

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาเอกสารและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์เพื่อลดการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยเนื้อหาแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 กล่าวถึงลักษณะโดยทั่วไปของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ส่วนที่ 2 กล่าวถึงโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางของ Ad-Hoc Mobile Wireless Network ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์ ส่วนที่ 4 กล่าวถึงข่ายงานระบบประสาท (Neural Network) และส่วนสุดท้ายกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์บนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

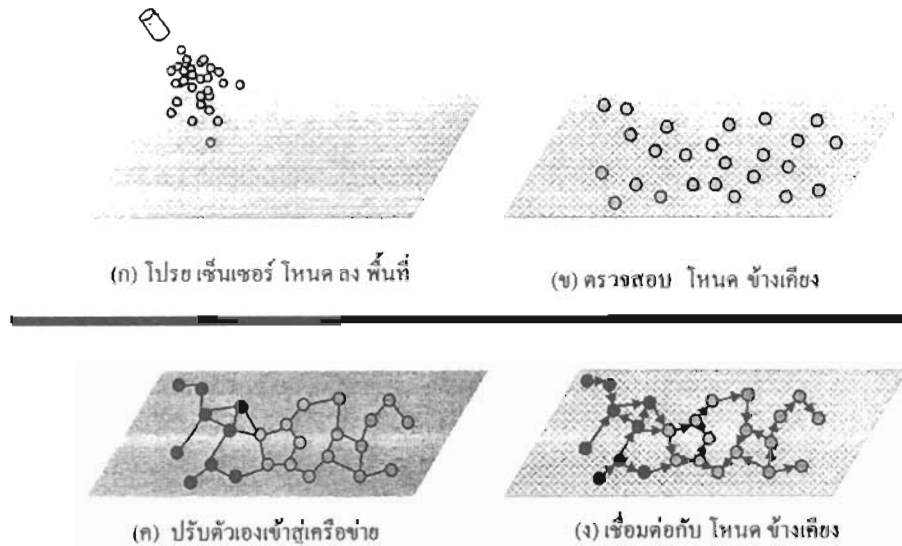
2.1 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2.1.1 คำนิยาม

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย หรือ Wireless Sensor Network (WSN) คือ เครือข่ายไร้สายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานเป็นอิสระกระจายตัวอยู่ในพื้นที่ต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ (Sensor) สำหรับตรวจสอบสภาพแวดล้อมทางกายภาพ ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ เสียง การสั่นสะเทือน แรงดัน การเคลื่อนที่ หรือ ปริมาณสารพิษ ในพื้นที่ที่แตกต่างกัน ความก้าวหน้าของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแรกเริ่มนั้นได้รับแรงกระตุ้นมาจากการใช้งานทางการทหาร เช่น การควบคุมในสนามรบ อย่างไรก็ตาม การใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในปัจจุบัน กลับพบมากในงานที่เกี่ยวข้องกับพลเรือน ภาวะสิ่งแวดล้อม การตรวจสอบถิ่นที่อยู่ของพืชและสัตว์ งานด้านการดูแลสุขภาพ Smart home และการควบคุมการจราจร[11, 14]

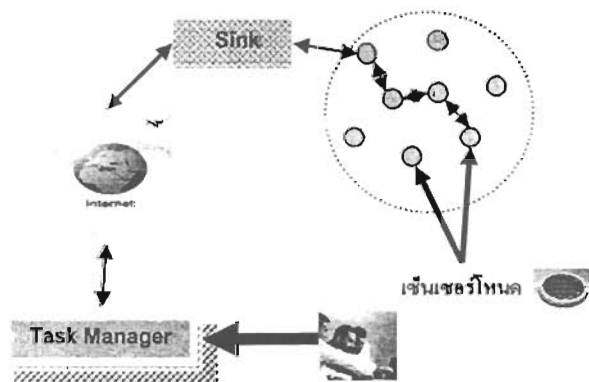
แต่ละโหนดที่อยู่ในเครือข่ายเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณวิทยุ อุปกรณ์สื่อสารไร้สายอย่างอื่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ขนาดเล็ก และแหล่งจ่ายพลังงาน โดยปกติจะใช้แบตเตอรี่ ซึ่งขนาดของเซ็นเซอร์โหนด แต่ละหน่วยอาจมีขนาดเท่ากับกล่องรองเท้าไปจนถึงขนาดเล็กเท่ากับผงฝุ่น ราคาของเซ็นเซอร์โหนดจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 100 ดอลลาร์ไปจนถึง 1-2 เซนต์ [11] ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานกับขนาดของเครือข่ายเซ็นเซอร์ต่างๆ และความซับซ้อนของเซ็นเซอร์โหนดแต่ละตัว ข้อจำกัดในเรื่องขนาดและค่าใช้จ่ายของเซ็นเซอร์โหนด

จะมีผลสอดคล้องกับข้อจำกัดในเรื่องของทรัพยากรที่ติดตั้งอยู่กับเซ็นเซอร์ในแต่ละตัว เช่น พลังงาน หน่วยความจำ ความเร็วในการคิดคำนวณ และช่วงความถี่ของคลื่นวิทยุ [14]



ภาพที่ 2-1 สภาพทั่วไปของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

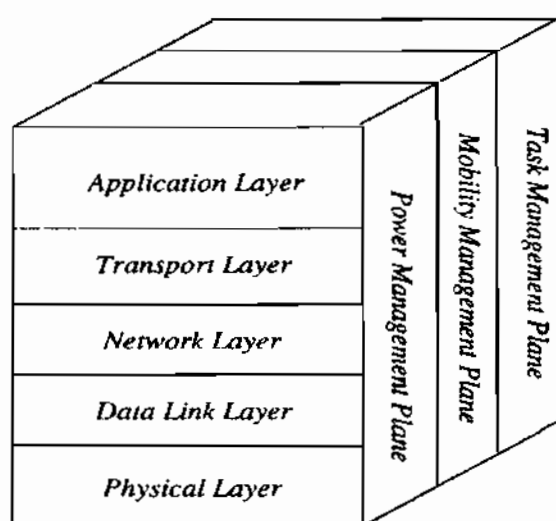
เซ็นเซอร์โหนดจะถูกโปรยให้กระจายตัวกันในพื้นที่ต่าง ๆ และเชื่อมโยงถึงกันเป็นระบบเครือข่าย ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ตำแหน่งที่ตั้งของเซ็นเซอร์โหนดที่ถูกโปรยลงไปในแต่ละพื้นที่นั้นไม่จำเป็นต้องมีการคาดเดาหรือการตัดสินใจไว้ล่วงหน้า นั่นคือ ขอมให้มีการสุ่มที่จะปรับปรุงการกระจายตัวลงไป ปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยากและพื้นที่ที่ประสบภัยพิบัติได้ตลอดเวลา ดังนั้น โปรโตคอลที่ใช้กันในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางจะต้องควบคุมสมรรถภาพการทำงานของแต่ละโหนดให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรับ-ส่งข้อมูลจากต้นทางไปถึงปลายทางได้อย่างถูกต้อง สมบูรณ์



ภาพที่ 2-2 การทำงานกับเซ็นเซอร์โหนดที่อยู่ในพื้นที่เซ็นเซอร์

เมื่อเซ็นเซอร์โหนดถูกโปรยลงในพื้นที่ ผู้ใช้สามารถเชื่อมโยงเข้าไปที่เซ็นเซอร์โหนดได้โดยผ่านทางช่องทางการสื่อสารต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ใช้งาน เช่น เครือข่าย Internet หรือ ช่องสัญญาณดาวเทียม ผู้ใช้สามารถ ควบคุม/สั่งให้เซ็นเซอร์โหนดทำงานตามที่ต้องการได้ ดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 2-2

2.1.2 The Sensor Network Protocol Stack



ภาพที่ 2-3 เซ็นเซอร์ Network Protocol Stack [10]

ในส่วนของการบริหารจัดการจะเป็นส่วนที่ช่วยให้เซ็นเซอร์โหนดสามารถทำงานได้โดยจะใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ค้นหาข้อมูลเส้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์และแบ่งปันการใช้งานทรัพยากรต่างๆ ระหว่างโหนดควบคู่กันไป โดยการบริหารจัดการนั้นสามารถแบ่งหน้าที่การทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

2.1.2.1 ส่วนการจัดการพลังงาน (Power Management Plane) เป็นส่วนใช้สำหรับจัดการให้เซ็นเซอร์โหนด สามารถใช้พลังงานอย่างไรให้เกิดประสิทธิภาพที่สุด ตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์โหนด อาจจะทำการปิดการรับข้อมูลหลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้ว ทั้งนี้เพื่อประหยัดพลังงานและช่วยป้องกันไม่ให้รับข้อมูลซ้ำซ้อนกัน หรือเมื่อระดับพลังงานใน เซ็นเซอร์โหนด อยู่ในระดับต่ำ เซ็นเซอร์โหนด ก็จะทำการเผยแพร่ข้อมูลแจ้งไปยังโหนดข้างเคียงว่าขณะนี้พลังงานอยู่ในระดับจำกัดไม่สามารถเข้าร่วมในการรับ-ส่งข้อมูลในการค้นหาเส้นทางได้

2.1.2.2 การจัดการการเคลื่อนย้าย (Mobility Management Plane) จะทำหน้าที่ในการตรวจจับและลงทะเบียนการเคลื่อนย้ายของเซ็นเซอร์โหนด หลังจากนั้นก็จะแจ้งข้อมูลที่เกิดการ

เปลี่ยนแปลงให้กับผู้ใช้ทราบเพื่อทำการปรับปรุงข้อมูล ซึ่งเซ็นเซอร์โหนดสามารถรักษาข้อมูลเส้นทางการเดินทางของโหนดที่เป็นโหนดข้างเคียงของเซ็นเซอร์โหนดได้

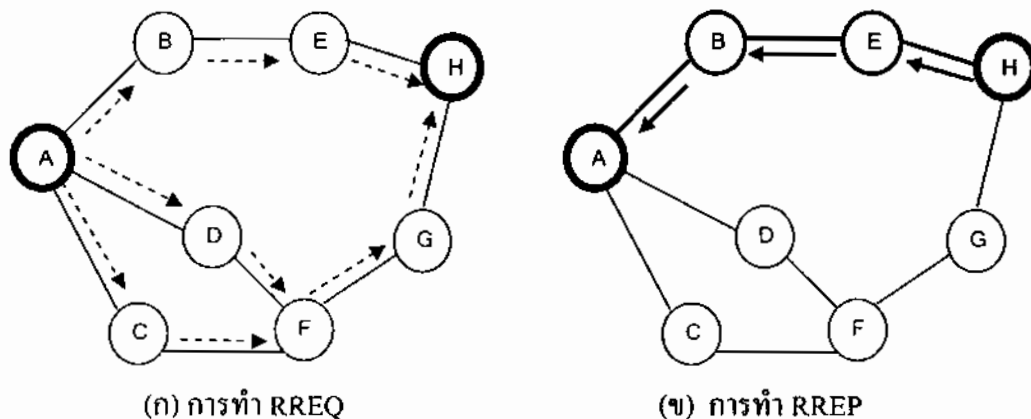
2.1.2.3 การจัดการภาระงาน (Task Management Plane) ทำหน้าที่ในการปรับสมดุลและตารางเวลาของ Sensing เพื่อให้เหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆ ได้ เนื่องจากในบางพื้นที่นั้นอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ เซ็นเซอร์ โหนด ทั้งหมดที่มีอยู่ในพื้นที่นั้นในเวลาเดียวกัน

2.2 โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางของ Ad-Hoc Mobile Wireless Networks

โพรโทคอลในการค้นหาเส้นทาง แบบ On-demand Routing จะทำการสร้างเส้นทางในการรับ-ส่งข้อมูลเมื่อมีการร้องขอมาจากโหนดปลายทางเท่านั้น นั่นคือ เมื่อมีโหนดร้องขอให้มีการสร้างเส้นทางรับ-ส่งข้อมูลไปยัง โหนด ปลายทาง โพรโทคอลก็จะเริ่มขั้นตอนการ Route Discovery ภายในเครือข่าย ซึ่งขั้นตอนนี้จะเสร็จสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อมีการสร้างเส้นทางที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางได้ และเส้นทางที่สร้างไว้นั้นจะยังคงถูกเก็บรักษาไว้ให้สามารถใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลได้ โดยการทำ Route Maintenance จนกระทั่งเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งไม่มีการรับส่ง-ข้อมูลโดยใช้เส้นทางนี้เป็นเวลานาน หรือไม่มีการเรียกใช้เส้นทางนี้ แล้วจึงยุติการทำ Route Maintenance ขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางแบบ On-demand Routing ที่รู้จักกันดีและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ Ad-Hoc On demand Distance Vector (AODV) และ Dynamic Source Routing (DSR)

2.2.1 Ad-Hoc On Demand Distance Vector (AODV)

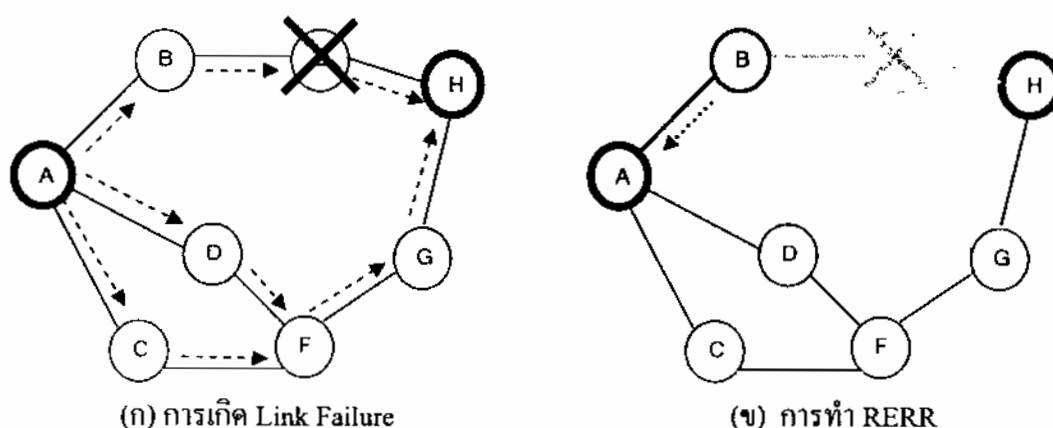
Ad-Hoc On Demand Distance Vector[5] คือ โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่พัฒนาขึ้นมาจาก DSDV Algorithm[6] เนื่องจาก AODV ถูกออกแบบมาเพื่อลดจำนวน Packet ที่ส่งออกไปในขั้นตอน Route Discoveryให้น้อยที่สุด และโดยอาศัย DSDV Algorithm ในการทำ Route Maintenance



ภาพที่ 2-4 การทำ Route Discovery ของ AODV

จากภาพที่ 2-4 (ก) เมื่อ โหนดต้นทาง A ต้องการที่จะส่ง Packet ไปยัง โหนดปลายทาง H และในขณะนั้นไม่มีเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับส่งข้อมูลไปยัง โหนดปลายทาง H อยู่เลย AODV จะเริ่มต้นด้วยการทำ Route Discovery โดยการแพร่กระจาย Route Request (RREQ) Packet ไปยัง โหนดข้างเคียง เมื่อ RREQ ถูกส่งต่อไปยังโหนดข้างเคียง โหนดข้างเคียงก็จะทำการตรวจสอบว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทางหรือไม่ หากไม่ใช่ก็จะทำการแพร่กระจาย RREQ ไปยัง โหนดข้างเคียง และทำวิธีการนี้ต่อไป จนกว่า RREQ จะถูกส่งต่อไปจนถึง โหนดปลายทาง H AODV ใช้ประโยชน์จากตัวเลขที่เรียงลำดับไปยังปลายทางเพื่อความแน่ใจว่าทุกเส้นทางที่ได้รับนั้นจะไม่เกิด Loop-free และข้อมูลที่ได้รับนั้นเป็นข้อมูลที่เป็นปัจจุบัน โดยการแพร่กระจาย ID ไปกับ RREQ ด้วย ซึ่ง ID จะถูกเพิ่มเข้าไปยังทุกโหนด ที่ RREQ ผ่าน ควบคู่ไปกับหมายเลข IP Address ของแต่ละ โหนด ดังนั้นค่าที่ได้ของ RREQ จึงเป็นค่าเฉพาะในระหว่างขั้นตอนการส่งต่อ RREQ โหนด ต่างๆ ที่ถูกพบจะถูกบันทึกลงสู่ตารางเส้นทาง (Route Table) ของ โหนด ข้างเคียงโดยการคัดลอก Packet ที่ได้รับไว้ในลำดับแรก และทำวิธีการเดียวกันนี้เส้นทางเดินกลับด้วย ถ้าหากว่ามีการคัดลอก RREQ ซ้ำกับ RREQ ที่ได้รับก่อนหน้านี้ Packet นั้นก็จะถูกทิ้ง

เมื่อ RREQ เดินทางมาถึงโหนดปลายทาง โหนดนั้นก็จะตอบสนองต่อ RREQ โดยการส่ง RREP Packet กลับไปยังโหนดข้างเคียงที่พบเป็นลำดับแรกจาก RREQ ตามที่แสดง ในภาพที่ 2-4 (ข) ในขณะที่ทำ RREP กลับโดยผ่านเส้นทางเดิม โหนดที่อยู่ในเส้นทางนี้จะถูกเพิ่มเข้าไปใน Routing Table เพื่อสร้างเส้นทางสำหรับส่งข้อมูล การเพิ่มข้อมูลเข้าไปใน Routing Table นี้จะถูกพบอยู่ในเส้นทางของการส่งข้อมูล



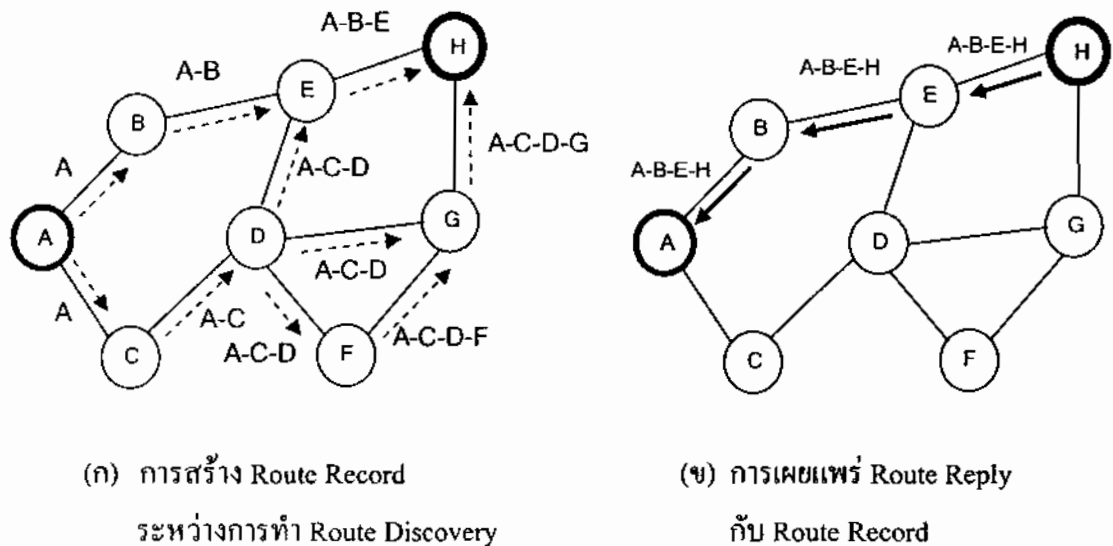
ภาพที่ 2-5 การทำ Route Maintenance ของ AODV

จากภาพที่ 2-5 ในกรณีที่เกิด Link Failure เนื่องจาก โหนด E ได้เกิดการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเดิมจึงทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลต่อได้ โหนด B จึงได้ส่ง Route Error กลับไปยัง โหนด A ซึ่ง

เป็นโหนดต้นทาง เพื่อแจ้งให้ทราบว่าขณะนี้เส้นทางที่ใช้อยู่ไม่สามารถส่งข้อมูลได้และทำการลบเส้นทางออกจากตารางเส้นทางและเริ่มทำ Route Discovery อีกครั้ง

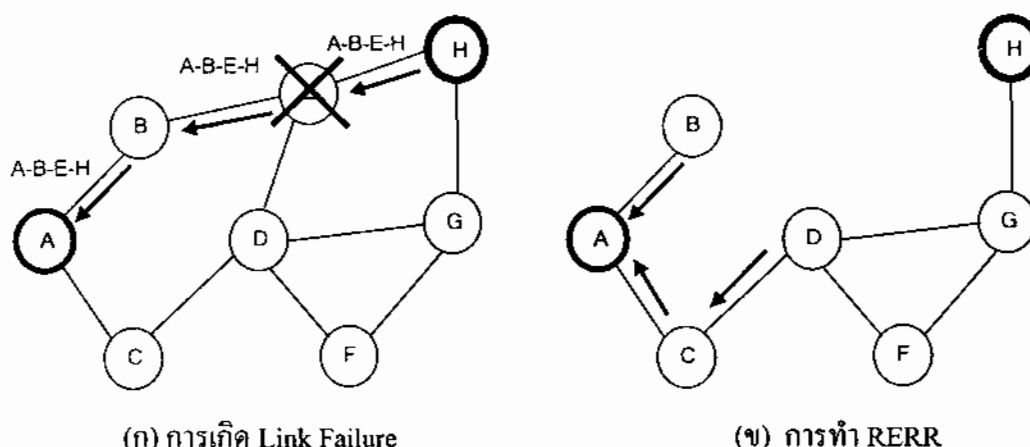
2.2.2 Dynamic Source Routing (DSR)

Dynamic Source Routing (DSR) [7] เป็นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบ On-demand Routing Protocol ที่มีกรอบความคิดในการทำงานมาจาก Source Routing โดยโหนดมีการร้องขอให้ทำ Route Maintenance ภายใน Cache ของเซ็นเซอร์โหนดซึ่งภายในจะบรรจุเส้นทางเชื่อมต่อไปยังโหนดต่างๆ ที่พบอยู่ในเครือข่ายตลอดเวลา เมื่อมีโหนดเพิ่มเข้ามาหรือเปลี่ยนตำแหน่งก็จะปรับปรุง Routing Table ใหม่ทุกครั้ง



ภาพที่ 2-6 การทำ Route Discovery ของ DSR

การทำงานของ DSR แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ Route Discovery และ Route Maintenance เมื่อ โหนด มี Packet ที่ต้องการส่งไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะพิจารณาเส้นทางที่มีอยู่ใน Cache Memory ว่ามีเส้นทางที่สามารถใช้งานได้สำหรับส่ง Packet ไปยังปลายทางได้หรือไม่ หากไม่มีก็จะเลือกเส้นทางในการส่ง Packet ออกไป แต่ถ้าหากว่าไม่พบเส้นทางใดเลยใน Cache Memory ที่สามารถใช้ส่ง Packet ออกไปได้ โหนดต้นทางนั้นก็จะทำการแพร่กระจาย Route Request Packet ออกไปเพื่อทำ Route Discovery ซึ่งภายใน Route Request Packet จะประกอบไปด้วยที่อยู่ของโหนดปลายทางกับ ที่อยู่ของโหนดต้นทางและ Packet ID เมื่อแต่ละโหนดได้รับ Route Request Packet นี้ ก็จะตรวจสอบว่าตัวเองเป็นโหนดปลายทางหรือไม่ หรือทราบเส้นทางที่จะไปยังโหนดปลายทางหรือไม่ ถ้าไม่ทราบก็จะเพิ่มที่อยู่ของตัวเองเข้าไปยัง Route Record ของ Packet จากนั้นจึงส่งต่อ Packet ต่อไปจนกว่าจะถึง โหนด ปลายทาง เมื่อพบโหนด ปลายทางจึงทำการสร้าง Route Reply ตอบกลับไปยัง โหนด ต้นทางแล้วจึงเริ่มส่งข้อมูล



ภาพที่ 2-7 การทำงานของ DSR ในส่วน Route Maintenance

การทำงานของ DSR ในส่วนที่สองคือ Route Maintenance ซึ่งใช้ในการตรวจสอบเส้นทาง ขณะที่ถูกใช้ส่งข้อมูลถ้าตรวจพบว่าเส้นทางขาดก็จะใช้เส้นทางอื่นหรือใช้ Router Discovery ในการค้นหาเส้นทาง โดยแต่ละโหนดที่ส่งข้อมูลจะรับผิดชอบการรับข้อมูลของโหนดใน Hop ถัดไป ถ้าไม่ได้รับการตอบกลับภายในระยะเวลาที่กำหนดก็จะส่งข้อมูลไปอีกครั้งหรือจนกว่าจะถึงค่าที่กำหนดไว้ก็จะส่ง Route Error กลับไปให้โหนดต้นทางทราบ เพื่อลบเส้นทางนี้ออกจาก Cache Memory และใช้เส้นทางอื่นที่มีใน Cache Memory ส่งข้อมูล ถ้าไม่มีเส้นทางที่ต้องการก็จะส่ง Packet หาเส้นทางใหม่อีกครั้ง

2.3 โพรโทคอลค้นหาเส้นทางบนพื้นฐานด้านภูมิศาสตร์ (Geographic Based Routing Protocol)

โพรโทคอลเชิงภูมิศาสตร์ (Geographic Protocol) มีบทบาทสำคัญสำหรับการทำงานบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเนื่องจากโพรโทคอลเหล่านี้ใช้ประโยชน์จากการใช้ข้อมูลแหล่งที่ตั้งของแต่ละโหนดในการค้นหาเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลซึ่งมีความเสถียรภาพมากกว่าโพรโทคอลทั่วไปและสามารถทำงานในเครือข่ายที่มีขนาดต่างๆ กันได้ ในสภาพแวดล้อมแบบไร้สายแหล่งที่ตั้งของแต่ละโหนดจะทำการเชื่อมต่อกันภายในเครือข่าย โดยโพรโทคอลเชิงภูมิศาสตร์จะประกอบไปด้วยสภาพแวดล้อมต่างๆ ทางธรรมชาติ ซึ่งการได้รับข้อมูลแหล่งที่ตั้งก็จะแตกต่างกันไปตามแต่ละระบบที่เลือกมาใช้งาน ตัวอย่างเช่น Global Position System (GPS) , Infrastructure Base Localization System และ Ad-hoc Localization System [15] เป็นต้น

ขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์จะจัดเตรียมวิธีการในการส่ง Packet ไปยังแหล่งที่ตั้งปลายทาง โดยมีพื้นฐานการทำงานที่ใช้ข้อมูลเฉพาะแห่งเท่านั้นและไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างพื้นฐานที่สร้างขึ้นมาเฉพาะ ขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์คือองค์ประกอบพื้นฐานหลัก

สำหรับโพรโทคอลเชิงภูมิศาสตร์โดยข้อมูลแหล่งที่ตั้งของโหนดที่มีในการค้นหาเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

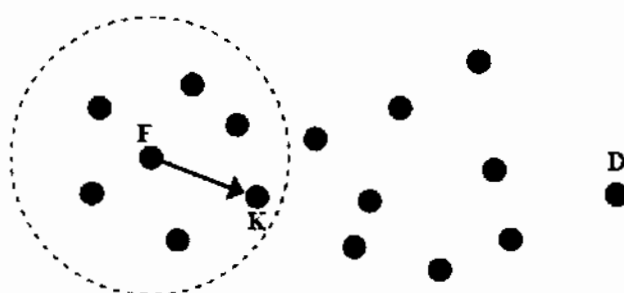
การค้นหาเส้นทางใน Ad-hoc Network และเครือข่ายเซ็นเซอร์มีเป้าหมายสำคัญ คือ สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงและมีทรัพยากรให้ใช้อย่างจำกัด แต่ก็ยังมีขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางจำนวนมากที่ไม่ได้ใช้ข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ในการค้นหาเส้นทาง ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย แบ่งได้เป็น Proactive (ทำการปรับปรุงเส้นทางอยู่ตลอดเวลา), Reactive (สร้างเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูลเท่านั้น) หรือ Hybrid ที่ใช้การหลักการทำงานทั้งแบบ Proactive และ Reactive ซึ่งการค้นหาเส้นทางแบบนี้จะประสบกับปัญหาเรื่องของ Overhead ที่มีขนาดใหญ่ในการปรับปรุงเส้นทางเมื่อเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้การ Flooding Packet หรือการ Update สถานะการเชื่อมโยง ซึ่งปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบให้เป็นข้อจำกัดในเรื่องการปรับขนาดและความมีประสิทธิภาพของการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการนี้

ในทางกลับกันโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์จะใช้ข้อมูลแหล่งที่ตั้งของโหนดจึงทำให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเครือข่ายแบบไร้สายเนื่องจาก 1) แต่ละโหนดต้องการทราบข้อมูลแหล่งที่ตั้งและเส้นทางเชื่อมโดยตรงไปยังโหนดข้างเคียงของตัวเองเพื่อสร้างเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลเชื่อมต่อกันโดยตรง 2) แต่ละโพรโทคอลจะพยายามประหยัดการใช้พลังงานและแบนด์วิธ (Bandwidth) 3) ในเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายได้บ่อย วิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบ่อยได้อย่างรวดเร็วและสามารถค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูลใหม่ได้อย่างรวดเร็วโดยการเรียกใช้ข้อมูลรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายเฉพาะแห่งได้

2.3.1 วิธีการค้นหาเส้นทาง

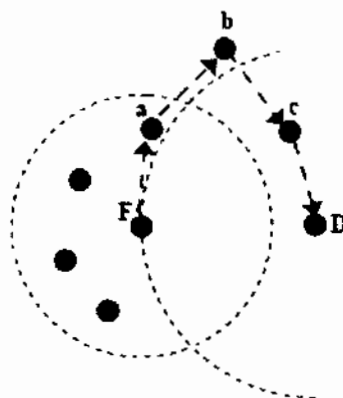
ในขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์ แต่ละ โหนด ต้องการทราบแหล่งที่ตั้งโดยตรงของแต่ละโหนดข้างเคียง (ที่อยู่ภายในรัศมีการรับ-ส่งสัญญาณ) ที่ตำแหน่งต้นทางจะแทรกแหล่งที่ตั้งปลายทางเข้าไปใน Packet ในระหว่างที่มีการส่งต่อ Packet แต่ละโหนด ก็จะใช้ข้อมูลแหล่งที่ตั้งของโหนดข้างเคียง และแหล่งที่ตั้งของโหนดปลายทางในการส่งต่อ Packet ไปยัง Hop ถัดไป การส่งต่อสามารถส่งต่อไปยังโหนดเดียวหรือหลายโหนด ก็ได้ แต่การส่งไปยังหลายโหนดจะช่วยให้เพิ่มความทนทานและก่อให้เกิดเส้นทางได้หลายเส้นทางที่จะไปยังโหนดปลายทางแต่ก็มีข้อเสียคือ จะเกิดการสูญเสียการใช้งานทรัพยากร (พลังงานและแบนด์วิธ) เป็นจำนวนมาก ซึ่งในความจริงแล้ว การส่งต่อข้อมูลไปที่โหนด เพียงโหนดเดียวก็สามารถทำให้เกิดความมีประสิทธิภาพได้ถ้าทำงานอยู่ภายใต้วิธีการของ Unicast Protocol

ส่วนประกอบหลักของขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์ คือ Greedy Forwarding ซึ่งส่งต่อแต่ละ Packet ไปครั้งละโหนดตลอดทั้งเส้นทาง โดยแต่ละโหนดจะส่งต่อ Packet ไปยังโหนดข้างเคียงที่มีตำแหน่งใกล้กับโหนดปลายทางมากกว่าตัวมันเองจนกว่า Packet จะเดินทางไปถึงโหนดปลายทาง ซึ่งถ้าโหนดนั้นมีข้อมูลแหล่งที่ตั้งด้วยแล้ว Greedy Forwarding สามารถป้องกันการเกิด Loop ได้



ภาพที่ 2-8 Greedy Forwarding [15]

ภาพที่ 2-8 แสดงการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์ที่ทำการส่งต่อข้อมูลด้วยวิธีการ Greedy Forwarding โหนด F ส่งต่อ Packet ไปยัง โหนด K ที่เป็น โหนดข้างเคียงและมีระยะทางใกล้กับโหนดปลายทางคือ โหนด D ที่สุด



ภาพที่ 2-9 วิธีการปรับเปลี่ยนเส้นทางของ Greedy Forwarding เมื่อเกิดความล้มเหลว [14]

ภาพที่ 2-9 แสดงการเกิดความล้มเหลวในการส่งต่อข้อมูลด้วยวิธีการ Greedy Forwarding ที่ โหนด F เนื่องจากการเกิด Voids หรือ Dead-Ends จึงทำให้ไม่สามารถส่ง Packet ต่อไปยัง โหนด D ได้ จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนเส้นทางส่งไปใช้เส้นทางที่ไกลออกไป คือ F-a-b-c-D แทน

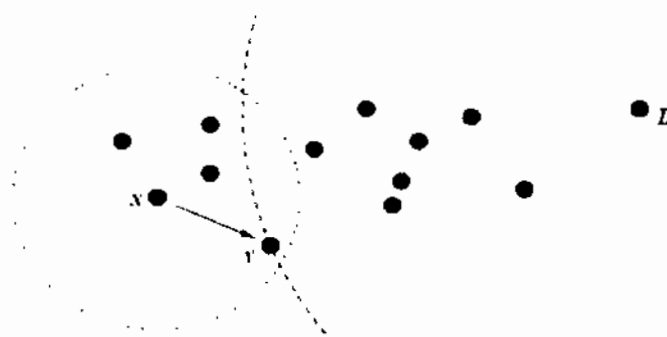
2.3.2 ความไม่ถูกต้องของข้อมูลแหล่งที่ตั้ง

โดยปกติแล้วพื้นฐานการทำงานของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์จะมีการคาดการณ์ถึงข้อมูลแหล่งที่ตั้ง เนื่องจากมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลดังกล่าวในขั้นตอนการทำงาน อย่างไรก็ตามในระบบการระบุแหล่งที่ตั้งที่มีใช้งานทั่วไปจะมีการประมาณค่าความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับการทำงานของแต่ละระบบและสภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ในขณะนั้น ตัวอย่างเช่น ระบบของ GPS ที่สามารถเทียบเคียงกับความเป็นจริงได้ แต่ระบบ GPS ต้องการใช้งานในบริเวณที่เห็นได้ชัดจากดาวเทียมและไม่สามารถทำงานในอาคารหรือพื้นที่ที่มีสิ่งอื่นปกคลุมได้ นอกจากนี้ก็มีค่าใช้จ่ายสูง ขนาดใหญ่และจำเป็นต้องใช้พลังงานในการทำงานจึงทำให้ไม่สามารถนำ GPS มาติดตั้งกับเซ็นเซอร์โหนดได้ สำหรับใน Ad-hoc Location System [15] โหนดสามารถคำนวณแหล่งที่ตั้งของตัวเองได้จากการวัดจากโหนดข้างเคียง หรืออ้างอิงจากโหนดอื่นๆ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อม การที่มีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของโหนดสูงสามารถเกิดได้จากผลกระทบของปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น มีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้นจากการประมาณแหล่งที่ตั้งของโหนด ที่เพิ่มเติมจากนั้น คือ ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการเผยแพร่แหล่งที่ตั้งของโหนดไปยังโหนดอื่นให้สามารถนำไปใช้ในการอ้างอิงได้

2.3.3 Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

GPSR[2] เป็นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับ Wireless Datagram Network ที่ใช้ตำแหน่งของ Router และ ตำแหน่งปลายทางของ Packet ในการตัดสินใจเพื่อส่งต่อ Packet GPSR จะตัดสินใจเพื่อทำ Greedy Forwarding โดยใช้ข้อมูลของ Router ที่ปรากฏเป็นโหนดข้างเคียงในเครือข่าย เมื่อ Packet ทำการค้นหาไปพบพื้นที่ที่ Greedy Forwarding ไม่สามารถทำได้ GPSR ก็จะทำการ Recovery โดยการทำ Perimeter กับพื้นที่นั้นเพื่อหาเส้นทางส่งข้อมูลใหม่ที่ถูกต้องได้อย่างรวดเร็ว

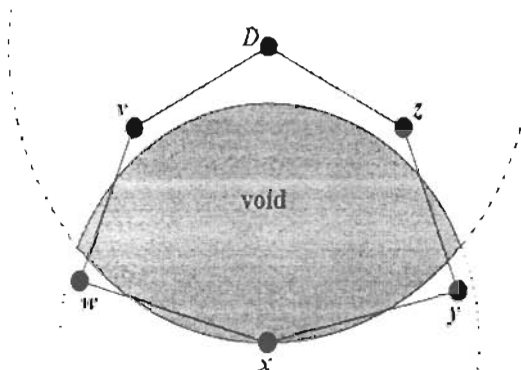
2.3.3.1 Greedy Forwarding Mode



ภาพที่ 2-10 การทำงานของ GPSR ใน Greedy Forwarding Mode

การทำงานภายใต้ GPSR Packet จะถูกทำเครื่องหมายจุดเริ่มต้นจากตัวเองกับแหล่งที่ตั้งปลายทาง เพื่อส่งต่อ Packet ไปยัง โหนดถัดไปให้ได้ระยะทางที่ดีที่สุด โดยทางเลือกที่ดีที่สุดของ Greedy จะอยู่ใน Packet ของ Hop ถัดไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าโหนดรู้ตำแหน่งของโหนดข้างเคียงที่อยู่ในรัศมีของคลื่นวิทยุ ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดของ Hop ถัดไป คือ โหนดข้างเคียงที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกว่าตัวเอง GPSR ก็จะเลือกโหนดนี้เป็น Hop ถัดไปในการส่ง Packet การส่งต่อตามกฎเกณฑ์นี้ คือ การส่งไปตามพื้นที่ที่ใกล้เคียงตามสภาพภูมิศาสตร์ต่อเนื่องกันไป จนกระทั่งเจอจุดหมายปลายทาง จากตัวอย่างการเลือก Hop ถัดไปของ Greedy ใน ภาพที่ 2-9 จากจุดเริ่มต้น โหนด x รับ Packet ที่ถูกกำหนดไว้แล้วว่าให้ส่งไปยัง โหนด D ช่วงสัญญาณวิทยุของ โหนด x จะแสดงตามเส้นจุดที่เป็นวงกลมและเส้นโค้งกับรัศมีเท่ากับระยะทางระหว่าง โหนด y และ โหนด D เส้นประที่แสดงในภาพคือเส้นโค้งของ โหนด D โหนด x เลือกที่จะส่ง Packet ต่อไปยัง โหนด y เนื่องจากระยะทางระหว่าง โหนด y และ โหนด D น้อยกว่าระยะทางจาก โหนด x ไป โหนด D และทั้งคู่ต่างก็เป็น โหนด ข้างเคียงซึ่งกันและกัน เมื่อตัดสินใจได้แล้ว Greedy ก็ทำการส่ง Packet ต่อไปเรื่อยๆ ตามขั้นตอนที่กล่าวมา จนกว่า Packet นั้นจะถูกส่งไปยังปลายทาง คือ โหนด D

2.3.3.2 Perimeters Forwarding Mode

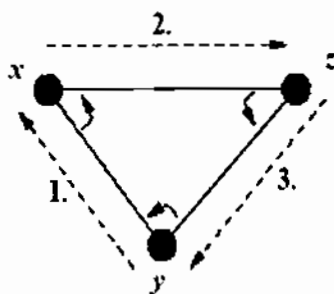


ภาพที่ 2-11 การทำงานของ GPSR เมื่อเกิดความล้มเหลว

จากภาพที่ 2-11 GPSR จะเกิดความล้มเหลวเมื่อ Packet เดินทางมาถึงบริเวณพื้นที่ไม่สามารถส่งต่อไปได้ นั่นคือ โหนด x ต้องการส่ง Packet ต่อไปยัง โหนด D ซึ่งเป็นจุดหมายปลายทาง แต่ในบริเวณดังกล่าวอยู่ระหว่างพื้นที่เกิดการ Intersection ของ โหนด x และ โหนด D เราเรียกพื้นที่นี้ว่า Void และเนื่องจากไม่มี โหนด ใดอยู่ในพื้นที่ดังกล่าวทำให้ โหนด x ไม่สามารถส่งข้อมูลต่อไปยัง โหนด D ได้ เมื่อเกิดเหตุการณ์แบบนี้ขึ้น GPSR จะแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนโหนดตัวเองจากการส่งแบบ Greedy Forwarding ไปสู่โหมดการทำงานที่เรียกว่า Perimeter Mode

โดยใช้กฎของ The Right Hand Rule เดินทางสำรวจรอบพื้นที่ Void หาเส้นทางที่สามารถส่ง Packet ไปยังจุดหมายปลายทาง

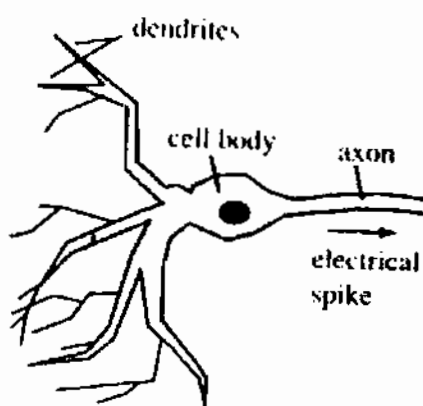
2.3.4 The Right-Hand rule



ภาพที่ 2-12 The right-hand rule

จากภาพที่ 2-12 แสดงให้เห็นการทำแผนที่เส้นรอบวงโดยการส่ง Packet ไปสำรวจรอบพื้นที่นั้น โดยใช้กฎ The Right-Hand Rule สถานะต่างๆ ที่สำรวจได้จะถูกเก็บสะสมเข้าสู่ Cache Memory ของ โหนด เมื่อมีการ Recover จาก Local Maxima ในขั้นตอนของ Greedy Forwarding จะนำข้อมูล โหนดที่อยู่ใกล้เคียงที่เก็บใน Cache Memory มาใช้ วิธีการนี้ใช้ No-crossing Heuristic และ The Right-Hand Rule ในการหา Perimeters ที่ล้อมรอบ Voids

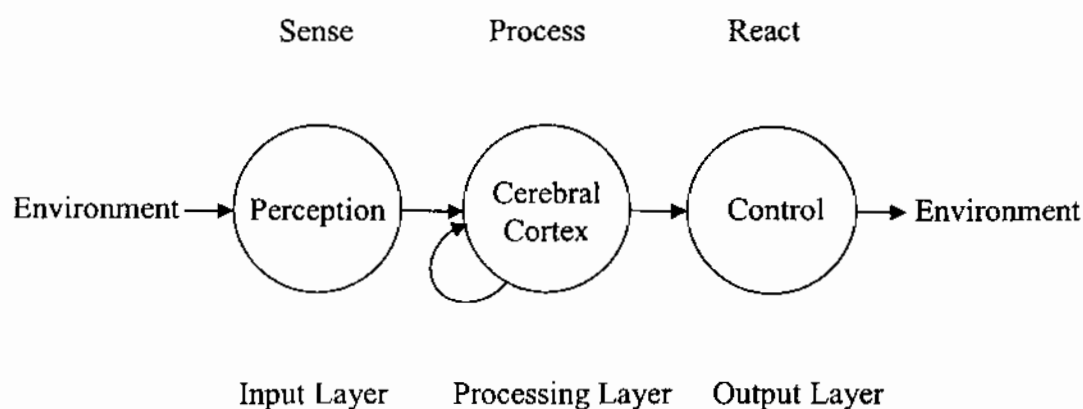
2.4 ข่ายงานระบบประสาท (Neural Network)



ภาพที่ 2-13 เซลล์ประสาท [4]

ข่ายงานระบบประสาท (Neural Network) เป็นการจำลองการทำงานพื้นฐานบางส่วนของสมองมนุษย์ ในสมองประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neuron) ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผล

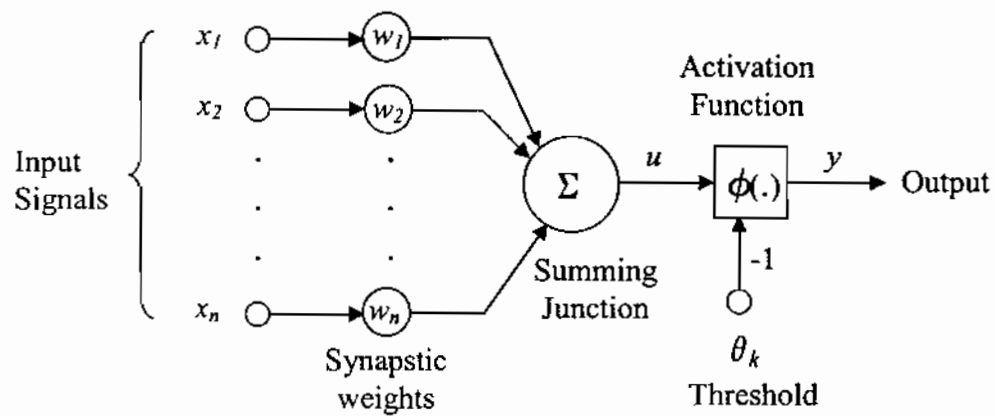
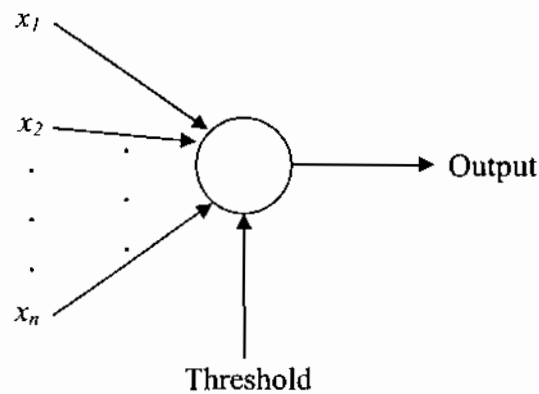
(Processing Element) เซลล์ประสาทเชื่อมต่อกันด้วยแกนประสาทนำออก (Axon) โดยมีใยประสาทนำเข้า (Dendrite) ทำหน้าที่รับข้อมูลเข้าสู่เซลล์ประสาท ในสมองมนุษย์มีเซลล์ประสาทประมาณ 10^{11} ตัว [4] แต่ละเซลล์เชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่นๆ ประมาณ 1,000 ตัว ยกเว้นในส่วนของ Cerebral Cortex ที่มีจำนวนเซลล์ประสาทมากกว่าบริเวณอื่น [12] โดยใยประสาทนำเข้า ทำหน้าที่รับสัญญาณไฟฟ้าเคมีซึ่งส่งมาจากเซลล์ประสาทอื่นที่เชื่อมต่อกัน เมื่อสัญญาณไฟฟ้าเคมีที่รับเข้ามาเกินค่าหนึ่ง เซลล์จะถูกกระตุ้นและส่งสัญญาณไปทางแกนประสาทนำออกไปยังเซลล์อื่น ๆ ต่อไป โครงสร้างของสมองมนุษย์นั้นซับซ้อนมาก แต่สามารถพิจารณาให้ง่ายขึ้นได้โดยมองการทำงานของสมองให้เป็นแบบลำดับชั้น โดยชั้นสำหรับข้อมูลเข้าใช้แทนการรับรู้ของมนุษย์ เช่น ระบบสัมผัสต่างๆ ชั้นของการประมวลผลคือการประมวลผลข้อมูลเข้า ส่วนชั้นข้อมูลออกคือพฤติกรรมที่แสดงออกเพื่อตอบสนองกับสิ่งแวดล้อมที่มากระทบ



ภาพที่ 2-14 รูปแบบการทำงานของสมองอย่างง่าย [12]

2.4.1 Single Layer Perceptron หรือ Perceptron

เป็นข่ายงานระบบประสาทรูปแบบหนึ่งประกอบด้วยหน่วยประมวลผลเพียงหน่วยเดียวข้อมูลเข้าสำหรับเพอร์เซ็ปตรอนจะถูกคูณด้วยค่าน้ำหนัก การทำงานของเพอร์เซ็ปตรอน คือ การคำนวณผลรวมของข้อมูลเข้า หักออกด้วยค่าขีดเริ่มเปลี่ยน(Threshold) และนำผลลัพธ์เข้าสู่ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) ซึ่งค่าที่ได้หลังจากผ่านฟังก์ชันกระตุ้นแล้ว คือคำตอบของเพอร์เซ็ปตรอน โดยทั่วไปฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในเพอร์เซ็ปตรอนมักเป็นฟังก์ชันแบบสองขั้ว (Bipolar Function) หรือฟังก์ชันไบนารี(Binary Function) ในช่วงแรกๆ ของงานวิจัยและพัฒนาข่ายงานระบบประสาทนั้น เพอร์เซ็ปตรอนเป็นรูปแบบของข่ายงานระบบประสาทที่ง่ายที่สุด ที่สามารถใช้จำแนกชุดข้อมูลที่แยกกันได้เชิงเส้น (Linearly Separable Patterns)



ภาพที่ 2-15 เพอร์เซ็ปตรอน [4]

จากภาพของเพอร์เซ็ปตรอนมีส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

- 1) คำนวณน้ำหนักการเชื่อมโยง (Connection Weights : Synapstic Weights)
- 2) การรวมค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงทั้งหมด (Summing Junction)

และสามารถแสดงการทำงานของเพอร์เซ็ปตรอนด้วยสมการ 2-1 และ 2-2 ดังนี้

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (2-1)$$

$$y = \phi(u - \theta) \quad (2-2)$$

โดยที่ x_i คือข้อมูลเข้าที่ i ของเพอร์เซ็ปตรอน

w_i คือค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงของข้อมูลเข้า x_i

θ คือค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

n คือมิติของเวกเตอร์ข้อมูลเข้า

u คือระดับกระตุ้นภายในสุทธิ

ϕ คือฟังก์ชันกระตุ้น

y คือข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน

ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเป็นแบบฟังก์ชันไบนารีข้อมูลออกจะมีค่าเป็น

$$y = \begin{cases} 0 & \text{if } u \geq 0 \\ 1 & \text{if } u < 0 \end{cases}$$

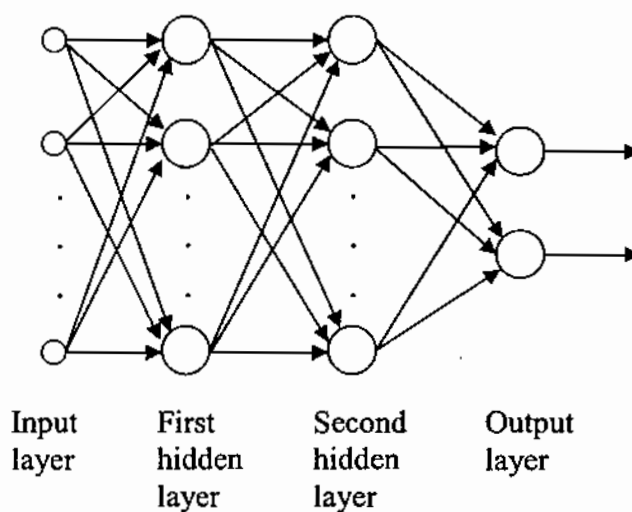
ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเป็นแบบฟังก์ชันสองขั้วข้อมูลออกจะมีค่าเป็น

$$y = \begin{cases} 1 & \text{if } u \geq 0 \\ -1 & \text{if } u < 0 \end{cases}$$

แม้ว่าเพอร์เซ็ปตรอนจะมีประสิทธิภาพและสามารถนำมาใช้เรียนรู้ฟังก์ชันทางตรรกะพื้นฐาน เช่น NOT Gate, OR Gate หรือ AND Gate ได้ แต่ไม่สามารถเรียนรู้ฟังก์ชันง่าย ๆ อย่าง Exclusive OR (XOR) ได้ เนื่องจากคำตอบที่ได้จากฟังก์ชัน XOR กับข้อมูลเข้ามีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น

2.4.2 มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน (Multilayer Perceptron)

ถูกสร้างขึ้นเพื่อแก้ปัญหการเรียนรู้ฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น เกิดจากการนำเพอร์เซ็ปตรอนหลายๆ ตัว มาจัดวางให้อยู่ในรูปของข่ายงานแบบลำดับชั้น โดยเพอร์เซ็ปตรอนในชั้นซ่อนที่หนึ่ง (First Hidden Layer) รับข้อมูลเข้าจากชั้นข้อมูลเข้า (Input Layer) ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนในชั้นซ่อนที่หนึ่ง จะเป็นข้อมูลเข้าสำหรับเพอร์เซ็ปตรอนในชั้นซ่อนที่สอง (Second Hidden Layer) ในทำนองเดียวกันข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนในชั้นซ่อนที่สองจะเป็นข้อมูลเข้าให้กับเพอร์เซ็ปตรอนในชั้นข้อมูลออก (Output Layer) ซึ่งปกติแต่ละเพอร์เซ็ปตรอนในแต่ละชั้นจะเชื่อมโยงไปยังทุกเพอร์เซ็ปตรอนของชั้นถัดไป (Fully Connected) และไม่มีการเชื่อมต่อข้ามชั้นหรือเชื่อมต่อย้อนกลับ



ภาพที่ 2-16 แผนภาพของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนแบบมี 2 ชั้นซ่อน [12]

โดยปกติข่ายงานแบบหลายชั้นจะไม่ใช่ฟังก์ชันกระตุ้นของเพอร์เซ็ปตรอนแบบไบนารีหรือฟังก์ชันสองขั้วแต่จะใช้ฟังก์ชันเชิงตรรกะ (Logistic Function) หรือฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic Tangent Function) สำหรับกรณีฟังก์ชันกระตุ้นเป็นฟังก์ชันเชิงตรรกะ ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมีค่าดังสมการที่ 2-3

$$y = \phi(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)} \quad (2-3)$$

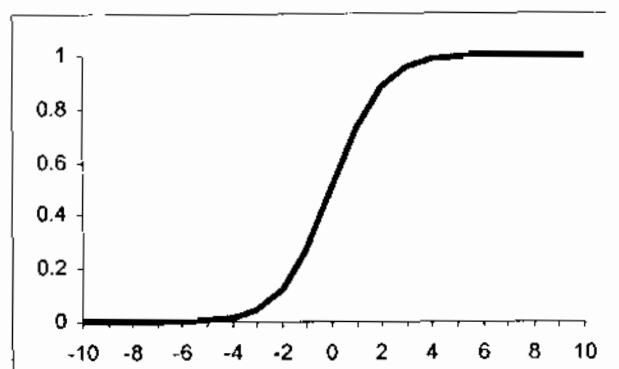
โดยที่ u คือระดับกระตุ้นภายในสุทธิ

y คือข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน

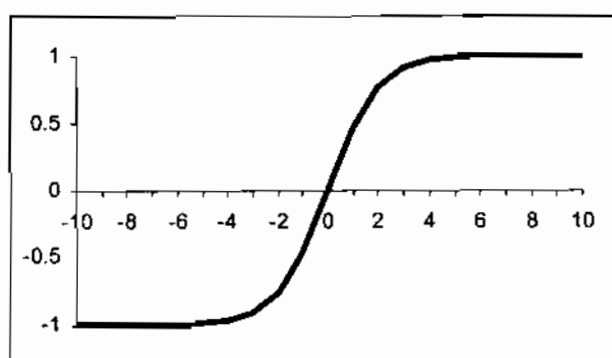
ส่วนกรณีที่ฟังก์ชันกระตุ้นเป็นฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมีค่าดังสมการที่ 2-4

$$y = \phi(u) = \frac{1 - \exp(-u)}{1 + \exp(-u)} \quad (2-4)$$

จากการใช้ฟังก์ชันเชิงตรรกะเป็นฟังก์ชันกระตุ้น ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมีพิสัยเป็น $0 < y < 1$ ตามที่แสดงในภาพที่ 2-17 ก) ส่วนการใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมีพิสัยเป็น $-1 < y < 1$ ตามที่แสดงในภาพที่ 2-17 ข)



ก)



ข)

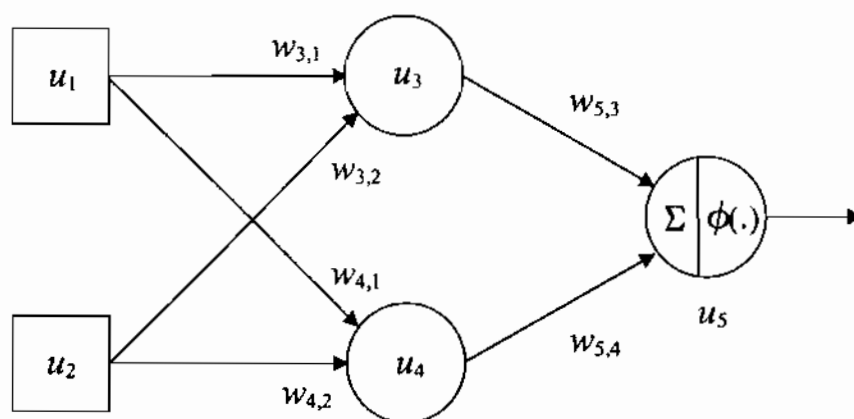
ภาพที่ 2-17 ก) พิสัยข้อมูลของฟังก์ชันเชิงตรรกะ[13] ข) พิสัยข้อมูลของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์ [13]

เมื่อเปลี่ยนฟังก์ชันกระตุ้นในเพอร์เซ็ปตรอนและนำมาประกอบกันเป็นข่ายงานของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน คุณสมบัติในการจำแนกของข่ายงานก็จะขยายขึ้นจากเดิมที่สามารถใช้เพอร์เซ็ปตรอนในการจำแนกชุดข้อมูลที่แยกกันได้เชิงเส้นเท่านั้น โดยที่มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนสามารถสร้างระนาบเกินไม่เชิงเส้น (Non-linear Hyper-plane) เพื่อใช้ในการจำแนกชุดข้อมูลที่แยกกันไม่ได้เชิงเส้นได้

2.4.3 การแพร่กระจายค่าผิดพลาดย้อนกลับ (Backward error Propagation : Back Propagation)

เป็นขั้นตอนวิธีสำหรับฝึกสอนข่ายงานประสาทแบบป้อนไปข้างหน้าหรือมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในชั้นข้อมูลออกจะถูกป้อนย้อนกลับเข้าไปในข่ายงานเพื่อปรับค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงในชั้นซ่อน และย้อนกลับไปยังชั้นข้อมูลเข้าตามลำดับ ขั้นตอนการทำงานของ การปรับค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงจะเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับค่าน้ำหนักเชื่อมโยงทั้งหมดโดยใช้วิธีสุ่มค่า โดยปกติแล้วจะเลือกค่าช่วงข้อมูลน้อยๆ ตัวอย่างเช่น ช่วง -0.05 ถึง 0.05 หรือ 0 ถึง 0.05 เป็นต้น และเพื่ออธิบายขั้นตอนวิธีการทำงาน

ของการแพร่กระจายค่าผิดพลาดย้อนหลัง จะอ้างอิงกับข่ายงานระบบประสาทตัวอย่างดังแสดงใน ภาพที่ 2-18



$$\begin{aligned} u_3 &= \phi(u_1 w_{3,1} + u_2 w_{3,2}) \\ u_4 &= \phi(u_1 w_{4,1} + u_2 w_{4,2}) \\ u_5 &= \phi(u_3 w_{5,3} + u_4 w_{5,4}) \end{aligned}$$

ภาพที่ 2-18 ตัวอย่างข่ายงานระบบประสาทเพื่ออธิบายขั้นตอนวิธีแพร่กระจายค่าผิดพลาดย้อนกลับ[13]

ในภาพที่ 2-18 ชั้นข้อมูลเข้ามี 2 หน่วยคือ u_1 และ u_2 ชั้นซ่อนมีเพอร์เซ็ปตรอน 2 หน่วยคือ u_3 และ u_4 ส่วนชั้นข้อมูลออกมีเพอร์เซ็ปตรอน 1 หน่วยคือ u_5 ค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงแทนด้วย w

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์บนเครือข่าย เซ็นเซอร์ไร้สาย

งานวิจัยของ Dongsin Son และคณะ[9] กล่าวถึง ผลกระทบเมื่อเกิดความผิดพลาดเรื่อง ตำแหน่งของโหนดที่มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสำหรับขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์ที่ ทำงานบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งการวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของ ข้อมูลแหล่งที่ตั้งของโหนดที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือย้ายตำแหน่งของโหนดบนโปรโตคอลค้นหา เส้นทางเชิงภูมิศาสตร์และได้กำหนดปัญหาหลัก 2 ปัญหาที่เป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ของโหนด ดังนี้

- 1) Lost Link Problem คือ ปัญหาที่เกิดจากการสูญหายของเส้นทางในการเชื่อมโยง
- 2) Loop Problem คือ ปัญหาการเดินเป็นวงรอบของ Packet

ผู้วิจัยได้นำเสนอแบบแผนวิธีในการทำนายการเคลื่อนที่ของโหนดสำหรับปัญหาดังกล่าว โดยในการทดลองได้เลือกปัจจัยที่ศึกษาหลัก 3 ประการคือ ความเร็วสูงสุดของโหนด, Beacon

Interval และตัวอย่างการเคลื่อนที่ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์ โดยอธิบายผลกระทบของปัจจัยนี้จากการทดสอบกับโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ทำงานบนพื้นฐานของตำแหน่งที่ตั้งของโหนด ซึ่งจากการทดลองพบว่า ปัจจัยเรื่องความเร็วสูงสุดของโหนดและ Beacon Interval ให้ผลทำนองเดียวกันกับทุกโมเดลการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม ระดับของผลกระทบที่ได้นั้นแสดงถึงความแตกต่าง เมื่อมีจำนวนโหนดที่เคลื่อนที่มากขึ้นจะมีผลกระทบอย่างมากกับโมเดลแบบ Freeway Mobility Model (FWY) และ Manhattan Mobility Model (MH) สำหรับปัจจัยเรื่อง Beacon Interval เมื่อมีช่วงความยาวมากจะมีผลกระทบกับประสิทธิภาพของ Random Waypoint Mobility Model และ Reference Point Group Mobility Model ลดลงเล็กน้อย ความแตกต่างเหล่านี้เป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างโมเดลการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ

ผลกระทบของการเคลื่อนที่ของโหนดในทางบวกและลบจะพบผลลัพธ์ได้ในการทดลองนี้ การระบุถึงปัญหาหลักทั้ง 2 แบบนั้น สาเหตุเกิดจากการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดตำแหน่งผิดพลาดและการค้นหาผลกระทบของการเคลื่อนที่ของโหนดไปในทางบวกเป็นปัญหาส่วนหนึ่งที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา ดังนี้ ปัญหาการสูญเสียเส้นทางการเชื่อมโยงมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของโหนดข้างเคียงและเส้นทางการส่งข้อมูลที่ไม่สมมาตร ปัญหาการเดินเป็นวงรอบของ Packet เกิดจากการเคลื่อนที่ของโหนดปลายทาง และการเกิดผลกระทบของการเคลื่อนที่ของโหนดในทางบวกสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับการทำนายแหล่งที่ตั้งของโหนดปลายทาง ซึ่งรูปแบบการทำนายการเคลื่อนที่ของโหนดจะประกอบไปด้วย การทำนายตำแหน่งที่ตั้งของโหนดข้างเคียงและการทำนายตำแหน่งที่ตั้งของโหนดปลายทาง โดยที่แต่ละส่วนประกอบ คือการแนะนำวิธีการรับมือเมื่อเกิดการสูญหายของเส้นทางการเชื่อมโยงและปัญหาการเดินวนรอบของ Packet โดยวิธีการทำนายตำแหน่งที่ตั้งของโหนดข้างเคียง พบว่าเมื่อจำนวนของการเกิดปัญหาการสูญหายของเส้นทางการเชื่อมโยงจะมีนัยสำคัญลดลงจากการประมาณตำแหน่งที่แท้จริงของโหนดข้างเคียงบนพื้นฐานการเคลื่อนที่ของโหนดในลำดับท้ายสุดและไม่นับโหนดที่เคลื่อนที่ออกไปจากรัศมีการส่งสัญญาณของผู้ส่ง วิธีการทำนายตำแหน่งที่ตั้งของโหนดปลายทางไม่จำเป็นที่โหนดจะต้องถูก Drop ใกล้เคียงกับโหนดปลายทางเท่านั้น ก็สามารถเดินด้วยวิธี The Right Hand Rule ได้ และเมื่อทำการทดสอบวิธีการทำนายทั้งสองแบบกับ GPRS ประสิทธิภาพของอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลและจำนวนของการพยายามส่ง Packet เมื่อเกิดการ Drop สำหรับโมเดลแบบ FWY เราพบว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีก 27% และลดอัตราการพยายามส่ง Packet เมื่อเกิดการ Drop 37%

งานวิจัยของ Seada และคณะ[16] กล่าวถึง ขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางเชิงภูมิศาสตร์ที่ทำงานบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีความเสียหายภายใต้เงื่อนไขว่าต้องใช้พลังงานสำหรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมโยงแบบไร้สายที่ใช้งานจริงบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีความไม่มั่นคงอย่างมาก

งานวิจัยของ Yu และคณะ [23] ได้บรรยายถึงการใช้ข้อมูลด้านภูมิศาสตร์ที่ชื่อว่า Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) ซึ่ง Protocol นี้จะเลือกเส้นทางที่จะส่ง Packet ไปยังพื้นที่ปลายทาง โดยพิจารณาจากปริมาณพลังงานและข้อมูลด้าน Geographic ของโหนดข้างเคียง สำหรับแนวคิดในการจำกัดจำนวนโหนดที่สนใจใน Direct Diffusion โดยการพิจารณาเฉพาะพื้นที่ที่แน่นอนมากกว่าที่จะทำการกระจายข้อมูลไปในเครือข่ายทั้งหมด ซึ่งจากวิธีการนี้ทำให้ GEAR สามารถรักษาลงานได้มากกว่าการทำด้วยวิธี Direct Diffusion

แต่ละโหนดใน GEAR จะเก็บค่าใช้จ่ายตั้งต้นและเรียนรู้ค่าใช้จ่ายในการค้นหาปลายทางโดยผ่านทางโหนดข้างเคียงของมัน ซึ่งค่าใช้จ่ายเริ่มต้นก็เกิดจากการรวบรวมพลังงานส่วนที่เหลือและระยะทางไปยังปลายทาง สำหรับค่าใช้จ่ายในการเรียนรู้ก็คือค่าใช้จ่ายเริ่มต้นที่ละเอียดเพิ่มขึ้นนั่นคือค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของโหนดนั้นในการค้นหาเส้นทางรอบๆ รอบโหนดในเครือข่าย ซึ่งรอบโหนดจะเกิดขึ้นเมื่อโหนดนั้นไม่มีโหนดข้างเคียงที่ใช้ระบุพื้นที่เป้าหมายของตัวเอง แต่ถ้าไม่มีรอบโหนด ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นก็จะเท่ากับค่าใช้จ่ายในการเรียนรู้ ค่าใช้จ่ายในการเรียนคือการเผยแพร่กลับ 1 Hop ทุกๆ เวลาที่ Packet ค้นหาปลายทางเมื่อเส้นทางได้ถูกคิดตั้งขึ้นสำหรับ Packet ถัดไปก็จะปรับตัวใหม่ ใน Algorithm นี้ก็จะแบ่งขั้นตอนการทำงาน ออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

(1) การส่งต่อ Packet ไปยังพื้นที่เป้าหมาย นั่นคือ เมื่อได้รับ Packet เข้ามาแล้ว โหนดก็จะทำการตรวจสอบกับโหนดข้างเคียงถ้ามีโหนดข้างเคียงหนึ่งที่อยู่ใกล้พื้นที่เป้าหมายมากกว่าโหนดมันเอง แต่ถ้ามีมากกว่า 1 โหนด ก็จะต้องเลือกโหนดที่อยู่ใกล้พื้นที่เป้าหมายที่สุดเป็น Hop ถัดไป แต่ถ้าหากโหนดข้างเคียงทั้งหมดอยู่ไกลออกไปนั่นก็หมายความว่ามิช้องโหนดเกิดขึ้น ในกรณีนี้จะต้องมีโหนดใดโหนดหนึ่งที่จะเลือกเส้นทางที่ส่ง Packet ต่อไปโดยใช้พื้นฐาน Learning Cost Function ซึ่งสิ่งที่ถูกเลือกจะต้องสอดคล้องกับภาวะการเรียนรู้ของค่าใช้จ่ายระหว่างการส่ง Packet

(2) การส่งต่อ Packet ที่อยู่ในพื้นที่ นั่นคือ ถ้า Packet มีการค้นหาพื้นที่ มันสามารถกระจายเข้าไปในพื้นที่ทั้งหมดได้โดยการส่งต่อข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ของตัวเองหรือทำการ Flooding แบบจำกัด การ Flooding แบบจำกัดจะทำงานได้ดีเมื่อเซ็นเซอร์โหนดไม่ได้กระจายกันอยู่อย่างหนาแน่น สำหรับในเครือข่ายที่มีการกระจายอยู่อย่างหนาแน่น การ Flooding ข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ของตัวเองจะใช้พลังงานมากกว่าวิธีการ Flooding แบบจำกัด

ใน GEAR ได้มีการเปรียบเทียบกับ GPSR ซึ่งเป็นโปรโตคอลหนึ่งที่ทำางอย่างง่ายในกลุ่มโปรโตคอลเชิงภูมิศาสตร์ นั่นคือใช้ Planar Graphs สำหรับแก้ปัญหาการยอหั่ว ในกรณีของ GPSR โดย Packet ที่เดินตามเส้นรอบวงของ Planar graph จะพบเส้นทางของมันเอง วิธีการ GRSSR จะลดจำนวนสถานะของโหนดที่จะต้องเก็บ เนื่องจากมันสามารถออกแบบสำหรับเครือข่าย Ad hoc ที่มีการเคลื่อนที่แบบทั่วๆ ไป และต้องการบริการแหล่งที่ตั้งและคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละโหนด GEAR ไม่ได้ลดการใช้พลังงานในการติดตั้งเส้นทางเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่จะทำงานได้ดีกว่า GPSR ในเรื่องของการส่ง Packet จากการผลลัพธ์ของการ Simulation แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่มีการกระจายของ Traffic ที่ไม่แน่นอน GEAR จะสามารถส่ง Packet ได้ในระดับ 70% - 80% มากกว่า GPSR