

Performance Evaluation of Tactical Tracking System Based on LoRaWAN in Rural Areas

Under NLoS Conditions.

การประเมินประสิทธิภาพระบบติดตามทางยุทธการด้วย LoRaWAN ในพื้นที่ชนบทภายใต้เงื่อนไขแบบมีสิ่งกีดขวาง

กวีณา อารยะพันธุ์, มาลินดา หงส์ทอง, เบญจา บุญเชื้อ, วราวุฒิ ภิรมย์, สรภพ สุภชัยพานิชพงศ์ และธนทรสน์ แซ่ลิ่ม

ส่วนงานวิศวกรรมระบบควบคุมและการสื่อสาร ฝ่ายวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบติดตามตำแหน่งทางยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ในพื้นที่ชนบทที่มีสภาพแวดล้อมแบบมีสิ่งกีดขวาง (NLoS) สำหรับเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานอุปกรณ์รับข้อมูล (Gateway) และอุปกรณ์ส่งข้อมูลจากผู้ใช้งาน (End Device) ให้เหมาะสมกับลักษณะของภารกิจ โดยทำการทดสอบตั้งแต่ระยะ 50 ถึง 450 เมตร เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบการใช้อุปกรณ์ End Device ที่ถูกออกแบบมาใช้งานด้วยการติดตั้งลักษณะท่าทางที่ต่างกัน และทำการศึกษากับข้อจำกัดในระยะใช้งานของตัวอุปกรณ์รับข้อมูล 2 รูปแบบ คือ อุปกรณ์รับข้อมูลแบบเคลื่อนย้ายได้ (Portable Gateway) และอุปกรณ์รับข้อมูลแบบพกพา (Handheld Gateway) ซึ่งในการประเมินประสิทธิภาพของระบบได้ใช้ผลข้อมูลที่เก็บได้มาเปรียบเทียบโดยใช้อัตราส่วนการรับส่งข้อมูลสำเร็จ (%PDR), ค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) และค่าระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มาวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณของระบบในภาพรวม

คำสำคัญ: ติดตามตำแหน่งทางยุทธการ, ระบบสื่อสารไร้สาย, เซนเซอร์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, เกตเวย์, พื้นที่แบบมีสิ่งกีดขวาง

Abstract

This paper presents a performance evaluation of a LoRaWAN-based tactical location tracking system in a rural environment with obstacles (NLoS). The study aims to provide guidelines for selecting suitable equipment for different mission scenarios. Tests were conducted at distances ranging from 50 to 450 meters to compare end Devices designed for various installation postures and to examine the range limitations of two types of gateways: portable and handheld. System performance was assessed using key metrics, including packet delivery ratio (PDR), received signal strength indicator (RSSI), and signal-to-noise ratio (SNR), to evaluate overall signal quality.

Keyword: Tactical Tracking, LoRaWAN, Sensor, IoT, Gateway, N-LoS

บทนำ

ในบทความนี้เป็นการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการสื่อสารของระบบติดตามตำแหน่งทางยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ซึ่งส่งมอบให้กับเจ้าหน้าที่หน่วยงานด้านความมั่นคงใช้งานในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้เพื่อในการกิจต่างๆ เช่น การกึ่งเฝ้าระวัง ปิดล้อม จับกุม ผู้ต้องสงสัยในพื้นที่ โดยฝ่ายควบคุมและบังคับบัญชาสามารถทราบถึงภาพรวมของปฏิบัติการและข้อมูลต่าง ๆ ได้จากการแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์แบบเวลาจริง ทำให้สามารถสั่งการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยลดโอกาสการสูญเสียชีวิตของเจ้าหน้าที่ในพื้นที่ได้ ซึ่งคุณสมบัติของระบบติดตามตำแหน่งทางยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN จะสามารถระบุตำแหน่งและรายงานสถานะข้อมูลผ่านการรับข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆ ได้แก่ จีพีเอส, เซนเซอร์ความเร็ว 3 แกน, เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และค่าความกดอากาศ รวมถึงเซนเซอร์วัดระดับพลังงานคงเหลือ เป็นต้น โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งผ่านโครงข่ายของระบบสื่อสารระยะไกลกำลังต่ำแบบไร้สาย (LoRaWAN) ไปยังระบบฐานข้อมูลและนำข้อมูลดังกล่าวไปแสดงผลบนระบบแผนที่สถานการณ์แบบเวลาจริง ซึ่งก่อนหน้านี้ได้มีการทดสอบระบบฯ ขณะใช้งานในพื้นที่แบบไม่มีสิ่งกีดขวาง (Line of Sight; LoS) แล้วพบว่าสามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะทาง 25 กิโลเมตร ขณะมีอัตราการรับส่งข้อมูลสำเร็จไม่น้อยกว่า 80 % [1] ในบทความนี้จึงมีเป้าหมายในการประเมินประสิทธิภาพของระบบขณะใช้งานในพื้นที่ชนบทภายใต้เงื่อนไขแบบมีสิ่งกีดขวาง ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใกล้เคียงการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง เนื่องจากพื้นที่ใช้งานส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ชนบท รวมถึงมีการประเมินประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์ขณะติดตั้งในรูปแบบท่าทางต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการใช้งานและวางแผนภารกิจให้มีประสิทธิภาพ โดยในการทดสอบจะใช้อุปกรณ์รับข้อมูล 2 รูปแบบ ได้แก่ อุปกรณ์แบบเคลื่อนย้ายได้ (Portable Gateway) และอุปกรณ์แบบพกพา (Handheld Gateway) โดยในการประเมินประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลจะพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่บ่งบอกถึงคุณภาพของการรับส่งข้อมูล ได้แก่ ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) อัตราส่วนสัญญาณต่อเสียงรบกวน (SNR) และเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนการรับส่งข้อมูลสำเร็จ (%PDR)

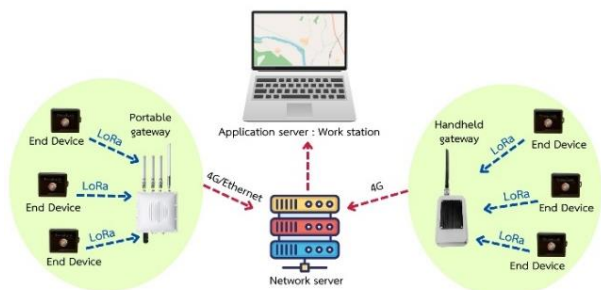
1. ข้อมูลทั่วไป

1.1 บทความวิจัยที่ผ่านมา

ระบบสื่อสารระยะไกลกำลังดำเนินไปอย่างรวดเร็ว LoRaWAN จัดอยู่ในเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) [2] โดยในแต่ละเทคโนโลยีของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ทำให้จำเป็นต้องเลือกให้เหมาะสมกับงานที่จะนำมาประยุกต์ใช้ โดยในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ IoT มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความแรงของสัญญาณที่แปรผันตามระยะทาง รวมถึงระดับพลังงานที่ใช้ โดยการเป็นการเปรียบเทียบเทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย 4 ประเภท ได้แก่ Wi-Fi, BLE, ZigBee และ LoRaWAN โดยพบว่าเทคโนโลยี LoRaWAN เป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำและสามารถครอบคลุมพื้นที่ใช้งานได้ในระยะไกล [3] นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณของเทคโนโลยี LoRaWAN กลางแจ้งในรูปแบบพื้นที่ LoS และภายในอาคารในรูปแบบ NLoS พบว่าอุปกรณ์สามารถสื่อสารรับส่งสัญญาณได้ครอบคลุมพื้นที่กว้างไม่เกิน 2 กิโลเมตร เนื่องจากเป็นพื้นที่ในเมืองที่มีประชากรหนาแน่น ทำให้มีการลดทอนของสัญญาณจากสิ่งกีดขวางมาก [4]

1.2 ระบบติดตามทางยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

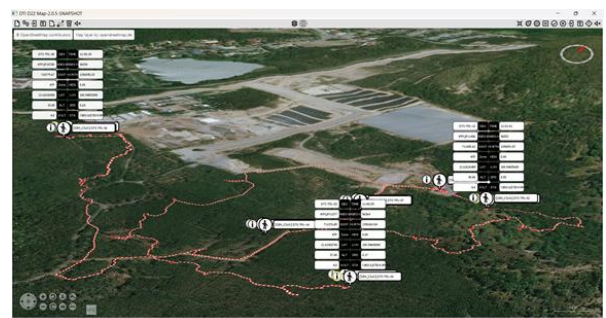
ระบบวิเคราะห์และติดตามทางยุทธการที่ถูกพัฒนาขึ้นมานั้น ออกแบบมาสำหรับติดตั้งอยู่กับเจ้าหน้าที่หรือยานพาหนะในการติดตามตำแหน่ง เพื่อรายงานสถานะต่าง ๆ ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN [5] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำ สื่อสารได้ในระยะไกล อีกทั้งยังมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสูงเนื่องจากจุดเด่นของเทคโนโลยี LoRa คือมีการใช้มอดูเลชันแบบ Frequency-Shift Keying (FSK) และพัฒนาเป็น Chirp Spread Spectrum (CSS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณให้มีค่าความไว (Sensitivity) ที่ดีขึ้น สามารถทำงานได้ดีกับช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้งานอื่น



รูปที่ 1 ภาพรวมของระบบติดตามทางยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ชิป SX1276 ของบริษัท Semtech ที่มีกำลังส่งสูงสุดที่ 100 mW และมีความไวในการรับสัญญาณที่ -148 dBm มาพัฒนาอุปกรณ์ [6] โดยภาพรวมของระบบติดตามทางยุทธการด้วย

เทคโนโลยี LoRaWAN ประกอบไปด้วย 4 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ส่งข้อมูล (End Device), อุปกรณ์รับข้อมูล (Gateway), เซิร์ฟเวอร์โครงข่าย (Network Server) และ เซิร์ฟเวอร์แอปพลิเคชัน (Application Server) ดังรูปที่ 1 โดยอุปกรณ์ส่งข้อมูลจะทำหน้าที่รับค่าจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ภายในประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง (MCU), โมดูล LoRa, โมดูลเซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์จีพีเอส, เซนเซอร์วัดความเร็ว 3 แกน, เซนเซอร์วัดสถานะแวดล้อม ซึ่งสามารถวัดค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, ค่าความกดอากาศ รวมถึงระบบจัดการพลังงาน และส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รับข้อมูลผ่านโครงข่าย LoRaWAN จากนั้นอุปกรณ์รับข้อมูลจะทำหน้าที่ส่งข้อมูลต่อไปยัง Application Server ผ่าน Network Server เพื่อไปแสดงผลบนระบบแผนที่สถานการณ์แบบเวลาจริงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบแสดงผลแผนที่สถานการณ์แบบเวลาจริง

โดยในการทดสอบนี้ใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ 2 รูปแบบ ได้แก่ Portable Gateway ซึ่งสามารถติดตั้งได้ทั้งแบบถาวรและสามารถเคลื่อนย้ายได้ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละภารกิจ โดยตัว Gateway ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน LoRaWAN มีกำลังส่งสูงสุดอยู่ที่ 27 dBm และสามารถรับส่งข้อมูลได้ถึง 16 ช่องสัญญาณ โดยรองรับความถี่ 923MHz และมีความไวในการรับสัญญาณอยู่ที่ -139dBm [7] ในส่วน Handheld Gateway เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณแบบพกพา มีขนาดเล็กกว่า เหมาะกับการใช้งานในพื้นที่ที่สัญญาณของ Portable Gateway ไม่สามารถให้บริการได้ มีคุณสมบัติทางเทคนิคดังนี้ มีกำลังส่งสูงสุดที่ 27 dBm รองรับการใช้งานย่านความถี่ 923MHz มีความไวในการรับสัญญาณที่ -139 dBm สามารถรับส่งข้อมูลได้ 8 ช่องสัญญาณ [8] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 (A) Portable Gateway และ (B) Handheld Gateway

1.3 หลักการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบในบทความนี้ ใช้การบันทึกผลค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงคุณภาพการรับส่งสัญญาณมาใช้วิเคราะห์ผลในแต่ละระยะการทดสอบ ได้แก่ ค่าความแรงของสัญญาณ RSSI ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ ค่าระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio; SNR) ซึ่งโดยปกติค่า RSSI และ SNR จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทดสอบมีระยะที่ไกลขึ้น และเมื่อใช้งานในพื้นที่ที่มีสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางและมีอุปกรณ์สื่อสารอื่นๆ ที่ใช้งานความถี่เดียวกันหรือในช่วงใกล้เคียงกัน และสุดท้ายประเมินจากเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จ (Packet Delivery Ratio; %PDR) โดยเป็นการคำนวณเปรียบเทียบจำนวนข้อมูลที่ Gateway รับได้กับจำนวนข้อมูลที่ถูกส่งมาจาก End Device



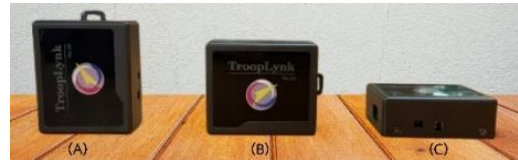
รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้ง End Device และ Gateway ในการทดสอบ

2. วิธีการดำเนินการทดสอบ

บทความนี้ทำการทดสอบการรับส่งสัญญาณในสภาพแวดล้อมแบบพื้นที่ชนบทภายใต้เงื่อนไขแบบมีสิ่งกีดขวาง โดยเลือกใช้พื้นที่แนวถนนที่ในแต่ละระยะทดสอบผ่านแนวพื้นที่ที่มีต้นไม้หนาแน่น ดังรูปที่ 4 โดยเริ่มจากการติดตั้ง End Device ที่ความสูง 1.2 เมตร โดยอ้างอิงจากการใช้งานจริง ทดสอบโดยเปรียบเทียบท่าทางการติดตั้งใช้งานทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบวางตั้งฉากกับพื้น (Vertical), รูปแบบวางตั้งขนานกับพื้น (Horizontal) และ รูปแบบวางนอนราบ (Top) ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 1 และทำการเก็บข้อมูลจาก Gateway ทั้ง 2 รูปแบบนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

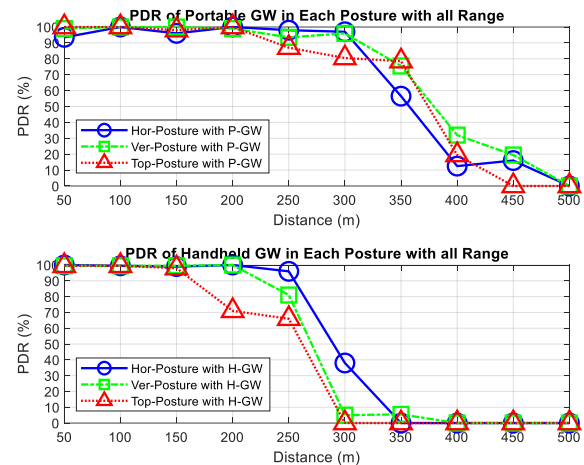
พารามิเตอร์	Portable Gateway	Handheld Gateway
ความถี่ (f)	923 MHz	
ขนาดแบนด์วิธ (BW)	125 kHz	
Spreading Factor (SF)	10, 12	
ความสูงของเสาอากาศ	3 เมตร	1.2 เมตร
อัตราขยายของเสาอากาศ	5.8 dBi	2.3 dBi
ระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ (เมตร)	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450	
กำลังส่งของ End Device	16 dBm	
จำนวน Packet ในการทดสอบ	200 packet	



รูปที่ 5 End Device ที่ถูกติดตั้งใน 3 ท่าทาง (A) Vertical (B) Horizontal (C) Top

3. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบสามารถวิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเด็น ได้แก่ ประสิทธิภาพในการรับข้อมูลของ Gateway ที่ใช้ทดสอบทั้ง 2 รูปแบบ และท่าทางการติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณ End Device โดยเมื่อพิจารณาความสามารถในการรับข้อมูลของ Portable Gateway พบว่าจากการทดสอบระยะ 300 เมตร ความสามารถในการรับสัญญาณเริ่มลดลง และหลังจากระยะ 350 เมตร ค่า %PDR มีค่าลดลงเกิน 60% ต่อมาเมื่อพิจารณาจากลักษณะท่าทางพบว่าค่า %PDR แบบ Horizontal และ Vertical มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ท่าทางการตั้งแบบ Top มีค่า %PDR ลดลงมากที่สุด โดยหลังจากระยะ 450 เมตร เป็นต้นไป ไม่สามารถรับข้อมูลได้ ในส่วนของ Handheld Gateway พบว่าที่ระยะ 250 เมตร เริ่มมีการรับข้อมูลได้น้อยลง โดยในระยะ 300 เมตร เป็นต้นไป ท่าทางการทดสอบแบบ Top ไม่สามารถรับข้อมูลได้ จากนั้นหลังจากระยะ 350 เมตร Handheld Gateway ไม่สามารถรับข้อมูลได้ในทุกท่าทางการติดตั้ง ดังรูปที่ 6



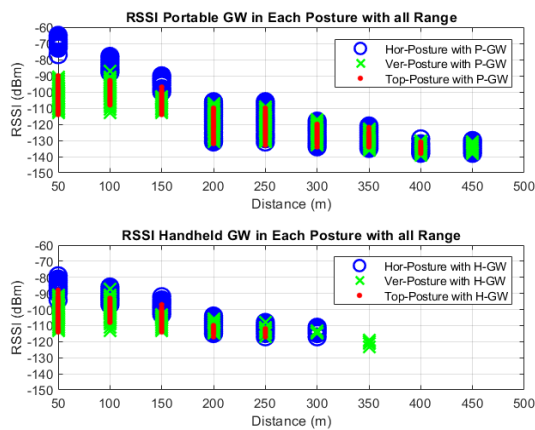
รูปที่ 6 กราฟเปอร์เซ็นต์ PDR ของ Gateway ทั้ง 2 ชนิด ขณะทดสอบติดตั้ง End Device ทั้ง 3 รูปแบบ

ในส่วนตารางที่ 2 ที่แสดงถึง %PDR ของ End Device ที่ถูกติดตั้งในรูปแบบต่าง ๆ หากพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของ %PDR จาก Gateway ทั้ง 2 ชนิด เมื่อมีการตั้ง End Device ในท่าทางเดียวกัน การติดตั้งรูปแบบ Vertical, Horizontal และ Top จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 66.81%, 66.78% และ 60.97% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการติดตั้งรูปแบบ Vertical และ Horizontal จะมีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลใกล้เคียงกัน โดยรูปแบบ Top จะมีประสิทธิภาพในการส่งต่ำกว่า

ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จ (%PDR) ของ End Device ที่ถูกติดตั้งทำทางต่างกัน ใน 3 รูปแบบ

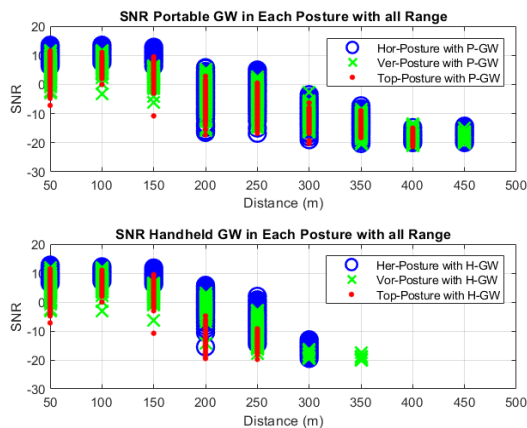
Gateway / End Device position	Distance (m.)									PDR Average in each posture (%)
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
Portable GW										
1. PDR of Vertical (%)	99	100	100	99	93.5	96	75.5	30	19.5	79.17
2. PDR of Horizontal (%)	93.5	100	96	100	98	97	56.5	12.5	16	74.39
3. PDR of Top (%)	100	100	98	100	87	80.5	78.5	19.5	0	73.72
PDR Average in each range (%)	97.5	100	98	99.67	92.83	91.17	70.17	20.67	11.83	75.76
Handheld GW										
1. PDR of Vertical (%)	99.5	99.5	99.5	100	81	5	5.5	0	0	54.44
2. PDR of Horizontal (%)	100	99.5	99	100	96	38	0	0	0	59.17
3. PDR of Top (%)	99.5	99.5	98	71	66	0	0	0	0	48.22
PDR Average in each range (%)	99.7	99.5	98.83	90.33	81	14.33	1.83	0	0	53.94

เมื่อพิจารณาค่า RSSI ของ Gateway ทั้ง 2 ชนิด พบว่า Portable Gateway จะสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่า Handheld Gateway โดยระยะที่รับสัญญาณได้ไกลที่สุดอยู่ที่ระยะ 450 เมตร ยกเว้นรูปแบบ Top ที่ส่งสัญญาณได้ไกลสุดถึงแค่ระยะ 400 เมตร



รูปที่ 7 เปรียบเทียบ RSSI จาก Gateway ทั้ง 2 ชนิด

ในการรับสัญญาณของ Handheld Gateway รูปแบบ vertical จะส่งได้ไกลสุดที่ระยะ 350 เมตร รูปแบบ Horizontal ส่งได้ไกลสุดที่ระยะ 300 เมตร และ Top ได้ระยะใช้งานน้อยสุดคือที่ระยะ 250 เมตร ดังรูปที่ 7



รูปที่ 8 เปรียบเทียบ SNR จาก Gateway ทั้ง 2 ชนิด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า SNR พบว่าในช่วงระยะ 50-150 เมตร ทั้ง Portable Gateway และ Handheld Gateway มีค่า SNR ใกล้เคียงกันในทุกท่าทางการติดตั้งของ End Device และสังเกตได้ว่าเมื่อระยะทางในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นค่า SNR จะมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 8

4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของระบบติดตามทางยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ภายใต้เงื่อนไขแบบ NLoS เพื่อศึกษาและทดสอบหาข้อจำกัดในการนำอุปกรณ์ที่ถูกรออกแบบในระบบไปใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบทที่มีสิ่งกีดขวาง โดยพิจารณาค่า %PDR, RSSI และ SNR ในช่วงระยะทดสอบ 50 ถึง 450 เมตร โดยมี 2 ประเด็นที่ต้องการหาข้อจำกัดในการใช้งานแบบ NLoS โดยประเด็นที่ 1 คือ ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณของ Gateway ที่ใช้ทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนี้ เมื่อพิจารณาทุกท่าทางของ End Device พบว่า Portable Gateway มีค่าเฉลี่ย %PDR ถึง 75.76% สามารถรับสัญญาณได้ถึงระยะ 450 เมตร ซึ่งมากกว่า Handheld Gateway ที่มีค่าเฉลี่ย %PDR เพียง 53.94% และไม่สามารถรับสัญญาณได้ตั้งแต่ระยะ 350 เมตร ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริง เมื่อต้องการใช้ในพื้นที่ที่มีระยะครอบคลุมไกลกว่า 300 เมตร ระบบจำเป็นต้องใช้ Portable Gateway แทนขนาดพกพาที่มีขนาดเล็กกว่าและมีอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ต่ำกว่า ประเด็นที่ 2 คือ ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณของ End Device ในการติดตั้งแต่ละท่าทาง จากผลทุกระยะของ Gateway ทั้ง 2 ชนิด พบว่าค่าเฉลี่ย %PDR ของการติดตั้ง End Device ทั้ง 3 ท่าทาง ยังคงสามารถทำงานได้ค่อนข้างดีในระยะไม่เกิน 350 เมตร แต่การติดตั้งแบบ Horizontal กับ Vertical ในระยะที่ไกลขึ้นจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่ต่ำกว่า การติดตั้งท่าทางอุปกรณ์ End Device แบบ Top

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Saelim, B. Boon-uea, V. Pirom, S. Suparchaiparnitchapong and M. Hongthong, "Design and Performance Evaluation of Tactical Tracking Operations Based on LoRaWAN Technology," Defence Technology Academic Journal, 2020
- [2] Y. Xu and A. Helal, "Scalable cloud-sensor architecture for the Internet of Things," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 285–298, 2016.
- [3] Sadowski and P. Spachos, "RSSI-based indoor localization with the internet of things," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30149–30161, 2018.
- [4] M. M. Erbati, G. Schiele, and G. Batke, "Analysis of LoRaWAN technology in an outdoor and an indoor scenario in Duisburg-Germany," In *Proceedings 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, Nagoya, Japan, 2018, pp. 273–277.
- [5] Semtech Corporation, "LoRa® and LoRaWAN®," Version 1.0, AN1200.86, March 2024
- [6] Semtech Corporation, "SX1276-7-8-9 Datasheet," Accessed on: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276#documentation>
- [7] RAKwireless Technology Limited, "RAK7249 WisGate Edge Max Datasheet," Accessed on: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisgate/rak7249/datasheet/>
- [8] RAKwireless Technology Limited, "RAK7243 WisGate Developer D3 Datasheet," Accessed on: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisgate/rak7243/datasheet/>