DIFS เป็นต้นไปถัดจากนั้นเป็นช่วงเวลา CW ในช่วงเวลานี้โหนดใดมีค่า Backoff Time เป็น 0 สามารถส่งเฟรมข้อมูลได้ทันที โดยมีข้อแม้ว่าต้องไม่มีโหนดอื่นใช้ช่องสัญญาณอยู่ในขณะนั้น แต่ถ้าพบว่ามีโหนดอื่นใช้ช่องสัญญาณไปแล้ว ต้องรอส่ง ในช่วง CW ถัดไป แต่กรณี

ค่า Backoff Time ไม่เท่ากับศูนย์ โหนดจะลดค่า Backoff Time ตามค่าของ Slot Time ใน CW ที่ผ่านไป แต่เมื่อช่องสัญญาณไม่ว่าง โหนดจะหยุดลดค่า Backoff Time และจะลดค่า Backoff Time อีกครั้งเมื่ออยู่ในช่วงเวลา CW

2.5 กระบวนการค้นหาเส้นทาง

กระบวนการค้นหาเส้นทาง มีหน้าที่ในการควบคุมดูแลการจัดส่งข้อมูลไปถึงปลายทางที่ต้องการ เนื่องจากข้อจำกัดในระยะเวลาการสื่อสารทำให้แต่ละโหนดในเครือข่ายไม่สามารถเห็นและส่งถึงทุกโหนดในเครือข่าย ดังนั้น ทำให้ต้องเกิดการฝากข้อมูลและส่งไปเรื่อยให้ถึงปลายทางเพื่อค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดในแต่ละการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายจึงเป็นงานวิจัยที่ต้องพัฒนาขึ้น มีหลายงานวิจัยที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับเครือข่ายไร้สายเช่น GPSR [42] ที่พัฒนาสำหรับเครือข่ายไร้สายทั่วไปและเป็นการค้นหาเส้นทางระบบตำแหน่งที่ได้รับความนิยม แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบเคลื่อนที่มีจุดมุ่งเน้นในการทำงานในหลายด้านเช่น ความล่าช้า คุณภาพการให้บริการ อัตราการส่ง แต่จะไม่เน้นในเรื่องพลังงานมากนักเนื่องจากอุปกรณ์สามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่โดยผู้ใช้ได้ แต่ขณะที่เซ็นเซอร์ไร้สายไม่สามารถทำเช่นนั้นได้เนื่องจากเซ็นเซอร์มีจำนวนมาก มีขนาดเล็กและอาจกระจายแบบ สุ่ม ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแหล่งพลังงานของเซ็นเซอร์โหนดได้

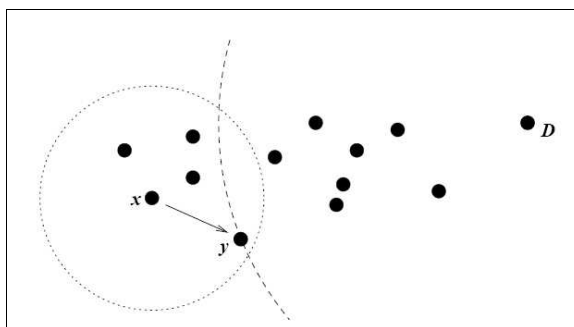
ดังนั้นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจึงพยายามลดพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายให้มากที่สุด โดยแลกเปลี่ยนกับความจำเป็นอื่นๆของเครือข่าย การออกแบบกระบวนการทำงานของเครือข่ายจะขึ้นกับความแตกต่างด้านการประยุกต์ใช้งาน โครงสร้างเครือข่าย ตัวอย่างของกระบวนการค้นหาเส้นทาง เช่น DD [7] SPIN [6] Rumor [44] GBR [45] นอกจากนี้ยังมีการทำงานแบบกลุ่ม เช่น LEACH [11] แต่อย่างไรก็ตามงานส่วนนี้ใช้กระบวนการค้นหาเส้นทางแบบเท่าเทียม (Flat Networks) เป็นหลักดังนั้นจะไม่อธิบายถึงในส่วนนี้

2.5.1 GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

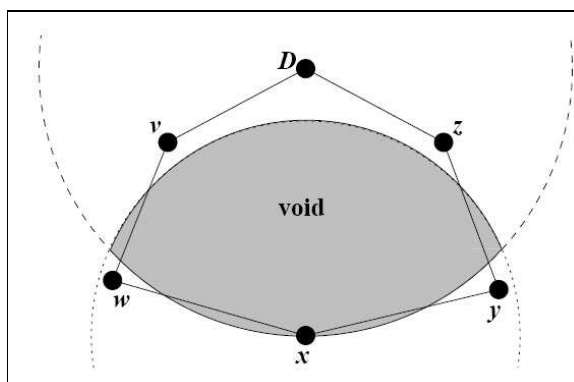
GPSR [42] เป็นรูปแบบการทำงานแบบระบบตำแหน่ง (Position Based) ที่อาศัยข้อได้เปรียบในการรู้ตำแหน่งของตนเองและปลายทางในการตัดสินใจส่งข้อมูล ดังนั้นแต่ละโหนดจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของตนเอง (อาจด้วย GPS หรือ [43]) และปลายทาง ข้อดีของระบบนี้คือการมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเส้นทางที่ต่ำและต้องการข้อมูลของโหนดข้างเคียงเท่านั้นที่ใช้ในการตัดสินใจ

แพ็คเก็ตจะ ประกอบ ด้วยตำแหน่งของปลายทางและ โหนดต้องการ ข้อมูลตำแหน่งของโหนดข้างเคียงเพื่อทำการส่งแพ็คเก็ต แสดงในภาพที่ 2-4 โหนด x จะส่งหาโหนดข้างเคียง y ที่อยู่ใกล้ปลายทางกว่าตัวมันเอง (ภายในระยะเวลาส่งของสัญญาณวิทยุ) เราเรียกวิธีการนี้ว่า Greedy Forwarding ซึ่งมีประสิทธิภาพอย่างมากในเครือข่ายที่กระจายตัวแบบหนาแน่น อย่างไรก็ตามความผิดพลาดสามารถเกิดขึ้นเมื่อการมีอยู่ของช่องว่าง (Void) หรือ Dead-End เมื่อโหนดเดินทางถึงจุดสูงสุดแบบโลคอล ที่ซึ่งไม่มีโหนดข้างเคียงที่ใกล้ปลายทางกว่าตัวมันเอง (แสดงในภาพที่ 2-5) ในสถานการณ์นี้แพ็คเก็ตจะไม่สามารถไปถึงปลายทางได้ อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่แก้ไข

ปัญหานี้ยกตัวอย่างเช่น ใช้การฟลัดซึ่งจำกัดจำนวนฮอปเพื่อเอาชนะ Dead-End ผ่านโหนดอื่นที่มีอยู่ เมื่อไปถึงโหนดที่ไม่มีโหนดที่ใกล้เคียงกว่าตัวมันเอง มันจะส่งแพ็คเก็ตค้นหาใน n ฮอป โหนดที่อยู่ใกล้เคียงมากกว่าจะทำการส่งตอบกลับมา และโหนดที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดจะถูกเลือก ค่าของ n จะขึ้นกับโครงสร้างเครือข่าย (ขนาดของ Void) การทำงานของ GPSR จะใช้ Face Routing ในการแก้ไขปัญหาด้วย Right-Hand Rule ที่แพ็คเก็ตจะทำการเดินทางเส้นทางรอบพื้นที่ว่างและเพื่อป้องกันการเดินซ้ำของเส้นเชื่อมต่อที่ทำให้แพ็คเก็ตไม่สามารถเดินทางรอบพื้นที่ว่างๆได้ GPSR จะใช้ Relative Neighborhood Graph (RNG) และ Gabriel Graph (GG) เพื่อทำการตัดเส้นเชื่อมต่อที่ซ้อนทับกัน



ภาพที่ 2-4 แสดงตัวอย่างการทำงานของ GPSR ขณะเดินทางแบบ Greedy Forwarding



ภาพที่ 2-5 แสดงตัวอย่างการทำงานของ GPSR ขณะเกิดปัญหาช่องว่างของเครือข่าย

2.5.2 Directed Diffusion [7]

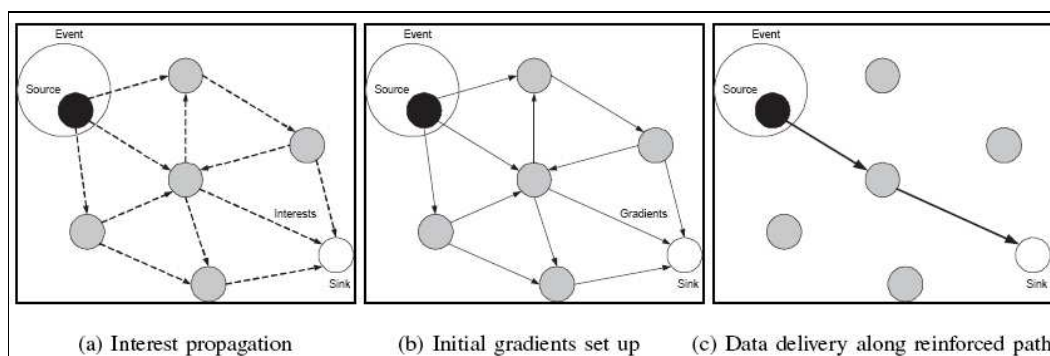
Directed Diffusion (DD) เป็นงานวิจัยแรกๆที่มีการแนะนำถึงการทำงานที่มีลักษณะที่เป็นดาต้าเซนทริก (Data Centric) ที่การสื่อสารจะมีการกำหนดรายละเอียดของข้อมูล และมีการจัดการเกี่ยวกับข้อมูลเป็นหลักที่มีลักษณะต่างจากการทำงานแบบ IP ที่ไม่มีการพิจารณาถึงการประมวลผลจากข้อมูลในแพ็คเก็ต โปรโตคอลมุ่งเน้นในการพัฒนาเกี่ยวกับเรื่องการประหยัดพลังงาน โดยทำการค้นหาเส้นทางเดินที่ดีที่สุด (มีอัตราความล่าช้าที่ต่ำ) ในการรับส่งข้อมูล และการทำเก็บและประมวลผลภายในเครือข่ายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ความสามารถที่โดดเด่นอีก

อย่างหนึ่ง คือ DD จะมีการทำงานในลักษณะ ที่เรียกว่าโลคอลไลซ์อินเตอร์แอคชั่น (Localized Interactions) คือการรับส่งข้อความจะทำการระหว่างโหนดที่อยู่ใกล้เคียงกัน ข้อมูลที่ใช้ในการส่ง จะถูกเรียกว่าเนมมิ่ง (Naming) โดยกำหนดรายละเอียด (Named Data) และคุณลักษณะต่างๆของ ข้อมูล (Attribute-value)

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างของการกำหนดเนมมิ่งหรือรายละเอียดข้อมูล

Type = four-legged animal // detect animal location
Interval = 20 ms // send back events every 20 ms
Duration = 10 seconds // for the next 10 seconds
Rect = [-100, 100, 200, 400] // from sensors within rectangle

อินเทอร์เรส และเกรเดียน (Interests & Gradients) เป็นกระบวนการสร้างเส้นทางเดิน โดยจะเริ่มจากสถานีฐานที่ต้องการจะรวบรวมข้อมูลจากบริเวณหนึ่ง สถานีฐานจะทำการสร้าง อินเทอร์เรสเมสเสจ (Interest Message) ภายในอินเทอร์เรสจะประกอบด้วยข้อมูลต่างๆ ตามตารางที่ 2-1 จากนั้นจะถูกแพร่กระจายผ่านตัวเครือข่าย โดยใช้วิธีการ โลคอลไลซ์อินเตอร์แอคชั่น



ภาพที่ 2-6 แสดงตัวอย่างการทำงานของ DD

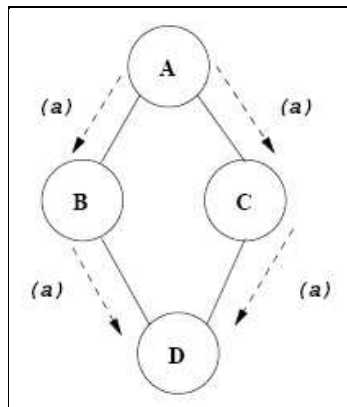
ภายในโหนดแต่ละโหนดจะมีข้อมูลส่วนของอินเทอร์เรสแคช (Interest Cache) ซึ่งทำหน้าที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับอินเทอร์เรสเมสเสจ ที่อยู่ภายในเครือข่าย แต่จะไม่มีเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสถานีฐาน ในกรณีที่อินเทอร์เรสใหม่เข้ามาและยังไม่มีอินเทอร์เรสนั้นอยู่ในอินเทอร์เรสแคช จะทำการเพิ่มอินเทอร์เรสใหม่เข้าไปในแคชแต่ละอินเทอร์เรสที่ถูกเก็บไว้จะต้องเป็นอินเทอร์เรสที่มีความแตกต่างกันสามารถดูได้จากคุณสมบัติของข้อมูล ในขั้นตอนของการกระจายอินเทอร์เรสเมสเสจ และมีจัดการเกี่ยวกับอินเทอร์เรสแคช โปรโตคอลจะมีการสร้างค่าเกรเดียน (Gradients) ตามภาพที่ 2-6 ซึ่งค่าเกรเดียนนี้จะถูกกำหนดไว้ในอินเทอร์เรสแคชด้วย โดยที่จะมีฟิลด์ข้อมูลพิเศษเพิ่มเข้าไปอีกสองตัว คือ ดาต้าเรท (Data Rate) และ ไดรเรคชั่น (Direction) ไดรเรคชั่นเป็นทิศทางของเกรเดียน มีทิศทางออกจากโหนดที่ได้รับอินเทอร์เรสเมสเสจ และดาต้าเรท เป็นขนาดของเกรเดียน จะถูกใช้ต่อไปในขั้นตอนของการส่งข้อมูล (Data Propagation) โดยที่ดาต้าเรทจะเป็นตัวบอกถึงทิศทางของเส้นทางเดิน ที่นำไปสู่สถานีฐาน

การส่งข้อมูล (Data Propagation) หลังจากขั้นตอนการสร้างอินเทอร์เฟซและเกรเดียนต์ โหนดแต่ละโหนดจะมีรายละเอียดของอินเทอร์เฟซและทิศทางของการส่งข้อมูล (Gradient) ที่อยู่ภายในอินเทอร์เฟซแคช ทำให้โหนดสามารถรู้ว่าต้องทำการตรวจจับข้อมูลอะไรบ้าง, เมื่อเวลาเท่าไร และทำการส่งข้อมูลไปทิศทางไหน โหนดจะส่งข้อมูลไปตามเส้นทางของเกรเดียนต์

DD มีข้อดี คือ มีการคำนวณเส้นทางเดินที่มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลทำให้คุณภาพของเส้นทางมีคุณภาพและสามารถลดพลังงานจากลดปริมาณที่ซ้ำซ้อนในการส่งข้อมูลแต่ข้อเสีย DD คือต้องทำการปลัดขิงอินเทอร์เฟซเมสเสจไปทั่วทั้งเครือข่าย ในตอนเริ่มต้นของโปรโตคอลถ้าในกรณีที่เครือข่ายมีขนาดใหญ่มากขึ้นจะทำให้สูญเสียพลังงานและเกิดการชนกันของแพ็คเกจ อย่างไรก็ตามการทำงานของ DD ไม่มีการรวมข้อมูลจากภายในเครือข่ายเพียงแต่แนะนำถึงความเป็นไปได้เท่านั้น ต่อถึงมีการพัฒนาต่อมาใน [9] ที่นำการรวมข้อมูลมาใช้ในกระบวนการทำงาน

2.5.3 Sensor Protocols For Information Via Negotiation (SPIN)[6]

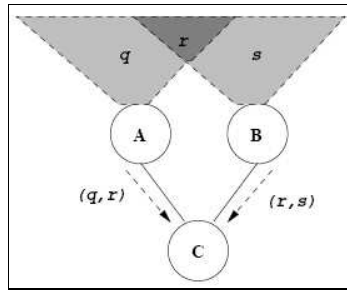
การกระจายข้อมูล (Data Dissemination) เป็นวิธีการที่ใช้ในการกระจายข้อมูลให้ทุกโหนดทั่วทั้งเครือข่าย เมื่อมีโหนดที่ต้องการกระจายข้อมูล จะทำการส่งข้อมูลต่อกันไปเรื่อยๆ ภายในเครือข่าย จนทุกโหนดภายในเครือข่ายได้รับข้อมูล กระบวนการทำงานเช่นนี้มีปัญหาในลักษณะการกระจายข้อมูลที่ซ้ำซ้อนกัน 2 ลักษณะ ดังนี้



ภาพที่ 2-7 แสดงปัญหาการกระจายข้อมูลซ้ำซ้อนแบบ Implosion

2.5.3.1 Implosion ปัญหาการกระจายข้อมูลซ้ำซ้อนกันแบบอิมพลชัน คือ จากรูป โหนด A ทำการกระจายข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียง ต่อจากนั้นโหนด B และ C จะทำการส่งข้อมูลต่อไปยังโหนด D ซึ่งข้อมูลที่ส่งไปยังโหนดจะเป็นข้อมูลที่เหมือนกันสองชุด ทำให้ระบบสูญเสียพลังงาน และช่องสัญญาณไปให้การ รับ/ส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อน ดังแสดงในภาพที่ 2-7

2.5.3.2 Overlap ปัญหาการกระจายข้อมูลที่มีข้อมูลบางส่วนที่ซ้ำซ้อนกัน แบบโอเวอร์แลป จากภาพที่ 2-8 โหนดสองโหนด A และ B ได้รับข้อมูลจากโหนด ที่มีพื้นที่ การทำงานที่เหลื่อมกัน โหนด A จะได้รับข้อมูล (q, r) และโหนด B จะได้รับข้อมูล (r, s) เมื่อข้อมูลส่งต่อไปให้กับโหนด C ข้อมูลที่ได้รับ จะมีข้อมูลของ (q, r) และ (r, s) ซึ่งจากข้อมูลทั้งสองชุดนี้ จะเห็นว่า จะมีข้อมูล r ที่ซ้ำกันอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 แสดงปัญหาการกระจายข้อมูลซ้ำซ้อนแบบ Overlap

ปัญหาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้น ในกระบวนการแพร่กระจายข้อมูลโดยทั่วไป ตัวอย่างเช่น

2.5.3.3 การฟลัดแบบดั้งเดิม (Classic Flooding) เป็นการกระจายข้อมูลในลักษณะที่ตัวส่งข้อมูลจะทำการกระจายข้อมูล (Broadcast) ถึงโหนดข้างเคียง หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วจะทำการกระจายข้อมูลต่อไปอีกในลักษณะเดียวกัน ซึ่งจะสิ้นสุดการกระจายข้อมูลเมื่อทุกโหนดในเครือข่ายได้รับข้อมูลแล้ว ปัญหาของคลาสสิกฟลัดจึงจะเกิดการซ้ำซ้อนดังกล่าวข้างต้นของการกระจายข้อมูลทำให้สูญเสียพลังงานและช่องสัญญาณ เนื่องจากการส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนกันจำนวนมาก แต่ข้อดีของคลาสสิกฟลัดคือ ใช้เวลาในการกระจายข้อมูลทั่วทั้งเครือข่ายน้อย

2.5.3.4 การฟลัดแบบค่อยๆ (Gossiping Flooding) จะแตกต่างจากคลาสสิกฟลัดตรงที่ในการส่งข้อมูลจะไม่ได้มีการกระจายข้อมูลไปในโหนดข้างเคียงทุกตัว แต่จะทำการสุ่มเลือก (Random) โหนดหนึ่งโหนดในการกระจายข้อมูล ซึ่งทำให้สามารถแก้ปัญหาความซ้ำซ้อนแบบอิมโพลัน ข้อเสียของการฟลัดแบบค่อยๆ คือเวลาที่ใช้ในการกระจายข้อมูลเป็นไปได้ช้า และยังคงมีปัญหาโอเวอร์แลป

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอ SPIN เป็นโปรโตคอลที่ใช้การกระจายข้อมูลระหว่างโหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย โดยมุ่งเน้นประสิทธิภาพเกี่ยวกับการใช้พลังงาน โดยที่ข้อมูลจะถูกกำหนดเป็นรายละเอียดของข้อมูลหรือ เรียกว่า เมทาดาทา (Meta-Data) โปรโตคอลเป็นลักษณะที่เรียกว่า ดาต้าเซนทริก (Data-Centric) คือในการสื่อสารจะสนใจเกี่ยวกับตัวข้อมูลเป็นหลัก สปินโปรโตคอลกำหนดให้โหนดแต่ละโหนดรู้ข้อมูลเกี่ยวกับโหนดทุกๆ โหนดที่อยู่ในเครือข่าย ซึ่งหมายถึงโหนดทุกๆ โหนดมีสถานะเป็นฐาน

เมทาดาทา (Meta-Data) คือข้อมูลอย่างย่อซึ่งใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลนั้น (Meta-Data Descriptor) ถ้าสมมติให้ x เป็นเมทาดาทาของดาต้า X แล้ว ขนาดของค่า x ควรสั้นกว่าขนาดของ X และถ้าข้อมูลสองข้อมูลที่มีความแตกต่างกันแล้วเมทาดาทาของข้อมูลควรจะแตกต่างกันด้วย ในทำนองเดียวกันถ้าข้อมูลทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันเมทาดาทาของข้อมูลควรจะเหมือนกัน ดังนั้นเมทาดาทามีข้อดีในการช่วยแก้ปัญหาฟลัดข้อมูล ทำให้ข้อมูลไม่ซ้ำกัน (Redundant) ในเครือข่ายดังนั้น ทำให้ระบบมีการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น สปินเมสเสจ (SPIN Messages) ใช้เมสเสจ (Messages) 3 ชนิด ในการสื่อสาร คือ

2.5.3.5 จะสร้าง Data Advertisement ขึ้นมา เมื่อโหนดต้องการมีค่าที่ต้องการส่ง ออก โหนดจะทำการประกาศ ADV ถึงโหนดข้างเคียงซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดของข้อมูล เท่านั้น Meta-Data

2.5.3.6 จะถูกสร้างเมื่อโหนดรับ ADV จากโหนดข้างเคียงแล้วต้องการข้อมูลนั้น โหนดจะส่ง REQ กลับเพื่อขอข้อมูลนั้นซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดของข้อมูลเท่านั้น Meta-Data เช่นเดียวกัน

2.5.3.7 จะเป็นข้อมูลจริงที่โหนดต้องการส่ง และจะส่งเมื่อได้รับ REQ แล้ว ประกอบด้วยรายละเอียดของข้อมูล Meta-Data และข้อมูลจริงที่ต้องการส่ง

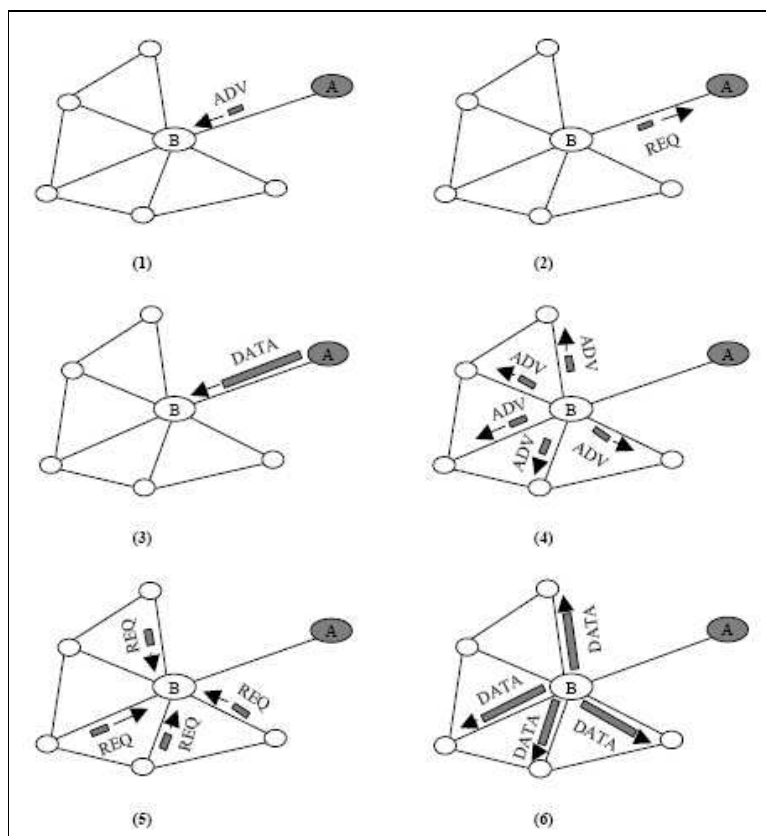
กระบวนการทำงานเราจะเรียกว่า SPIN-1: A3-Stage Handshake Protocol เป็นกระบวนการทำงานอย่างง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน ใช้สำหรับกระจายข้อมูลไปในเครือข่าย การทำงานจะมี 3 ขั้นตอน คือ (ADV-REQ-DATA) ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะสัมพันธ์กับ ชนิดของเมสเสจที่กล่าวมาแล้ว

โปรโตคอลจะเริ่มเมื่อโหนดมีข้อมูลใหม่ที่ต้องการกระจาย ตัวโหนดจะทำการส่งข้อความ ADV (ADV Stage) ไปยังโหนดใกล้เคียงโดยที่ภายในจะใส่เมทาดาต้าไปด้วย โหนดที่ได้รับ ADV จะตรวจสอบ ADV ว่าได้รับแล้วหรือ ได้ส่ง REQ กลับไปแล้ว ถ้ายังจะทำการสร้าง REQ ตอบกลับยังโหนดผู้ส่ง (REQ Stage) และเมื่อโหนดผู้ส่งได้รับ REQ จะทำการส่งดาต้าให้แก่โหนดที่ส่ง REQ มา ในภาพที่ 2-9 แสดงตัวอย่างการทำงานของ SPIN เมื่อโหนด B รับ ADV จากโหนด A, โหนด B จะตรวจสอบว่าโหนด B มีข้อมูลนี้อยู่หรือไม่ 2-9(a) ถ้ายังไม่มีโหนด B จะส่ง REQ กลับไปยังโหนด A 2-9(b) และเมื่อโหนด A รับ REQ จะทำการส่งข้อมูลกลับไปให้โหนด B 2-9(c)

SPIN สามารถแก้ไขปัญหาการกระจายข้อมูลที่ซับซ้อนได้ดี เช่น ปัญหาอิมโพลชันและโอเวอร์แลป โดยจะมีการเจรจาการส่งข้อมูลกันระหว่างโหนดก่อนและมีการใช้เมทาดาต้า โดยการใช้ ADV, REQ และ DATA เมสเสจ เช่น ในการกรณีที่ส่ง ADV เมสเสจ ซึ่งประกอบด้วยเมทาดาต้า ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าดาต้า ไปยังโหนดข้างเคียงแล้วโหนดข้างเคียง ไม่ต้องการที่จะรับข้อมูลชนิดนั้น หรือมีข้อมูลอยู่แล้ว จะไม่มีการส่ง REQ กลับมา และจะไม่มีการส่งดาต้าไป ทำให้ประหยัดช่องสัญญาณ และพลังงานในการรับส่งข้อมูลเมื่อเทียบกับการส่งข้อมูลทั้งหมด ข้อดีอีกประการหนึ่งคือขั้นตอนในการตัดสินใจ ในการจะส่งข้อมูลไม่ซับซ้อน ใช้เวลาคำนวณน้อยทำให้ใช้พลังงานน้อย ส่วนข้อเสียของสปิน คือไม่มีรูปแบบการส่งข้อมูล ในลักษณะที่เป็นเส้นทาง การรับส่งข้อมูลเฉพาะ ใช้ลักษณะการกระจายข้อมูลไปเรื่อยๆ ทำให้ไม่เหมาะสม ใช้กับงานประยุกต์แบบถามหาข้อมูลเข้าไปในเครือข่าย (Query Base) ซึ่งมีความต้องการในการหาเส้นทางในการรับส่งข้อมูลที่ดี

2.5.4 Rumor Routing Algorithm

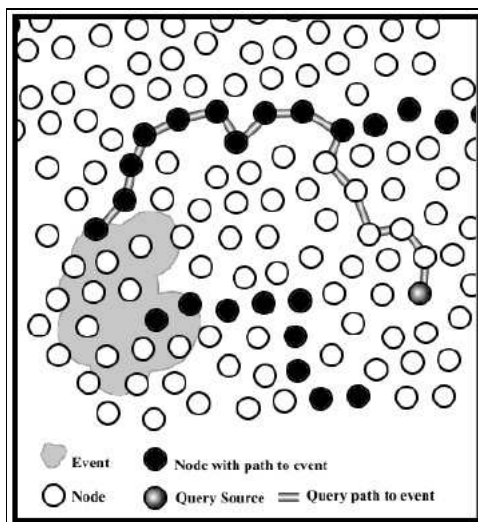
Rumor [44] เป็นโปรโตคอลที่ปรับปรุงลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเส้นทางระหว่างโหนด สร้างข้อมูลกับสถานีฐาน ตัวอย่างเช่น DD ในขั้นตอนแรกเป็นการหาเส้นทางถึงสถานีฐาน จะทำการส่งอินเทอร์เน็ตไปทั่วเครือข่ายโดยใช้วิธีการการฟลัด ซึ่งทำให้โหนดต้องสูญเสียพลังงานจำนวนมาก อย่างน้อยที่สุดก็ต้องสูญเสียพลังงานในการรับอินเทอร์เน็ตและถ้ากรณีเครือข่ายมีขนาดใหญ่ มีความหนาแน่นมากจะทำให้สูญเสียพลังงานมากขึ้น



ภาพที่ 2-9 แสดงตัวอย่างการทำงานของ SPIN

แต่สำหรับกรณีของ Rumor ในช่วงของการหาเส้นทางเดินจะไม่ใช้การฟลัดแพ็คเก็ตออกไปทั่วทั้งเครือข่าย ทำให้ทุกโหนดไม่จำเป็นต้องสูญเสียพลังงานในขั้นตอนนี้ Rumor จะมีรูปแบบเป็นอีเวนต์เซนทริก (Event-Centric) และคิวรีเบส (Query Based) ก็จะมีโหนดต้นกำเนิดข้อมูลที่ป็นเซ็นเซอร์ในเครือข่าย และจะมีสถานะที่เป็นตัวขอข้อมูลและทำการรวบรวมข้อมูลในโปรโตคอลจะทำการสนใจข้อมูลในลักษณะของการกำหนดเป็นรูปแบบของเหตุการณ์ หรือเรียกว่าอีเวนต์เซนทริก

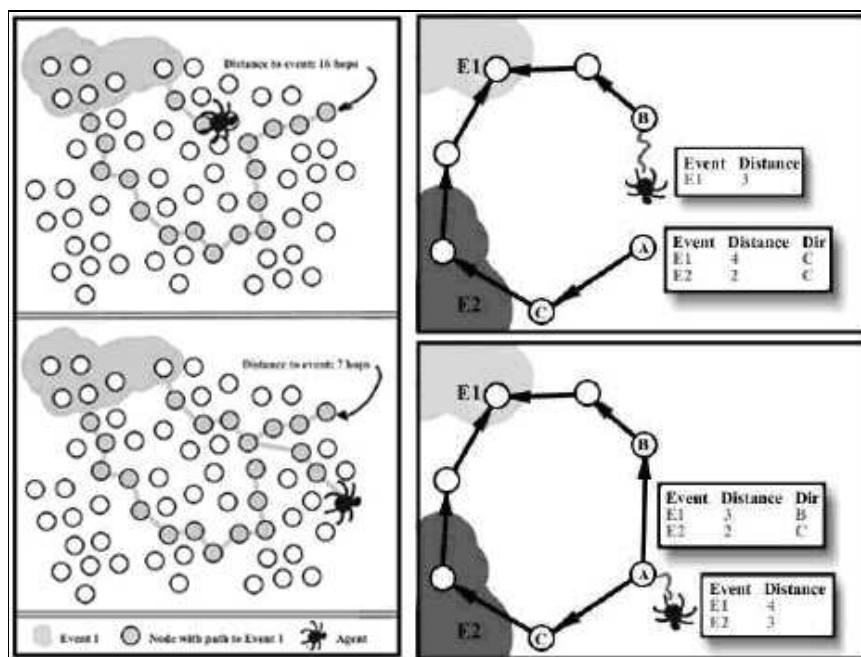
Rumor จะทำการกำหนดลักษณะของข้อมูลในรูปแบบของ Event (Event Centric) ทำการแบ่งประเภทของโหนดเป็น 2 ส่วน คืออีเวนต์โหนด (Event Node) กับคิวรีโหนด (Query Node) ซึ่งความหมายของอีเวนต์โหนดคือกลุ่มของโหนดที่สามารถตรวจจับเหตุการณ์ที่ต้องตรวจสอบในเครือข่าย และคิวรีโหนดคือโหนดที่ร้องขอข้อมูลตามอีเวนต์ที่ต้องการ การทำงานจะแยกเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเมื่อมีอีเวนต์เกิดขึ้นในกลุ่มของอีเวนต์โหนดนั้น โปรโตคอลจะทำการสร้างเอเจนต์แพ็คเก็ต (Agent) โดยที่ตัวเอเจนต์จะทำการสร้างเส้นทางเดินที่เรียกว่าอีเวนต์เส้นทางเดิน (Event Path) ออกไป โดยเป็นการเดินแบบสุ่ม (Random Walk) ไปเรื่อยๆ และจะสิ้นสุดเมื่อเกินจำนวนสอปที่กำหนดไว้ เช่น กำหนดไว้ 500 สอป ตัวเอเจนต์ก็จะทำการสร้างเส้นทางเดินของเหตุการณ์ออกไป เป็นระยะเท่ากับ 500 สอปแล้ว ตัวเอเจนต์ก็ถูกละทิ้ง (Drop) การทำงานของการเดินทางของเอเจนต์แสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 แสดงตัวอย่างการทำงานของ Agent ใน Rumor Routing

สำหรับคิวรี โหนดจะเริ่มทำงาน เมื่อ โหนดต้องการ จะรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับอีเวนท์ที่ต้องการ ตัวคิวรีโหนดจะทำการสร้างเส้นทางเดินออกไป ในลักษณะเดียวกันกับการสร้างเส้นทางเดินของเหตุการณ์ซึ่งคือการเดินแบบสุ่ม และเมื่อคิวรีเส้นทางเดินและเส้นทางเดินของเหตุการณ์เดินทางมาตัดกัน จะทำให้คิวรีโหนดได้เส้นทางรับส่งข้อมูลจากการจำลองการทำงานของ Monte Carlo แสดงให้ทราบว่า ความน่าจะเป็นของโอกาสของเส้น 2 เส้นที่อยู่ภายในกรอบสี่เหลี่ยมจะเดินทางมาตัดกันเท่ากับ 69% ดังนั้น แสดงว่า 5 เส้นทางเดิน ที่นำไปสู่อีเวนท์จะมีโอกาสที่คิวรีเส้นทางเดิน เดินทางมาตัดเท่ากับ 99.7% ภายในโหนดแต่ละโหนดจะมีการเก็บข้อมูลไว้ในตารางชื่อว่า ตารางอีเวนท์ (Event Table) จะเก็บรายละเอียดของอีเวนท์ว่ามีทิศทาง และระยะทางอยู่ห่างจากโหนดเท่าไร ซึ่งจากคุณสมบัติของตารางอีเวนท์ทำให้โปรโตคอลสามารถให้การปรับปรุงเส้นทางเดินได้ จากภาพที่ 2-11 เมื่อเอเจนต์มีการสร้างอีเวนท์เส้นทางเดิน และได้มีการค้นพบเส้นทางใหม่ ที่มีระยะทางที่ใกล้กว่าเส้นทางเก่า ตัวโปรโตคอลสามารถทำการปรับปรุงเส้นทางเดินใหม่ ในตารางที่อยู่ภายในโหนดให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ และจะเห็นว่าในส่วนด้านล่างซ้ายของภาพ โหนด A, B จะมีตารางอีเวนท์ ซึ่งบอกถึงข้อมูลเกี่ยวกับอีเวนท์จากโหนดอีเวนท์ E1, E2 อยู่ห่างเป็นระยะทางและทิศทางอย่างไร เมื่อเอเจนต์ของ E1 ที่ออกจากโหนด B มาถึงโหนด A โปรโตคอลจะทำการปรับปรุงตารางอีเวนท์ของโหนด A ใหม่ โดยจะเปลี่ยนแปลงระยะและทิศทางของ E1 ภายในโหนด A ใหม่

ดังนั้น Rumor สามารถลดการสูญเสียพลังงานในการหาเส้นทางเดินที่ใช้การฟัดไปทั้งเครือข่าย มีคุณสมบัติด้านความสามารถในการขยายเครือข่าย (Scalability) ได้ดีและเหมาะสมสำหรับลักษณะงานที่มีขนาดใหญ่ และมีจำนวนอีเวนท์ที่น้อย แต่อย่างไรก็ตามเส้นทางเดินที่ได้ อาจไม่ใช่เป็นเส้นทางเดินที่ดีที่สุด, ในกรณีที่จำนวนของอีเวนท์เมื่อเทียบกับจำนวนของคิวรีมากๆ จะทำให้โหนดจะสูญเสียทรัพยากร (Resource) ในการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับอีเวนท์มากเกินไป



ภาพที่ 2-11 แสดงตัวอย่างการทำงานของ Rumor Routing

2.5.5 Energy Efficient Routing In Wireless Sensor Networks (GBR)

GBR [45] เน้นให้เครือข่ายมีอายุการทำงานยาวนานมากที่สุด ซึ่งจะแตกต่างจากโปรโตคอลอื่นที่มุ่งเน้นในการหาเส้นทางเดินที่สั้นที่สุดหรือเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดในการส่งข้อมูล ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการใช้เส้นทางเดิมหรือเซ็นเซอร์โหนดเดิมซ้ำกันจะทำให้โหนดที่ถูกใช้งานบ่อย โหนดจะสูญเสียพลังงานไปเรื่อยๆและในที่สุดจะหยุดทำงาน

GBR จะมีการปรับปรุงประสิทธิภาพ 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกเป็นการทำการรวมข้อมูลและส่วนที่สองเป็นการกระจายการใช้งานเครือข่าย (Network Traffic Spreading)

2.5.5.1 การทำการรวมข้อมูล (Aggregation Data) บนโหนด ซึ่งข้อมูลได้ส่งผ่าน เช่น การรวม (Combine) ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนกัน ในบทความนี้ จะเรียกการทำงานในส่วนนี้ว่า "Data Combining Entity (DCE)" แต่ภายในบทความ ไม่ได้บอกรายละเอียดเกี่ยวกับการทำงานของ DCE จากการจำลองการทำงาน โดยใช้ DCE ลงไปภายในโหนด ทำให้ขนาดของข้อมูลที่ส่งภายในเครือข่ายลดลงถึง 60% แต่ผลจากการจำลองการทำงานพบว่ามีความล่าช้าสูงขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นการแลกเปลี่ยนกัน

2.5.5.2 การกระจายการใช้งานเครือข่าย (Network Traffic Spreading) เป็นส่วนของวิธีในการกระจายการใช้งานเครือข่าย (Balance) ให้แต่ละโหนด ถูกใช้งานอย่างเท่าเทียม เพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการใช้งาน โหนดบางโหนดซ้ำกันบ่อยส่งผลทำให้อายุการทำงาน of เครือข่ายสั้นลง ดังนี้

ก) การกระจายแบบสุ่ม (Stochastic Scheme) จะทำงานเมื่อมีเส้นทางที่มีค่าของเกรเดียนต์เท่ากันมากกว่า 2 เส้นทาง จะทำการสุ่มเลือกเส้นทางหนึ่งเส้นทางในการส่งแต่ละครั้ง นั่นคือจะไม่มีการใช้เส้นทางเดิมในการส่งทุกครั้ง

ข) การกระจายแบบใช้เงื่อนไขพลังงาน (Energy-Based Scheme) วิธีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเกรเดียนใหม่ ซึ่งภายในค่าเกรเดียน คือ ค่าความสูงของโหนด (Node Height) ในกรณีที่พลังงานที่เหลืออยู่ในโหนด น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Threshold) สำหรับการทดสอบในบทความนี้ ใช้ 50% หลังจากทำการปรับปรุงเกรเดียนของตัวเองแล้ว จะต้องทำการปรับปรุงให้โหนดข้างเคียงรับรู้ด้วย ซึ่งผลการปรับปรุงค่าเกรเดียนให้สูงขึ้น ทำให้ข้อมูลที่ถูส่งเข้ามา จะทำการเปลี่ยนแปลงเส้นทางไปใช้เกรเดียนที่ต่ำกว่า

ค) การกระจายแบบใช้เงื่อนไขสเต็มข้อมูล (Stream-Based Scheme) วิธีนี้จะคล้ายกับวิธีการกระจายแบบใช้เงื่อนไขพลังงาน แต่จะทำการปรับปรุงค่าเกรเดียนใหม่ โดยอาศัยเส้นทางการรับส่งของข้อมูล (Flow) หรือสเต็ม (Stream) ที่ไหลผ่านโหนด คือเมื่อโหนดที่มีสเต็มของข้อมูลไหลผ่านจำนวนหนึ่งครั้ง ก็จะทำให้การปรับปรุงเพิ่มค่าเกรเดียนขึ้นหนึ่งขั้น คือค่าความสูงของโหนดจากการทดสอบ และ เปรียบเทียบการใช้พลังงานของแต่ละรูปแบบการกระจาย Traffic ของเครือข่าย ผลคือการกระจายแบบ Stream-Based จะมีการกระจายการใช้พลังงานดีที่สุด

GBR มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ คือมีการกระจายการใช้พลังงานของแต่ละโหนดโดยเฉลี่ยเท่าๆกัน ทำให้อายุการทำงานรวมของเครือข่ายยาวนานขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ เช่น ในการบำรุงรักษาระบบโหนดแต่ละโหนดจะมีอายุการทำงานใกล้เคียงกัน สามารถที่จะทำการเปลี่ยนแปลงแบตเตอรี่ใหม่ได้พร้อมๆกันทั้งระบบ ข้อเสียคือการกระจายแบบสเต็มเบสจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการครอบงำของแพ็คเกจ ในลักษณะการส่งข้อมูลที่ผ่านทางเครือข่ายที่มีจุดที่เป็นคอขวด (Bottleneck) และมีทราฟฟิก (Traffic) ที่หนาแน่น เนื่องจากสเต็มเบสจะมีการกระจายการใช้งานของเส้นทางเดิน ซึ่งรวมถึงเส้นทางเดินที่ผ่านจุดที่เป็นคอขวด ทำให้กรณีที่ Traffic หนาแน่นจะทำให้สเต็มเบสถูกครอบงำ แต่สำหรับโปรโตคอลแบบอื่นซึ่งไม่มีการกระจายของทราฟฟิกจะทำการให้เส้นทางเดินไม่ผ่านทางคอขวดและทำให้การครอบงำแพ็คเกจน้อยกว่า

2.6 กระบวนการสร้างเส้นทางระบบอานานิคม

จากการทำงานกระบวนการหาเส้นทางที่ใช้การประมวลผลข้อมูล ทำให้เกิดแนวทางวิจัยใหม่สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ที่ใช้การรวมข้อมูลในเส้นทางเพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ส่ง ข้อมูลที่สะสมในเซ็นเซอร์โหนดจะถูกส่งถึงสถานีฐานเพื่อประมวลผล แต่จะกรณีที่เซ็นเซอร์โหนดมีแหล่งพลังงานที่จำกัด ถ้าให้เซ็นเซอร์โหนดทุกโหนดส่งโดยตรงถึงสถานีฐานโดยตรงจะไม่มีประสิทธิภาพอย่างมาก ข้อมูลที่ถูกสร้างจากเซ็นเซอร์โหนดข้างเคียงโดยส่วนใหญ่แล้วมากเกินไปจะมีความจำเป็นและมีข้อมูลที่คล้ายกันสูง จำนวนข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นจากเครือข่ายขนาดใหญ่โดยทั่วไปจะมีจำนวนมหาศาลที่ส่งให้สถานีฐาน ดังนั้นเราต้องการกลไกที่ใช้ในการรวมข้อมูลที่เซ็นเซอร์โหนดหรือโหนดในระหว่างเส้นทางเพื่อลดจำนวนการส่งถึงสถานีฐาน ส่งผลให้จำนวนการใช้พลังงานและช่องสัญญาณลดลง ซึ่งเราเรียกว่า การรวมข้อมูล หรือ "Data Aggregation" การรวมข้อมูลเป็นการนิยามถึงกระบวนการรวมข้อมูลจากหลายเซ็นเซอร์เพื่อจัดการส่งข้อมูลมากเกินไปและทำการผสมรวมข้อมูลที่โหนดระหว่างเส้นทางก่อนถึงสถานีฐาน

การเลือกเส้นทางสำหรับส่งถึงสถานีฐาน โดยให้สามารถรวมข้อมูลมากที่สุดเป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดในเชิงการจัดแบบหนึ่ง (Combinatorial Optimization) เป็นวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงการจัดลำดับตัวแปรตัดสินใจของปัญหาภายใต้เงื่อนไขหรือขอบเขตที่กำหนดขึ้น การหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงการจัดมีความสำคัญต่อการวางแผนและการตัดสินใจที่เกิดจากการหาคำตอบโดยเป้าหมายหลักของการตัดสินใจ เช่น การวางแผนการเดินทางโดยให้ไปครบทุกสถานที่และมีระยะการเดินทางน้อยที่สุด

โดยปกติปัญหาต่างๆ ในทางคณิตศาสตร์สามารถนิยามเป็น ฟังก์ชันของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) ได้ซึ่งจำนวนของตัวแปรตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบคือ ฟังก์ชันที่คำตอบหาได้จากหลักการกำหนด (Deterministic Function) เป็นฟังก์ชันที่มีแนวทางการหาคำตอบที่มีแนวทางการหาคำตอบอย่างแน่นอน จากฟังก์ชันที่สามารถนิยามเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้ หรือฟังก์ชันอีกแบบเป็นฟังก์ชันที่หาคำตอบได้จากการสุ่ม (Stochastic Function) เป็นฟังก์ชันที่แนวทางในการหาคำตอบไม่สามารถกำหนดได้ชัดเจน หรือ ไม่สามารถนิยามเป็น สมการทางคณิตศาสตร์ได้ เช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem, TSP) [14]

วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดสามารถแบ่งตามการวิธีการหาคำตอบได้ 3 วิธี วิธีแรกเป็นวิธีทางแคลคูลัส (Calculus Base Method) ซึ่งใช้ข้อมูลที่มีความชันของฟังก์ชันเป็นแนวทางการหาคำตอบ แต่สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมากเป็นผลให้ความสามารถในการหาความชันของฟังก์ชันเป็นไปได้ยากจำเป็นต้องใช้คณิตศาสตร์ชั้นสูงและอาจไม่สามารถหารูปแบบ (Model) ที่เหมาะสมทำให้วิธีนี้ขาดเสถียรภาพ วิธีที่สองเป็นวิธีการทางอินัมเมอเรทีฟ (Enumerative Scheme) โดยวิธีนี้จะหาค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function Values) ของทุกๆ จุดในพื้นที่การค้นหา (Search Space) การค้นหาวิธีนี้เป็นการค้นหาทำให้หาคำตอบที่ดีที่สุดแต่ต้องการการคำนวณที่มากเมื่อพื้นที่มีขนาดใหญ่ วิธีการสุดท้ายคือวิธีการหาคำตอบแบบสุ่ม (Random Search) ที่ใช้การสุ่มในการหาคำตอบ

จากวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวที่กล่าวมาทั้ง 3 แบบ ในการแก้ปัญหการรวมข้อมูลในเครือข่ายเพื่อหาเส้นทางหรือลำดับของโหนด จะเห็นได้ว่าวิธีทางแคลคูลัส ไม่สามารถใช้ในการแก้ปัญหได้เนื่องจากไม่สามารถสร้างรูปแบบหรือฟังก์ชันที่เหมาะสมกับรูปแบบเครือข่ายขนาดใหญ่และสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ ส่วนวิธีการอินัมเมอเรทีฟต้องการคำนวณที่มากและข้อมูลจำนวนมากจากในเครือข่ายและต้องการการคำนวณทุกครั้งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นวิธีทางอินัมเมอเรทีฟนี้จึงไม่เหมาะสม และสุดท้ายคือวิธีการหาคำตอบแบบสุ่มจึงน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหานี้

ระบบอาณานิคมมดเป็นกระบวนการในการค้นหาคำตอบแบบสุ่มวิธีการหนึ่ง ที่ถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาลากหลาย ตัวอย่างเช่น ปัญหาการจัดอันดับของลำดับ (Sequential Ordering Problem [46]) ปัญหาเส้นทางการเดินรถ (Vehicle Routing Problem [47]) และการแก้ปัญหเครือข่ายที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการให้บริการ [48] การสมดุลของภาระการใช้งาน [49] และการรวมข้อมูลที่ถูกใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

2.6.1 ระบบอาณานิคมมด

แนวคิดของระบบอาณานิคมมดใช้พฤติกรรมการค้นหาค้นหาอาหารของมด เมื่อมดต้องการจะหาอาหารมดจะเดินทางจากรังไปยังอาหาร ขณะเดินมดจะทิ้งสารฟีโรโมนในเส้นทางที่เดินผ่าน สารฟีโรโมนเป็นฮอร์โมนซึ่งสร้างโดยมดใช้ติดต่อทางอ้อมระหว่างมด มดแต่ละตัวสามารถเลือกเส้นทางไหนก็ได้จากระบบเคออส แต่เมื่อพบร่องรอยของสารฟีโรโมนในเส้นทางไหน มดตัวนั้นจะมีความน่าจะเป็นที่จะเลือกเดินตามเส้นทางดังกล่าว การที่มดทิ้งสารฟีโรโมนในระหว่างค้นหาอาหารนั้นเมื่อมดพบอาหารแล้ว มันก็จะกลับรังในเส้นทางเดิมพร้อมทั้งทิ้งสารฟีโรโมนเพิ่มอีก เมื่อมดตัวอื่นๆ ในบริเวณใกล้เคียงได้กลิ่น จะถูกดึงดูดจากสารเคมีดังกล่าวก็จะเลือกเส้นทางดังกล่าวทวีมากขึ้น ทำให้จำนวนของสารเคมีในเส้นทางนั้นมากยิ่งขึ้น ทำให้เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดมีฟีโรโมนมากกว่าเส้นทางอื่นๆ และเพื่อลดผลกระทบในอดีของเส้นทางเราจะใช้กลไกการระเหย (Evaporation) ให้ค่าฟีโรโมนในเส้นทางจะลดลงตามเวลาการสื่อสารระหว่างมดด้วยค่าฟีโรโมนนี้ให้สามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างรังและอาหารได้ รูปแบบการทำงานของมดนี้สามารถช่วยในการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดได้

อย่างไรก็ตามในการทำงานจริงเพื่อแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากกว่าที่จะใช้ระบบการทำงาน ของมดจริงๆ ยกตัวอย่างเช่นการหาค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดในกราฟ การใช้ระบบการทำงาน ของมดอาจทำให้เกิดปัญหาของการเกิดลูปภายในกราฟ เมื่อมีการเสริมฟีโรโมน ในขณะที่มดเดินทางหาอาหารเกิดลูปจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มของฟีโรโมนที่จะเพิ่มและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้การเลือกตามความน่าจะเป็นไม่สามารถทำงานได้อีก เพราะปัญหานี้เนื่องด้วยการเสริมฟีโรโมนเมื่อมดเดินทางหาอาหาร (Forward Pheromone Trail) อาจดูเหมือนว่าทางที่ง่ายที่สุดใน การแก้ปัญหาคือการไม่ใช้การเสริมฟีโรโมนเมื่อมดเดินทางหาอาหารแต่จะใช้เพียงการเสริมฟีโรโมนในตอนกลับจากการหาอาหาร (Backward Pheromone Trail) อย่างไรก็ตามการทำงานนี้ ยังคงไม่สามารถแก้ไขและทำให้ระบบการทำงานของมดไม่สามารถทำงานได้อีกต่อไป

ดังนั้นเราต้องการเพิ่มความสามารถการทำงานจากระบบของมดจริงๆ ขณะที่รักษาคุณสมบัติของมดจริงไว้ คือให้มดสามารถจดจำและสามารถเก็บข้อมูลต่างๆ ของเส้นทางรวมทั้งค่าใช้จ่ายของเส้นทาง ดังนั้นสามารถเพิ่มคุณลักษณะที่เป็นประโยชน์เช่น เราสามารถปรับปรุงค่าฟีโรโมนโดยปราศจากการเสริมค่าฟีโรโมนจากรังไปอาหาร ไม่เกิดลูปในกราฟ และเส้นทางที่มีคุณภาพจะสามารถสร้างการเสริมฟีโรโมนที่มากกว่าส่งผลให้สามารถแก้ปัญหาได้ดียิ่งขึ้น (จากผลการทดลองพบว่าในมดตระกูลหนึ่ง เมื่อมาจากอาหารชนิดดีกว่าจะพยายามเสริมฟีโรโมนมากกว่าอาหารที่แย่กว่า)

ด้วยข้อดีในการแก้ปัญหาที่คลุมเครือหรือไม่แน่นอน และไม่สามารถกำหนดรูปแบบของเครือข่ายได้และสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็ว [16] ดังนั้นจึงมีการนำระบบอาณานิคมมด มาใช้เพื่อหาเส้นทางเพื่อรวมข้อมูล [17, 18, 19] ดังนี้

2.6.2 An Ant Colony Algorithm for Sensor Network Routing [17]

เป็นกระบวนการค้นหาเส้นทางระบบอาณานิคมมดแรกที่ถูกใช้เพื่อหาเส้นทางที่เกิดการรวมข้อมูลที่มากที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการส่งหลายต้นทาง การทำงานจะประกอบด้วย

มดสองแบบ แบบแรกเป็นมดส่งจากเซ็นเซอร์โหนด (Forward Ant, fant) เป็นข้อมูลที่ถูกส่งถึงปลายทางเพื่อหาเส้นทางใหม่และเก็บข้อมูลต่างๆของเส้นทาง และแบบที่สองเป็นมดส่งกลับ (Backward Ant, bant) เดินทางกลับถึงต้นทางจากปลายทางเพื่อปรับปรุงเส้นทางที่เดินผ่าน แต่ละโหนดจะประกอบด้วยสองตาราง ตารางแรกเป็นตารางฟีโรโมน (τ_i) ตารางที่สองเป็นระดับของโหนด (ψ_i) สำหรับแต่ละโหนดข้างเคียง i (จำนวนของโหนดข้างเคียงถูกสมมติว่ารู้) และค่า tag เพื่อบอกให้รู้ว่ามีจำนวน fant เดินผ่านกี่เพ็คเกตเริ่มต้นจะมีค่าเป็น ศูนย์ เมื่อ fant เดินทางผ่านโหนดจะทำการเพิ่ม tag ของตัวเองขึ้นหนึ่ง

```

1: procedure forwardAnt( $m, src^m, d$ )
2:    $f = FALSE$ 
3:    $i = src^m$ 
4:    $T^{(m)} = \{\}$ 
5:   push( $T^{(m)}, i$ )
6:    $cost^{(m)} = 0$ 
7:   while  $i \neq d$  do
8:     if  $f = FALSE$  then
9:        $\forall j \in nbd_i - T^{(m)}, \text{compute } p_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j})^\alpha / (\psi_{i,j})^\beta}{\sum_{k \in nbd_i} (\tau_{i,k})^\alpha / (\psi_{i,k})^\beta}$ 
10:      select  $j$  based on probability
11:       $next_i = j$ 
12:    else
13:       $j = next_i$ 
14:    end if
15:    move to  $j$ 
16:    if  $f = FALSE$  then
17:       $pCost^{(m)} = pCost^{(m)} + dist(i, j)$ 
18:    end if
19:    if ( $tag^{(j)} > 0$ ) then
20:       $f = TRUE$ 
21:    end if
22:     $tag^{(j)} = tag^{(j)} + 1$ 
23:     $i = j$ 
24:  end while
25: end procedure

```

ภาพที่ 2-12 รหัสเทียมสำหรับการเดินทางของ fant

```

1: procedure backwardAnt( $m, d, src^m$ )
2:    $i = d$ 
3:    $pCost^{(m)} = 0$ 
4:    $rCost^{(m)} = 0$ 
5:   while  $i \neq src^{(m)}$  do
6:      $j = pop(T^{(m)})$ 
7:     move to  $j$ 
8:     if ( $tag_i \neq tag_j$ ) then
9:        $rCost^{(m)} = 0$ 
10:    else
11:       $rCost^{(m)} = rCost^{(m)} + dist(i, j)$ 
12:    end if
13:     $pCost^{(m)} = pCost^{(m)} + dist(i, j)$ 
14:     $\tau_{j,i} = (1 - \rho)\tau_{j,i} + \rho \frac{Q}{cost}$ 
15:     $\forall l, \tau_{j,l} = (1 - \rho)\tau_{j,l}$ 
16:    if  $\psi_{i,j} > \gamma \times rCost^{(m)} + \lambda \times pCost^{(m)}$  then
17:       $\psi_{i,j} = \gamma \times rCost^{(m)} + \lambda \times pCost^{(m)}$ 
18:    end if
19:     $i = j$ 
20:  end while
21: end procedure

```

ภาพที่ 2-13 รหัสเทียมสำหรับการเดินทางของ bant

การเดินทางของ fant จะมีจำนวนทั้งหมดของ fant จะเท่ากับจำนวนของโหนดที่ต้องการส่งข้อมูล (โหนดต้นกำเนิดข้อมูล) แต่ละ fant จะประกอบด้วยข้อมูลและ Tabu List (T) ไว้ในแฟ้มเก็บ ซึ่งจะเก็บโหนดที่ fant นั้นเดินทางแล้วเพื่อป้องกันการเกิดวงลูป รวมถึงเก็บ $pCost$ เป็นค่าใช้จ่ายที่ fant เดินทาง เริ่มต้นค่า $pCost$ จะเป็น 0

เมื่อโหนดต้องการส่งข้อมูลโหนดปลายทางหรือสถานีฐาน (d) โหนดจะทำการส่ง fant ไปหาสถานีฐาน การตัดสินใจเลือกโหนดข้างเคียงเพื่อไปหาปลายทางนั้นมี 2 ทางเลือก แบบแรกเป็นการส่งเมื่อ tag ภายในโหนดที่เก็บไว้เท่ากับ 0 โหนดจะทำการเลือกโหนดข้างเคียงตามน่าจะเป็นที่ได้จากสมการ 2-2

$$p_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j})^\alpha / (\psi_{i,j})^\beta}{\sum (\tau_{i,j})^\alpha / (\psi_{i,j})^\beta} \quad \forall j \in N_i - T \quad (2-2)$$

โดยที่ p เป็นความน่าจะเป็นที่ใช้ตัดสินใจส่ง, ψ_i แทนด้วยค่าระดับของโหนดที่ i , α และ β แทนค่าถ่วงน้ำหนักของ τ และ ψ ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของค่า α และ β มีส่วนสัมพันธ์กับการหาเส้นทางคือ ถ้า $\alpha > \beta$ แล้วค่าของฟีโรโมน τ จะมีผลกับความน่าจะเป็นที่ใช้ตัดสินใจส่งมากกว่าค่าระดับของโหนดข้างเคียง ψ แต่ถ้า $\alpha < \beta$ ค่าระดับของโหนดข้างเคียง ψ จะมีผลต่อการตัดสินใจมากกว่าค่าของฟีโรโมน τ , K เป็นโหนดข้างเคียงที่ไม่มีอยู่ใน Tabu List ที่เก็บอยู่ในแฟ้มเกิด fant

แบบที่สองคือเมื่อ tag ไม่เท่ากับศูนย์ในสถานการณ์นี้ fant ถูกสมมติว่าได้เกิดการรวมตัวกับ fant ที่มีอยู่แล้ว ดังนั้นมันจะเดินทางตาม fant ที่เคยเดินทางผ่านมาก่อนหน้านี้ การทำงานของ fant จะถูกสรุปในรหัสเทียมภาพที่ 2-12

ปลายทางหรือสถานีฐาน (d) จะประกอบด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด ($cost$) จากหลายเส้นทางถึงสถานีฐานเดียว เมื่อ fant เดินทางถึงปลายทาง มันจะเพิ่ม $cost$ ตาม $pCost$ ใน fant เมื่อทุก fant เดินทางถึงปลายทาง(โหนดสถานีฐานถูกสมมติว่ารู้จำนวนของเส้นทาง) ปลายทางจะทำการสร้าง bant ส่งถึงทุกเส้นทางตาม T (Tabu List) ใน fant ที่รับมาก่อนหน้านี้ และค่าที่ถูกส่งกลับเพื่อปรับปรุงเส้นทางประกอบด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด ($cost$) ที่ปลายทางเก็บเพื่อปรับปรุงค่าฟีโรโมนไว้ ค่า $pCost$ และ $rCost$ ใช้เพื่อปรับปรุงระดับของโหนด

ขณะที่โหนดเคลื่อนที่จากโหนด j ถึงโหนด i โหนด i จะปรับปรุงค่าฟีโรโมนของโหนดข้างเคียง j ตามสมการ 2-3

$$\tau_j = (1 - \rho)\tau_j + \rho \frac{Q}{cost} \quad (2-3)$$

โดยที่ค่า τ_j เป็นค่าฟีโรโมนของโหนด j ที่โหนด i , ρ และ ค่า Q เป็นค่าตัวแปรที่ถูกใช้ในระบอบอาณานิคมเมื่อค่า Q มีมากเส้นทางอาจบรรจบเร็วเกินไปแล้วเส้นทางที่ได้จะไม่ต่ำที่สุด แต่ถ้า Q น้อยเกินไปเส้นทางจะไม่เสถียรและไม่สามารถหาเส้นทางที่ต่ำที่สุดได้ เช่นเดียวกันการกำหนด ρ ถ้ามีค่ามาก ส่วนโหนดข้างเคียงอื่นๆ ที่ไม่ใช่โหนด j ค่าฟีโรโมนจะถูกระเหยตามสมการ 2-4

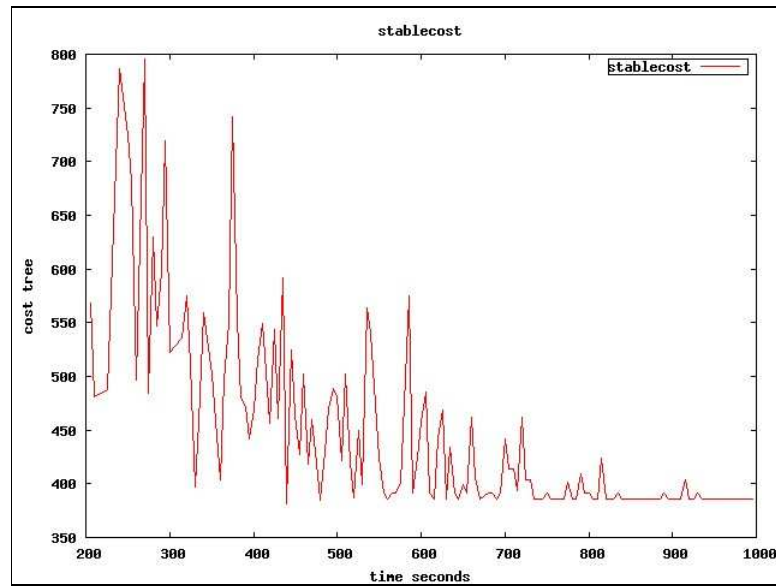
$$\tau_k = (1 - \rho)\tau_k \quad \forall k \in N - j \quad (2-4)$$

จากนั้นโหนดจะทำการปรับปรุงระดับโหนด (ψ) ระดับโหนดจะพิจารณาถึงความใกล้ปลายทางและการใกล้จุดที่เกิดการรวม ค่าที่พิจารณาประกอบด้วยสองค่าคือ $pCost$ และ $rCost$ ค่า $pCost$ จะคล้ายกับที่อยู่ใน fant เริ่มต้นจะมีค่าเป็น 0 ทุกๆการเดินทางของ bant จะทำการเพิ่มตามระยะทางของโหนดซึ่งก็คือระยะทางทั้งหมดที่ bant นั้นเดินทาง อีกค่าหนึ่งเป็น $rCost$ จะทำการเพิ่มตามระยะทางเช่นเดียวกัน แต่ $rCost$ จะทำการปรับให้เป็น 0 เมื่อ bant ตรวจจบได้ว่าการแยกเส้นทาง การแยกนี้สามารถตรวจจบได้โดย tag ที่เก็บไว้ตอนที่ fant เดินทางซึ่งแสดงถึงระยะทางจากจุดรวม เมื่อโหนดทำการส่ง bant แล้วจะทำการลด tag ลง กฎการปรับระดับโหนดเมื่อโหนด j ไปยังโหนด i โหนดที่ i จะปรับปรุงระดับโหนดข้างเคียง j จะทำตามสมการ 2-5

$$\psi_j = \gamma \times rCost + \lambda \times pCost \quad (2-5)$$

โดยที่ค่า γ และ λ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของ $rCost$ และ $pCost$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงระดับโหนดนี้ต่อเมื่อ ψ_j ที่มากกว่า bant มีค่าที่ต่ำกว่าที่เก็บไว้ที่โหนด การทำงานของ bant จะถูกสรุปในรหัสเทียมภาพที่ 2-13

จากผลการทำงานใน ns2 แสดงให้เห็นถึงค่า $cost$ ที่ลดต่ำลงสามารถสร้างเส้นทางต้นไม้ที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 แสดงผลการทำงานของ ANT [17] ค่า $cost$ ของเส้นทางต้นไม้

2.6.3 Ant Colony Algorithms for Routing [18]

เป็นกระบวนการปรับปรุงการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด [17] ด้านบนโดยเพิ่มประเภทของมดในเครือข่ายที่เรียกว่า มดแบบสุ่ม (Random Ant, rant) โดยมดแบบสุ่มจะทำการแพร่กระจายค่าระดับโหนดถึงโหนดข้างเคียง ซึ่งแบบเดิมนั้นจะอาศัยแต่การแพร่กระจายจาก bant เท่านั้น จากผลการทำงานพบว่าเมื่อใช้จำนวนของมดแบบสุ่มมากขึ้น (จำนวนของโหนดที่ส่ง bant) พบว่ามีค่าใช้จ่ายของเส้นทางทั้งหมดต่ำลง เนื่องด้วยมดแบบสุ่มจะทำการสำรวจเส้นทางมากขึ้น การทำงานของ rant สามารถแสดงในรหัสเทียมภาพที่ 2-15

2.6.4 Ant Colony Algorithm for Optimal Data Aggregation [19]

เป็นกระบวนการทำงานแบบอาณานิคมมดเช่นเดียวกัน แต่ปรับปรุงการรวมข้อมูลตามความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล เนื่องจากการทำงานแบบเดิมนั้นไม่พิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ถูกทดลอง ที่บางเส้นทางอาจรวมข้อมูลได้สูงแต่บางเส้นทางอาจรวมกันได้ต่ำ ดังนั้นระดับโหนด (ψ) ที่ถูกปรับปรุงจากเป็นไปตามสมการ 2-6

$$\psi_j = \gamma \times rCost + \lambda \times pCost + \kappa \times Cost_{ij_correlation} \quad (2-6)$$

1:	procedure randomAnt(m, i)
2:	compute $\min_k(\psi_{i,k})$
3:	select j from nbd_i
4:	move to j
5:	$\psi_{i,j} = \min(\psi_{i,j}, \text{dist}(j, i) + \min_k(\psi_{k,i}))$
6:	$j = i$
7:	end procedure

ภาพที่ 2-15 รหัสเทียมสำหรับการเดินทางของ rant

โดยที่ κ เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก ค่า $Cost_{ij_correlation}$ เป็นความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ลดได้จากการส่ง fant จากโหนด j ถึงโหนด i ที่ได้จากสมการ 2-7

$$Cost_{ij_correlation} = \frac{H(X_j|X_i)}{H(X_j)} \quad (2-7)$$

โดยที่ $H(X_j|X_i)$ เป็นจำนวนบิตที่ลดได้จากการรวมข้อมูล และ $H(X_j)$ เป็นจำนวนข้อมูลที่มาจากโหนด j โดยที่ค่า $0 < Cost_{ij_correlation} < 1$ ถ้ามีค่าเป็น 1 แสดงถึงข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์ใดๆต่อกัน แต่ถ้าเป็น 0 แสดงว่าจำนวนข้อมูลเหมือนกันทำให้สามารถลดได้ทั้งหมด

2.6.5 ปัญหาในการสร้างเส้นทางแบบอาณานิคมมด

ในกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดนั้น มีข้อจำกัดหรือข้อเสียอยู่เช่นเดียวที่ทำให้ มีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังนี้

2.6.5.1 การทำงานของกระบวนการนี้เป็นระบบที่ต้องเข้าจังหวะกัน (Synchronous) ระหว่าง fant และ bant ซึ่งโหนดปลายทางจะต้องรอ fant ทั้งหมดก่อนจึงส่ง bant และ fant จะไม่สามารถส่งได้ถ้ายังไม่ได้รับ bant ส่งผลให้เราไม่สามารถส่ง fant และ bant พร้อมกัน

2.6.5.2 การค้นหาเส้นทางนี้ค้นหาการรวมข้อมูลได้ในทางแนวคิดเท่านั้น ซึ่งถูกสมมติว่ามีการรวมข้อมูลอย่างสมบูรณ์ (Perfect Aggregation) หมายถึงข้อมูลจากทุกโหนดที่สร้างขึ้นมีลักษณะเหมือนกัน เมื่อเส้นทางถูกซ้อนทับกัน ข้อมูลนั้นจะไม่จำเป็นต้องส่งและจะถูกครอบงำทันที แต่จากการรวมในเครือข่ายจริงนั้นข้อมูลต้องถูกรวมในบัฟเฟอร์ในโหนดซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ร่วมกันและ ค่าความล่าช้าของการรอข้อมูลเพื่อรวม ทำให้อาจไม่สามารถรวมข้อมูลและลดค่าใช้จ่ายของเครือข่ายได้ตามการทำงานนี้

2.6.5.3 การค้นหาเส้นทางเริ่มต้นนั้นเป็นแบบสุ่มทำให้ในช่วงเริ่มต้น ไม่สามารถค้นหาปลายทางได้ ส่งผลให้มีความล่าช้ากว่าจะค้นหาปลายทาง และสูญเสียข้อมูลในช่วงเริ่มต้นของเครือข่าย

2.6.5.4 จากผลการทดลองใน ns2 เราพบว่า ANT แบบที่กล่าวมาไม่สามารถประหยัดพลังงานได้เนื่องจาก ไม่สามารถรวมข้อมูลได้ในจุดที่รวมข้อมูล และแม้สามารถประหยัดพลังงานจากจำนวนข้อมูลถูกส่งลดลงแต่กลับเพิ่มจำนวนการส่งตอบกลับของ bant ขึ้น

2.6.5.5 การเปรียบเทียบการทดลองไม่นำมาเปรียบเทียบกับโปรโตคอลที่มีอยู่ หรือ แทนค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายด้วยค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการรวมข้อมูล (Cost) ในเครือข่าย ส่งผลให้ไม่สามารถเปรียบเทียบในเครือข่ายจริงได้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างเส้นทางแบบอาณานิคมมด

ในกระบวนการสร้างเส้นทางแบบอาณานิคมมดเพื่อรวมข้อมูลแบบเดิม นั้น ยังคงมีปัญหา ด้าน การ ค้นหาแบบ สุ่ม ซึ่งเป็น ปัญหา พื้นฐาน ในการ ค้นหาแบบอาณานิคมมด [20] ซึ่ง ก่อ ให้เกิดปัญหาการ ไม่สามารถค้นหาปลายทาง ถ้าช้ากว่าจะหาปลายทางพบและเกิดการสูญเสีย ข้อมูลเนื่องจาก ไม่สามารถส่งถึงปลายทางเนื่องจากระบบอาณานิคมมดนี้ ใช้แค่เกิดข้อมูล ในการ ค้นหาปลายทาง ซึ่งต่างจากระบบอาณานิคมมดบางแบบ [23, 24] ที่ใช้แค่เกิดเฉพาะในการ ค้นหาปลายทางทำให้ไม่สูญเสียข้อมูลที่ต้องส่งหาปลายทาง เพื่อแก้ปัญหาในงานวิทยานิพนธ์นี้ นำกระบวนการค้นหาเส้นทางที่เรียกว่า PAGER นำมาทำงานกับระบบอาณานิคมมด PAGER จะจำกัดการเลือกส่งของระบบอาณานิคมมด โดยรับประกันว่าจะ ไม่เกิดลูปและสามารถส่งถึง ปลายทางได้รวดเร็วและแน่นอน

จากปัญหาการทำงานของกระบวนการอาณานิคมมดเป็นระบบที่ต้องเข้าจังหวะกัน (Synchronous) ระหว่าง fant และ bant ซึ่ง โหนดปลายทางจะต้องรอ fant ทั้งหมดก่อนจึงส่ง bant และ fant จะ ไม่สามารถส่งได้ถ้ายังไม่ได้รับ bant ส่งผลให้เราไม่สามารถส่ง fant และ bant พร้อมกัน เนื่องจากข้อมูลคือ fant การที่ต้องรอ bant นั้นในการตอบกลับมา ส่งผลให้ต้องจำกัดอัตราการ ส่งข้อมูลเพื่อไม่ให้มากเกินไประดับหนึ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงการละทิ้งของแพ็คเกจจากการที่ต้องรอ bant เพื่อตอบกลับมาถ้า bant เกิดการละทิ้งในเส้นทางโหนดจะไม่ได้รับ bant ทำให้โหนดไม่ได้ส่ง fant ต่อและอาจต้องรอนานพอที่จะแน่ใจว่าไม่ได้รับแล้ว จึงสามารถส่งได้อีกครั้ง ซึ่งส่งผลให้เกิด ความล่าช้ามากในการส่งข้อมูล งานวิทยานิพนธ์นี้จำเป็นต้องปรับปรุงสมการและค่าตัวแปรใหม่ ที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบอาณานิคมมดสามารถส่งข้อมูล fant และ bant ได้พร้อมกัน เพื่อ ไม่ให้เกิด ข้อจำกัดในการส่งข้อมูล

นอกจากนี้กระบวนการทำงานอาณานิคมมดนั้น เป็นค้นหาการรวมข้อมูลได้ในทางแนว คิดหรือเพิ่มความน่าจะเป็นเท่านั้นที่กำหนดว่าแต่ละ โหนดเซ็นเซอร์สร้างข้อมูลที่เหมือนกันทำ ให้สามารถสรุปข้อมูลเมื่อมีเส้นทางร่วมกัน ซึ่งระบบอาณานิคมมดนี้จะเป็นการค้นหาเส้นทางตาม ปัญหาค่าที่ต่ำที่สุดของต้นไม้แบบสไตเนอร์ (Steiner Tree) ซึ่งเป็นการศึกษาหาจุดที่ทำให้ระยะ ทางรวมของหลายจุดไปยังจุดจุดหนึ่งที่สนใจมีค่าน้อยที่สุด แต่จากการรวมในเครือข่ายจริงนั้น การรวมกันของข้อมูลขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ร่วมกันและ ค่าความ ล่าช้าของการรอข้อมูลเพื่อรวม ทำให้อาจไม่สามารถรวมข้อมูลและลดค่าใช้จ่ายของเครือข่ายลง ได้จริง ส่งผลให้งานวิทยานิพนธ์นี้พยายามปรับปรุงกระบวนการทำงานของอาณานิคมมดนี้ให้ เหมาะสมเพื่อใช้ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

อย่างไรก็ตามจากการจำลองผลการทำงานพบว่าการตอบกลับของ bant จำนวนมากนั้นส่ง ผลให้แม้สามารถประหยัดพลังงานจากจำนวนข้อมูลที่ใช้ส่งลดลง แต่การส่ง bant จำนวนมาก

พอๆกับการส่งของ fant ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ไม่สามารถประหยัดได้จริง ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้พยายามลด bant ให้เหมาะสมโดยเลือก bant ที่เป็นเส้นทางที่มีคุณภาพเพื่อให้เส้นทางมีคุณภาพถูกเลือกมากกว่าเส้นทางคุณภาพน้อยกว่า โดยใช้การสมมติการกระจายตัวของค่าคุณภาพเส้นทางเป็นแบบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ทำให้เราสามารถกำหนดค่าจุดตัดสินใจ (Threshold) ในการส่ง bant กลับได้

3.1 กระบวนการสร้างเส้นทาง PAGER

งานวิทยานิพนธ์นี้ปรับปรุงการทำงานระบบอาณานิคมมดเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในอาณานิคมมดแบบเดิมนั้นต้องการระยะเวลาในการค้นหาปลายทางและอาจมีความเป็นไปได้ที่อาจหาปลายทางไม่เจอเนื่องจากระบบอาณานิคมมดมีการเดินทางแบบสุ่ม เพื่อแก้ปัญหานี้งานวิทยานิพนธ์นี้ทำการร่วมทำงานระหว่างระบบตำแหน่งและระบบอาณานิคมมด การทำงานร่วมกันระหว่างระบบอาณานิคมมดกับโปรโตคอลอื่นๆ สามารถพบได้ใน [23, 24, 25, 26] ระบบอาณานิคมมดจะถูกใช้เพื่อเลือกเส้นทางจากเส้นทางที่ถูกสร้างโดยอีกโปรโตคอลหนึ่ง

การเดินทางแบบระบบตำแหน่งมีปัญหาที่เรียกว่า ช่องว่างของเครือข่าย เป็นปัญหาที่สำคัญในการค้นหาเส้นทางแบบระบบตำแหน่ง จะเกิดขึ้นเมื่อข้อมูลถูกส่งผ่านถึงจุดสูงสุดแบบท้องถิ่น (Local Minimum) เมื่อใช้การส่งผ่านแบบ Greedy ทำให้ไม่สามารถส่งถึงปลายทางหรือทำให้การเดินทางยาวมากกว่าเดิม PAGER [21, 22] สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุด เราสามารถแบ่งขั้นตอนวิธีการของ PAGER เป็น 2 ส่วน คือ Shadow Spread และ Cost Spread แต่ก่อนหน้านั้นเราจะพิจารณาสถานะการทำงานของ PAGER ที่ถูกสมมติเช่นเดียวกับการค้นหาเส้นทางแบบระบบตำแหน่งโดยทั่วไป คือแต่ละโหนดสามารถรู้ตำแหน่งตนเอง อาจมาจากอุปกรณ์จีพีเอสหรือ [43] และโหนดต้องรู้ตำแหน่งปลายทางหรือสถานีฐาน ซึ่งใน PAGER นั้นมีการสมมติว่าสถานีฐานสามารถส่งสัญญาณได้ไกลพอที่จะครอบคลุมโหนดต่างๆหรืออาจโปรแกรมเก็บไว้โหนดต่างๆไว้เลย โหนดสามารถรู้ตำแหน่งและค่าต่างๆจากโหนดข้างเคียงโดยการส่ง hello

การทำงานของ PAGER นั้นขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการแพร่กระจายเงา (Shadow Spread Phase) ถูกใช้เพื่อกำหนดสถานะของโหนดโดยจะแบ่งเครือข่ายเป็นส่วนที่สามารถส่งผ่านแบบ Greedy ได้จะเรียกโหนดนี้ว่า โหนดแสง (Bright Node) และส่วนที่ไม่สามารถส่งได้ว่า โหนดเงา (Shadow Node) การทำงานถูกแสดงในภาพรหัสเทียมที่ 3-1 และ 3-2

```
shadow=true;
for each node Z N(x) do
    if ((status(z)=bright)&&(distance(z)<distance(x))) then return false
end if
end forreturn shadow
```

ภาพที่ 3-1 รหัสเทียมสำหรับ PAGER ในการตัดสินใจว่าเป็นโหนดเงาหรือไม่

```

status(x)=bright
while active do
    if receive beacon from a neighbor y then
        Refresh the neighbor set N(x) by updating the status and location
        information of y
        if DecideShadow(Nx) then
            status(x)=shadow
        else
            status(x)=bright
        end if end if
    end if
    if beacon timeout occurs then
        Copy status and location information of node x to beacon(status,location)
        and send out to all neighbors
    end if
end while

```

ภาพที่ 3-2 รหัสเทียมสำหรับ PAGER ในขั้นตอนการแพร่กระจายเงา

```

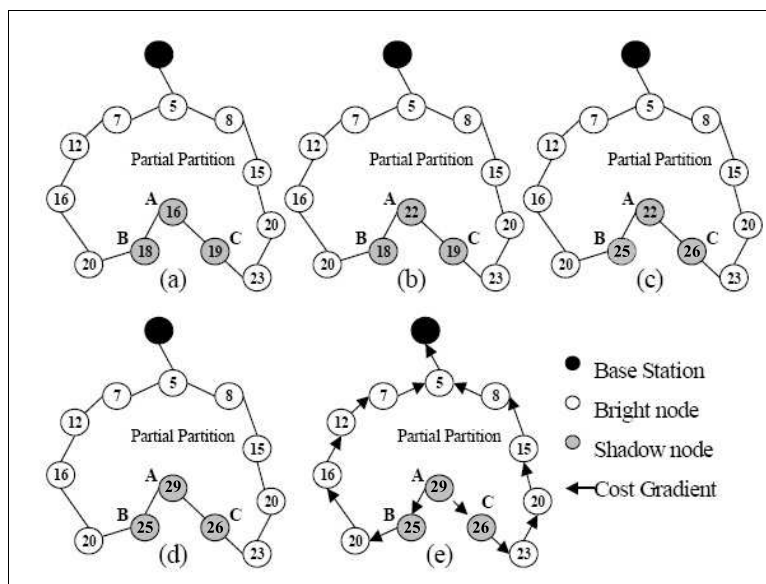
cost(x)=distance(x,BS)
while active do
    if receive beacon(cost) from a neighbor y then
        Refresh the neighbor set N(x) by updating the cost of y
        if cost(x)<minimum cost of neighbors set N(x) then
            cost(x)=maximum cost of neighbors +  $\Delta$ 
        end if
    end if
    if beacon timeout occurs then
        Copy cost of node x to beacon(cost) and send out to all neighbors
    end if
end while

```

ภาพที่ 3-3 รหัสเทียมสำหรับ PAGER ในขั้นตอนการแพร่กระจายค่าใช้จ่าย

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดค่าใช้จ่ายในแต่ละโหนดเรียกว่า ขั้นตอนการแพร่กระจายค่าใช้จ่าย (Cost Spread Phase) ถ้าโหนดมีสถานะเป็นโหนดแสง ค่าใช้จ่ายของโหนดจะเป็น

ระยะทางระหว่างโหนดถึงสถานีฐาน แต่ถ้าโหนดเป็นโหนดเงา ค่าใช้จ่ายของโหนดจะถูกปรับตามแสดงในรหัสเทียมภาพที่ 3-3 คือเมื่อโหนดไม่มีโหนดข้างเคียงที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าตัวมันเองอยู่ โหนดจะปรับให้ค่าใช้จ่ายของตัวเองให้มีความมากกว่าทุกโหนดข้างเคียง ค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นกว่าเดิมจะแพร่กระจายไปจนถึงขอบระหว่างพื้นที่แสงและเงา และหยุดลงทำให้แต่ละโหนดเงามีอย่างน้อยหนึ่งโหนดที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่ายโหนด ในงานวิทยานิพนธ์นี้กำหนดตามคำแนะนำของ [22] เป็นค่าเฉลี่ยของระยะทาง โหนดข้างเคียงเมื่อกระบวนการค้นหาเส้นทางกำหนดค่าใช้จ่ายเสร็จสิ้น โหนดสามารถส่งข้อมูลได้โดยส่งผ่านโหนดข้างเคียง โดยโหนดที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดจะถูกเลือกให้ส่งผ่านข้อมูล



ภาพที่ 3-4 แสดงตัวอย่างการทำงานของ PAGER

ภาพที่ 3-4 แสดงตัวอย่างการทำงานของ PAGER พิจารณาโหนด A ที่ตรวจสอบพบว่าทุกโหนดข้างเคียง B C มีค่าใช้จ่ายในการส่งสูงกว่าโหนดจะไม่สามารถส่งข้อมูลได้ เพื่อหลีกเลี่ยงสถานการณ์นี้โหนด A จะเพิ่มค่าใช้จ่ายตนเองเป็น 22 ซึ่งมากกว่าค่าใช้จ่ายสูงสุดของโหนดข้างเคียงโดย Δ (โดยในตัวอย่างนี้เป็น 3) ต่อมาโหนด B และ C จะพบว่าโหนดข้างเคียงมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าตนเองดังนั้นจะเพิ่มค่าใช้จ่ายตัวเองเป็น $\max(20, 22) + 3 = 25$ และ $\max(23, 22) + 3 = 26$ จากนั้นโหนด A จะเพิ่มค่าใช้จ่ายตัวเองเป็น $\max(25, 26) + 3 = 29$ กระบวนการทำงานในการกระจายค่าใช้จ่ายจะสิ้นสุดลง โหนด A จะส่งข้อมูลผ่านโหนด B ที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า จะเห็นว่า PAGER สามารถแก้ปัญหา DEAD END ได้ดี การนำมาประยุกต์ในระบบอเนกานิคมนั้นการเลือกของโหนดในการส่งจะเลือกโหนดที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าตนเองในการส่ง ต่างจาก PAGER ที่เลือกโหนดที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด

3.2 สภาวะแวดล้อมการทำงาน

การกำหนดเส้นทางในระบบเครือข่ายตรวจสอบแบบไร้สายด้วยขั้นตอนวิธีระบบอาณานิคม มดนั้น อุปกรณ์ตรวจสอบจะกระจายอยู่ในพื้นที่ตรวจสอบ โดยมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บและประมวล ข้อมูลเหตุการณ์เพื่อส่งต่อไปยังผู้ใช้ เรียกว่า "Sink Node" หรือสถานีฐาน และอุปกรณ์ที่มีข้อมูล เหตุการณ์ ซึ่งจะถูกรเรียกว่า "Source Node" หรือเซ็นเซอร์โหนด เมื่อผู้ใช้ต้องการทราบข้อมูล เหตุการณ์จากพื้นที่ตรวจสอบ ก็จะกำหนดให้สถานีฐานแพร่กระจายข้อมูลที่ต้องการการตรวจสอบ ถึงเซ็นเซอร์โหนด ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้สมมติว่าแต่ละเซ็นเซอร์โหนดสามารถรู้ตำแหน่ง ปลายทาง [42] และเหตุการณ์ที่ต้องตรวจสอบ เมื่อเซ็นเซอร์โหนดสามารถตรวจสอบเหตุการณ์ได้ ข้อมูลต่างๆก็จะส่งถึงสถานีฐานตามกระบวนการสร้างเส้นทางระบบอาณานิคมมด

3.3 องค์ประกอบของข้อมูลในอุปกรณ์การตรวจสอบ

ใน อุปกรณ์ ตรวจสอบ แต่ละ อุปกรณ์ จะ ต้อง มี การ ดำเนินการ กับ ข้อมูล ที่มีอยู่ ทั้ง ข้อมูล เหตุการณ์ที่มีการตรวจสอบได้ และข้อมูลสำหรับการกำหนด เมื่อ โหนดตรวจสอบได้และทำการ แยกแยะประเภทเหตุการณ์ที่ตรวจสอบจะทำการส่งข้อมูลถึงปลายทาง การส่งข้อมูลถึงปลายทาง นี้โหนดแต่ละโหนดจะใช้ตารางข้อมูลเกี่ยวกับเส้นทาง (Routing Table) ในการตัดสินใจ ตาราง เส้นทางข้อมูลจะประกอบด้วย

3.3.1 ข้อมูลต่างๆของโหนดตนเอง (My Data) ระดับศักยภาพของโหนด (Node Potential, ψ) ค่าใช้จ่ายโหนด ($cost$), ที่มาจากกระบวนการหาของ PAGER) ตำแหน่งที่อยู่ของโหนด (x, y) ข้อมูลตำแหน่งของสถานีฐาน (dx, dy)

3.3.2 ข้อมูลต่างๆของโหนดข้างเคียง (Neighbor List) ค่าฟีโรโมน (τ) ค่าระดับศักยภาพ ของโหนด (ψ) ค่าใช้จ่ายโหนด ($cost$) และตำแหน่งของโหนด (x, y) ค่าต่างๆในตารางนี้จะถูก ปรับปรุงในการทำงานของกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดนี้

ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างข้อมูลต่างๆของโหนดข้างเคียง

ID Neighbors, id	Pheromone, τ	Node Potential, ψ	Position, x, y	$cost$
A	0.1	1	300,490	578
B	0.9	4	200,400	497

3.4 ชนิดและองค์ประกอบของแพ็กเก็ต

แพ็กเก็ตที่ใช้ในการกำหนดเส้นทางการเดินทางนี้แบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

3.4.1 แพ็กเก็ต hello เป็นแพ็กเก็ตที่มีขนาด 17 ไบต์ จะประกอบด้วย ชนิดของแพ็กเก็ต 7 บิต หมายเลขของอุปกรณ์ 1 ไบต์ ค่าใช้จ่ายในการส่งถึงปลายทาง 4 ไบต์ สถานะของโหนด 1 บิต ตำแหน่งของอุปกรณ์ 8 ไบต์ และศักยภาพของโหนด 4 ไบต์ การส่งแพ็กเก็ตนี้เพื่อให้โหนด สามารถทราบข้อมูลต่างๆของโหนดข้างเคียงในบริเวณที่สามารถติดต่อสื่อสารเมื่อโหนดรับแล้ว จะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางข้อมูลของตัวเองเพื่อให้ใหม่อยู่เสมอ

Type(7b)	Src(1B)	X,Y(8B)	Cost(4B)	status(1b)	ψ (4B)
----------	---------	---------	----------	------------	-------------

ภาพที่ 3-5 แสดงองค์ประกอบของแพ็คเกจ hello

3.4.2 แพ็คเกจ fant ทำหน้าที่สุ่มค้นหาสำรวจเส้นทางจากเซ็นเซอร์โหนดไปยังสถานีฐาน เป็นแพ็คเกจข้อมูลตาม [7] ที่มีขนาดตามข้อมูลที่ส่งซึ่งประกอบด้วย ชนิดของแพ็คเกจ หมายเลขของอุปกรณ์ ลำดับของแพ็คเกจ(Sequence Number) จำนวนครั้งในการส่ง (Hop) หมายเลขโหนดที่เดินผ่าน (Tabu List) และประเภทของเหตุการณ์ที่ตรวจจับ และข้อมูลที่ต้องการส่งถึงสถานีฐานซึ่งประกอบด้วย ตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับ พลังงานของเหตุการณ์ที่ตรวจจับ และเวลาในการตรวจจับ ซึ่งขนาดขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้งานวิทยานิพนธ์นี้เพิ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลต่างๆในเส้นทางเพื่อใช้ในการกระบวนการปรับปรุงเส้นทาง 2 ส่วน ในส่วนแรก *FUSSION* คือจำนวนไบต์ที่ลดได้จากการรวมข้อมูลในโหนดระหว่างเส้นทาง และ *SAVE_FUSSION* เป็นปริมาณการลดไบต์ที่ลดได้ในการส่งแต่ละครั้ง

Type(7b)	Src(1B)	Seq(1B)	Hop(1B)	FUSSION(2B)	SAVE_FUSSION(2B)	Tabu(...)
----------	---------	---------	---------	-------------	------------------	-----------

ภาพที่ 3-6 แสดงองค์ประกอบส่วนหัวของแพ็คเกจ fant

Event ID(1B)	Event X,Y (8B)	Sensor X,Y (8B)	Energy(4B)	Timestamp (4B)
--------------	----------------	-----------------	------------	----------------

ภาพที่ 3-7 แสดงองค์ประกอบข้อมูล

3.4.3 แพ็คเกจ bant เป็นแพ็คเกจที่ใช้ในการปรับเส้นทางที่ fant เดินผ่าน เมื่อ fant เดินทางถึงสถานีฐานจะทำการส่ง bant กลับเพื่อให้โหนดในเส้นทางรู้ถึงคุณภาพของเส้นทางที่ fant เดินผ่าน เส้นทางที่มีคุณภาพที่ดีก็จะถูกเลือกเป็นเส้นทาง ในแพ็คเกจประกอบด้วย ชนิดของแพ็คเกจ หมายเลขของอุปกรณ์ ลำดับของแพ็คเกจ (Sequence Number) จำนวนครั้งในการส่ง (Hop) หมายเลขโหนดที่เดินผ่านที่มาจาก fant (Tabu List), *SAVE_FUSSION* ที่มาจาก fant และค่าถ่วงน้ำหนักในการเพิ่มค่าฟิโรโมนในเส้นทาง (δ)

3.5 ขั้นตอนวิธีกระบวนการสร้างเส้นทางระบบอานานิคมมด

ในการสร้างเส้นทางด้วยระบบอานานิคมมดนั้น เซ็นเซอร์โหนดในพื้นที่ตรวจจับจะต้องมีหมายเลขของโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียงเก็บไว้ในตารางเส้นทางข้อมูล ดังนั้นเซ็นเซอร์โหนดทั้งหมดจะประกาศตัวเองด้วยการส่งแพ็คเกจ hello และทำการเก็บข้อมูลต่างๆที่ส่งมาพร้อมกับ hello แพ็คเกจที่อุปกรณ์นั้นได้รับด้วย และเซ็นเซอร์โหนดจะเริ่มกระบวนการการทำงานของ *PAGER* ซึ่งจะเริ่มขั้นตอนเพื่อสร้างเส้นทางถึงสถานีฐาน โดยสามารถแทนโหนดข้างเคียงที่มีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าตัวมันเองด้วย J และค่าฟิโรโมนเริ่มต้นจะมีค่าตามสมการ 3-1

Type(7b)	Src(1B)	Seq(1B)	Hop(1B)	SAVE_FUSSION(2B)	δ (4B)	Tabu(...)
----------	---------	---------	---------	------------------	---------------	-----------

ภาพที่ 3-8 แสดงองค์ประกอบส่วนหัวของแพ็คเกจ bant

$$\tau_0 = \frac{1}{N} \quad (3-1)$$

โดยที่ N เป็นจำนวนของสมาชิกใน J ที่มีค่าใช้จ่ายถึงปลายทางของโหนดข้างเคียงน้อยกว่าตัวเอง เมื่อเซ็นเซอร์โหนด i ตรวจจับเหตุการณ์ได้จะทำการส่ง fant เพื่อสำรวจเส้นทางต่างๆ ถึงโหนดข้างเคียง j โดยเลือกโหนดตามความน่าจะเป็นที่ได้ตามสมการ 3-2

$$p_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j})^\alpha (\psi_{i,j})^\beta}{\sum (\tau_{i,j})^\alpha (\psi_{i,j})^\beta} \quad (3-2)$$

โดยที่ p เป็นความน่าจะเป็นที่โหนดจะเลือกโหนดที่ j , i เป็นโหนดที่แพ็คเกจอยู่และ j เป็นสมาชิกของโหนดข้างเคียงที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าตัวเอง, τ เป็นค่าฟีโรโมนและ ψ เป็นระดับศักยภาพของโหนดซึ่งสามารถปรับโดยการตอบกลับของ bant เมื่อเลือกโหนดแล้วโหนดจะถูกเพิ่มใน Tabu List และส่งถึงโหนดที่เลือกไว้ ในระหว่างทาง การเดินทางในแต่ละโหนดจะถูกเก็บใน Tabu List ของแพ็คเกจคล้ายกับกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ DSR ถูกใช้ในการส่งกลับของ bant ถึงเซ็นเซอร์โหนดที่เป็นต้นกำเนิดข้อมูล

ในระหว่างการส่งการรวมแพ็คเกจอาจเกิดขึ้น จำนวนไบต์ที่ลดได้จากการรวมแพ็คเกจจะถูกเก็บไว้ใน *FUSSION* และปริมาณไบต์ที่ประหยัดจากการส่งที่ได้จากการรวมข้อมูลจะถูกเก็บใน *SAVE_FUSSION* ยกตัวอย่างเช่นเมื่อสามารถรวมสองแพ็คเกจข้อมูลแล้วลดได้ 10 ไบต์ *FUSSION* จะเท่ากับ 10 ไบต์ เมื่อโหนดทำการส่งจะทำให้สามารถประหยัดได้ 10 ไบต์ดังนั้น *SAVE_FUSSION* = 10 เมื่อส่งต่ออีกโหนดหนึ่งก็จะประหยัดเพิ่มอีก 10 กลายเป็น 20 ไบต์ ดังนั้นการส่งในแต่ละครั้งสามารถกำหนดตามสมการ 3-3 ในการเดินทางในแต่ละโหนด

$$SAVE_FUSSION = SAVE_FUSSION + FUSSION \quad (3-3)$$

เมื่อ fant เดินทางจากซอร์สโหนดถึงสถานีฐาน สถานีฐานจะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของตัวแปร *SAVE_FUSSION* ที่เท่ากับ fant ถูกใช้ในการคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเพิ่มค่าฟีโรโมนในเส้นทางตามสมการ 3-4

$$\overline{SAVE_FUSSION} = \overline{SAVE_FUSSION} + (1 - \lambda) \times (\overline{SAVE_FUSSION} - \overline{SAVE_FUSSION}) \quad (3-4)$$

โดยที่ $\overline{SAVE_FUSSION}$ เป็นค่าเฉลี่ยของ *SAVE_FUSSION* ที่รับมาจาก fant, λ เป็นค่าการลื้มที่ใช้ปรับการมีอิทธิพลของค่าในอดีต สมการ 3-4 นี้เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ (Moving Average) [50] ที่นำมาใช้เมื่อข้อมูลมีลักษณะแบบเวลาจริง จากนั้นจะทำการ

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อใช้ในการปรับค่าฟิโรโมนในการเดินทางกลับของ bant ตามสมการ 3-5 ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแปรในการคำนวณ ถ้า $SAVE_FUSSION$ ที่รับมามีขนาดมากกว่า $\overline{SAVE_FUSSION}$ มากจะทำให้มีค่าเข้าใกล้ k แต่ถ้าน้อยกว่าแล้วจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

$$\delta(i) = k \left(\frac{SAVE_FUSSION}{SAVE_FUSSION + \overline{SAVE_FUSSION}} \right) \quad (3-5)$$

โดยที่ δ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการเพิ่มค่าฟิโรโมน , k เป็นค่าถ่วงน้ำหนักและ $\overline{SAVE_FUSSION}$ เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากสมการ 3-4

จากนั้นโหนดจะทำการตัดสินใจว่าควรส่ง bant กลับหรือไม่ โดยพยายามส่ง bant ที่มีค่า $SAVE_FUSSION$ ที่มีค่าสูง โดยจะสมมติการกระจายตัวของ $SAVE_FUSSION$ ที่รับมาในแต่ละเซ็นเซอร์โหนดเป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้นความน่าจะเป็นของ $SAVE_FUSSION$ ที่รับมาเป็นไปตามสมการ 3-6

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2 \right] \quad (3-6)$$

ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่า $SAVE_FUSSION$ ที่รับมาว่ามีคุณภาพที่ดีกว่าเป็นค่าความน่าจะเป็นเท่าไรของจำนวนที่รับมาทั้งหมด ตามสมการ 3-7

$$C(x) = P(x \leq SAVE_FUSSION) = \int_{-\infty}^{SAVE_FUSSION} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2 \right] dx \quad (3-7)$$

ในทำนองเดียวกันถ้าเรากำหนดว่าต้องการให้คุณภาพของ $SAVE_FUSSION$ หรือ $C(x)$ มีคุณภาพคงที่แล้ว เราสามารถคำนวณหาจุดตัดสินใจโดยกำหนดให้ค่า $C(x)$ คงที่แล้วทำการคำนวณค่า $SAVE_FUSSION$ ในสมการ 3-7 อย่างไรก็ตามการอินทิเกรตตามสมการนี้ทำได้ค่อนข้างยาก จึงมีความจำเป็นจะต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถอินทิเกรตได้ง่ายขึ้นด้วยการแปลงให้เป็นการกระจายแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) ตามสมการ 3-8 และสามารถคำนวณพื้นที่ใต้กราฟหรือคุณภาพตามตารางในภาคผนวก ก

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3-8)$$

เราสามารถค้นหาค่าจุดในการตัดสินใจได้ตามสมการ

$$SAVE_FUSSION > Z \times \sigma + \mu \quad (3-9)$$

โดยที่ Z เป็นค่าที่ได้มาจากการกระจายตัวแบบปกติในภาคผนวก ก เช่นเมื่อกำหนดให้มี $SAVE_FUSSION$ ที่ใช้ในการส่งกลับของ bant มีคุณภาพที่ดีกว่าที่รับมาทั้งหมด 0.9 แล้วค่า Z ที่ได้จากการตารางจะเป็น 1.28 , μ และ σ เป็นค่าเฉลี่ยและเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มาจากการ

3-10 และ 3-11 ตามลำดับ โดยสถานีสถานจะส่ง bant กลับถ้า $SAVE_FUSSION$ มีค่ามากกว่า ตามสมการ 3-9

ดังนั้นเมื่อสถานีรับ fant แล้วจะทำการค้นหาจำนวนเซ็นเซอร์โหนดที่เป็นต้นกำเนิดข้อมูล จากนั้นจะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละโหนดต้นกำเนิดข้อมูล ตามสมการ 3-10 และ 3-11 ตามลำดับในแต่ละโหนด สมการนี้สามารถพบได้ใน [50]

$$\mu_k(i) = \mu_k(i-1) + (1-\lambda)(SAVE_FUSSION - \mu_k(i-1)) \quad (3-10)$$

$$\sigma_k(i) = \sigma_k(i-1) + (1-\lambda)(|SAVE_FUSSION - \mu_k(i)| - \sigma_k(i-1)) \quad (3-11)$$

โดย k เป็นหมายเลขโหนดที่เป็นตัวกำเนิดข้อมูลที่มาจก fant , μ เป็นค่าเฉลี่ยของ $SAVE_FUSSION$ ที่รับมา, λ เป็นค่าการลื้มที่ใช้ปรับการมีอิทธิพลของค่าในอดีต, σ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $SAVE_FUSSION$ ที่รับมา

การตัดสินใจในการส่ง bant จะตัดสินใจในแต่ละโหนดที่เป็นตัวกำเนิดข้อมูล เมื่อสถานีสถานตัดสินใจส่งข้อมูล bant จะเดินทางตาม Tabu List ที่รับมาจาก fant ขณะที่โหนดเดินทางกลับจากโหนด i ถึง j โหนด j จะเพิ่มค่าฟีโรโมนของโหนด i ตามสมการ 3-12

$$\tau_j = (1-\rho) \times \tau_j + \rho \times \delta \quad (3-12)$$

โดยที่ τ เป็นค่าฟีโรโมนของโหนด j , ρ เป็นอัตราการระเหยของฟีโรโมน (Trial Evaporation Rate) แสดงถึงความเร็วในการเปลี่ยนแปลงค่าฟีโรโมน และ δ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักในการเพิ่มของฟีโรโมนที่คำนวณจากสถานีสถานและส่งมากับ bant

โหนดอื่นๆยกเว้นโหนด j จะทำการลดค่าฟีโรโมนตามสมการ 3-13

$$\tau_j = (1-\rho) \times \tau_j + \rho \times \delta \quad (3-13)$$

โดยที่ τ เป็นค่าฟีโรโมนของโหนดข้างเคียงที่ไม่ใช่โหนด j จากนั้นโหนดจะทำการปรับปรุงศักยภาพของโหนดข้างเคียง ψ_j ตามค่าเฉลี่ยที่รับมาตามสมการ 3-14

$$\psi_j(i) = \psi_j(i-1) + (1-\lambda)\left(\frac{SAVE_FUSSION}{hop^t} - \psi_j(i-1)\right) \quad (3-14)$$

และปรับปรุงศักยภาพของโหนดตนเองเป็น 3-15

$$\psi(i) = \psi(i-1) + (1-\lambda)\left(\frac{SAVE_FUSSION}{(hop+1)^t} - \psi(i-1)\right) \quad (3-15)$$

ศักยภาพของโหนดตนเองนี้จะถูกกระจายโดยใช้ hello เพื่อเกิดเนื่องจากการปรับโดย bant ถ้าช้ากว่าจะปรับได้ ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้เพื่อการปรับปรุงศักยภาพโหนดโดยใช้ hello เพื่อเกิดด้วยเมื่อโหนดรับ hello เพื่อเกิดแล้วจะปรับปรุงถ้าศักยภาพที่เก็บไว้น้อยกว่าที่อยู่ใน hello เพื่อเกิด

จะพบว่าสมการ ปรับ ระดับของ โหนดต่างจากระบบอาณานิคม มด ที่อธิบายก่อนหน้านี้ ที่การเปลี่ยนแปลงของระดับ โหนดจะเปลี่ยน โดยค่าเฉลี่ยแทนที่รับค่าที่น้อยกว่าจึงจะเปลี่ยน เนื่องด้วยความไม่แน่นอนของสถานะเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้การกำหนดตายตัวของค่าระดับของ โหนดอาจไม่เหมาะสม นอกจากนี้ระดับศักยภาพของ โหนดถูกคำนวณจาก $\frac{SAVE_FUSSION}{hop^t}$ เนื่องจากความต้องการหาเส้นทางที่ทำให้ได้ $SAVE_FUSSION$ มากที่สุด แต่ถ้ากำหนดตัวแปรเดียวในการคำนวณแล้ว จากการทดลองพบว่าการส่งของ โหนดอาจมีหลายข้อเพื่อพยายามรวมข้อมูลให้ได้มากที่สุดส่งผลให้มีจำนวนข้อมูลจำนวนมากส่งภายในเครือข่าย ดังนั้นจึงนำตัวแปร hop^t ใช้ในสมการเพื่อให้มีจำนวนการส่งที่น้อยขอลง

จากกระบวนการ ค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคม มด นี้จะเห็น ว่า การ ค้นหาเส้นทางมุ่งสู่ การค้นหาแบบสุ่มเพื่อค้นหาเส้นทางที่สามารถรวมข้อมูล ได้มากและมีจำนวนครั้งการส่งที่น้อย เส้นทางที่มีศักยภาพของ โหนดสูงจะมีความน่าจะเป็นในการเลือกสูง ค่าฟีโรโมนก็จะบรรจุบน เส้นทางที่มีการรวมข้อมูลสูงด้วยเช่นกัน

บทที่ 4

การประเมินประสิทธิภาพ

การทดสอบประสิทธิภาพในงานวิทยานิพนธ์นี้ สามารถทำได้โดยอาศัยเครื่องมือสำหรับจำลองผลการทำงานของเครือข่ายที่เรียกว่า Network Simulator หรือ ns2 [27] ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีฟังก์ชันสนับสนุนการจำลองการทำงานของเครือข่ายอย่างหลากหลายและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การค้นหาเส้นทางบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยขั้นตอนวิธีระบบอานานิคมมดเพื่อรวมข้อมูลที่ปรับปรุงใหม่ เราจะเรียกกระบวนการหาเส้นทางนี้ว่า "P-ANT" โดยเปรียบเทียบกับระบบอานานิคมมดแบบเดิม ANT [17], PAGER [21] และ DD [7] หรือ Opportunistic Aggregation ด้วยเครื่องมือสำหรับจำลองการทำงานของเครือข่าย ns2 ซึ่งวิธีที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพได้แก่

1. ปริมาณพลังงานโดยเฉลี่ยที่อุปกรณ์ใช้ไปในการจำลอง สามารถคำนวณได้โดยปริมาณเฉลี่ยพลังงานที่ใช้ในการทำงานของทุกโหนดในเครือข่าย การวัดประสิทธิภาพนี้ยังสามารถบ่งชี้ถึงอายุการใช้งานของอุปกรณ์
2. อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลถึงสถานีฐาน (Delivery Ratio) คืออัตราส่วนของข้อมูลที่สร้างจากเซ็นเซอร์โหนด เทียบกับข้อมูลที่สถานีฐานได้รับ เพื่อวัดปริมาณการสูญเสียข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการทำงานของโปรโตคอล
3. ระยะเวลาในการส่งถึงสถานีฐาน (Data Delay) เมื่อข้อมูลถูกสร้างเซ็นเซอร์โหนดจะมีค่าเวลาที่สร้างเก็บไว้ในแฟลชเมมโมรี่ เมื่อสถานีฐานได้รับข้อมูลจะรู้ถึงระยะเวลาที่แฟลชเมมโมรี่เดินทาง
4. จำนวนข้อมูลที่ส่งทั้งหมดภายในเครือข่าย เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการลดข้อมูลของกระบวนการทำงานของโปรโตคอลต่างๆ
5. จำนวนแพ็คเกจที่ส่งทั้งหมดภายในเครือข่าย เป็นการทดสอบความสำเร็จในการสร้างเส้นทาง โดยวัดจากจำนวนแพ็คเกจที่ใช้สร้างเส้นทางกับข้อมูลที่ส่งทั้งหมด

สภาวะแวดล้อมการจำลองผลการทำงานจะกำหนดพื้นที่การตรวจจับเป็น $1500 \times 500 \text{ m}^2$ จำนวนโหนดในเครือข่าย 100 โหนดโดยกระจายตัวแบบสุ่มขอบเขตในการส่ง 250 เมตร พลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็คเกจตามรูปแบบของ [11] โดยพลังงานที่ใช้จะเป็นไปตามระยะทางที่ส่งออกในแต่ละผลการทดลองจะใช้รูปแบบโครงสร้างของการจำลอง (Scenario) สำหรับแต่ละกรณีเป็น 10 รูปแบบแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยใช้รูปแบบการส่งข้อมูลแบบ Random-Source Model (RS) [10] ที่จำนวน k โหนดที่ไม่เป็นสถานีฐานจะถูกสุ่มเลือกเป็นโหนดที่ใช้ส่งข้อมูล

ในการทดสอบกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบอานานิคมมดนั้นเราจะแบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบการทำงานกับโปรโตคอลต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมของข้อมูลและเครือข่ายที่แตกต่างกัน โดยในการทดลองแรกเป็นการทดสอบกระบวนการทำงานกับการเปลี่ยนแปลงของจำนวนโหนดที่ใช้ส่งข้อมูล (Source Node, ซอร์สโหนด) ต่อมาทำการทดสอบ

การทำงานกับการปรับของจำนวนอัตราการส่ง (Data Rate) จากนั้นในส่วนที่สองเราจะศึกษาตัวแปรต่างๆที่ใช้ในกระบวนการทำงาน ประกอบด้วย ปริมาณการส่ง bant โดยการปรับตัวแปร Z ตามสมการ 3-8, k จากสมการ 3-5, ρ จากสมการ 3-12 3-13

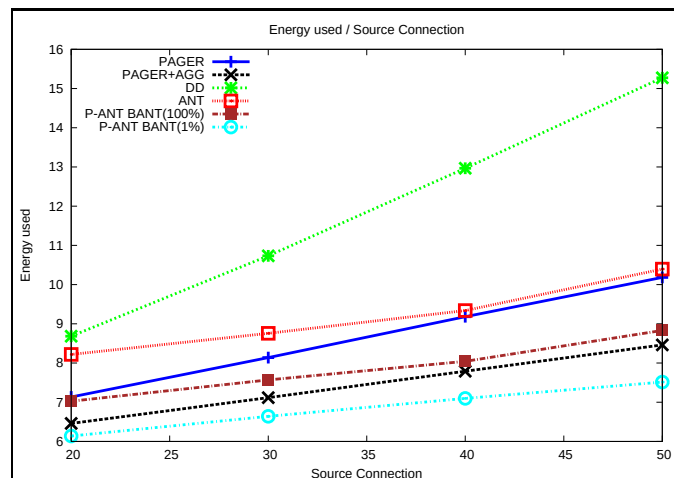
4.1 การเปรียบเทียบการทำงานในหลากหลายสภาพแวดล้อม

เริ่มต้น นั้น จะทำการ เปรียบเทียบกระบวนการ ทำงาน กับ โปรโตคอลอื่นๆ โดยกำหนดจำนวนซอร์สโหนดเป็น 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับโดยทำการกำหนดเวลาในการรอเพื่อรวมข้อมูล (T_a) เป็น 0.1 วินาทีและกำหนดอัตราการส่งข้อมูลเป็น 5 วินาทีต่อแพ็คเก็ต และค่าตัวแปรต่างๆในสมการจะแสดงในตารางที่ 4-1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่พบว่าให้ผลดี โดยทำการเปรียบเทียบกับโปรโตคอล DD[7], PAGER [21], PAGER+AGG เป็นโปรโตคอล PAGER ที่ใช้การรวมข้อมูลในการทำงานเพิ่มเติม, ANT [17], P-ANT(100%) เป็นการกำหนดการตอบกลับของ bant ทั้งหมดที่ได้รับ fant มา และสุดท้าย P-ANT(1%) เป็นการกำหนดการตอบกลับของ bant เป็นประมาณ 1% ($Z = 2.23$) ของ fant (จากการทดลองยังพบว่า bant ที่ถูกส่งยังคงมีหลายพันแพ็คเก็ตซึ่งมากพอที่จะเสริมเส้นทางได้) ซึ่งจะถูกกล่าวเป็นหลักในการเปรียบเทียบ

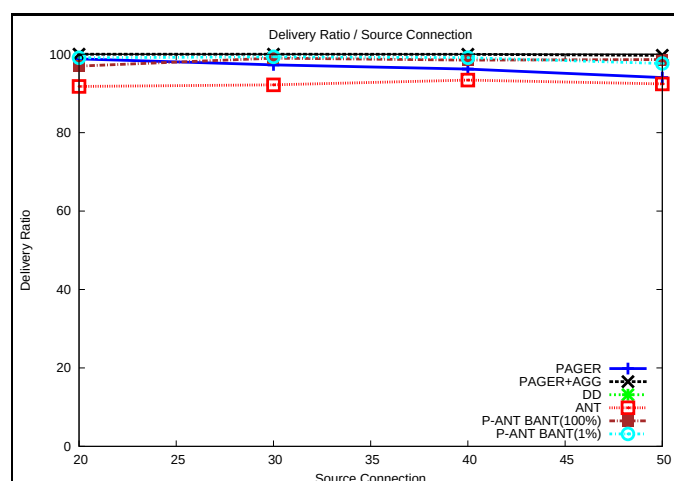
ตารางที่ 4-1 ค่าตัวแปรในการจำลองการทำงาน

ตัวแปร (สมการ)	ค่าตัวแปร
α (3-2)	1
β (3-2)	4
λ (3-4, 3-10, 3-11, 3-14, 3-15)	0.9
k (3-5)	0.1
ρ (3-12, 3-13)	0.1
t (3-14, 3-15)	3

จากภาพที่ 4-1 พบว่า P-ANT(100%) ประสบความสำเร็จในการประหยัดพลังงานมากกว่า ANT สูงสุด 15.1% เมื่อจำนวนโหนดที่ใช้ส่งข้อมูล 50 โหนดแต่วิธีการที่ลดจำนวนการตอบกลับมาร่วมใช้ด้วย P-ANT(1%) พบว่าสามารถลดลงได้มากกว่า ANT 27.7% เมื่อจำนวนโหนดที่ใช้ส่งข้อมูล 50 โหนด เมื่อเปรียบเทียบกับ PAGER+AGG สามารถลดได้ 11.2% เมื่อเปรียบเทียบกับ DD ประหยัดมากกว่าถึง 50.8% และภาพที่ 4-2 แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการส่งข้อมูลเราจะพบว่า P-ANT และ PAGER+AGG มีความสำเร็จในการส่งข้อมูลที่สูง แต่ขณะที่ ANT มีความสำเร็จในการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่าเนื่องจากในขณะเริ่มต้นของโปรโตคอลนั้น ต้องการเวลาในการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายและมีการเดินทางแบบสุ่ม ทำให้แพ็คเก็ตถูกดรอปปิ้งเมื่อในช่วงเวลาดังกล่าวและจะมากขึ้นเมื่อมีจำนวนโหนดการส่งมากขึ้น PAGER มีความสำเร็จในการส่งที่ต่ำ เนื่องจากจำนวนแพ็คเก็ตที่ใช้ส่งมากและมีเส้นทางในการส่งมีเส้นทางเดิม

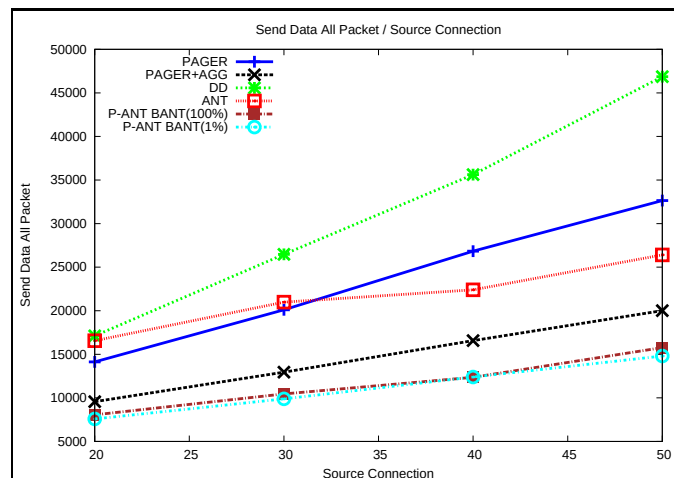


ภาพที่ 4-1 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะกำหนด rate 5 s/packet

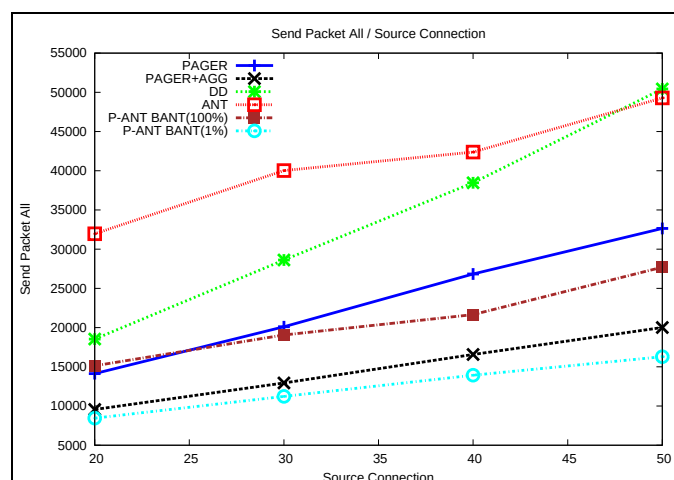


ภาพที่ 4-2 แสดงอัตราความสำเร็จในการรับข้อมูลขณะกำหนด rate 5 s/packet

ขณะที่ภาพที่ 4-3 แสดงให้เห็นถึงจำนวนข้อมูลที่ส่งทั้งหมดจะพบว่า P-ANT(1%) พอๆกับ P-ANT(100%) แสดงให้เห็นว่าการลด bant โดยเลือกเส้นทางที่มีคุณภาพดียังคงมีประสิทธิภาพในการรวมข้อมูล จำนวนการส่งข้อมูลของ P-ANT(1%) สามารถลดได้ 26% เมื่อเทียบกับ PAGER+AGG, 43.96% เมื่อเทียบกับ ANT, 48.63% เมื่อเทียบกับ DD แต่อย่างไรก็ตาม P-ANT ต้องการการตอบกลับจากสถานีฐานเพื่อสร้างเส้นทาง ส่งผลให้จำนวนแพ็คเกจทั้งหมดมีมากขึ้นซึ่งแสดงในภาพที่ 4-4 P-ANT(100%) จะมีการตอบกลับของสถานีฐานทั้งหมดเกือบ 100% ของจำนวนข้อมูลที่ส่ง ส่งผลให้แม้สามารถลดจำนวนการส่งลงแต่กลับมีจำนวนการส่งแพ็คเกจทั้งหมดสูงกว่าเนื่องจากการตอบกลับของสถานีฐาน ขณะที่ P-ANT(1%) สามารถลดจำนวนการส่งข้อมูลและอาศัยการตอบกลับสถานีฐานเล็กน้อย ทำให้แพ็คเกจทั้งหมดที่ใช้ส่งยังคงน้อยกว่า PAGER+AGG



ภาพที่ 4-3 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกส่งทั้งหมดขณะกำหนด rate 5 s/packet

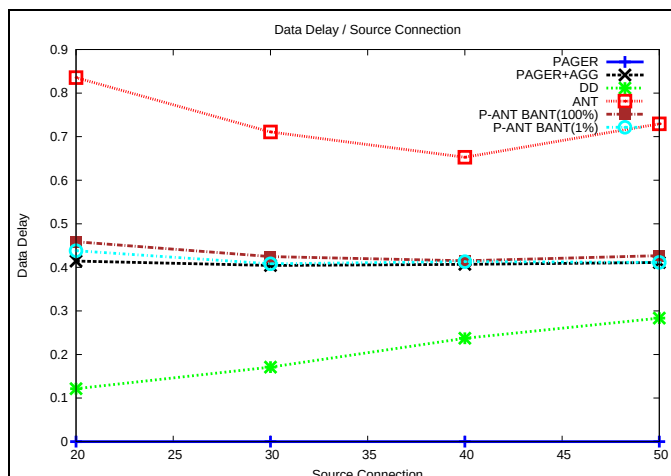


ภาพที่ 4-4 แสดงจำนวนแพ็คเกจที่ถูกส่งทั้งหมดขณะกำหนด rate 5 s/packet

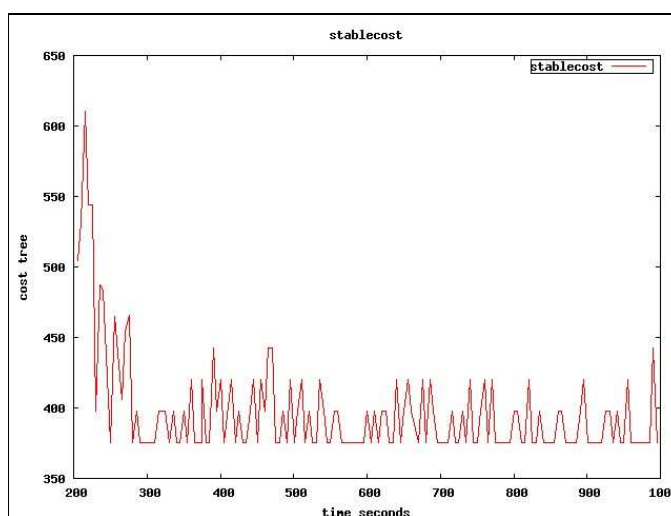
ความล่าช้าในการส่งของข้อมูลของโปรโตคอลต่างๆ แสดงในภาพที่ 4-5 เราพบว่า PAGER มีความล่าช้าที่ต่ำกว่ามากเนื่องจากไม่มีการใช้กลไกในการรวมข้อมูล ขณะที่ DD ใช้การรวมข้อมูลแต่ยังคงมีความล่าช้าต่ำเนื่องจากการเลือกคุณภาพเส้นทางให้มีความล่าช้าต่ำและกลไกให้การส่งบางแบบใช้การส่งข้อมูลแบบฟลัดทำให้ไม่มีการใช้การรอข้อมูลในแต่ละโหนด PAGER+AGG และ P-ANT มีความล่าช้าพอกันเนื่องจากการเดินทางของข้อมูลเป็นแบบเส้นทางที่สั้นที่สุดในการร่วมทำงานด้วย ทำให้มีจำนวนฮอปน้อยที่สุด ต่างจากการใช้ ANT ในการทำงานซึ่งเป็นลักษณะแบบสุ่มและมีความล่าช้าในการหาเส้นทางในช่วงเริ่มต้นสูงส่งผลให้มีความล่าช้ามากกว่า P-ANT ประมาณ 50%

นอกจากนี้เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในกระบวนการทำงานในการหาเส้นทางต้นไม้แบบสไโดเนอร์ที่ต่ำที่สุด ค่าใช้จ่ายของต้นไม้แสดงในภาพที่ 4-6 จะเห็นว่ามีประสิทธิภาพ

ของ P-ANT สามารถแก้ไขปัญหาในการสร้างเส้นทางแบบสโตนอร์ที่ต่ำที่สุดเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 2-14

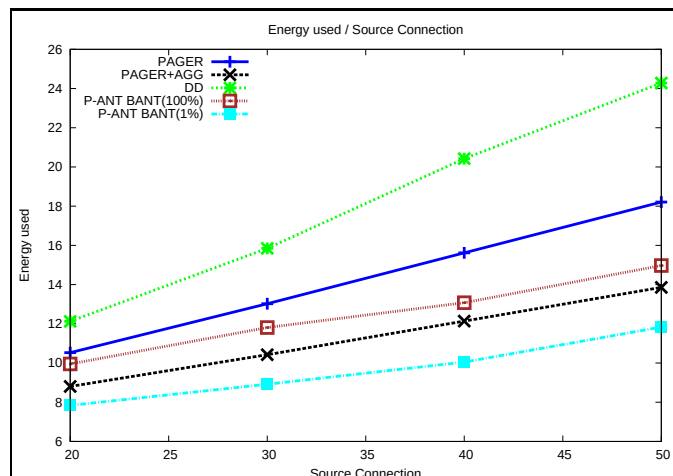


ภาพที่ 4-5 แสดงการความล่าช้าในการรับข้อมูลขณะกำหนด rate 5 s/packet



ภาพที่ 4-6 แสดงผลการทำงานของ P-ANT ค่า cost ของเส้นทางต้นไม้

ต่อมาเราจะทำการทดสอบให้มีสถานะการส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นจาก 5 วินาทีต่อแพ็คเก็ตเป็น 2 วินาทีต่อแพ็คเก็ต อย่างไรก็ตามใน ANT จะไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากการที่ระบบอานิคมมดแบบเดิมนั้นต้องมีการเข้าจังหวะกันระหว่าง fant และ bant ทำให้ต้องมีอัตราการส่งที่จำกัด ยกตัวอย่างเช่น เรากำหนดให้มีการรอข้อมูลในแต่ละโหนดที่ 0.1 วินาที จำนวนโหนดที่มากที่สุดที่ fant จะเดินทางผ่านเป็น 40 โหนด แล้วสมมติว่าความล่าช้าในการส่ง bant กลับและความล่าช้าของกระบวนการทำงานภายในโหนดประมาณ 0.2 วินาที ดังนั้นเราสามารถส่งข้อมูลได้ในอัตราเร็วสูงสุด 4.2 วินาทีต่อแพ็คเก็ต ทำให้ในการเปรียบเทียบเมื่อมีอัตราการส่งเร็วกว่า 4.2 วินาทีต่อแพ็คเก็ตจะไม่มีเปรียบเทียบ ANT



ภาพที่ 4-7 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะกำหนด rate 2 s/packet

จากภาพที่ 4-7 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดจะพบว่าเมื่อมีอัตราการส่งที่มากขึ้นพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็คเกจจะสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4-1 ซึ่งโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มคงเดิมแต่ P-ANT(1%) สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับ PAGER+AGG เป็น 17.2%

4.2 ตัวแปรส่งผลกระทบต่อกระบวนการหาเส้นทาง

เริ่มต้นเราจะกำหนดจำนวนซอร์สโหนดเป็น 30 โหนดและกำหนดเวลาในการรอเพื่อรวมข้อมูลเป็น 0.1 วินาทีและกำหนดอัตราการส่งข้อมูลเป็น 5 วินาทีต่อแพ็คเกจ จากนั้นจะทำการปรับตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการทำงาน

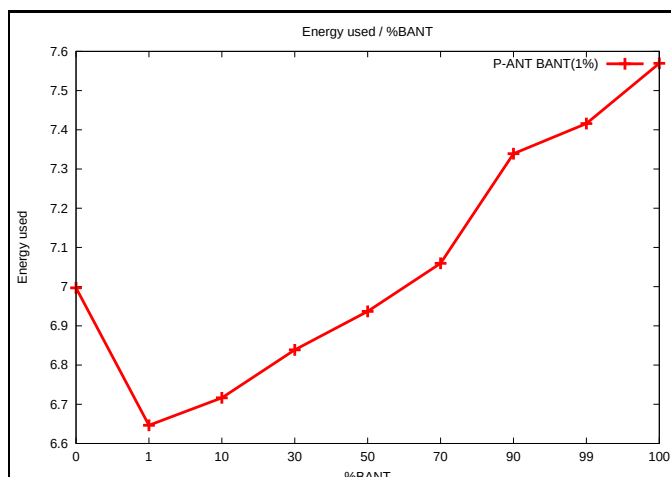
4.2.1 ผลกระทบจากตัวแปร Z

ค่า Z ตามสมการ 3-8 เป็นจำนวนที่ใช้คำนวณเพื่อค้นหาปริมาณการตอบกลับของ bant โดยกำหนดการประเมินการตอบกลับของ bant เป็น 0%, 1%, 30%, 50%, 90% และ 100% ดังนั้นกำหนด Z เป็น 9, 2.33, 0.52, 0.0, -0.52, -2.33 และ -9

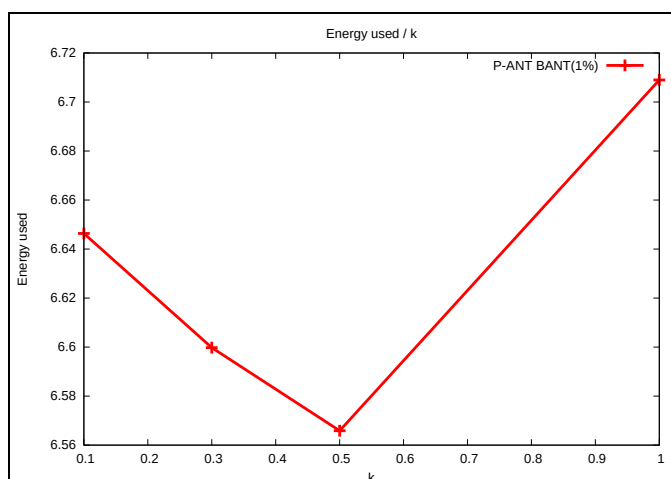
จากภาพที่ 4-8 จะพบว่าพลังงานจะสูงขึ้นเมื่อการตอบกลับของ bant มีจำนวนมาก ขณะที่ใช้การตอบกลับ 100% เมื่อเทียบกับ 1% จะเห็นว่าสามารถลดพลังงานได้ประมาณ 11.4% แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเราไม่ส่ง bant หรือการตอบกลับเพื่อเสริมเส้นทางค่าพลังงานสูงขึ้นเนื่องจาก P-ANT จะทำการเดินทางแบบสุ่มอย่างไรก็ตามยังคงมีกระบวนการทำงานของ PAGER ในการเลือกอยู่ทำให้การใช้พลังงานยังคงไม่สูงมากนัก ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่ากลไกการปรับปรุงระบบอาณานิคมมดโดยใช้การลด bant สามารถให้ผลที่ดีขึ้นและลดพลังงานได้สูงสุดถึง 11.4% แต่อย่างไรก็ตามการลด bant ส่งผลให้การบรรจบเส้นทางในระบบช้าลง

4.2.2 k จากสมการ 3-5

ค่า k เป็นค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเสริมฟีโรโมนในเส้นทางเพื่อนำไปใช้ในสมการ 3-12 ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4-9 จะพบว่าขณะที่กำหนดค่า k ให้มีค่าต่ำจะทำให้เส้นทางมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และอาจน้อยเกินไปในการเสริมของฟีโรโมนทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานมากกว่าระบบอาจนิคมจะพบเส้นทางที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามถ้ากำหนดให้ค่า k มากเกินไปเส้นทางจะไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลให้พลังงานที่ใช้สูง



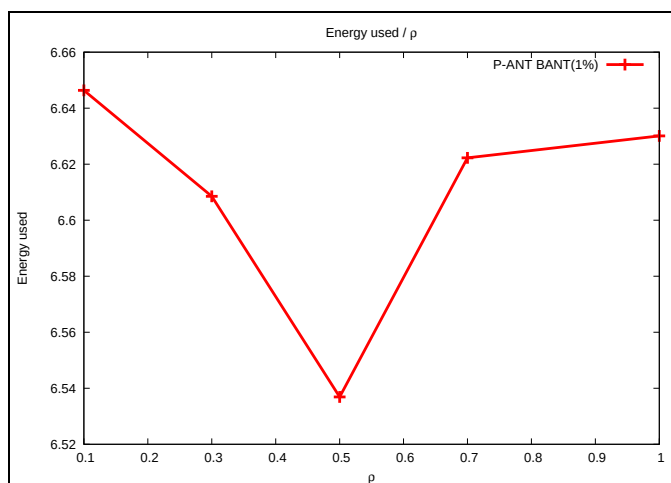
ภาพที่ 4-8 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะเปลี่ยนแปลงค่า Z



ภาพที่ 4-9 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะเปลี่ยนแปลงค่า k

4.2.3 ρ จากสมการ 3-12, 3-13

ค่า ρ เป็นค่าตัวแปรเพื่อใช้ลดอิทธิพลในอดีตของเส้นทางจากภาพที่ 4-10 แสดงให้เห็นว่าถ้ากำหนดให้มีค่ามากเกินไปเส้นทางจะไม่คงที่ทำให้อิทธิพลของเส้นทางในอดีตน้อย ถ้ามีค่าน้อย อิทธิพลจากเส้นทางในอดีตจะสูง การเปลี่ยนแปลงจะเป็นไปอย่างช้ามากกว่า เนื่องจากเส้นทางที่ใช้ในการหา ยังไม่เหมาะสมส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่สูง



ภาพที่ 4-10 แสดงการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดขณะเปลี่ยนแปลงค่า ρ

บทที่ 5

สรุป

การรวมข้อมูลเป็นกลไกหนึ่งที่ใช้ในการลดพลังงานในเครือข่ายได้ดี เพื่อให้เกิดการรวมข้อมูล ได้มากที่สุดและสามารถใช้พลังงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการ กระบวนการสร้างเส้นทางที่มีประสิทธิภาพ หนึ่งในกระบวนการสร้างเส้นทางเพื่อรวมข้อมูลให้ ได้มากที่สุดเป็นกระบวนการ ค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด แต่อย่างไรก็ตามระบบอาณานิคมมดที่มีอยู่มีข้อเสียและข้อจำกัดหลายข้อ งานวิทยานิพนธ์นี้พยายามปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการทำงานระบบอาณานิคมมดเพื่อใช้สร้างเส้นทางเพื่อรวมข้อมูลให้มากที่สุดและสามารถประหยัดพลังงานได้จริง โดยการปรับปรุงสมการ ตัวแปรและนำเสนอกลไกที่ใช้ลด bant ลง ซึ่งเราเรียกกระบวนการนี้ว่า P-ANT จากผลการทดลองด้วย ns2 พบว่าสามารถประหยัดพลังงานมากกว่า PAGER+AGG 17.2%, ANT ประมาณ 27.7% และ DD 50.8% และสามารถลดจำนวนการส่งข้อมูลได้ 26% เมื่อเทียบกับ PAGER+AGG, 68% เมื่อเทียบกับ DD และ ANT 43.96% และมีความสำเร็จในการส่งข้อมูลที่ดีกว่า ANT ในขณะที่ความล่าช้าของข้อมูลมากกว่า PAGER+AGG เล็กน้อย

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้เราสามารถสรุปได้ว่า P-ANT ปรับสมการตัวแปรต่างๆ และกลไกที่ใช้ลดการส่ง bant กลับ ให้ผลดีขึ้นและสามารถประหยัดพลังงานจริง ส่งผลให้ผลรวมการใช้พลังงานของระบบมีค่าลดลง และสำเร็จในการลดปริมาณการส่งข้อมูลลง อย่างไรก็ตามในกระบวนการขั้นตอนการปรับลด bant นั้นส่งผลให้การเสริมของฟีโรโมนมีค่าน้อยลงและการบรรจบของเส้นทางใช้เวลานานขึ้น

ทั้งนี้ผลการทดสอบระบบเครือข่ายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังสามารถนำไปขยายผล ในขั้นตอนการออกแบบที่คำนึงถึงปัจจัยอื่น เช่น ความสมดุลของพลังงาน (Balance) ในเครือข่าย เนื่องจากกระบวนการทำงานนี้มุ่งสู่การหาเส้นทางที่สามารถรวมข้อมูลมากที่สุดและส่งน้อยที่สุด ดังนั้นเส้นทางอาจไม่เปลี่ยนแปลงทำให้โหนดบาง โหนดรับภาระมากเกินไปทำให้โหนดตายเร็วกว่าโหนดอื่นๆ หรือการกำหนดให้อุปกรณ์สามารถหยุดพักการทำงานได้ (Sleep) เพื่อการประหยัดพลังงานมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. UC Berkeley. "Tinyos Community Forum || An Open-Source OS for The Networked Sensor Regime." [online] [cited 2005 Feb 5]. Available from : URL : <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>
2. Crossbow Technology, Inc. "MICA2DOT Datasheet." [online] [cited 2005 Jan 30]. Available from : URL : <http://xbow.com>
3. Jennic Ltd. "Wireless Sensor Network Products and Wireline Intellectual Property." [online] [cited 2005 Jan 30]. Available from : URL : <http://www.jennic.com>
4. IC Invocon Inc. "Extended-Life Micro-Miniature Wireless Instrumentation System (ELMWIS)." [online] [cited 2005 Jan 30]. Available from : URL : <http://www.invocon.com>
5. H Qi, P Kurganti and Y Xu. "The Development of Localized Algorithms in Wireless Sensor Networks." *Sensors 2002*. 286-293.
6. Wendi Heinzelman, Joanna Kulik and Hari Balakrishnan. "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks." *Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conference*. Seattle, WA. August 1999.
7. C Intanagonwiwat, R Govindan and D Estrin. "Directed Diffusion : A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks." *ACM MobiCom*. 2000.
8. Bhaskar Krishnamachari, John Heidemann. "Application-specific Modelling of Information Routing in Sensor Networks." *Technical Report ISI-TR-576*. USC/Information Sciences Institute. August 2003.
9. B Krishnamachari, D Estrin and S Wicker. "The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks." *In Proceedings of International Workshop on Distributed Event-Based Systems*. 2002.
10. B Krishnamachari, D Estrin and S Wicker. "Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks." *USC Computer Engineering Technical Report CENG 02-14*. 2002.
11. W R Heinzelman. *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*. Ph.D.Thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2000.
12. O Younis and S Fahmy. "HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks." *IEEE Transactions on Mobile Computing*. December 2004 : 366-379.

13. S Lindsey, C Raghavendra and K M Sivalingam. "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics." *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. September 2002 : 924-935.
14. L Bianchi, L M Gambardella and M Dorigo. "An Ant Colony Optimization Approach to The Probabilistic Traveling Salesman Problem." *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Germany : Springer Verlag. 2002.
15. M Ding, X Cheng and G Xue. "Aggregation Tree Construction in Sensor Networks." *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference*. October 2003 : 2168-2172.
16. กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ. "ANT Colony System ระบบอาณาจักรมด." *สาร NECTEC 2546*. ก.ย.-ต.ค. 46 : 52-56.
17. G Singh, S Das, S Pujar and S Gosavi. "Ant Colony Algorithms for Steiner Trees: An Application to Routing in Sensor Networks." *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*. IGI press. 2004.
18. Sanjoy Das, Gurdip Singh, Sandeep Pujar and Praveen Koduru. "Ant Colony Algorithms for Routing in Sensor Networks." *The 2004 Genetic and Evolutionary Computation Conference*. 2004.
19. Misra R, Mandal C. "Ant-Aggregation : Ant Colony Algorithm for Optimal Data Aggregation in Wireless Sensor Networks." *Wireless and Optical Communications Networks 2006 IFIP International Conference*. 11-13 April 2006.
20. Ying Zhang, Lukas D Kuhn, Markus and P J Fromherz. "Improvements on Ant Routing for Sensor Networks." *ANTS Workshop 2004*. 154-165.
21. L Zou, M Lu, and Z Xiong. "PAGER-M: A Novel Location-Based Routing Protocol for Mobile Sensor Networks." *Proc. BroadWISE'04*. San Jose, CA. October 2004.
22. L Zou, M Lu and Z Xiong. "PAGER: A Distributed Algorithm for The Dead-End Problem of Location-Based Routing in Sensor Networks." *Proc. ICCCN'04*. Chicago, IL. October 2004.
23. Mesut Gunes, Udo Sorges and Imed Bouazizi. "ARA – The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs." *International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'02)*. Vancouver, Canada. August 2001.
24. C K Tham, S Marwaha and D Srinivasan. "Mobile Agents Based Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks." *In Proceedings of IEEE Globecom*. 2002.
25. Di Caro G, Ducatelle F and Gambardella L M. "AntHocNet: an Ant-Based Hybrid Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks." *In Proceedings of the 8th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN VIII)*. Birmingham, UK. September 2004.

26. Ducatelle F, Di Caro G and Gambardella L M. "Ant Agents for Hybrid Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks." *In Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2005)*. St. Moritz, Switzerland. January 2005.
27. *The Network Simulator - ns2*. [online] [cited 2003 Nov 23]. Available from : URL : <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> January 2005.
28. D Estrin, R Govindan, J Heidemann and S Kumar. "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks." *ACM MobiCom 99*. Washington, USA. 1999.
29. S Vardhan, M Wilczynski, G Pottie and W J Kaiser. "Wireless Integrated Network Sensors (WINS) : Distributed in Situ Sensing For Mission And Flight Systems." *IEEE Aerospace Conference*. 2000 : 459–463.
30. P Bonnet, J Gehrke and P Seshadri. "Querying The Physical World." *IEEE Personal Communications*. October 2000 : 10–15.
31. P Johnson et al. "Remote Continuous Physiological Monitoring in The Home." *Journal of Telemed Telecare 2*. 1996 : 107–113.
32. M Ogawa et al. "Fully Automated Biosignal Acquisition in Daily Routine Through 1 Month." *International Conference on IEEE-EMBS*. Hong Kong. 1998 : 1947–1950.
33. N Noury, T Herve, V Rialle, G Virone, E Mercier, G Morey, A Moro and T Porcheron. "Monitoring Behavior in Home Using A Smart Fall Sensor." *IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology*. October 2000 : 607–610.
34. P Bauer, M Sichitiu, R Istepanian and K Premaratne. "The Mobile Patient: Wireless Distributed Sensor Networks for Patient Monitoring And Care." *In Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine*. 2000 : 17–21.
35. B Sibbald. "Use Computerized Systems to Cut Adverse Drug Events: Report." *CMAJ: Canadian Medical Association Journal*. 2001.
36. C Herring, S Kaplan. "Component-Based Software Systems for Smart Environments." *IEEE Personal Communications*. October 2000 : 60–61.
37. J M Rabaey, M J Ammer, J L da Silva Jr, D Patel and S Roundy. "PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking." *IEEE Computer Magazine*. 2000 : 42–48.

38. E Shih, S Cho, N Ickes, R Min, A Sinha, A Wang and A Chandrakasan. "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks." *Proceedings of ACM MobiCom '01*. Rome, Italy. July 2001 : 272–286.
39. E M Petriu, N D Georganas, D C Petriu, D Makrakis and V Z Groza. "Sensor-Based Information Appliances." *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*. December 2000 : 31–35.
40. LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) And Physical Layer (PHY) Specification." *IEEE Std 802.11*. 1997.
41. W Ye, J Heidemann and D Estrin. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks." *INFOCOM*. 2002.
42. Karp, B Kung and H T. "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks." *In Proceedings of the Sixth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*. Boston. 2000.
43. D Niculescu, Badri Nath. "Ad Hoc Positioning System (APS)." *In Proceedings of GLOBECOM*. San Antonio. November 2001.
44. D Braginsky, D Estrin. "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks." *International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-22)*. 2002.
45. C Schurgers, M B Srivastava. "Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks." *The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*. McLean, VA. 2001.
46. Gambardella L M, Dorigo M. "HAS-SOP: Hybrid Ant System for The Sequential Ordering Problem." *Technical Report IDSIA*. 1997.
47. Gambardella L M, Taillard E and Agazzi G. "MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows." *New Ideas in Optimization*. McGraw-Hill. 1999 : 63-76.
48. Zhang Subing, Liu Zemin. "A QoS Routing Algorithm Based on Ant Algorithm." *Local Computer Networks (LCN 2000)*. 2000 : 574-578.
49. Kwang Mong Sim, Weng Hong Sun. "Ant Colony Optimization for Routing and Load-Balancing: Survey and New Directions." *Systems, Man and Cybernetics Part A, IEEE Transactions*. September 2003 : 560 - 572.
50. Martin Arnaud, Mauuary Laurent. "Voicing Parameter and Energy Based Speech/Non-Speech Detection for Speech Recognition in Adverse Conditions." *In EUROSPEECH-2003*. 3069-3072.

ภาคผนวก ก

ความน่าจะเป็นแบบปกติมาตรฐาน (CDF)

ก ความน่าจะเป็นแบบปกติมาตรฐาน (CDF)

[illegible]

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายทัสยุ สร้อยสุนทร
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : กระบวนการสร้างเส้นทางระบบอาณานิคมแบบร่วมประมวลผล
 เพื่อรวมข้อมูลสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

เกิดเมื่อวันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2524 ณ ประเทศไทย บิดาชื่อ นายสุทัต สร้อยสุนทร มารดาชื่อ นางสุจิตรา สร้อยสุนทร มีพี่น้องรวมทั้งสิ้น 2 คน เป็นบุตรคนโต สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย และระดับอุดมศึกษาในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์