

บทคัดย่อ

ชื่อโครงงาน	การจำลองรูปแบบระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลบนโปรโตคอล ESP-NOW
ผู้จัดทำ	นายคนานนท์ ศาลาน้อย, นายกฤตภาส แก้วสง่า, นายอภิรักษ์ พิลา, นายบุญยกร ภูมิฐาน และ นายณัฏพพงศ์ อาระวี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ นศรราช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา	2569

โครงงานนี้ออกแบบ พัฒนา และจำลองการใช้งานระบบสื่อสารสำหรับอุปกรณ์ IoT เคลื่อนที่แบบกระจายศูนย์บนเครือข่ายเมช ESP-NOW สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร ซึ่งอุปกรณ์กระจายอยู่ในพื้นที่กว้าง ถูกย้ายตำแหน่งได้ และไม่มีโครงข่าย Wi-Fi หรือโครงข่ายเซลลูลาร์ จุดเน้นของโครงงานคือการสร้างเส้นทางสายสื่อสารหลายทอดที่อุปกรณ์จัดการได้เอง ระบบประกอบด้วยสถานีฐาน 1 ชุดและอุปกรณ์ IoT 5 ชุดที่ใช้บอร์ด ESP32-S3 สายอากาศภายนอก 3 dBi และเซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้น DHT22 จริงเป็นแหล่งข้อมูล ทุกโหนดใช้เฟิร์มแวร์ชุดเดียวกันและเลือกเส้นทางด้วยตนเองตามหลักการ Decentralized Ring-Ladder โดยแลกเปลี่ยนสถานะลิงก์สองทางทุก 2 วินาที คำนวณวงระยะทอดด้วยการค้นหาตามแนวกว้าง (BFS) แล้วจัดลำดับอายุโหนดภายในวงด้วยค่า RSSI แบบแบ่งช่วงละ 4 dB สถานีฐานไม่กำหนดเส้นทางให้โหนดใด เฟิร์มแวร์รุ่นล่าสุด (v32) เพิ่มเครื่องมือวัดผลระดับความพยายามส่ง ทำให้วัดอัตราการส่งถึงปลายทาง (PDR) ได้โดยตรง

ในการออกแบบระบบจำลอง คณะผู้จัดทำคำนึงถึงองค์ประกอบของการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในโรงงานและแปลงเกษตร ได้แก่ (1) อุปกรณ์ถูกเคลื่อนย้ายบ่อย จึงออกแบบให้ทุกอุปกรณ์เลือกเส้นทางใหม่ได้เองโดยไม่ต้องแก้ไขโปรแกรม (2) โครงสร้างโลหะและสิ่งกีดขวางทำให้สัญญาณอ่อนและไม่สมมาตร จึงใช้การส่งต่อหลายทอดรวมกับการพิสูจน์ลิงก์สองทาง (3) พื้นที่ไม่มีโครงข่ายสื่อสาร จึงใช้ ESP-NOW ที่ไม่ต้องพึ่งจุดกระจายสัญญาณและมีต้นทุนต่ำ และ (4) ข้อมูลต้องถึงปลายทางครบ จึงใช้การตอบรับปลายทางถึงปลายทางและการส่งซ้ำ องค์ประกอบเหล่านี้มุ่งแก้ปัญหาพื้นที่อุปสรรคสัญญาณ และเพิ่มประสิทธิภาพและศักยภาพของระบบในการใช้งานจริง

การจำลองสถานการณ์ใช้งานด้วยการทดสอบภาคสนามบนฮาร์ดแวร์จริง 6 ชุด พบว่าสถานีฐานได้รับข้อมูลครบทุกหมายเลขลำดับรวม 445 แพ็กเก็ต คิดเป็น PDR 100% (ขอบล่างของช่วงความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 99.33%) รวมถึงการส่ง 5 ทอดที่ระยะห่าง 47–54 เมตรต่อทอด และระยะเส้นตรงจากสถานีฐานถึงโหนดปลายทางสุด 242.22 เมตร เพิ่มขึ้นจาก PDR ประมาณ 65% ของรุ่น v31 เวลาตอบรับปลายทางถึงปลายทางเพิ่มขึ้นประมาณ 12.8 มิลลิวินาทีต่อทอด แบบจำลองการสูญเสียเชิงประจักษ์จากข้อมูลจริงให้เลขชี้กำลัง $n = 3.19$ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma = 12.5$ dB ซึ่งยืนยันความจำเป็นของการเลือกเส้นทางจากค่าที่วัดได้จริง ระบบทั้ง 7 ชุดมีต้นทุนฮาร์ดแวร์ 8,455 บาท และไม่มีค่าใช้จ่ายรายเดือน

เมื่อทดสอบซ้ำแบบ 5 ทอดในพื้นที่โล่ง (นาข้าว) ที่ระยะใกล้เคียงกัน (ระยะเส้นตรง 229.94 เมตร) ต่อเนื่อง 61 นาที สถานีฐานได้รับ 738 แพ็กเก็ตครบทุกหมายเลข (PDR 100% ขอบล่างของช่วงความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 99.59%) มี 164 แพ็กเก็ตที่ผ่านเส้นทางครบ 5 ทอด และส่งสำเร็จในครั้งแรก 98.9%

ผลงานนี้สามารถต่อยอดเพื่อเพิ่มศักยภาพของระบบได้ 2 แนวทาง คือ การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาช่วยตัดสินใจเลือกเส้นทาง จากข้อมูลคุณภาพลิงก์ที่ระบบบันทึกไว้แล้ว และการใช้ค่า RSSI ระหว่างอุปกรณ์ระบุตำแหน่งอุปกรณ์เคลื่อนที่ (localization) สำหรับติดตามอุปกรณ์และสินทรัพย์ในโรงงานและแปลงเกษตร

คำสำคัญ: อุปกรณ์ IoT เคลื่อนที่, ESP-NOW, เครือข่ายเมช, การเลือกเส้นทางแบบกระจายศูนย์, การจำลองสถานการณ์ใช้งาน

Abstract

Project Title	Simulation of a Wireless Personal Area Network System Model on the ESP-NOW Protocol
Authors	Mr.Kananon Salanoi, Mr.Krittapas Kaewsanga, Mr.Aphirak Phila, Mr.Boonyakorn Phumithan and Mr.Nanthaphong Arawee
Advisor	Assistant Professor Dr. Prasit Nakonrat
Program	Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University
Academic Year	2026

This project designs, implements and simulates the deployment of a decentralized communication system for mobile IoT devices on an ESP-NOW mesh network for industrial factories and agriculture, where devices are spread over wide areas, may be relocated, and no Wi-Fi or cellular infrastructure is available. The focus is the self-organizing multi-hop communication path. The system consists of one Master station and five IoT devices built on ESP32-S3 boards with external 3 dBi antennas and real DHT22 temperature and humidity sensors as data sources. All nodes run identical firmware and select their own routes using a Decentralized Ring-Ladder scheme: two-way link-state advertisements are exchanged every 2 s, reachability rings are computed by breadth-first search, and seniority within each ring is ordered by RSSI quantised in 4 dB buckets. The Master never assigns routes. Firmware v32 adds per-attempt instrumentation so that the packet delivery ratio (PDR) can be measured directly.

The simulated system was designed around the components of real deployment in factories and farms: (1) devices are relocated frequently, so every device re-selects its route without reprogramming; (2) metal structures and obstacles cause weak and asymmetric links, so multi-hop relaying is combined with two-way link proof; (3) the sites lack communication infrastructure, so ESP-NOW is used without access points at low cost; and (4) data must arrive complete, so end-to-end acknowledgement and retransmission are used. These components address signal dead zones and raise the efficiency and potential of the system in practical use.

Six deployment-scenario field tests on real hardware showed that the Master received every sequence number of 445 packets, a PDR of 100% (one-sided 95% lower bound 99.33%), including 5-hop delivery at 47–54 m per hop over a 242.22 m straight-line span, compared with about 65% for v31. End-to-end acknowledgement latency grows by about 12.8 ms per hop. An empirical path-loss model fitted to field data gives $n = 3.19$ and $\sigma = 12.5$ dB, confirming that route selection must rely on measured link quality. The seven units cost 8,455 THB in total with no recurring fees.

A repeat 5-hop test at a similar range in an open rice field (229.94 m straight-line span), run continuously for 61 minutes, delivered all 738 sequence numbers to the Master (PDR 100%, one-sided 95% lower bound 99.59%), with 164 packets carried over the full 5-hop path and a first-attempt success rate of 98.9%.

The system can be extended in two directions to raise its potential: artificial intelligence (AI) can assist route selection using the link-quality data already logged by the firmware, and inter-device RSSI can be used to localize mobile devices for asset tracking in factories and farms.

Keywords: mobile IoT devices, ESP-NOW, mesh network, decentralized routing, deployment simulation

บทสรุปผู้บริหาร / Executive Summary

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบ พัฒนา และจำลองการใช้งานระบบสื่อสารสำหรับอุปกรณ์ IoT เคลื่อนที่แบบกระจายศูนย์เต็มรูปแบบบนเครือข่ายเมช ESP-NOW (ย่านความถี่ 2.4 GHz ช่องสัญญาณที่ 6) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร ซึ่งอุปกรณ์กระจายอยู่ในพื้นที่กว้าง ถูกย้ายตำแหน่งได้ และไม่มีจุดกระจายสัญญาณ Wi-Fi หรือเครือข่ายเซลลูลาร์ จุดเน้นของโครงการคือการสร้างเส้นทางการสื่อสารหลายทอดที่อุปกรณ์ทุกตัวจัดการได้เองโดยไม่มีศูนย์กลาง ระบบประกอบด้วยสถานีฐาน (Master) 1 ชุด โหนดเซนเซอร์ 5 ชุด (Node1–Node5) และชุดสํารอง 1 ชุด รวม 7 ชุด โหนดเซนเซอร์ทุกตัวใช้เฟิร์มแวร์แกนกลางชุดเดียวกัน (MeshCore.h) ทำหน้าที่ทั้งต้นทางข้อมูลและตัวส่งต่อ (relay) และคำนวณเส้นทางด้วยตนเองจากข้อมูลสถานะลิงก์สองทาง (Link-State Advertisement: LSA) ที่แลกเปลี่ยนกันทุก 2 วินาที ตามหลักการ Decentralized Ring-Ladder ซึ่งจัดวงระยะทอด (ring) ด้วยการค้นหาตามแนวกว้าง (BFS) ก่อน แล้วจึงจัดลำดับอาวุโสภายในวงด้วยค่า RSSI แบบแบ่งช่วงละ 4 dB สถานีฐานไม่กำหนดเส้นทางให้โหนดใด ทำหน้าที่เพียงส่งสัญญาณ heartbeat ทุก 2 วินาที รับข้อมูล ตรวจสอบข้อมูลซ้ำ และตอบรับ (ACK) ย้อนกลับตามเส้นทางเดิม

ในการออกแบบระบบจำลอง คณะผู้จัดทำคำนึงถึงองค์ประกอบของการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพและศักยภาพของระบบ ดังนี้ (1) **การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์** — สายการผลิตและแปลงปลูกถูกจัดใหม่บ่อย ระบบจึงให้ทุกอุปกรณ์ใช้เฟิร์มแวร์เดียวกันและเลือกเส้นทางใหม่ได้เองขณะถูกเคลื่อนย้าย ซึ่งยืนยันได้จากการทดสอบที่ผู้ทดสอบเดินถือโหนดในทุกชุด (2) **สิ่งกีดขวางและสัญญาณไม่สมมาตร** — โครงสร้างโลหะ เครื่องจักร และต้นไม้ทำให้สัญญาณระหว่างจุดใกล้เคียงกันต่างกันอย่างมาก ระบบจึงใช้การส่งต่อหลายทอด การพิสูจน์ลิงก์สองทาง และสายอากาศภายนอก 3 dBi ทำให้ส่งได้ไกล 242.22 เมตรผ่าน 5 ทอด (3) **ไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน** — พื้นที่ห่างไกลไม่มี Wi-Fi หรือเครือข่ายเซลลูลาร์ ระบบจึงใช้ ESP-NOW ที่สื่อสารระหว่างอุปกรณ์โดยตรง ไม่มีค่าใช้จ่ายรายเดือน ทั้งนี้ต้นทุนฮาร์ดแวร์ของชุดจำลองรวม 8,455 บาท (7 ชุด) ค่อนข้างสูง เนื่องจากการจำลองทดสอบ คณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้บอร์ดพัฒนาที่มีประสิทธิภาพสูง (ESP32-S3 หน่วยความจำแฟลช 16 MB และ PSRAM 8 MB) เพื่อรองรับการบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลอย่างละเอียด หากนำไปใช้งานจริงสามารถลดต้นทุนได้อีก เช่น ใช้โมดูลที่มีหน่วยความจำน้อยลงและออกแบบแผงวงจรเฉพาะ (4) **ความน่าเชื่อถือของข้อมูล** — ข้อมูลจากอุปกรณ์ต้องถึงศูนย์กลางครบ ระบบจึงใช้การตอบรับปลายทางถึงปลายทาง การส่งซ้ำ และการกรองข้อมูลซ้ำ ทำให้ได้ PDR 100% และ (5) **การดูแลระบบ** — ผู้ดูแลต้องตรวจสอบเครือข่ายได้ ระบบจึงบันทึกเส้นทางและคุณภาพลิงก์ทุกอุปกรณ์ และแสดงผลผ่านสถานีฐานและ Blynk Dashboard

เฟิร์มแวร์รุ่นปัจจุบัน (v32) เพิ่มเครื่องมือวัดผลระดับความพยายามส่งแต่ละครั้ง (attemptId) ตัวนับสถิติบนอุปกรณ์ (Metrics) และโปรแกรมวิเคราะห์บันทึกแบบออฟไลน์ (analyze_logs.py) พร้อมการตรวจยืนยันเพิ่มเติม 163 รายการ ทำให้สามารถวัดอัตราการส่งถึงปลายทาง (Packet Delivery Ratio: PDR) ได้โดยตรง ผลการทดสอบภาคสนาม 6 ชุดระหว่างวันที่ 12–13 ตุลาคม 2569 บริเวณอาคาร EN6 คณะวิศวกรรมศาสตร์ พบว่าในการทดสอบ 5 ชุดที่มีบันทึกฝั่งสถานีฐานครบถ้วน สถานีฐานได้รับข้อมูลไม่ซ้ำรวม 445 แพ็กเก็ต และหมายเลขลำดับ (seq) ของทุกโหนดต่อเนื่องครบทุกชุด คิดเป็น **PDR 100%** (ขอบล่างของช่วงความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 99.33%) โดยการทดสอบ 5 ทอดระยะไกลที่ระยะทาง 47.19–54.29 เมตรต่อทอด และระยะเส้นตรงจากสถานีฐานถึง Node5 เท่ากับ **242.22 เมตร** ได้ PDR 100% จาก 74 แพ็กเก็ต ข้อมูลซ้ำ 7 แพ็กเก็ตถูกคัดกรองออกอย่างถูกต้อง เวลาตอบรับปลายทางถึงปลายทางเพิ่มขึ้นประมาณ 12.8 มิลลิวินาทีต่อทอด (5 ทอดอยู่ในช่วง 38–88 มิลลิวินาที) ผลดังกล่าวเพิ่มขึ้นจากรุ่น v31 ซึ่งพบข้อมูลสูญหายเป็นช่วงที่ระยะไกลสุดและวัด PDR ของการทดสอบทอดระยะไกลได้ประมาณ 65% และรุ่น v20–v27.4 (PDR 61–67%)

เมื่อทดสอบซ้ำแบบ 5 ทอดในพื้นที่โล่ง (นาข้าว) ที่ระยะใกล้เคียงกัน (ระยะเส้นตรง 229.94 เมตร) ต่อเนื่อง 61 นาที สถานีฐานได้รับ 738 แพ็กเก็ตครบทุกหมายเลข (PDR 100% ขอบล่างของช่วงความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 99.59%) มี 164 แพ็กเก็ตที่ผ่านเส้นทางครบ 5 ทอด และส่งสำเร็จในครั้งแรก 98.9%

ตรรกะการเลือกเส้นทางผ่านการตรวจยืนยันด้วยการจำลองซอฟต์แวร์ 1,198,542 รายการ รายงานฉบับนี้วิเคราะห์ข้อสังเกตที่ยังต้องติดตามอย่างตรงไปตรงมา ได้แก่ ช่วงเวลาที่ลำดับชั้นบันไดเปลี่ยนจนเกิดเส้นทางอ้อม (N5 → N2) ระหว่างการทดสอบระยะไกล ความล่าช้าของข้อมูลระหว่างรอเส้นทางนิ่ง และการที่ Blynk Cloud เชื่อมต่อไม่ได้ในภาคสนามเนื่องจากไม่มีจุดกระจายสัญญาณ Wi-Fi พร้อมข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อ ได้แก่ การนำปัญญาประดิษฐ์มาช่วยตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด และการนำข้อมูล RSSI ของเครือข่ายไปใช้ระบุตำแหน่งของอุปกรณ์เคลื่อนที่ (localization)

คำสำคัญ: อุปกรณ์ IoT เคลื่อนที่, ESP-NOW, เครือข่ายเมช, การเลือกเส้นทางแบบกระจายศูนย์, การจำลองสถานการณ์ใช้งาน

ศณานนท์ ศาตาน้อย
กฤตภาส แก้วสง่า
อภิรักษ์ พิลลา
บุญยกร ภูมิฐาน
นันทพงศ์ อาระวี

This project presents the design, implementation and deployment simulation of a fully decentralized communication system for mobile IoT devices on an ESP-NOW mesh network (2.4 GHz, channel 6) for industrial factories and agriculture, where devices are spread over wide areas, may be relocated, and no Wi-Fi access point or cellular coverage exists. Its focus is the self-organizing multi-hop communication path. The system comprises one Master station, five sensor nodes (Node1–Node5) and one spare unit (7 units in total). All sensor nodes run the same core firmware (MeshCore.h), act simultaneously as data sources and relays, and compute their own routes from two-way link-state advertisements exchanged every 2 s, following the Decentralized Ring-Ladder principle: reachability rings are computed first by breadth-first search, and seniority within a ring is then ordered by RSSI quantised into 4 dB buckets. The Master never assigns routes; it only broadcasts a 2 s heartbeat, receives and de-duplicates data, and returns end-to-end acknowledgements along the reverse path.

The simulated system was designed around the components of real deployment in industrial factories and agriculture, in order to solve practical problems and raise the efficiency and potential of the system: (1) device relocation — every device runs the same firmware and re-selects its route while being moved, as confirmed by walking the nodes in every test; (2) obstacles and asymmetric links — multi-hop relaying, two-way link proof and external 3 dBi antennas reached 242.22 m over 5 hops; (3) no infrastructure — ESP-NOW communicates device-to-device with no recurring fees; the prototype hardware cost of 8,455 THB (7 units) is relatively high because high-performance development boards (ESP32-S3, 16 MB flash, 8 MB PSRAM) were chosen for detailed logging and analysis during the simulation, and it can be reduced further in real deployment, e.g. with lower-memory modules and a custom PCB; (4) data reliability — end-to-end acknowledgement, retransmission and duplicate filtering achieved a PDR of 100%; and (5) maintainability — every device logs its route and link quality, shown at the Master and on the Blynk dashboard.

Firmware v32 adds per-attempt instrumentation (attemptId), on-device Metrics counters and an offline log analyzer (analyze_logs.py) with 163 additional verification checks, making the packet delivery ratio (PDR) directly measurable. Six field tests were carried out on 12–13 October 2026 around the EN6 building of the Faculty of Engineering. In the five tests with complete Master-side logs, the Master received 445 unique packets with contiguous sequence numbers from every node, i.e. a PDR of 100% (one-sided 95% lower confidence bound 99.33%). In the long-range 5-hop test (47.19–54.29 m per hop, 242.22 m straight-line span) the PDR was 100% over 74 packets, and all 7 duplicates were correctly filtered. End-to-end acknowledgement latency grows by about 12.8 ms per hop (38–88 ms at 5 hops). These results improve on v31, which showed intermittent loss at maximum span (long-range hop test PDR $\approx$ 65%), and on v20–v27.4 (61–67%). The routing logic passed 1,198,542 simulated assertions. Future work includes AI-assisted selection of the best route and RSSI-based localization of mobile devices.

A repeat 5-hop test at a similar range in an open rice field (229.94 m straight-line span), run continuously for 61 minutes, delivered all 738 sequence numbers to the Master (PDR 100%, one-sided 95% lower bound 99.59%), with 164 packets carried over the full 5-hop path and a first-attempt success rate of 98.9%.

Keywords: Mobile IoT Devices, ESP-NOW, Mesh Network, Decentralized Routing, Deployment Simulation