การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

การปรับปรุงประสิทธิภาพการวัดค่าความแรงของสัญญาณจากบีคอนบลูทูธพลังงานต่ำสำหรับระบบระบุตำแหน่งในอาคาร: การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการกรองสัญญาณรบกวนบน ESP32

Optimizing BLE Beacon RSSI Measurements for Indoor Positioning: A Comparative Study of Noise Reduction Filters on ESP32

อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ[1]* และ นพดล มณีรัตน์[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ athasart.na@kmitl.ac.th*
[2]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง noppadol.ma@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบผลของตัวกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดในการกระจายสัญญาณเพื่อตรวจสอบตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ BLE Beacon และอุปกรณ์รับสัญญาณ สำหรับการทดสอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งต้นทุนต่ำในอนาคต การศึกษาในครั้งนี้ได้เปรียบเทียบตัวกรองทั้งหมด 3 ตัวกรอง ที่นิยมใช้สำหรับการกรองสัญญาณรบกวน คือ Kalman filter Moving average filter และ Median filter จากการทดลองพบว่า Kalman filter ให้ผลในการกรองสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสัญญาณที่กระจายจาก BLE Beacon มีค่าความแปรปรวนของระดับค่าสัญญาณอยู่ที่ 0.6 ซึ่งน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวกรองทั้งหมดที่ทำการทดลอง ในขณะที่ Median filter มีความไวในการติดตามการเปลี่ยนแปลงสัญญาณสูงที่สุด

คำสำคัญ: การระบุตำแหน่งภายในอาคาร บีคอนบลูทูธพลังงานต่ำ ค่าความแรงสัญญาณ ตัวกรองคาลมาน

Abstract

The study presents a comparative analysis of noise filters on signal propagation for indoor positioning systems. This research developed a BLE Beacon and a receiver device for testing with an ESP32 microcontroller to facilitate the future development of a low-cost positioning system. The study compared three commonly used noise filters: Kalman filter, Moving average filter, and Median filter. The experimental results showed that the Kalman filter performed best in filtering signal noise and was the most robust against rapid changes in signals from the BLE Beacon. It demonstrated the lowest signal variance at 0.6 when compared to all other filters tested. In contrast, the Median filter exhibited the highest sensitivity in tracking signal changes.

Keywords: Indoor positioning, BLE Beacon, RSSI, Kalman Filter

1. บทนำ

ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor Positioning System: IPS) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยติดตามตำแหน่งของคนหรือวัตถุในพื้นที่ปิด ซึ่งระบบนำทางภายนอกอาคารเช่น GPS ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสัญญาณดาวเทียมไม่สามารถทะลุผ่านโครงสร้างอาคารได้ ในปัจจุบันการระบุตำแหน่งภายในอาคารยังคงเป็นความสนใจของนักวิจัยในการพัฒนาระบบ และวิธีการ เพื่อการระบุตำแหน่งที่แม่นยำและรวดเร็ว ซึ่งจะมีประโยนช์ในการใช้งานในหลายด้าน อาทิ การนำทางในพื้นที่ การติดตามทรัพย์สินและอุปกรณ์ ความปลอดภัยและการจัดการเหตุฉุกเฉิน เป็นต้น ซึ่งได้มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ทำการศึกษาระบบการระบุตำแหน่งภายในอาคาร เช่น การพัฒนาเฟรมเวิร์ก MSNN-Loc สำหรับระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ WiFi fingerprinting มีความแม่นยำและทนทานต่อความเปลี่ยนแปลง เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยสัญญาณ WiFi [1] การพัฒนาต้นแบบระบบนำทางภายในอาคารด้วย 3D Point Cloud และ LiDAR-AR เพื่อระบุตำแหน่งผู้ใช้ในอาคารสามารถนำทางในอาคารที่สแกนไว้แล้วล่วงหน้าได้ [2] การพัฒนาระบบ Visual SLAM สำหรับนำทางหุ่นยนต์ในโรงพยาบาล ระบบนี้ช่วยให้ หุ่นยนต์นำทางในโรงพยาบาลได้อย่างมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่แบบเดิมทำได้ไม่ดี สามารถประยุกต์ใช้เพื่อการขนส่งอัตโนมัติในสถานพยาบาล เช่น นำส่งยา หรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] ระบบระบุตำแหน่งในอาคารด้วยแท็ก WiFi แบบพาสซีฟ ใช้หลักการ Backscatter (การสะท้อนสัญญาณ WiFi จาก APs หรือสมาร์ทโฟน) เพื่อระบุตำแหน่ง [4] จะพบว่ามีการใช้หลักการ และวิธีการที่หลากหลายเพื่อการระบุตำแหน่งภายในอาคาร และจะพบว่าในหลาย ๆ งานวิจัยจะใช้วิธีการระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีไร้สาย ซึ่งรับความนิยมมากขึ้นในยุคปัจจุบัน และถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ [5] ระบบ IPS มีบทบาทสำคัญในยุค IoT และ Smart City การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม เช่น BLE Beacon สำหรับต้นทุนต่ำ หรือ UWB สำหรับความแม่นยำสูง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งด้วย BLE Beacon ซึ่งสามารถใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีราคาถูก แต่เนื่องจากปัญหา

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

ของสัญญาณรบกวน และสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าระดับความแรงสัญญาณ RSSI (Received Signal Strength Indicator) ซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีการในการลดความแปรปรวนของค่าระดับความแรงสัญญาณ เพื่อให้การระบุตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Moving Average, Median Filter และ Kalman Filter ในการลดสัญญาณรบกวนของ RSSI การพัฒนาสมการคำนวณระยะทาง (Distance Estimation) จากค่า RSSI ที่ผ่านการกรอง และ ทดสอบประสิทธิภาพบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ Edge Computing สำหรับระบบระบุตำแหน่งต่อไป โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้ กำหนดการทดลองในสภาพแวดล้อมห้องโถงภายในอาคาร ใช้ BLE Beacon ที่พัฒนาด้วย ESP32 และใช้ ESP32 เป็นตัวรับสัญญาณและประมวลผลตัวกรองต่าง ๆ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ESP32 เป็นบอร์ดพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์อเนกประสงค์ที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในปัจจุบัน โดยเฉพาะในด้าน IoT (Internet of Things) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถ การเชื่อมต่อ Wi-Fi และ Bluetooth ได้ในตัว ซึ่งมีหน่วยประมวลผลเป็นชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่พัฒนาโดยบริษัท Espressif Systems ซึ่งได้มีการหน่วยประมวลผลนี้ไปสร้างเป็นบอร์ด ESP32 ในรุ่นต่าง ๆ มากมายซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ ESP-WROOM-32 [6] เป็นหน่วยประมวลผล ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ บอร์ด Doit ESP32 DevKit V1 ซึ่งมีโมดูล Bluetooth Low Energy (BLE) ตามความต้องการในการพัฒนาอุปกรณ์ BLE Beacon มีหน่วยประมวลผลกลางแบบ Dual-Core 32-bit รองรับการพัฒนาด้วย Arduino IDE ด้วยภาษา C/C++ มีความยืดหยุ่นในการพัฒนาระบบงาน

2.2 BLE Beacon และการระบุตำแหน่งด้วย RSSI

BLE Beacon (Bluetooth Low Energy Beacon) เป็นอุปกรณ์ส่งสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้เทคโนโลยี Bluetooth Low Energy (BLE) ทำงานบนมาตรฐาน Bluetooth 4.0+ ที่ใช้พลังงานต่ำ เพื่อระบุตำแหน่งและส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียง โดยไม่ต้องมีการเชื่อมต่อ (Connectionless) ส่งข้อมูลแบบ Broadcast ในรูปแบบ Advertising Packet แบบคงที่ เป็นระยะ (Interval: 100 ms - 1 s)

RSSI (Received Signal Strength Indicator) ถูกนำมาใช้ในการประมาณตำแหน่งภายในอาคารโดยอาศัยความแรงของสัญญาณ WiFi, Bluetooth หรือสัญญาณไร้สายอื่น ๆ จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ เช่น Access Points, Beacons เพื่อคำนวณระยะทางหรือตำแหน่งของอุปกรณ์เป้าหมาย ในการวัดค่า RSSI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำการวัดความแรงของสัญญาณ มีหน่วยเป็น dBm จากจุดส่งสัญญาณหลายจุด โดยค่า RSSI จะแปรผกผันกับระยะทาง สามารถเขียนแบบจำลองการสูญเสียสัญญาณตามระยะทาง (Log-Distance Path Loss Model) [7] ดังสมการที่ (1) ซึ่งจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ถูกลดทอนลง โดยพิจารณาจากระยะทาง และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมในอาคาร และสามารถแปลงสมการเป็นระยะทางได้ดังสมการที่ (2)

$$PL(dBm) = PL_0(dBm) + 10n\,log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

$$d = d_0.10^{\left(\frac{PL(dBm)-PL_0(dBm)}{10n}\right)} \quad (2)$$

เมื่อ $PL(dB)$ คือ ค่าสัญญาณที่ถูกลดทอน
$PL_0(dB)$ คือ ค่าสัญญาณที่จุดอ้างอิง ปกติคือค่าสัญญาณที่ d_0
n คือ อัตราการลดทอนสัญญาณ (มีค่าระหว่าง 2 – 4)
d คือ ระยะทางระหว่างโหนดเป้าหมายกับโหนดอ้างอิง
d_0 คือ ระยะทางอ้างอิง ปกติกำหนดเป็น 1 เมตร

ในการประมาณตำแหน่ง โดยทั่วไปจะมีวิธีการที่นิยม 2 วิธี

1. Trilateration ใช้ระยะทางจากจุดส่งสัญญาณอย่างน้อย 3 จุด เพื่อหาตำแหน่งโดยการหาจุดตัดของวงกลม [8]

2. Fingerprinting เปรียบเทียบค่า RSSI ปัจจุบันกับฐานข้อมูลที่เก็บไว้ [9]

2.3 สัญญาณรบกวนใน BLE Beacon และวิธีการกรอง

ปกติสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบ BLE Beacon โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร มีสาเหตุหลักแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Multipath Fading (สัญญาณสะท้อนหลายทาง) มีสาเหตุมาจากสัญญาณไม่ได้เดินทางเป็นเส้นตรงเท่านั้น แต่ยังมีการสะท้อนกับสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ภายในอาคาร เช่น ผนัง เฟอร์นิเจอร์ หรือ ร่างกายของคน ส่งผลให้อุปกรณ์รับสัญญาณได้รับสัญญาณเดียวกันหลายเส้นทาง อาจเกิดการหักล้าง หรือเสริมกันได้ ส่งผลให้ค่า RSSI ที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง

2. Interference (สัญญาณรบกวน) ปกติ BLE Beacon จะทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีอุปกรณ์หลายชนิดที่ทำงาน ณ ความถี่นี้ มีโอกาสถูกรบกวนได้ เช่น WiFi หรือ Beacon ตัวอื่น ๆ ในบริเวณ ส่งผลให้เกิดการขาดหายของสัญญาณ ค่า RSSI เปลี่ยนแปลงฉับพลัน

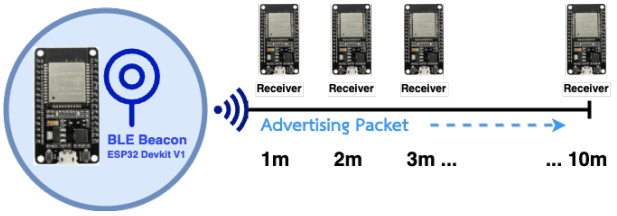
ในการแก้ปัญหาความผิดปกติของสัญญาณที่กล่าวไปในข้างต้น สำหรับระบบการระบุตำแหน่ง สามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคการกรองสัญญาณรบกวน ได้แก่ Moving Average ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงเวลาหนึ่ง Filter Median Filter เลือกค่ากลางเพื่อลดผลกระทบจาก Outliers และ Kalman Filter ประมาณค่าที่เหมาะสมโดยพิจารณาแบบจำลองทางสถิติ [10 - 11]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

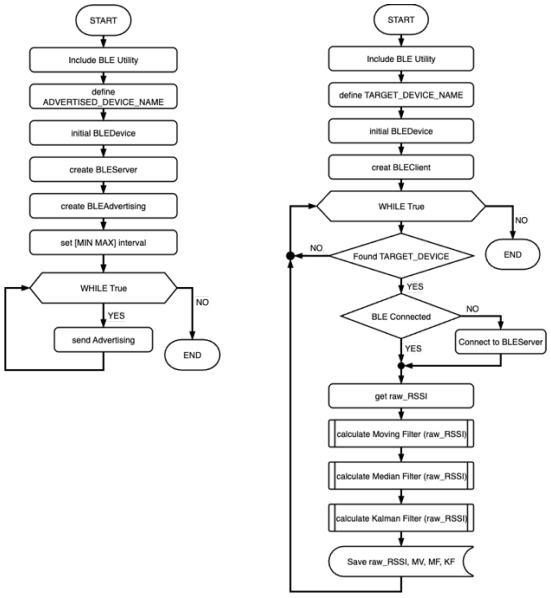
ในการศึกษานี้ได้ออกแบบระบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Doit ESP32 DevKit V1 เพื่อสร้างอุปกรณ์ BLE Beacon จำนวน 1 ตัว สำหรับ

ส่งข้อมูล Advertising Packet กระจายออกไป และสร้างอุปกรณ์รับสัญญาณจำนวน 1 ตัว ทำการทดลอง รับ - ส่ง สัญญาณในบริเวณภายในอาคารโดยวางอุปกรณ์ BLE Beacon ไว้ในตำแหน่งที่กำหนด และเคลื่อนที่อุปกรณ์รับสัญญาณไปในระยะต่าง ๆ ตั้งแต่ 1 เมตร ไปจนถึง 10 เมตร ตามแผนผังตำแหน่งการวางอุปกรณ์ใน รูปที่ 1 ทำการทดลองเก็บข้อมูลการวัดค่า RSSI ดั้งเดิม และค่า RSSI ที่ผ่านการกรองสัญญาณทั้ง 3 แบบตัวกรอง คำนวณหาค่าความแปรปรวนของสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแต่ละตัวกรอง และสร้างสมการคำนวณระยะทาง



รูปที่ 1 แผนผังตำแหน่งการวางอุปกรณ์ รับ - ส่ง สัญญาณ

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับอุปกรณ์ BLE Beacon และ BLE Client ซึ่งแสดงผังงานของโปรแกรมบนอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดได้ตามผังงานของโปรแกรมดังรูปที่ 2 ผังงานการทำงานของอุปกรณ์ BLE Beacon ในรูปที่ 2ก เริ่มต้นจากการ Import library ต่าง ๆ ของ BLE Device บน ESP32 กำหนดชื่อของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ สร้าง BLE Server เพื่อให้อุปกรณ์รับสัญญาณสามารถค้นหา และเชื่อมต่อเพื่อรับสัญญาณได้อย่างต่อเนื่อง และในการทำงาน BLE Device ที่พัฒนาขึ้น จะวนส่ง Advertising เป็นระยะ ตามที่กำหนดไว้ใน ค่า Min Max interval และผังงานรูปที่ 2ข แสดงการทำงานของอุปกรณ์สแกนสัญญาณ RSSI BLE Beacon เริ่มจากการ Import library ต่าง ๆ ของ BLE Device บน ESP32 เช่นเดียวกับการสร้างอุปกรณ์ BLE Beacon แต่แตกต่างกันโดยต้องสร้าง BLE Client เพื่อเป็น Client สำหรับการสแกนสัญญาณ กระบวนการสแกนสัญญาณเริ่มจากการตรวจสอบการค้นหาอุปกรณ์ตามค่า TARGET_DEVICE ที่กำหนดไว้ ซึ่งก็คือชื่อของ BLE Beacon ที่ได้กำหนดไว้ในอุปกรณ์กระจายสัญญาณ จากนั้นทำการตรวจสอบการเชื่อมต่อ หากยังไม่ได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณให้ดำเนินการเชื่อมต่อให้สำเร็จ จากนั้นเป็นขั้นตอนของการตรวจวัดค่า RSSI ซึ่งจะถูกเก็บไว้ในตัวแปร raw_RSSI จากนั้นส่งผ่านค่าไปยังฟังก์ชันการคำนวณค่า RSSI ใหม่ของตัวกรองทั้ง 3 ตามสมการที่ได้จากหัวข้อที่ผ่านมา และทำการเก็บบันทึกข้อมูล เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ในการทำงานของ BLE Client ที่ออกแบบนี้จะทำการสแกนตรวจวัดสัญญาณไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะหยุดการทำงานของอุปกรณ์



ก.อุปกรณ์กระจายสัญญาณ ข.อุปกรณ์สแกนสัญญาณ

รูปที่ 2 ผังงานการทำงานของอุปกรณ์ BLE Beacon บน ESP32

3.2 การกรองสัญญาณ

ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการกรองสัญญาณ RSSI เพื่อลดความแปรปรวนและความผิดเพี้ยนของสัญญาณ RSSI เพื่อการประยุกใช้สำหรับการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีการกรองสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ ตัวกรอง Moving Average ตัวกรอง Median Filter และตัวกรอง Kalman Filter ตามงานวิจัยที่ได้นำเสนอไปแล้ว ซึ่งสามารถนำมาเขียนโปรแกรมกรองข้อมูลค่า RSSI ได้ ตามสมการที่ (3) แสดงฟังก์ชันของตัวกรองแบบ Moving Average ซึ่งเป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลค่า RSSI ที่วัดได้จำนวนข้อมูลตาม Window size ที่กำหนด และ สมการที่ (4) แสดงฟังก์ชันของตัวกรองแบบ Median Filter โดยจะเลือกเอาค่ากลางของข้อมูลที่เก็บไว้ตามขนาด Window size ที่กำหนด ซึ่งขนาดของ Window size จะต้องเป็นจำนวนเลขคี่

$$RSSI_MA_{filter} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} RSSI_i \quad (3)$$

$$RSSI_MF_{filter} = Median[(x-2),(x-1),(x),(x+1),(x+2)] \quad (4)$$

ในส่วนของตัวกรอกแบบ Kalman Filter จะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าโดยจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1: Prediction

State Prediction

$$\hat{x}_{\bar{k}} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (5)$$

Error Covariance Prediction

$$P_{\bar{k}} = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 2: Update

Calculate Kalman Gain

$$K_k = P_{\bar{k}} H^T (H P_{\bar{k}} H^T + R)^{-1} \quad (7)$$

State Update

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{\bar{k}} + K_k (z_k - H\hat{x}_{\bar{k}}) \quad (8)$$

Error Covariance Update

$$P_k = (I - K_k H) P_{\bar{k}} \quad (9)$$

เมื่อ $\hat{x}_k$ ค่าประมาณสถานะปัจจุบัน
$\hat{x}_{\bar{k}}$ ค่าประมาณสถานะก่อนอัพเดต
A โมเดลระบบ
B สัญญาณควบคุม
u_k ค่าอินพุตควบคุม
P_k ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ
Q สัญญาณรบกวนของระบบ
H โมเดลการวัด
R สัญญาณรบกวนของการวัด
z_k ค่าที่วัดได้จริง
K_k น้ำหนักในการปรับค่าประมาณ

3.3 การคำนวณระยะทาง

เมื่อทำการกรองสัญญาณ RSSI แล้วจะสามาถนำค่า RSSI ที่ผ่านการกรองแล้วมาดำเนินการคำนวณระยะทาง ซึ่งค่า RSSI ที่ผ่านการกรองจะมีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ค่าระยะทางที่คำนวณออกมาได้จะไม่แกว่งมาก โดยในการคำนวณระยะทางจะใช้สูตรของการลดทอนสัญญาณ Log-Distance Path Loss Model มาแปลงกลับเพื่อหาค่าระยะทางแสดงได้ดังสมการที่ (10)

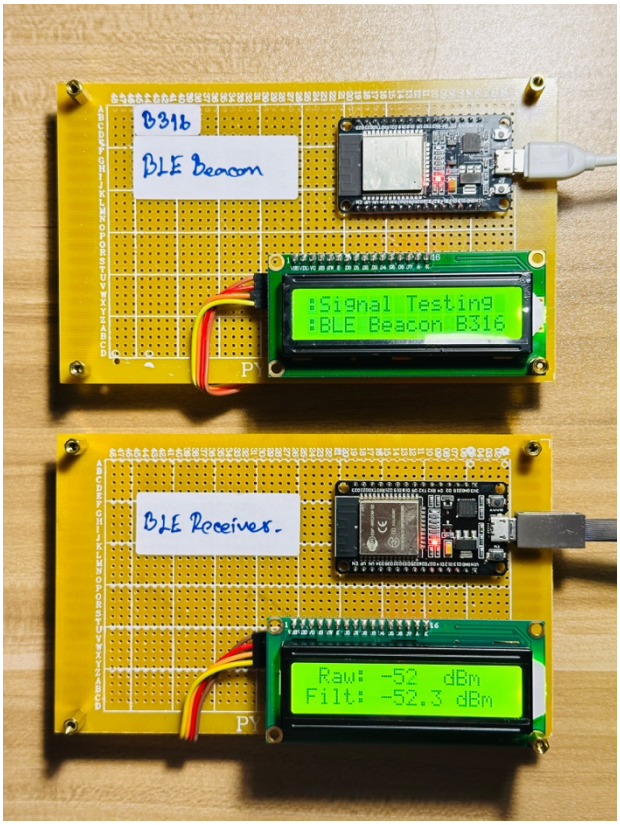
$$d = d_0 \times 10^{\frac{(RSSI_0 - RSSI)}{10n}} \quad (10)$$

4. ผลการทดลอง

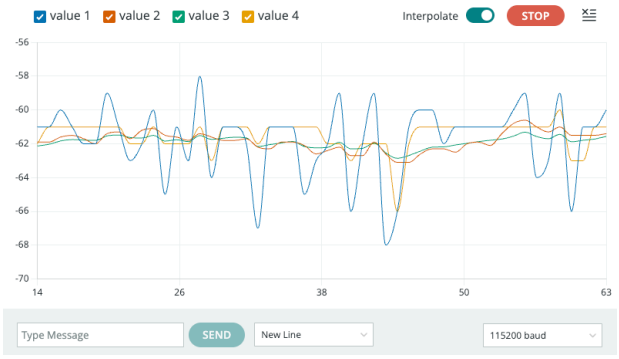
ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองวัดค่าสัญญาณ RSSI รวมถึงการกรองสัญญาณของทั้ง 3 ตัวกรอง พร้อม ๆ กัน เพื่อการเปรียบเทียบผลที่วัดได้ในช่วงเวลาเดียวกัน การทดลองถัดมา คือ การทดลองนำค่า RSSI ที่ผ่านการกรองที่ประสิทธิภาพดีที่สุดมาคำนวณหาระยะทาง ซึ่งแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 1 – 3

การทดลองที่ 1: การทดลองวัดค่า RSSI และกรองสัญญาณ

ในการทดลองนี้ ได้ทำการวัดค่าสัญญาณ RSSI จากจุดต่าง ๆ ที่ห่างจากอุปกรณ์ BLE Beacon ในระยะ 10 เมตร โดยทดลองเคลื่อนที่อุปกรณ์สแกนสัญญาณห่างออกจากอุปกรณ์ BLE Beacon ครั้งละ 1 เมตร โดยในการวัดเมื่อวางตำแหน่งแล้วจะไม่ขยับอุปกรณ์ทั้ง 2 ให้อุปกรณ์สแกนสัญญาณเก็บข้อมูลเป็นเวลา 1 นาที แล้วเคลื่อนไปยังจุดถัดไป โดยใช้อุปกรณ์สำหรับการทดลองดังรูปที่ 3 และรูปการสแกนสัญญาณดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงการพล็อตกราฟสัญญาณที่สแกนได้ในระยะต่าง ๆ



รูปที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง



รูปที่ 4 ตัวอย่างภาพการสแกนสัญญาณและการใช้ตัวกรองต่าง ๆ

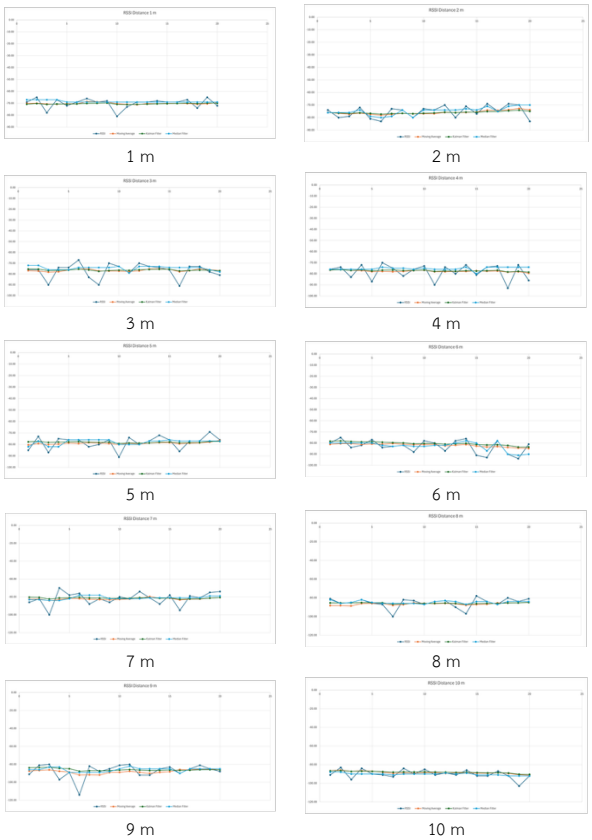
ในภาพแสดงเส้นสแกนสัญญาณ 4 เส้น ประกอบด้วย
เส้นสีน้ำเงิน คือ ค่าสัญญาณ RSSI ที่วัดได้
เส้นสีเขียว คือ ค่า RSSI ที่ผ่านการกรองด้วย Kalman Filter
เส้นสีแดง คือ ค่า RSSI ที่ผ่านการกรองด้วย Moving Average
เส้นสีเหลือง คือ ค่า RSSI ที่ผ่านการกรองด้วย Median Filter

ตารางที่ 1 แสดงถึงผลสรุปการวัดค่าสัญญาณ และการกรองด้วยตัวกรองทั้งหมด โดยคำนวณหาค่าเฉลี่ย และความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละกลุ่มข้อมูล

ตารางที่ 1 ผลสรุปการวัดค่าสัญญาณ RSSI และผ่านตัวกรอง

Distance (m)	RSSI		Moving Average		Median Filter		Kalman Filter	
	avg	var	avg	var	avg	var	avg	var
1	-70.0	15.9	-70.1	0.5	-68.6	0.6	-70.4	0.2
2	-75.4	20.7	-75.9	2.0	-74.7	8.8	-76.0	0.7
3	-77.1	44.2	-76.6	1.0	-74.5	3.3	-76.3	0.4
4	-78.2	42.7	-77.7	0.6	-75.4	1.9	-77.2	0.4
5	-78.3	28.8	-79.0	0.7	-77.9	4.6	-78.1	0.3
6	-83.1	31.3	-82.0	1.8	-82.6	14.6	-80.4	0.7
7	-81.8	50.0	-82.2	1.0	-81.1	3.3	-81.3	0.4
8	-85.4	27.0	-86.5	1.2	-84.8	2.3	-85.8	0.3
9	-87.5	58.5	-88.1	4.0	-86.0	5.0	-86.0	1.6
10	-90.1	20.3	-88.6	1.8	-90.2	1.3	-88.1	1.0
ค่าเฉลี่ยความแปรปรวน		33.9		1.5		4.6		0.6

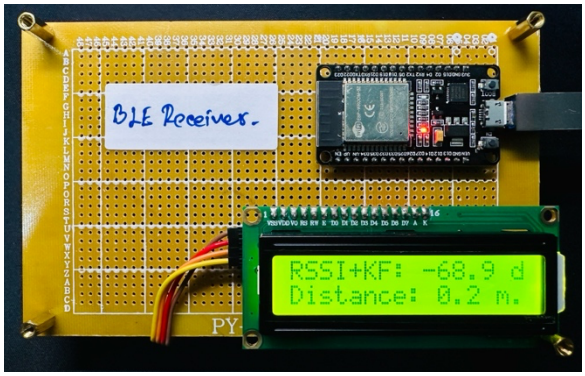
เมื่อ avg คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลสัญญาณที่ตรวจวัดได้
var คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูลสัญญาณที่ตรวจวัดได้



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการสแกนสัญญาณที่ระยะ 1 – 10 เมตร

การทดลองที่ 2: การทดลองคำนวณหาค่าระยะทาง

ในการทดลองนี้ ได้คำนวณหาค่าระยะทางตามสมการที่ 10 โดยนำค่าความแรงสัญญาณ RSSI ที่กรองแล้วโดยตัวกรอง Kalman เนื่องจากมีค่าความแปรปรวนของความแรงสัญญาณน้อยที่สุด ตามข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 1 ซึ่งในรูปที่ 6 ได้แสดงตัวอย่างภาพหน้าจอ LCD ของการคำนวณระยะทาง โดยในการทดลองได้ทำการการเพิ่มและลดระยะห่างระหว่าง 2 อุปกรณ์



รูปที่ 6 หน้าจอ LCD แสดงผลคำนวณระยะทาง

5. การอภิปรายผล

จากผลการทดลองที่ได้ดำเนินการในการทดลองที่ 1: การทดลองวัดค่า RSSI และกรองสัญญาณ ผลที่ได้พบว่าค่า RSSI ที่ไม่ผ่านการกรองให้ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปมาอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อนำค่าความแรงสัญญาณที่วัดได้มาผ่านตัวกรองทั้ง 3 แบบ พบว่า ตัวกรอง Median Filter มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความแรงสัญญาณที่เปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว แต่ยังให้ค่าที่เรียบกว่าที่ไม่มีการกรอง ในขณะที่ตัวกรอง Moving Average และ Kalman filter มีความไวต่อการเปลี่ยนของค่าความแรงสัญญาณ RSSI ที่วัดได้ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากกราฟแสดงผลการสแกนสัญญาณ ตามรูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นว่า Moving Average และ Kalman filter มีความใกล้เคียงกัน ทั้งในด้านค่า RSSI และการเปลี่ยนแปลง แต่ตัวกรอง Kalman Filter จะมีความเสถียรของค่าสัญญาณที่ดีกว่า ซึ่งสามารถให้เห็นได้จากค่าความแปรปรวนที่คำนวณออกมา ตามตารางที่ 1 และประสิทธิภาพการประมวลผลข้อมูลของ บอร์ด ESP32 สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างราบรื่น

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองตามวิธีการที่ได้นำเสนอไปนี้สามารถสรุปได้ว่า ค่า RSSI ที่วัดได้โดยตรง มีค่าความแปรปรวนสูงถึง 33.9 ไม่สามารถนำมาใช้ในการระบุตำแหน่ง หรือการวัดระยะทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ส่งผลให้เกิดปัญหาค่าระดับสัญญาณไม่เสถียร การนำตัวกรองมาปรับใช้ในการประมวลผลค่า RSSI ส่งผลดีต่อค่าความแปรปรวนของค่า RSSI มีผลต่อความคงทนของการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI โดยพิจารณาจากค่าความแปรปรวนของค่า RSSI หลังผ่านตัวกรองเรียงตามลำดับได้ดังนี้ Kalman filter = 0.6, Moving Average filter= 1.5 และ Median filter = 4.6 ซึ่งจากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าตัวกรอง Kalman filter มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่า RSSI ดั้งเดิม มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการจัดการกับความแปรปรวนของค่า RSSI ภายในอาคาร ในขณะที่ ตัวกรอง Median filter สามารถจัดการกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแบบฉับพลันได้ดี

ในส่วนของการประยุกต์ใช้บอร์ด ESP32 เพื่อการประมวลผลสัญญาณ Bluetooth สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในอนาคตสามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์ BLE Beacon และสามารถประยุกต์ใช้บอร์ด ESP32 เป็นอุปกรณ์ Edge Computing เพื่อลดภาระในการประมวลผลข้อมูลบนเครื่องแม่ข่ายได้ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยส่งเสริมส่วนงานวิชาการ ประจำปีงบประมาณ 2565 ในโครงการการพัฒนาระบบคัดกรองและแสดงตนเพื่อเข้าสถานที่ และการวิเคราะห์การเชื่อมโยงบุคคลด้วยปัญญาประดิษฐ์ (สัญญาเลขที่ 2565-02-08-005)

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Xu, Y. Wang, J. Guo and L. Meng, "WiFi Fingerprint Localization Model Based on Multi-Scale Residual Convolution and Self-Attention Mechanism*," *2025 5th International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS)*, Xi'an, China, 2025, pp. 277-280, doi: 10.1109/ISCTIS65944.2025.11065311.

[2] M. Magada and A. Maneli, "The Challenges of Indoor Navigation: LiDAR-AR Exploring Solutions Beyond GPS," *2025 IST-Africa Conference (IST-Africa)*, Nairobi, Kenya, 2025, pp. 1-7, doi: 10.23919/IST-Africa67297.2025.11060062.

[3] Z. Sha, S. Shiro, K. Shibamiya, K. Shintani and K. Tanaka, "Improving Orb-Slam3 Performance in Textureless Environments: Mapping and Localization in Hospital Corridors," *2025 IEEE Conference on Artificial Intelligence (CAI)*, Santa Clara, CA, USA, 2025, pp. 723-726, doi: 10.1109/CAI64502.2025.00130.

[4] S. Wei, J. Wang and Z. Zhao, "Poster Abstract: LocTag: Passive WiFi Tag for Robust Indoor Localization via Smartphones," *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Toronto, ON, Canada, 2020, pp. 1342-1343, doi: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162919.

[5] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007, doi: 10.1109/TSMCC.2007.905750.

[6] A. Maier, A. Sharp and Y. Vagapov, "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things," *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Wrexham, UK, 2017, pp. 143-148, doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.

[7] J. Sangthong, J. Thongkam and S. Promwong, "Indoor Wireless Sensor Network Localization Using RSSI Based Weighting Algorithm Method," *2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, Chiang Mai, Thailand, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEAST50382.2020.9165300.

[8] Z. Jianyong, L. Haiyong, C. Zili and L. Zhaohui, "RSSI based Bluetooth low energy indoor positioning," *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Busan, 2014, pp. 526-533, doi: 10.1109/IPIN.2014.7275525.

[9] D. Csík, Á. Odry and P. Sarcevic, "Comparison of RSSI-Based Fingerprinting Methods for Indoor Localization," *2022 IEEE 20th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Subotica, Serbia, 2022, pp. 000273-000278, doi: 10.1109/SISY56759.2022.10036270.

[10] S. Shankpale, G. Andurkar, R. Marravulla, S. Jadhav and K. Kishore, "Localization Technique using Bluetooth," *2022 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech)*, Pune, India, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/I4Tech55392.2022.9952540.

[11] M. A. Koledoye, D. De Martini, S. Rigoni and T. Facchinetti, "A Comparison of RSSI Filtering Techniques for Range-based Localization," *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Turin, Italy, 2018, pp. 761-767, doi: 10.1109/ETFA.2018.8502556.

อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ งานวิจัยด้านการประมวลผลภาพดิจิทัล ปัญญาประดิษฐ์ และระบบสมองกลฝังตัว

นพดล มณีรัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยด้านการประมวลผลภาพดิจิทัล ปัญญาประดิษฐ์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์