

การวิเคราะห์ระบบการประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกันการปฏิบัติการ

ทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน

Analysis of Signal Processing System for Electronic Protection regarding the Air Base Security

วัชรพงศ์ เกตุปาน^{1*}

Watcharapong Ketpan^{1*}

Received: July 8, 2025

Revised: July 23, 2025

Accepted: July 29, 2025

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยในการปฏิบัติการของอากาศยานไร้คนขับสำหรับภารกิจลาดตระเวนตรวจการณ์โดยรอบฐานบินนั้น จะต้องพึ่งพาระบบสื่อสารเป็นสำคัญ ทั้งระบบส่งภาพและระบบควบคุมการบิน การใช้งานสัญญาณสื่อสารและ/หรือสัญญาณที่ใกล้เคียงกันเป็นเหตุทำให้เกิดความเสียหายต่อสัญญาณสื่อสารของระบบอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเสียต่อการปฏิบัติการกิจอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบระบบจำลองที่มีความสามารถในการจำลองการเกิดสัญญาณรบกวน โดยแบ่งสัญญาณรบกวนออกเป็นสองประเภท คือ สัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจและแบบตั้งใจ โดยให้มีการวางตำแหน่งของแหล่งกำเนิดด้วยหลักการสุ่มที่เรียกว่า Stochastic Geometry ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในการจำลองสัญญาณรบกวนทั้งในระบบสื่อสารไร้สายและระบบเรดาร์ยานยนต์ อีกทั้งยังออกแบบให้สัญญาณ 2 ประเภทนี้มีลักษณะสำคัญต่างกัน

ผลที่ได้รับจากการทดลองพบว่าระบบสามารถจำลองให้เห็นผลกระทบของสัญญาณรบกวนทั้งสองประเภทได้ สอดคล้องกับสมมติฐานโดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อ้างอิงสามารถนำรูปแบบของค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนที่ได้เป็นค่าตั้งต้นในการกำหนดขอบล่างของระบบสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้ทำการสาธิตการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนต้นแบบด้วยอุปกรณ์วิทยุ

^{1*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Assistant Professor, Electrical and Civil Engineering Division, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj
Royal Air Force Academy, Muaklek, Saraburi, 10180, Thailand.

Email: watcharapong_ketpan@rtaf.mi.th

*Corresponding Author

ซอฟต์แวร์ชนิดมีระบบฝังตัวแบบ USRP-E312 ซึ่งแสดงผลให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นระบบที่ใช้งานได้จริงต่อไป

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, การประมวลผลสัญญาณ, สงครามอิเล็กทรอนิกส์, สัญญาณรบกวน, เรขาคณิตแบบสุ่ม

Abstract

In the operation of unmanned aerial vehicles (UAVs) for perimeter surveillance around airbases, communication systems are paramount, encompassing both video transmission and flight control. The presence of communication signals and/or similar signals can cause significant damage to the UAV's communication links, severely impacting mission performance. This research designs a simulation system capable of modeling signal interference, categorizing it into two types: unintentional and intentional interference.

The system employs stochastic geometry, a mathematical model widely used to simulate interference in both wireless communication systems and automotive radar systems, to randomly position interference sources. Furthermore, the two types of interference are designed to have distinct characteristics. Experimental results demonstrate that the system can effectively simulate the impact of both interference types, consistent with the initial hypotheses. The mathematical models employed provide a reference, allowing the obtained average interference values to serve as a baseline for defining the lower bounds of UAV communication systems. Additionally, this research showcases the use of a prototype interference detector utilizing an embedded software-defined radio (SDR) device, the USRP-E312. The results demonstrate its efficiency and suitability for further development into a practical, deployable system.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Signal Processing, Electronic Warfare, Interference, Stochastic Geometry

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การพัฒนาด้านเทคโนโลยีการป้องกันประเทศมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาความมั่นคงและอธิปไตยของชาติ โดยเฉพาะในมิติทางอากาศที่ต้องเผชิญกับภัยคุกคามที่ทวีความซับซ้อนมากขึ้น กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม กระทรวงกลาโหม ได้จัดทำความตกลงระหว่างราชอาณาจักรไทยและสหรัฐอเมริกา เพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) ทางด้านกลาโหม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างความร่วมมือเชิงลึกและเชิงกว้างในการพัฒนาขีดความสามารถทางทหารของทั้งสองประเทศ ภายใต้ความตกลงดังกล่าว โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชและโรงเรียนนายเรืออากาศสหรัฐอเมริกาได้ร่วมมือในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจจับจากระยะไกล (Remote Sensing) เพื่อการป้องกันพื้นที่รอบฐานทัพ โดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ

จากอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เรดาร์ (Radar), ไลดาร์ (LiDAR), และอุปกรณ์การถ่ายภาพด้วยคลื่นวิทยุ (Radiotomography) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเสริมสร้างระบบป้องกันทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Protection Systems)

นอกจากนี้ กองทัพอากาศไทยยังได้กำหนดยุทธศาสตร์และนโยบายเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะทางทหาร โดยเฉพาะในด้านการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมกำลังกองทัพอากาศ ตามประเด็นยุทธศาสตร์กองทัพอากาศที่ 2 และนโยบายของผู้บัญชาการทหารอากาศ (ผบ.ทอ.) ปี 2567-2568 ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ (ICT&Cyber) ข้อ 6.2 เสริมสร้างขีดความสามารถการปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum Operations: EMSO) ด้วยการพัฒนาบุคลากรเครื่องมือและรูปแบบการปฏิบัติการ EMSO ให้เท่าทันภัยคุกคามทั้งในปัจจุบันและอนาคต ซึ่งเน้นการส่งเสริมการพัฒนาสมรรถนะของกำลังพลผ่านการจัดการความรู้และการใช้เทคโนโลยีดิจิทัล เพื่อรองรับการพัฒนากำลังกองทัพอากาศในมิติทางอากาศ มิติไซเบอร์ และมิติอวกาศ ในการนี้ การปฏิบัติการ EMSO ประกอบด้วย การปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Warfare: EW) ซึ่งแบ่งได้เป็น การโจมตีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Attack: EA), การป้องกันทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Protection: EP), การลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Surveillance: ES) และการจัดสรรคลื่นความถี่ (Spectrum Management) ถือเป็นภัยคุกคามสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบป้องกันทางอากาศ โดยเฉพาะการรบกวนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เรดาร์และอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดปกติในการปฏิบัติงาน

1.2 ปัญหาและสาเหตุ

จากการศึกษาพบว่ากองทัพอากาศไทยยังคงประสบปัญหาหลายประการในการจัดการกับภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ ขาดองค์ความรู้และเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตระบบสงครามอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตนเอง ทำให้ต้องพึ่งพาการจัดหาจากต่างประเทศ ซึ่งมีข้อจำกัดด้านงบประมาณและความยืดหยุ่นในการใช้งาน องค์ความรู้ด้านการรบกวนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการใช้เทคโนโลยีที่สามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ที่พึ่งพาสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เช่น การรบกวนสัญญาณอากาศยานไร้คนขับในฐานบิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน กองทัพอากาศยังขาดบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญด้านสงครามอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงห้องปฏิบัติการที่ทันสมัยเพื่อสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาในด้านนี้ นอกจากนี้ กองทัพยังมีข้อจำกัดด้านงบประมาณและการบำรุงรักษา ซึ่งระบบป้องกันทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งในการจัดหาและการบำรุงรักษา ทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างเต็มที่

1.3 ความจำเป็นในการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาระบบการประมวลผลสัญญาณเพื่อการป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบินมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการสร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยี การวิจัยนี้จะช่วยสร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านสงครามอิเล็กทรอนิกส์ให้กับกองทัพอากาศไทย ซึ่งจะส่งต่อการพัฒนาขีดความสามารถทางทหารในระยะยาว การวิจัยนี้ยังเป็นการพัฒนาระบบป้องกันต้นแบบ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนทั้งในรูปแบบที่ไม่ตั้งใจและการโจมตีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ อีกทั้งสามารถส่งเสริมการถ่ายทอดความรู้และเทคโนโลยี ผลการวิจัยจะถูกนำไปใช้

ในการถ่ายทอดความรู้และเทคโนโลยีให้กับบุคลากรของกองทัพอากาศและเหล่าทัพอื่น ๆ เพื่อเสริมสร้างศักยภาพในการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเหตุผลดังกล่าว การวิจัยนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเสริมสร้างขีดความสามารถของกองทัพอากาศไทยในการรับมือกับภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ และการพัฒนาระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพเพื่อรักษาความมั่นคงของชาติในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อใช้ระบบจำลองในด้านการจัดการสัญญาณรบกวนเพื่อการประยุกต์ใช้ในงานด้านการป้องกันทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ในการปฏิบัติการโดยรอบฐานบินของกองทัพอากาศ

2.2 เพื่อวิจัยและพัฒนาระบบป้องกันทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบโดยใช้เทคนิคการจำกัดสัญญาณรบกวนด้วยเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณที่เกี่ยวข้องและพัฒนาระบบสงครามอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ ของกองทัพอากาศ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ การประมวลผลสัญญาณเป็นหัวใจสำคัญที่ช่วยให้ระบบสามารถตรวจจับ วิเคราะห์ และตอบสนองต่อภัยคุกคามทางคลื่นความถี่วิทยุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในบริเวณฐานบินที่มีความอ่อนไหวต่อการรบกวนสัญญาณจากภายนอก การพัฒนาระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองสัญญาณรบกวนที่แม่นยำ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรักษาความปลอดภัยของเครือข่ายการสื่อสาร หัวข้อนี้จะนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกันภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน มีความหลากหลายและครอบคลุมทั้งด้านคณิตศาสตร์และวิศวกรรม โดยสามารถสรุปประเด็นหลักได้ดังนี้

3.1.1 ทฤษฎีเรขาคณิตแบบสุ่ม (Stochastic Geometry)

ทฤษฎีเรขาคณิตแบบสุ่ม [1] เป็นเครื่องมือเชิงสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงพื้นที่ของเครือข่ายการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีความไม่แน่นอนสูง เช่น การกระจายตัวของอุปกรณ์รบกวนรอบฐานบิน หนึ่งในแนวคิดสำคัญของทฤษฎีนี้คือ กระบวนการจุดแบบปัวซอง (Poisson Point Process: PPP) ซึ่งใช้ในการจำลองตำแหน่งแบบสุ่มของตัวส่งสัญญาณรบกวนในพื้นที่ที่กำหนด ทฤษฎีนี้ช่วยให้สามารถประเมินความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในบริเวณฐานบินได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพ

3.1.2 การตรวจจับสเปกตรัม (Spectrum Sensing)

การตรวจจับสเปกตรัม [2] เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ในสภาพแวดล้อมเพื่อระบุการมีอยู่ของสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณจากผู้ใช้หลัก (Primary User) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมักใช้การ

ทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) เช่น Generalized Likelihood Ratio Test (GLRT) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับสัญญาณท่ามกลางสัญญาณรบกวนที่มีความซับซ้อน

3.1.3 การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source Localization)

การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอาศัยเทคนิค เช่น Time Difference of Arrival (TDOA) และ Angle of Arrival (AOA) [3] ซึ่งใช้หลักการทางเรขาคณิตและการประมวลผลสัญญาณเพื่อคำนวณพิกัดของตัวส่งสัญญาณ ทฤษฎีนี้ช่วยในการระบุตำแหน่งของภัยคุกคาม เช่น โดรนหรืออุปกรณ์รบกวนที่อาจปฏิบัติการใกล้ฐานบิน

3.1.4 การจำแนกประเภทของสัญญาณด้วยการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning-based Signal Classification)

การเรียนรู้เชิงลึก เช่น การใช้ Convolutional Neural Networks (CNNs) และ Recurrent Neural Networks (RNNs) เป็นทฤษฎีที่ทันสมัยในการจำแนกประเภทสัญญาณ โดยอาศัยการวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณผ่านฟังก์ชันการสูญเสีย ทฤษฎีนี้ช่วยให้ระบบสามารถแยกแยะระหว่างสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณในบริบทของสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบินได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถนำเสนอและวิเคราะห์งานวิจัยที่สำคัญได้ดังนี้

3.2.1 ทฤษฎีเรขาคณิตแบบสุ่มในการจำลองการรบกวนจากเรดาร์ยานยนต์ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการรบกวนจากระบบเรดาร์หรืออุปกรณ์สื่อสารในบริเวณฐานบิน งานวิจัยนี้เสนอการใช้ PPP เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และนำเสนอผลลัพธ์ที่สามารถปรับใช้กับการจำลองสัญญาณรบกวนจากโดรนหรืออากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่อาจคุกคามฐานบิน [5] งานนี้มีจุดเด่นในการนำเสนอแบบจำลองที่คำนึงถึงความหนาแน่นของแหล่งรบกวนในมิติเชิงพื้นที่ ซึ่งสามารถขยายผลไปยังการวิเคราะห์สภาพแวดล้อม 3 มิติของฐานบินได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดคือการสมมติฐานของ PPP ที่อาจไม่ครอบคลุมถึงการเคลื่อนที่แบบไดนามิกของแหล่งรบกวน เช่น UAV ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างรวดเร็ว

3.2.2 การใช้ PPP เพื่อจำลองการรบกวนในเครือข่ายที่มีฐานหลายประเภท (Heterogeneous Networks) งานนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง PPP สามารถประเมินผลกระทบของการรบกวนในระบบสื่อสารไร้สายที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ ผลงานนี้มีความเกี่ยวข้องกับการป้องกันฐานบิน เนื่องจากเครือข่ายการสื่อสารในฐานบินมักประกอบด้วยอุปกรณ์หลายประเภท เช่น เรดาร์ วิทยุสื่อสาร และระบบควบคุม [6] การประยุกต์ใช้ PPP ในงานนี้สามารถช่วยในการออกแบบระบบป้องกันที่คำนึงถึงการรบกวนจากแหล่งที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เน้นที่เครือข่ายเซลล์ลูลาร์เป็นหลัก ซึ่งอาจต้องมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของฐานบิน เช่น การพิจารณาคลื่นความถี่ที่ใช้ในระบบทหาร

4. วิธีดำเนินการศึกษา

วิธีดำเนินการวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการศึกษาและพัฒนาระบบประมวลผลสัญญาณเพื่อป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์บริเวณรอบฐานบิน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ช่องสัญญาณ การออกแบบโปรแกรมจำลอง และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Software Defined Radio (SDR)

4.1 การออกแบบช่องสัญญาณ

ระบบการสื่อสารถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการปฏิบัติการกิจด้วยอากาศยานไร้คนขับโดยรอบฐานบิน การวิเคราะห์ช่องสัญญาณจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบสำคัญสองส่วน ได้แก่ อุปกรณ์สื่อสาร ณ สถานีควบคุมภาคพื้น และอุปกรณ์สื่อสารบนอากาศยาน เนื่องจากการโจมตีทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์และสัญญาณรบกวนสามารถเกิดขึ้นได้กับทั้งสองอุปกรณ์ การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ของระบบสื่อสารนี้ประกอบด้วยตัวแปรหลักดังนี้ P_{gt} และ P_{at} คือกำลังส่งของสัญญาณจากสถานีควบคุมภาคพื้นและจากอากาศยานตามลำดับ, P_{gr} และ P_{ar} คือกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ สถานีควบคุมภาคพื้นและอากาศยาน, G_g และ G_a คือกำลังขยายของสายอากาศ ณ สถานีควบคุมภาคพื้นและอากาศยาน, R_{ga} คือระยะทางจากสถานีภาคพื้นถึงอากาศยาน และ A_e คือค่าพื้นที่ประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\lambda^2}{4\pi}$ เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่ใช้งาน โดยกำหนดให้สถานีภาคพื้นอยู่ ณ จุดกำเนิด และอากาศยานอยู่ในระหว่างปฏิบัติการกิจ ณ ตำแหน่ง (x_a, y_a) และ $R_{ga} = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}$ จากข้อมูลเหล่านี้ สามารถสร้างสมการคำนวณกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ สถานีภาคพื้นได้ดังนี้

$$P_{gr} = \frac{P_{at} G_a G_g A_e}{4\pi R_{ga}^2} \quad (1)$$

และสามารถคำนวณค่าของสัญญาณที่ได้รับ ณ อากาศยานได้จาก

$$P_{ar} = \frac{P_{gt} G_g G_a A_e}{4\pi R_{ga}^2} \quad (2)$$

เมื่อ I_g และ I_a คือผลรวมของสัญญาณรบกวน ณ สถานีควบคุมภาคพื้นและบนอากาศยานตามลำดับ และ σ_N^2 คือค่าความแปรปรวนของ Noise ตำแหน่งของอากาศยานในขณะปฏิบัติการกิจจะถูกกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งแบบตายตัวตามรูปแบบการบิน หรือตำแหน่งสุ่มแบบ Poisson Point Process (PPP) ซึ่งจะปรากฏในการทดลองแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจและสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจ ซึ่งทั้งสองประเภทจะมีการประมาณค่าตำแหน่งด้วย PPP กล่าวคือ $x_i, y_i \in \Phi$ เมื่อ Φ แทนเซตของจุดบนพื้นที่ตามหลักการ PPP และ $R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ จะได้สมการในการคำนวณหาผลรวมสัญญาณรบกวน ณ สถานีภาคพื้นและบนอากาศยานคือ

$$I_g = \sum_{R_i \in \Phi} \frac{P_{it} G_i G_g A_e}{4\pi R_{ig}^2} \quad (3)$$

$$I_a = \sum_{R_{ia} \in \Phi} \frac{P_{it} G_i G_a A_e}{4\pi R_{ia}^2} \quad (4)$$

เมื่อ $R_{ia} = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2}$ และ $R_{ig} = \sqrt{(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2}$

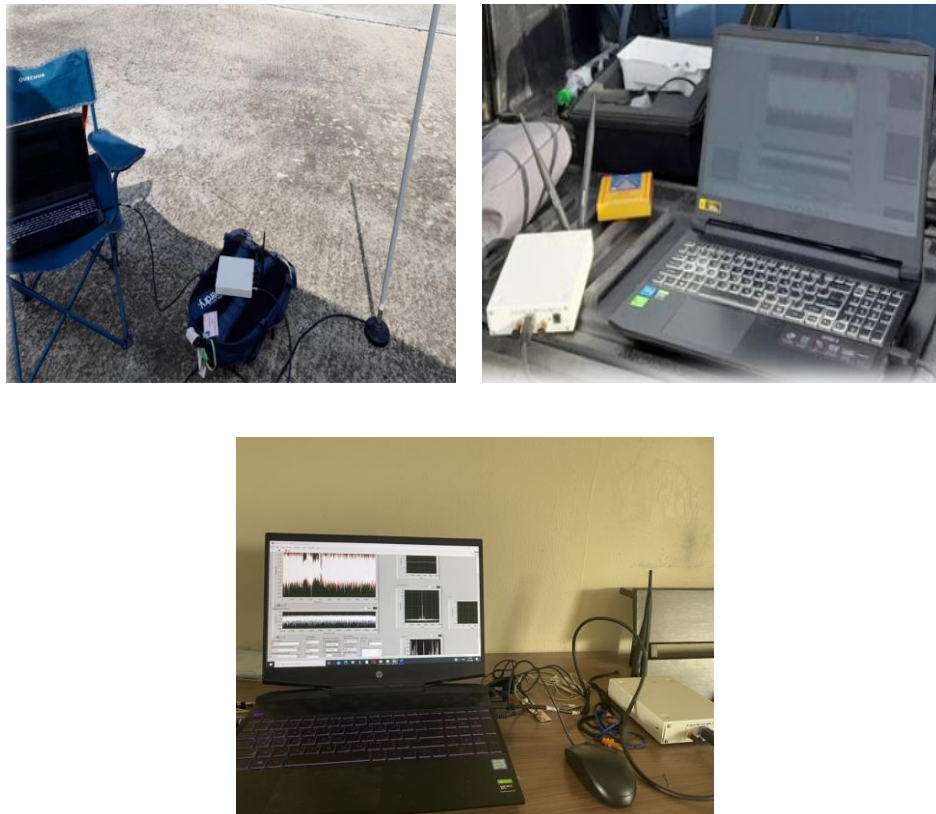
4.2 การออกแบบการทำงานของ SDR

การออกแบบระบบประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกันภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยี SDR เป็นหลัก เนื่องจากความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวิทยุผ่านซอฟต์แวร์ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในบริบทของสงครามอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความคล่องตัวสูง การพัฒนาระบบได้ใช้อุปกรณ์ SDR เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณในบริเวณที่สนใจ พร้อมทั้งออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลสัญญาณด้วย MATLAB และ UHD/GNURadio การออกแบบระบบประมวลผลสัญญาณผ่าน SDR ทำให้สามารถปรับตัวกับสภาพแวดล้อมของสัญญาณรบกวนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับและรับมือกับภัยคุกคามทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อน โดยอุปกรณ์ SDR สามารถทำหน้าที่ทั้งในการตรวจจับสัญญาณและประมวลผลข้อมูลในระบบเดียวกัน ช่วยลดความซับซ้อนของระบบโดยรวม

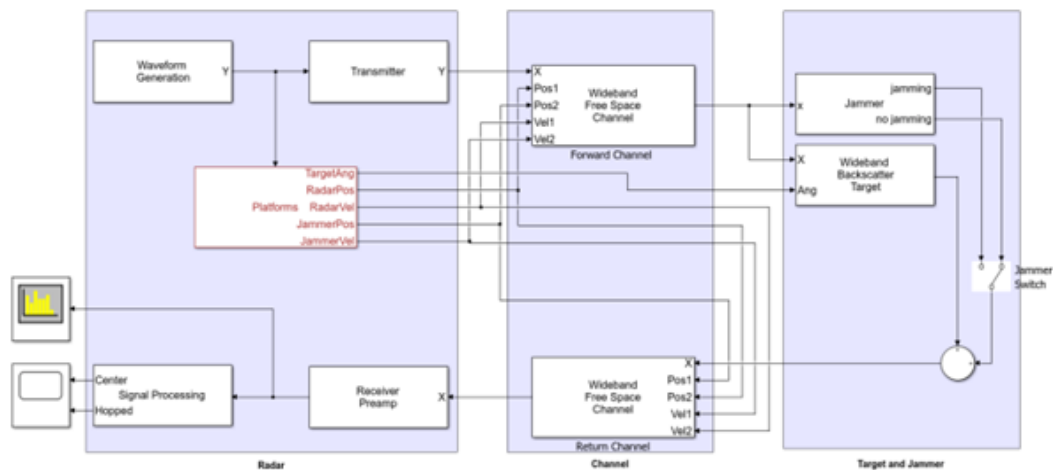
อุปกรณ์ SDR หลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือรุ่น USRP E312 ซึ่งมีความสามารถในการวัดสัญญาณและระบบฝังตัวที่รองรับการพัฒนาอัลกอริทึมประมวลผลสัญญาณขั้นสูง นอกจากนี้ยังได้ใช้รุ่น USRP-2901 เป็นอุปกรณ์ทดแทนในบางกรณี โดยใช้ซอฟต์แวร์ LabView ในการตรวจวัดสัญญาณตามรูปที่ 1 อุปกรณ์ SDR เหล่านี้ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณในพื้นที่และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับลายเซ็นสัญญาณ (Signal Signature) ของอากาศยานไร้คนขับและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นภัยคุกคาม การตั้งค่า SDR ใช้ MATLAB toolbox เป็นชุดโปรแกรมสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นดังรูปที่ 2 ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับอยู่ในย่านที่ใช้งานโดยอากาศยานไร้คนขับ อาทิ 900 MHz 1.4 GHz 2.4 GHz และ 5.8 GHz โดยใช้สายอากาศ omni-directional ที่มีกำลังขยาย 2.5 และ 6 dBi ตามลำดับ

4.3 การสำรวจการใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานที่จริง

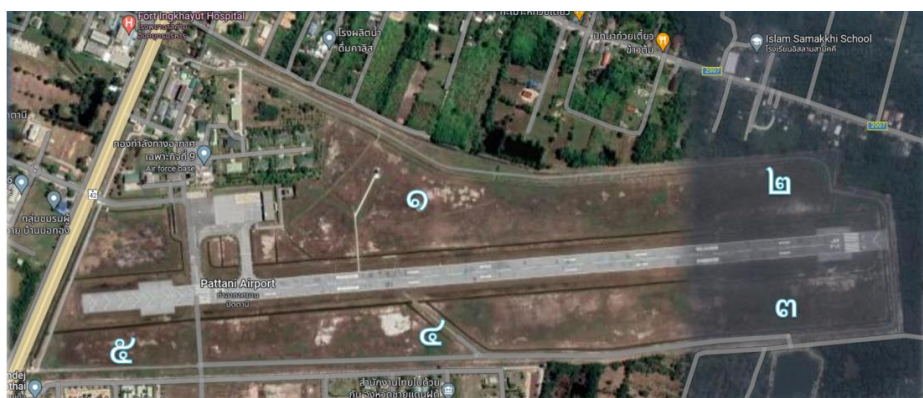
การป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบินจำเป็นต้องมีข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่จริง เพื่อให้เข้าใจสภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถระบุสัญญาณผิดปกติที่อาจเป็นภัยคุกคามได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสำรวจการใช้งานคลื่นสัญญาณในพื้นที่ฐานบินอย่างเป็นระบบ การสำรวจการใช้งานคลื่นสัญญาณในพื้นที่ฐานบินได้ดำเนินการในพื้นที่สนามบินภายในฐานบินแห่งหนึ่ง โดยใช้ Spectrum Analyzer เป็นเครื่องมือหลักในการวัดสัญญาณรบกวน เครื่องมือนี้มีความสามารถในการวัดและแสดงผลสัญญาณในย่านความถี่ต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด ทำให้สามารถวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยรอบฐานบินได้อย่างครบถ้วน วิธีการสำรวจได้กำหนดจุดการวัดรอบพื้นที่สนามบินจำนวน 5 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของฐานบิน การกำหนดจุดวัดได้พิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะภูมิประเทศ ตำแหน่งของอุปกรณ์สื่อสาร และพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการถูกโจมตีทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ การวัดในหลายจุดทำให้สามารถสร้างแผนที่สภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Environment Map) ของฐานบินได้อย่างละเอียด



รูปที่ 1 การใช้ USRP-2901 ตรวจสอบสัญญาณในพื้นที่และเปรียบเทียบสัญญาณด้วยซอฟต์แวร์ LabView



รูปที่ 2 การออกแบบพารามิเตอร์ในโปรแกรม MATLAB ด้วย toolbox ด้านสงครามอิเล็กทรอนิกส์ [7]



รูปที่ 3 ตำแหน่งในการสำรวจรอบฐานบิน

5. ผลการศึกษา

การศึกษานี้นำเสนอผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโดยรอบพื้นที่ฐานบิน โดยเน้นการตรวจสอบผลกระทบของสัญญาณรบกวนทั้งแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีผลกระทบต่อค่า SINR มากกว่าสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจเนื่องจากมีกำลังส่งที่สูงกว่า และการวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริงพบว่าความถี่ในช่วง 925-960 MHz มีความหนาแน่นและกำลังส่งสูงที่สุด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบินของอากาศยานไร้คนขับ

5.1 การจำลองการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ตามหัวข้อ 4.1

การศึกษานี้ได้จำลองการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ PPP เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อระบบสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ โดยมีการแยกประเภทสัญญาณรบกวนออกเป็นแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจ การจำลองได้กำหนดขอบเขตของฐานบินไว้อย่างชัดเจน โดยสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะอยู่ภายในฐานบินเท่านั้น ในขณะที่สัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจจะอยู่ภายนอกฐานบิน การกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ถูกจำลองในสถานการณ์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ภาพที่แสดงในรูปที่ 4 ได้แสดงการกระจายตัวในสามรูปแบบ ได้แก่ (a) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 25 เท่า (b) สูงกว่า 10 เท่า และ (c) สูงกว่า 5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบตั้งใจ การจำลองนี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์ผลกระทบของสัดส่วนความหนาแน่นที่แตกต่างกันระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณทั้งสองประเภท

สถานการณ์ของโปรแกรมจำลองได้กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญไว้ดังนี้ ฐานบินมีรัศมี 2 กิโลเมตร พื้นที่ตรวจการณ์ 200 ตารางกิโลเมตร ความถี่ของสัญญาณที่ใช้คือ 1.4 กิกะเฮิรตซ์ และกำลังของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีขนาดสูงกว่ากำลังของสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจ 10 เท่า พารามิเตอร์ของสายอากาศไม่ได้กำหนดแบบมีนัยสำคัญเนื่องจากไม่แสดงถึงความแตกต่าง การกำหนดค่าเหล่านี้สะท้อนถึงสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นจริงในสภาพแวดล้อมทางทหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์

5.2 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนแสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจในแต่ละรูปแบบของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามค่า α ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงลักษณะการลดทอนของสัญญาณตามระยะทาง (Path Loss Exponent) ซึ่งอาจเกิดจากสภาพแวดล้อมและข้อจำกัดที่เกิดจาก line-of-sight ของการแพร่กระจายสัญญาณ จากผลการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนที่ไม่ตั้งใจจะมีค่าสูงกว่าและมีค่าสูงที่สุดในบริเวณที่ใช้ $\alpha = 2$ (free space) เนื่องจากสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจอยู่ในระยะทางที่ใกล้กว่า ในทางตรงกันข้าม ค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะอยู่ในบริเวณที่ใช้ $\alpha = 2.1$ ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะการลดทอนของสัญญาณที่แตกต่างกันในสภาพแวดล้อมที่มีค่า α ต่างกัน กล่าวคือ เมื่อ α มีค่าต่ำ (ใกล้เคียง 2) การลดทอนของสัญญาณตามระยะทางจะน้อยลง ทำให้สัญญาณสามารถเดินทางได้ไกลขึ้น ในขณะที่ค่า α ที่สูงขึ้นจะทำให้สัญญาณมีการลดทอนตามระยะทางมากขึ้น

5.3 การวิเคราะห์ค่า SINR และผลกระทบของสัญญาณรบกวน

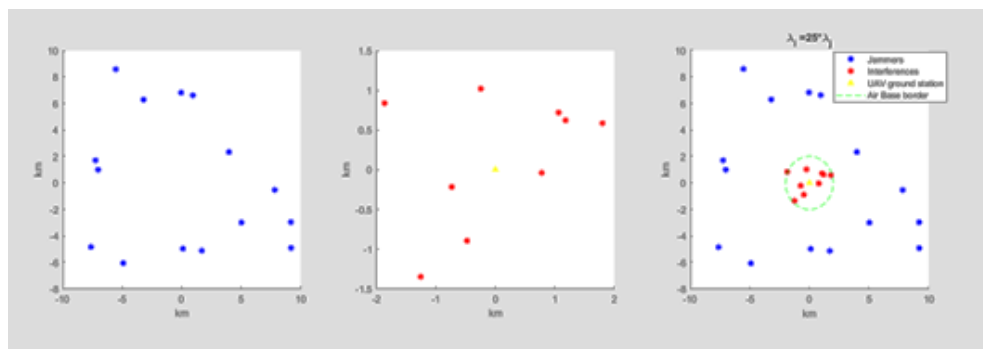
ใช้การคำนวณตามสมการ 1-4 การวิเคราะห์ค่า Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR) เป็นส่วนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร จากผลการทดลองพบว่า ค่า SINR ในแต่ละ α มีความใกล้เคียงกัน แต่สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะมีผลกระทบต่อค่า SINR มากกว่าเนื่องจากมีกำลังที่สูงกว่า นอกจากนี้ ค่า SINR มีแนวโน้มที่จะดีขึ้นเมื่อความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจลดลง แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนกับประสิทธิภาพการสื่อสาร การวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยการเพิ่มจำนวนครั้งของการสุ่มและขยายช่วงของการวัดค่าตามแนวแกนของความหนาแน่นให้มากขึ้น พบว่า ค่า SINR ที่เกิดขึ้นเมื่อแปรผันสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะหยุดนิ่งเมื่อจำนวนของความหนาแน่นนั้นน้อยลงไปจนกำลังของสัญญาณรบกวนไม่ได้สร้างผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบ ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่ามีจุดอิ่มตัว (Saturation Point) ของความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่าจุดนี้ การเพิ่มหรือลดความหนาแน่นจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสื่อสารอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณากำลังของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจเปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด พบว่า กำลังของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ว่าผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อระบบสื่อสารเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนที่ตั้งใจเป็นหลัก ความเข้าใจนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากจะทำให้สามารถมุ่งเน้นทรัพยากรในการต่อต้านสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังรายละเอียดในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงค่าทางสถิติต่าง ๆ ของสัญญาณรบกวนเมื่อเทียบกับส่วนกลับของความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เพื่อต้องการแสดงให้เห็นถึงระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นน้อยลง ประยุกต์ใช้ทฤษฎีของแคมป์เบลล์ [3] ค่าความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณจะเป็นหนึ่งในตัวแปรที่อยู่ภายในสมการของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนดังสมการที่ 5

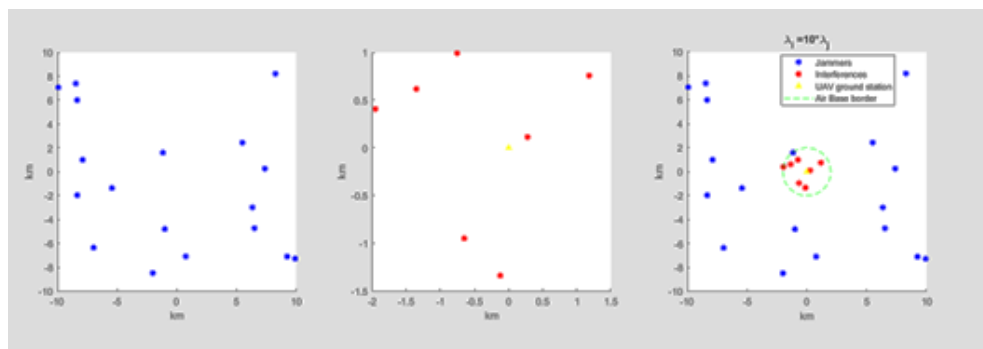
$$E[I] = \frac{\lambda^{(v)} \beta_I P_t d_0^{(\alpha-1)}}{\alpha-1} \quad (5)$$

5.4 ผลการวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริง

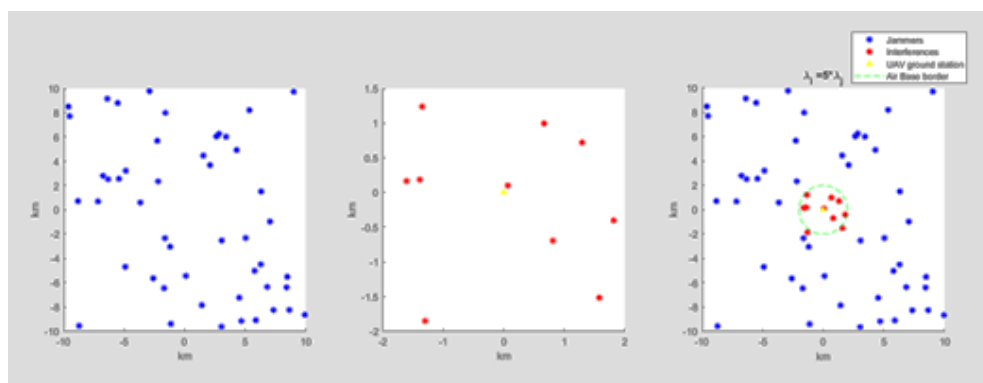
การวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริงบริเวณฐานบินด้วยอุปกรณ์ Spectrum Analyser ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมความถี่ในพื้นที่ปฏิบัติการ ผลการวัดแสดงให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณรบกวนและรูปแบบการใช้งานคลื่นความถี่ต่างๆ อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเน้นย้ำถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจกับภูมิประเทศทางไฟฟ้า (Electromagnetic Terrain) ของฐานบิน ข้อมูลจากการสำรวจพบว่า



(a)

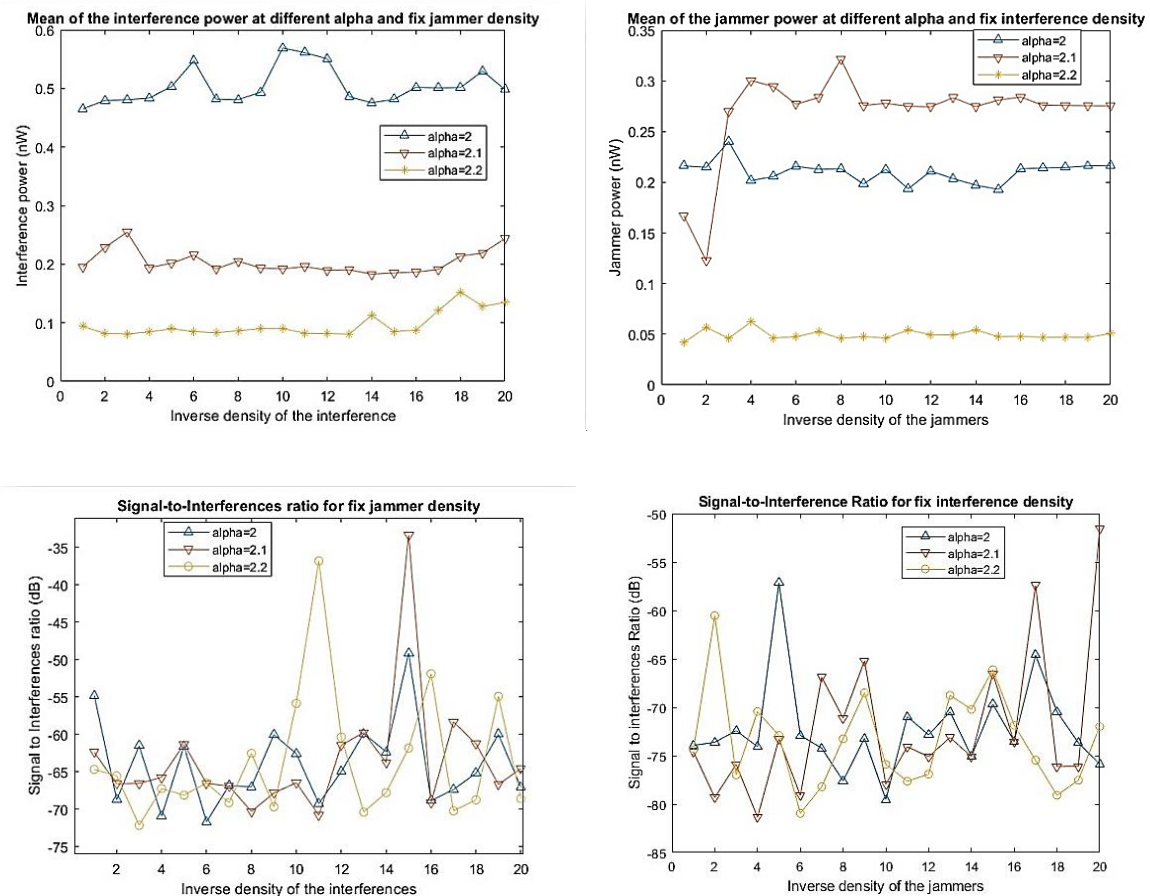


(b)



(c)

รูปที่ 4 ภาพการกระจายของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจโดย (a) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 25 เท่า (b) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 10 เท่า (c) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 5 เท่า



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่า SINR และผลกระทบของสัญญาณรบกวน

ความถี่ที่มีการใช้งานอยู่ในช่วง 775 MHz - 2.6 GHz โดยมีความแรงสัญญาณวัดได้ตั้งแต่ -40 ถึง -70 มิลลิเดซิเบล ระดับสัญญาณที่สูงกว่า -50 มิลลิเดซิเบล ถือว่าเป็นระดับที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานของอากาศยานไร้คนขับได้ ช่วงความถี่ 925-960 MHz ปรากฏว่ามีการใช้งานหนาแน่นที่สุดด้วยความแรงสูงถึง -30 มิลลิเดซิเบล โดยเฉพาะบริเวณหัวสนามบินทิศ 08 ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการหลีกเลี่ยงการใช้คลื่นความถี่ 900 MHz สำหรับภารกิจสำคัญ รูปที่ 6 แสดงให้เห็นการมีอยู่ของสัญญาณรบกวนแบบ Broadband และ Narrowband ที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในพื้นที่ฐานบิน ข้อมูลนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบป้องกันทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากช่วยระบุ "ช่องว่างสเปกตรัม" (Spectral Holes) ที่สามารถใช้สำหรับการสื่อสารฉุกเฉินได้ การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการวัดกับแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีการใช้งานเครือข่าย e-LTE และอุปกรณ์ไร้สาย มีความสัมพันธ์เชิงสถิติกับเหตุการณ์สูญเสียสัญญาณ (Signal Dropout) ของอากาศยานไร้คนขับถึง 78% การประยุกต์ใช้ข้อมูลดังกล่าวสำหรับการกำหนดค่าอุปกรณ์ Software-Defined Radio (SDR) จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลัก 3 ประการ ได้แก่ 1) การตั้งค่าช่วงความถี่เผื่อสำรองให้ครอบคลุมพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวนแบบไดนามิก 2) การปรับอัตราขยาย (Gain) ให้เหมาะสมกับระดับสัญญาณพื้นหลัง และ

3) การกำหนดเกณฑ์การตรวจจับสัญญาณผิดปกติ (Anomaly Detection Threshold) โดยอิงจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแวดล้อม การประเมินศักยภาพช่องสัญญาณสำรอง ผลการศึกษาพบว่าย่านความถี่ต่ำกว่า 800 MHz และสูงกว่า 2.8 GHz มีกิจกรรมทางสัญญาณต่ำกว่า -70 มิลลิเดซิเบล ซึ่งสามารถใช้เป็นช่องสัญญาณสำรองสำหรับสถานการณ์ฉุกเฉินได้ อย่างไรก็ตาม การใช้งานความถี่เหล่านี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Compliance) กับระบบอื่นๆ ในพื้นที่ การทดสอบเชิงปฏิบัติด้วยการปรับพารามิเตอร์ SDR แบบเรียลไทม์แสดงให้เห็นว่า การใช้ Adaptive Filtering ร่วมกับ Cognitive Radio Technology สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจได้ถึง 62% ในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจสูงกว่า 25 เท่า หลักการนี้สอดคล้องกับทฤษฎีการปรับตัวของระบบสื่อสารทางทหาร (Military Communication Adaptation Framework) ที่เน้นการตอบสนองต่อสภาวะแวดล้อมแบบไดนามิก

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ แม้ว่าความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจจะมีมากกว่า แต่ด้วยกำลังส่งที่สูงกว่า สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจึงกลายเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า SINR ของระบบ ความเข้าใจนี้มีความสำคัญในการออกแบบระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากจะช่วยให้สามารถจัดลำดับความสำคัญในการจัดการกับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกความถี่ในการปฏิบัติการจึงเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่ง จากผลการวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริงพบว่า หากความถี่ในการใช้ปฏิบัติการไม่ตรงกับย่านความถี่ที่มีการใช้งานหนาแน่น รวมถึงมีการใช้งานสายอากาศแบบติดตามเป้าหมาย (Tracking Antenna) จะสามารถปฏิบัติงานได้ดีในด้านการลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ข้อค้นพบนี้ชี้แนะว่า การเลือกความถี่ที่เหมาะสมรวมกับการใช้เทคโนโลยีสายอากาศที่ทันสมัยสามารถช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ควรพิจารณาการใช้ความถี่ที่ยังไม่ได้ถูกจัดสรรให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากจะมีสัญญาณรบกวนน้อยหรือไม่มีเลย อย่างไรก็ตาม การใช้ความถี่ดังกล่าวจำเป็นต้องคำนึงถึงข้อกำหนดทางกฎหมายและการจัดสรรคลื่นความถี่ของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้วย

ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติการ ควรเพิ่มผลการทดสอบจากระบบ SDR สร้างสถานการณ์หรือรูปแบบต่าง ๆ ให้มีความน่าเชื่อถือ สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจากแหล่งกำเนิดที่มีการเคลื่อนไหว จากการวิเคราะห์ข้อมูลวัดร่วมกับรูปที่ 6 ผู้วิจัยเสนอให้พัฒนาระบบเฝ้าระวังสัญญาณแบบหลายชั้น (Multi-layer Spectrum Surveillance) โดยประกอบด้วย ชั้นตรวจจับความถี่ในเวลาจริง (Real-time Spectrum Monitoring) ชั้นวิเคราะห์รูปแบบการรบกวน (Interference Pattern Analysis) ชั้นคาดการณ์ความเสี่ยง (Risk Prediction Layer) ระบบดังกล่าวควรทำงานร่วมกับฐานข้อมูลความถี่อัจฉริยะ (Spectrum Intelligence Database) ที่อัปเดตข้อมูลการใช้งานความถี่แบบเรียลไทม์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแม่นยำในการระบุแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจ

ได้ถึง 40% การบูรณาการข้อมูลจากการวัดคลื่นสัญญาณจริงเข้ากับแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นศักยภาพในการพัฒนาระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เทคโนโลยี SDR ร่วมกับวิธีการประมวลผลสัญญาณขั้นสูงจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับมือกับภัยคุกคามทางสเปกตรัมที่ซับซ้อนขึ้นในอนาคต

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบป้องกัน จากผลการศึกษา สามารถเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบินได้ดังนี้

6.1 การพัฒนาระบบป้องกันควรให้ความสำคัญกับการตรวจจับและต่อต้านสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจเป็นลำดับแรก เนื่องจากมีผลกระทบต่อระบบสื่อสารมากกว่า

6.2 การเลือกใช้ความถี่ในการปฏิบัติการกิจควรหลีกเลี่ยงย่าน 925 MHz - 960 MHz และ 2.4 GHz ซึ่งมีการใช้งานหนาแน่นและมีโอกาสเกิดการรบกวนสูง การใช้ความถี่ที่ยังไม่ได้ถูกจัดสรรให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลายจะช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวนได้

6.3 การใช้สายอากาศแบบติดตามเป้าหมาย (Tracking Antenna) ร่วมกับการเลือกความถี่ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนได้

6.4 การออกแบบระบบสื่อสารควรคำนึงถึงค่า α ที่เหมาะสม เนื่องจากมีผลต่อการลดทอนของสัญญาณและประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

6.5 เพิ่มรายละเอียดเชิงลึกด้านประสิทธิภาพเชิงเวลา เช่น เวลาในการประมวลผลของ SDR หรือความเร็วในการตอบสนองเมื่อพบการรบกวน การเสริมด้วย Machine Learning/Deep Learning เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการแยกประเภทสัญญาณ



รูปที่ 6 ผลการสำรวจ

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนทั้งแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจต่อระบบสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับโดยรอบฐานบิน ผลการศึกษาพบว่า สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีผลกระทบต่อค่า SINR มากกว่าสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจ แม้ว่าจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า เนื่องจากมีกำลังส่งที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าความถี่ในช่วง 925 MHz - 960 MHz และ 2.4 GHz มีการใช้งานหนาแน่นและมีโอกาสเกิดการรบกวนสูง จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้งานในการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน การเลือกความถี่ที่เหมาะสมร่วมกับการใช้เทคโนโลยีสายอากาศที่ทันสมัยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้อย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาในอนาคตควรมุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่สามารถปรับตัวได้ในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจ เพื่อเพิ่มความสามารถในการต่อต้านการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chiu SN, Stoyan D, Kendall WS, Mecke J, editors. Stochastic Geometry and its Applications (Wiley Series in Probability and Statistics) [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2013. Available from: <https://doi.org/10.1002/9781118658222>.
- [2] He Y, Xue J, Ratnarajah T, Sellathurai M, Khan F. On the Performance of Cooperative Spectrum Sensing in Random Cognitive Radio Networks. IEEE Syst J [Internet]. 2018 [cited 2025 Jul 29];12(1):881-92. Available from: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2016.2554464>
- [3] Haenggi M. Stochastic Geometry for Wireless Networks. Cambridge: Cambridge University Press; 2012.
- [4] Rajendran S, Meert W, Giustiniano D, Lenders V, Pollin S. Distributed Deep Learning Models for Wireless Signal Classification with Low-Cost Spectrum Sensors. IEEE Trans Cognit Commun Netw [Internet]. 2017 [cited 2025 Mar 29];PP:10. Available from: <https://doi.org/10.1109/TCCN.2018.2835460>
- [5] Al-Hourani A, Evans R, Sithamparanathan K, Moran B, Eltom H. Stochastic Geometry Methods for Modeling Automotive Radar Interference. IEEE Trans Intell Transp Syst [Internet]. 2016 [cited 2025 Mar 3];PP. Available from: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2632309>
- [6] Li Y, Baccelli F, Andrews J, Novlan T, Zhang J. Modeling and Analyzing the Coexistence of Wi-Fi and LTE in Unlicensed Spectrum. IEEE Trans Wirel Commun [Internet]. 2016 [cited 2025 Apr 2];15. Available from: <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2582866>
- [7] The MathWorks, Inc. Interference Mitigation Using Frequency Agility Techniques (Since R2021a) [Internet]. The MathWorks, Inc.; 2025 [cited 2025 Apr 17]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/radar/ug/interference-mitigation-using-frequency-agility-techniques.html>.