



รายงานการวิจัย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการ
เฝ้าตรวจเพื่อการเกษตร
(Energy-efficient wireless sensor networks for agricultural
monitoring)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการ
เฝ้าตรวจเพื่อการเกษตร
(Energy-efficient wireless sensor networks for agricultural
monitoring)

ผู้วิจัย

วิภาวี อูสาหะ

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2555

บทคัดย่อ

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ทำงานอย่างกระจายและอัตโนมัติ โดยแต่ละเซ็นเซอร์สามารถติดต่อสื่อสารกับเซ็นเซอร์อื่นๆ เพื่อทำการตรวจรู้และประมวลข้อมูลร่วมกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของทรัพยากรบนบอร์ดเซ็นเซอร์ จึงมีความจำเป็นต้องลดการใช้พลังงานลง รูปแบบการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมซึ่งมักอาศัยความร่วมมือระหว่างโหนดจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเฝ้าระวังสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามโหนดอาจถูกโจมตีจากโหนดที่เป็นอันตรายซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่อพื้นที่สังเกตการณ์ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของรายงานฉบับนี้คือการพัฒนาการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ไม่ซับซ้อนและทำงานอย่างกระจายตัว และยังสามารถป้องกันการโจมตีในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการของการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้การเรียนรู้แบบมัลติเอเจนต์หรือฟอรัมร่วมกับโปรโตคอลรักษาความปลอดภัยของเครือข่าย เพื่อที่จะได้กลยุทธ์การจัดการพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยและใกล้เคียงกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธีการที่นำเสนอถูกออกแบบให้โหนดหนึ่งๆ ทำการตัดสินใจ โดยพิจารณาข้อมูลจากโหนดข้างเคียงหลายโหนด เพื่อรับมือกับข้อมูลที่ผิดพลาดจากโหนดที่เป็นอันตราย

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีความทนทานและมีประสิทธิภาพกว่าโดยได้รับพื้นที่ครอบคลุมต่อพลังงานหนึ่งหน่วยที่มีค่าสูงและได้รับเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมมากกว่าวิธีการดีวีเอฟ (DVF) เดิมถึง 6 - 12% ภายใต้การโจมตีแบบไม่ให้หลับและการโจมตีแบบให้หลับ นอกจากนี้จากการศึกษาการโจมตีแบบยึดครองโหนดในเครือข่ายซึ่งทำให้โหนดแลกเปลี่ยนข้อมูลที่คลาดเคลื่อนระหว่างโหนด พบว่าวิธีการที่นำเสนอได้รับพื้นที่ครอบคลุมที่มากกว่าวิธีการเดิมถึง 19% 32% และ 37% เมื่อเกิดการยึดครองโหนดอย่างเดียวหรือเกิดการยึดครองโหนดรวมกับการโจมตีแบบไม่ให้หลับ และการโจมตีแบบให้หลับตามลำดับ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าวิธีการที่รวมโปรโตคอลรักษาความปลอดภัยนั้นสามารถลดความเสี่ยงของการโดนโจมตีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้รายงานฉบับนี้ยังพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการเฝ้าระวังตรวจสอบคุณภาพสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการนำระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมาประยุกต์ใช้เพื่อประหยัดเวลาในการตรวจวัดปัจจัยต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการเจริญเติบโตของผักไฮโดรโปนิกส์ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกส่งไปยังสถานีฐานด้วยการส่งข้อมูลแบบไร้สาย เพื่อให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประมวลได้อย่างสะดวก รวดเร็ว ทำให้ผู้เพาะปลูกสามารถควบคุมและดูแลปัจจัยต่างๆได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และต่อเนื่องตลอดเวลา

Abstract

A wireless sensor network (WSN) is a wireless network consisting of spatially distributed autonomous sensory devices that can communicate with each other to perform sensing and data processing cooperatively. However, due to limited onboard resources, power consumption must be reduced. Coverage control schemes, where nodes typically cooperate with each other, are therefore essential for effective condition monitoring of the environment. However, nodes are vulnerable to malicious attacks which directly affect the area under observation. Therefore, the underlying aim of this thesis is to develop a distributed light-weight coverage control scheme which countermeasures against malicious attacks in WSNs. This thesis proposed a coverage control algorithm based on multi-agent reinforcement learning integrated with a topology maintenance protocol in order to obtain a secure and near-optimal coverage allocation strategy. The proposed algorithm was designed in such a way that a node makes its decisions by considering inputs from multiple neighboring nodes in order to tolerate false messages created by malicious nodes.

Simulation results showed that our algorithm was more robust and efficient by consistently attaining higher coverage per unit energy consumed, and achieving 6-12% of coverage greater than the original DVF algorithm under sleep deprivation and snooze attacks. Furthermore, the network substitution attack was studied where inaccurate information was exchanged between nodes. The proposed algorithm gained up to 19%, 32% and 37% of coverage higher than the DVF algorithm for the network substitution attack alone, and network substitution paired with sleep deprivation and snooze attacks, respectively. By integrating the secure topology maintenance protocol, our results suggested that vulnerability to such attacks can efficiently be reduced.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญรูป.....	ง
บทที่	
1 ที่มาและความสำคัญ	
1.1 บทนำ.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.2.1 การครอบคลุมแบบทั้งพื้นที่.....	6
1.2.2 การครอบคลุมพื้นที่แบบเฉพาะจุด.....	10
1.2.3 การครอบคลุมพื้นที่แบบขวางกัน.....	11
1.3 การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมในระบบหลายตัวกระทำ.....	11
2 ทฤษฎีพื้นฐาน	
2.1 กล่าวนำ.....	14
2.2 พื้นฐานทฤษฎีการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ.....	15
2.2.1 คุณสมบัติมาร์คอฟ.....	15
2.2.2 กระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ.....	15
2.3 กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์.....	16
2.4 วิธีการเรียนรู้แบบคิวในรูปแบบหลายตัวกระทำ.....	18
2.5 กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ในรูปแบบการกระจาย.....	19
2.6 สรุป.....	21
3 การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีโหนดประสงค์ร้ายในระบบหลายตัวกระทำ	
3.1 กล่าวนำ.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมในระบบหลายตัวกระทำ.....	22
3.3 สิ่งแวดล้อมที่มีโหนดประสงค์ร้าย.....	24
3.4 การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมอย่างปลอดภัยในระบบหลายตัวกระทำ.....	24
3.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	28
3.5.1 การโจมตีแบบไม่ให้กลับและแบบให้กลับ.....	28
3.5.2 การโจมตีแบบยึดครองโหนดในเครือข่าย.....	32
3.6 สรุป.....	37
4 ระบบตรวจวัดสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	
4.1 กล่าวนำ.....	39
4.2 การปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์.....	40
4.3 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์.....	41
4.3.1 เซ็นเซอร์โหนด.....	42
4.3.2 บอร์ดรวมข้อมูล.....	43
4.3.3 สถานีฐาน.....	43
4.3.4 อุปกรณ์เซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดค่าสารละลายและความเข้มแสง.....	44
4.4 การทดสอบการใช้งาน.....	46
4.4.1 ระบบตรวจสอบสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์.....	46
4.4.2 ผลการทดสอบ.....	47
4.5 สรุป.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	57
ประวัตินักวิจัย.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์เพื่อการครอบคลุม.....	6
2.1 แผนผังการกระทำโต้ตอบระหว่างผู้เรียนและสิ่งแวดล้อมในระบบการเรียนรู้แบบ รีอินฟอร์สเมนต์.....	16
2.2 ตัวอย่างเครือข่ายที่มีการเรียนรู้แบบกระจายตัว ซึ่งแสดงโดยโหนดในการกำหนดปัญหา เป็นระบบการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ที่มีการเรียนรู้แบบกระจาย.....	20
3.1 พื้นที่ห้องขนาด 30x30 กริด.....	25
3.2 ไดอะแกรมการส่งสถานะของกลไกการโพรบในอัลกอริธึม DVF+TMP.....	27
3.3 ผลตอบแทนเฉลี่ยสำหรับการโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ ในสถานะที่มีโหนด ประสงค์ร้าย 15 โหนด และในสถานะปกติ.....	29
3.4 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดไม่ให้หลับในรูปของเปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่ครอบคลุม.....	29
3.5 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดไม่ให้หลับในรูปของผลจากการแลกเปลี่ยน.....	30
3.6 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดให้หลับในรูปของเปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่ครอบคลุม.....	31
3.7 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดให้หลับในรูปของผลจากการแลกเปลี่ยน.....	31
3.8 ผลตอบแทนเฉลี่ยสำหรับการโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ ในสถานะที่มี โหนดประสงค์ร้าย 15 โหนด และในสถานะปกติด้วยระดับความผิดพลาด $\xi_{\max} = 10$	32
3.9 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ครอบคลุมด้วย โหนดประสงค์ร้าย 5 โหนด.....	33
3.10 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของการแลกเปลี่ยนด้วย โหนดประสงค์ร้าย 5 โหนด.....	34
3.11 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ครอบคลุมด้วย โหนดประสงค์ร้าย 10 โหนด.....	35
3.12 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของการแลกเปลี่ยนด้วย โหนดประสงค์ร้าย 10 โหนด.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมด้วย โหนดประสงคร้าย 15 โหนด.....	36
3.14 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของการแลกเปลี่ยนด้วย โหนดประสงคร้าย 15 โหนด.....	37
4.1 โรงเรือนปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (ไฮโดรโพนิกส์)มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	42
4.2 เซนเซอร์โมดูลรุ่น MPR2400.....	42
4.3 บอร์ดรวมข้อมูลรุ่น MDA300.....	43
4.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MIB 520 CB.....	44
4.5 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสารละลายกรด-ด่าง.....	44
4.6 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	45
4.7 บอร์ด MTS 300 สำหรับการตรวจวัดค่าความเข้มแสง.....	45
4.8 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดค่ากรด-ด่าง และ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	46
4.9 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดค่าความเข้มแสง.....	47
4.10 สถานีฐาน.....	47
4.11 ข้อมูลที่ทำการตรวจวัดได้.....	48
4.12 ค่าที่ถูกบันทึกลงฐานข้อมูล.....	49
4.13 ผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายในแปลงผักไฮโดรโพนิกส์.....	50
4.14 ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในแปลงผักไฮโดรโพนิกส์.....	50
4.15 ผลการวัดค่าความเข้มแสงในแปลงผักไฮโดรโพนิกส์.....	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์.....	4
1.2 ลักษณะของวิธีการต่างๆในตารางที่ 1.1.....	5



บทที่ 1

ที่มาและความสำคัญ

1.1 บทนำ

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (wireless sensor network หรือ WSN) เป็นเครือข่ายไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์โหนดซึ่งถูกหว่านกระจายลงในพื้นที่สนใจ โดยเซ็นเซอร์โหนดเหล่านี้สามารถติดต่อสื่อสารหรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ด้วยการสื่อสารไร้สาย[1] จุดประสงค์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคือการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพเช่น แสง ความดัน อุณหภูมิ จากสิ่งแวดล้อมที่สนใจ และมีการส่งข้อมูลกลับไปสู่สถานีฐานเพื่อวิเคราะห์ผล แหล่งกักเก็บพลังงานของเซ็นเซอร์โหนดคือแบตเตอรี่ซึ่งมีการใช้พลังงานที่ต่ำมาก ดังนั้นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านภัยพิบัติ การแพทย์ การรบ การขนส่ง เป็นต้น อย่างไรก็ตามภายใต้ขอบเขตของแหล่งเก็บพลังงานในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งพลังงานต้องมีขนาดเล็ก ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการประมวลผลและการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่ายจึงต้องคำนึงถึงการลดการใช้พลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานเครือข่ายด้วย หน้าที่สำคัญประการหนึ่งของระบบ WSN คือการรักษาหรือคงไว้ซึ่งขนาดของพื้นที่ครอบคลุม มีเหตุผลมาจากพื้นที่ครอบคลุมนั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพการเฝ้าระวังในพื้นที่ๆสนใจหนึ่งๆ

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการครอบคลุมพื้นที่เฝ้าระวังที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพใน WSN อาจแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. ปัญหาพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์

ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือปัญหาพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์ ซึ่งมุ่งประเด็นยังปัญหาที่พิจารณาถึงพื้นที่ทางกายภาพที่เซ็นเซอร์ปกคลุมอยู่นั้นมากน้อยเพียงใด การปกคลุมพื้นที่ของเซ็นเซอร์นั้นถือได้ว่าเป็นมาตรชี้วัดคุณภาพการให้บริการ (quality of service) ประการหนึ่งของฟังก์ชันการทำงานของเซ็นเซอร์ จุดมุ่งหมายหลักของปัญหานี้คือ พื้นที่ที่สนใจนั้นจะต้องถูกปกคลุมด้วยเซ็นเซอร์

อย่างน้อยหนึ่งเซ็นเซอร์ หลายงานวิจัยทำการศึกษถึงวิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมโดยตั้งสมมุติฐานว่าทุกเซ็นเซอร์โหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายร่วมมือกัน

2. ปัญหาการออกแบบวิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์

โหนดเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์จำนวนหนึ่ง อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ (transceiver) ส่วนประมวลผล หน่วยความจำ และส่วนกระตุ้น (actuators) เซ็นเซอร์โหนดเหล่านี้มีการทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบในลักษณะเครือข่าย เพื่อที่จะเฝ้าระวังหรือตรวจหาสิ่งผิดปกติในพื้นที่สนใจขนาดใหญ่ ระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่สำคัญระบบหนึ่งได้แก่ เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบแอดฮอค (wireless ad-hoc sensor networks หรือ WASNs) ซึ่งมีลักษณะการวางโหนดเซ็นเซอร์แบบแอดฮอค (ad-hoc) หรือแบบสุ่ม (random) โดยตำแหน่งที่แน่นอนของการวางโหนดเซ็นเซอร์ในระบบนี้จะไม่มีการระบุไว้ล่วงหน้า เซ็นเซอร์ในระบบนี้มีประโยชน์เมื่อประยุกต์ใช้งานในสถานการณ์ที่ไม่สามารถจัดวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์ตามต้องการได้ เช่น ในสนามรบ หรือในเขตภัยพิบัติ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้ว เซ็นเซอร์โหนดจะถูกนำมาใช้งานเป็นจำนวนมากเกินความจำเป็นเพื่อทำการวัดเฝ้าระวัง หรือตรวจสอบสิ่งผิดปกติ ซึ่งเหตุที่มีการใช้เซ็นเซอร์จำนวนมากนั้น เนื่องจากไม่สามารถจัดวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์ในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดได้ ทั้งยังช่วยลดความผิดพลาดในการส่งข้อมูลอีกทางหนึ่งด้วย ในกรณีที่สามารถทำการจัดวางเซ็นเซอร์โหนดลงในตำแหน่งที่เหมาะสมได้ การระบุในลักษณะดังกล่าวจะเรียกว่า การจัดวางตำแหน่งแบบแน่นอน (deterministic) เนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดนั้นมีข้อจำกัดด้านทรัพยากรแบตเตอรี่ หน่วยประมวลผลกลาง และความสามารถในการสื่อสาร อีกทั้งการเปลี่ยนแบตเตอรี่ระหว่างการทำงานนั้นกระทำได้ยากเนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดมักอยู่ในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบ WASN ให้ใช้พลังงานในเครือข่ายให้น้อยที่สุด ทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์ (hardware), อัลกอริทึม (algorithm) และโปรโตคอล (protocol) ในทุกชั้นการทำงานของระบบ (layer) ดังนั้น ปัจจัยสำคัญยิ่งในการออกแบบระบบเครือข่ายนี้จึงเป็นการยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานที่สุด (maximize network lifetime) และในกรณีการระบุตำแหน่งแบบ deterministic นั้น ปัจจัยที่สำคัญอีกประการก็คือ การใช้จำนวนเซ็นเซอร์โหนดให้น้อยที่สุด (minimum number of sensors) อีกด้วย

ณ เวลาขณะหนึ่ง เซ็นเซอร์โหนดอาจอยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่งดังต่อไปนี้ คือ ส่งข้อมูล รับข้อมูล วางหรือหลับ โดยสถานะว่างนั้นได้แก่ สถานะที่โหนดนั้นไม่ได้ส่งหรือรับข้อมูลแต่อย่างใด ส่วนสถานะหลับนั้น ได้แก่ สถานะที่สัญญาณวิทยุถูกปิดลง ประเด็นที่น่าสนใจคือ สถานะรับข้อมูลและสถานะว่างนั้นอาจใช้พลังงานสูงเท่ากับสถานะส่งข้อมูล นอกจากนี้อัตราส่วนในการใช้พลังงานสำหรับ

สื่อสารต่อพลังงานที่ใช้ในการประมวลผลจะสูงมาก เป็นผลให้จำเป็นต้องทำการประมวลผลข้อมูลที่เซ็นเซอร์โหนด (ก่อนทำการส่งข้อมูล) การทำฟิวชั่นข้อมูล (data fusion) และการบีบอัดข้อมูล (data compression) เพื่อสงวนพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารและการส่งข้อมูล นอกจากนี้การกำหนดเวลาทำงานของโหนดเซ็นเซอร์ (scheduling) ยังช่วยประหยัดพลังงานในเครือข่ายได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยกลไกดังกล่าวจะลดจำนวนเซ็นเซอร์ที่ทำงานครอบคลุมพื้นที่ที่สนใจ โดยจุดมุ่งหมายของการกำหนดเวลาทำงานของโหนดใน WASN คือการรักษาการเชื่อมต่อ (maintain connectivity) ระหว่างเซ็นเซอร์โหนดในระบบ

อัลกอริทึมซึ่งควบคุมพื้นที่ครอบคลุมนั้น มีลักษณะการทำงาน 3 แบบด้วยกันคือ แบบรวมศูนย์กลาง (centralized) แบบกระจายตัว (distributed) และแบบเฉพาะที่ (localized) สำหรับลักษณะการทำงานแบบ distributed และแบบ localized นั้นมีกระบวนการตัดสินใจต่างๆเกิดขึ้นที่แต่ละเซ็นเซอร์โหนดเอง ซึ่งจะอาศัยเพียงข้อมูลจากโหนดใกล้เคียงเท่านั้น เช่น ในรัศมีจำนวนฮอป (hop) ระยะหนึ่งๆ การออกแบบการทำงานของอัลกอริทึมที่มีการทำงานแบบ distributed และแบบ localized นั้นมีความเหมาะสมสำหรับโหนดจำนวนมากได้ดีเช่นกันปัญหาเรื่องพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์นั้นมีหลายด้านด้วยกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่ที่สนใจ (แบบทั้งพื้นที่ แบบเฉพาะจุด หรือแบบขวางกัน) และเงื่อนไขการออกแบบดังนี้

- วิธีการจัดวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์ (sensor deployment method) เช่น เป็นการระบุตำแหน่งแบบแน่นอน (deterministic) หรือแบบสุ่ม (random) โดยการระบุตำแหน่งเซ็นเซอร์แบบแน่นอนนั้นอาจเหมาะสมในสถานการณ์ที่เซ็นเซอร์ถูกวางในสิ่งแวดล้อมที่ง่ายต่อการเข้าถึง ส่วนการจัดวางตำแหน่งเซ็นเซอร์แบบสุ่มนั้นมักใช้ในการประยุกต์ใช้งานทางทหาร หรือในสิ่งแวดล้อมที่ยากต่อการเข้าถึง
- ระยะทางในการสื่อสารและตรวจรู้ (communication and sensing range) เซ็นเซอร์โหนดในระบบ WASN นั้นอาจมีรัศมีในการตรวจรู้เหมือนกันหรือแตกต่างกัน อีกปัจจัยหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเชื่อมต่อ (connectivity) คือรัศมีการสื่อสารซึ่งอาจจะไม่จำเป็นต้องเท่ากับรัศมีการตรวจรู้ก็เป็นได้
- ปัจจัยที่สำคัญอื่นๆ เช่น การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและความสามารถในการรักษาการเชื่อมต่อในพื้นที่ครอบคลุม (connectivity)
- ลักษณะการทำงานของอัลกอริทึม เช่น แบบรวมศูนย์กลาง แบบกระจายตัว หรือแบบเฉพาะที่

- จุดมุ่งหมายของปัญหา เช่นการยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานที่สุด หรือการใช้จำนวนเซ็นเซอร์น้อยที่สุด

ตารางที่ 1.1 และ 1.2 นั้น ได้จำแนกงานวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับปัญหาพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์ไว้ตามเงื่อนไขทั้ง 5 ประการที่กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 1.1 วิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์

วิธีการ	ลักษณะพื้นที่ครอบคลุม	จุดมุ่งหมายของปัญหา
Most Constrained-Minimally Constraining Heuristic [2]	ทั้งพื้นที่	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานโดยลดจำนวนของโหนดที่ทำงาน
Disjoint Dominating Sets Heuristic [3]	ทั้งพื้นที่	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานโดยลดจำนวนของโหนดที่ทำงาน
Node Self-Scheduling Algorithm [4]	ทั้งพื้นที่	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานโดยลดจำนวนของโหนดที่ทำงาน
Probing-based Density Control Algorithm [5]	ทั้งพื้นที่	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานที่สุดโดยควบคุมความหนาแน่นของโหนดที่ทำงาน
Optimal Geographical Density Control (OGDC) Algorithm [6]	ทั้งพื้นที่	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานที่สุดโดยลดจำนวนของโหนดที่ทำงาน
Coverage Configuration Protocol (CCP) [7]	ทั้งพื้นที่	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานที่สุดโดยลดจำนวนของโหนดที่ทำงาน
Connected Dominating Setbased Coverage [8]	ทั้งพื้นที่	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานที่สุดโดยลดจำนวนของโหนดที่ทำงาน
Node Placement Algorithms [9]	ทั้งพื้นที่ และแบบเฉพาะจุด	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การเชื่อมต่อและการจัดวางตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ให้น้อยที่สุด

ตารางที่ 1.1 วิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์ (ต่อ)

วิธีการ	ลักษณะพื้นที่ครอบคลุม	จุดมุ่งหมายของปัญหา
Disjoint Set Cover Heuristic [10]	แบบเฉพาะจุด	การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานเครือข่ายให้ยาวนานที่สุดโดยลดจำนวนของโหนดที่ทำงาน
Maximal Breach Path and Maximal Sup-Port Path Algorithms [11]	แบบขวางกัน	หาเส้นทางที่ให้พื้นที่ครอบคลุมแบบขวางกันที่ดีที่สุดและแย่ที่สุด
Maximal Support Path Algorithm [12]	แบบขวางกัน	หาเส้นทางที่ให้พื้นที่ครอบคลุมแบบขวางกันที่ดีที่สุด
Node Density-based Coverage [13]	แบบขวางกัน	หาความหนาแน่นวิกฤตของโหนดซึ่งทำให้สามารถตรวจพบการบุกรุกได้เกือบ 100%
Minimum Exposure Path Algorithm [14]	แบบขวางกัน	หาเส้นทางที่ทำให้มีพื้นที่เจาะเข้าถึงได้น้อยที่สุด
Critical Node Density for Complete Cover-age in the Exposure Model [15]	แบบขวางกัน	หาความหนาแน่นวิกฤตของโหนดที่ให้ความน่าจะเป็นในการตรวจพบเป้าหมายสูงที่สุด

ตารางที่ 1.2 ลักษณะของวิธีการต่างๆในตารางที่ 1.1

อัลกอริธึม	การระบุตำแหน่งของเซ็นเซอร์	รัศมีการตรวจรู้ R_s , รัศมีการสื่อสาร R_c		ลักษณะของอัลกอริธึม
		R_s เท่ากัน	$R_s = R_c$	
[2]	แบบสุ่ม	ใช่	-	แบบรวมศูนย์กลาง
[3]	แบบสุ่ม	ใช่	-	แบบรวมศูนย์กลาง
[4]	แบบสุ่ม	มีทั้งใช่และไม่ใช่	-	แบบกระจายตัว, แบบเฉพาะที่
[5]	แบบสุ่ม	ใช่	-	แบบกระจายตัว, แบบเฉพาะที่
[6]	แบบสุ่ม	ใช่	ไม่ใช่	แบบกระจายตัว, แบบเฉพาะที่
[7]	แบบสุ่ม	ใช่	ไม่ใช่	แบบกระจายตัว, แบบเฉพาะที่
[8]	แบบสุ่ม	ใช่	ใช่	แบบกระจายตัว, แบบเฉพาะที่
[9]	แบบกระจายตัว	ใช่	ใช่	แบบรวมศูนย์กลาง
[10]	แบบสุ่ม	ใช่	-	แบบรวมศูนย์กลาง

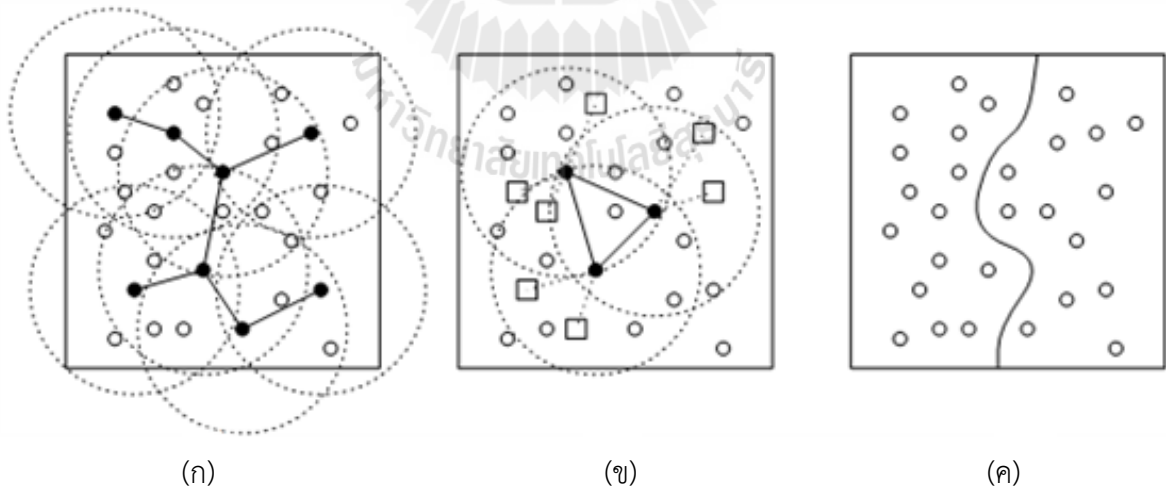
ตารางที่ 1.2 ลักษณะของวิธีการต่างๆในตารางที่ 1.1 (ต่อ)

อัลกอริธึม	การระบุตำแหน่ง ของเซ็นเซอร์	รัศมีการตรวจรู้ R_s , รัศมีการสื่อสาร R_c		ลักษณะของ อัลกอริธึม
		R_s เท่ากัน	$R_s = R_c$	
[11]	แบบสุ่ม	-	-	แบบรวมศูนย์กลาง
[12]	แบบสุ่ม	-	-	แบบกระจายตัว, แบบเฉพาะที่
[13]	แบบสุ่ม	-	-	แบบรวมศูนย์กลาง
[14]	แบบสุ่ม	-	-	แบบรวมศูนย์กลาง
[15]	แบบสุ่ม	-	-	แบบรวมศูนย์กลาง

1.2.1 การครอบคลุมแบบทั้งพื้นที่ (Area Coverage)

ปัญหาที่ศึกษากันมากที่สุดคือปัญหาการครอบคลุมแบบทั้งพื้นที่ของ WASN รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างการวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์เพื่อครอบคลุมพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสหนึ่งๆ โดยจุดสีดำแสดงเซ็นเซอร์โหนด ที่ทำงานอันเป็นผลมาจากกลไก scheduling

งานวิจัยดังต่อไปนี้เป็นงานซึ่งพิจารณาปัญหาการหาพื้นที่ที่ครอบคลุมในลักษณะต่างๆ ตลอดจนการตั้งปัญหา การตั้งแบบจำลอง และสมมติฐานของงานเหล่านี้



รูปที่ 1.1 การวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์เพื่อการครอบคลุม

(ก) แบบทั้งพื้นที่ (ข) แบบเฉพาะจุด (ค) แบบขวางกัน

1.2.1.1 พื้นที่ครอบคลุมที่วางโหนดแบบสุ่ม ที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Energy-efficient random coverage)

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นหัวข้อที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ของ WASN อันเนื่องมาจากพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีอย่างจำกัด กลไกต่างๆในระบบ จึงจำเป็นต้องสงวนพลังงานอย่างยิ่งเพราะมีผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานเครือข่าย โดยทั่วไปแล้วอายุการใช้งานเครือข่ายมักนิยามโดยใช้ระยะเวลาที่เครือข่ายสามารถทำงานตรวจสอบและส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐาน (sink) ได้ โดยในระยะเวลาดังกล่าวโหนดบางตัวอาจเสียหายหรือหมดพลังงานลง หรืออาจมีโหนดใหม่ถูกวางแทนที่ กลไกที่นิยมใช้กันเพื่อสงวนพลังงานในระบบได้แก่การทำ scheduling ซึ่งจะกำหนดเวลาที่เซ็นเซอร์โหนดหนึ่งๆทำงาน (active mode) เพื่อให้เซ็นเซอร์โหนดตัวอื่นๆเข้าสู่โหมดหลับ (sleep mode) ได้บ่อยและยาวนานที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในการออกแบบกลไกการทำ scheduling นี้ จำต้องคำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ควรใช้กฎเกณฑ์ในการกำหนดว่าโหนดใดควรที่จะเข้าสู่โหมดหลับ
2. เซ็นเซอร์โหนดจะเข้าสู่โหมดหลับเมื่อใด
3. เมื่อเข้าสู่โหมดหลับแล้ว เซ็นเซอร์โหนดจะสามารถอยู่ในโหมดนี้นานเท่าใด

งานวิจัยที่ [2] และ [3] ได้พัฒนาระบบ WASNs ที่มีเซ็นเซอร์โหนดจำนวนมาก โดยจัดวางตำแหน่งเซ็นเซอร์แบบสุ่มในพื้นที่เฝ้าระวัง จุดประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อให้ได้มาซึ่งพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเพิ่มจำนวนเซ็นเซอร์โหนดจนกระทั่งมีจำนวนมากกว่าจำนวนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำการเฝ้าระวังในพื้นที่ งานวิจัยเหล่านี้เสนอให้แบ่งเซ็นเซอร์ออกเป็นเซตย่อยที่ไม่มีสมาชิกร่วมกัน โดยที่เซ็นเซอร์โหนดแต่ละเซตจะทำงานในลักษณะที่แยกจากกัน หากเซ็นเซอร์โหนดในเซตหนึ่งทำงาน เซ็นเซอร์โหนดทุกตัวในเซตอื่นๆจะเข้าสู่โหมดหลับซึ่งใช้พลังงานต่ำ จุดมุ่งหมายหลักคือการหาจำนวนเซตที่ไม่มีสมาชิกร่วมกันให้ได้จำนวนมากที่สุด ซึ่งจะสามารถยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายได้นานที่สุด งานวิจัยเหล่านี้มีลักษณะการทำงานแบบศูนย์กลาง งานวิจัยที่ [2] ได้จำลองพื้นที่เฝ้าระวังให้อยู่ในรูปแบบของลำดับของสนาม ซึ่งแต่ละสนามมีคุณสมบัติที่จำเป็นคือทุกจุดในสนามจะต้องถูกครอบคลุมด้วยเซ็นเซอร์โหนดเซตเดียวกัน อัลกอริธึมใน [2] จะคำนวณเซตที่ไม่มีสมาชิกร่วมกันเป็นลำดับโดยเลือกเซ็นเซอร์ที่ครอบคลุมพื้นที่ที่วิกฤต (คือ พื้นที่ที่ถูกครอบคลุมด้วยเซ็นเซอร์จำนวนน้อยที่สุด) และให้ลำดับความสำคัญแก่เซ็นเซอร์โหนดที่ครอบคลุมจำนวนสนามที่ยังไม่มีเซ็นเซอร์ใดครอบคลุม หรือเซ็นเซอร์โหนดที่ครอบคลุมสนามที่ถูกครอบคลุมเพียงบางส่วน และสนามที่ไม่ถูกครอบคลุมแบบซ้ำเติม ส่วนงานวิจัยที่ [3] นั้นได้จำลองเซตที่ไม่มีสมาชิกร่วมกันด้วยเซตโดดเด่นที่

ไม่มีสมาชิกร่วมกัน (disjoint dominating set) และงานจำลองบนคอมพิวเตอร์พบว่าจำนวนเซตที่ได้มีจำนวนมากกว่าจำนวนเซตที่มาจาก [2] ประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่าด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นที่ซ้ำซ้อนน้อยกว่า 5%

กลไกการทำ scheduling ที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นอีกกลไกหนึ่งถูกนำเสนอในงานวิจัยที่ [4] กลไกนี้มีลักษณะการทำงานแบบกระจายตัวและแบบเฉพาะที่ โดยพิจารณาว่าพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์โหนดหนึ่งๆจะถูกครอบคลุมด้วยเซ็นเซอร์โหนดในบริเวณใกล้เคียงได้หรือไม่ ทั้งนี้พิจารณาจากรัศมีการตรวจรู้และตำแหน่งการวางตัวของเซ็นเซอร์โหนด โดยใช้การแบ่งเวลาการทำงานของโหนดออกเป็นรอบๆ แต่ละรอบมีสองเฟส (phase) ได้แก่ เฟสการตรวจรู้ (sensing phase) และการจัดการการทำงานด้วยตัวเอง (self-scheduling phase) ซึ่งโหนดจะตรวจสอบว่าตนเข้าเกณฑ์ที่จะเข้าสู่โหมดหลับหรือไม่ ถ้าหากโหนดนั้นเข้าเกณฑ์ก็จะทำการปิดหน่วยประมวลผลสื่อสารและตรวจรู้ในขณะที่โหนดอื่นจะทำหน้าที่แทนในเฟสตรวจรู้ ในการนี้โหนดแต่ละตัวจำเป็นต้องมีข้อมูลของโหนดในบริเวณใกล้เคียง โดยที่โหนดแต่ละตัวจะทำการแพร่กระจาย (broadcast) ข้อความที่ระบุตำแหน่ง และหมายเลขประจำตัวของตนในตอนเริ่มต้นรอบการทำ scheduling ในแต่ละรอบ เพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่โหนดหลายตัวในบริเวณใกล้เคียงกันเข้าสู่โหมดหลับพร้อมๆ กันซึ่งก่อให้เกิดจุดบอด (blind point) โหนดทุกตัวจะต้องอาศัยวิธีการรอเวลาอย่างสุ่ม (random back-off scheme) ซึ่งจะทำให้โหนดทุกตัวที่เข้าเกณฑ์ที่จะเข้าสู่โหมดหลับทำการแพร่กระจายข้อความหลังจากที่รอมานี้แล้วด้วยระยะเวลาที่สุ่มมาค่าหนึ่งก่อน และก่อนที่โหนดหนึ่งๆจะหลับ จะต้องฟังข้อความตอบรับจากโหนดข้างเคียงด้วยระยะเวลา T_w อีกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ [4] นี้ไม่ได้ระบุถึงกลไกซิงโครไนซ์ (synchronizing mechanism) ที่ใช้ และเป็นเพียงงานวิจัยต่อยอดมาจากโปรโตคอล LEACH ใน [16] ผลการทดลองพบว่างาน [4] นี้สามารถยืดหยุ่นระบบได้ถึง 1.7 เท่าตัว

กลไกการทำ scheduling อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ควบคุมพื้นที่ครอบคลุมอย่างประหยัดพลังงาน ได้แก่งานวิจัยที่ [5] ในกลไกนี้ เซ็นเซอร์โหนดทุกตัวมีรัศมีการตรวจรู้และการสื่อสารเท่ากันทุกโหนด และพื้นที่ครอบคลุมนั้นถูกกำหนดโดยอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่เซ็นเซอร์ทำการตรวจรู้ต่อขนาดของเครือข่ายทั้งหมด เกณฑ์การเข้าสู่โหมดหลับถูกกำหนดโดยกลไกการโพรบ (probing mechanism) โดยเซ็นเซอร์โหนดจะแพร่กระจายข้อความ PRB ไปยังโหนดอื่นๆในพิสัย r หากโหนดอื่นได้รับข้อความนี้ก็จะทำการส่งข้อความ PRB_RPY กลับมา ถ้าหากโหนดที่ส่ง PRB ได้รับข้อความ PRB_RPY มาอย่างน้อยหนึ่งข้อความ โหนดนั้นก็จะเข้าสู่โหมดหลับ พิสัยการส่งข้อความนั้นจะพิจารณาตามความหนาแน่นตามต้องการของโหนดที่ทำงานอยู่ (จำนวนเซ็นเซอร์โหนดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) หรือตามความต้องการในการ

จัดพื้นที่ครอบคลุมซ้ำซ้อน ส่วนระยะเวลาในการอยู่ในโหมดหลับนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาพักจากการตรวจรู้ที่ผ่อนผันได้ (tolerable sensing intermittence) กลไกในงาน [5] นี้มีลักษณะการทำงานแบบกระจายตัว, แบบเฉพาะที่ และมีความซับซ้อนต่ำ แต่ก็ไม่ได้ส่งวนระดับพื้นที่ครอบคลุมดั้งเดิมไว้แต่อย่างใด

1.2.1.2 ความสามารถในการเชื่อมต่อในพื้นที่ครอบคลุมแบบสุ่ม (Connected random coverage)

การเชื่อมโยงภายในเครือข่ายจะเกิดขึ้นเมื่อเซ็นเซอร์โหนดที่ทำงานอยู่สามารถสื่อสารกับโหนดอื่นๆ ที่ทำงานอยู่ได้โดยอาจใช้โหนดอื่นเป็นรีเลย์ (relay) การเชื่อมโยงภายในเครือข่ายทำให้ข้อมูลที่ต้องการถูกส่งจากเซ็นเซอร์โหนดกลับไปยัง sink ได้ จุดมุ่งหมายของปัญหาเรื่องการเชื่อมต่อที่พบบ่อยได้แก่ การหาจำนวนเซ็นเซอร์โหนดที่ทำงานจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถคงพื้นที่ครอบคลุมและความสามารถในการเชื่อมต่อในระบบและยืดอายุการใช้งานเครือข่าย

งานวิจัยใน [6] ได้สรุปว่ามีรัศมีการสื่อสาร R_c ควรเป็นสองเท่าของรัศมีการตรวจสอบ R_s จึงจะครอบคลุมพื้นที่แบบคอนเว็กซ์ (convex area) โดยสมบูรณ์ หาก R_c มีค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดที่สูงมาก โด่งานวิจัยนี้ได้เสนอกลไกการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมแบบกระจายตัวและแบบเฉพาะที่ที่เรียกว่า optimal geographical density control หรือ OGDC ซึ่งมีการทำงานเป็นรอบ โดยแต่ละรอบทุกโหนดจะมีสถานะที่ยังไม่ชัดเจน (undecided) ซึ่งจะเปลี่ยนเป็น เปิด (on) หรือ ปิด (off) เมื่อมีการแลกเปลี่ยนข้อความแจ้งสถานะจากโหนดอื่นๆ เมื่อโหนดหนึ่งได้รับข้อความดังกล่าวก็จะทำการเชื่อว่าโหนดที่ส่งข้อความแจ้งสถานะเปิดนั้นอยู่ในพื้นที่ของตนหรือไม่ ถ้าหากว่าอยู่ โหนดที่ได้รับข้อความก็จะเปลี่ยนเป็นสถานะปิดทันที

งานวิจัยใน [7] แสดงให้เห็นว่าเมื่อรัศมีการสื่อสาร R_c เป็นสองเท่าของรัศมีการตรวจสอบ R_s แล้วจะได้พื้นที่ที่มีระดับ k (k -coverage) โดยในพื้นที่หนึ่งๆ จะถูกเรียกว่ามีระดับการครอบคลุมระดับ k เมื่อพื้นที่นั้นๆ ถูกครอบคลุมโดยเซ็นเซอร์โหนดอย่างน้อย k ตัว

1.2.1.3 การครอบคลุมพื้นที่ที่วางโหนดแบบระบุตำแหน่ง (Deterministic coverage)

ในงานวิจัยที่ [9] ได้พิจารณาปัญหาเรื่องการจัดวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์โหนดแบบแน่นอน โดยวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์จำนวนน้อยที่สุดเพื่อครอบคลุมพื้นที่ๆ ที่สนใจ โดยสมมุติว่ารัศมีการสื่อสารมีค่าเท่ากับรัศมีการตรวจสอบ พื้นที่ครอบคลุมที่เป็นผลเฉลยมีรูปร่างที่ประกอบไปด้วยแนวของพื้นที่ครอบคลุมแต่ละโหนดที่มีรัศมี r วางเรียงต่อกันเป็นแถวในแนวขวาง โดยระยะห่างระหว่างพื้นที่แต่ละ

โหนดเป็น r และแต่ละแถวห่างกันด้วยระยะเท่ากับ $r(1 + \sqrt{3}/2)$ จากนั้นก็มีการเพิ่มแถวระหว่างแถวเดิมเพื่อเชื่อมแถวเหล่านี้เข้าด้วยกัน

1.2.1.4 การประมาณพื้นที่ครอบคลุมจากพื้นที่ของโหนด (Node coverage as approximation)

ในสถานการณ์ที่มีเครือข่ายเซ็นเซอร์ขนาดใหญ่และหนาแน่นถูกวางอย่างสุ่มในพื้นที่ขนาดใหญ่ ขนาดพื้นที่ที่ครอบคลุมนั้นอาจประมาณการได้จากพื้นที่ครอบคลุมของตำแหน่งของเซ็นเซอร์โหนดดังในงานวิจัยที่ [8] ที่ใช้วิธีการ connected dominating set หรือ CDS ซึ่งเป็นวิธีการที่มีลักษณะการทำงานแบบกระจายตัวและแบบเฉพาะที่ วิธีการนี้เลือกสรรโหนดขึ้นเป็นโหนดครอบคลุมพื้นที่หนึ่งๆ ถ้าในพื้นที่ดังกล่าวมีโหนด 2 ตัวที่ยังไม่สามารถติดต่อกันได้ และเพื่อลดจำนวนโหนดครอบคลุมลง วิธีการ CDS นี้ก็ใช้กระบวนการคัดเลือกโหนดออก (pruning process) เพื่อลดจำนวนโหนดในขณะที่ยังคงรักษาคุณสมบัติ CDS ได้ โดยโหนดครอบคลุมโหนดหนึ่งจะถูกคัดออกเมื่อโหนดนั้นมีโหนดข้างเคียงที่อยู่ในพื้นที่ของโหนดครอบคลุมโหนดอื่นอีก k ตัวอยู่แล้ว

1.2.2 การครอบคลุมพื้นที่แบบเฉพาะจุด (Point coverage)

สำหรับปัญหาการหาพื้นที่ครอบคลุมแบบจุดนั้น จุดประสงค์ของปัญหาคือ การหาวิธีที่จะครอบคลุมเซตของจุดดังแสดงในรูปที่ 1.1 ข โดยในรูปมีการวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์โหนดอย่างสุ่มเพื่อครอบคลุมพื้นที่ของเซตของจุด (สี่เหลี่ยม) โดยโหนดสีดำเป็นโหนดที่ถูกเลือกให้ทำงาน ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกทำ scheduling

1.2.2.1 พื้นที่ครอบคลุมแบบจุดที่วางโหนดแบบสุ่ม (random point coverage)

การครอบคลุมพื้นที่ในลักษณะนี้มักใช้ในการประยุกต์ใช้งานทางทหาร ซึ่งพิจารณาจำนวนจุด (เป้าหมาย) ที่ทราบตำแหน่งและต้องการให้มีการแผ่ระวังเป้าหมายเหล่านี้ [10] ในสถานการณ์นี้มีการใช้เซ็นเซอร์โหนดจำนวนมาก และวางตำแหน่งกระจายอย่างสุ่มในบริเวณใกล้เคียงกับเป้าหมาย โดยเป้าหมายแต่ละจุดจะต้องมีเซ็นเซอร์โหนดอย่างน้อยหนึ่งตัวคอยแผ่ระวังและส่งข้อมูลกลับไปยังโหนดประมวลผลกลาง

วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานเครือข่ายและสงวนพลังงานซึ่งถูกนำเสนอในงานวิจัย [10] คือวิธีการแบ่งเซตของเซ็นเซอร์ออกเป็นเซตย่อยๆที่ไม่มีสมาชิกร่วมกัน (disjoint set) โดยเซ็นเซอร์โหนดในแต่ละเซตจะต้องครอบคลุมเป้าหมายได้ครบทุกจุด เซตย่อยเหล่านี้จะถูกกำหนดให้ทำงานในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยจะมีเซตที่ทำงานในแต่ละช่วงขณะเพียงเซตเดียว ดังนั้นจุดมุ่งหมายของ

วิธีการนี้จึงเป็นการหาจำนวน disjoint set จำนวนมากที่สุดเพื่อที่จะทำให้ระยะเวลาการทำงานของเซตเหล่านี้ห่างกันมากที่สุด ฉะนั้นเมื่อลดสัดส่วนเวลาการอยู่ในโหมดทำงานของเซ็นเซอร์หนึ่งลงได้ อายุการใช้งานของเซ็นเซอร์โหนดก็จะยืดออกไปตามสัดส่วนที่แปรผันตรงกับจำนวน disjoint set

1.2.2.2 พื้นที่ครอบคลุมแบบจุดที่ระบุตำแหน่งโหนดแบบแน่นอน (Deterministic point coverage)

งานวิจัยที่ [9] พิจารณาการวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่แน่นอนซึ่งสามารถกระทำได้ในสภาพแวดล้อมที่มีการเชื่อมต่อและเข้าถึงได้ง่าย จุดมุ่งหมายของปัญหานี้ก็คือ ถ้าหากมีจุดที่ต้องการครอบคลุมอยู่ n จุดด้วยกัน จะมีวิธีการที่จะหาจำนวนเซ็นเซอร์โหนดจำนวนน้อยที่สุด และตำแหน่งของเซ็นเซอร์โหนดเหล่านั้นอย่างไรเพื่อที่จะครอบคลุมทั้ง n จุดตามต้องการ และทุกโหนดนั้นเชื่อมต่อกันด้วย งานวิจัยนี้พิจารณากรณีที่รัศมีการสื่อสารมีค่าเท่ากับรัศมีการตรวจรู้ และวิธีการที่เสนอนั้นใช้การหา minimum spanning tree บนจุดที่ต้องการ n จุด และเลือกเซ็นเซอร์โหนดบนจุดยอด (vertex) หรือขอบ (edge) ซึ่งทำให้ได้พื้นที่และการเชื่อมต่อตามความต้องการ

1.2.3 การครอบคลุมพื้นที่แบบขวางกั้น (Barrier Coverage)

สำหรับปัญหาพื้นที่ครอบคลุมแบบขวางกั้น มักมีจุดมุ่งหมายที่จะลดความน่าจะเป็นที่พลาดการตรวจพบการบุกรุกผ่านแนวเซ็นเซอร์ขวางกั้น รูปที่ 1 ค แสดงพื้นที่ครอบคลุมของเซ็นเซอร์โหนดแบบขวางกั้น โดยเส้นทางขวางกั้นเริ่มที่จุดล่างสุด และสิ้นสุดที่จุดบนสุดของพื้นที่ โดยเส้นทางที่เลือกใช้มักพิจารณาจากจุดมุ่งหมายของปัญหาที่พิจารณา เช่น ในงานวิจัยที่ [11] นำเสนอวิธีการหาเส้นทางที่ทำให้เกิดการทะลุแนวขวางกั้นได้ง่ายที่สุด (maximal breach path หรือ MBP) ซึ่งเป็นเส้นทางที่แย่มากที่สุด และเส้นทางที่ทำให้เกิดการตั้งแนวรับที่ดีที่สุด (maximal support path หรือ MSP) ซึ่งเป็นเส้นทางที่ดีที่สุด โดยวิธีการดังกล่าวตั้งสมมุติฐานไว้ว่าเซ็นเซอร์โหนดทุกตัวมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ และทราบตำแหน่งที่แน่นอนของเซ็นเซอร์โหนดผ่านระบบ GPS

1.3 การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมในระบบหลายตัวกระทำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการแผ่รังสีพื้นที่ครอบคลุมแบบทั้งพื้นที่ (Area coverage) ทั้งนี้เพื่อสนับสนุนความร่วมมือระหว่างเซ็นเซอร์โหนดในการทำงานแผ่รังสีในพื้นที่ครอบคลุมของระบบ WASN ระบบหลายตัวกระทำ (multi-agent systems หรือ MAS) จึงถูกนำมาใช้ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อรับมือกับข้อจำกัดของแหล่งพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายด้วยการสร้างความร่วมมือระหว่างเซ็นเซอร์

โหนดอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้รับประโยชน์สูงสุดร่วมกัน งานวิจัย [17], [18] และ [19] แสดงให้เห็นว่าความร่วมมือระหว่างเซ็นเซอร์โหนดในพื้นที่สนใจเดียวกันสามารถทำได้โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบกระจาย (distributed learning algorithm) ภายใต้การกระจายข้อมูลของฟังก์ชันมูลค่า (value function) ระหว่างเอเจนต์ โดยทั่วไปแต่ละเอเจนต์จะได้รับผลการตัดสินใจที่ร่วมมือโดยการแลกเปลี่ยนมูลค่าของสถานะที่แต่ละเอเจนต์เป็นอยู่กับเอเจนต์ข้างเคียง

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอถึงวิธีควบคุมพื้นที่ครอบคลุมซึ่งไม่ต้องอาศัยการคำนวณหรือข้อมูลด้านกายภาพใดๆมากนักเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายประเภทนี้ ได้แก่ กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินท์ฟอร์สเมนต์ (reinforcement learning หรือ RL) [20], [21] ซึ่งเป็นวิธีการที่นำมาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพในการร่วมมือของเซ็นเซอร์โหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย RL ใช้สำหรับนิยามปัญหาที่ว่าผู้เรียนรู้จะกระทำตัวหรือมีการตัดสินใจให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดอย่างไรภายใต้การลองผิดลองถูก (trial and error) ด้วยการโต้ตอบการกระทำกับสิ่งแวดล้อมและเรียนรู้ผลจากการกระทำนั้นเพื่อนำไปปรับปรุงนโยบายของตนให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ วิถีหาผลเฉลยในกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินท์ฟอร์สเมนต์คือวิธีที่เรียกว่า วิธีการเรียนรู้แบบคิว (Q-learning) เป็นวิธีที่ใช้การประมาณค่าจากฟังก์ชันมูลค่าการกระทำที่ดีที่สุด (optimal action-value function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่อธิบายถึงการเลือกการกระทำที่เหมาะสมกับสถานะที่เป็นอยู่ได้อย่างไร

วิธีการควบคุมและปรับเปลี่ยนพื้นที่ครอบคลุมแบบกระจายได้ด้วยตัวเอง (distributed self-adaptive coverage control) กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากมีความเหมาะสมกับคุณลักษณะของเครือข่าย WSNs ที่มีการกระจายตัวของเซ็นเซอร์โหนดไปในพื้นที่บริเวณกว้างและมีสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งยากต่อการดูแลควบคุมด้วยมือ งานวิจัยที่ [18] ได้นำเสนอวิธีควบคุมพื้นที่ครอบคลุมด้วยการใช้กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินท์ฟอร์สเมนต์ แบบหลายตัวกระทำ (multi-agent reinforcement learning หรือ MARL) ซึ่งเป็นวิธีการเรียนรู้แบบกระจายตัวที่เรียกว่า วิถีทางฟังก์ชันมูลค่าแบบกระจายตัว (Distributed Value Function algorithm หรือ DVF algorithm) เมื่อกำหนดให้เซ็นเซอร์โหนดในเครือข่ายทำหน้าที่เป็นเอเจนต์ โดยเอเจนต์เหล่านี้จะร่วมมือกันเพื่อบรรลุเป้าหมายเดียวกัน นั่นคือการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมให้มากที่สุดและลดการใช้พลังงานในเครือข่าย อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างพิจารณาระบบเป็นสิ่งแวดล้อมที่เกื้อกูลกัน แต่ด้วยทรัพยากรด้านพลังงานที่จำกัดของเซ็นเซอร์อาจส่งผลให้เซ็นเซอร์มีพฤติกรรมที่เห็นแก่ตัวโดยลดการรับส่งข้อมูลกับโหนดอื่นๆลง [22,23] เซ็นเซอร์โหนดอาจถูกโจมตีจากโหนดประสงค์ร้ายจากภายในหรือภายนอกเครือข่าย ซึ่งการโจมตีดังกล่าวส่งผลให้อายุการใช้งานเครือข่ายลดลง

ดังนั้นในรายงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปในการพัฒนาการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ไม่ซับซ้อนและทำงานอย่างกระจายตัวและยังสามารถป้องกันการโจมตีในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ โดยมีวัตถุประสงค์คือ การเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมต่อหน่วยพลังงานที่ถูกใช้ไปให้มากที่สุดสำหรับสิ่งแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการถูกโจมตีจากโหนดที่เป็นอันตรายงานวิจัยนี้เสนอวิธีการของการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้การเรียนรู้แบบมัลติเอเจนต์หรืออินฟอร์สเมนที่เรียกว่า วิธีทางฟังก์ชันมูลค่าแบบกระจายตัว ร่วมกับโปรโตคอลรักษารูปร่างเครือข่ายที่ปลอดภัย (a secure topology maintenance protocol หรือ TMP)[24] เพื่อที่จะได้กลยุทธ์การจัดการพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยและใกล้เคียงกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธีการที่นำเสนอถูกออกแบบให้โหนดหนึ่ง ๆ ทำการตัดสินใจ โดยพิจารณาข้อมูลจากโหนดข้างเคียงหลายโหนด เพื่อรับมือกับข้อมูลที่ผิดพลาดจากโหนดที่เป็นอันตราย



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมในระบบหลายตัวกระทำสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (wireless sensor networks หรือ WSNs) ซึ่งเป็นการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ไม่ซับซ้อนและทำงานอย่างกระจายตัวและยังสามารถป้องกันการโจมตีในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์จะกำหนดปัญหาให้เป็นกระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ (Markov decision process หรือ MDP) ด้วยการระบุปัญหาว่า ระบบที่มีสิ่งแวดล้อมแบบพลวัตจะสามารถเรียนรู้นโยบายในการเลือกการกระทำที่ดีที่สุดเพื่อให้บรรลุเป้าหมายได้อย่างไร ในกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์นั้นจะมองปัญหาในรูปแบบของผู้เรียนสามารถเรียนรู้พฤติกรรมที่ดีจากการลองผิดลองถูกซึ่งเป็นการเลือก การกระทำ และสังเกตผลจากการกระทำที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมแบบพลวัตงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการของการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้การเรียนรู้แบบมัลติเอเจนต์รีอินฟอร์สเมนต์ร่วมกับโปรโตคอลรักษารูปร่างเครือข่าย เพื่อที่จะได้กลยุทธ์การจัดการพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยและใกล้เคียงกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด

หัวข้อถัดไปจะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ และกล่าวแนะนำกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ในหัวข้อที่ 2.3 ในหัวข้อ 2.4 จะกล่าวแนะนำวิธีการเรียนรู้แบบคิวในระบบหลายตัวกระทำและกล่าวแนะนำกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ในรูปแบบการกระจายในหัวข้อที่ 2.5 และกล่าวสรุปเนื้อหาในบทนี้ในหัวข้อสุดท้าย

2.2 พื้นฐานทฤษฎีการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ

2.2.1 คุณสมบัติมาร์คอฟ

คุณสมบัติมาร์คอฟกล่าวว่าทุกสิ่งที่เกิดขึ้นในระยะยาวเป็นผลสืบเนื่องมาจากสถานะปัจจุบัน ดังนั้นความน่าจะเป็นของสถานะถัดไป ณ เวลา $k+1$ สามารถนิยามได้โดยใช้เงื่อนไขอย่างง่ายภายใต้ข้อมูลที่ทราบจากสถานะปัจจุบัน ณ เวลา k ดังนี้

$$\Pr\{s_{k+1} = s' | s_k = s\} = \Pr\{s_{k+1} = s' | s_k = s, s_{k-1} = s, \dots, s_0 = s\}. \quad (2.1)$$

โดยรายงานฉบับนี้จะประยุกต์ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ด้วยการกำหนดปัญหาให้มีคุณสมบัติสอดคล้องกับคุณสมบัติมาร์คอฟ สถานะของผู้เรียนอธิบายถึงข้อมูลของสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจ ถ้าสถานะของผู้เรียนมีคุณสมบัติมาร์คอฟจะทำให้การตอบสนองของสิ่งแวดล้อมที่เวลา $k+1$ ขึ้นอยู่กับผลที่เกิดจากสถานะปัจจุบันที่เวลา k ซึ่งเรียกสถานะเช่นนี้ว่า สถานะมาร์คอฟ (Markov state)

2.2.2 กระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ

กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ที่มีสิ่งแวดล้อมที่สอดคล้องกับคุณสมบัติมาร์คอฟถูกเรียกว่า กระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ (Markov decision process หรือ MDP) สมมติให้เวลาปัจจุบันคือ ช่วงเวลา k ซึ่งมีสถานะจากสิ่งแวดล้อม s ผู้เรียนจะเลือกการกระทำ a ผลที่ได้รับจากการเลือกการกระทำ a ณ สถานะ s คือการตอบสนองจากสิ่งแวดล้อมทำให้ได้สถานะใหม่เป็น s' ดังนั้นความน่าจะเป็นในการเกิดสถานะใหม่ที่เป็นไปได้ คือ

$$P_{ss'}^a = \Pr\{s_{k+1} = s' | s_k = s, a_k = a\}. \quad (2.2)$$

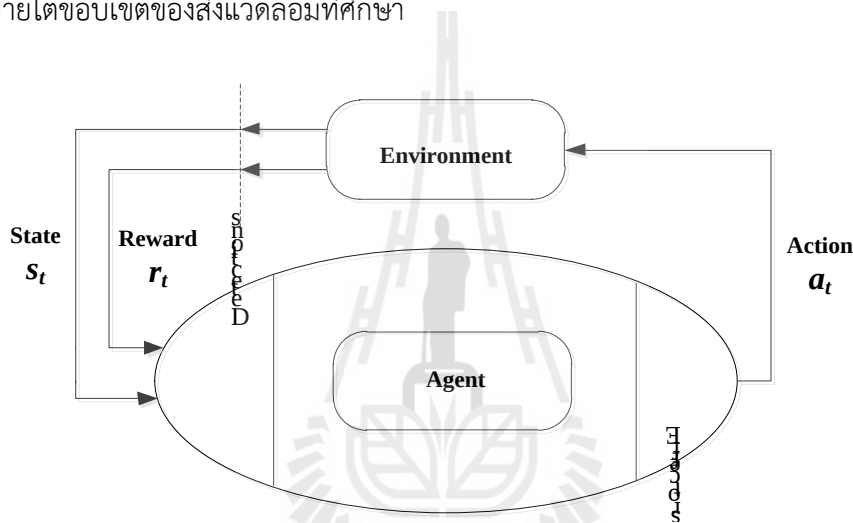
สมการนี้ถูกเรียกว่า ความน่าจะเป็นในการส่งสถานะ (transition probabilities) สมมติให้สถานะและการกระทำ ณ เวลาปัจจุบันคือ s_k และ a_k และสถานะใหม่ที่เกิดขึ้นคือ s_{k+1} ส่งผลให้ได้รับค่าตอบแทน g_k ซึ่งเป็นค่าที่ได้รับจากการกระทำของผู้เรียน ค่าคาดหวัง (The expected value) ของผลตอบแทนถัดไปคือ

$$G_{ss'}^a = E\{g_k | s_k = s, a_k = a, s_{k+1} = s'\} \quad (2.3)$$

เมื่อผู้เรียนได้รับผลตอบแทนจากสมการนี้แล้ว ผู้เรียนจะสามารถเรียนรู้เพื่อหาการกระทำที่ดีและปรับปรุงกระบวนการตัดสินใจเพื่อให้ได้รับผลตอบแทนสูงสุดระยะยาว

2.3 กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์

กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์เป็นวิธีการคำนวณด้วยการกำหนดให้ระบบที่มีสิ่งแวดล้อมแบบพลวัตสามารถเรียนรู้เพื่อเลือกการกระทำที่ส่งผลให้ผู้เรียนบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ ผู้เรียน (The learner) จะมีกลไกการเรียนรู้โดยจะไม่สามารถระบุอย่างชัดเจนว่าการกระทำไหนควรเลือกแต่จะค้นหาการกระทำที่เหมาะสมจากการกระทำที่ให้ผลตอบแทนมากที่สุดซึ่งได้มาจากการลองผิดลองถูกภายใต้ขอบเขตของสิ่งแวดล้อมที่ศึกษา



รูปที่ 2.1 แผนผังการกระทำโต้ตอบระหว่างผู้เรียนและสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์

รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงแนวทางการเรียนรู้ในกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์เพื่อหาผลเฉลยจากปัญหาที่ซับซ้อนด้วยการเรียนรู้จากการกระทำโต้ตอบระหว่างผู้เรียนและสิ่งแวดล้อมซ้ำไปซ้ำมา เมื่อ เอเจนต์หมายถึงผู้เรียน (learner) หรือผู้ตัดสินใจ (decision maker) ทุกสิ่งนอกเหนือเอเจนต์ถูกกำหนดให้เป็นสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไป การกระทำใช้นิยามถึงการตัดสินใจของผู้เรียน ในขณะที่สถานะหมายถึงข้อมูลที่ทราบจากสิ่งแวดล้อมซึ่งใช้ประกอบการตัดสินใจของผู้เรียน

เป้าหมายหลักของผู้เรียนคือการหานโยบาย π ซึ่งเป็นการจับคู่ระหว่างสถานะและการกระทำที่ให้ผลตอบแทนระยะยาวสูงสุด รูปแบบมาตรฐานของกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์คือ ผู้เรียนจะพยายามเลือก การกระทำ จากชุดของการกระทำที่เป็นไปได้ทั้งหมด ณ สภาพแวดล้อมปัจจุบัน จากนั้น การกระทำที่ถูกเลือก จะส่งผลให้สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงและผู้เรียนก็จะได้

ผลตอบแทน ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าการกระทำดังกล่าวส่งผลให้สภาพแวดล้อมเปลี่ยนไปในทิศทางใด กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ประกอบด้วยปัจจัยพื้นฐานสามอย่างคือ สิ่งแวดล้อม, ฟังก์ชันรีอินฟอร์สเมนต์ และฟังก์ชันมูลค่า (value function)

1) สิ่งแวดล้อม

ในระบบการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์จะเรียนรู้การจับคู่จากสถานะไปยังการกระทำด้วยการสุ่มทดลองการกระทำโต้ตอบ (interactions) กับสิ่งแวดล้อมแบบพลวัต สิ่งแวดล้อมเหล่านี้จะถูกเฝ้าสังเกตจากกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ด้วยการสังเกตจากค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์, สัญลักษณ์ หรือ จากสถานการณ์ที่ผิดปกติ ถ้ากระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์สามารถสังเกตรายละเอียดต่างๆของสิ่งแวดล้อมที่สนใจได้ดีเยี่ยมจะส่งผลให้กระบวนการนี้สามารถเลือกการกระทำที่เหมาะสมกับสถานะจริงที่เกิดขึ้นได้ แนวคิดนี้จึงเป็นแนวคิดพื้นฐานที่ดีที่สุดของกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังต้องอาศัยปัจจัยที่จำเป็นต่อการเรียนรู้เพื่อการจับคู่ที่เหมาะสมตามทฤษฎีดังกล่าว

2) ฟังก์ชันรีอินฟอร์สเมนต์

จากที่กล่าวมาข้างต้น ระบบที่มีการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ซึ่งทำการจับคู่จากสถานะไปยังการกระทำด้วยการทดลองสุ่มการกระทำโต้ตอบกับสิ่งแวดล้อม โดยเป้าหมายของกระบวนการเรียนรู้คือการใช้นโยบายของฟังก์ชันรีอินฟอร์สเมนต์ซึ่งเป็นฟังก์ชันจริงของการเสริมกำลังในอนาคต (future reinforcements) ของผู้เรียนเพื่อค้นหาการกระทำที่ให้ผลตอบแทนระยะยาวสูงสุด โดยหลังจากการเลือก การกระทำ ที่ สถานะปัจจุบัน แล้วผู้เรียนจะได้รับ ผลตอบแทน (reward) ในรูปแบบของปริมาณเชิงตัวเลข ผู้เรียนจะเรียนรู้การกระทำที่ให้ผลตอบแทนระยะยาวสูงสุด

3) ฟังก์ชันมูลค่า

กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์เป็นกระบวนการเรียนรู้ภายใต้ฟังก์ชันประมาณมูลค่า (estimating value function) ฟังก์ชันมูลค่านี้ใช้สำหรับคาดการณ์ผลรวมของผลตอบแทนที่ได้รับจากสถานะ s เนื่องจากผลตอบแทนที่เอเจนต์จะได้รับในอนาคตขึ้นอยู่กับกระทำที่ถูกเลือกไป ดังนั้นฟังก์ชันมูลค่าของสถานะใดๆภายใต้นโยบาย π จึงถูกนิยามด้วย

$$\begin{aligned}
V^\pi(s) &= E^\pi[R_t | s_t = s] \\
&= E^\pi[\sum_{k=0}^{\infty} \beta^k r_{t+k+1} | s_t = s]
\end{aligned} \tag{2.4}$$

ดังนั้นฟังก์ชันมูลค่าการกระทำ (action-value function) ซึ่งให้นโยบาย π สำหรับทุกคู่ สถานะ-การกระทำ (state-action pairs) ด้วยการคาดเดาผลตอบแทนที่จะได้รับการเลือกการกระทำ a ที่สถานะ s ณ เวลา t ซึ่งเป็นไปตามนโยบาย π คือ

$$\begin{aligned}
Q^\pi(s, a) &= E^\pi[R_t | s_t = s, a_t = a] \\
&= E^\pi[\sum_{k=0}^{\infty} \beta^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a]
\end{aligned} \tag{2.5}$$

4) วิธีการเรียนรู้แบบคิว

วิธีการเรียนรู้แบบคิว (Q-learning) เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้หาผลเฉลยของกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ที่มีตัวกระทำเดียว โดยเอเจนต์ที่มีมูลค่าคิว (Q-value) เริ่มต้นที่เวลา 0 หลังจากเอเจนต์เลือกการกระทำ a_t ที่สถานะ s_t เอเจนต์จะได้รับผลตอบแทน r_{t+1} และสถานะถัดไป s_{t+1} มูลค่าคิวค่าใหม่จะถูกอัปเดตที่เวลา $t+1$ ดังนี้

$$Q_{t+1}(s, a) = (1 - \alpha)Q_t(s, a) + \alpha[r + \beta \max_{a'} Q_t(s', a')], \tag{2.6}$$

เมื่อ $\alpha \in [0, 1)$ คืออัตราการเรียนรู้ เป้าหมายหลักของเอเจนต์คือการหานโยบายซึ่งเป็นการจับคู่ระหว่างสถานะและการกระทำที่ให้ผลตอบแทนระยะยาวสูงสุด รูปแบบมาตรฐานของกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์คือ ผู้เรียนจะพยายามเลือก การกระทำ จากชุดของการกระทำที่เป็นไปได้ทั้งหมด ณ สภาพแวดล้อมปัจจุบัน จากนั้น การกระทำที่ถูกเลือก จะส่งผลให้สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงและผู้เรียนก็จะได้รับ ผลตอบแทน ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าการกระทำดังกล่าวส่งผลให้สภาพแวดล้อมเปลี่ยนไปในทิศทางใด

2.4 วิธีการเรียนรู้แบบคิวในรูปแบบหลายตัวกระทำ

ในระบบหลายตัวกระทำ (Multi-agent system) ต่างจากระบบตัวกระทำเดียวในด้านของการมีตัวกระทำอื่นๆ ที่เรียนรู้นโยบายและผลจากการกระทำของทุกตัวกระทำจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นนโยบายที่ดีที่สุดจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวกระทำเดียวแต่ขึ้นกับทุกๆ ตัวที่กระทำในระบบบางงานวิจัยได้ทำ

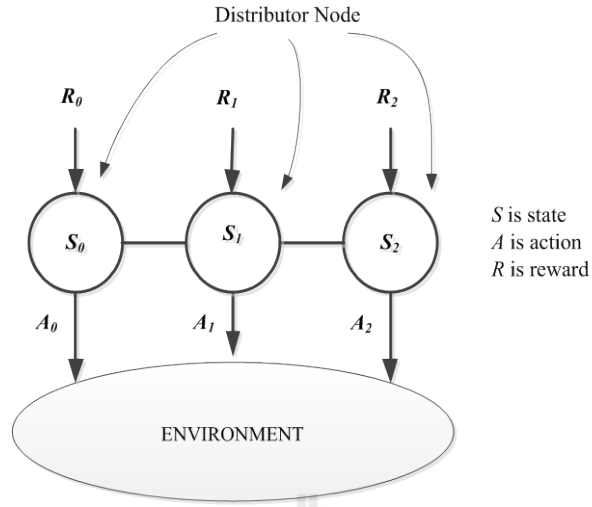
การประยุกต์ใช้วิธีการเรียนรู้แบบคิวในระบบหลายตัวกระทำเมื่อแต่ละเอเจนต์จะเลือกการกระทำที่ให้ผลประโยชน์สูงสุดแก่ตนเองโดยไม่ได้พิจารณาถึงการกระทำของเอเจนต์อื่นๆที่เหลือ ซึ่งผลที่ได้จากการกระทำเช่นนี้อาจทำให้เอเจนต์ไม่ได้รับนโยบายที่ดีที่สุดก็เป็นได้ ดังนั้นแต่ละเอเจนต์ควรคำนึงถึงผลกระทบจากการเลือกการกระทำของเอเจนต์อื่นๆมาใช้ประกอบการตัดสินใจเพื่อให้ได้นโยบายที่เหมาะสมในระบบหลายตัวกระทำ

2.5 กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ในรูปแบบการกระจาย

ในช่วงปีที่ผ่านมา งานวิจัยหลายงานได้พยายามขยายองค์ความรู้ของกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์และวิธีการเรียนรู้แบบคิวเป็นการเรียนรู้แบบกระจาย(distributed system) เมื่อชุดสถานะ และ(หรือ) การกระทำ มีขนาดใหญ่ขึ้น กระบวนการเรียนรู้แบบกระจายจึงถูกพิจารณาเนื่องจากวิธีการนี้มีการประมวลผลเพื่อหานโยบายได้รวดเร็วขึ้น

1) *Distributed value function*

กระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ที่มีการเรียนรู้แบบกระจาย(distributed reinforcement learning)ภายใต้การกระจายข้อมูลเกี่ยวกับฟังก์ชันมูลค่าระหว่างเซ็นเซอร์โหนด แต่ละโหนดในระบบจะรู้สถานะของตน และเลือกการกระทำ และได้รับผลตอบแทน (จุดมุ่งหมายคือทุกโหนดจะได้รับผลตอบแทนสะสมสูงสุดตลอดเวลา)อย่างไรก็ตามแต่ละโหนดจะต้องประมาณค่าฟังก์ชันมูลค่าของโหนดข้างเคียงจากสถานะที่ผ่านมาด้วย โดยกฎของการเรียนรู้ฟังก์ชันมูลค่านี้คือ การใช้ข้อมูลที่มีอยู่ในการเรียนรู้ฟังก์ชันมูลค่าซึ่งเป็นการประมาณค่าของค่าผลตอบแทนในอนาคตสะสมของทุกโหนดในเครือข่าย ด้วยแนวคิดเช่นนี้ แต่ละโหนดจะสามารถเลือกการกระทำเพื่อปรับปรุงนโยบายของตนให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการได้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเครือข่ายที่มีการเรียนรู้แบบกระจายตัว ซึ่งแสดงโดยโหนดในการกำหนดปัญหา เป็นกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์ที่มีการเรียนรู้แบบกระจาย เมื่อ สถานะ ถูกพบจึงทำการเลือกการกระทำโต้ตอบและได้รับผลตอบแทนหลังจากการเลือกการกระทำนั้น

2) Distributed value function (DVF) algorithm

โดยทั่วไปในระบบหลายตัวกระทำ (multi-agent system หรือ MAS) เอเจนต์จะรู้ข้อมูลสถานะแบบเจาะจงเท่านั้น โดยแต่ละโหนดจะคำนวณฟังก์ชันมูลค่าของตนภายใต้ข้อมูลจำเพาะ(local information) ที่ได้มาเท่านั้น ดังนั้นวิธี DVF เอเจนต์จะส่งเพียงค่าประมาณของสถานะปัจจุบันที่ตนอยู่เท่านั้น นั่นคือค่า สำหรับเอเจนต์ i ที่เวลา t ในแต่ละช่วงเวลาของการเลือกการกระทำโต้ตอบระหว่างกัน การอัปเดตค่า Q ณ เวลา t ของเอเจนต์ i สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q_{t+1}^i(s_t^i, a_t^i) = (1 - \alpha)Q_t^i(s_t^i, a_t^i) + \alpha(r_{t+1}^i(s_{t+1}^i) + \gamma \sum_{j \in \text{Neigh}(i)} f^j(j)V_t^j(s_{t+1}^j)) \quad (2.7)$$

$$V_{t+1}^i(s_t^i) = \max_{a \in A^i} Q_{t+1}^i(s_t^i, a) \quad (2.8)$$

เมื่อ α คืออัตราการเรียนรู้ $f^j(j)$ คือค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันมูลค่าจากโหนดข้างเคียงของเอเจนต์ i ซึ่งจะได้ว่า

$$f^j(j) = \begin{cases} \frac{1}{|\text{Neigh}(i)|} & , \text{if } \text{Neigh}(i) \neq \emptyset \\ 1 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.9)$$

เมื่อ $j \in \text{Neigh}(i)$ คือโหนดข้างเคียงของเอเจนต์ i

2.6 สรุป

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึงแนวคิดของกระบวนการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ การแนะนำแนวคิดของกระบวนการเรียนรู้แบบรีอินฟอร์สเมนต์เพื่อหาผลเฉลยของปัญหาที่มีการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ และกระบวนการเรียนรู้แบบคิวในระบบหลายตัวกระทำที่เรียกว่า วิธีทางฟังก์ชันมูลค่าแบบกระจาย (Distributed Value Function algorithm หรือ DVF) ซึ่งวิธีดังกล่าวถูกนำมาใช้กำหนดวิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมให้มากที่สุดสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่แบบแอตฮอค โดยการพิจารณาความร่วมมือระหว่างเอเจนต์ โดยที่เอเจนต์สามารถกำหนดกลยุทธ์การจัดการพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยและใกล้เคียงกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับบทถัดไปจะเสนอถึงวิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยในระบบหลายตัวกระทำสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีการโจมตีจากโหนดประสงค์ร้าย วิธีทางฟังก์ชันมูลค่าแบบกระจาย และโปรโตคอลรักษารูปร่างเครือข่าย (Topology Maintain Protocol หรือ TMP) จะถูกนำมาใช้ศึกษาการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมและทดสอบประสิทธิภาพภายใต้พฤติกรรมโจมตีของโหนดประสงค์ร้าย



บทที่ 3

การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ที่มีโหนดประสงค์ร้ายในระบบหลายตัวกระทำ

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึงวิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้การเรียนรู้แบบมีลabeledเจเนอรัลอินฟอร์เมชันร่วมกับโปรโตคอลรักษาความปลอดภัย เพื่อที่จะได้กลยุทธ์การจัดการพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยและใกล้เคียงกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธีการที่นำเสนอถูกออกแบบให้โหนดหนึ่ง ๆ ทำการตัดสินใจโดยพิจารณาข้อมูลจากโหนดข้างเคียงหลายโหนด เพื่อรับมือกับข้อมูลที่ผิดพลาดจากโหนดที่เป็นอันตราย

เนื้อหาสำคัญที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ได้แก่

1. กล่าวแนะนำการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมในระบบหลายตัวกระทำ
2. กล่าวถึงสิ่งแวดล้อมที่มีโหนดประสงค์ร้าย
3. การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ปลอดภัยในระบบหลายตัวกระทำ
4. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมด้วยวิธีDVF+TMPเทียบกับวิธีการเลือกเส้นทางที่มีอยู่เดิมอีก ได้แก่ วิธีDVFดั้งเดิม

3.2 การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมในระบบหลายตัวกระทำ

วิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมในระบบหลายตัวกระทำซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันมูลค่าแบบกระจาย (Distributed value function หรือ DVF) เป็นวิธีการทั่วไปในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมที่ผิวนและร่วมมือกันในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย [17,18,25] วิธีการนี้แต่ละโหนดจะ

ติดต่อสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลเกี่ยวกับฟังก์ชันมูลค่าของตัวเอง โดยฟังก์ชันมูลค่าดังกล่าวคือฟังก์ชันที่ใช้กำหนดว่าเอเจนต์จะปฏิบัติตัวอย่างใดเมื่ออยู่ในสถานะ $s \in S$ เมื่อ s คือเซตจำกัดของสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย กำหนดให้ $a \in A$ คือการกระทำที่ถูกเลือกโดยเอเจนต์ เมื่อ A คือเซตจำกัดของการกระทำที่เป็นไปได้ทั้งหมดในแต่ละสถานะที่เกิดขึ้น กฎเกณฑ์หรือนโยบาย π นิยามถึงกฎที่เอเจนต์ใช้เลือกการกระทำจากฟังก์ชันของสถานะ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการจับคู่ของสถานะ $s \in S$ และ $a \in A$ ไปสู่ความน่าจะเป็นในการเลือกการกระทำ a ที่สถานะ s ฟังก์ชันมูลค่าที่สถานะ s ภายใต้การกระทำ a ด้วยนโยบาย π นิยามโดย

$$V^\pi(s) = E^\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \mid s_t = s \right\} \text{ เมื่อ } r_{t+1} \text{ คือผลตอบแทนจากการเลือกการกระทำที่สถานะ } s \text{ ณ}$$

เวลา t γ คือค่าการนับ (discount factor) และ $E^\pi \{ \}$ คือค่าคาดหวัง

ดังนั้นฟังก์ชันมูลค่าการกระทำจากการเลือกการกระทำ a ที่สถานะ s ภายใต้นโยบาย π นิยามโดย $Q^\pi(s, a) = E^\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \mid s_t = s, a_t = a \right\}$ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหานโยบาย π^* เพื่อให้ $\pi^* = \arg \max_{\forall \pi} Q^\pi(s, a)$ เพื่อที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว เอเจนต์แต่ละตัว (โหนด) จะต้องทำการอัปเดตฟังก์ชันมูลค่าการกระทำของตน หลักเกณฑ์ในการอัปเดต ณ ช่วงเวลา t สำหรับเอเจนต์ i แสดงโดย [7]

$$Q_{t+1}^i(s_t^i, a_t^i) = (1 - \alpha) Q_t^i(s_t^i, a) + \alpha \left(r_{t+1}^i(s_{t+1}^i) + \gamma \sum_{j \in \text{Neigh}(i)} f^i(j) V_t^j(s_{t+1}^i) \right) \quad (3.1)$$

$$V_{t+1}^i(s_t^i) = \max_{a \in A^i} Q_{t+1}^i(s_t^i, a), \quad (3.2)$$

เมื่อ α คืออัตราการเรียนรู้ $f^i(j)$ คือค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันมูลค่าที่โหนดข้างเคียงของเอเจนต์ i โดยที่

$$f^i(j) = \begin{cases} \frac{1}{|\text{Neigh}(i)|} & , \text{ if } \text{Neigh}(i) \neq 0 \\ 1 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3.3)$$

เมื่อ $j \in \text{Neigh}(i)$ คือเซตของโหนดข้างเคียงของเอเจนต์ i [18] ดังนั้นภายในกระบวนการ DVF โหนดที่ร่วมมือกันไม่ใช่เพียงแต่โหนดที่อยู่ข้างเคียงแต่หมายถึงทุกๆ โหนดเนื่องมาจากฟังก์ชันมูลค่าที่ต้องใช้ข้อมูลของโหนดอื่นๆ ที่เหลือทั้งหมดในเครือข่ายนั่นเอง ดังนั้นวิธีการ DVF จึงขึ้นอยู่กับความร่วมมือ

จากโหนดอื่นๆในเครือข่ายซึ่งแสดงในเทอมสุดท้ายทางด้านขวาของสมการที่ (3.1) การแลกเปลี่ยนข้อมูล (นั่นคือ ฟังก์ชันมูลค่าของโหนดอื่นๆ) ในวิธีการ DVF จึงเสี่ยงต่อการโจมตีของโหนดประสงค์ร้าย ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวอาจเป็นข้อมูลที่ผิดพลาดได้ ด้วยเหตุนี้รายงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นที่จะปรับปรุงวิธีการ DVF ให้สามารถฟื้นคืนสู่สภาพปกติได้เมื่อเกิดการโจมตีของโหนดประสงค์ร้าย

3.3 สิ่งแวดล้อมที่มีโหนดประสงค์ร้าย

วิธีการ DVF ถูกศึกษาภายใต้สมมติฐานที่ว่า ทุกๆโหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีความร่วมมือกัน [18] ดังนั้น DVF จึงมีความเสี่ยงต่อการโจมตีด้านความปลอดภัยเมื่อโหนดประสงค์ร้ายส่งเมสเสจหลอกหรือเมสเสจที่ผิดพลาดเพื่อทำลายเป้าหมายที่ตั้งไว้ของอัลกอริธึม โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงชนิดของการโจมตีที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย [24] การโจมตีเหล่านี้สามารถลดอายุการใช้งานของเครือข่าย หรือลดการเชื่อมต่อของเครือข่ายและพื้นที่ที่ครอบคลุมได้

การโจมตีแบบไม่ให้หลับ (sleep deprivation attack): การโจมตีประเภทนี้ ฝ่ายตรงข้ามจะพยายามชักจูงให้โหนดในพื้นที่อยู่ในสถานะตื่นตัวตลอดเวลา การโจมตีเช่นนี้จะส่งผลกระทบ 2 ด้านด้วยกัน อย่างแรกจะเป็นการเพิ่มการใช้พลังงานภายในตัวเซ็นเซอร์โหนดซึ่งจะไปลดอายุการใช้งานของเครือข่ายนั่นเอง ผลกระทบถัดมาคือการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความแออัดของข้อมูลและการแข่งขันกันภายในชั้นการเชื่อมต่อข้อมูล (data link layer)

การโจมตีแบบให้หลับ (snooze attack) : การโจมตีประเภทนี้ ฝ่ายตรงข้ามจะชักจูงให้โหนดอยู่ในสถานะหลับ การโจมตีเช่นนี้จะเป็อันตรายต่อการเชื่อมต่อของเครือข่าย หรือเป็นการลดพื้นที่ที่ครอบคลุมในพื้นที่เป้าหมายนั่นเอง

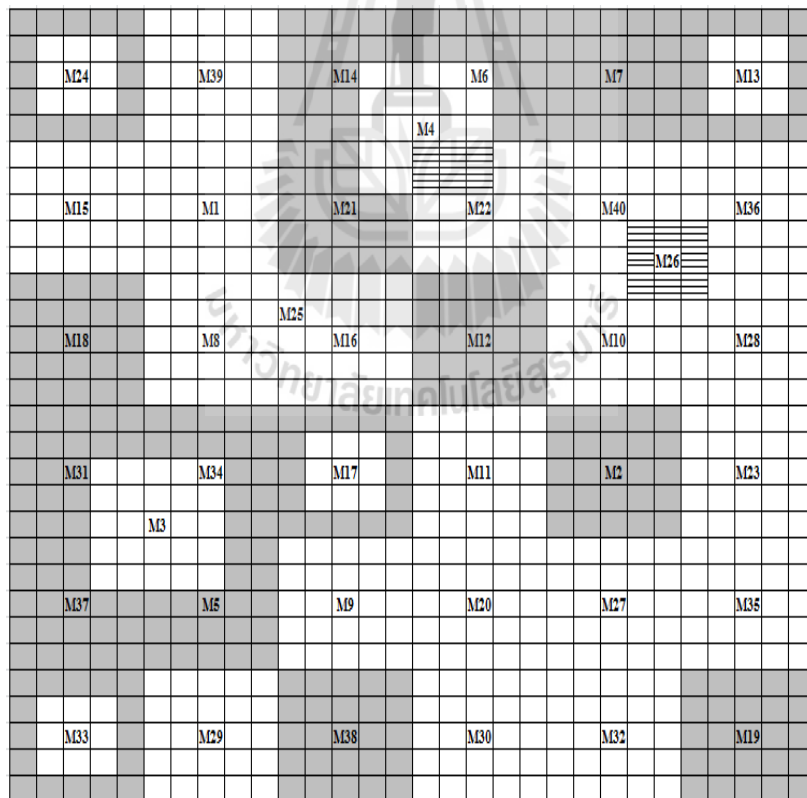
*การโจมตีแบบโดยยึดครองโหนดในเครือข่าย (network substitution attack):*การโจมตีประเภทนี้ฝ่ายตรงข้ามจะวางโหนดบางตัวซึ่งอยู่ในเซตที่คัดเลือกมาจากวิธี TMP เมื่อโหนดเหล่านี้อยู่ภายใต้การควบคุม ฝ่ายตรงข้ามก็จะสามารถโจมตีได้สำเร็จ เช่น การแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ผิดพลาดแก่โหนดอื่นๆ ซึ่งการโจมตีประเภทนี้ยากต่อการตรวจจับเนื่องจากโหนดเหล่านี้สามารถรักษาการเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายและแสดงตัวในสถานะปกติได้

3.4 การควบคุมพื้นที่ครอบคลุมอย่างปลอดภัยในระบบหลายตัวกระทำ

เพื่อให้วิธีการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมแบบ DVF มีความคงทนต่อการโจมตีของโหนดประสงค์ร้ายมากขึ้น กระบวนการโพรบแบบ TMP จึงถูกนำมาผนวกกับวิธี DVF ดังเดิม กลไกการโพรบ

แสดงให้เห็นว่ามีโหนดที่ตื่นตัว (active node) หรือโหนดที่ไม่ตื่นตัว (inactive node) อยู่หรือไม่ในเส้นทางการส่งข้อมูลก่อนการตัดสินใจเลือกการกระทำใดๆ (นั่นคือ การเปลี่ยนขนาดของพื้นที่ครอบคลุม) โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอในรายงานวิจัยฉบับนี้ โหนดหนึ่งๆสามารถทนต่อการโจมตีซึ่งขึ้นอยู่กับ t โหนดภายในระยะการส่งข้อมูลของตน

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเมื่อถูกโจมตี รายงานฉบับนี้จึงเริ่มศึกษาจากการควบคุมแสงสว่างภายในห้องขนาด 30×30 กริด แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งห้องดังกล่าวประกอบด้วยกลุ่มของเอเจนต์ 40 เอเจนต์ถูกวางตัวแบบสุ่ม โดยมีความสามารถในการตรวจจับความสว่างภายในห้อง แสดงโดยสัญลักษณ์ M1 ถึง M40 แต่ละเอเจนต์จะมีตัวกำเนิดแสงซึ่งสามารถให้ความสว่างในส่วนต่างๆของห้องรอบๆเอเจนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เอเจนต์สามารถเรียนรู้เพื่อร่วมมือกันกับเอเจนต์อื่นซึ่งก็คือโหนดประสงค์ร้ายเพื่อให้เกิดแสงสว่างภายในห้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือการลดจำนวนของไฟที่เปิด พื้นที่ของเอเจนต์ i นิยามโดย d^i ซึ่งแสดงถึงพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด 5×5 เซลล์ล้อมรอบเอเจนต์ i



รูปที่ 3.1 พื้นที่ห้องขนาด 30×30 กริด เมื่อพื้นที่สีเทาหมายถึงไม่มีแสงสว่างในพื้นที่ ในขณะที่พื้นที่สีขาวหมายถึงมีแสงสว่างจากโหนด 1 โหนดและพื้นที่ที่เป็นเส้นหมายถึงมีแสงสว่างที่เกิดจากโหนด 2 โหนด

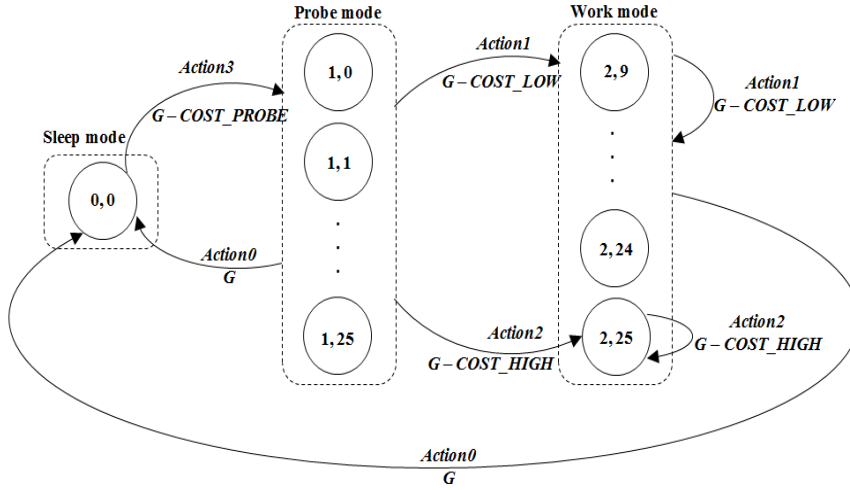
รายงานวิจัยฉบับนี้นิยามโหมดไว้ 3 โหมดสำหรับเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัว นั่นคือ โหมดหลัก โหมดทำงาน และโหมดตรวจสอบ สำหรับโหมดหลักนั้นโหนดต่างๆจะไม่มีการทำงานเกิดขึ้น ในโหมดตรวจสอบโหนดจะทำการตรวจสอบโหนดอื่นๆในระยะการรับส่งข้อมูลว่ามีโหนดใดทำงานอยู่หรือไม่ ก่อนทำการตัดสินใจเลือกการกระทำ ในส่วนของโหมดทำงานนั้นโหนดจะสามารถตัดสินใจเลือกได้ว่าจะเปลี่ยนไปเป็นไม่ทำงาน (เนื่องจากเซลล์ของโหนดเหล่านี้มีแสงสว่างครอบคลุมพื้นที่แล้ว) หรือจะเปลี่ยนพื้นที่ครอบคลุมให้เล็กลงหรือใหญ่ขึ้น

สถานะเฉพาะของเอเจนต์ (Local agent state): แต่ละเอเจนต์ i สามารถตรวจวัดระดับแสงสว่างภายในพื้นที่ของตนได้ สถานะเฉพาะ s^i คือ สถานะของแต่ละเอเจนต์ภายใต้โหมดและพื้นที่ครอบคลุมของเอเจนต์นั้น สถานะของโหมดประกอบด้วย 3 โหมดด้วยกันคือ โหมดทำงาน โหมดหลัก และโหมดตรวจสอบ ในโหมดหลักจะมีสถานะเฉพาะที่เป็นไปได้อยู่ 1 สถานะ (กล่าวคือ ไม่มีเซลล์ใดส่องสว่าง) สำหรับโหมดตรวจสอบและโหมดทำงาน จะมีสถานะที่เป็นไปได้โหนดละ 26 สถานะ ดังนั้น จะมีสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมดในระบบนี้ทั้งสิ้น 53 สถานะ ($1+26+26$) ซึ่งแสดงโดย

$$s^i = (\text{state of mode}, \text{state of coverage}) = (s_m^i, s_c^i),$$

เมื่อ $s_m^i \in \{\text{sleep mode}, \text{probe mode}, \text{work mode}\}$ และ $s_c^i \in \{0, \dots, 25\}$

การกระทำเฉพาะของเอเจนต์ (Local agent actions): แต่ละเอเจนต์ i สามารถเลือกการกระทำจากเซตของการกระทำที่เป็นไปได้ในแต่ละสถานะที่เกิดขึ้น เซตของการกระทำ $A^i = \{\text{การกระทำ } 0 (\text{ปิดไฟ}), \text{การกระทำ } 1 (\text{เปิดไฟด้วยพื้นที่ครอบคลุมต่ำ ซึ่งให้ความสว่าง 9 เซลล์รอบเอเจนต์ แสดงโดย M1, M3 และ M5 ในรูปที่ 3.1}), \text{การกระทำ } 2 (\text{เปิดไฟด้วยพื้นที่ครอบคลุมสูง ซึ่งให้ความสว่าง 25 เซลล์รอบเอเจนต์ แสดงโดย M2 และ M4 ในรูปที่ 3.1}), \text{การกระทำ } 3 (\text{ทำการส่งโปรบไปยังโหนดข้างเคียงและรอผลตอบกลับภายในระยะเวลาจำกัด โดยที่การกระทำนี้อุญาตให้เอเจนต์ตรวจสอบเซลล์ที่ส่องสว่างก่อนการตัดสินใจเลือกการกระทำ } 0, \text{การกระทำ } 1 \text{ หรือ การกระทำ } 2)\}$ เมื่อการกระทำถูกเลือก สถานะเฉพาะปัจจุบันจะถูกส่งไปยังสถานะใหม่ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมการส่งสถานะของกลไกการโพรบในอัลกอริธึม DVF+TMP

กระบวนการเรียนรู้แบบกระจายของวิธี DVF นั้น เอเจนต์จะใช้เพียงข้อมูลเฉพาะที่ได้มาเพื่อใช้ในการตัดสินใจเท่านั้น ผลตอบแทนเฉลี่ยสำหรับเอเจนต์ i นิยามโดย $r^i(s_t^i)$ คือฟังก์ชันสถานะ s^i ของเอเจนต์ i ณ เวลา t นิยามโดย

$$r^i(s_t^i) = G^i(s_t^i) - C^i, \quad (3.4)$$

เมื่อ $G^i(s_t^i)$ คือ ฟังก์ชันของจำนวนเซลล์ที่ส่องสว่างรอบพื้นที่ของเอเจนต์ i เช่น

$$G^i(s_t^i) = nb_cell_bright(a^i) \times GAIN_CELL_BRIGHT, \quad (3.5)$$

และ C^i คือ พลังงานที่ถูกใช้ไป ซึ่งเป็นผลจากการปฏิบัติตามการกระทำที่เลือกโดยเอเจนต์ i ณ เวลา t นิยามโดย

$$C^i = \begin{cases} 0 & , \text{if Action 0 was taken} \\ COST_LOW & , \text{if Action 1 was taken} \\ COST_HIGH & , \text{if Action 2 was taken} \\ COST_PROBE & , \text{if Action 3 was taken.} \end{cases} \quad (3.6)$$

รายงานวิจัยฉบับนี้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบทั้งหมด 4 ด้านด้วยกัน คือ

- 1) ผลตอบแทนเฉลี่ยต่อ 1 ช่วงเวลา นิยามโดย

$$average\ reward = \frac{\sum_{t=0}^T r^i(s_t^i)}{T}, \quad (3.7)$$

- 2) พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไป
- 3) เปอร์เซนต์ของพื้นที่ครอบคลุมจากโหนดที่ดี (โหนดที่ไม่มั่วร้าย) นิยามโดยจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่ส่องสว่างของโหนดที่ดีใน 1 ช่วงเวลาหารด้วยจำนวนของเซลล์ทั้งหมด
- 4) การแลกเปลี่ยน (trade-off) นิยามโดย

$$\text{Trade-off} = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{\forall i} \text{number of lit cells by agent}_i(t)}{\sum_{t=0}^T \sum_{\forall i} \text{energy consumption by agent}_i(t)} \quad (3.8)$$

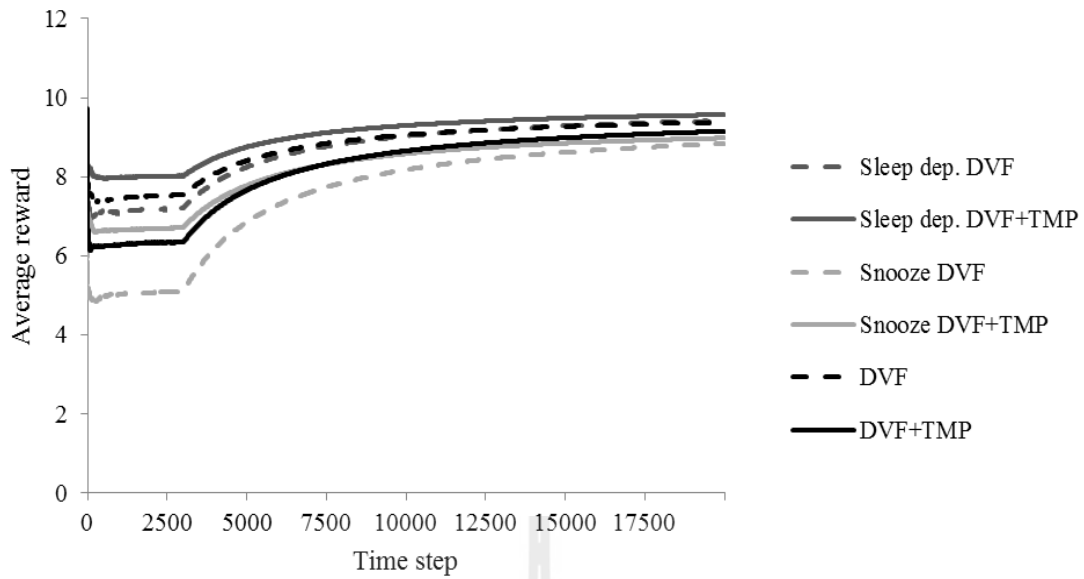
การจำลองระบบในรายงานวิจัยฉบับนี้ สมมุติให้ $GAIN_CELL_BRIGHT = 0.5$, $COST_LOW = 0.8$, $COST_HIGH = 3$, $COST_PROBE = 0.5$ อัตราการสูญเสีย(α) เท่ากับ 0.4 และ $\gamma = 0.7$ จำนวนการทดสอบระบบในแต่ละครั้ง $T=20,000$ ครั้ง และผลจากการจำลองระบบเป็นผลเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบระบบทั้งสิ้น 10 ครั้ง เพื่อให้ได้ความแม่นยำมากที่สุด

3.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

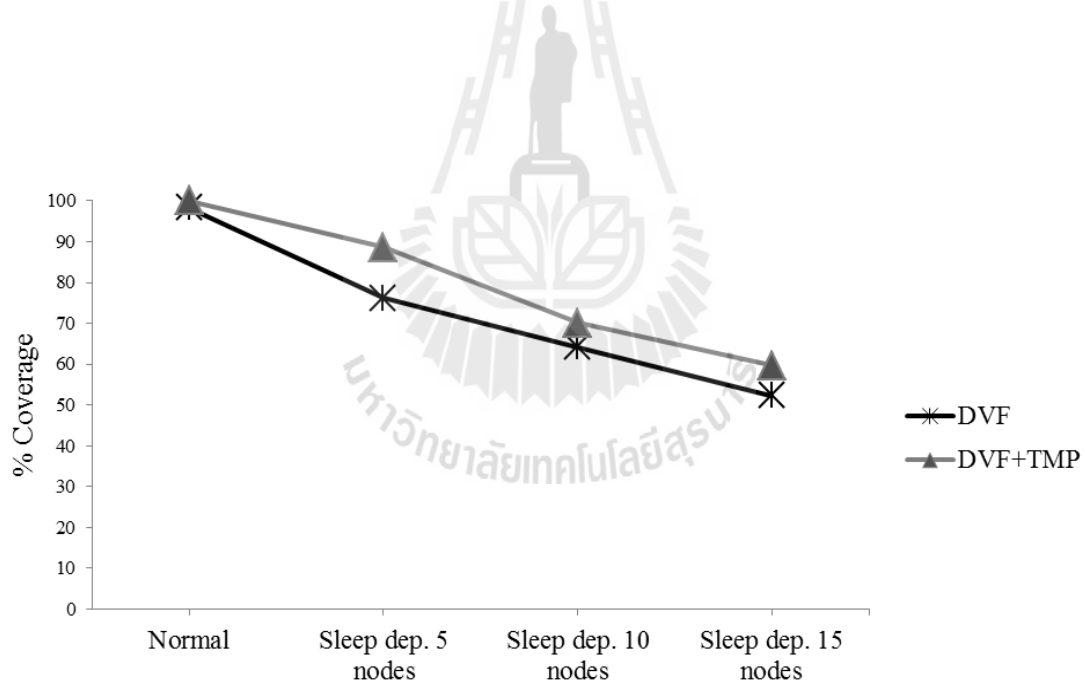
3.5.1 การโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ

กำหนดให้มีการสุ่มโหนด 5, 10 และ 15 โหนด เพื่อให้เป็นโหนดโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ จากนั้นจึงทำการทดสอบและวิเคราะห์ผล โดยที่ n โหนดในสถานะไม่ให้หลับ (n โหนดในสถานะให้หลับ) หมายถึงระบบถูกโจมตีด้วย โหนด n โหนดในสถานะไม่ให้หลับ (ในสถานะให้หลับ) เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลกระทบของโหนดประสงค์ร้ายจึงทำการสังเกตผลจากการจำลองระบบในสถานะปกติ (ไม่มีการโจมตี) รายงานวิจัยฉบับนี้เปรียบเทียบผลจากอัลกอริธึม DVF+TMP กับวิธี DVF ดั้งเดิม

รูปที่ 3.3 แสดงถึงผลการเรียนรู้ในเทอมของผลตอบแทนเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาสำหรับวิธี DVF ดั้งเดิม และวิธี DVF+TMP ภายใต้สถานการณ์ปกติ และสถานการณ์ที่มีโหนด 15 โหนดสำหรับการโจมตีในแต่ละแบบเข้ามาโจมตีระบบ เมื่อเวลาทดสอบสิ้นสุดลงจะเห็นว่าเอเจนต์จากทั้งสองกระบวนการสามารถเรียนรู้เพื่อตัดสินใจได้ดีขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นโดยการเพิ่มขึ้นของผลตอบแทนเฉลี่ยสำหรับทุกสถานการณ์ อย่างไรก็ตามอัลกอริธึมที่นำเสนอแสดงผลได้ดีกว่าวิธีการ DVF ดั้งเดิม



รูปที่ 3.3 ผลตอบแทนเฉลี่ยสำหรับการโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ ในสภาวะที่มีโหนด
ประสงค์ร้าย 15 โหนด และในสภาวะปกติ



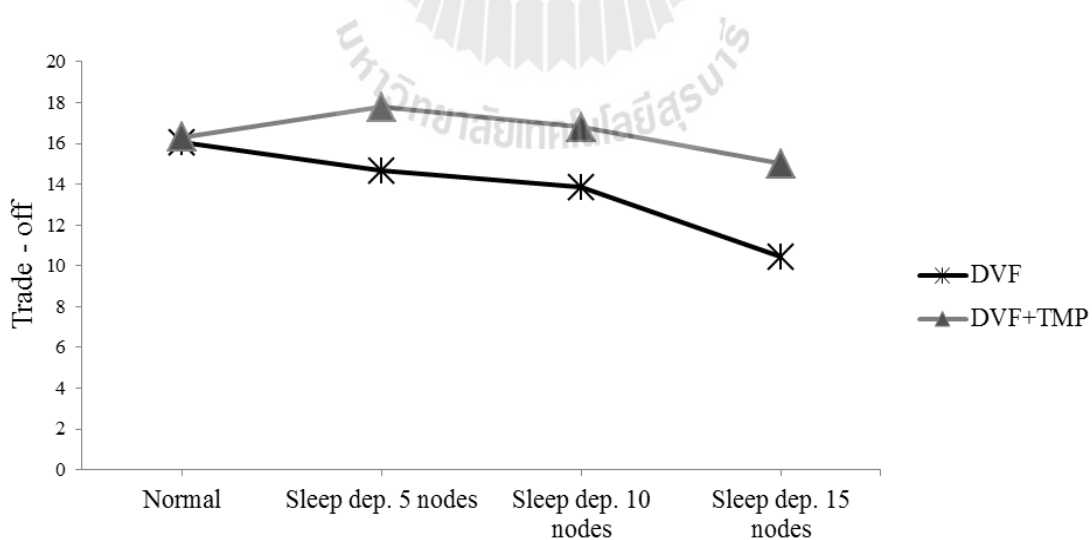
รูปที่ 3.4 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดไม่ให้หลับในรูปของเปอร์เซ็นต์พื้นที่ครอบคลุม

ผลกระทบของพื้นที่ที่ครอบคลุมจากจำนวนของโหนดประสงค์ร้ายแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับการโจมตีแบบไม่ให้หลับ ในสถานการณ์ปกติเมื่อไม่มีโหนดถูกโจมตีจะมีเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ครอบคลุมที่ได้จากวิธี DVF ดั้งเดิมและวิธี DVF+TMP เป็น 98% และ 100% ตามลำดับ และเมื่อระบบถูกโจมตีด้วยโหนดในสภาวะไม่ให้หลับจำนวน 5, 10 และ 15 โหนด เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ครอบคลุมที่ได้จากวิธี DVF

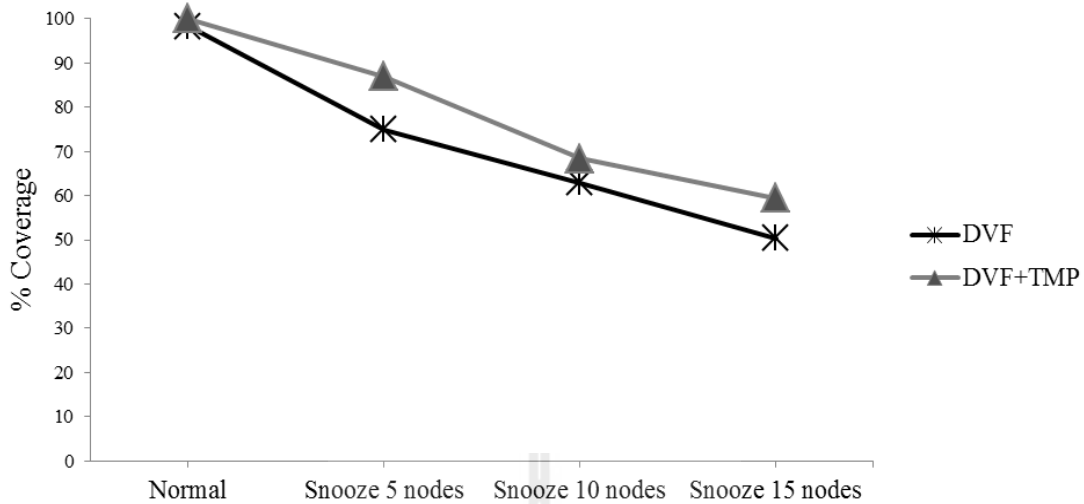
ดั้งเดิมลดลงเหลือ 76%, 64% และ 52% ตามลำดับ ในขณะที่วิธี DVF+TMP ให้ผลที่ดีกว่าโดยมีเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมเป็น 88%, 70% และ 59% ตามลำดับ

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าวิธี DVF+TMP ให้ผลของพื้นที่ครอบคลุมที่ดีกว่าผลที่ได้จากวิธี DVF ดั้งเดิมด้วยการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จึงแสดงผลในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดง การแลกเปลี่ยนในฟังก์ชันของจำนวนโหนดประสงค์ร้าย ผลจากสถานการณ์ปกติพบว่าทั้งสองกระบวนการให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนของโหนดในสถานะไม่ให้หลับเพิ่มมากขึ้น วิธี DVF ดั้งเดิมกลับให้ผลที่น่าสนใจกว่า แม้ว่าวิธี DVF+TMP จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม แต่ก็เป็นการเพิ่มการใช้พลังงานในเครือข่ายด้วย พลังงานที่ถูกใช้ไปเพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมที่กว้างขึ้นจึงทำให้วิธี DVF+TMP มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม

รูปที่ 3.6 แสดงผลกระทบจากการโจมตีแบบให้หลับในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมเมื่อระบบไม่มีการโจมตี เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมที่ได้จากวิธี DVF ดั้งเดิมและวิธี DVF+TMP เป็น 98% และ 100% ตามลำดับ เมื่อจำนวนโหนดประสงค์ร้ายเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมที่ได้จะลดลง ซึ่งวิธี DVF ดั้งเดิมให้ผลเป็น 74%, 62% และ 50% ตามลำดับ ในขณะที่วิธีที่นำเสนอได้ผลเป็น 86%, 68% และ 57% ตามลำดับ โดยที่ก่อนทำการเลือกการกระทำ แต่ละโหนดจะตรวจสอบสถานะของโหนดข้างเคียงโดยใช้กลไกการโพรบของวิธี DVF+TMP ก่อนซึ่งสามารถระบุตัวโหนดประสงค์ร้ายได้ ดังนั้นจึงทำให้วิธีที่นำเสนอให้พื้นที่ครอบคลุมที่สูงกว่าผลของวิธีดั้งเดิม

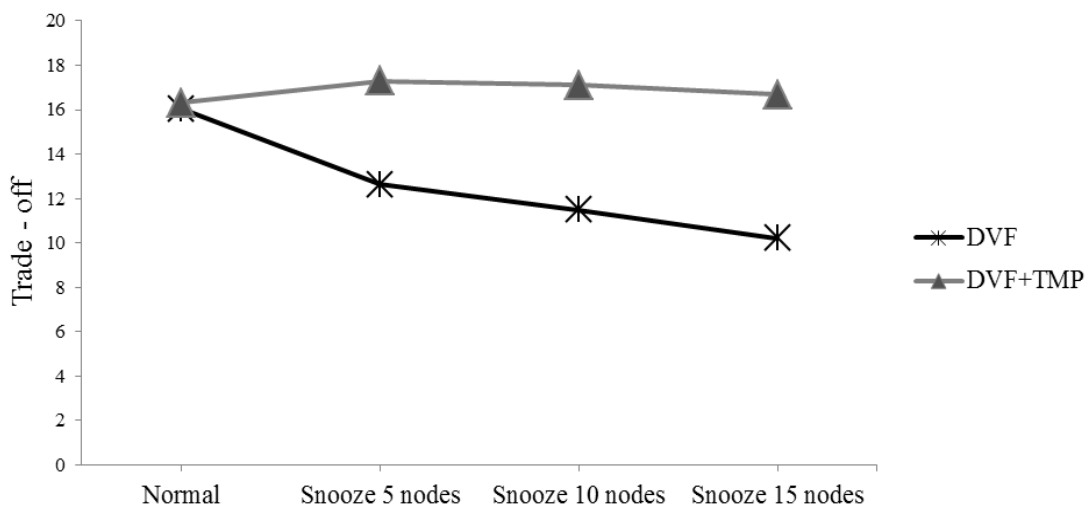


รูปที่ 3.5 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดไม่ให้หลับในรูปของผลจากการแลกเปลี่ยน



รูปที่ 3.6 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดให้หลับในรูปของเปอร์เซ็นต์พื้นที่ครอบคลุม

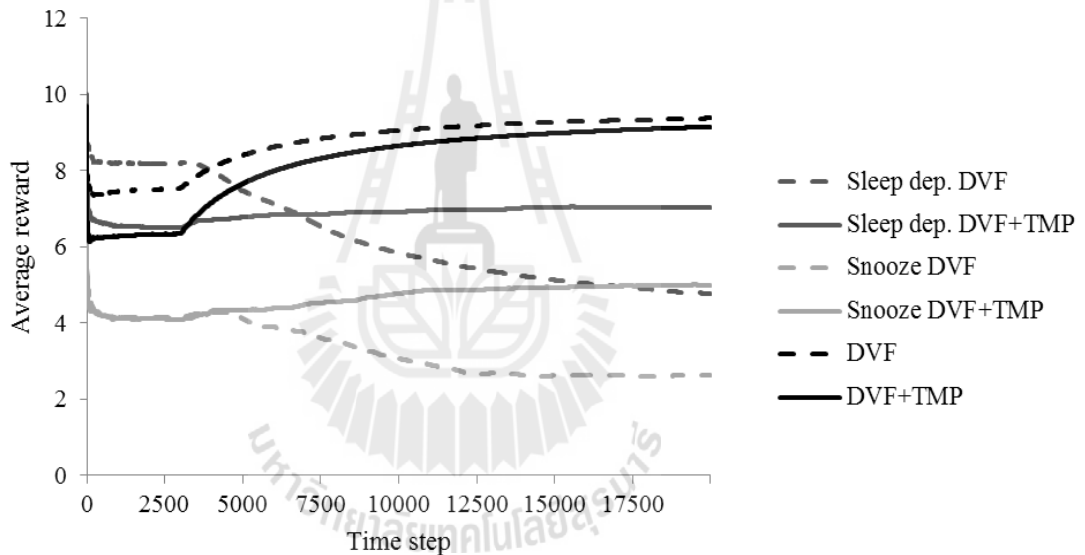
รูปที่ 3.7 แสดงผลการแลกเปลี่ยนซึ่งแสดงในฟังก์ชันของโหนดประสงค์ร้าย จะเห็นว่าเมื่อโหนดในสถานะหลับเพิ่มขึ้น การแลกเปลี่ยนแสดงให้เห็นถึงการบริหารพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นอีกครั้งว่าวิธี DVF ดั้งเดิมมีการลดลงของการแลกเปลี่ยนอย่างรวดเร็วซึ่งให้ผลตรงข้ามกับวิธี DVF+TMP ที่มีการลดลงอย่างช้าๆ ดังนั้นผลจากการโจมตีแบบให้หลับก็แสดงผลเช่นเดียวกับการโจมตีแบบไม่ให้หลับ กล่าวคือ แม้ว่าวิธีที่นำเสนอจะใช้พลังงานสูงกว่าเนื่องมาจากกระบวนการโพรบ แต่สามารถให้พื้นที่ครอบคลุมที่มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม ดังนั้นวิธีที่นำเสนอได้มาด้วยการแลกเปลี่ยนที่ดีกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม



รูปที่ 3.7 ผลกระทบจากจำนวนของโหนดให้หลับในรูปของผลจากการแลกเปลี่ยน

3.5.2 การโจมตีแบบยึดครองโหนดในเครือข่าย

ในหัวข้อนี้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของทั้งสองอัลกอริทึมในแง่ของการโจมตีแบบยึดครองโหนดในเครือข่าย ภายใต้การโจมตีเช่นนี้ โหนดประสงค์ร้ายยังคงรักษาเส้นทางการเชื่อมต่อและมีการทำงานที่เป็นปกติ อย่างไรก็ตามเมื่อโหนดเหล่านี้ถูกควบคุมโดยศัตรู มันสามารถทำให้เกิดการโจมตีแบบอื่นๆได้ เช่น การแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ผิดพลาดให้กับโหนดอื่นๆ ในการทดลองนี้จะสมมติว่าโหนดที่เป็นอันตรายจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ผิดพลาดให้โหนดอื่น โดยมีระดับความผิดพลาดถูกระบุเข้าไปในฟังก์ชันมูลค่าในเทอมสุดท้ายของสมการที่ (3.1) นั่นคือพารามิเตอร์ ξ ด้วยการสุ่มค่าจากช่วง $[1-\xi_{\max}, 1+\xi_{\max}]$ เมื่อ $\xi_{\max}$ เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 0.25 ถึง 1, 5 และ 10 จำนวนของโหนดโจมตีจะถูกสุ่มขึ้นมาและผลที่ได้รับเกิดจากค่าเฉลี่ยของจำนวนเอเจนต์ทั้งหมด

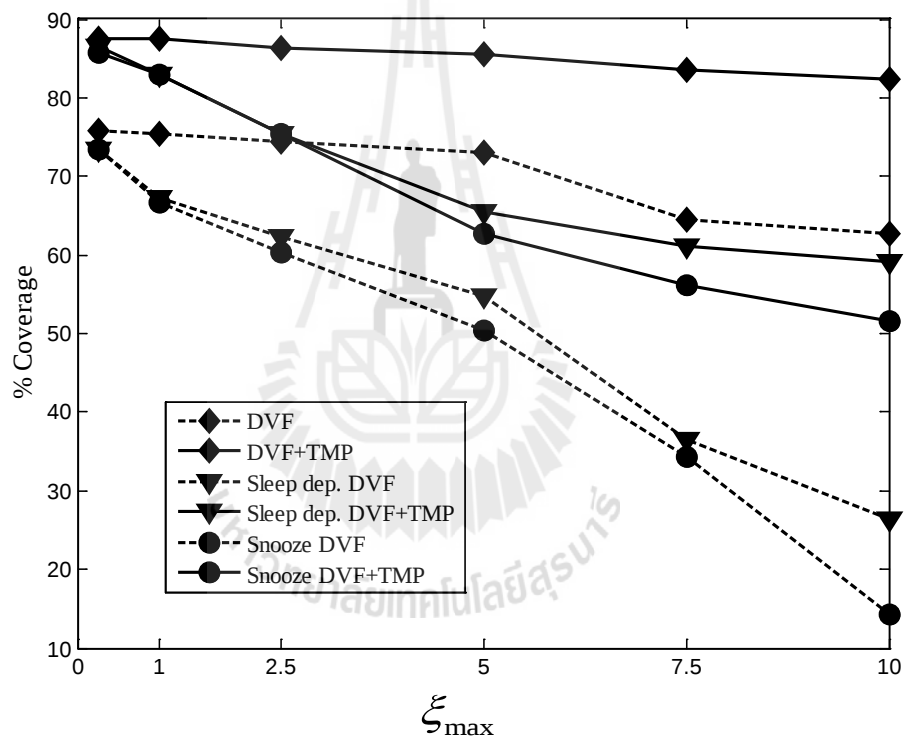


รูปที่ 3.8 ผลตอบแทนเฉลี่ยสำหรับการโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ ในสถานะที่มี

โหนดประสงค์ร้าย 15 โหนด และในสถานะปกติด้วยระดับความผิดพลาด $\xi_{\max} = 10$

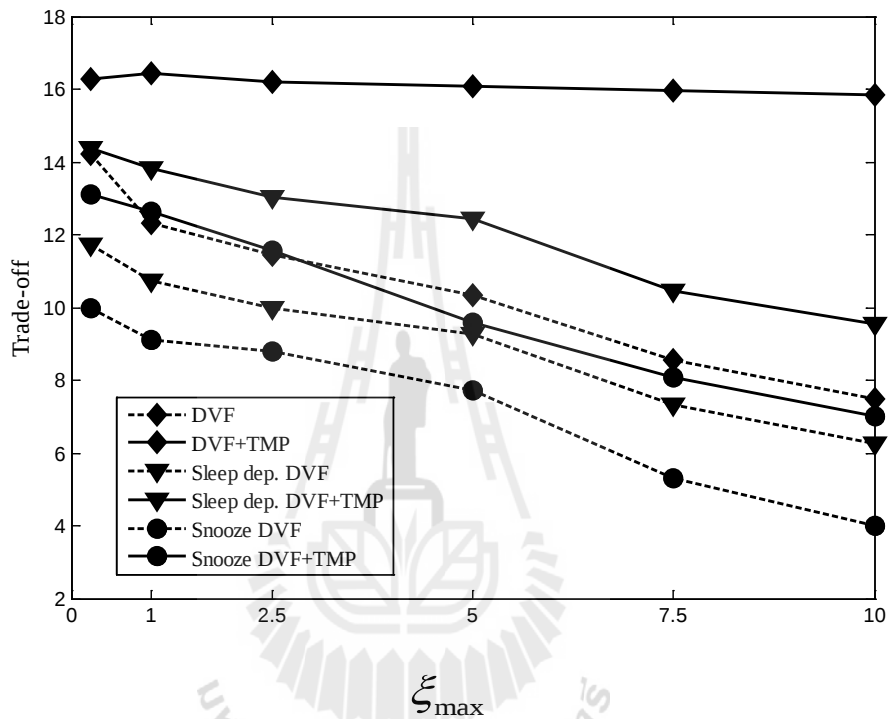
รูปที่ 3.8 แสดงผลจากการเรียนรู้ของทั้งสองกระบวนการเมื่อระดับความผิดพลาดของ $\xi_{\max} = 10$ ภายใต้การโจมตีแบบไม่ให้หลับ 15 โหนด แบบให้หลับ 15 โหนดและแบบปกติ ซึ่งพบว่าวิธี DVF+TMP สามารถแสดงผลการตัดสินใจได้ดีกว่าซึ่งแสดงในรูปของการเพิ่มขึ้นของผลตอบแทนเฉลี่ย แม้ว่าอัตราการเรียนรู้ของอัลกอริทึมที่นำเสนอจะต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดในสภาวะการโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ แต่วิธี DVF ดั้งเดิมก็แสดงให้เห็นว่าวิธีนี้ไม่สามารถเรียนรู้เพื่อปรับปรุงการตัดสินใจได้ตลอดการทดสอบซึ่งสังเกตได้จากจุดเบรกดาวในผลตอบแทนเฉลี่ย

รูปที่ 3.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมที่ระดับความผิดพลาดในฟังก์ชันมูลค่าที่แตกต่างกันด้วยการโจมตีของโหนดประสงค์ร้าย 5 โหนด และทำการเปรียบเทียบใน 3 สถานการณ์คือ ในสถานการณ์ปกติ สถานการณ์ที่มีการโจมตีแบบไม่ให้หลับ และสถานการณ์ที่มีการโจมตีแบบให้หลับ พบว่าเมื่อระดับความผิดพลาดสูงขึ้นจะทำให้ได้พื้นที่ครอบคลุมน้อยลง ซึ่งเป็นการยืนยันเป้าหมายของการทดลองและผลที่ได้รับจากวิธีควบคุมพื้นที่ครอบคลุมโดยเกี่ยวเนื่องกับความร่วมมือของโหนดซึ่งทำให้เกิดการความเสี่ยงต่อการโจมตีของโหนดประสงค์ร้าย นอกจากนี้ในแต่ละสถานการณ์จะเห็นว่าวิธี DVF+TMP ให้ผลที่ดีกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม โดยมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ครอบคลุมเป็น 19%, 32% และ 37% ในสภาวะการณ์ปกติ, สภาวะไม่ให้หลับ และสภาวะให้หลับตามลำดับ



รูปที่ 3.9 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมด้วยโหนดประสงค์ร้าย 5 โหนด

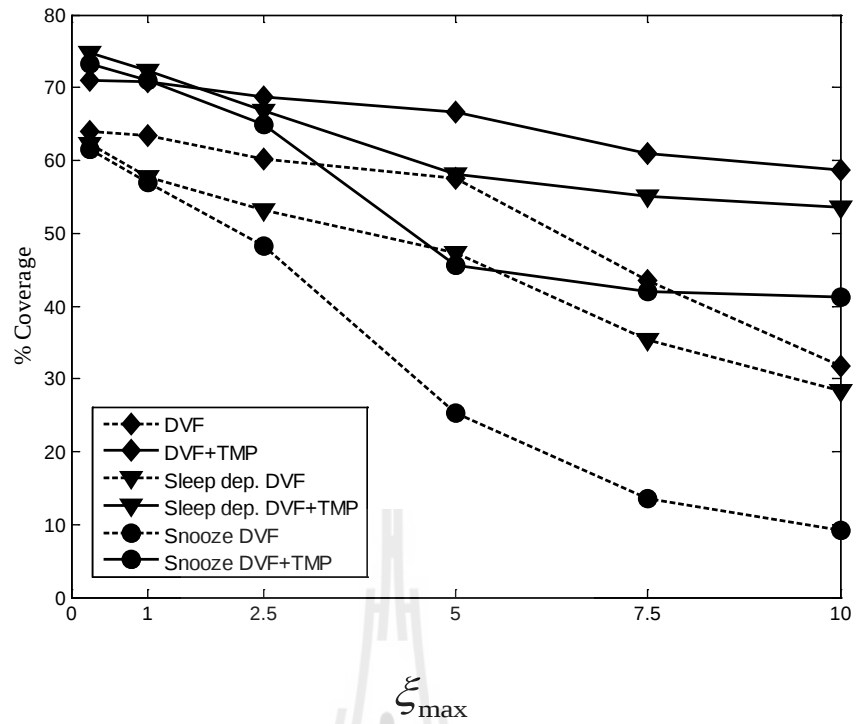
รูปที่ 3.10 แสดงผลการแลกเปลี่ยนที่ระดับความผิดพลาดของฟังก์ชันมูลค่าที่แตกต่างกันของแต่ละอัลกอริทึมในสภาวะการณปกติ, สภาวะไม่ให้หลับ และสภาวะให้หลับตามลำดับผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธี DVF+TMP เพิ่มพื้นที่ส่องสว่างได้ 3-8 เซลล์ต่อยูนิตพลังงานที่ถูกใช้ไปได้มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม โดยเมื่อระดับของความผิดพลาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้การแลกเปลี่ยนลดลงเนื่องมาจากการตัดสินใจที่ได้จากการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่มีความผิดพลาดระหว่างโหนดในเครือข่าย



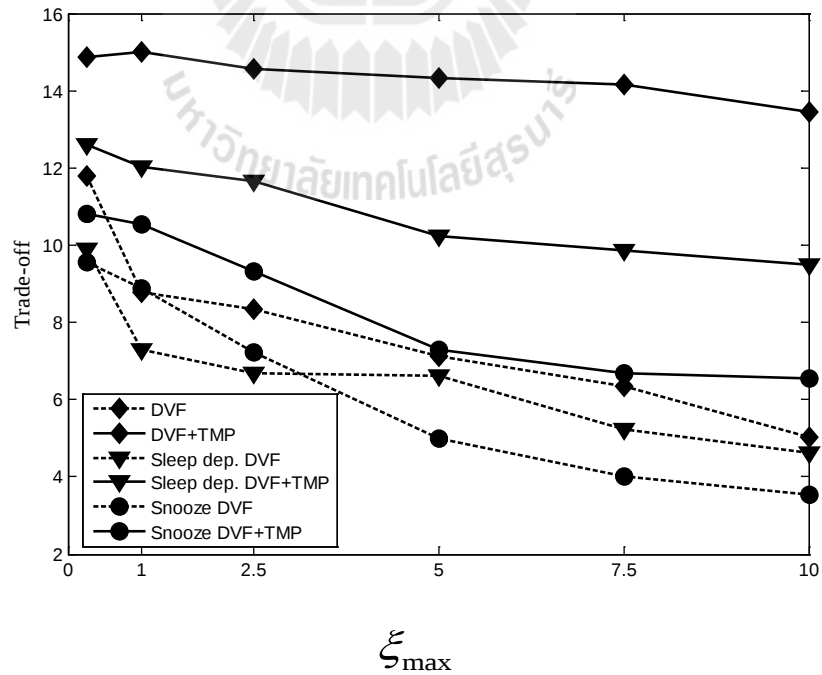
รูปที่ 3.10 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของการแลกเปลี่ยน

ด้วยโหนดประสงค์ร้าย 5 โหนด

รูปที่ 3.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมที่มีการโจมตีของโหนดประสงค์ร้าย 10 โหนด จะเห็นว่าวิธี DVF+TMP ให้ผลที่ดีกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม โดยมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ครอบคลุมเป็น 27%, 25% และ 32% ในสภาวะการณปกติ, สภาวะไม่ให้หลับ และสภาวะให้หลับตามลำดับ รูปที่ 3.12 แสดงผลการแลกเปลี่ยนที่ระดับความผิดพลาดของฟังก์ชันมูลค่าที่แตกต่างกันในสภาวะการณปกติ, สภาวะไม่ให้หลับ และสภาวะให้หลับตามลำดับ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าวิธี DVF+TMP สามารถเพิ่มพื้นที่ส่องสว่างได้ 3-8 เซลล์ต่อยูนิตพลังงานที่ถูกใช้ไปได้มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม

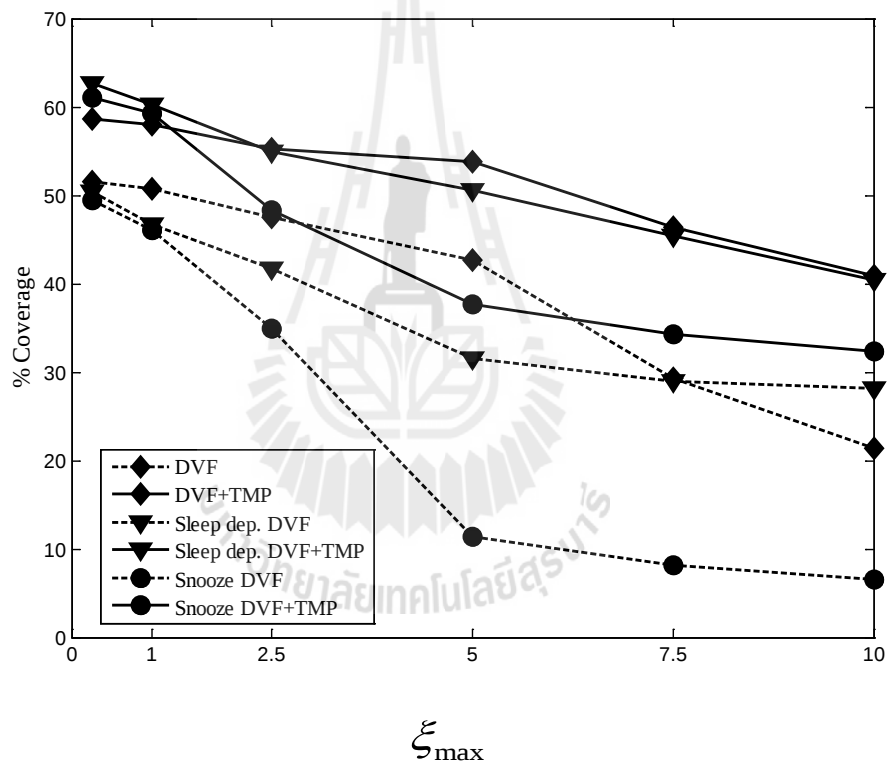


รูปที่ 3.11 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมด้วย
โหนดประสงค์ร้าย 10 โหนด

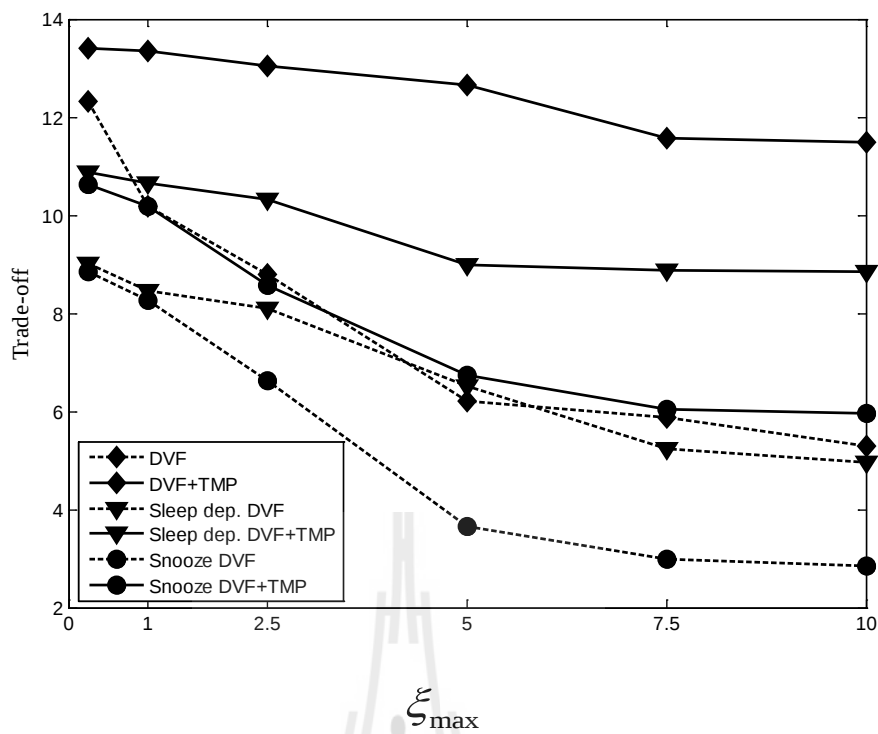


รูปที่ 3.12 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของการแลกเปลี่ยนด้วยโหนด
ประสงค์ร้าย 10 โหนด

ผลของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมที่มีการโจมตีของโหนดประสงค์ร้าย 15 โหนดแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งวิธีDVF+TMP ให้ผลที่ดีกว่าวิธีDVF ดั้งเดิม โดยมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ครอบคลุมอยู่ที่ 19%, 12% และ 26% ในสภาวะการณปกติ, สภาวะไม่ให้หลับ และสภาวะให้หลับตามลำดับรูปที่ 3.14 เปรียบเทียบผลการแลกเปลี่ยนที่ระดับความผิดพลาดของฟังก์ชันมูลค่าที่แตกต่างกันในสภาวะการณปกติ, สภาวะไม่ให้หลับ และสภาวะให้หลับตามลำดับ ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับกรณีที่มีโหนดประสงค์ร้าย 5 และ 10 โหนด นั่นคือวิธีDVF+TMP สามารถเพิ่มพื้นที่ส่องสว่างได้ 3-8 เซลล์ต่อยูนิตพลังงานที่ถูกใช้ไปได้มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม แม้ว่าจะได้พื้นที่ครอบคลุมและการแลกเปลี่ยนที่น้อยกว่าก็ตาม



รูปที่ 3.13 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ครอบคลุมด้วยโหนดประสงค์ร้าย 15 โหนด



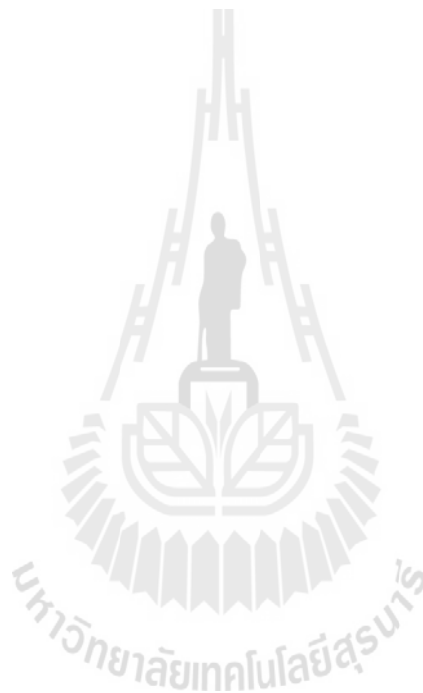
รูปที่ 3.14 ผลกระทบจากระดับความผิดพลาดในรูปของการแลกเปลี่ยนด้วยโหนด

ประสงคร้าย 15 โหนด

3.6 สรุป

รายงานวิจัยฉบับนี้แนะนำวิธีควบคุมพื้นที่ครอบคลุมแบบ DVF+TMP ภายใต้กระบวนการเรียนรู้แบบกระจายสำหรับระบบที่มีหลายตัวกระทำที่เรียกว่า วิธี DVF และโปรโตคอลรักษาเส้นทางที่ปลอดภัย (a secure topology maintenance protocol หรือ TMP) เพื่อป้องกันการโจมตีแบบไม่ให้หลับ แบบให้หลับ และแบบยึดครองโหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในรายงานวิจัยฉบับนี้ กระทำโดยการศึกษาจากการควบคุมการเปิดไฟ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า วิธี DVF ดั้งเดิมมีจุดเด่นในเรื่องของความร่วมมือกันระหว่างโหนด อย่างไรก็ตามวิธี DVF+TMP มีความยืดหยุ่นต่อการโจมตีของโหนดประสงคร้ายได้มากกว่าโดยได้รับ 6-12% ของพื้นที่ครอบคลุมเมื่อเทียบกับวิธี DVF ดั้งเดิมในสภาวะการโจมตีแบบไม่ให้หลับและแบบให้หลับ นอกจากนี้ในสภาวะการโจมตีแบบยึดครองโหนดในเครือข่ายที่ระดับความผิดพลาดของฟังก์ชันมูลค่าที่แตกต่างกันพบว่าวิธี DVF+TMP สามารถเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมได้มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม 19%-37% ในสภาวะการผิดปกติ, สภาวะไม่ให้หลับ และสภาวะให้หลับเมื่อมีโหนดประสงคร้าย 5 โหนด และเมื่อโหนดประสงคร้าย

เพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 15 โหนด DVF+TMP สามารถเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมได้มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม 25%-32% และ 12%-26% ตามลำดับ ในด้านการแลกเปลี่ยน สำหรับโหนดประสงค์ร้าย 5-15 โหนด พบว่าวิธี DVF+TMP สามารถให้พื้นที่ส่องสว่างได้ 3-8 เซลล์ต่อยูนิตพลังงานที่ถูกใช้ไปได้มากกว่าวิธี DVF ดั้งเดิม ด้วยการทำงานร่วมกับโปรโตคอลรักษาเส้นทางที่ปลอดภัยส่งผลให้อัลกอริธึมที่นำเสนอสามารถลดความเสี่ยงต่อการถูกโจมตีได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 4

ระบบตรวจวัดสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์

ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ระบบ WASN ในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต้นแบบที่นำไปใช้สำหรับการเฝ้าระวังตรวจสอบคุณภาพสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการนำระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมาประยุกต์ใช้เพื่อประหยัดเวลาในการตรวจวัดปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกระบวนการเจริญเติบโตของผักไฮโดรโปนิกส์ อุปกรณ์ต้นแบบนี้ติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (EC) และค่าความเข้มข้น เพื่อวัดและส่งผลที่วัดได้ด้วยการส่งข้อมูลแบบไร้สายไปยังสถานีฐาน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประมวลได้อย่างสะดวก รวดเร็ว ทำให้ผู้เพาะปลูกสามารถควบคุมและดูแลปัจจัยต่างๆได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และต่อเนื่องตลอดเวลา

เนื้อหาสำคัญที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ได้แก่

1. กล่าวแนะนำการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์
2. กล่าวถึงระบบตรวจสอบสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์
3. การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับระบบตรวจสอบสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

4.2 การปลูกพืชไฮโดรโพนิกส์

ปัจจุบันเกษตรกรรมแม่นยำสูง (Precision Agriculture) มีบทบาทอย่างยิ่งต่อการเข้าสู่ยุคการเกษตรแนวใหม่ โดยเกษตรกรรมแม่นยำสูงช่วยให้เกษตรกรสามารถดูแลพื้นที่เพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ ไม่ว่าจะเป็นการหว่านเมล็ดพืช การให้ปุ๋ย การไถพรวนดิน การรดน้ำ การคัดเลือกผลผลิต นอกจากนี้ยังสามารถทำนายการเก็บเกี่ยวผลผลิตได้อย่างแม่นยำอีกด้วย เกษตรกรรมแม่นยำสูงเกี่ยวข้องกับการเฝ้าสังเกตปัจจัยต่างๆอย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น ด้านสิ่งแวดล้อม (เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและการควบคุม) ด้านเศรษฐศาสตร์ (ได้แก่ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต เช่น น้ำ ดิน ปุ๋ย เป็นต้น) และความต้องการของเกษตรกร (นั่นคือ ปริมาณผลผลิตที่ต้องการ) [26] ปัจจุบันการเกษตรยุคใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย คือ การปลูกพืชไร้ดินที่เรียกว่าไฮโดรโพนิกส์ (Hydroponics) การปลูกพืชไฮโดรโพนิกส์เป็นการปลูกพืชลงบนสารละลายธาตุอาหารพืชแทนการใช้ดิน โดยให้รากพืชสัมผัสกับสารอาหารโดยตรง (water culture) พืชสามารถเจริญเติบโตได้โดยอาศัยสารอาหารต่างๆที่ละลายในน้ำเพื่อทดแทนสารอาหารที่มีอยู่ในดิน ดังนั้นพืชผักที่ได้จะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและให้ผลผลิตสูง ผลผลิตมีความสม่ำเสมอ สะอาด มีคุณภาพดี สามารถวางแผนเก็บเกี่ยวได้ค่อนข้างแน่นอน เนื่องจากมีการควบคุมปริมาณสารอาหารอย่างพอเพียงและสม่ำเสมอ ตลอดจนการควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังสามารถปลูกพืชได้ต่อเนื่องตลอดทั้งปี เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้วยังสามารถปลูกพืชผักรุ่นต่อไปได้ทันที เนื่องจากไม่ได้ใช้ดินจึงไม่ต้องทิ้งระยะเวลาเพื่อทำการพักหน้าดินเตรียมแปลงปลูกใหม่ อีกทั้งยังไม่เกิดปัญหาดินเสื่อมสภาพอีกด้วย

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการปลูกพืชไฮโดรโพนิกส์คือ จะต้องทำการเพาะปลูกในโรงเรือนปิดที่มีการควบคุมปัจจัยต่างๆตลอดเวลา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย ระดับออกซิเจนในน้ำ เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ทำการปลูก จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตรวจสอบทุกวันเพื่อควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งก่อให้เกิดความยุ่งยากสำหรับผู้เพาะปลูกพืชในระบบนี้ [27] ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำระบบเซ็นเซอร์เข้ามาประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมและดูแลระบบการปลูกพืชไฮโดรโพนิกส์ เพื่อให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างอัตโนมัติหรือมีการพึ่งพาแรงงานคนในบางขั้นตอนเท่านั้น ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4.3 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งถูกติดตั้งที่โรงเรือนปลูกพืชไร้ดิน (ไฮโดรโปนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติที่สนใจ ตัวแปรที่ตรวจวัดได้แก่

1) *ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)* การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในระบบไฮโดรโปนิกส์ ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นไม่น้อยไปกว่าการใส่ธาตุอาหารให้กับพืช หากไม่สามารถรักษาระดับความเป็นกรด-ด่างไว้ได้ พืชจะไม่สามารถดูดสารอาหารที่มีในระบบไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ จึงต้องทำการวัดค่า pH สมำเสมอ โดยทั่วไปพืชในระบบไฮโดรโปนิกส์จะมีค่า pH ของสารละลายอยู่ในช่วง 5.6 -6.5

2) *ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electric Conductivity)* ค่าการนำไฟฟ้าของเกลือ ใน (ไฮโดรโปนิกส์จะหมายถึงเกลือของธาตุอาหาร ทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย เพื่อเป็นตัวบอกปริมาณเกลือธาตุอาหารที่ละลายในน้ำ ค่า EC ที่วัดได้นี้จะนำไปใช้กับพืชที่เราจะทำการปลูก และควรรักษาระดับค่า EC ให้คงที่ และปรับค่าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ในสารละลายมีธาตุอาหารที่พืชสามารถจะนำไปใช้ได้ตลอดเวลาและพอเพียง โดยส่วนมากค่าที่ใช้วัดสำหรับการปลูกพืชจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5-5.0 mS/cm

3) *ค่าความเข้มแสง (Light intensity)* แสงมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสร้างอาหารและการเจริญเติบโตของพืช การสังเคราะห์แสงของพืชจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงจนถึงจุดหนึ่งการสังเคราะห์แสงจะไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป โดยเรียกว่าพืชอิ่มตัวด้วยแสง ซึ่งอาจทำให้ใบพืชไหม้เกรียมตายได้ หากพืชได้รับแสงที่มีความเข้มแสงน้อยพืชจะไม่มีอาการเจริญเติบโต และตายได้เช่นกัน พืชผักทั่วไปมีจุดอิ่มตัวด้วยแสงประมาณ 20000-30000 Lux

ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากโรงเรือนจะถูกส่งไปยังสถานีฐานด้วยการรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สาย ทำให้การตรวจวัดเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็ว และง่ายต่อการควบคุม



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 โรงเรือนปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (ไฮโดรโปนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ก) ภายนอกโรงเรือน
(ข) ภายในโรงเรือน

อุปกรณ์สำหรับนำไปใช้สร้างชุดต้นแบบสำหรับการตรวจสอบสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย มีองค์ประกอบดังนี้

4.3.1 เซ็นเซอร์โหนด (Sensor mote)

อุปกรณ์ต้นแบบในงานวิจัยนี้ใช้เซ็นเซอร์โหนดรุ่น MPR2400 หรือ MicaZ ผลิตภัณฑ์จากบริษัท Crossbow ซึ่งสามารถส่งสัญญาณไร้สายด้วยคลื่นความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีอัตราการส่งข้อมูล (data rate) 250 kbps สามารถรับส่งสัญญาณภายนอกอาคารในช่วง 75-100 เมตร และ 20-30 เมตรสำหรับภายในอาคาร เซ็นเซอร์โหนดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่รีชาร์จ AA จำนวน 2 ก้อน มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และใช้พลังงานต่ำ เซ็นเซอร์โหนดทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ TinyOS ซึ่งใช้ภาษาเนสซี (NesC) ในการโปรแกรมคำสั่งต่างๆ



รูปที่ 4.2 เซนเซอร์โหนดรุ่น MPR2400

4.3.2 บอร์ดรวมข้อมูล (Data acquisition board)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์โหมดได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากบริษัท Crossbow รุ่น MDA300 มีช่องสัญญาณ 8 ช่อง ทำหน้าที่รับข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกเพื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต นอกจากนี้ MDA300 ยังสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟขนาด 2.5, 3.3 และ 5 โวลต์ อีกด้วย จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้ MDA300 เป็นอุปกรณ์ที่ง่ายต่อการเข้าถึงข้อมูล เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย เช่น สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ภายนอก ไม่ว่าจะเป็นเซ็นเซอร์วัดความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เซ็นเซอร์วัดความชื้น หรือเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้พลังงานต่ำ การเก็บและแสดงผลข้อมูลถูกสนับสนุนภายใต้อุปกรณ์เชื่อมต่อของ Crossbow ด้วยกัน ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกรวบรวมไปยังสถานีฐานซึ่งมีการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติเพื่อบันทึกค่าลงฐานข้อมูล



รูปที่ 4.3 บอร์ดรวมข้อมูลรุ่น MDA300

4.3.3 สถานีฐาน (Base Station)

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MIB 520CB เป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท Crossbow ประกอบด้วย USB สำหรับการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ MIB 520CB แบ่งออกเป็น 2 พอร์ตทำหน้าที่แตกต่างกัน โดยพอร์ตแรกทำหน้าที่เป็นช่องทางสำหรับการโปรแกรมข้อมูลให้แก่เซ็นเซอร์โหมด พอร์ตที่สองทำหน้าที่ในการรับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยปกติแล้วอุปกรณ์ MIB 520CB จะทำหน้าที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ต USB และทำหน้าที่เป็นสถานีฐานด้วยการ

ใช้เซ็นเซอร์ชนิด IRIS/MICAz/Mica2 มาต่อเข้ากับบอร์ดอินเตอร์เฟส (interface board) ของ MIB 520CB และถูกโปรแกรมให้ทำหน้าที่เป็นสถานีฐานเรียบร้อยแล้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MIB 520 CB (ก) MIB 520 CB (ข) MIB 520 CB ต่อเข้ากับโหมดทำหน้าที่เป็นสถานีฐาน

4.3.4 อุปกรณ์เซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดค่าสารละลายและความเข้มแสง

1) เซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดสารละลายกรด-ด่าง (pH sensor) สามารถวัดค่าความเป็นกรด-ด่างได้ในช่วง 0-14 โดยเซ็นเซอร์ pH นี้จะให้ค่าแรงดัน 1.75 โวลต์ ที่ค่า pH 7 และแรงดันจะเพิ่มขึ้นทุกๆ 0.25 โวลต์ เมื่อค่า pH 1 ลดลงค่า ในทางตรงข้าม แรงดันจะลดลง 0.25 โวลต์ เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น



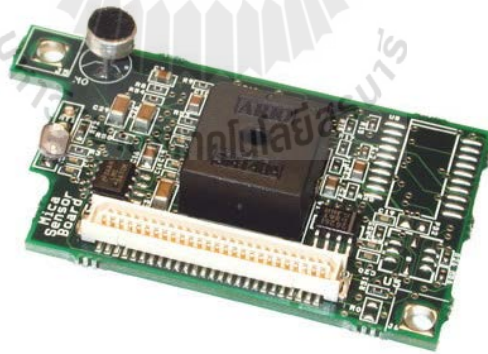
รูปที่ 4.5 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสารละลายกรด-ด่าง

2) โพรบวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Conductivity Probe) ใช้สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้า หรือค่าความเข้มข้นของไอออนของสารละลาย มีช่วงการวัดครอบคลุมตั้งแต่ 0-20,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$



รูปที่ 4.6 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

3) เซ็นเซอร์วัดแสงบนบอร์ดรุ่น MTS300 เป็นเซ็นเซอร์บนอุปกรณ์ (internal sensor) โดยใช้ CdSe photocell ซึ่งสามารถวัดแสงได้ที่มีความยาวคลื่นสูงสุด 690 nm ในบริเวณที่มีแสงสว่างจะมีค่าความต้านทานที่ 2 k Ω และบริเวณที่มีมืดจะมีค่าความต้านทาน 520 k Ω



รูปที่ 4.7 บอร์ด MTS 300 สำหรับการตรวจวัดค่าความเข้มแสง

4.4 การทดสอบการใช้งาน

4.4.1 ระบบตรวจสอบสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์

อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการตรวจสอบสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายถูกนำไปติดตั้งที่โรงเรือนปลูกพืชไร้ดิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีอุปกรณ์ทั้งหมด 2 ชุด ชุดแรกเป็นชุดต้นแบบสำหรับการตรวจวัดค่ากรด-ด่าง และ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย จะถูกนำไปติดตั้งในบ่อสารละลายภายในโรงเรือนเพื่อวัดค่า pH และ EC ของสารละลายที่จะถูกนำไปใช้เลี้ยงพืช แสดงดังรูปที่ 4.8 สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สายชุดที่สอง คือชุดต้นแบบสำหรับการตรวจวัดค่าความเข้มข้น จะถูกติดตั้งบริเวณกึ่งกลางของโรงเรือนเพื่อตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นภายในโรงเรือน แสดงดังรูปที่ 4.9



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดค่ากรด-ด่าง และ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

(ก) ชุดอุปกรณ์ต้นแบบ (ข) การติดตั้งชุดอุปกรณ์ต้นแบบในบ่อสารละลายภายในโรงเรือนไฮโดรโปนิกส์



รูปที่ 4.9 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดค่าความชื้นแฉะ



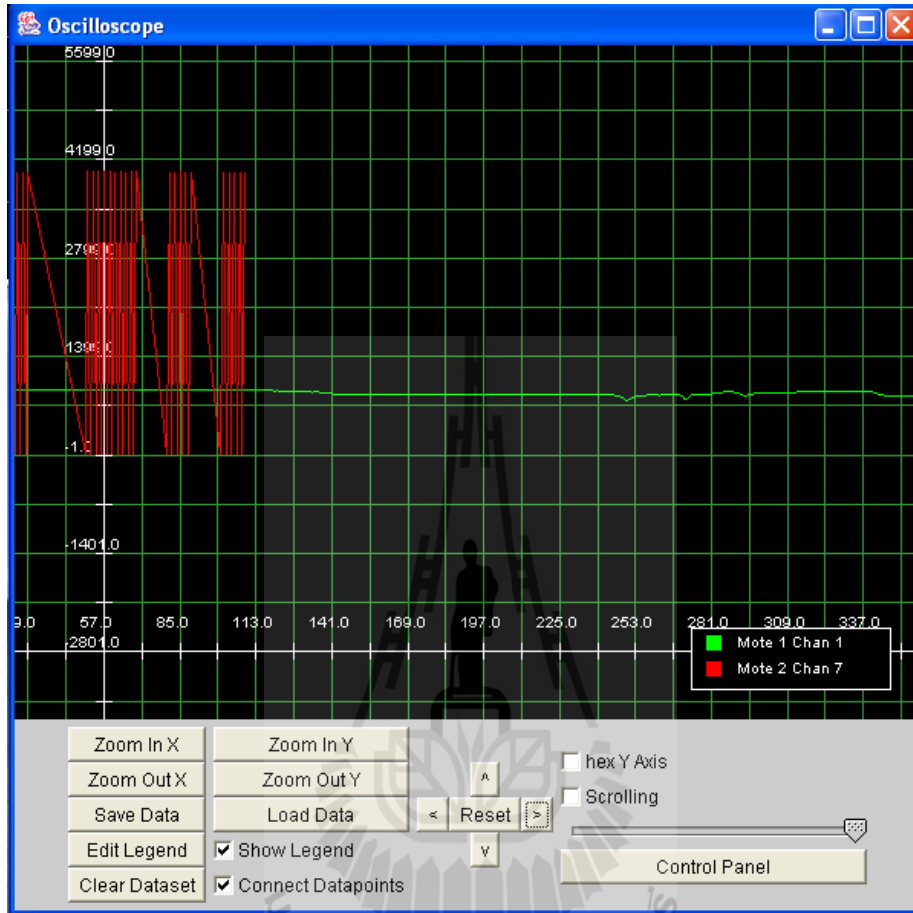
รูปที่ 4.10 สถานีฐาน

ชุดเซ็นเซอร์ไร้สายทั้งสองชุดจะทำการตรวจวัดปริมาณที่สนใจและทำการส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้มายังสถานีฐาน แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยสถานีฐานตั้งห่างจากโรงเรือนประมาณ 40 เมตร โหนดสถานีฐานจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อทำการรับและบันทึกข้อมูลการตรวจวัดลงฐานข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบค่าที่สนใจได้อย่างสะดวก รวดเร็ว

4.4.2 ผลการทดสอบ

เมื่อเริ่มต้นการทำงาน จะรันโปรแกรมที่ใช้ในการเปิดพอร์ตเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์โหนดในโรงเรือนปลูกพืชไร่นากับโหนดสถานีฐาน โดยผู้วิจัยทำการโปรแกรมระบบให้โหนดเซ็นเซอร์ทำการตรวจวัดและส่งค่าที่วัดได้มายังสถานีฐานทุกๆ 1 ชั่วโมง ข้อมูลที่ถูกส่งกลับมานั้นจะเป็นค่าแรงดันของปริมาณที่วัดได้ (นั่นคือ ค่าEC ค่าpH และค่าความชื้นแฉะ) แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยโหนด

ที่หนึ่ง (Mote 1 Chan 1) เป็นค่าแรงดันของปริมาณความเข้มแสง และโหมดที่สอง (Mote 2 Chan 7) เป็นค่าแรงดันของปริมาณความเป็นกรด-ด่างและปริมาณการนำไฟฟ้าของสารละลาย



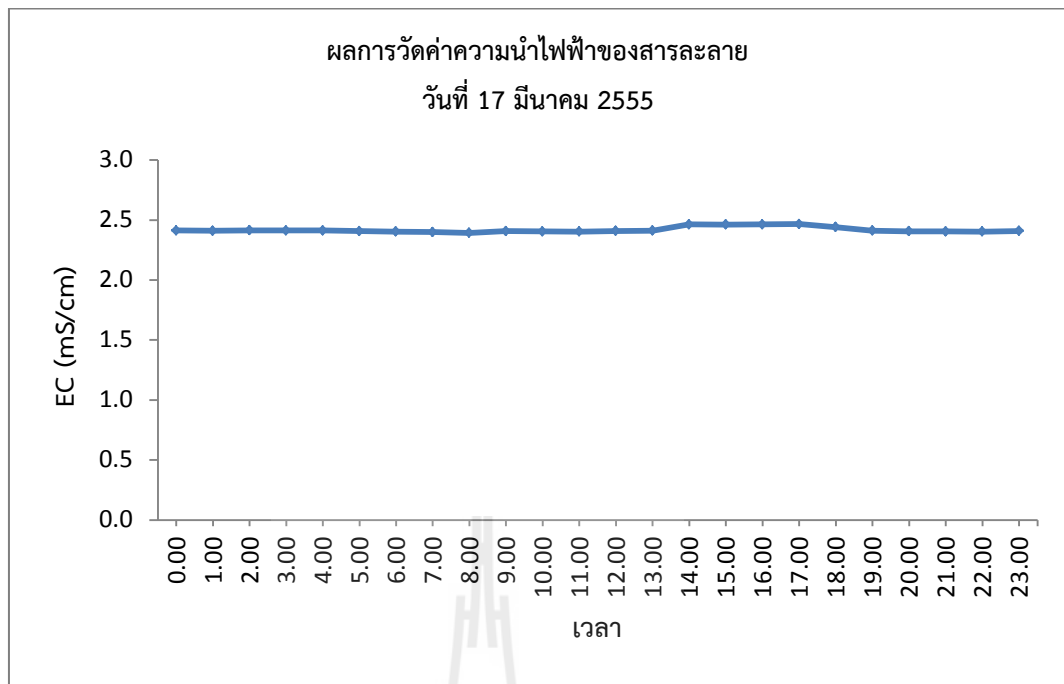
รูปที่ 4.11 ข้อมูลที่ทำการตรวจวัดได้

ค่าแรงดันที่ตรวจวัดได้ดังกล่าวจะถูกนำไปประมวลในโปรแกรมแมทแลป (Matlab) เพื่อแสดงค่าที่ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ และจะถูกบันทึกลงฐานข้อมูล โดยข้อมูลที่ทำการบินที่ก็จะประกอบไปด้วย วัน เวลาและค่าที่ตรวจวัด (EC pH และ ความเข้มแสง) ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งผู้ใช้สามารถอ่านค่าการตรวจวัดนี้ได้อย่างสะดวก รวดเร็ว โดยไม่ต้องไปทำการตรวจวัดค่าด้วยตนเอง

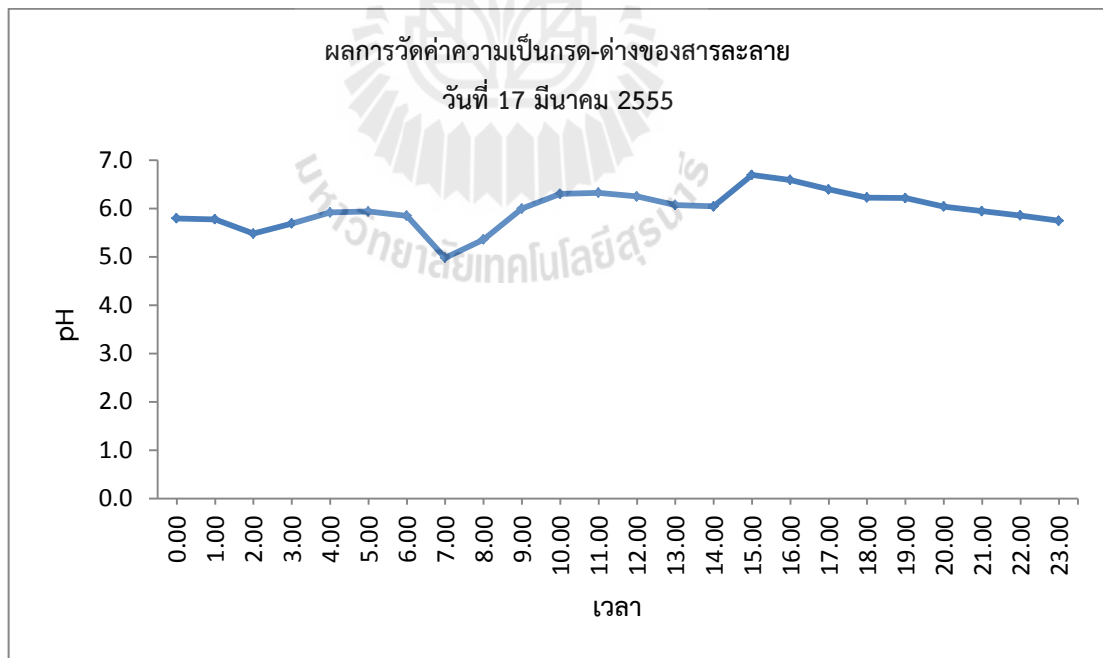
120317_DatabaseHydroponics - Notepad								
File	Edit	Format	View	Help				
Year	Mount	Day	Hour	Min	EC	pH	LUX	
2012	3	17	0	55	2.4122	5.7969	0	
2012	3	17	1	56	2.4107	5.7772	0	
2012	3	17	2	56	2.4141	5.4825	0	
2012	3	17	3	56	2.4128	5.6916	0	
2012	3	17	4	56	2.4135	5.9181	0	
2012	3	17	5	57	2.4078	5.9407	0	
2012	3	17	6	57	2.4033	5.8486	0.23808	
2012	3	17	7	57	2.3999	4.9811	2287.4	
2012	3	17	8	58	2.3925	5.3606	10818	
2012	3	17	9	58	2.4079	6.0002	11741	
2012	3	17	10	58	2.4048	6.3041	12841	
2012	3	17	11	59	2.4039	6.3261	13741	
2012	3	17	12	59	2.4093	6.2501	13686	
2012	3	17	13	59	2.4119	6.0747	11900	
2012	3	17	14	59	2.463	6.046	10790.9	
2012	3	17	15	1	2.4628	6.6935	8300	
2012	3	17	16	1	2.4635	6.5926	3782	
2012	3	17	17	1	2.4668	6.3969	2778.7	
2012	3	17	18	1	2.4412	6.2284	946.45	
2012	3	17	19	2	2.4118	6.2168	378.2	
2012	3	17	20	2	2.4064	6.0408	378.2	
2012	3	17	21	3	2.4049	5.9463	0	
2012	3	17	22	3	2.4041	5.8581	0	
2012	3	17	23	3	2.4094	5.7466	0	
2012	3	18	0	4	2.463	6.046	0	
2012	3	18	1	4	2.463	6.046	0	

รูปที่ 4.12 ค่าที่ถูกบันทึกลงฐานข้อมูล

รูปที่ 4.13 แสดงผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย (EC) ในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ ของวันที่ 17 มีนาคม 2555 โดยปริมาณความนำไฟฟ้าที่วัดตั้งแต่เวลา 0.00 – 23.00 น. จะเห็นว่าค่า EC ที่ทดสอบตลอดทั้งวันมีค่าค่อนข้างจะคงที่ ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.42 mS/cm ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์แห่งนี้ ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) แสดงดังรูปที่ 4.14 วัดได้ในช่วง 4.89 - 6.69 โดยค่า pH ที่เหมาะสมที่แปลงผักไฮโดรโปนิกส์ต้องการคือ ช่วง pH 5.6-6.5 จะเห็นว่าค่า pH ของสารละลายในแปลงผักที่ทำการทดสอบใน 1 วัน จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตลอดเวลา ซึ่งมีบางช่วงเวลาที่ค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าระดับ pH ที่ต้องการ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตรวจเฝ้าระวังเพื่อควบคุมปริมาณ pH ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมอยู่เสมอ นอกจากนี้เมื่อพืชเริ่มเจริญเติบโตมากขึ้น ปริมาณ EC และ pH ของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนไป ดังนั้นการตรวจวัดเพื่อเฝ้าระวังค่าความเปลี่ยนแปลงของสารละลายอยู่เสมอ จะช่วยให้ผู้ปลูกสามารถควบคุมความเหมาะสมของสารละลายได้ทันที

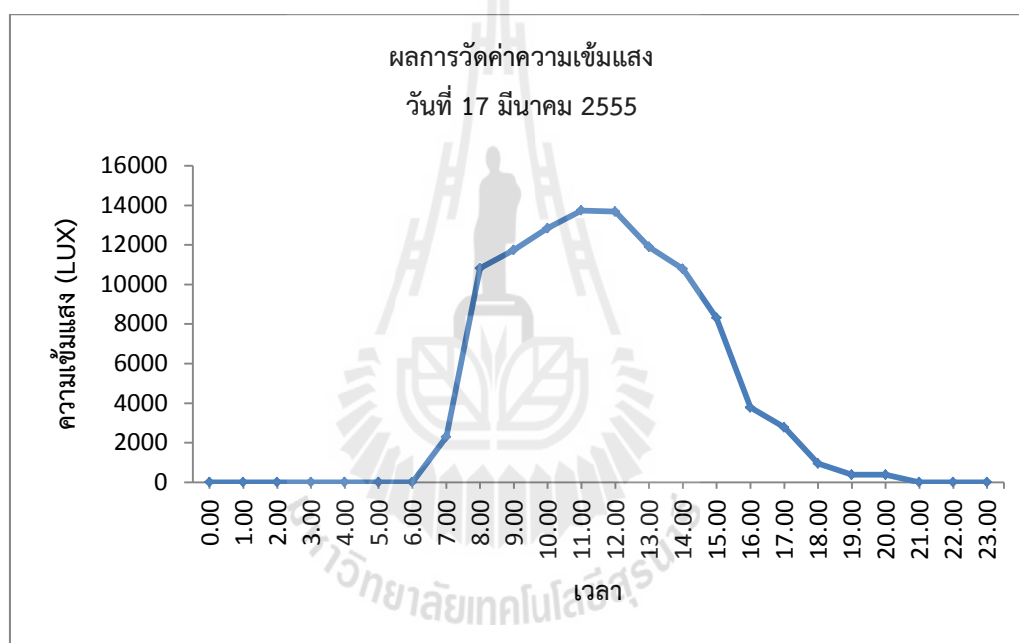


รูปที่ 4.13 ผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ของวันที่ 17 มีนาคม 2555



รูปที่ 4.14 ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ของวันที่ 17 มีนาคม 2555

รูปที่ 4.15 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ของวันที่ 17 มีนาคม 2555 จากรูปแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มแสงที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 11.00-13.00 โดยปริมาณความเข้มแสงในแต่ละวันจะมีปริมาณไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่เพาะปลูก เวลา สภาพอากาศ และฤดูกาล ความเข้มแสงที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป จะมีผลในการลดการสังเคราะห์แสงของพืช ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตน้อยลง สำหรับการปลูกพืชในประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อน มักจะได้รับแสงที่มีความเข้มสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจวัดปริมาณแสงในแต่ละวัน เพื่อควบคุมระดับแสงและอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช



รูปที่ 4.15 ผลการวัดค่าความเข้มแสงในแปลงผักไฮโดรโปนิกส์ของวันที่ 17 มีนาคม 2555

4.5 สรุป

ชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับระบบตรวจสอบสารละลายในโรงเรือนปลูกพืชไร้ดิน (ไฮโดรโพนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สามารถตรวจวัดคุณสมบัติของสิ่งแวดล้อมที่สนใจซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ทำการเพาะปลูก โดยชุดต้นแบบจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ที่มีความสามารถในการตรวจวัด ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย และค่าความเข้มข้น เซ็นเซอร์จะทำการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดที่ได้ส่งไปยังสถานีฐานเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลไว้ในฐานข้อมูล โดยสามารถทำการรับส่งข้อมูลการตรวจวัดได้ไกลด้วยการใช้วิธีการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบฮอปเดียว (single hop) ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลที่ตรวจวัดไปใช้ประโยชน์หรือแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทันที หรือหากต้องการทำการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังก็สามารถทำการตรวจสอบข้อมูลภายในฐานข้อมูลได้ นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังสามารถทำการปรับตั้งค่าให้เซ็นเซอร์ทำการส่งข้อมูลกลับเป็นระยะเวลาตามที่ต้องการได้

แนวทางการพัฒนาต่อสำหรับชุดต้นแบบระบบตรวจวัดคุณสมบัติของสิ่งแวดล้อมที่สนใจในแปลงผักไฮโดรโพนิกส์ด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยการพัฒนาระบบให้สามารถทำการปรับพื้นที่ครอบคลุมการรับส่งข้อมูลได้อย่างอัตโนมัติ พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ภายนอกเพิ่มเติมเพื่อตรวจวัดปริมาณอื่นๆที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น) และทำการปรับปรุงโปรแกรมประยุกต์ให้มีรูปแบบในการนำเสนอและวิเคราะห์ข้อมูลที่ตรวจวัดที่หลากหลายยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Stankovic, A. J. 2006. Wireless Sensor Networks. , Chapter in Handbook of Real-Time and Embedded Systems. CRC Press.
- [2] Slijepcevic, S., Potkonjak, M. 2001. Power Efficient Organization of Wireless Sensor Networks. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, pp.472-476.
- [3] Cardei, M., MacCallum, D., Cheng, X., Min, M., Jia, X., Li, D., Du, D. 2002. Wireless Sensor Networks with Energy Efficient Organization. Journal of Interconnection Networks, Vol.3, No.3-4, pp.213-229.
- [4] Tian, D., Georganas, N. D. 2002. A Coverage-Preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks. Proceedings of ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pp.32-41.
- [5] Ye, F., Zhong, G., Lu, S., Zhang, L. 2002. Energy Efficient Robust Sensing Coverage in Large Sensor Networks. Technical Report UCLA.
- [6] Zhang, H., Hou, J. C. 2003. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks. Technical Report UIUC, UIUCDCS-R-2003-2351.
- [7] Wang, X., Xing, G., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R., Gill, C. D. 2003. Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks. Proceedings of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp.28-39.
- [8] Wu, J., Li, H., 1999. On Calculating Connected Dominating Set for Efficient Routing in Ad Hoc Wireless Networks. Proceedings of International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, pp.7-14.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Kar, K., Banerjee, S. 2003. Node Placement for Connected Coverage in Sensor Networks. Proceedings of the Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks.
- [10] Cardei, M., Du, D. Z. 2005. Improving Wireless Sensor Network Lifetime through Power Aware Organization. Proceedings of ACM Wireless Networks, pp.333-340.
- [11] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., Srivastava, M. 2001. Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks. Proceedings of IEEE Infocom, pp.1380-1387.
- [12] Li, X. Y., Wan, P. J., Frieder, O. 2002. Coverage in Wireless Ad-hoc Sensor Networks. IEEE Transactions on Computers, Vol.52, No.6, pp.753-763.
- [13] Liu, B., Towsley, D. 2003. On the Coverage and Detectability of Large-scale Wireless Sensor Networks. Proceedings of the Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks.
- [14] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Qu G., Potkonjak, M. 2001. Exposure in Wireless Ad Hoc Sensor Networks. Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.139-150.
- [15] Adlakha, S., Srivastava, M. 2003. Critical Density Thresholds for Coverage in Wireless Sensor Networks. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking, pp.16-20.
- [16] Raghunathan, V., Schurgers, C., Park, S., Srivastava, M. B. 2002. Energy-Aware Wireless Microsensor Networks,” IEEE Signal Processing Magazine, Vol.19, No.2, pp.40-50.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] Seah, M.W.M., Tham, C.K., Srinivasan, V., Xin, A. 2007. Achieving Coverage through Distributed Reinforcement Learning in Wireless Sensor Networks. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, pp.425-430.
- [18] Tham, C.K., Renaud, J.C. 2005. Multi-Agent Systems on Sensor Networks: A Distributed Reinforcement Learning Approach. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, pp.423-429.
- [19] Guestrin, C., Lagoudakis, M., Parr, R. 2002. Coordinated Reinforcement Learning. Proceedings of the 19th International Conference on Machine Learning, pp.227-234.
- [20] Sutton, R., and Barto, A. 1998. Reinforcement Learning: An Introduction. The MIT Press.
- [21] Kaelbling, L., Littman, M., Moore, A. 1996. Reinforcement Learning: A Survey. Journal of Artificial Intelligence Research, Vol.4, pp.237-285.
- [22] Vaz de Melo, P.O.S., Cunha, F.D., Almeida, J.M., Loureiro, A.A.F., Mini, R.A.F. 2008. The Problem of Cooperation Among Different Wireless Sensor Networks. Proceedings of the International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, pp.86-91.
- [23] Singsanga, S., Hattagam, W., Tat, E.H. 2010. Packet Forwarding in Overlay Wireless Sensor Networks using NashQ Reinforcement Learning. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor networks and Information Processing, pp.85-90.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [24] Gabrielli, A., Mancini, L.V., Setia, S., Jajodia, S. 2011. Securing Topology Maintenance Protocols for Sensor Networks. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol.8, No.3, pp.450-465.
- [25] Renaud, J.C., Tham, C.K. 2006. Coordinated Sensing Coverage in Sensor Networks using Distributed Reinforcement Learning. Proceedings of IEEE International Conference on Networks, pp.1-6.
- [26] Diaz, S. E., Perez, J. C., Mateos, A. C. 2011. A Novel Methodology for the Monitoring of the Agricultural Production Process based on Wireless Sensor Networks. Computers and Electronics in Agriculture, Vol.76, No.2, pp.252-265.
- [27] Siripanadorn, S., Hattagam, W., Teaumroong, N. 2010. Anomaly Detection in Wireless Sensor Networks using Self-Organizing Map and Wavelets in Wireless Sensor Networks. Proceedings of ACS international conference on Applied computer science, pp.291-297.

ภาคผนวก



Secure Coverage Control in Wireless Sensor Networks with Malicious Nodes using Multi-agents

A. Phuphanin

School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima, Thailand 30000
a.phuphanin@gmail.com

W. Usaha

School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima, Thailand 30000
wusaha@ieee.org

Abstract—In this paper, a multi-agent coverage control scheme in wireless sensor networks called the Distributed Value Function was integrated with a secure Topology Maintenance Protocol (DVF+TMP). The objective was to achieve a coverage control scheme which maximizes the coverage per unit energy consumed and countermeasures sleep deprivation, snooze and network substitution attacks in WSNs. Simulation results showed that our algorithm was more resilient by consistently attaining higher coverage per unit energy consumed, and achieving up to 75% and 10% of coverage greater than the original DVF algorithm under sleep deprivation and snooze attacks, respectively. Furthermore, the network substitution attack was studied where inaccurate information was exchanged between nodes. The proposed algorithm gained up to 12%, 25% and 8% of coverage than the DVF algorithm for the normal, sleep deprivation and snooze attack, respectively. The proposed algorithm also consistently achieved more average reward per unit energy consumed than the existing algorithm.

Keywords—multi agent; malicious node; control coverage;

I. INTRODUCTION

A wireless sensor network (WSN) is a wireless network consisting of spatially distributed autonomous device using sensors that can communicate with each other to perform sensing and data processing cooperatively. The overall objective of a WSN is to provide a low-cost solution to gather physical data from the environment, such as noise, pressure, light, observation and transmit it to a base station.

Due to scarce battery supply, topology maintenance and coverage control has become a challenging issue in WSNs. Works in [1-4] aimed at increasing the lifetime of the network by keeping only a subset of sensing nodes active and turning off the remaining redundant nodes. While [1, 2] attempt to maintain connectivity but not guarantee sensing coverage, [3, 4] addressed both network connectivity and coverage requirement.

Distributed self-adaptive coverage control schemes are attractive as WSNs are typically spatially-distributed and

deployed in dynamically changing environments which may be difficult to access and manually reconfigure. Such autonomous coverage control can be achieved by multi-agent systems (MAS) [7]. Such distributed approach is also more scalable and compatible with resource-constrained sensor nodes. One of such system called the DVF algorithm has been investigated in [7] where all sensor nodes act as agents that cooperate to achieve a common goal of maximum coverage and minimum energy consumption.

However, all of the aforementioned works were designed for trusted and cooperative environments. With scarce onboard resources, it is possible that sensor nodes may act selfishly by declining to service other nodes [5, 6]. Sensor nodes may also encounter attacks by other malicious nodes inside or outside of the network. These attacks may be used to reduce the lifetime of the sensor network, or to degrade the functionality of the sensor application by reducing the network connectivity and the sensing coverage that can be achieved. We study *three* types of attacks that can be launched in WSNs: *sleep deprivation* are attacks which the adversary tries to induce a node in a specific area to remain active thereby wasting energy and reduce the sensor network lifetime; *snooze attack* which the adversary forces the nodes to remain in the sleeping state thereby reducing sensing coverage or network connectivity; and *network substitution attack* which an adversary controls some nodes which were elected to maintain the connectivity. Once the adversary takes control of a portion of the network, it can carry out other attacks such as sending false information to other nodes. To the best of our knowledge, only [10] presented countermeasures against these types of security attacks in topology maintenance and coverage control schemes in WSNs. However, [10] only aimed at maintaining coverage by using a subset of nodes in an active or awake state, their objective was not to maximize coverage area per unit energy consumed.

This paper therefore proposes a coverage control scheme which aims at maximizing the coverage per unit energy consumption and is designed to operate in an adversarial malicious environment. In particular, we

proposed to integrate the DVF algorithm which is an adaptive and distributed multi-agent coverage control scheme [7] with a secure topology maintenance protocol (TMP) [10] against malicious node attacks in WSNs. More specifically, we incorporated a TMP countermeasure i.e. *probing* to verify the local states and active nodes within a neighboring area before increasing or reducing its coverage to allow tolerance against attacks from multiple nodes within a node's transmission range. Our contribution centers on the integration of the probing mechanism to the DVF scheme and its performance evaluation against sleep deprivation, snooze and network substitution attacks.

II. MULTI-AGENT COVERAGE CONTROL

A multi-agent coverage control scheme called the Distributed Value Function (DVF) has been a common approach to coordinately and cooperatively improve the coverage control performance in wireless sensor networks [7-9]. In this method, each node communicates and exchanges information about its value function. A value function is a function that quantifies how well the agent at a node performs at a given state $s \in S$ where S is a discrete set of all possible states of the sensor network. Let $a \in A$ be the action selected by an agent, where A is the discrete set of all possible actions available at each state. The rule, so called policy π , is defined as a rule which the agent selects actions as a function of states. In other words, it is the mapping from a state $s \in S$ and action $a \in A$ to the probability of selecting action a at state s . The *value function* of state s under a given policy π is formally defined by

$$V^\pi(s) = E^\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \mid s_t = s \right\}, \text{ where } r_{t+1} \text{ is the}$$

reward of taking a particular action in a given state s at time t , γ is the discount factor and $E^\pi \{ \cdot \}$ is the expectation operator. Similarly, we define the *action value function* of taking action a at a given state under policy π by

$$Q^\pi(s, a) = E^\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \mid s_t = s, a_t = a \right\}.$$

The objective is to find a policy π^* such that $\pi^* = \underset{\pi}{\operatorname{argmax}} Q^\pi(s, a)$. To achieve this objective, each agent i (node) in the DVF algorithm performs an update of its own action value function. The update rule at time step t for agent i is given by [7]:

$$Q_{t+1}^i(s_t^i, a_t^i) = (1 - \alpha) Q_t^i(s_t^i, a_t^i) + \alpha (r_{t+1}^i(s_{t+1}^i) + \gamma \sum_{j \in \operatorname{Neigh}(i)} f^i(j) V_t^j(s_{t+1}^j)) \quad (1)$$

$$V_{t+1}^i(s_t^i) = \max_{a \in A^i} Q_{t+1}^i(s_t^i, a) \quad (2)$$

where α is the learning rate, $f^i(j)$ are factors that weigh the value functions of the neighbors of agent i such that:

$$f^i(j) = \begin{cases} \frac{1}{|\operatorname{Neigh}(i)|} & , \text{ if } \operatorname{Neigh}(i) \neq 0 \\ 1 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

where $j \in \operatorname{Neigh}(i)$ is the set of neighbors of node i [7]. Hence, in the DVF algorithm, nodes cooperate not only with their direct neighbors but with all the nodes since the value function captures information about other nodes which are not direct neighbors as well. Therefore, the DVF algorithm is strongly dependent on cooperation from other nodes in the network through the last summation term on the right hand side of equation (1). The information exchange (i.e. the value functions of other nodes) in the DVF algorithm is vulnerable to malicious nodes attacks, as such information may be falsely exchanged by a compromised node. This has motivated us to improve the resilience of the DVF algorithm to malicious nodes.

III. MALICIOUS NODE ENVIRONMENT

So far the DVF algorithm has been studied under the assumption that all nodes in the WSN are cooperative [7]. Hence, like other topology maintenance and coverage control schemes assuming this condition, DVF is vulnerable to security attacks where malicious nodes send spoofed or false messages to defeat the objective of the algorithm. This section describes the types of attacks that could occur in a WSN [10]. These attacks could potentially be used to reduce the lifetime of the sensor network, or reduce the achievable network connectivity and sensing coverage.

Sleep deprivation attack: In this type of attack, the adversary tries to induce a node in a specific area to remain active. This attack has two effects. First, by increasing the energy expenditure of sensor nodes, it reduces the estimated lifetime of the network. Second, in the case of a densely populated area, it can lead to increased energy consumption due to congestion and contention at the data link layer.

Snooze attack: In this type of attack, the adversary forces the nodes to remain in the sleeping state. This kind of attack can be applied to the whole network or to a subset of nodes. In the latter case, the adversary can launch an attack to jeopardize the connectivity of the network or to reduce the sensing coverage in a region. For example, an adversary can selectively turn off nodes that are monitoring an intruder's path through an area in which a sensor field has been deployed for surveillance.

Network substitution attack: In this type of attack, the adversary deploys some nodes, which are in a set elected by the TMP, to gain control of part of or the entire network. Once these nodes are under control, the

adversary can carry out other attacks such as sharing false or inaccurate information or readings with other nodes. This type of attack is difficult to detect since the compromised node can still maintain connectivity and appear as it were operating as normal.

IV. SECURE MULTI-AGENT COVERAGE CONTROL

In order to make the DVF coverage control scheme more robust to malicious node attacks, TMP probing procedures were integrated into the DVF framework. The probing mechanism verifies whether there are active or inactive nodes in a node's transmission range before decision take any action (i.e. changing the size of coverage area). In particular, in our proposed algorithm, a node can tolerate attacks by up to t nodes within its transmission range.

To study the coverage control performance of a WSN under attack, a lighting control application of a room represented by a 10 x 10 grid was studied as shown in Figure 1. This room contains a group of five agents deployed on five nodes with light sensing capabilities, labeled M1 to M5. Each of them has a light source that can illuminate the part of the room surrounding the agent. The objective is for the agents to learn to cooperate with one another, in presence of malicious nodes, in order to completely illuminate the room in an energy-efficient way, i.e. minimize the number of lights turned on. The area of agent i , denoted as a^i , refers to the 5 x 5 grid square centered on agent i .

We define three modes for each sensor node, i.e., sleep mode, work mode and probe mode. In sleep mode, a node becomes inactive. In probe mode, a node has just awoken from the sleep mode but is checking on other nodes in its transmission range whether they are active or not, prior to taking any decision. In work mode, nodes are active and can decide to become inactive (since their cells may already be covered by other nodes) or to use low or high coverage. On the other hand, in the original DVF algorithm, a node collects and exchanges data with its neighboring nodes, and immediately decides whether to be in an active (awake) or to be inactive (asleep) state. In our proposed integrated DVF and TMP algorithm, before a node enters work mode, it enters probe mode to check whether or not there exists other nodes within its transmission range already in work mode or not.

Local agent state: Each agent i can sense the level of light in its area. Its local state s^i is state of each agent based on its mode and coverage. The state of mode consists of three modes i.e. sleep mode, work mode and probing mode. In sleep mode, there is 1 possible state (i.e. no lit cells). In probing and work modes, each has 26 possible states. Therefore, there are 53 possible states (1+26+26) for the system given by:

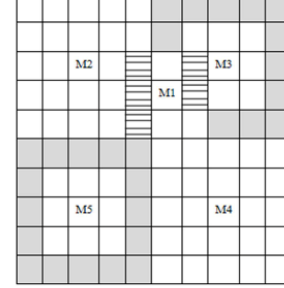


Figure 1. A 10x10 grid room representation. Grey cells are not illuminated, white cells are illuminated by one node and striped cells are illuminated by two nodes.

$$s^i = (\text{state of mode}, \text{state of coverage}) = (s_m^i, s_c^i)$$

where $s_m^i \in \{\text{sleep mode}, \text{probe mode}, \text{work mode}\}$ and $s_c^i \in \{0, \dots, 25\}$.

Local agent actions: Each agent i has the ability to take one of the following three actions in any state it lands in. The action space A^i is the set of all possible actions for each state $A^i = \{\text{Action 0 (Turn off the light), Action 1 (Turn on the light in LOW coverage. This illuminates 9 cells around the agent, as shown by M1, M3 and M5 in Fig.1), Action 2 (Turn on the light in HIGH coverage. This illuminates the 25 cells around the agent, as shown by M2 and M4 in Fig.1), and Action 3 (Send probe to neighbors and wait for a response within a finite time. This action allows the agent to sense the illuminated cells within its range prior to deciding to take Action 0, Action 1 or Action 2)}\}$. Once an action is taken, the current local state of the agent transits to a new local state accordingly as shown in Figure 2.

Note that in the distributed learning schemes such as the DVF algorithm, the agents use only information that is locally available to make their decisions. The reward for agent i , denoted as $r^i(s^i)$ is a function of agent i 's state s^i at time t and is defined by:

$$r^i(s^i) = G^i(s^i) - C^i \quad (4)$$

where $G^i(s^i)$ is a function of the number of cells illuminated in the area of agent i such that

$$G^i(s^i) = nb_cell_bright(a^i) \times GAIN_CELL_BRIGHT, \quad (5)$$

and C^i is the energy consumption resulting from the action taken by agent i at time t such that

$$C^i = \begin{cases} 0 & , \text{if Action 0 was taken} \\ \text{COST_LOW} & , \text{if Action 1 was taken} \\ \text{COST_HIGH} & , \text{if Action 2 was taken} \\ \text{COST_PROBE} & , \text{if Action 3 was taken} \end{cases} \quad (6)$$

The reward functions and state transitions for the proposed DVF+TMP algorithm are shown in Figure 2. Note that when the agent decides to take Action0, a reward G is obtained since the local cells could still be lit by neighboring nodes and the cost is zero since no energy is consumed if the agent becomes inactive. For other actions, the agent is rewarded with G subtracted by a non-zero cost in (6).

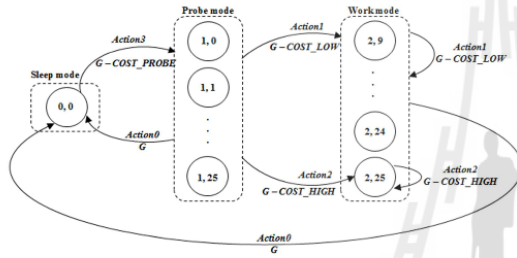


Figure 2. State transition diagram of the probing mechanism in the DVF+TMP algorithm.

Four performance metrics were considered: 1) the average reward per time step defined by:

$$\text{average reward} = \frac{\sum_{t=0}^T r^i(s_t^i)}{T}, \quad (7)$$

where T is the total number of time steps, and $r^i(s_t^i)$ is given by (4); 2) the average energy consumption; 3) the percentage of coverage area from good (uncompromised) nodes defined as the total number of cells illuminated by all good nodes at a time step divided by the total number of cells in the system; and 4) the trade-off which is defined by:

$$\text{Trade-off} = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{i \in \mathcal{I}} \text{number of lit cells by agent}_i(t)}{\sum_{t=0}^T \sum_{i \in \mathcal{I}} \text{energy consumption by agent}_i(t)} \quad (8)$$

Note that the trade-off in the above equation reflects the total number of illuminated cells throughout the simulation over the total amount of energy consumption. The trade-off represents the number of illuminated cells

(coverage) per unit energy consumed. It is expected that the better the system can deal with malicious nodes, the better (and more efficient) the uncompromised sensor nodes can decide and therefore the higher the trade-off.

In the simulation, we used $\text{GAIN_CELL_BRIGHT} = 0.5$, $\text{COST_LOW} = 0.8$, $\text{COST_HIGH} = 3$, $\text{COST_PROBE} = 0.5$ the learning rate $\alpha = 0.4$ and the discount factor $\gamma = 0.7$. The values of the learning rate and discount factor were obtained from experimenting a range of values and selecting the parameters which received the best performance in terms of average reward per time step. The run length of each simulation was $T = 20,000$ time steps and the results were averaged over 10 runs to achieve the desired accuracy.

V. RESULTS AND ANALYSIS

A. Sleep Deprivation and Snooze Attacks

We assigned each agent to encounter sleep deprivation attack and snooze attack and then analyze the results in Figures 3-6. Note also the percentages of coverage in the normal situation (no attack) are also shown in Figures 3 and 5 (represented by DVF and DVF+TMP). Denote "M1-w", "M2-w", "M3-w", "M4-w", "M5-w" for cases when agent 1, 2, 3, 4 and 5 were each attacked by sleep deprivation, respectively. Similarly, denote "M1-s", "M2-s", "M3-s", "M4-s", "M5-s" for cases where agent 1, 2, 3, 4 and 5 were each attacked by snooze attack, respectively. As a benchmark to compare the effects from malicious nodes, i.e., sleep deprivation and snooze attacks, we observe how each agent operates in the normal situation. We compared our proposed integrated DVF and TMP algorithm (abbreviated by DVF+TMP) with the original DVF algorithm (abbreviated by DVF).

Figure 3 depicts the sleep deprivation effect on the percent coverage of the DVF algorithm compared with the proposed DVF+TMP algorithm. In case of sleep deprivation attack on agents 2, 3, 4, and 5, we can see that the percentage of coverage for each case achieved at 75%. Furthermore, for each case, convergence to a policy which obtained the most coverage was achieved. However, in the case when agent 1 was attacked by sleep deprivation, the original DVF algorithm attained zero coverage. Note that agent 1 was located in the center of the area and its coverage overlapped those of agent 2, 3, 4, and 5 (see Figure 1). Such result showed that when agent 1 was under sleep deprivation attack, all the other good (uncompromised) agents in the system were falsely led to converge to sleep mode thereby attaining zero good node coverage with the original DVF scheme. On the other hand, when agent 1 was attacked by sleep deprivation, the proposed DVF+TMP algorithm can attain 75% percentage of coverage. Figure 4 shows the trade-off results. In the cases of sleep deprivation attack on agent 2, 3, 4, 5 achieved the maximum tradeoff that

could be achieved, thereby agreeing with the percentage of coverage results. Note that in the case when agent 1 was attacked, we can see that the average coverage per energy consumption unit of DVF+TMP was significantly better than the original DVF algorithm.

Figures 5, 6 illustrate the snooze attack effect on the percentage of coverage and the trade-off in both algorithms. In Figure 5, when agent 2, 3, 4 were attacked by snooze attack, the final coverage results of the DVF+TMP algorithm obtained were up to 5% 10% 10% respectively is more than those of the DVF algorithm. Note that when agent 1 was under snooze attack, both algorithms eventually attained 100% coverage. This was because all agents must work in HIGH mode when agent 1 was attacked, in which case was the optimal policy for the system. When considering the trade-off in Figure 6, we can see that all agents depicted similar patterns though the DVF+TMP algorithm consistently gave a better trade-off (i.e. more cells illuminated per unit energy) than the DVF algorithm.

So far the nodes under attack have been predetermined. In the next experiment, we evaluated the performance of the DVF and DVF+TMP algorithms when the malicious nodes were randomly generated. Tables 1 and 2 show the results as the number of malicious nodes were increased from 0 (normal situation) to 4 (worst case scenario). Table 1 shows results from DVF and DVF+TMP algorithms under the sleep deprivation attack. Although the average rewards were increased as a result of the attack, the average energy consumption was high. However, the DVF+TMP algorithm achieved higher average reward per unit energy consumed than the DVF algorithm alone. On the contrary, Table 2 shows that as the number of nodes under snooze attack increased, the average reward dropped significantly along with the energy consumption. Once again, our algorithm attained more average reward than the DVF alone. Furthermore, under this attack, the average reward per unit energy consumed by the DVF+TMP scheme was also higher than the DVF algorithm. The results in Tables 1 and 2 agreed with the trade-off in Figures 3 and 5, indicating that our method can achieve more coverage per unit energy consumed than the DVF alone.

B. Network Substitution Attacks

In this subsection, we study the performance of the two algorithms in presence of network substitution attacks. Under this type of attack, the adversary takes control of a node in the system. The compromised node can still maintain connectivity and appear to operate normally. However, since it is completely controlled by the adversary, it can carry out other types of attacks such as selective or complete packet dropping, traffic analysis, send false or inaccurate readings or information. We assume that the compromised node exchanges inaccurate

information with other agents. We assume that the degree of inaccuracy is inserted by multiplying the value function in the last summation term in (1) by a parameter ξ randomly chosen from the interval $[1-\xi_{max}, 1+\xi_{max}]$ where $\xi_{max} = 0.25, 0.5, 0.75$ and 1 . Each agent encountered such attack and the results obtained were averaged over all agents. Figure 7 depicts the percentage of achievable coverage obtained from different degrees of inaccurate value functions on each algorithm under normal situation (with no sleep deprivation or snooze attacks), sleep deprivation and snooze attacks, respectively. The higher the degree of inaccuracy, the less the coverage achieved. This confirms our motivation that distributed coverage control schemes rely on node cooperation and thereby are vulnerable to malicious node attacks. Furthermore, for each scenario, the DVF+TMP algorithm consistently outperforms the DVF algorithm alone by gaining up to 12%, 25% and 8% more coverage in the normal situation (with no other attacks), sleep deprivation and snooze attacks, respectively.

The effects of inaccurate value functions on the average reward, average energy consumption, and the ratio of the two parameters are shown in Tables 3, 4 and 5 for the normal situation (with no sleep deprivation or snooze attacks), sleep deprivation and snooze attacks, respectively. From the three tables it can be seen that as the degree of inaccuracy increases, the average reward from both algorithms decreased accordingly. However, the DVF+TMP algorithm consumed less average energy than the DVF algorithm alone therefore achieved higher efficiency in terms of average reward per unit energy consumed for all cases.

All of these results suggested that the DVF alone relies strongly on the cooperation among agents and is vulnerable to security attacks. The proposed DVF+TMP scheme can enhance the security and can cope with sleep deprivation, snooze and network substitution attacks, thereby improving the resilience of the distributed coverage control scheme.

VI. CONCLUSION

In this paper, we proposed the DVF+TMP coverage control scheme based on the integration of a distributed learning scheme for multi-agent systems called the DVF algorithm and a secure topology maintenance protocol (TMP) to countermeasure sleep deprivation, snooze and network substitution attacks in WSNs. To evaluate its performance, a lighting control application was studied. The results showed that in the presence of malicious nodes in the system, the original DVF algorithm was directly affected suggesting that the DVF algorithm alone strongly relies on the cooperation between nodes. However, results showed that the proposed DVF+TMP algorithm was more resilient to malicious node attacks by achieving up to 75% and 10% of coverage more than the DVF algorithm alone under sleep deprivation and snooze attack, respectively. The proposed algorithm also

attained a better trade-off in terms of the number of cells illuminated per unit energy consumed. Similar results were achieved when the presence of malicious nodes in the system were increased. Furthermore, in the network substitution attack where various degrees of inaccurate information of value functions were exchanged, the DVF+TMP algorithm gained up to 12%, 25% and 8% of coverage than the DVF algorithm alone for the normal, sleep deprivation and snooze attack cases, respectively. The proposed algorithm also consistently achieved more average reward per unit energy consumed than the DVF algorithm.

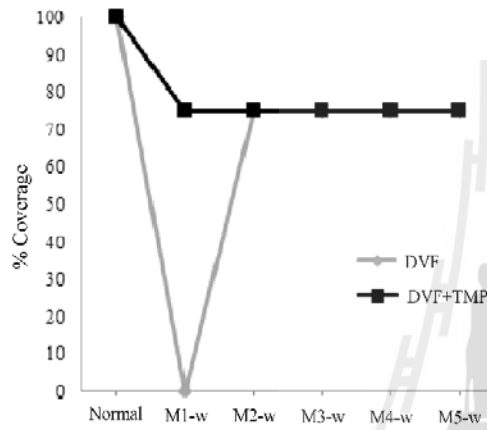


Figure 3. Sleep deprivation effect on the percentage of coverage.

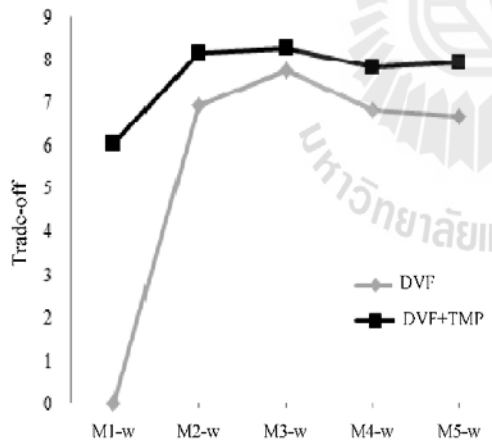


Figure 4. Sleep deprivation effect on the trade-off.

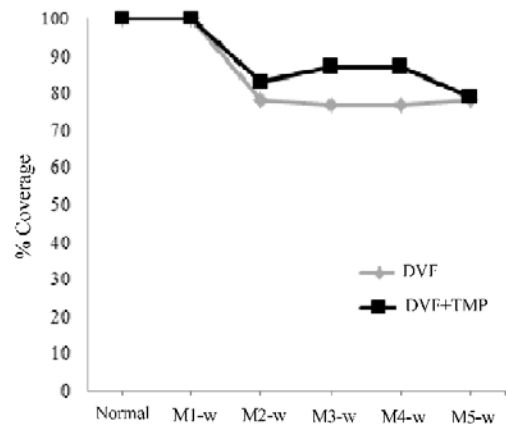


Figure 5. Snooze effect on the percentage of coverage.

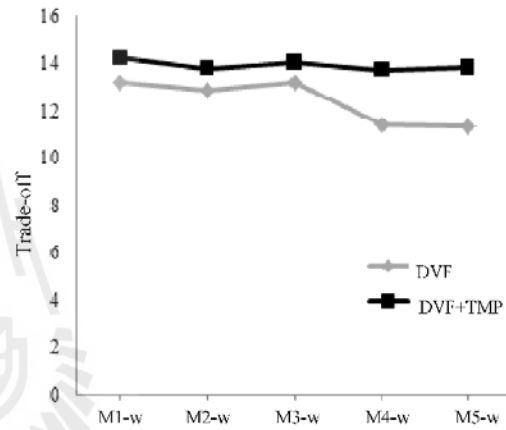


Figure 6. Effect of the number of snooze attacked nodes on the percentage of coverage.

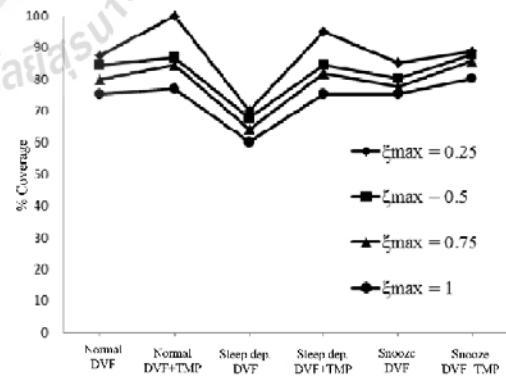


Figure 7. Effect of inaccuracy on the percentage of coverage.

TABLE I. RANDOMLY GENERATED SLEEP DEPRIVATION ATTACK RESULTS.

No. of attacked nodes	Coverage control schemes					
	DVF algorithm			DVF+TMP algorithm		
	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed
0	6.19	1.18	5.23	6.59	1.21	5.45
1	8.57	1.60	5.35	8.98	1.64	5.47
2	9.33	1.80	5.18	9.65	1.80	5.36
3	9.85	1.95	5.04	10.35	2.04	5.07
4	10.21	2.09	4.88	11.13	2.12	5.26

TABLE II. RANDOMLY GENERATED SNOOZE ATTACK RESULTS.

No. of attacked nodes	Coverage control schemes					
	DVF algorithm			DVF+TMP algorithm		
	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed
0	6.19	1.18	5.23	6.59	1.21	5.45
1	3.03	0.75	4.06	5.39	0.88	6.15
2	1.87	0.62	3.03	4.39	0.80	5.50
3	1.26	0.49	2.58	3.34	0.55	6.06
4	1.03	0.44	2.36	2.98	0.54	5.49

TABLE III. EFFECT OF INACCURACY IN NORMAL SCENARIO.

$\xi_{\max}$	Coverage control schemes					
	DVF algorithm			DVF+TMP algorithm		
	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed
0.25	7.14	1.54	4.63	7.90	1.55	5.11
0.5	7.11	1.56	4.57	7.84	1.54	5.11
0.75	7.08	1.55	4.58	7.76	1.53	5.09
1	7.02	1.55	4.55	7.67	1.51	5.07

TABLE IV. EFFECT OF INACCURACY INSLEEP DEPRIVATION SCENARIO.

$\xi_{\max}$	Coverage control schemes					
	DVF algorithm			DVF+TMP algorithm		
	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed
0.25	7.20	1.56	4.63	7.91	1.52	5.20
0.5	7.10	1.55	4.60	7.58	1.49	5.09
0.75	6.90	1.54	4.49	7.21	1.50	4.81
1	6.70	1.53	4.37	6.87	1.49	4.61

TABLE V. EFFECT OF INACCURACY INSNOOZE ATTACK SCENARIO.

$\xi_{\max}$	Coverage control schemes					
	DVF algorithm			DVF+TMP algorithm		
	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed	Avg reward	Avg energy consumed	Avg reward / Avg energy consumed
0.25	6.89	1.58	4.36	7.76	1.57	4.95
0.5	6.86	1.57	4.32	7.57	1.56	4.86
0.75	6.77	1.56	4.30	7.28	1.52	4.80
1	6.63	1.54	4.29	7.01	1.51	4.65

ACKNOWLEDGEMENT

This work is financially supported by the Telecommunication Research Industrial and Development Institute (TRIDI), National Telecommunication Commission Fund, Thailand.

REFERENCES

- [1] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris, "Span: An energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks", ACM Wireless Networks Journal, Vol. 8 (5), Sep 2002.
- [2] A. Cerpa and D. Estrin, "ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies", IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol. 3 (3), Jul-Aug 2004.
- [3] F.Ye, G. Zhong, S. Lu, L. Zhang, "PEAS: A Robust Energy Conserving Protocol for Long-lived Sensor Networks.", Proc. of the 23rd IEEE Intl. Conf. on Distributed Computing System (ICDCS'03), May 2003.
- [4] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, C. Gill, "Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks", ACM Trans. on Sensor Network (TOSN), Vol. 1 (1), Aug 2005.
- [5] P. Vaz de Melo, F. da Cunha, J. Almeida, A. Loureiro, and R. Mini, "The Problem of Cooperation Among Different Wireless Sensor Networks", Proceedings of the International Symposium on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, 2008.
- [6] S. Singsanga, W. Hattagam, H.T Ewe, "Packet Forwarding in Overlay Wireless Sensor Networks Using NashQ Reinforcement Learning", Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP'10), Dec 2010.
- [7] C.K. Tham, J.C. Renaud, "Multi-agent systems in sensor networks: A distributed reinforcement learning approach", Proceedings of the 2005 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, December 2005.
- [8] M.W.M. Seah, C.K Tham, V. Srinivasan and A. Xin "Achieving Coverage through Distributed Reinforcement Learning in Wireless Sensor Network", International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information, pp. 425-430, Dec. 2007.
- [9] J.C. Renaud and C.K. Tham "Coordinated sensing coverage in sensor network using distributed reinforcement learning", IEEE International Conference on Networks, ICON '06, Vol. 1, pp. 1-6, Feb. 2007.
- [10] A. Gabrielli, L. V. Mancini, S. Setia, and S. Jajodia, "Securing Topology Maintenance Protocols for Sensor Network", IEEE Trans. on Dependable and Secure Computing, Vol.8 (3), pp.450-465, May-Jun.2011.

ประวัตินักวิจัย

ผศ.ดร. วิภาวี อุสาหะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ระดับปริญญาโทและปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยอิมพีเรียลลอนดอน ในเครือมหาวิทยาลัยลอนดอนกรุงลอนดอน สหราชอาณาจักร ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

