

การยืดอายุของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยกระจายการใช้พลังงานอย่างเท่าเทียม

ศรายุทธ ชเนศสกุลวัฒนา¹ โชติพัชร ภรณ์วลัย¹ และ Goutam Chakraborty²

¹คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

²Department of Software and Information Science, Iwate Prefectural University, Japan

Emails: sarayoot@gmail.com, chotipat@it.kmitl.ac.th, goutam@soft.iwate-pu.ac.jp

บทคัดย่อ

เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงาน (Energy-Aware Routing Protocol) บนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (Wireless sensor networks) โดยส่วนใหญ่ที่พบ จะเลือกใช้การแบ่งเครือข่ายออกเป็นกลุ่ม (Cluster) โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่ม (Cluster Head) ซึ่งเป็นตัวรับรู้ (Sensor) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้อื่น ๆ ภายในกลุ่ม แล้วส่งไปยังสถานีฐาน (Base Station) ถึงกระนั้นก็ตามจะยังคงมีตัวรับรู้บางตัวที่มีการใช้พลังงานมากกว่าตัวรับรู้อื่น ๆ เนื่องจากระยะทางในการส่งคลื่นวิทยุที่ห่างไกล หรือจำนวนข้อมูลที่ต้องส่งต่อ (Relay) เป็นจำนวนมาก การปรับกลุ่มของตัวรับรู้และหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลา จะทำให้พลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวในกลุ่มใกล้เคียงกัน แต่การปรับกลุ่มของตัวรับรู้จะมีค่าใช้จ่ายอื่น (Overhead) และต้องสูญเสียพลังงานในการติดต่อสื่อสารเพื่อการปรับเปลี่ยนกลุ่มทุกครั้ง ในงานวิจัยนี้เราจึงได้นำเสนอการใช้ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem) เข้ามาช่วยในการทำให้การกระจายตัวของพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายมีระดับใกล้เคียงกัน โดยการคำนวณอัตราส่วนของข้อมูลที่จะต้องส่งในตัวรับรู้แต่ละตัวที่จะถูกส่งออกไปยังตัวรับรู้อื่นก่อนจะถูกส่งต่อไปยังสถานีฐาน ทำให้ระดับพลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวอยู่ในระดับใกล้เคียงกันโดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่ม

คำสำคัญ— เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย; การใช้พลังงานของตัวรับรู้; ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม

1. บทนำ

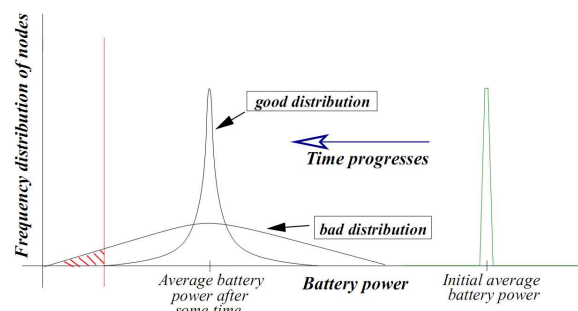
เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ประกอบด้วย ตัวรับรู้พร้อมตัวรับส่ง เชื่อมต่อกันด้วยคลื่นวิทยุ เพื่อตรวจวัดข้อมูลต่าง ๆ และส่งข้อมูลที่ได้อีกกลับไปให้สถานีฐาน นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามทำให้ตัวรับรู้ไร้สายมีราคาถูกลง มีความน่าเชื่อถือสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นเป้าหมายหลักของการวิจัยเกี่ยวกับเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ซึ่งมีหลากหลายมุมมองตั้งแต่ระบบปฏิบัติการ [2] การได้มาของข้อมูล [3] การแพร่กระจายข้อมูล [4] กระบวนการสอบถามข้อมูล [5] การควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง [6] ข้อกำหนดในการติดต่อสื่อสาร [7] [8] [10] และ [11] ไปจนถึงทอพอโลยีของเครือข่าย [9]

ซึ่งงานวิจัยของเราฉบับนี้มุ่งเน้นไปในด้านข้อกำหนดในการติดต่อสื่อสารโดยตระหนักถึงการใช้พลังงาน

การใช้งานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ตามจุดมุ่งหมายของข้อมูลที่ตัวรับรู้ตรวจสอบคือ 1) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวตรวจจับได้มีความสำคัญสูง ตัวอย่างเช่น ในระบบสัญญาณเตือนอัคคีภัย ก็ต้องตรวจตราเพื่อความมั่นคง ระบบตรวจสอบสถานะของโครงสร้างสะพานหรืออาคาร 2) ข้อมูลที่ตัวรับรู้ไร้สายแต่ละตัวรวบรวมมาได้ สามารถใช้ข้อมูลจากตัวรับรู้ตัวอื่นที่อยู่ใกล้เคียงทดแทนได้ เนื่องจากสิ่งที่เราต้องการคือข้อมูลที่ถูกรวบรวมให้เห็นภาพรวมของบริเวณนั้น ๆ การใช้งานลักษณะนี้มักใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเช่น การตรวจจับอุณหภูมิ ความเข้มของแสง

จากการใช้งานด้านบนทั้งสองลักษณะ การยืดอายุการใช้งานของตัวรับรู้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้งานในลักษณะที่ 1 ซึ่งข้อมูลจากตัวรับรู้แต่ละตัว ไม่สามารถใช้ข้อมูลจากตัวรับรู้อื่นที่อยู่รอบข้างมาทดแทนได้



รูปที่ 1. การกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้เทียบกับจำนวนตัวรับรู้

จากรูปที่ 1 แสดงการกระจายของพลังงานที่เหลืออยู่ในตัวรับรู้ ในสถานะเริ่มต้นตัวรับรู้ทุกตัว มีพลังงานสูงและใกล้เคียงกัน ดังกราฟในรูปที่ 1 ด้านขวามือ เมื่อเวลาผ่านไป พลังงานของตัวรับรู้จะลดลงเรื่อย ๆ จากขวามาซ้าย การกระจายตัวของพลังงานที่เหลือของตัวรับรู้ที่คืนนั้นควรจะใกล้เคียงกัน กราฟของพลังงานในตัวรับรู้ที่มีการกระจายตัวที่ดี (good distribution) คือกราฟที่มีฐานแคบ พลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวมีระดับใกล้เคียงกัน สำหรับการกระจายตัวของพลังงานที่ไม่ดี (bad distribution) เป็นกราฟที่มีฐานกว้าง พลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ที่มีพลังงานมากที่สุดและน้อยที่สุดมีค่าแตกต่างกันมาก ตัวรับรู้ที่มีพลังงานน้อยกว่าค่าที่กำหนด

ไว้ (Threshold) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกแรงจางในรูปที่ 1 จะไม่สามารถทำงานต่อได้ ทำให้ข้อมูลที่ควรจะได้รับจากตัวรับนั้นขาดหายไปจากระบบ

เป้าหมายของเกณฑ์วิธีคิดต่อสื่อสารในเครือข่ายตัวรับรู้ไว้สายที่ดีควรจะเป็น (1) ลดการใช้พลังงานโดยรวมของตัวรับรู้ และ (2) ลดการกระจายของระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ในเครือข่ายให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ซึ่งงานวิจัยของเราชิ้นนี้จะเน้นไปใน 2 เป้าหมายนี้

ตามสมมติฐานของงานวิจัยนี้ ตัวรับรู้ไว้สายแต่ละตัวในระบบสามารถจะปรับกำลังส่งของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการสื่อสารได้ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล จะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของระยะทาง ในวิธี Direct Transmission (Direct) ตัวรับรู้ทุกตัวทำการส่งข้อมูลของตนเองไปยังสถานีฐานโดยตรง ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมาก ๆ หมดพลังงานก่อนตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ และสำหรับวิธี Minimum Transmission Energy (MTE) [1] [7] ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งให้น้อยที่สุด โดยส่งต่อข้อมูลผ่านตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้ตนเองมากที่สุดและใกล้สถานีฐานไปเรื่อย ๆ ทำให้ตัวรับรู้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะต้องส่งต่อข้อมูลเป็นจำนวนมาก และหมดพลังงานไปก่อนตัวรับรู้อื่น

เพื่อแก้ปัญหาของวิธี Direct และ MTE วิธี LEACH [7] [10] จะแบ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไว้สายออกเป็นกลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มจะมีหัวหน้ากลุ่มทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้สมาชิกส่งต่อไปให้สถานีฐาน การทำงานในลักษณะนี้ตัวรับรู้ที่จะต้องส่งพลังงานมากคือหัวหน้ากลุ่ม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มและหัวหน้ากลุ่มตามช่วงเวลาเพื่อลดการใช้พลังงานออกไปยังตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ซึ่งการปรับเปลี่ยนกลุ่มจะต้องมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างหัวหน้ากลุ่มและสมาชิกในกลุ่มเพื่อยกเลิกกลุ่มเดิม และทำการสร้างกลุ่มใหม่ หากมีการเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้งพลังงานที่จะต้องเสียไปกับการนี้ก็จะมากตามไปด้วย [13]

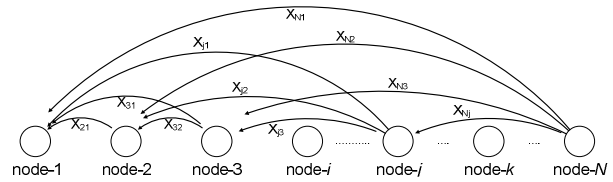
งานวิจัยของเราได้เห็นความจำเป็น ณ จุดนี้จึงพยายามทำให้ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน โดยไม่จำเป็นจะต้องทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มบ่อยครั้ง ตัวรับรู้ทุกตัวในเครือข่ายจะส่งต่อข้อมูลให้กับตัวรับรู้อื่น ๆ ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า การส่งข้อมูลของตัวรับรู้แต่ละตัวจะส่งข้อมูลโดยใช้หลายระดับพลังงานไปยังตัวกลางหลาย ๆ ตัว ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พลังงานที่ตัวรับรู้ทุกตัวใช้ในกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน เราจะนำปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem) เข้ามาช่วยในการหาค่าของอัตราส่วนดังกล่าว

งานวิจัยนี้เป็นงานที่หนึ่งในกลุ่มนักวิจัยของเราได้วิจัยมาก่อนหน้านี้ [14] โดยต่อขยายเพื่อแก้ปัญหาบนระนาบ 2 มิติ พร้อมสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบเปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีอื่น ๆ เพื่อดูพลังงานที่ตัวรับรู้ในเครือข่ายใช้รวมถึงการกระจายตัวของค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของตัวรับรู้ในระบบ

2. เป้าหมายและเงื่อนไขของการหาค่าที่เหมาะสม

สมมติแบบจำลองมีตัวรับรู้ไว้สายทั้งหมด N โหนด (Node) วางห่างกันด้วยระยะ d โดยตัวรับรู้แต่ละโหนดมีการสร้างกลุ่มข้อมูลจำนวน m แพ็คเก็ต จำนวนข้อมูลที่แต่ละโหนดส่งเป็นผลรวมของข้อมูลที่ตัวเองสร้างขึ้นกับข้อมูลที่โหนดรับมาจากโหนดที่อยู่ห่างออกไป โดยจะทำการส่งข้อมูลผ่าน

คลื่นวิทยุไปยังโหนดที่ 1 (node-1) และโหนดตัวกลางด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามระยะทาง ดังรูปในที่ 2 การแก้ปัญหาการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะไม่นำค่าพลังงานที่ใช้เลี้ยงวงจรของตัวรับรู้ทั้งในขณะรับและส่งข้อมูล เพื่อลดความซับซ้อนของสมการ



รูปที่ 2. แบบจำลองแสดงอัตราส่วนของการส่งข้อมูลของแต่ละโหนด

ถ้าให้จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่โหนด j จะต้องส่งมีจำนวน R_j โดยรวมข้อมูลที่โหนด j สร้างกับข้อมูลที่โหนด j รับมาจากโหนดที่อยู่ห่างออกไปให้ k ซึ่งเป็นโหนดใด ๆ ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมากกว่าโหนด j ซึ่งโหนด k จะส่งข้อมูลมาให้โหนด j ด้วยอัตราส่วน x_{jk} จากข้อมูลทั้งหมดของโหนด k ซึ่งมีจำนวนข้อมูลเป็น R_k เราจะเขียนได้ว่า

$$R_j = m + \sum_{k=j+1}^N R_k x_{kj} \quad (1)$$

$$= m \times [1 + \{x_{(j+1)j}\} + \{x_{(j+2)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+2)j}\} + \{x_{(j+3)(j+2)}x_{(j+2)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+3)(j+2)}x_{(j+2)j} + x_{(j+3)(j+1)}x_{(j+1)j} + x_{(j+3)j}\} \dots] \quad (2)$$

ถ้าให้พลังงานทั้งหมดที่โหนด j ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุมีค่าเป็น C_j และ C_j มีการแปรผันโดยตรงกับระยะทางที่ส่งยกกำลัง v โดย $2 \leq v \leq 4$ ถ้าให้ $\mathcal{E}_{amp}$ เป็นค่าคงที่ในการขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ มีหน่วยเป็น Joule/bit/m² และ pks เป็นขนาดของแพ็คเก็ต ในหน่วยบิต จะเขียนสมการของพลังงานที่โหนด j ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ว่า [7]

$$C_j = \mathcal{E}_{amp} \times R_j \times pks \times \left[\sum_{i=j-1}^1 x_{ji} \{(j-i) \times d\}^v \right] \quad (3)$$

ขอบเขตปัญหาของเราคือการหาค่า x_{ji} ทั้งหมด เมื่อ $i < j$ ที่ทำให้ค่า C_j มีค่าน้อยที่สุดและสอดคล้องตามสมการดังต่อไปนี้

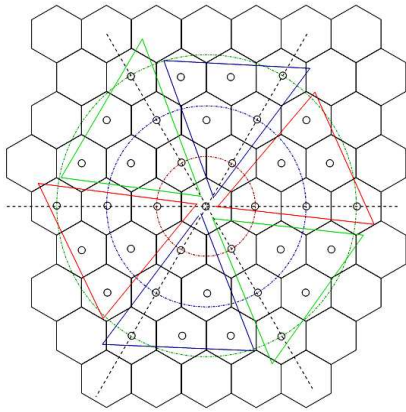
$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (4)$$

$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i < j, i \geq 1, j > 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=(j-1)}^1 x_{ji} = 1 \quad (6)$$

สมการที่ (4) แสดงเงื่อนไขว่าค่าพลังงานที่แต่ละโหนดใช้จะต้องเท่าเทียมกัน สมการที่ (5) กำหนดขอบเขตบนและล่างของ x_{ji} อยู่ระหว่าง 0 และ 1 สมการที่ (6) ระบุเงื่อนไขว่าผลรวมอัตราส่วนของแต่ละโหนดจะต้องรวมกันได้เท่ากับ 1 เสมอ การแก้ปัญหานี้ จะต้องหาค่าของ x_{ji} แยกเป็นกรณีตามค่าของ N

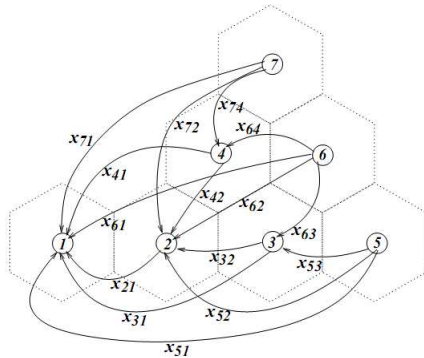
3. การคำนวณในกรณีโทหนดกระจายบนระนาบ



รูปที่ 3. ตัวรับรู้ไร้สายถูกวางกระจายบนระนาบ 2 มิติอย่างสม่ำเสมอ

ในงานวิจัยนี้ที่สมมติให้โหนดตัวรับรู้ไร้สายถูกจัดวางอยู่บนระนาบ 2 มิติ อย่างสม่ำเสมอ โดยกลุ่มของตัวรับรู้ไร้สายมีรัศมีเท่ากับ 3 ฟีลิป ดังในรูปที่ 3

ถ้าหากเราแบ่งกลุ่มของตัวรับรู้นี้ออกเป็น 6 ส่วนเท่า ๆ กัน เราจะได้ส่วนตัดของกลุ่มตัวรับรู้ที่มีลักษณะเดียวกันดังในรูปที่ 4 จำนวน 6 ส่วน ซึ่งเราสามารถจะทำการคำนวณค่าต่าง ๆ ของส่วนตัดเพียงส่วนเดียว แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้กับส่วนตัดส่วนอื่น ๆ ได้



รูปที่ 4. ส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงเศษหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้

จากรูปที่ 4 แสดงส่วนตัดสามเหลี่ยมแสดงเศษหนึ่งส่วนหกของกลุ่มตัวรับรู้ เช่นเดียวกับกับหัวข้อที่ 3 เรากำหนดให้ x_{ji} เป็นอัตราส่วนของข้อมูลที่ส่งจากโหนด j ไปยังโหนด i โดยอัตราส่วนทั้งหมดของ x_{ji} จะถูกแสดงในเมทริกซ์ X ด้านล่าง ซึ่งสมการของเมทริกซ์จะหมายถึงโหนดที่รับข้อมูลเริ่มตั้งแต่ 1 ไปจนถึง 7 ส่วนแถวของเมทริกซ์หมายถึงโหนดที่เป็นฝ่ายส่งข้อมูลเริ่มต้นด้วยโหนดที่ 2

$$X_{ji} = \begin{bmatrix} x_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{31} & x_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{41} & x_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} & x_{64} & 0 & 0 & 0 \\ x_{71} & x_{72} & 0 & x_{74} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{node-2} \\ \text{node-3} \\ \text{node-4} \\ \text{node-5} \\ \text{node-6} \\ \text{node-7} \end{matrix}$$

$$\text{โดย } x_{ji} = \frac{\text{packets transmitted from node-}j \text{ to node-}i}{\text{total packets transmitted from node-}i}$$

ระยะห่างของตัวรับรู้แต่ละโหนดในรูปที่ 4 จะแสดงได้โดยเมทริกซ์ D ด้านล่าง เมื่อหน่วยข้อมูล d_{ji} เป็นระยะทางจากโหนด j ไปยังโหนด i ค่า “NA” ในตารางเป็นระยะทางที่เราไม่สนใจเนื่องจากไม่มีการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุระหว่างโหนดนั้น

$$D = \begin{bmatrix} \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} \\ d & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} \\ 2d & d & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} \\ \sqrt{3}d & d & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} \\ 3d & 2d & d & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} \\ \sqrt{7}d & \sqrt{3}d & d & d & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} \\ \sqrt{7}d & 2d & \text{NA} & d & \text{NA} & \text{NA} & \text{NA} \end{bmatrix}$$

เช่นเดียวกับหัวข้อก่อนหน้านี้ เรากำหนดให้จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งโดยโหนด j มีจำนวนเป็น R_j โดย R_j เป็นผลรวมของข้อมูลที่โหนด j สร้างขึ้น (m) กับข้อมูลที่โหนด j รับจากโหนดอื่น ดังนั้น

$$R_7 = R_6 = R_5 = m \quad (7)$$

$$R_4 = m + \sum_{i=5,6,7} R_i \cdot x_{i4} \quad (8)$$

$$R_3 = m + \sum_{i=5,6,7} R_i \cdot x_{i3} \quad (9)$$

$$R_2 = m + \sum_{i=3,4} R_i \cdot x_{i2} + \sum_{i=5,6,7} R_i \cdot x_{i2} \quad (10)$$

จากระยะทางในเมทริกซ์ D เราสามารถคำนวณหาพลังงานที่แต่ละโหนดจะใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคลื่นวิทยุได้ ซึ่งในที่นี้เราจะไม่นำพลังงานในการเลี้ยววงจรของของตัวรับรู้ในขณะที่รับและส่งข้อมูลมาคำนวณด้วย เพื่อลดความซับซ้อนของสมการ เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ เรากำหนดให้พลังงานที่ใช้โดยโหนด j มีค่าเป็น C_j และพลังงานที่ตัวรับรู้แต่ละโหนดใช้มีค่าเท่าเทียมกัน โดยค่าที่เราต้องการคือชุดของอัตราส่วนที่ทำให้พลังงานที่ใช้ในแต่ละโหนดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเงื่อนไขของสมการดังสมการที่ (11) ถึง (13) ด้านล่าง

$$\sum_{i=(j-1)}^1 x_{ji} = 1 \quad (11)$$

$$C_2 = C_3 = \dots = C_i = \dots = C_N \quad (12)$$

$$0 \leq x_{ji} \leq 1 \text{ for all } i < j, i \geq 1, j > 1 \quad (13)$$

จากสมการที่ (11) เราจะแทนค่า $x_{74} = x_{33} = \alpha$ และแทนค่า $x_{64} = x_{63} = \beta$ เพื่อแปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ได้ชุดของสมการดังนี้

$$x_{74} + x_{72} + x_{71} = \alpha + x_{72} + x_{71} = 1 \quad (14)$$

$$x_{64} + x_{63} + x_{62} + x_{61} = 2\beta + x_{62} + x_{61} = 1 \quad (15)$$

$$x_{53} + x_{52} + x_{51} = \alpha + x_{52} + x_{51} = 1 \quad (16)$$

$$x_{42} + x_{41} = 1 \quad (17)$$

$$x_{32} + x_{31} = 1 \quad (18)$$

$$x_{21} = 1 \quad (19)$$

เราจะมี x_{ji} ซึ่งยังไม่ทราบค่าทั้งหมด 10 ค่าและมีสมการเชิงเส้นทั้งหมด 5 สมการ นำสมการที่ (7) ถึง (10) มาเขียนใหม่โดยแทนค่า $\lambda=(1+\alpha+\beta)$ ลงไปเพื่อลดรูปสมการ เราจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$R_7 = R_6 = R_5 = m \quad (20)$$

$$R_4 = \lambda m \quad (21)$$

$$R_3 = \lambda m \quad (22)$$

$$R_2 = m(1 + x_{72} + x_{62} + x_{53} + \lambda x_{42} + \lambda x_{32}) \quad (23)$$

ใช้ระยะทางจากเมทริกซ์ D และอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุมาสร้างสมการพลังงานที่ใช้ของตัวรับแต่ละ โหนด

$$C_7 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (4x_{72} + 7x_{71} + \alpha) \quad (24)$$

$$C_6 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (3x_{62} + 7x_{61} + 2\beta) \quad (25)$$

$$C_5 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (4x_{52} + 9x_{51} + \alpha) \quad (26)$$

$$C_4 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (\lambda x_{42} + 3\lambda x_{41}) \quad (27)$$

$$C_3 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (\lambda x_{32} + 4\lambda x_{31}) \quad (28)$$

$$C_2 = \varepsilon_{amp} \times m \times pks \times d^2 \times (x_{72} + x_{62} + x_{52} + \lambda x_{42} + \lambda x_{32} + 1) \quad (29)$$

จากสมการ (24) ถึง (29) นำสมการ (24) มาจับคู่กับสมการ (25) ถึง (29) เราจะได้สมการเชิงเส้นอีก 5 สมการคือ

$$4x_{72} + 7x_{71} - 3x_{62} - 7x_{61} = 2\beta - \alpha \quad (30)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - 4x_{52} - 9x_{51} = 0 \quad (31)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - \lambda x_{42} - 3\lambda x_{41} = -\alpha \quad (32)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - \lambda x_{32} - 4\lambda x_{31} = -\alpha \quad (33)$$

$$4x_{72} + 7x_{71} - x_{62} - x_{52} - \lambda x_{42} - \lambda x_{32} = 1 - \alpha \quad (34)$$

เราจะได้สมการเชิงเส้นทั้งหมด 10 ตัวแปร คือสมการ (24) ถึง (28) และสมการ (30) ถึง (34) เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุของตัวรับไร้สายแต่ละ โหนด สิ่งที่เราต้องการหาคือค่าของ

$$X = [x_{72} \ x_{71} \ x_{62} \ x_{61} \ x_{52} \ x_{51} \ x_{42} \ x_{41} \ x_{32} \ x_{31}]$$

โดยเราต้องการค่าที่ทำให้พลังงานที่ตัวรับแต่ละตัวใช้มีค่าน้อยที่สุด นำสมการ (24) ถึง (28) และสมการ (30) ถึง (34) มาเขียนใหม่ในรูปของเมทริกซ์ $A_{eq} \cdot X = b_{eq}$ ได้ดังนี้

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 7 & -3 & -7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & -4 & -9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & -3\lambda & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & -4\lambda \\ 3 & 7 & -1 & 0 & -1 & 0 & -\lambda & 0 & -\lambda & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$b_{eq} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 1 - 2\beta \\ 1 - \alpha \\ 1 \\ 1 \\ 2\beta - \alpha \\ 0 \\ -\alpha \\ -\alpha \\ 1 - \alpha \end{bmatrix}$$

เนื่องจากเรากำหนดค่าของ $x_{74}=x_{53}=\alpha$ และ $x_{74}=x_{53}=\beta$ ซึ่งมีขอบเขตล่างที่ 0 และขอบเขตบนที่ 1 เราจะทำกาแทนค่าของ α และ β ตั้งแต่ค่า 0 จนถึง 1 โดยทำการเพิ่มค่าของ α และ β ขึ้นทีละ 0.01 แล้วทำการแก้สมการเชิงเส้นด้านบน

เราจะได้คำตอบของสมการเชิงเส้นที่เป็นไปได้ในบางช่วงของ $0.11 \leq \alpha \leq 0.57$ และ $0.01 \leq \beta \leq 0.28$ โดยจะมีค่าพลังงานน้อยที่สุดเมื่อ $\alpha = 0.57$ และ $\beta = 0.28$ ซึ่งจะได้ค่าอัตราส่วนของการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุของตัวรับไร้สายแต่ละ โหนดดังนี้

$$x_{74}=0.57; x_{72}=0.0172; x_{71}=0.4128; x_{64}=0.28; x_{63}=0.28; x_{62}=0.0279; x_{61}=0.4121; x_{53}=0.57; x_{52}=0.1823; x_{51}=0.2477; x_{42}=0.5463; x_{41}=0.4537; x_{32}=0.6976; x_{31}=0.3024; x_{21}=1$$

4. การทดลองและการประเมินผล

จากหัวข้อก่อนหน้าเราได้ค่า x_{ji} ที่ทำให้พลังงานที่ใช้ของตัวรับแต่ละตัวเท่าเทียมกัน เราจะนำค่าเหล่านั้นมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB สร้างตามทอพอโลยีในรูปที่ 4 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพลังงาน เปรียบเทียบวิธีการของเรา (Uniform) กับเกณฑ์วิธี LEACH [7] และ Direct Transmission โดยทำการเฉลี่ยผลที่ได้จากการทดลอง 100 ครั้ง จากกลุ่มของตัวรับในรูปที่ 3 เราจะให้หัวหน้ากลุ่ม (ตัวรับไร้สายที่ 1 ในรูปที่ 4) ทำหน้าที่เป็นสถานีฐานของเครือข่าย ในการทดลองมีค่าตัวแปรเสริมดังต่อไปนี้

E_i – พลังงานเริ่มต้นของตัวรับไร้สายแต่ละ โหนด (0.5 J)

d – ระยะห่างระหว่าง 2 โหนดที่อยู่ติดกัน (10-35 m)

m – จำนวนแพ็คเกจที่ตัวรับไร้สายสร้างในแต่ละรอบ (1 packet/round)

k – Desired percentage of cluster head สำหรับ LEACH (16.66%)

n – จำนวนโหนดสมาชิกในกลุ่ม, $n=36$

E_d – พลังงานที่ถือว่าตัวรับไร้สายสามารถทำงานต่อไปได้ (0.05 J)

$\mathcal{E}_{amp}$ – ค่าคงที่สำหรับการขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ (100 pJ/bit/m²)

pks – ขนาดของแพ็คเกจ (2000 bits)

จากตารางที่ 1 เปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวรับไร้สายในแต่ละเกณฑ์วิธี วิเคราะห์ที่ค่า $d=15$ จะเห็นว่าวิธี Direct Transmission จะมีตัวรับไร้สายหมดพลังงานในรอบที่ 1236 สำหรับ LEACH ตัวรับไร้สายจะหมดพลังงานในรอบที่ 1832 และท้ายสุดวิธีการของเรา Uniform ตัวรับไร้สายจะหมดพลังงานในรอบที่ 2794

เปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวรับไร้สายในแต่ละเกณฑ์วิธี จะเห็นได้ว่าเกณฑ์วิธีแบบ Direct Transmission จะมีตัวรับไร้สายที่หมดพลังงานก่อนอย่าง

รวดเร็ว จากนั้นก็จะเป็นเกณฑ์วิธี LEACH และสุดท้ายคืองานของเราที่จะเริ่มมีตัวรับรู้หมดพลังงานซ้ำที่สุดจากการเฉลี่ยค่าพลังงานที่ตัวรับรู้แต่ละโหนดใช้อย่างสม่ำเสมอ

ในการทดลองนี้เรายังไม่ได้รวมพลังงานที่ LEACH จะต้องใช้ในการปรับเปลี่ยนกลุ่มเข้าไปในสมการ ซึ่งหากเพิ่มค่าพลังงานในส่วนนี้เข้าไป จะทำให้จำนวนรอบในวิธี LEACH มีค่าน้อยกว่าที่ถูกต้องแสดงในตารางที่ 1

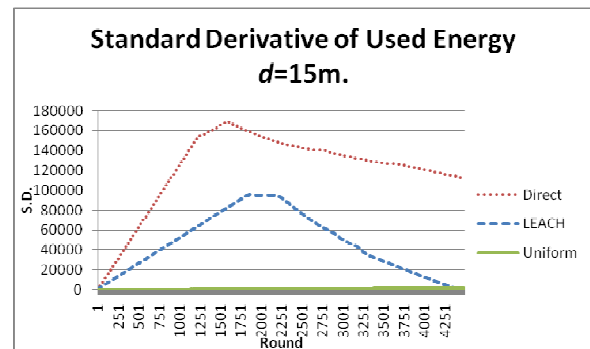
ตาราง 1. อาชุกรการใช้งานของตัวรับรู้ที่ค่า d แตกต่างกัน

d (m)	Protocol	Round that 1st node die	Round that 1/2 of nodes die
10	Direct	2780	3573
	LEACH	4039	4907
	Uniform	6284	6395
15	Direct	1236	1589
	LEACH	1832	2326
	Uniform	2794	2844
20	Direct	696	894
	LEACH	1034	1326
	Uniform	1571	1601
25	Direct	446	573
	LEACH	661	870
	Uniform	1007	1025
30	Direct	310	398
	LEACH	457	606
	Uniform	700	713
35	Direct	228	293
	LEACH	338	457
	Uniform	513	524

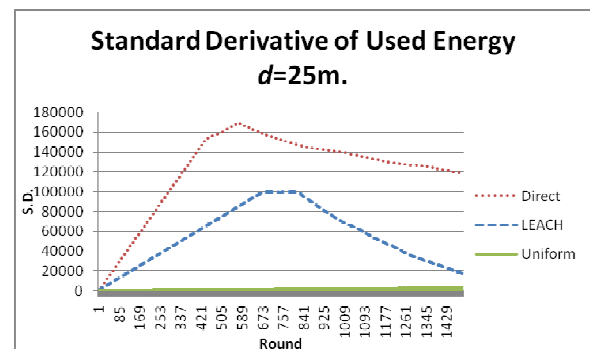
จากรูปที่ 5 6 และ 7 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อระยะ d มีค่าเท่ากับ 15 25 และ 35 เมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในงานของเรามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์วิธีของ LEACH ตามเป็นลำดับที่ 2 และสุดท้ายคือเกณฑ์วิธี Direct Transmission ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงมาก แสดงให้เห็นว่าวิธีการของเรามีการกระจายพลังงานของตัวรับรู้ทุกตัวในแต่ละรอบใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับ LEACH และ Direct Transmission

จากรูปที่ 8 แสดงการใช้พลังงานรวมในเครือข่าย กราฟเหล่านี้ได้จากค่าผลรวมของพลังงานที่ตัวรับรู้ใช้ไปทั้งหมดใน 200 รอบแรก นำมาหาค่าเฉลี่ยต่อรอบ จากตาราง 2 แสดงอาชุกรการใช้งานของตัวรับรู้ จะเห็นว่าใน 200 รอบแรกของการจำลองแบบ เมื่อ d อยู่ระหว่าง 10 ถึง 35 ยังไม่มีตัวรับรู้ตัวใดหมดพลังงาน จากกราฟในรูปที่ 8 กราฟของ Direct Transmission อยู่บนสุด แสดงถึงการใช้พลังงาน Direct Transmission ใช้พลังงานในแต่ละรอบมากที่สุด เส้นต่ำลงมาคือกราฟของ LEACH และกราฟเส้นต่ำสุดคือ Uniform งานของเรา แสดงให้เห็นว่างานของเราใช้พลังงานน้อยกว่าในวิธี LEACH และในการทดลองนี้สำหรับ LEACH เรายังไม่ได้รวมพลังงานที่

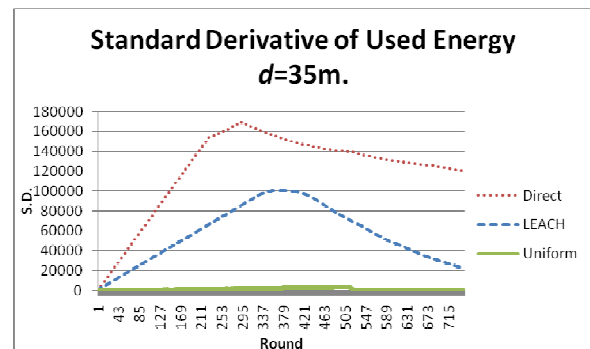
ต้องใช้ในการปรับเปลี่ยนกลุ่มเข้าไปซึ่งหากรวมค่าพลังงานดังกล่าวเข้าไป ด้วยระยะห่างระหว่างกราฟของ LEACH และวิธีการของเราก็น่าจะมีมากกว่าค่าที่แสดงในรูปที่ 8



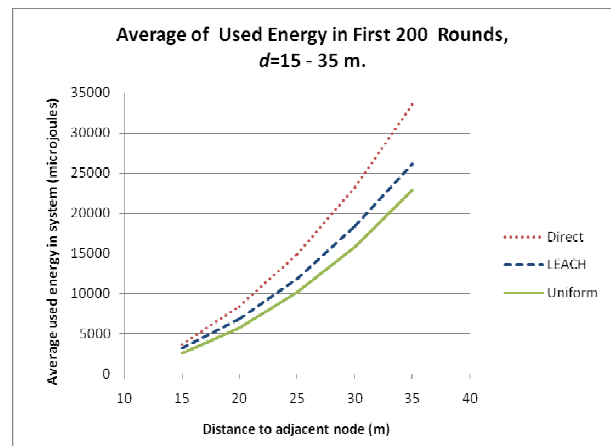
รูปที่ 5. กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อ $d=15$



รูปที่ 6. กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อ $d=25$



รูปที่ 7. กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ เมื่อ $d=35$



รูปที่ 8. กราฟแสดงการใช้พลังงานรวมในเครือข่าย เฉลี่ยจาก 200 รอบแรก

5. สรุปผล

ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เกณฑ์วิธีการหาเส้นทางโดยตระหนักถึงพลังงานบนเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายอยู่บนพื้นฐานของการหาเส้นทางแบบเป็นลำดับขั้น ซึ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตัวรับรู้แต่ละโหนดในกลุ่มจะทำการส่งข้อมูลของตนเองให้กับหัวหน้ากลุ่ม แม้ระยะทางในกลุ่มจะไม่ห่างไกลมากนัก แต่ตัวรับรู้ที่ทำหน้าเป็นหัวหน้ากลุ่มก็จะต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเป็นปริมาณมาก เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ตัวอื่น ๆ ในกลุ่ม เพื่อเฉลี่ยพลังงานของตัวรับรู้แต่ละตัวในระบบให้เหลือใกล้เคียงกัน เมื่อครบคาบเวลาหนึ่งเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายจะมีการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวรับรู้ แต่การยกเลิกกลุ่มปัจจุบันแล้วทำการสร้างกลุ่มใหม่ ก่อให้เกิดการส่งข้อมูลจำนวนมาก [13] เพื่อหลีกเลี่ยงการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวรับรู้เมื่อครบคาบเวลาปกติ เราจึงเสนอให้โหนดสมาชิกในกลุ่ม สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดที่อยู่ใกล้กว่า ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ตามระยะทางก่อนที่ข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังสถานีฐานต่อไป ทำให้สามารถเฉลี่ยค่าการใช้พลังงานของแต่ละโหนดให้เท่ากันได้

งานชิ้นนี้ยังอยู่ในขั้นพัฒนา เราจะมีวิธีที่สามารถเฉลี่ยพลังงานของตัวรับรู้ไร้สายที่ถูกส่งมาตำแหน่งลงบนพื้นระนาบ รวมถึงการทำการรวมข้อมูลเพื่อลดปริมาณข้อมูลที่จะผ่านคลื่นวิทยุไปยังสถานีฐาน มุมมองอีกข้อหนึ่งซึ่งเราละไว้ในงานนี้คือ พลังงานที่ใช้ในการเลี้ยงวงจรของตัวรับรู้ไร้สายทั้งในขณะที่ทำการส่งข้อมูลและทำการรับข้อมูล ซึ่งในส่วนนี้เราทำการเพิ่มเข้ามาในงานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Meng and R. Volkan, "Distributed Network Protocols for Wireless Communications." In the Proceedings of IEEE ISCAS, Vol. 4, pp. 600 - 603, May 1998.
- [2] P. Levis, S. Madden, et.al., "Tiny OS: An Operating System for Wireless Micro-sensor Networks." In Ambient Intelligence, pp. 115-148, New York, 2005, Springer-Verlag.
- [3] S. R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, W. Hong, "Tiny DB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks." ACM Transactions on Database Systems, Vol. 30, Issue. 1, pp. 122-173, March 2005.
- [4] C. Intanagonwivat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable Robust Communication Paradigm for Sensor Networks." In the Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM 2000), pp. 56 - 67, Boston, Massachusetts, August 2000.
- [5] D. Braginsky, and D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks." In the Proceedings of Wireless Sensor Network Algorithms (WSNA'02) , pp. 22-30, Atlanta, Georgia, September 28, 2002.
- [6] W. Ye, and J. Heidemann, "Ultra-low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling." In the Proceedings of fourth International Conferences on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06), pp. 321-334, 2006.
- [7] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, October 2002.
- [8] Bhaskar Krishnamachari, "Networking Wireless Sensors.", Cambridge University Press, January 2006.
- [9] A. Cerpa, and D. Estrin, "ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies.", IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol 3, 3, pp. 1-14, 2004.
- [10] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks." in the Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000.
- [11] Alex Rogers, Esther David, and Nicholas R. Jennings, "Self-Organized Routing for Wireless Microsensor Networks." IEEE Transactions on SMC - Part A, Vol. 35, No. 3, pp. 349 - 359, May 2005.
- [12] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy Efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks." IEEE Journal on Selected areas in Communication, pp 1089-1098, 2004.
- [13] Prabal Dutta, David Culler, and Scott Shenker, "Procrastination Might Lead to a Longer and More Useful Life.", In the Sixth Workshop on Hot Topics in Networks (Hotnet-VI), Atlanta, Georgia, USA, November 2007.
- [14] Goutam Chakraborty, "A Note on Cluster Size of WSN", In the Proceeding of the 4th International Conference on Computers & Devices for Communication (CODEC 2009), pp. 1-6, Kolkata, India, December 2009.