

การปรับกำลังส่งอัตโนมัติของอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแบบเหมาะสมกับ ระยะทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

เอกบุตต์ เทพนรัตน์* พงษ์ศักดิ์ กิริติวินทร และ เวช วิเวก

บทคัดย่อ

การสื่อสารไร้สายที่สามารถสื่อสารจากต้นทางไปถึงปลายทางได้นั้น องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ กำลังส่ง โดยส่วนมากการใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายซึ่งจะมีส่วนของการปรับกำลังส่งโดยใช้กำลังเฉพาะที่สามารถกำหนดได้ว่าต้องการให้อุปกรณ์สื่อสารใช้กำลังส่งเท่าไร แต่จะเป็นการปรับแบบคงที่ หรือครั้งต่อครั้ง และในการติดตั้งระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จะมีการติดตั้งในแต่ละจุดที่ระยะทางและสภาพแวดล้อมต่างกัน ซึ่งทำให้มีผลกระทบกับประสิทธิภาพโดยรวม ถ้าทำการกำหนด กำลังส่งมากเกินไปอาจจะทำให้อุปกรณ์สื่อสารใช้พลังงานมากเกินไปจนความจำเป็น หรือ กำหนดกำลังส่งน้อยเกินไปอาจจะทำให้การสื่อสารจากต้นทางไปถึงปลายทางไม่สมบูรณ์ได้ ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการปรับกำลังส่งอัตโนมัติ ทำการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ที่กำหนดเป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย และอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย โดยอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายจะทำการวิเคราะห์และส่งค่าการปรับกำลังส่งให้กับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย เพื่อให้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายสามารถใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ : การสื่อสารไร้สาย, กำลังส่ง, อัตโนมัติ, เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: thepnor@gmail.com รับเมื่อ 12 มีนาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 27 พฤษภาคม 2556

Optimal Distance RF Transmission with Automatic Variable Gain for Wireless Sensor Networks

Ekkabut Thepnorarat^{*} Phongsak Keeratiwintakorn and Vech Vivek

Abstract

One major parameter of the wireless communication systems that allows the sender and the receiver to communicate is the transmission power. For most of wireless communication module, the transmission power is configurable by applying a special command. This method is a persistent configuration but in wireless sensor network applications, the sensor nodes are installed in various distances and environments, which require a different transmission power. The transmission power adjustment affects the overall performance. The exorbitant configured transmission power increases the power consumption of the sensor node. On the other hand, the communication performance will be decreased when the configured transmission power is too low. This paper proposes the automatic transmission power adjustment method. The client's transmission power will be adjusted once it receives the adjusting command from the base station in order to optimize the power consumption and communication performance according to experimental distance.

Keywords : Wireless communication, Transmission power, Automatic, Wireless Sensor Networks

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

^{*} Corresponding author, E-mail: thepnor@gmail.com Received 12 March 2013, Accepted 27 May 2013

1. บทนำ

การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายเริ่มเข้ามา มีบทบาทเกี่ยวข้องกับชีวิตมนุษย์มากขึ้นทุกวัน ซึ่งการ ใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายนั้นสามารถประยุกต์ใช้ งานได้หลากหลาย เช่น การวัดอุณหภูมิและความชื้นใน งานเกษตรกรรมแล้วส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์ส่วนกลาง เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ปรับปรุงหรือควบคุม สภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อไปซึ่งการใช้งานทางด้าน เกษตรกรรมจะทำการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งแล้ว กำหนดกำลังส่งคงที่ที่สามารถส่งข้อมูลได้ในระยะทาง นั้นๆ หรือนำอุปกรณ์สื่อสารไร้สายติดไว้กับคนไข้ ในโรงพยาบาลเพื่อวัดอัตราการเต้นของหัวใจและ ติดตามตำแหน่งคนไข้ในโรงพยาบาลโดยที่แพทย์ สามารถดูข้อมูลจากคอมพิวเตอร์แบบ Real-Time [1] ได้ เป็นต้น

ตัวอย่างการใช้งานที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสังเกตได้ว่า อุปกรณ์สื่อสารไร้สายถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ต่างกัน การ ประยุกต์ใช้งานบางอย่างมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ซึ่ง การปรับกำลังส่งโดยทั่วไปอาจจะทำการปรับไว้ที่ กำลัง สูงสุด เพื่อให้สามารถติดต่อสื่อสารได้แม้ว่าอุปกรณ์ สื่อสารไร้สายนั้นเคลื่อนที่ไปที่ระยะทางไกลขึ้น แต่เมื่อ อุปกรณ์ไร้สายนั้นเคลื่อนที่ใกล้เข้ามา กำลังส่งที่ถูกปรับ ไว้ยังคงเป็นกำลังส่งสูงสุดเช่นเดิม

จากตัวอย่างการใช้งานข้างต้น ข้อดีของการปรับ กำลังส่งสูงสุดคือ อุปกรณ์สื่อสารไร้สายสามารถ ติดต่อสื่อสารกันได้แม้ว่าระยะจะใกล้หรือไกลกัน แต่จะ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็นถ้าอุปกรณ์สื่อสาร ไร้สายนั้นอยู่ในระยะทางใกล้กัน ดังนั้นในบทความนี้จะ กล่าวถึงการปรับกำลังส่งอัตโนมัติของอุปกรณ์สื่อสาร ด้วยคลื่นวิทยุแบบเหมาะสมกับระยะทางสำหรับ

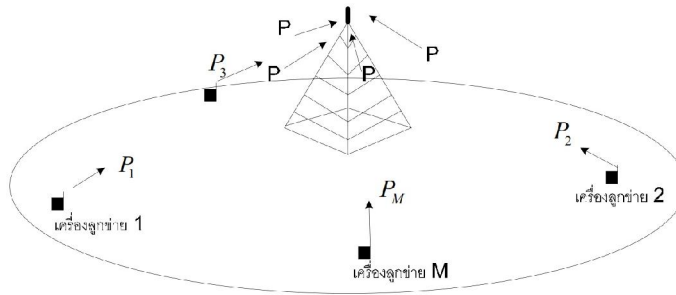
เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย [1-4] โดยใช้ไมโคร- คอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย เพื่อ สร้างอัลกอริทึม ควบคุมการปรับกำลังส่งของอุปกรณ์ สื่อสารไร้สายให้เหมาะสมแม้ว่าอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย นั้นจะเคลื่อนที่หรือถูกติดตั้งในตำแหน่งใดก็ตาม เพื่อให้ อุปกรณ์สื่อสารไร้สายนั้นใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ระยะทางที่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลที่สุดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายด้วย

งานวิจัยที่มีการทำให้ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย มีการตรวจสอบตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้ง [2] และมีการเคลื่อนที่โดยใช้โปรโตคอลกระจายการ ติดตามสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายขนาดใหญ่ โดย ใช้การจัดกลุ่มของอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งกระจายออกไป แบบแยกช่องสัญญาณ [2] โดยทำการคาดการณ์จากการ กระจายพลังงานในกลุ่มนั้น ซึ่งจะมีการผลัดกันส่ง ข้อมูล [2] ของแต่ละกลุ่มของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย นั้นๆ

งานวิจัยที่น่าสนใจอีกรูปแบบหนึ่งเป็นการติดตั้ง แบบแผ่ระว่างในสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยใช้ลักษณะ การจัดกลุ่มการกระจาย เช่นเดียวกับงานวิจัยข้างต้น แต่ จะมุ่งเน้นการติดตามแบบประหยัดพลังงานและแบนด์ วิธ [3-5]

1.1 การควบคุมกำลัง

การควบคุมกำลังนั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหา ความใกล้-ไกล [6-7] และเพื่อให้ได้ความจุสูงสุด การ ควบคุมกำลังจะกระทำโดยให้กำลังที่ถูกส่งมาจากแต่ละ ผู้ให้บริการจะถูกควบคุมให้มีการรับได้ของกำลัง ดังกล่าวที่สถานีฐานมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการควบคุมกำลังที่สมบูรณ์ [6]

1.1.1 การควบคุมกำลังแบบลูปเปิด (Open Loop Power Control)

ในรูปแบบการควบคุมกำลังแบบลูปเปิด [6] เครื่องลูกข่ายจะเป็นตัวจัดการกระบวนการเองทั้งหมด ไม่ได้เกี่ยวข้องกับสถานีฐาน กระบวนการควบคุมแบบลูปเปิดจะเป็นกระบวนการที่กระทำอย่างต่อเนื่องหลังจากที่สถานีฐานนั้นรับรู้ข้อมูลการขอเข้าใช้งานช่องสัญญาณของเครื่องลูกข่าย และหลังจากที่เครื่องลูกข่ายเริ่มส่งในช่องสัญญาณทราฟฟิก

หลังจากที่มีการเรียกเข้า เมื่อเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่ไปรอบๆภายในเซลล์แล้ว การสูญเสียเชิงระยะทางระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จากผลดังกล่าวกำลังที่ถูกรับได้ที่เครื่องลูกข่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงและการควบคุมกำลังแบบลูปเปิดจะทำการตรวจสอบสัญญาณกำลังที่ถูกรับที่เครื่องลูกข่ายอย่างต่อเนื่องและจะมีการปรับกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป

กล่าวได้จากการควบคุมกำลังแบบลูปเปิดจะอยู่บนพื้นฐานการประมาณการสูญเสียเชิงระยะทางในทิศทางไปยังสถานีฐาน การควบคุมกำลังนี้เป็นการชดเชยในส่วนของปรากฏการณ์ถูกบดบังแบบลือกอนอรัมอด [6]

และเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการจางหายในส่วนการเชื่อมโยงไปข้างหน้ากับส่วนเชื่อมโยงย้อนกลับ อย่างไรก็ตามความถี่ของการเชื่อมโยงขาไปและขากลับนั้นก็ใช้ความถี่ที่ต่างกัน การควบคุมกำลังแบบลูปเปิดจึงไม่เพียงพอและช้าเกินไปที่จะสามารถชดเชยการจางหายแบบรวดเร็วได้ [6]

1.1.2 การควบคุมกำลังแบบลูปปิด (Closed Loop Power Control)

การควบคุมกำลังแบบลูปเปิดนั้นจะถูกใช้สำหรับการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของกำลังเนื่องจากการจางหายแบบรวดเร็ว โดยที่การควบคุมกำลังเป็นแบบลูปปิดนั้นเนื่องจากว่ากระบวนการจะเกี่ยวข้องกับทั้งสถานีฐานและเครื่องลูกข่าย เมื่อเครื่องลูกข่ายได้รับช่องสัญญาณทราฟฟิกและเริ่มการสื่อสารกับสถานีฐาน กระบวนการของการควบคุมกำลังแบบลูปปิด จะกระทำร่วมกันไปด้วยการควบคุมกำลังแบบลูปเปิด ในการควบคุมกำลังแบบลูปปิด ทางสถานีฐานจะทำการตรวจวัดทั้งสัญญาณของทางการสื่อสารเชื่อมโยงขากลับ (Reverse Link) [6] และคุณภาพของการเชื่อมโยงถ้าคุณภาพของการเชื่อมโยงเริ่มที่จะไม่ดี ทางสถานีฐานจะมีคำสั่งไปยังเครื่องลูกข่ายผ่านการเชื่อมโยงขาไป

(Forward Link) [6] ทำให้การเพิ่มกำลังของสัญญาณเพิ่มขึ้น ถ้าในกรณีที่คุณภาพของสัญญาณดีเกินไป นั่นคือการที่มีกำลังของสัญญาณสูงเกินไปในการสื่อสารเชื่อมโยงกลับ ในกรณีนี้ทางสถานีฐานจะสั่งให้ทางเครื่องลูกข่ายลดกำลังที่ส่งลง ในอุดมคติอัตราความผิดพลาดต่อเฟรมนั้นจะเป็นตัววัดคุณภาพของการเชื่อมโยงที่ดี แต่เพราะว่าทำให้ใช้เวลานานสำหรับสถานีฐานที่ใช้จำนวนบิตที่มากำหนดให้ถูกต้อง ดังนั้น $\frac{E_b}{N_o}$ จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพการสื่อสารเชื่อมโยงกลับ [6]

การควบคุมกำลังแบบลูปเปิดมีกระบวนการในการกระทำดังนี้

1. สถานีฐานจะทำการตรวจวัด $\frac{E_b}{N_o}$ อย่างต่อเนื่อง

ในการสื่อสารเชื่อมโยงกลับ

2. ถ้า $\frac{E_b}{N_o}$ นั้นมีค่าสูงเกินไป สถานีฐานจะมีคำสั่งให้

เครื่องลูกข่ายลดกำลังส่งลงมา

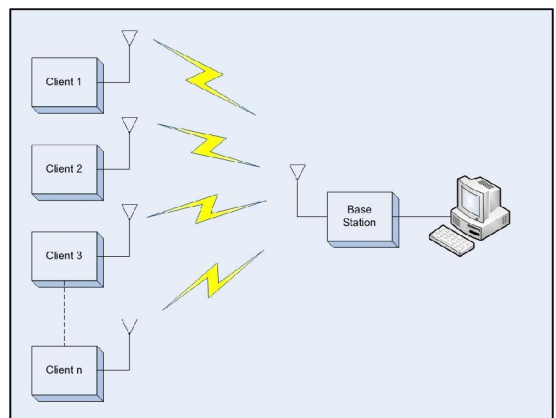
3. ถ้า $\frac{E_b}{N_o}$ นั้นมีค่าต่ำเกินไป สถานีฐานจะมีคำสั่ง

ให้เครื่องลูกข่ายเพิ่มกำลังขึ้น โดยคำสั่งในการควบคุมจะเรียกว่า บิตของการควบคุมกำลัง (Power Control Bits: PCBs) [6] ปริมาณของกำลังของเครื่องลูกข่ายที่ถูกสั่งให้เพิ่มหรือลดนั้น โดยทั่วไปจะมีค่า 1dB และ -1dB [6] เนื่องจากการควบคุมกำลังแบบลูปปิดจะเป็นการลดเซกการจางหายแบบรวดเร็ว ดังนั้นการตอบสนองของเครื่องลูกข่ายต่อคำสั่งในการควบคุมจึงต้องมีความเร็วมาก จากเหตุผลดังกล่าวบิตของ PCBs เหล่านี้จึงถูกส่งตรงผ่านช่องสัญญาณทราฟฟิก แต่เมื่อมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับบิตเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดผลกระทบต่อการควบคุมกำลังเช่นกัน

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การควบคุมกำลังแบบลูปปิดเนื่องจากการคำนวณการปรับกำลังส่งนั้นจะให้เครื่องแม่ข่ายเป็นผู้คำนวณ จากการวัดกำลังที่รับได้จากเครื่องลูกข่ายเมื่อเครื่องลูกข่ายมีการใช้กำลังส่งที่มากไป เครื่องแม่ข่ายจะทำการคำนวณและสั่งให้ปรับกำลังลดลงมา หรือถ้าเครื่องลูกข่ายมีการใช้กำลังส่งต่ำไปเครื่องแม่ข่ายจะสั่งให้เพิ่มกำลังส่งขึ้นมาตามความเหมาะสม ส่วนที่แตกต่างกันกับในระบบ CDMA คือ เครื่องแม่ข่ายจะทำการวัดกำลังส่งของเครื่องลูกข่ายได้ทีละหนึ่งตัวเท่านั้น เนื่องจากในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [8] ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ใช้ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) และมีการมอดูเลตแบบ O-QPSK ซึ่งจะใช้วิธีการผลัดกันส่งจึงลดปัญหาการกวนกันของสัญญาณ

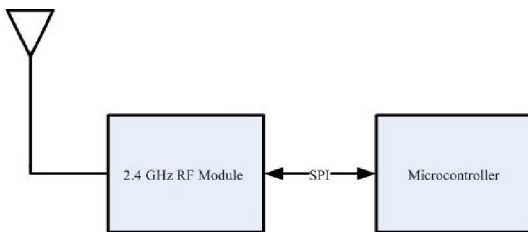
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ออกแบบการทำงาน



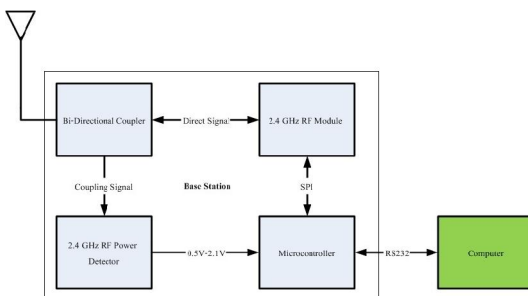
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย (Device) และอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย (Base Station)

การออกแบบการปรับกำลังส่งอัตโนมัติของอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแบบเหมาะสมกับระยะทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย แสดงภาพรวมการสื่อสารดังรูปที่ 2 แบ่งเป็นสามส่วนคือ ส่วนของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย ดังรูปที่ 3 ส่วนของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายและการออกแบบการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์สื่อสารไร้สายตัวส่ง

ส่วนที่หนึ่ง การออกแบบอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายประกอบด้วยวงจรอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz เชื่อมต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ การควบคุมการสื่อสารจะควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านการเชื่อมต่อแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) โดยข้อมูลที่จะส่งไปให้อุปกรณ์ไร้สายแม่ข่ายนั้นคือ ค่ากำลังส่งปัจจุบัน



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายและการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

ส่วนที่สอง การออกแบบอุปกรณ์ไร้สายแม่ข่ายประกอบด้วยอุปกรณ์ Bi-Directional Coupler ซึ่งจะทำหน้าที่แยกสัญญาณออกเป็นสองทาง คือ RF Signal และ Coupling Signal โดย RF Signal จะเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ 2.4 GHz โดยตรงและทำการควบคุมการสื่อสารด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านการเชื่อมต่อแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) เช่นเดียวกับบล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย ส่วนของ Coupling Signal จะเป็นสัญญาณที่ถูกแยกออกมาจากสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศ โดยใช้ Bi-Directional Coupler เป็นตัวแยกสัญญาณส่วนนี้ออกมาเพื่อนำไปเข้าส่วนของ 2.4 GHz RF Power Detector ซึ่งจะทำหน้าที่วัดค่ากำลังส่งที่ได้รับจากอุปกรณ์ไร้สายลูกข่ายแล้วแปลงค่าออกมาเป็นค่าแรงดันช่วง 0.5V-2.1V ค่าของแรงดันที่ได้จะนำเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่งค่าของแรงดันที่ได้นี้พร้อมกับค่ากำลังส่งปัจจุบันจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายที่มาจากการเชื่อมต่อแบบ SPI ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผล แล้วทำการส่งค่ากลับไปยังอุปกรณ์สื่อสารลูกข่ายว่าให้ปรับกำลังส่งเป็นเท่าไร

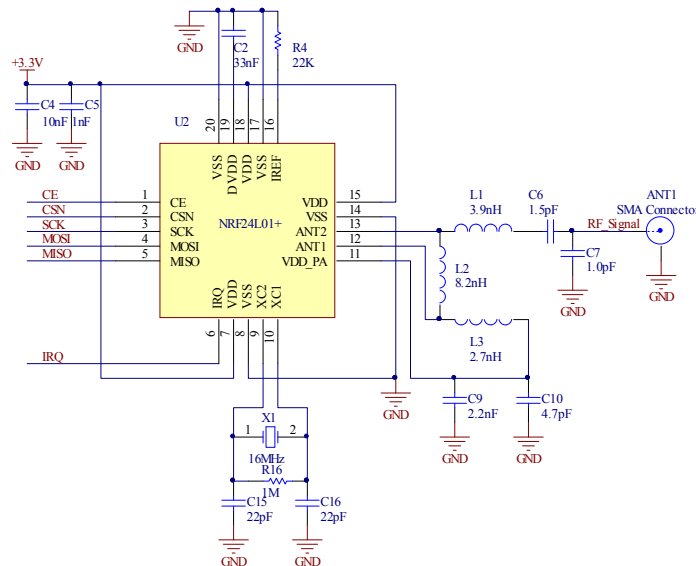
ส่วนที่สาม การออกแบบการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ การออกแบบการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ออกแบบเพื่อให้โปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ทางด้านอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย เพื่อทำการคำนวณหาค่ากำลังส่งที่จะต้องปรับให้เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย โดยส่งค่ากำลังส่งที่จะต้องปรับผ่านการสื่อสาร RS232 เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วส่งผ่านวงจรสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุไปยังอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย

2.2 การออกแบบและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2.2.1 วงจรอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ

การออกแบบวงจรส่วนนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ nRF24L01 [9] ซึ่งเป็นไอซีประเภทสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ ความถี่ 2.4 GHz ISM band โมดูละชันแบบ GFSK รองรับอัตราการส่งข้อมูล 1 Mbps และ 2 Mbps ช่อง

แบนด์วิดท์ 1 MHz ที่อัตราการส่งข้อมูล 1 Mbps และ ช่องแบนด์วิดท์ 2 MHz ที่อัตราการส่งข้อมูล 2 Mbps สามารถเลือกกำลังส่งได้ 4 ระดับ คือ -18 dBm, -12 dBm, -6 dBm และ 0 dBm โดยการใช้คำสั่งผ่านการ เชื่อมต่อแบบ SPI วงจรอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ แสดงดังรูปที่ 5

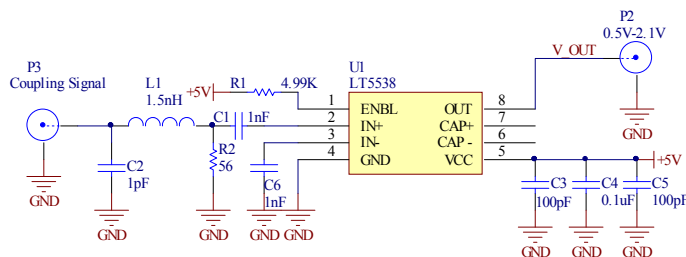


รูปที่ 5 วงจรอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ [9]

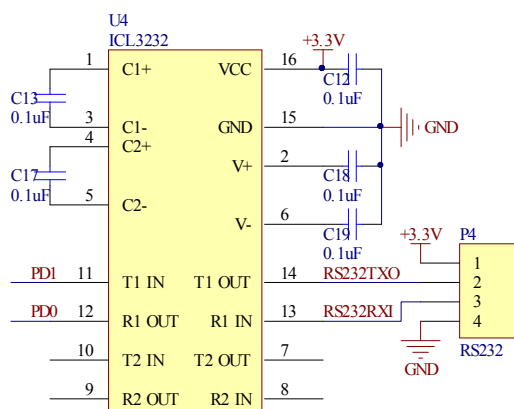
2.2.2 วงจรตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz

วงจรตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz เลือก ออกแบบโดยใช้ไอซีเบอร์ LT5538 [10] ของบริษัท Linear Technology สามารถใช้งานช่วงความถี่ตั้งแต่ 40 MHz – 3.8 GHz ความไวในการตรวจจับที่ -72 dBm

มีหน้าที่ตรวจจับกำลังที่รับได้ทางอินพุต Coupling Signal แล้วแปลงค่าเป็นแรงดันทางด้านเอาต์พุต V_OUT 0.5V – 2.1V เพื่อส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป วงจรตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4GHz [10]

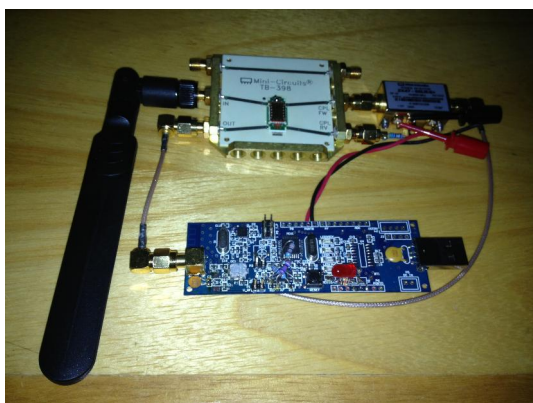


รูปที่ 8 วงจรเชื่อมต่อ RS232 [12]

อุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายและแม่ข่ายที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 อุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย



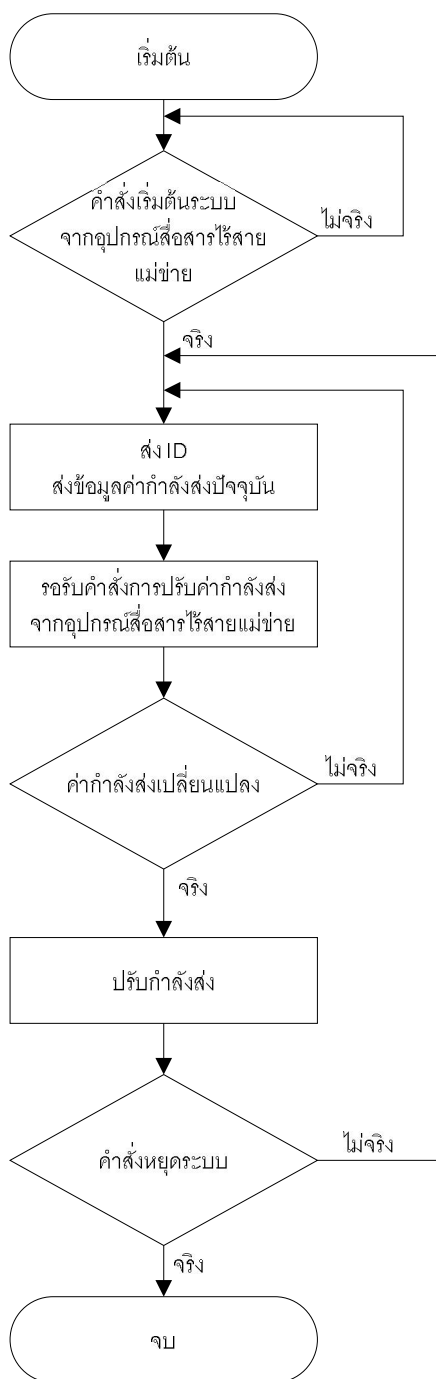
รูปที่ 10 อุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย

2.3 การออกแบบและสร้างโปรแกรม

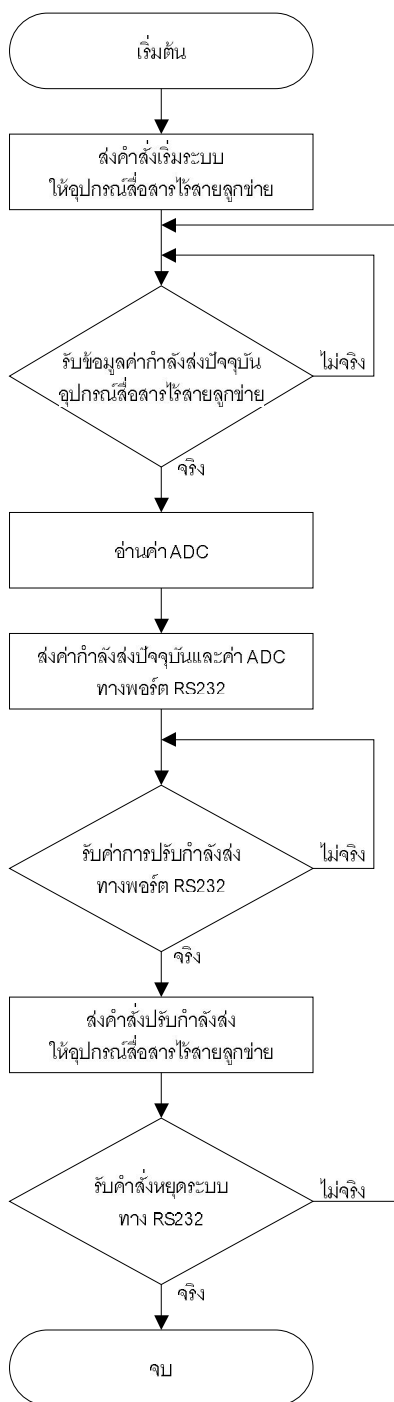
2.3.1 โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

AVR Studio [13] เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ของบริษัท ATMEAL โดยเฉพาะ การเขียน Source Code [13-14] นั้นสามารถเลือกใช้ภาษา C [13] หรือ Assembly ในการพัฒนาได้ ทั้งนี้ยังสามารถ Compile [13-14] โปรแกรมที่ทำการพัฒนาเสร็จแล้วให้เป็น HEX File และโปรแกรมเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อีกด้วย

โปรแกรมควบคุมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งเป็นโปรแกรมสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย ซึ่งจะเขียนโปรแกรมเพื่อส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ไร้สายแม่ข่ายแล้วรอรับข้อมูลค่าการปรับกำลังส่งจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายโดยโปรแกรมจะวนทำงานในลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ ส่วนโปรแกรมสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายจะรอรับข้อมูลที่ส่งมาจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย พร้อมกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากวงจรตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz แล้วส่งข้อมูลที่ได้นี้ทั้งหมดนี้ส่งให้คอมพิวเตอร์ผ่านการติดต่อสื่อสาร RS232 ทำการประมวลผลและวิเคราะห์หาค่าการปรับกำลังส่งเพื่อทำการส่งค่ากำลังส่งที่ต้องปรับกลับไปยังอุปกรณ์ไร้สายลูกข่าย ดังแสดงโฟลว์ชาต การทำงานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายรูปที่ 11 และโฟลว์ชาตการทำงานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายรูปที่ 12 ตามลำดับ



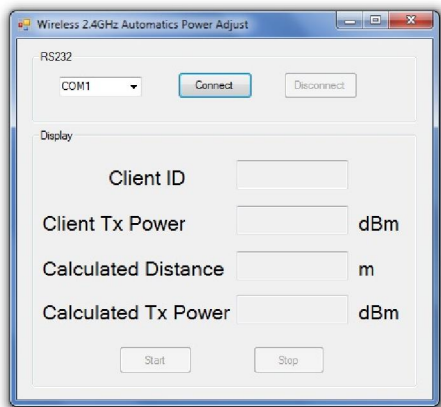
รูปที่ 11 โฟลว์ชาตการทำงานอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย
ลูกข่าย



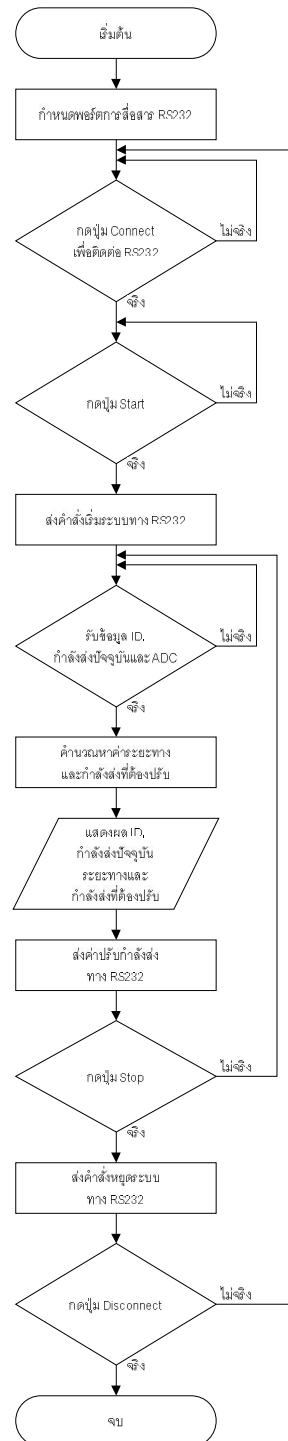
รูปที่ 12 โฟลว์ชาตการทำงานอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย
แม่ข่าย

2.3.2 โปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์

การออกแบบโปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์จะพัฒนาด้วยโปรแกรม Visual Studio 2010 [14] ซึ่งสามารถออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (GUI) [14] ได้ และทำการพัฒนาด้วยภาษา C# [13] โดยการออกแบบหน้าต่างของโปรแกรมประกอบด้วย ช่องสำหรับเลือกพอร์ตที่ใช้ติดต่อสื่อสาร RS232 ปุ่ม Connect สำหรับเริ่มการติดต่อสื่อสาร RS232 ปุ่ม Disconnect สำหรับหยุดการติดต่อสื่อสาร RS232 ส่วนแสดงผลจะประกอบด้วยช่อง Client ID สำหรับแสดงหมายเลขประจำตัวของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย ช่อง Client Tx Power สำหรับแสดงกำลังส่งที่อุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายใช้อยู่ขณะนั้นมีหน่วยเป็น dBm ช่อง Calculated Distance สำหรับแสดงระยะห่างระหว่างอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายและแม่ข่ายมีหน่วยเป็นเมตร ช่อง Calculated Tx Power สำหรับแสดงกำลังส่งที่จะต้องปรับมีหน่วยเป็น dBm ปุ่ม Start สำหรับเริ่มระบบการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย ปุ่ม Stop สำหรับหยุดการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย ดังแสดงตามรูปที่ 13 และโฟลว์ชาตการทำงานของโปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 13 โปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์



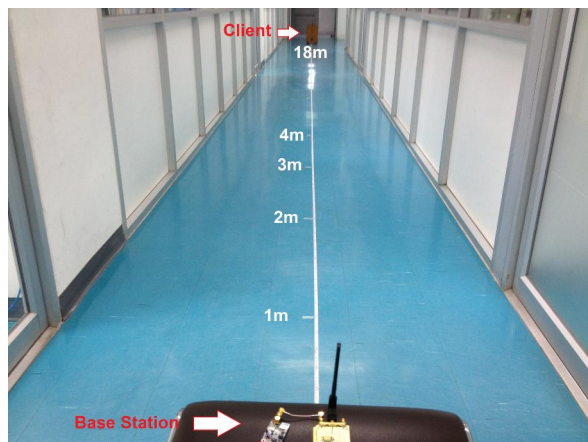
รูปที่ 14 โฟลว์ชาตโปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองสำหรับการเก็บข้อมูล

การทดลองนั้นจะทำการให้อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ลูกข่ายทำการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายแบบต่อเนื่องจำนวน 5,000 ชุดข้อมูล ที่กำลังส่ง 4 ระดับ คือ -18 dBm, -12 dBm, -6 dBm และ 0 dBm ทุกๆ ระยะห่าง 1 เมตร โดยเริ่มต้นจาก 1 เมตรถึง 18 เมตร ดัง

รูปที่ 12 โดยข้อมูลที่เก็บจะเป็นค่ากำลังส่งของ อุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายและค่าที่อ่านได้จากวงจร ตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz ที่เข้ามาทางขา ADC_CH0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์อุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย จากนั้นส่งข้อมูลออกทาง RS232 เพื่อเก็บผลโดยโปรแกรม Terminal ที่สามารถบันทึกข้อมูลที่ส่งเข้ามาทาง RS232 ได้



รูปที่ 15 การทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลที่ระยะทางต่างๆ

ตารางที่ 1 การเก็บค่าข้อมูลจำนวน 10 ชุดข้อมูล ที่ 0 dBm

Sequence	Client Tx PWR	ADC	Vout	Rx PWR
Data	(dBm)			(dBm)
1	0	151	0.738	-47.305
2	0	152	0.742	-47.079
3	0	155	0.757	-46.231
4	0	159	0.777	-45.101
5	0	158	0.772	-45.384
6	0	153	0.747	-46.796
7	0	152	0.742	-47.079
8	0	156	0.762	-45.949
9	0	152	0.742	-47.079
10	0	152	0.742	-47.079

จากตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างผลข้อมูลจำนวน 10 ชุด ข้อมูล โดยคอลัมน์ที่ 1 แสดงลำดับชุดข้อมูล คอลัมน์ที่ 2 แสดงค่ากำลังส่งของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายถูกข่าย คอลัมน์ที่ 3 แสดงค่า ADC ที่อ่านได้จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งค่า ADC ที่อ่านได้นี้จะเป็นค่า เลขฐานสิบ ซึ่งจะต้องทำการแปลงออกมาให้เป็นค่าของ แรงดันตามคอลัมน์ที่ 4 จึงจะสามารถนำไปเปรียบเทียบ

เป็นค่าที่วงจรตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz รับเข้ามาได้ในคอลัมน์ที่ 5

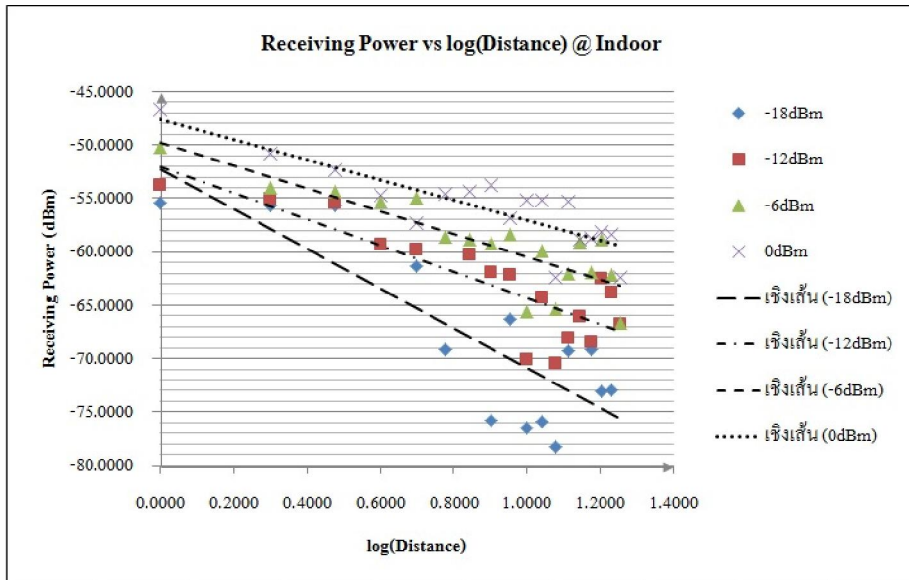
หลังจากทำการเก็บข้อมูลทั้งหมดได้แล้วจะนำผล ของค่า ADC ที่กำลังส่งและระยะทางต่างๆ มาเฉลี่ยเพื่อ หาแนวโน้มการรับค่ากำลังส่งได้ที่ระยะทางต่างๆ และ เก็บเป็นข้อมูลเพื่อนำไปสร้างโปรแกรมประมวลผลใน คอมพิวเตอร์ ค่าเฉลี่ยของกำลังที่รับได้ที่กำลังส่งและ ระยะทางต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยข้อมูลกำลังที่รับได้ที่กำลังส่งและระยะทางต่างๆ

Distance (m)	log(Distance)	Rx PWR			
		-18 dBm	-12 dBm	-6 dBm	0 dBm
1	0.0000	-55.3634	-53.7980	-50.1650	-46.6719
2	0.3010	-55.6354	-55.1005	-53.9433	-50.8383
3	0.4771	-55.6937	-55.3648	-54.3636	-52.3906
4	0.6021		-59.3429	-55.3191	-54.7350
5	0.6990	-61.3552	-59.8566	-54.9511	-57.3489
6	0.7782	-69.1901		-58.5597	-54.6095
7	0.8451		-60.3044	-58.8404	-54.3873
8	0.9031	-75.8022	-61.9841	-59.1875	-53.7169
9	0.9542	-66.2583	-62.1273	-58.3516	-56.8286
10	1.0000	-76.4538	-70.0727	-65.6312	-55.1281
11	1.0414	-75.9143	-64.3341	-59.9499	-55.2276
12	1.0792	-78.3215	-70.4217	-65.3473	-62.3718
13	1.1139	-69.2942	-68.1350	-62.0244	-55.3299

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยข้อมูลกำลังที่รับได้ที่กำลังส่งและระยะทางต่างๆ (ต่อ)

Distance (m)	log(Distance)	Rx PWR			
		-18 dBm	-12 dBm	-6 dBm	0 dBm
14	1.1461		-66.1053	-59.1258	-58.8905
15	1.1761	-69.1175	-68.4157	-61.9881	-58.7339
16	1.2041	-73.0766	-62.5132	-58.8228	-58.1587
17	1.2304	-72.9979	-63.8634	-62.1134	-58.4154
18	1.2553		-66.7814	-66.6576	-62.4104



รูปที่ 16 กราฟแสดงเส้นแนวโน้มค่ากำลังที่รับได้ที่กำลังส่งและระยะทางต่างๆ

พิจารณาข้อมูลที่ได้นำตารางที่ 2 จะเป็นข้อมูลสำหรับนำไปสร้างกราฟเส้นแนวโน้มของกำลังส่งทั้ง 4 ระดับที่ระยะทางต่างๆ ซึ่งกราฟเส้นแนวโน้มแต่ละเส้นจะได้ออกมาเป็นสมการเชิงเส้นที่เก็บไว้เป็นข้อมูลใช้คำนวณในโปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์ เพื่อตัดสินใจเลือกกำลังส่งที่ต้องปรับสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่าย ซึ่งนำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงในการคำนวณโดยไม่ต้องทำการเก็บผลข้อมูลใหม่ สมการเชิงเส้นที่ได้จากการเก็บข้อมูลแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมการเชิงเส้นที่ได้จากการเก็บข้อมูล

เชิงเส้น	สมการ
-18 dBm	$y_{(-18dBm)} = -18.621x - 52.272$
-12 dBm	$y_{(-12dBm)} = -12.231x - 52.042$
-6 dBm	$y_{(-6dBm)} = -10.713x - 49.778$
0 dBm	$y_{(0dBm)} = -9.3986x - 47.646$

ค่าที่อ่านได้จาก ADC ทำการแปลงเป็นค่ากำลังที่รับได้โดยใช้สมการที่ 1 [11, 13]

$$V_{adc} = \frac{5 * ADC}{1023} \quad (1)$$

ยกตัวอย่างเช่น เมื่ออุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายและอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายถูกใช้งาน โดยที่อุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายเริ่มต้นการส่งด้วยกำลังส่งที่ 0 dBm วงจรตรวจจับกำลังคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz อ่านค่า ADC ได้เท่ากับ 123 แล้วทำการแปลงเป็นค่าแรงดันดังสมการที่ 1 ได้เท่ากับ 0.6018 V จากนั้นทำการแทนค่าแรงดันที่ได้จากสมการที่ 1 ลงในสมการที่ 2 ที่ได้ออกมาจากเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ของ IC เบอร์ LT5538 เพื่อหาค่า Receiving Power ซึ่งจะได้ค่า Receiving Power เท่ากับ -55 dBm

$$Receiving Power = \left(\frac{V_{out}}{(17.7mV / dB)} \right) - 89dBm \quad (2)$$

เมื่อนำค่า Receiving Power ไปเปรียบเทียบกับ
แนวแกน y ในกราฟแสดงเส้นแนวโน้มภายในอาคารดัง
รูปที่ 16 ทำการแทนค่า Receiving Power ใน y ของ
สมการเชิงเส้นที่ 0 dBm จากตารางที่ 3

$$-55dBm = -9.3986x - 47.646 \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 จะได้ค่า x เท่ากับ 0.782 ซึ่งค่า x ที่
ได้นี้จะนำไปแทนในสมการเส้น แนวโน้มภายในอาคาร
ที่เหลือทั้งหมด เพื่อหาค่า y ของสมการที่เหลือ ณ จุด x
ค่าเดียวกัน ซึ่งค่า x นี้สามารถนำมาคำนวณเพื่อหา
ระยะทาง (Calculated Distance) ได้ดังสมการที่ 4

$$Calculated Distance = 10^x \quad (4)$$

เมื่อได้ค่า y ที่สมการเส้นแนวโน้มทั้งหมดจะสามารถ
คำนวณหาระยะทางระหว่างค่า y ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การหาระยะทางระหว่างค่า y ที่ตำแหน่ง
Receiving Power กับค่า y ของเส้นแนวโน้มที่เหลือ

ระยะห่าง	สมการ	ผลการคำนวณ
Δ_0	$y - y_{(-18dBm)}$	11.833
Δ_1	$y - y_{(-12dBm)}$	6.606
Δ_2	$y - y_{(-6dBm)}$	3.155
Δ_3	$y - y_{(0dBm)}$	0

เมื่อได้ค่าระยะทางดังตารางที่ 4 ต่อไปจะเป็นการ
คำนวณหาค่าเพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจเลือกปรับกำลัง
ส่ง ซึ่งจะใช้วิธีการคำนวณดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การหาค่าเพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจเลือก
ปรับกำลังส่ง

ค่าการตัดสินใจ	สมการ	ผลการคำนวณ
$Dval_0$	$P_{(rxNRF)} - \Delta_0$	-53.243
$Dval_1$	$P_{(rxNRF)} - \Delta_0$	-48.016
$Dval_2$	$P_{(rxNRF)} - \Delta_0$	-44.565
$Dval_3$	$P_{(rxNRF)} - \Delta_0$	-41.41

เนื่องจากค่าความไวในการรับสัญญาณของ IC
nRF24L01 อยู่ที่ -85 dBm ผลการตัดสินใจเลือกปรับ
กำลังส่งจึงเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความไวของ IC
nRF24L01 แต่ไม่ต่ำกว่า จึงได้คำตอบเป็นค่าของ
 $Dval_0$ ซึ่งเป็นการปรับกำลังส่งไปที่ -18 dBm

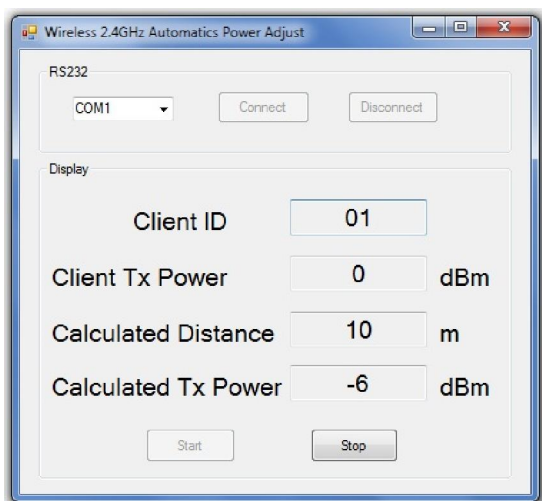
3.2 ผลการทดลองการปรับกำลังส่งระหว่างอุปกรณ์ สื่อสารไร้สายลูกข่ายกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย

การทดลองเริ่มจากเลือกระยะทางวางอุปกรณ์
สื่อสารไร้สายลูกข่ายกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่าย
อย่างละ 1 ชุด ในที่นี้ได้ทำการเลือกระยะทางไว้ที่
ประมาณ 10 เมตร จากนั้นเริ่มระบบโดยการกดปุ่ม Start
ในโปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์ ค่าที่แสดงใน
โปรแกรมประมวลผลคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 17

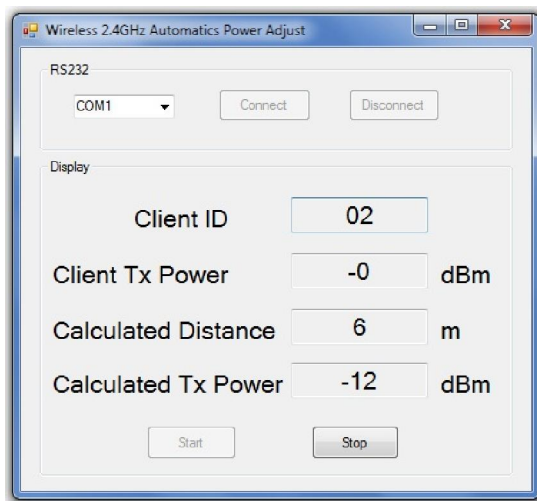
เมื่อระบบทำงานอย่างต่อเนื่องโปรแกรมประมวลผล
ในคอมพิวเตอร์จะคำนวณการปรับกำลังส่ง ที่ถูกปรับ
ในครั้งต่อไป โดยกำลังส่งที่ถูกปรับแล้วส่งกลับมาที่
อุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม่ข่ายจะทำการแสดงในช่อง
Client Tx Power ซึ่งเป็นค่าเดียวกับที่แสดงในช่อง
Calculated Tx Power ในครั้งก่อนหน้า แสดงว่าการปรับ
กำลังส่งสามารถทำได้จริง ส่วนของระยะทางยังคงเป็น

10 เมตรเช่นเดิมดังแสดงในช่อง Calculated Distance ซึ่งได้มาจากการค่ากำลังที่รับได้ที่อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย แม้ค่าจะเปรียบเทียบกับค่าระยะทางในตาราง และการคำนวณการปรับกำลังส่งในครั้งต่อไปเป็น -6dBm แสดงดังรูปที่ 18

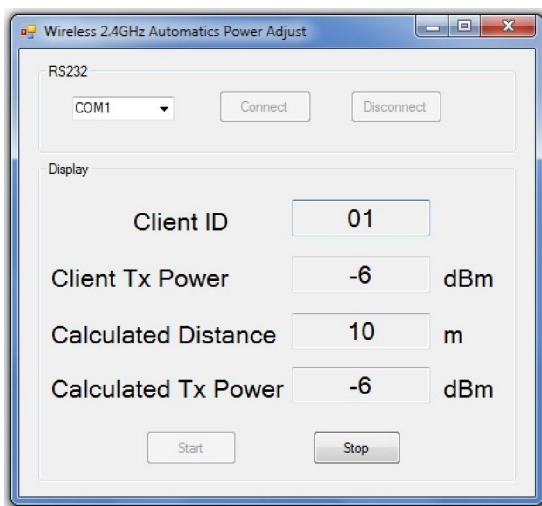
จากนั้นทำการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์สื่อสารไร้สายถูกเข้าในระบบโดยกำหนดให้เป็น Client ID 02 วางไว้ที่ระยะประมาณ 6 เมตร และ Client ID 03 วางไว้ที่ระยะ 15 เมตร เมื่อทำการทดสอบ โปรแกรมประมวลผลในคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณและแสดงผลดังรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ



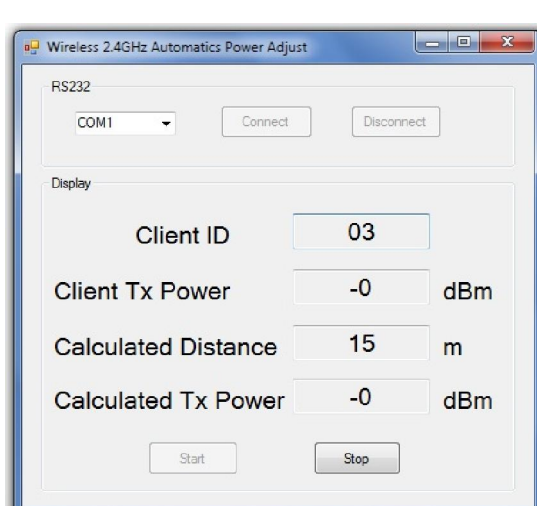
รูปที่ 17 การแสดงผลของโปรแกรมเมื่อเริ่มระบบ



รูปที่ 19 การแสดงผลของโปรแกรมเมื่อรับข้อมูลจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายตัวที่ 2 ได้



รูปที่ 18 การแสดงผลของโปรแกรมเมื่อปรับกำลังส่ง



รูปที่ 20 การแสดงผลของโปรแกรมเมื่อรับข้อมูลจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สายลูกข่ายตัวที่ 3 ได้

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลจากการเก็บค่าข้อมูลสามารถนำมาสร้างเป็นอัลกอริทึมสำหรับการปรับกำลังส่งสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายได้ ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในการสร้างอัลกอริทึมจากการเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อให้เห็นแนวทางความเป็นไปได้ที่จะนำวิธีการนี้ไปใช้สำหรับสภาพแวดล้อมอื่น ซึ่งถ้ามีผลข้อมูลจากสภาพแวดล้อมอื่นก็สามารถนำอัลกอริทึมนี้ไปปรับใช้กับพื้นที่อื่นๆ ได้และสามารถนำวิธีการดังกล่าวนี้ไปใช้สำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายอื่นๆ ได้

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้เมื่อมีการปรับกำลังส่งทดลองอาจมีการสูญหายของชุดข้อมูลเกิดขึ้น จากการทดลองได้ทำการคำนวณการปรับกำลังส่งที่ 5,000 ชุดข้อมูลต่อครั้ง สามารถคำนวณหาอัตราการสูญหายของข้อมูลเป็นเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ 5

$$\text{อัตราการสูญหายชุดข้อมูล} = \frac{(N_{(tx)} - N_{(rx)})}{N_{(tx)}} * 100 \quad (5)$$

เมื่อ $N_{(tx)}$ คือ จำนวนชุดข้อมูลที่ส่ง $N_{(rx)}$ คือ จำนวนชุดข้อมูลที่ได้รับ

ผลการทดสอบจากรูปที่ 17 เมื่อมีการปรับกำลังส่งเป็น -6dBm ที่ระยะทาง 10 เมตร ทำการส่ง 5,000 ชุดข้อมูล ได้รับข้อมูล 3,530 ชุดข้อมูล

ผลการทดสอบจากรูปที่ 19 เมื่อมีการปรับกำลังส่งเป็น -12dBm ที่ระยะทาง 6 เมตร ทำการส่ง 5,000 ชุดข้อมูล ได้รับข้อมูล 4,915 ชุดข้อมูล

ผลการทดสอบจากรูปที่ 20 เมื่อมีการปรับกำลังส่งเป็น 0dBm ที่ระยะทาง 15 เมตร ทำการส่ง 5,000 ชุดข้อมูล ได้รับข้อมูล 4,409 ชุดข้อมูล

เมื่อทำการคำนวณดังสมการที่ 5 จะได้อัตราการสูญหายชุดข้อมูล ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 อัตราการสูญหายชุดข้อมูลจากผลการทดสอบ

กำลังส่ง	ระยะทาง (m)	อัตราการสูญหายชุดข้อมูล
-6dBm	10	29.4%
-12dBm	6	1.7%
0dBm	15	11.82%

จากตารางที่ 6 เมื่อทำการปรับลดกำลังส่งในการสื่อสารลงมา มีผลทำให้เกิดการสูญหายของข้อมูลซึ่งเมื่อคำนวณออกมาแล้วจะเห็นว่า อัตราการสูญหายชุดข้อมูลอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และอุปกรณ์สื่อสารยังสามารถสื่อสารกันได้ ถ้าอัตราการสูญหายของชุดข้อมูลมีมากขึ้นจนไม่สามารถสื่อสารกันได้ที่กำลังส่งต่ำๆ อุปกรณ์สื่อสารไร้สายแม้ว่าจะทำการส่งให้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายถูกข่ายปรับกำลังส่งขึ้นจนกว่าจะสื่อสารกันได้ใหม่

4. สรุปผล

การปรับกำลังส่งอัตโนมัติของอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เป็นแนวคิดที่สร้างขึ้นเพื่อให้เห็นแนวทางการพัฒนาด้านการประหยัดพลังงานสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่คงมีการทำงานโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สื่อสารไร้สายและโปรแกรมที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ตามต้องการซึ่งมีผลให้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายถูกข่ายสามารถใช้พลังงานอย่างเหมาะสมได้จริง เนื่องจากได้ทำการวัดระยะเวลาของ

การใช้งานแบตเตอรี่แบบไม่มีการปรับกำลังส่งและมีการปรับกำลังส่ง แบตเตอรี่ที่ใช้กับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่มีการปรับกำลังส่งสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่า แบตเตอรี่ที่ใช้กับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ไม่มีการปรับกำลังส่งประมาณ 5 วัน โดยกำลังส่งคงที่กำหนดไว้ที่ 0 dBm ซึ่งเป็นกำลังส่งสูงสุดทั้งนี้ค่าที่ได้จากการวัดผลและการทดลองใช้งานจริงอาจมีการคลาดเคลื่อนบ้างอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่มีความแตกต่างกัน

5. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ในการเก็บผลข้อมูลนั้น ค่าข้อมูลที่ได้บางจุดนั้นเป็นผลข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อน อาจเนื่องมาจากสภาพอากาศ สภาพแวดล้อม หรือแม้แต่อุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ดังนั้นการเก็บข้อมูลที่ระยะทางและสภาพแวดล้อมต่างๆ ต้องทำการเก็บค่าข้อมูลให้ได้มากที่สุดจึงจะทำให้มีความเชื่อมั่นสูง ความถูกต้องของข้อมูลก็จะถูกต้องมากขึ้น เมื่อนำไปสร้างโปรแกรมสำหรับการใช้งานจริงจะทำให้โปรแกรมที่สร้างมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Lin, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, J. Stankovic and T. He, "ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks." SenSys '06. Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. New York, 2006.
- [2] D. Li, K. Wong, Y. H. Hu and A. Sayeed, "Detection, classification and tracking of targets in distributed sensor networks.", IEEE Signal Processing Magazine, 19, 2002, pp. 17-29.
- [3] B. Richard, R. Parameswaran, and S. Akbar, "Distributed Target Classification and Tracking in Sensor Networks.", Proceeding of the IEEE, 91, 2003, pp. 1163-1171.
- [4] S. Janakiraman, S. Rajasoundaran and P. Narayanasamy, "The Model — Dynamic and Flexible Intrusion Detection Protocol for high error rate Wireless Sensor Networks based on data flow", IEEE International Conference on Computing, Communication and Applications (ICCCA), 2012.
- [5] E.Miletic, M.Krstic, M.Piz, and M.Methfessel, "Digital Automatic Gain Control Integrated on WLAN Platform", IHP, 2008.
- [6] P. Teepakasatitkul and K. Hanwicha, "Resource Allocation in CDMA Systems", Master Thesis, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. 2007.
- [7] M.A. Landolsi, "Near-far problem impact on mobile radiolocation accuracy in CDMA wireless cellular networks.", Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications, IEEE International Conference, 2007.
- [8] K. Marios, C. Konstantinos, N. Sotiris and R. Jose, "Passive target tracking: Application with mobile devices using an indoors WSN Future Internet testbed.", Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), IEEE International Conference, 2011.

- [9] Nodic Semiconductor Corporation, "nRF24L01 Product Specification", Available: <http://www.nordicsemi.com>, July 2007.
- [10] Linear Technology Corporation. "LT5538 datasheet" Available: <http://www.linear.com>, May 2008.
- [11] Atmel Corporation. "ATmega8A datasheet" Available from: <http://www.atmel.com>, June 2009.
- [12] Intersil Corporation. "ICL3232 datasheet" Available: <http://www.intersil.com>, May 2006
- [13] P.Parangsantikul, "C Programming for AVR Microcontroller and WinAVR (C Compiler)", Appsofitech Co.,Ltd, 2006. (in Thai)
- [14] J. Allwork, "Visual Studio C# 2010 Programming and PC interfacing", Elektor International Media, 2011, pp. 305.