

## การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพของระบบติดตามตำแหน่งสำหรับ ปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

ธนทรศน์ แซ่ลิ้ม<sup>\*1</sup> เบญจมา บุญเอื้อ<sup>1</sup> วรารุณี ภิรมย์<sup>1</sup>  
สรภพ สุภชัยพานิชพงศ์<sup>1</sup> และมาลินดา หงษ์ทอง<sup>1</sup>

วันที่รับ 4 เมษายน 2564 วันที่แก้ไข 6 สิงหาคม 2564 วันตอบรับ 6 สิงหาคม 2564

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอการออกแบบพัฒนาและประเมินผลประสิทธิภาพของระบบติดตามตำแหน่งเจ้าหน้าที่สำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเครือข่ายสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สายระยะไกล (LoRaWAN) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบมาสำหรับติดตั้งที่ตัวของเจ้าหน้าที่หรือยานพาหนะสำหรับการติดตามตำแหน่งและรายงานสถานะของเจ้าหน้าที่ เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการกิจต่าง ๆ ทางทหาร เช่น การกิจลาดตระเวน ฝ้าตรวจ ปิดล้อมจับกุม หรือหาข่าว เป็นต้น โดยหลักการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งจะมีระบบประมวลผลกลางทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ได้แก่ เซนเซอร์บอกพิกัดผ่านดาวเทียม เซนเซอร์ตรวจวัดความเร็ว 3 แกน เซนเซอร์ตรวจวัดความดัน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ระดับพลังงาน และส่งข้อมูลดังกล่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ไปยังศูนย์บัญชาการและควบคุมผ่านเกตเวย์ เพื่อประมวลผลและแสดงผลข้อมูลบนแผนที่สถานการณ์ ซึ่งจะช่วยให้ศูนย์บัญชาการและควบคุม หัวหน้าชุดปฏิบัติการ ทราบถึงภาพรวมของตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ในแต่ละหน่วยที่เข้าร่วมในการปฏิบัติการกิจ ทำให้สามารถสั่งการและตัดสินใจได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมถึงเพิ่มอัตราความสำเร็จและลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับเจ้าหน้าที่ทหารในการปฏิบัติการกิจอีกด้วย

**คำสำคัญ :** ระบบติดตามตำแหน่ง, ไอโอที, เครือข่ายสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สายระยะไกล, โลร่าแวน, โลร่า, ระบบบัญชาการและควบคุม, จีพีเอส, เซนเซอร์

<sup>1</sup> ส่วนงานวิศวกรรมควบคุมและการสื่อสาร - RCC, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

<sup>\*</sup> อีเมลติดต่อผู้เขียน : thanathat.s@dti.or.th

# Design and Performance Evaluation of Tactical Tracking Operations Based on LoRaWAN Technology

Thanathat Saelim<sup>\*1</sup> Bencha Boon-uea<sup>1</sup> Varavut Pirom<sup>1</sup>  
Soraphob Suparchaiparnitchapong<sup>1</sup> and Marinda Hongthong<sup>1</sup>

Received 4 April 2021, Revised 6 August 2021, Accepted 6 August 2021

## Abstract

This paper presents the design, development, and system efficiency evaluation of a Troop Tracking Equipment operating via a Long-Range Wide Area Network (LoRaWAN). At Defence Technology Institute, a LoRaWAN system has been developed for use on body of a soldier or on a vehicle in order to track the object's position as well as report certain status. The system can be used for supporting various missions such as surveillance, monitoring, seizure, or intelligence gathering. The system is operated by having a main central processor read certain data from sensors within the module, which include the GPS, 3-axis accelerometer, barometric sensor, temperature sensor, humidity sensor, as well as power level of the module. These data will be transmitted from a client module through LoRaWAN to the Control Center via a Gateway module. At the Control Center, the data will be displayed on a Situation Map so that the Team Supervisor will see and understand overall picture as well as position of all team members on the mission. This results in a precise command and decision-making as well as an increasing success rate of the operation and therefore minimizes any loss which might occur to soldiers in the mission.

**Keywords :** Tactical Tracking, Internet of Things, IoT, LoRa, LoRaWAN, Command Control, Military Operations, GPS, Sensor

---

<sup>1</sup> Control and Communication Division - RCC, Defence Technology Institute.

\* Corresponding author e-mail: thanathat.s@dti.or.th

## 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

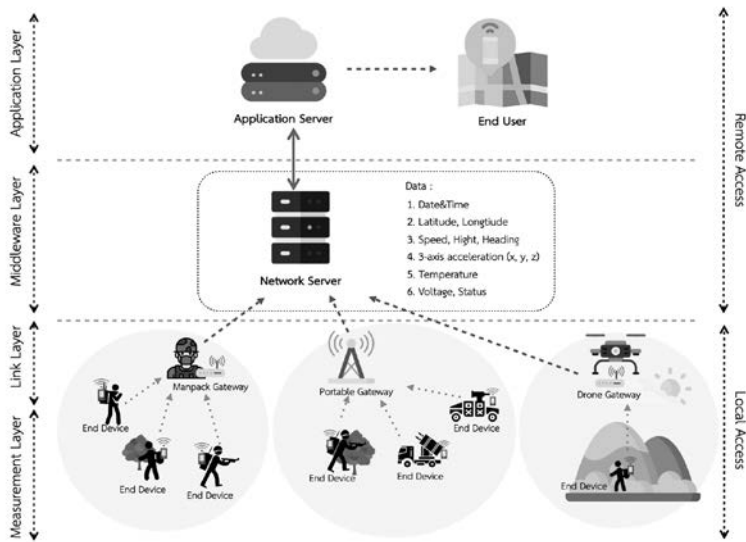
เนื่องจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศเป็นสถาบันที่มีภารกิจในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการทำงานของเจ้าหน้าที่ทางด้านความมั่นคง ซึ่ง สทป. มีการดำเนินงานโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบสารสนเทศแบบรวมศูนย์และโปรแกรมประยุกต์สำหรับเจ้าหน้าที่หน่วยงานด้านความมั่นคง สนับสนุนการแก้ไขปัญหา 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่าง สทป. และกองอำนวยการรักษาความมั่นคงภายในภาค 4 ส่วนหน้า ทำให้ สทป. ทราบถึงความต้องการหรือข้อขัดข้องในการปฏิบัติภารกิจต่าง ๆ ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ ปัญหาในการบัญชาการและควบคุมในกรณีที่มีการปฏิบัติภารกิจทางทหาร เช่น ภารกิจลาดตระเวน ฝึาตรวจ หาข่าว รวมถึงการปิดล้อมจับกุม ในปัจจุบันยังไม่มีการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการสนับสนุนการทำงานของเจ้าหน้าที่ ทำให้ผู้บังคับบัญชาและหัวหน้าชุดไม่ทราบถึงภาพรวมของตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ อีกทั้งในบางภารกิจมีหลายหน่วยงานด้านความมั่นคงเข้าร่วมในการปฏิบัติภารกิจโดยขาดการประสานงานก่อนปฏิบัติภารกิจ ทำให้เจ้าหน้าที่ไม่ทราบตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ภายในหน่วยและนอกหน่วยส่งผลให้การปฏิบัติภารกิจขาดประสิทธิภาพรวมถึงอาจก่อให้เกิดความสูญเสียของเจ้าหน้าที่ทั้งภายในและภายนอกหน่วย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวโดยการนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) [1] เข้ามาช่วยในการสื่อสาร โดยหลักการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งจะมีระบบประมวลผลกลางทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่

ติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ ได้แก่ เซนเซอร์บอกพิกัดผ่านดาวเทียม เซนเซอร์วัดความเร่ง 3 แกน เซนเซอร์วัดความดัน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ระดับพลังงาน และส่งข้อมูลดังกล่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN [2] ไปยังเกตเวย์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบเคลื่อนย้ายได้และแบบพกพา โดยเกตเวย์ประเภทแรกจะติดตั้งในพื้นที่ที่เป็นจุดสูงสามารถรับสัญญาณจากโหนดได้แบบไม่มีสิ่งกีดขวางส่วนในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางจะใช้งานเกตเวย์แบบพกพาโดยจะติดตั้งอยู่กับหัวหน้าชุดที่อยู่ในพื้นที่ภารกิจ เกตเวย์ชนิดพกพานี้ สามารถติดตั้งอยู่กับอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน ในกรณีที่มีการปฏิบัติการในระยะไกลหรือพื้นที่ที่มีภูมิประเทศเป็นข้อจำกัดในการรับส่งข้อมูล หลังจากนั้นเกตเวย์จะส่งข้อมูลต่อไปยังศูนย์บัญชาการและควบคุม เพื่อประมวลผลและแสดงผลข้อมูลบนแผนที่สถานการณ์ดังรูปที่ 1

ในบทความวิจัยนี้ในส่วนแรกจะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ส่วนที่ 2 จะเป็นงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการสื่อสารและการระบุตำแหน่ง ส่วนที่ 3 เป็นหลักการของเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สาย (LPWAN) ส่วนที่ 4 จะเป็นหลักการในการออกแบบระบบทั้งในส่วนของอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งและระบบแสดงผล ส่วนที่ 5 เป็นการประเมินประสิทธิภาพของระบบและในส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลการออกแบบพัฒนาและการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ในการพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าว จะมีเทคโนโลยีหลักอยู่ 2 เทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลและเทคโนโลยีที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง ซึ่งในส่วนองเทคโนโลยีที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลได้มีงานวิจัยที่นำเสนอการใช้ระบบโครงข่ายโทรศัพท์



รูปที่ 1 การทำงานของระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการทางด้านยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

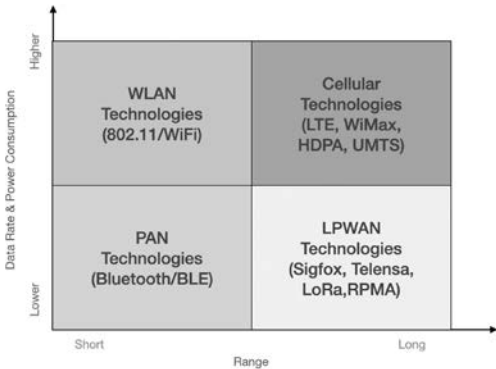
เคลื่อนที่ในการส่งข้อมูลต่าง ๆ ไปยังระบบแสดงผลด้วยระบบจีพีอาร์เอส [3, 4] และข้อความสั้น [5, 6, 7, 8] ซึ่งเป็นระบบที่ใช้พลังงานสูงและสามารถใช้งานได้เฉพาะบริเวณที่มีสัญญาณครอบคลุม งานวิจัย [9, 10, 11] ได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยี Wi-Fi ในการส่งข้อมูลซึ่งสามารถสนับสนุนการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากด้วยความเร็วสูงได้แต่ระยะรับส่งข้อมูลอยู่ในระยะจำกัดและมีโอกาสเกิดการรบกวนของสัญญาณสูง เนื่องจากใช้ความถี่ย่านสาธารณะ (ISM-Band)

ในงานวิจัย [12, 13] ได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยี IEEE802.15.4 หรือ Zigbee เข้ามาใช้ในการส่งข้อมูลตำแหน่งและสถานะของเป้าหมาย ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวใช้พลังงานต่ำมีระยะการส่งข้อมูลในระยะจำกัดแต่มีคุณสมบัติในการส่งข้อมูลต่อกับโครงข่ายแบบ Mesh รวมถึงมีการนำเสน�휂เทคโนโลยี NB-IoT เข้ามาเป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลด้วย [13, 14] รวมถึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีระบุตำแหน่งและเทคโนโลยี NB-IoT อยู่ในโครงสร้างด้วยกัน [15] ซึ่งมีคุณสมบัติหลักคือ สามารถสื่อสารข้อมูลโดยใช้พลังงานต่ำ แต่

จำเป็นต้องเสียค่าบริการให้กับผู้ให้บริการ เนื่องจากอาศัยระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการส่งข้อมูล

ในส่วนของเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งมีการนำเสนองานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีที่หลากหลายมีการใช้ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ของโครงข่ายระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มาใช้ในการระบุตำแหน่งของเป้าหมาย [16] การใช้เทคโนโลยีเชิงแสงในย่านความถี่อินฟราเรดช่วยในการระบุตำแหน่งซึ่งตัวของเป้าหมายจะมีอุปกรณ์กำเนิดแสงอินฟราเรดและใช้กล้องที่สามารถแสดงภาพย่านอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์ในการแสดงตำแหน่งของเป้าหมาย [17, 18] รวมถึงมีการใช้ประโยชน์จาก RSSI ของสัญญาณจากความถี่คลื่นวิทยุของเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น วิทยุ [19] บลูทูธ [20] หรือ โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (WSN) [21, 22, 23] เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งของเป้าหมาย ซึ่งจำเป็นต้องมีฐานข้อมูลที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังเป้าหมายไม่น้อยกว่า 2 สถานี เพื่อให้ลูกข่ายสามารถคำนวณพิกัดของตัวเองได้อย่างถูกต้องซึ่ง

วิธีดังกล่าวมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของเป้าหมายไปยังแต่ละสถานีฐานอีกด้วย รวมถึงมีงานวิจัย [24] ที่นำคุณลักษณะของสัญญาณ (Fingerprint signal) มาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งและนำเทคนิคของ Machine Learning เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาตำแหน่งอีกด้วย

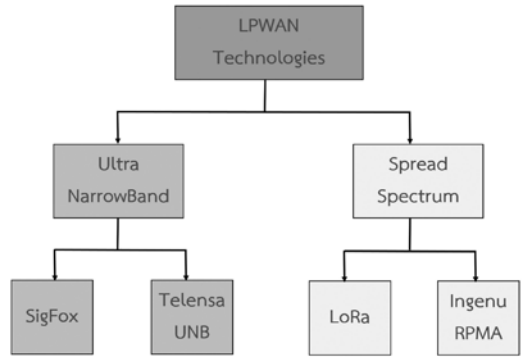


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบอัตราเร็วในการส่งข้อมูล พลังงานที่ใช้ และระยะสื่อสารของแต่ละเทคโนโลยี

โดยในงานวิจัยส่วนใหญ่ในการหาตำแหน่งจะนำเสนอการใช้เทคโนโลยีจีพีเอสเข้ามาช่วยในการระบุตำแหน่งเป้าหมาย [3, 25] ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ แต่มีข้อจำกัดคือระบบจีพีเอสใช้พลังงานสูงและมีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่ออยู่ในอาคารหรือพื้นที่ที่มีการบดบังจากสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอส

### 3. เทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สาย (LPWAN)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายระยะไกลกำลังงานต่ำ ซึ่งในปัจจุบันมีหลายเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน โดยจะแบ่งประเภทออกตามคุณสมบัติของเทคโนโลยี ดังรูปที่ 2 เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล ระยะทางในการสื่อสารและระดับพลังงานที่ใช้ เป็นต้น



รูปที่ 3 เทคโนโลยีของ LPWAN แบ่งตามเทคนิคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณข้อมูลเข้าไปยังแถบความถี่

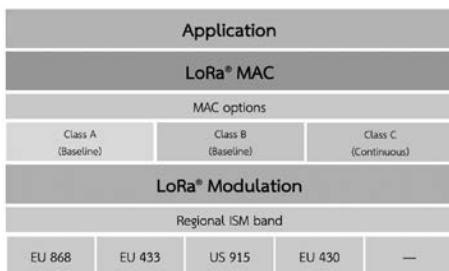
ในส่วนของเทคโนโลยี LPWAN มีการแบ่งเทคโนโลยีออกตามเทคนิคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณข้อมูลเข้าไปยังแถบความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งจะมีการใช้งานอยู่ 2 เทคนิค ได้แก่ Ultra-Narrowband (UNB) และ Spread Spectrum (SS) ดังรูปที่ 3 โดยในการเลือกใช้งานเทคโนโลยีระบบสื่อสาร IoT ส่วนใหญ่ผู้ใช้งานจะเลือกประเมินจากความถี่พื้นฐานในการสื่อสารข้อมูล เช่น รัศมีการให้บริการ ปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล ระดับพลังงานที่ใช้ต่ำ รวมถึงปริมาณการรองรับจำนวนของลูกข่ายซึ่งแต่ละเทคโนโลยีจะมีรายละเอียดและคุณสมบัติดังตารางที่ 1

**3.1 LoRaWAN** เทคโนโลยีสื่อสารระยะไกล หรือ LoRa เป็นคำที่ย่อมาจาก Long-Range ถูกพัฒนาโดยบริษัท Semtech โดยเทคโนโลยี LoRa ในประเทศไทยได้รับอนุญาตให้ใช้ย่านความถี่ที่ 923 MHz ซึ่งเป็นย่าน ISM-Band โดยเทคโนโลยี LoRa มีแบนด์วิธ (BW) ขนาด 125, 250 หรือ 500 kHz ขึ้นอยู่กับย่านความถี่ที่อนุญาตใช้งานในแต่ละประเทศ LoRa มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ Frequency-Shift Keying (FSK) และแบบ Chirp Spread Spectrum (CSS) โดยอัตราเร็วในการส่งข้อมูลหรือ Data Rate (DR) หรือ บิตเรต (Rb) ซึ่งมีหน่วยเป็นจำนวนบิตต่อวินาที

โดยอัตราของ  $R_b$  จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจำนวนบิตของค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัว (Spreading factor, SF) ซึ่ง SF จะมีขนาด 7-12 บิต จำนวนบิตดังกล่าวจะแปรผกผันกับ  $R_b$  ดังสมการที่ 1

$$R_b = SF * \frac{\left(\frac{4}{4 + CR}\right)}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)} \quad (1)$$

โดยจะเห็นได้ว่าหากจำนวนบิตของ SF มาก อัตราเร็วในการส่งข้อมูลจะต่ำลง แต่จะมีคุณสมบัติในการทนต่อสภาพการสื่อสารที่มีสัญญาณรบกวนสูงและมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยอัตราการเข้าไค้ด (Code rate, CR) จะมีค่าอยู่ที่ 1-4 โดยทั่วไปอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของ LoRa จะอยู่ที่ 0.3 ถึง 50 kbps [26] ซึ่งเทคโนโลยี LoRa ทำงานบนโปรโตคอล LoRaWAN Stack ดังรูปที่ 4 ซึ่งถูกกำกับดูแลโดย LoRa Alliance โดยหลักการทำงานคือ อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะส่งข้อมูลไปยังปลายทางผ่านเกตเวย์ ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถสื่อสารได้ไกลไม่ต่ำกว่า 10 กิโลเมตร ในขณะที่เกตเวย์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งข้อมูลของลูกข่ายไปยังเซิร์ฟเวอร์ด้วยระบบเครือข่าย TCP/IP ผ่านระบบ LAN หรือระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่



รูปที่ 4 โปรโตคอล LoRaWAN Stack

**3.2 Sigfox** เป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานในย่านความถี่ ISM-Band มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่ 100-600 bps มีระยะในการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 10 - 50 กิโลเมตร เทคโนโลยีของ Sigfox มีข้อจำกัดคือ ในแต่ละอุปกรณ์ จะมีการจำกัดการรับส่งข้อมูลในแต่ละวันเพื่อคงคุณสมบัติในการประหยัดพลังงาน กล่าวคือ สามารถส่งข้อมูลได้วันละ 140 ข้อความ และรับข้อมูลได้วันละ 4 ข้อความ [27] โดย Sigfox จะใช้การประมวลผลบน Cloud เป็นหลัก ในส่วนของคุณสมบัติการทนทานต่อสภาพสัญญาณรบกวนของ Sigfox จะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย ได้แก่ เวลา ความถี่ และระยะทาง

**3.3 Random Phase Multiple Access (RPMA)**

เทคโนโลยี RPMA จะใช้ช่วงความถี่ 2.4 GHz ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งช่วงความถี่ที่ใช้จะแตกต่างกับเทคโนโลยี LoRa และ Sigfox ซึ่งเป็นการใช้งานความถี่ที่ต่ำกว่า 1 GHz โดย RPMS จะใช้เทคนิค Spread Spectrum ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณให้ครอบคลุมแถบความถี่ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งเป็นการพัฒนาอยู่บนพื้นฐานของเทคโนโลยี LPWAN โดยบริษัท Ingenu ซึ่งในการรับส่งข้อมูลจะมีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยเทคนิค Advance Encryption Standard หรือ AES ขนาด 128 บิต โดยเทคโนโลยี RPMA มีข้อดีคือ สามารถใช้ความถี่ดังกล่าวได้ทั่วโลก เนื่องจากเป็นความถี่ ISM-Band ทำให้มีกำลังส่งสูง จึงสามารถสื่อสารข้อมูลในระยะไกลได้ดี โดยอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลของ RPMA สูงสุดในการดาร์วินโหลดอยู่ที่ 156 kbps และอัฟโหลดจะอยู่ที่ 624 kbps จะเห็นได้ว่า RPMS จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ไกลกว่า LoRa และ Sigfox แต่จะมีข้อเสียคือ ใช้พลังงานที่สูงเกิดสัญญาณรบกวนจากการใช้งานความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะได้ง่ายรวมถึงข้อกำหนดในการควบคุมกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณของบางประเทศ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ UNB และ Spread Spectrum ของเทคโนโลยี LPWAN [27]

	SigFox	Telensa	LoRaWAN	RPMA
<b>Band</b>	Sub-GHz ISM: EU (868 MHz), US (902 MHz)	Sub-GHz ISM: EU (868 MHz), US (915 MHz), AS (430 MHz)	Sub-GHz ISM: EU (433, 868 MHz), US (915 MHz)	2.4 GHz ISM
<b>Data rate</b>	UL: 100/600 bps DL: 600bps	UL: 62.5 bps DL: 500bps	LoRa: 0.3-5 kbps FSK: 50 kbps	UL: 624 Kbps DL: 156 kbps
<b>Bandwidth</b>	UL: 100/600 bps DL: 1.5kHz	100kHz	125 kHz	1 MHz
<b>Modulation</b>	UL: UNB/DBPSK, DL: GFSK	UNB 2-FSK	LoRa/FSK	RPMA/DSSS
<b>Range</b>	10 km (urban), 50 km (rural)	3 km (urban), 8km (rural)	5 km (urban), 15km (rural)	15 km (urban), 500 km (LoS)
<b>MAC</b>	R-FDMA	Not Known	Pure ALOHA	CDMA-like
<b>Max. Payload Size (bytes)</b>	UL: 12, DL:8	64 k	250	64
<b>Error Correction</b>	UL: CRC-16, DL: CRC-8	CRC	CRC-8/16	16 bits hash, AES 128 bits

3.4 Telensa เป็นระบบสื่อสารอีกชนิดหนึ่ง ที่ใช้เทคโนโลยี UNB ซึ่งพัฒนาอยู่บนพื้นฐานของการส่งข้อมูลไร้สายระยะไกลที่ใช้พลังงานต่ำ พัฒนาโดยบริษัท Telensa โดยใช้งานความถี่วิทยุย่าน ISM-Band ส่งข้อมูลขนาดเล็ก เชื่อมต่อเข้ากับระบบ IoT โดยใช้ระบบบริหารจัดการกลาง (Central management system, CMS) ที่ชื่อว่า Telensa PLANet ใช้ในการควบคุมไฟส่องสว่างของเส้นทางการจราจร ซึ่งมีการใช้งานอยู่ไม่ต่ำกว่า 30 ประเทศทั่วโลก

#### 4. หลักการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

ส่วนของหลักการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN จะกล่าวถึงปัจจัยสำคัญที่ผู้วิจัยได้นำมาใช้ในการออกแบบ ได้แก่ แนวทางการออกแบบระบบ โครงสร้างระบบโดยรวม รายละเอียดอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้ การออกแบบ

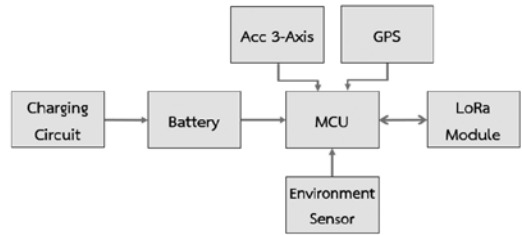
ประสิทธิภาพในการสื่อสาร รวมถึงระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ ตามลำดับดังนี้

**4.1 แนวทางในการออกแบบ** เนื่องจากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะมีเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานด้านความมั่นคงเป็นผู้ใช้งานอุปกรณ์ ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลที่ได้รับจากการปฏิบัติการกิจของหน่วยผู้เข้ามาเป็นปัจจัยในการออกแบบระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) อุปกรณ์ต้องมีขนาดเล็ก ติดตั้งง่าย สามารถพกพาได้สะดวกไม่เป็นภาระแก่เจ้าหน้าที่
- 2) ระบบสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ติดตามและเกตเวย์ต้องเป็นระบบเครือข่ายส่วนบุคคล (Private network) เพื่อให้สอดคล้องกับการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ซึ่งมีความจำเป็นต้องปฏิบัติการกิจในภูมิประเทศที่เป็นภูเขาหรือป่าทึบโดยในบางพื้นที่อยู่นอกพื้นที่ให้บริการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่
- 3) คลื่นความถี่ที่ใช้เป็นย่านความถี่ ISM Band
- 4) รัศมีในการให้รับส่งข้อมูลระหว่างโหนดและเกตเวย์ต้องครอบคลุมไม่น้อยกว่า 20 กม. แบบไม่มีสิ่งกีดขวาง (Line of sight, LoS)
- 5) รองรับจำนวนผู้ใช้งานไม่ต่ำกว่า 100 โหนด และสามารถขยายระบบได้ในอนาคต
- 6) อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับเจ้าหน้าที่จะต้องใช้พลังงานต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับการปฏิบัติการกิจเป็นระยะเวลาหลายวัน
- 7) ศูนย์บัญชาการและควบคุมสามารถแสดงผลตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ได้แบบเวลาจริง

**4.2 โครงสร้างของระบบ** โครงสร้างของระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN จะประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลกลางที่ใช้ในการควบคุมและรับส่งข้อมูลกับโมดูลเซนเซอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ ดังรูปที่ 5

ซึ่งประกอบด้วยระบบสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำไร้สาย ระยะไกลเซนเซอร์รายงานพิกัดผ่านดาวเทียมเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง 3 แกน เซนเซอร์ตรวจวัดสภาวะแวดล้อม แหล่งพลังงาน รวมถึงอุปกรณ์ LoRa เกตเวย์ โดยรูปที่ 6 แสดงถึงอุปกรณ์ติดตามที่ได้ ออกแบบขึ้น ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 โครงสร้างของอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง

**4.2.1 หน่วยประมวลผลกลาง (MCU)** อุปกรณ์ประมวลผลกลางใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิต ตระกูล ARM Cortex M5 ชนิดใช้พลังงานต่ำ ทำหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูล อ่านค่าจากเซนเซอร์ต่าง ๆ และส่งข้อมูลที่ได้ไปยังโมดูลสื่อสาร SX1276 เพื่อส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

**4.2.2 ระบบสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สายระยะไกล** การสื่อสารข้อมูลจากอุปกรณ์รายงานตำแหน่งไปยังศูนย์บัญชาการและควบคุมจะใช้เทคโนโลยี LoRaWAN ในการรับส่งข้อมูลเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานต่ำ มีความสามารถในการสื่อสารได้ในระยะไกล อีกทั้งยังมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสูง โดยเลือกใช้ชิปเซต SX1276 ของบริษัท Semtech ซึ่งมีกำลังส่งสูงสุดที่ 100mW มีความไวในการรับสัญญาณอยู่ที่ -148 dBm โดยในประเทศไทยหน่วยงาน กสทช. ได้อนุญาตให้เทคโนโลยี LoRaWAN ใช้งานในย่านความถี่ 923 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะ



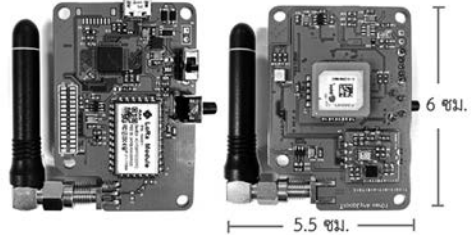
**4.2.3 เซนเซอร์รายงานพิกัดผ่านดาวเทียม** เป็นอุปกรณ์ที่เอาไว้บอกพิกัดตำแหน่งของเจ้าหน้าที่ทหารหรือยานพาหนะ โดยอุปกรณ์จีพีเอสนี้จะรายงานข้อมูลตามมาตรฐาน MNEA-0183 ยกตัวอย่างเช่น วัน-เวลา สถานะจีพีเอส แลตติจูด ลองติจูด ความเร็วในการเคลื่อนที่ ทิศทางของการเคลื่อนที่ ความสูงจากระดับน้ำทะเล เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปยังระบบประมวลผลและแสดงผล เพื่อแสดงผลข้อมูลดังกล่าวบนระบบแผนที่สถานการณ์ โดยเซนเซอร์จีพีเอสที่เลือกใช้ เป็นของบริษัท U-blox รุ่น SAM-M8Q ซึ่งมีจุดเด่นคือ มีสายอากาศภายในโมดูล กินพลังงานต่ำ มีขนาดเล็กและมีความไวในการรับสัญญาณจากดาวเทียมสูง

**4.2.4 เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง 3 แกน** เป็นเซนเซอร์ทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่าความเร่งในแนวแกน 3 แกน ได้แก่ แกน x แกน y และ แกน z โดยจะเลือกใช้เซนเซอร์ LIS3DHTR ซึ่งโมดูลนี้จะสื่อสารข้อมูลกับหน่วยประมวลผลกลาง ด้วย I2C เมื่อทราบถึงค่าความเร่งที่ได้ในแต่ละแนวแกนแล้ว จะสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลเพื่อรายงานถึงสถานะของเจ้าหน้าที่ทหารได้

**4.2.5 เซนเซอร์ตรวจวัดสถานะแวดล้อม** เป็นเซนเซอร์ที่ทำการรวมคุณสมบัติของเซนเซอร์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ เซนเซอร์ตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันอากาศ และเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยเซนเซอร์ BME680 จะเชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลกลางด้วยการสื่อสารแบบ I2C

**4.2.6 แหล่งกำเนิดพลังงาน** เป็นระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับหน่วยประมวลผลกลางและโมดูลเซนเซอร์ต่าง ๆ โดยแหล่งจ่ายไฟเป็นแบตเตอรี่

ขนาดแรงดัน 3.7 โวลต์ ขนาด 1000 มิลลิแอมป์ รวมถึงมีวงจรจัดเรียงกระแสไฟเพื่อทำการชาร์จพลังงานให้กับแบตเตอรี่อีกด้วย



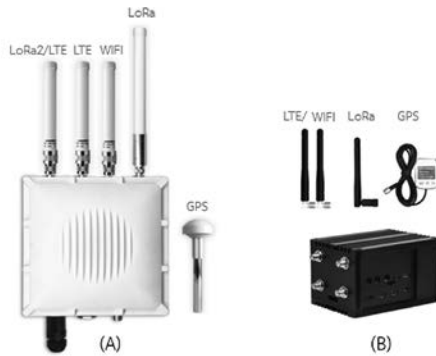
รูปที่ 6 อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งที่ได้ทำการออกแบบ

**4.2.7 อุปกรณ์ LoRa เกตเวย์** ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง หากอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ในพื้นที่ให้บริการของเกตเวย์ใด เกตเวย์นั้นจะรับสัญญาณจากอุปกรณ์และส่งข้อมูลต่อไปยัง Application Server โดยจะส่งผ่านระบบ Network Server เพื่อไปแสดงผลบนระบบแผนที่สถานการณ์ ซึ่ง LoRa เกตเวย์เป็นแบบ Commercial off-the-shelf (COTS) โดยจะมี 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 7 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) เกตเวย์ชนิดเคลื่อนย้ายได้ (Portable gateway) เป็นเกตเวย์ที่มีคุณลักษณะในการติดตั้งได้ทั้งแบบถาวรและแบบเคลื่อนที่ได้ตามลักษณะของภารกิจ โดยเกตเวย์ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน LoRaWAN ได้ 16 ช่องสัญญาณ มีกำลังส่งสูงสุดที่ 27 dBm ความไวในการรับสัญญาณที่ -139 dBm มีระบบจีพีเอสแสดงพิกัดของเกตเวย์ได้สามารถเชื่อมต่อระบบ Wi-Fi และโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้มีแบตเตอรี่ภายใน รวมถึงมีคุณสมบัติในการทนต่อสภาพแวดล้อมสูง โดยผ่านการรับรองมาตรฐาน IP-67

2) เกตเวย์ชนิดพกพา (Manpack gateway) เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการเคลื่อนย้ายและติดตั้งได้อย่างสะดวกซึ่งเกตเวย์แบบพกพาจะมีความเหมาะสมในการใช้งานในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางในการรับส่ง

สัญญาณ เกิดเวรี่ ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน LoRaWAN จำนวน 8 ช่องสัญญาณ มีกำลังส่งอยู่ที่ 27 dBm ความไวในการรับสัญญาณ -139 dBm และมีระบบจีพีเอสแสดงพิกัดของเกตเวย์ได้ โดยในการใช้งานสามารถติดตั้งไว้กับหัวหน้าชุดที่เข้าปฏิบัติการกิจเพื่อรับสัญญาณจากเจ้าหน้าที่ชุดปฏิบัติการหรือติดตั้งบนโดรนเพื่อสนับสนุนภารกิจในลักษณะภูมิประเทศที่มีการกีดขวางสัญญาณสื่อสารรวมถึงยังสามารถใช้งานในการกิจค้นหาได้อีกด้วย



รูปที่ (7A) เกตเวย์ชนิดเคลื่อนย้ายได้  
รูปที่ (7B) เกตเวย์ชนิดพกพา

**4.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร**  
ประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร (Link budget) จะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ภาคส่งได้ทำการส่งออกไปและกำลังงานที่ภาครับได้รับ หากค่า Link Budget มีค่าสูง หมายความว่า ระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะไกลซึ่งการคำนวณ Link Budget จะมีพารามิเตอร์หลายชนิดที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบสื่อสารเข้ามาเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่าง เช่น กำลังงานที่ใช้ในการส่ง กำลังของสายอากาศ (Gain) ค่าการสูญเสียระหว่างการสื่อสาร (Path loss) ค่าการสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation loss) ค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณ

และจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ (Cable & connector loss) ค่าความไวในการรับสัญญาณ (Receiver sensitivity) เป็นต้น ซึ่งการคำนวณ Link Budget จะทำให้เราสามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสารที่ได้ทำการออกแบบขึ้นได้เพื่อลดปัญหาการออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพเกินความจำเป็น ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบสื่อสารที่ไม่คุ้มค่าเกิดขึ้น ซึ่งระบบ LPWAN ส่วนใหญ่จะมีค่า Link Budget อยู่ที่ 156 dB ถึง 172 dB โดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 160 dB [28] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\text{Received Power (dBm)} = \text{Transmitted Power (dBm)} + \text{Gains (dB)} - \text{Losses (dB)}$$

(2)

ซึ่งจากสมการที่ 2 นี้ สามารถนำพารามิเตอร์ต่างที่เกี่ยวข้องในการคำนวณกำลังส่งของอุปกรณ์สื่อสารและค่าการสูญเสียต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ 3

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M - L_{RX}$$

(3)

จากการคำนวณในสมการที่ 3 ทำให้เราทราบถึงค่ากำลังงานที่ภาครับได้รับ ซึ่งจะสามารถทำให้ทราบถึงค่ากำลังงานคงเหลือของระบบ (Link margin) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{Link Margin} = P_{RX} - S_{RX}$$

(4)

โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะมีความหมายดังต่อไปนี้

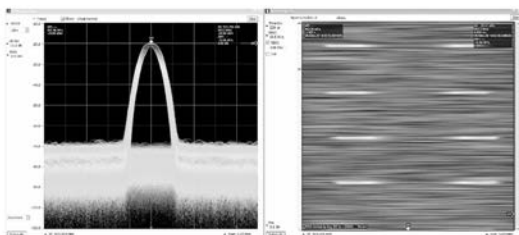
- $P_{RX}$  คือ กำลังงานที่ได้รับของภาครับ (dBm)
- $P_{TX}$  คือ กำลังงานส่งของภาคส่ง (dBm)
- $G_{TX}$  คือ เกนของสายอากาศภาคส่ง (dBi)
- $G_{RX}$  คือ เกนของสายอากาศภาครับ (dBi)
- $L_{TX}$  คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณและจุดเชื่อมต่อของภาคส่ง (dB)

- $L_{FS}$  คือ ค่าการสูญเสียระหว่างการส่งข้อมูล (dB)
- $L_M$  คือ ค่าการสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่น (dB)
- $L_{RX}$  คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณและจุดเชื่อมต่อของภาครับ (dB)
- $S_{RX}$  คือ ค่าความไวการรับสัญญาณของภาครับ (dBm)

**4.4 ระบบแสดงผลแผนที่สถานการณ์** หลังจากทีอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งได้ส่งข้อมูลมายังระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ผ่านเกตเวย์ชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ระบบ LoRa Server จะนำข้อมูลที่รับส่งผ่านไปยังระบบประมวลผลด้วยเทคนิค ZeroMQ (ZMQ) เมื่อระบบประมวลผลได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จะทำการประมวลผลและแสดงผลบนระบบแผนที่สถานการณ์ ซึ่งงานวิจัยนี้พัฒนาระบบแสดงผลด้วยแอปพลิเคชัน NASA Worldwind [29] ซึ่งเป็นระบบโอเพนซอร์สและพัฒนาภาษาจาวา

## 5. การประเมินผลประสิทธิภาพของระบบ

ในการประเมินผลการทำงานของระบบ จะทำการเปิดใช้งานระบบทั้งหมด โดยจะนำอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งติดตั้งที่เจ้าหน้าที่ ส่วนระบบเกตเวย์จะติดตั้งอยู่บนชั้นบนสุดของอาคารสูง 10 ชั้น โดยอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะส่งข้อมูลที่อ่านได้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ ไปยัง LoRa เกตเวย์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จาก Spectrum Analyzer ดังรูป 8



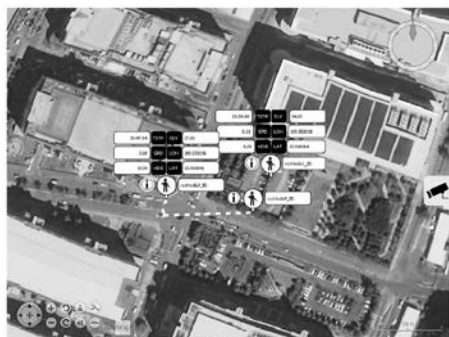
รูปที่ 8 ค่ากำลังงานในรูปแบบของคลื่นความถี่วิทยุที่วัดได้จากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง

หลังจากนั้นเกตเวย์จะทำการส่งข้อมูลที่ได้รับต่อไปยัง Network Server และ Application Server ตามลำดับ ผ่านระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่ง Application Server สามารถแสดงรายละเอียดข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งดังรูปที่ 9



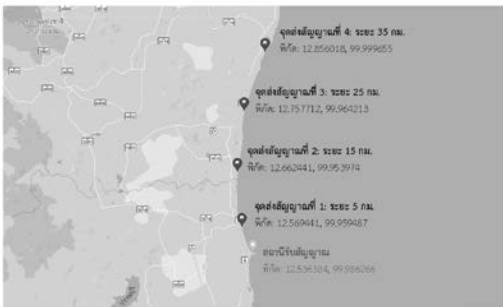
รูปที่ 9 รายละเอียดภายในเฟรมข้อมูลที่แสดงผลบนระบบ Application Server

หลังจากที่ Application Server ได้รับข้อมูลแล้ว จะส่งข้อมูลต่อไปยังระบบประมวลผลและแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ที่พัฒนาด้วยโอเพนซอร์สของ NASA Worldwind ซึ่งจะแสดงชื่อของอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง ค่าที่ตรวจวัดได้เช่นเซนเซอร์ต่าง ๆ รวมถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ้าหน้าที่ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์

ในส่วนของการประเมินผลประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร จะทำการประเมินในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศไม่มีการกีดขวางของสัญญาณ ซึ่งได้ทดสอบในพื้นที่ชายฝั่งของจังหวัดเพชรบุรีและประจวบคีรีขันธ์ ดังรูปที่ 11 เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีระยะ LoS เป็นระยะทาง 35 กิโลเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการทดสอบในการทดสอบจะเป็นการทดสอบ 2 รูปแบบ ได้แก่ การรับส่งข้อมูลจากระดับภาคพื้นสู่พื้นที่สูงและการรับส่งข้อมูลจากระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น

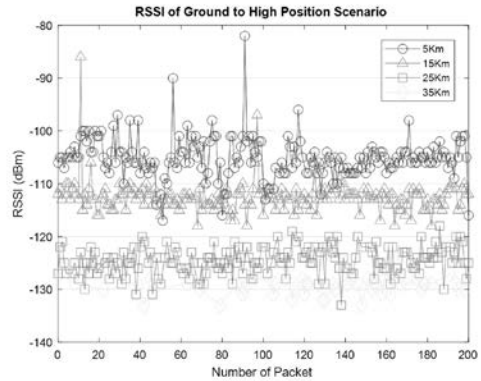


รูปที่ 11 ตำแหน่งจุดติดตั้งระบบรับส่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

ซึ่งจะทำการส่งข้อมูลที่มีเฟรมขนาด 11 Bytes ทุก ๆ 3 วินาที จำนวน 200 ชุดข้อมูล ไปยังเกตเวย์ โดยการวัดประสิทธิภาพจะเป็นการวัดผ่านพารามิเตอร์ที่บอกถึงคุณภาพในการรับส่งสัญญาณประกอบไปด้วยระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) จำนวนข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับรวมถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการรับข้อมูล (PER) ซึ่งมีรายละเอียดผลการวัดประสิทธิภาพดังนี้

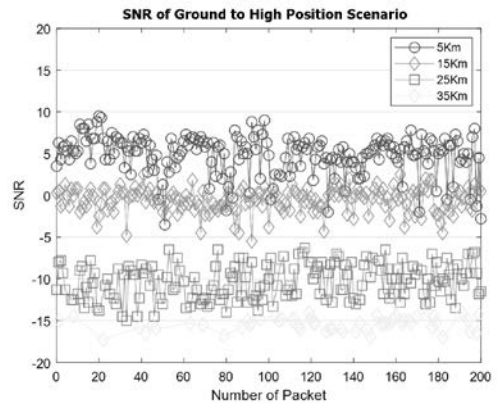
**5.1 การวัดประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณจากภาคพื้นสู่พื้นที่สูง** ในการวัดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในรูปแบบนี้จะทำการติดตั้งระบบเกตเวย์ไว้บริเวณพื้นที่มีระดับความสูง 58 เมตรจากระดับน้ำทะเล โดยอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะติดตั้งอยู่ที่ภาคพื้นระยะ 5, 15, 25 และ 35 กิโลเมตร ซึ่งผลการทดสอบวัดประสิทธิภาพระบบสื่อสารจะแสดง

ถึงค่าของ RSSI, SNR และปริมาณข้อมูลที่ได้รับ



รูปที่ 12 ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

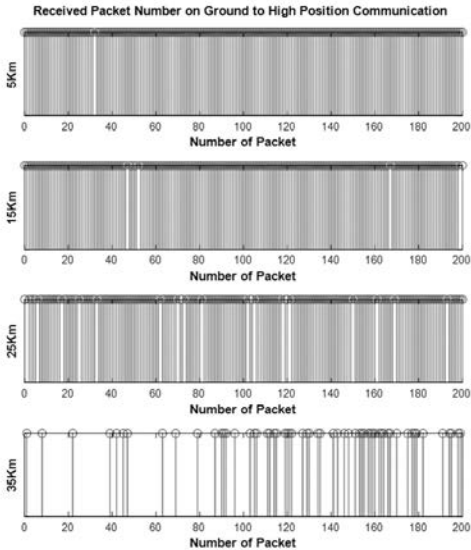
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งที่มีระยะไกลกับเกตเวย์จะมีค่าระดับ RSSI ที่สูง หากอุปกรณ์มีระยะห่างไกลออกจากเกตเวย์ค่า RSSI จะมีค่าลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 13 ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

ในส่วนค่า SNR ก็จะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับค่า RSSI กล่าวคือ ยิ่งอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งไกลออกจากเกตเวย์มากเท่าไรก็จะมีสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณข้อมูลมากขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 13 ในส่วนของจำนวนข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับในการทดสอบจะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลระยะ 5 - 25 กิโลเมตร เกตเวย์ยังคง

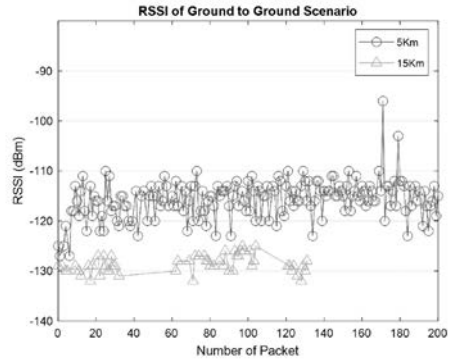
รับข้อมูลได้ดีแต่จะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเข้าสู่ระยะที่ 35 กิโลเมตรดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ปริมาณข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับในระยะต่าง ๆ

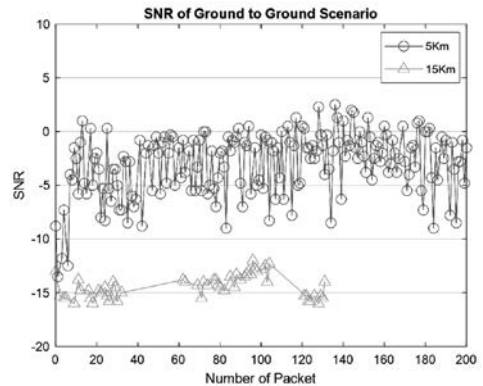
5.2 การวัดประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณจากระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น ในการวัดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น จะทำการติดตั้งระบบเกตเวย์ไว้บริเวณพื้นที่ระดับความสูง 6 เมตรจากระดับน้ำทะเล โดยอุปกรณ์ติดตั้งตามตำแหน่งจะติดตั้งที่ภาคพื้นระยะ 5, 10, 15, 25 และ 35 กิโลเมตร ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงถึงระดับค่า RSSI, SNR และปริมาณข้อมูลที่ได้รับ โดยในการรับส่งข้อมูลจากระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้นจะเห็นได้ว่าค่า RSSI และ SNR มีค่าการกระจายตัวที่มากกว่า รวมถึงปริมาณข้อมูลที่ได้รับมีน้อยกว่าการส่งข้อมูลในระบบภาคพื้นสู่พื้นที่สูง ดังรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ

โดยสาเหตุที่ทำให้การรับส่งข้อมูลแบบภาคพื้นสู่ภาคพื้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการส่งข้อมูลแบบภาคพื้นสู่จุดสูง เนื่องจากมีปัจจัยในการเกิดการลดทอนของสัญญาณมากกว่า เช่น การบดบังสัญญาณจากสิ่งกีดขวางการลดทอนของสัญญาณจากปรากฏการณ์



รูปที่ 15 ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

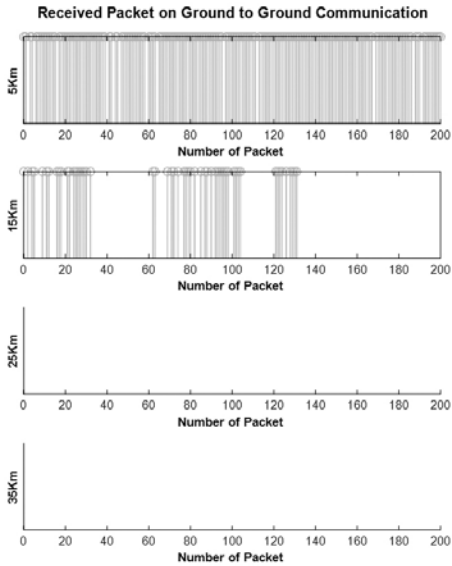
Multi Path การส่งสัญญาณที่ไม่เป็นไปตามหลักของ Fresnel Zone รวมถึงสัญญาณรบกวนจากการใช้งานความถี่ข้างเคียงของระบบสื่อสารอื่น ๆ ภายในเขตชุมชน เป็นต้น



รูปที่ 16 ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

ซึ่งจากรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าในการรับส่งข้อมูลระดับภาคพื้นจะรับส่งข้อมูลได้ดีที่ระยะ 5 กิโลเมตร ในขณะที่ระยะ 15 กิโลเมตร ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลเริ่มลดลง โดยระบบจะไม่สามารถรับข้อมูลได้เลยในระยะที่ 25 และ 35 กิโลเมตร

ผลการวัดประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจากการทดสอบประสิทธิภาพทั้ง 2 รูปแบบ จำนวนข้อมูลที่เกตเวย์สามารถรับได้ในระยะต่าง ๆ จะแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 17 ปริมาณข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับในระยะต่าง ๆ

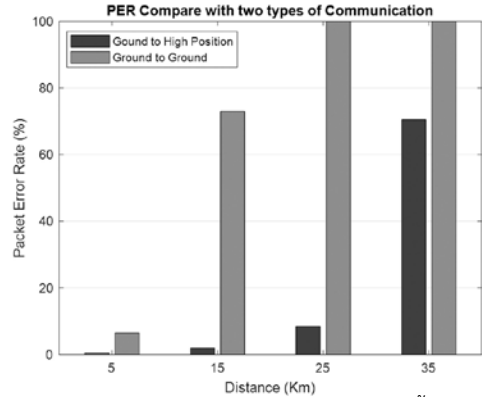
ตารางที่ 2 จำนวนข้อมูลที่ได้รับในแต่ละระยะ

ระยะทาง (กม.)	5	15	25	35
ภาคพื้นสู่พื้นที่สูง	199	196	183	59
ภาคพื้นสู่ภาคพื้น	187	54	0	0

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์อัตราการผิดพลาดในการรับข้อมูล (PER)

ระยะทาง (กม.)	5	15	25	35
ภาคพื้นสู่พื้นที่สูง	0.5	2	8.5	70.5
ภาคพื้นสู่ภาคพื้น	6.5	73	100	100

ในส่วนของจำนวนของเปอร์เซ็นต์ของอัตราการผิดพลาดในการรับข้อมูลจะแสดงในตารางที่ 3 จากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าการรับส่งข้อมูลในรูปแบบระดับภาคพื้นสู่พื้นที่สูงจะมีค่า PER ต่ำจนถึงระยะที่ 25 กิโลเมตร และมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะที่ 35 กิโลเมตร ในส่วนของการทดสอบระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น มีค่า PER ต่ำ ในระยะที่ 5 กิโลเมตร และมีค่า PER ใกล้เคียง 70% ที่ระยะ 15 กิโลเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวจะแปรผันตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบค่า PER ในการรับส่งข้อมูลทั้ง 2 รูปแบบ

## 6. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งสำหรับงานด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยีระบบสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สาย (LoRaWAN) เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการต่าง ๆ ทางทหาร เช่น การกักตุนตรวจเฝ้าตรวจ ปิดล้อมจับกุม หรือหาข่าว เป็นต้น โดยในบทความมีการบรรยายถึงการออกแบบและพัฒนาระบบฯ ในขั้นตอนต่าง ๆ รวมถึงการวัดประสิทธิภาพระบบสื่อสารที่ได้ทำการออกแบบขึ้น โดยแบ่งการวัดประสิทธิภาพออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การรับส่งสัญญาณระดับภาคพื้นสู่พื้นที่สูงและระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้นซึ่งมีระยะทางในการทดสอบสูงสุดที่ระยะ 35 กิโลเมตร โดยผลการทดสอบพบว่าการทดสอบรูปแบบที่ 1 จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ดีที่ระยะทางไม่เกิน 25 กิโลเมตร ในส่วนของการวัดประสิทธิภาพในรูปแบบที่ 2 จะสามารถรับข้อมูลได้ดีที่ระยะ 5 กิโลเมตร หลังจากนั้นจะมีค่า PER เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการรับส่งข้อมูลแบบภาคพื้นสู่ภาคพื้นมีปัจจัยในการเกิดการลดทอนของสัญญาณมากกว่า เช่น มีสิ่งกีดขวางระหว่างการรับส่งสัญญาณ การลดทอนจากปรากฏการณ์ Multi Path การส่งสัญญาณที่ไม่เป็นไปตามหลักของ Fresnel Zone

รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการใช้งานความถี่ข้างเคียงภายในเขตชุมชน เป็นต้น

ในทางปฏิบัติหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารของระบบรายงานตำแหน่งให้ดีขึ้น ทำได้โดยปรับเปลี่ยนได้ที่สายอากาศฝั่งเกิดเวทย์ให้มีกำลังขยายมากขึ้นซึ่งไม่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงที่อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งก็จะทำให้การรับส่งข้อมูลของระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบสารสนเทศแบบรวมศูนย์และโปรแกรมประยุกต์สำหรับหน่วยงานด้านความมั่นคงใน 3 จังหวัดชายแดนใต้รวมถึงได้รับการสนับสนุนจากนาวาอากาศโท พันธุ์เทพ แก้วมงคล ผู้อำนวยการส่วนงานวิศวกรรมการสื่อสารข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์และเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในการพัฒนาระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น

## 8. เอกสารอ้างอิง

[1] Andrade, R.O., Yoom, S.G., Tello-Oquendo, L. & Ortiz-Garcés, I. 2020. A Comprehensive Study of the IoT Cybersecurity in Smart Cities. vol 8. IEEE Access.

[2] Sornin, N. 2015. LoRaWAN Specification, LoRa Alliance.

[3] Hoque, M.I., Amin, A.A., Rahaman, M.J. & Hossam-E-Haider, M. 2017. Designing and Performance Evaluation of GSM/GPS Based Helicopter Tracking Device. IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics.

[4] Mustafa, A., al-Nouman, M.I.A. & Awad, O.A. 2019. A Smart real-time tracking system using GSM/GPRS technologies. First International

Conference of Computer and Applied Sciences.

[5] Islam, M.N., Islam, M.R., Rafiqul Islam, S.M., Bhuyan, S.A. & Hasib, F. 2018. LocSoldiers: Towards Developing an Emergency Troops Locating System in Military Operations. 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology.

[6] Yellamma, P., Chandra, N.S.N.S.P., Sukhesh, P., Shruthi, P. & Teja, S.S. 2021. Arduino Based Vehicle Accident Alert System Using GPS, GSM and MEMS Accelerometer. 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication.

[7] Ameen, F.N., Mohammed, Z.S. & Sddiq, A.I. 2018. An Economic Tracking Scheme for GPS-GSM Based Moving Object Tracking System. The 2nd International Conference on Engineering, Technology and Sciences of Al-Kitab University.

[8] Bharavi, U. & Rao, M.S. 2017. Design and Development of GSM and GPS Tracking Module. 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology.

[9] Mohsin, A. & Yellampalli, S.S. 2017. IoT based Cold Chain Logistics Monitoring. IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation.

[10] Raj, J.T. & Sankar, J. 2017. IoT Based Smart School Bus Monitoring and Notification System. IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference.

[11] Ranjeeth, B., Reddy B.S., Reddy, Y.M.K., Suchitra, S. & Pavithra, B. 2020. Smart Child Safety Wearable Device. International Conference on Electronics and Sustainable Communication System.

[12] Nair, S., Rodrigues, G., Bellary, C.D. & Gonsalves, V. 2019. Designing of Beach Rescue Drone Using GPS And Zigbee Technologies. International

Conference on Communication and Electronics Systems.

[13] Kavuri, S., Moltchanov, D., Ometov, A. & Andreev, S. 2020. Performance Analysis of Onshore NB-IoT for Container Tracking During Near-the-Shore Vessel Navigation. *IEEE Internet of Things Journal*. vol 7. issue 4.

[14] Wan, L., Zhang, Z., Huang, Y., Yan, Y. & Wang, J. 2017. Performance Analysis of NB-IoT Technology for Indoor IoT Applications. *International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication*.

[15] Choi, W., Galkin, I., Lee, S., Park, J., Lee, J. & Kim, D. 2019. Efficient NB-IoT and GNSS chipset solution. *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*.

[16] Chitraranjan, C. D., Denton, A. M. & Perera, A.S. 2016. A Complete Observation Model for Tracking Vehicles from Mobile Phone Signal Strengths and its Potential in Travel-time Estimation. *IEEE 84th Vehicular Technology Conference*.

[17] Zulkifley, M.A. & Trigoni, N. 2018. Multiple-Model Fully Convolutional Neural Networks for Single Object Tracking on Thermal Infrared Video. *IEEE Access*.

[18] Tsun, M.T.K., Lau, B.T., Jo, H.S. & Lau, S.L. 2015. A Human Orientation Tracking System using Template Matching and Active Infrared Marker. *International Conference on Smart Sensors and Application*.

[19] Guo, G., Chen, R., Ye, F., Peng, X., Liu, Z. & Pan, Y. 2019. Indoor Smartphone Localization: A Hybrid WiFi RTT-RSS Ranging Approach. *IEEE Access*.

[20] Chena, W., Koa, K., Changa, Y. & Chang, C. 2018. An RSSI-based Distributed Real-time Indoor Positioning Framework. *IEEE International Conference on Applied System Innovation*.

[21] Guan, B. & Li, X. 2018. Research on Wireless Sensor Networks Localization Algorithm. *IEEE International*

*Conference of Safety Produce Informatization*.

[22] Arif, S.A., Niaz, M.H., Shabbir, N., Zafar, M.H., Hassan, S.R. & Rehman, A.U. 2018. RSSI Based Trilateration for Outdoor Localization in Zigbee based Wireless Sensor Networks (WSNs). *10th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*.

[23] Zhang, L., Yang, H., Yu, Y. & Peng, F. 2018. A Three-Dimensional Node Security Localization Method for WSN Based on Improved RSSI-LSSVR Algorithm. *10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.

[24] Li, L., Guo, X. & Ansari, N. 2020. SmartLoc: Smart Wireless Indoor Localization Empowered by Machine Learning. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 67, issue 8.

[25] Ge X., Gu R., Lang Y. & Ding, Y. 2017. Design of Handheld Positioning Tracker Based on GPS/GSM. *IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*.

[26] LoRa Alliance technical committee, LoRaWAN 1.1 Specification, LoRa Alliance, Product specification, 2017. Retrieved from [https://loro-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-specification-v1-1/](https://loro-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/)

[27] Qadir, Q.M., Rashid, T.A., Al-Salihi, N.K., Ismael, B., Kist, A.A. & Zhang, Z. 2018. Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs. vol. 6. *IEEE Access*.

[28] Naik, N. 2018. LPWAN Technologies for IoT Systems: Choice Between Ultra Narrow Band and Spread Spectrum. *IEEE International Systems Engineering Symposium*.

[29] The NASA WorldWind project. Retrieved from <https://worldwind.arc.nasa.gov/>