

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบหลายความถี่ด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

เจตนิพัทธ์ กิตติขุเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Engineering Commons](#)

Recommended Citation

กิตติขุเทศ, เจตนิพัทธ์, "การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบหลายความถี่ด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6582. <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6582>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบหลายความถี่ด้วยเทคนิค
การประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้
คนขับขนาดเล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE OF THE LOW-COST MULTI-FREQUENCY GNSS RECEIVER USING PRECISE
POINT POSITIONING TECHNIQUE FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE
APPLICATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Survey Engineering
Department of Survey Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2022
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ราคาประหยัดแบบหลายความถี่ด้วยเทคนิคการประมวลผล แบบจุดเดียวความละเอียดสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงาน สำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก
โดย	นายเจตนิพัทธ์ กิตติบุญเกศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติชาย ไวกสุระสิงห์)

เจตนิพัทธ์ กิตติบุญเกศ : การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด
แบบหลายความถี่ด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ใน
งานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก. (PERFORMANCE OF THE LOW-COST MULTI-
FREQUENCY GNSS RECEIVER USING PRECISE POINT POSITIONING
TECHNIQUE FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE APPLICATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
ผศ. ดร.ธีรทัต เจริญกาต้ญญา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์

การผลิตแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กในปัจจุบัน ได้มีการนำเทคโนโลยีระบบนำทางด้วยดาวเทียม GNSS มาใช้ในการระบุตำแหน่งหมุดควบคุมภาคพื้นดิน รวมถึงการระบุตำแหน่งของอากาศยานนั้นด้วย ซึ่งความถูกต้องทางตำแหน่งของหมุดควบคุมฯ และตำแหน่งอากาศยานฯ ดังกล่าวนั้น เป็นส่วนสำคัญของความถูกต้องทางตำแหน่งของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากงานสำรวจด้วยอากาศยานนี้ โดยปัจจัยที่จะทำให้ได้ตำแหน่งที่มีความถูกต้องสูง ได้แก่ ชนิดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่ใช้ในการรังวัด และเทคนิคการรังวัดดาวเทียม GNSS ที่นำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบรังวัด (Survey grade) ชนิดหลายความถี่ และเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์คือเทคนิค RTK (Real Time Kinematic) หรือ PPK (Post Processing Kinematic) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบรังวัดนั้น มีราคาค่อนข้างสูง รวมทั้งเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK และ PPK นั้นยังคงมีข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานการผลิตแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศด้วยวิธีการนี้ กล่าวคือความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานถึงตำแหน่งหมุดควบคุมฯ หรือตำแหน่งของอากาศยานนั้น แล้วแต่กรณี ซึ่งจะทำให้อากาศยานไร้คนขับถูกจำกัดระยะทางในการบิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาประหยัดแบบหลายความถี่ U-blox F9P ด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ซึ่งต้องการเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพียงเครื่องเดียวและความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากสถานีฐานใดๆ โดยทดสอบทั้งในการรังวัดแบบสถิตและแบบจลน์ ผลการวิจัยพบว่าความถูกต้องทางตำแหน่งจากการรังวัดแบบสถิตของเครื่องรับและเสาอากาศราคาประหยัดดังกล่าวให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งที่ดีกว่า 0.03 เมตร (ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดที่รังวัดด้วยเทคนิค RTK) ในการทดสอบรังวัดแบบจลน์ที่ความเร็ว 10 และ 20 เมตรต่อวินาที สามารถให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบดีกว่า 0.6 เมตร และทางตั้งดีกว่า 1.2 เมตร

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ นิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270376921 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: Precise Point Positioning Technique, Low-cost GNSS receiver, small
Unmanned Aerial Vehicle, GNSS

Jadeniphat Kittiboongate : PERFORMANCE OF THE LOW-COST MULTI-FREQUENCY GNSS RECEIVER USING PRECISE POINT POSITIONING TECHNIQUE FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE APPLICATION. Advisor: Asst. Prof. TEETAT CHAROENKALUNYUTA, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. PHISAN SANTITAMNONT, Dr.Ing.

The small unmanned aerial photogrammetric mapping has been produced by using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) to identify ground control points including the aircraft's position. The ground control point and aircraft's position accuracy are important for the result of aerial photogrammetric mapping. Position accuracy will be affected by Types of GNSS receivers and GNSS survey techniques. Nowadays, Multi-frequency GNSS receivers (Survey grade) and Kinematic techniques are popular in use including RTK (Real-Time Kinematic) and PPK (Post Processing kinematic) respectively. However, Survey grade GNSS is quite pricey. Moreover, RTK and PPK techniques still have some limitations in use and applied to aerial photogrammetric mapping production. The aerial photogrammetric mapping accuracy depends on the distance from the base station to ground control point or aircraft's position. This will limit the traveled distance of aircraft. So, the purpose of this research is to evaluate the performance of low-cost GNSS receivers and antennas by using precise point positioning technique (The requirements are using a single receiver, and distance independent from any station). The test will be conducted by PPP static and PPP-Kinematic techniques. The results found that the accuracy of the low-cost GNSS receiver and antennas in static survey method can provide an accuracy of better than 0.03 meters in both horizontal and vertical directions. This accuracy is at the same level as the GNSS Survey grade using the RTK technique, while the kinematic method the accuracy was 0.6 meters in horizontal and 1.2 meters in vertical directions, respectively.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากหลายท่านด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งติดตามการดำเนินงานวิจัยตลอดจนช่วยเหลือตรวจสอบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำพร้อมแนวคิดและติดต่อจัดหาอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย อ.ดร.ชัยโชค ไวกาษา ประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาติชาย ไวยสุระสิงห์ กรรมการรายนอก ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ซึ่งทุกท่านได้กรุณาให้แนวความคิด คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ เพื่อปรับปรุง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน

ขอขอบคุณบริษัท อินฟราพลัส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลและอุปกรณ์ในการศึกษาเพื่อประกอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงนายธีรรัช มณีนาถ และทีมงานจากบริษัท อินฟราพลัสทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานและการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่คอยอบรมให้ความรู้ในด้านวิชาการ และการปฏิบัติภาคสนาม รวมทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้องภาควิชากรรมสำรวจทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่สาว และขอขอบคุณนางสาวกาญจน์สินี รัตนบุญฤทธิ์ ที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้เขียนเป็นอย่างดีเสมอมา ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบไป

เจตนิพัทธ์ กิตติบุญเกศ

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	14
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตการวิจัย	17
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา	17
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	18
1.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	20
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	25
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.1 แนวคิดพื้นฐานของงานวิจัย.....	25
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	26
2.2.1 ระบบดาวเทียมนำหน GNSS (Global Navigation Satellite Systems)	26
2.2.2 การหาตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)	26

2.2.3 การหาค่าพิกัดด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning).....	30
2.2.4 การหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning).....	30
2.2.5 การระบุพิกัดโลกด้วยการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (Post-Processing Kinematic : PPK).....	31
2.2.6 ค่าคลาดเคลื่อนในการรังวัดดาวเทียม.....	32
2.2.7 เรขาคณิตดาวเทียม (Satellite Geometry).....	33
2.2.8 สถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Stations : CORS).....	33
2.2.9 กรอบอ้างอิงสากล (International Terrestrial Reference Frame : ITRF).....	34
2.2.10 การผลิตแผนที่ทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ	34
2.2.11 รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE)	35
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1 การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย	41
3.1.1 ข้อมูลสถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร	41
3.1.2 ข้อมูลการรังวัดแบบสถิต.....	42
3.1.3 ข้อมูลการรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์	44
3.1.4 ข้อมูลการรังวัดแบบจลน์บนอากาศยานไร้คนขับ.....	47
3.2 การประมวลผลข้อมูลรังวัดดาวเทียม GNSS	48
3.2.1 ข้อมูลค่าพิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการตรวจสอบ	48
3.2.1.1 ค่าพิกัดหมุดตรวจสอบกรณีรับสัญญาณแบบสถิต.....	48
3.2.1.2 ค่าพิกัดอ้างอิงสำหรับการทดสอบแบบจลน์บนรถยนต์	48
3.2.2 การประมวลผลผลภายหลังจากข้อมูลรังวัดแบบสถิต.....	50

3.2.3 การประมวลผลข้อมูลรังวัดแบบจลน์จากอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนรถยนต์	51
3.2.4 การประมวลผลข้อมูลรังวัดแบบจลน์บนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก	52
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	54
4.1 เปรียบเทียบค่าพิกัดจากการรังวัดแบบสถิตแล้วประมวลผลภายหลังแบบจุดเดียวความละเอียดสูง.....	54
4.2 เปรียบเทียบค่าพิกัดจากการรังวัดแบบสถิตแล้วประมวลผลภายหลังแบบจลน์ (PPK).....	59
4.3 เปรียบเทียบค่าพิกัดจากการรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์	65
4.4 เปรียบเทียบความต่อเนื่องข้อมูลค่าพิกัดของวิถีการเคลื่อนที่ (Trajectory) จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดในการทดสอบบนอากาศยานไร้คนขับ.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผลการศึกษา	74
5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ.....	76
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเฉพาะเสาอากาศ รุ่น HX-CH6601A	23
ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลค่าแก้ที่สามารถดาวน์โหลดได้จาก IGS	29
ตารางที่ 3 แสดงค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร DPT9 และ PKKT	42
ตารางที่ 4 อุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต	44
ตารางที่ 5 ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ในการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหลังคารถยนต์	47
ตารางที่ 6 แสดงค่าพิกัดและความสูงเหนือทรงรีของจุดตรวจสอบ SV1 SV2 และ SV3	48
ตารางที่ 7 ระยะห่างทางราบและทางตั้งจากจุดศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณของเสาอากาศ (Phase Center) ที่ติดตั้งบนหลังคารถ หน่วยเป็นเมตร	49
ตารางที่ 8 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนในทางราบทางตั้งและ 3มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมกันฟ้า 5 องศา	56
ตารางที่ 9 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบทางตั้งและ 3มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมกันฟ้า 7.5 องศา	57
ตารางที่ 10 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบทางตั้งและ 3มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมกันฟ้า 10 องศา	57
ตารางที่ 11 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบทางตั้งและ 3มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมกันฟ้า 15 องศา	58
ตารางที่ 12 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบและทางตั้งจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว ความละเอียดสูงแบบสถิต	59
ตารางที่ 13 ผลลัพธ์การประมวลผลภายหลังแบบจลน์จากข้อมูลรับสัญญาณแบบสถิตด้วยเครื่องรับสัญญาณ U-blox F9P	60
ตารางที่ 14 แสดงร้อยละของจำนวนข้อมูล SD ในแต่ละช่วงตามทิศทางการประมวลผลและข้อมูลค่าแก้ที่ใช้	67

ตารางที่ 15 ค่า RMSE ทางราบและทางตั้ง จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์.	68
ตารางที่ 16 ค่า SD ของค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์.....	68
ตารางที่ 17 ค่า RMSE ของระยะอ้างอิงจุดในการทดสอบ	68
ตารางที่ 18 จำนวนดาวเทียมที่รับได้ในแต่ละEpochของ 2 เทียวบิน	70



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 พื้นที่ทดสอบรับสัญญาณแบบสถิตกับสถานี CORS DTP9 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง..	18
รูปที่ 2 เส้นทางการทดสอบรับสัญญาณดาวเทียมบนรถยนต์	19
รูปที่ 3 เส้นทางการบินรับสัญญาณดาวเทียมของอากาศยานไร้คนขับที่อำเภอทับปดบุรี	20
รูปที่ 4 โปรแกรม U-center 20.10	21
รูปที่ 5 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ SparkFun รุ่น RTK surveyor ใช้ชิปรับสัญญาณ U-blox ZED-F9P	21
รูปที่ 6 เสาอากาศรับสัญญาณประเภท Helical Coil รุ่น HX-CH6601A และตำแหน่งศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณ	22
รูปที่ 7 เสาอากาศรับสัญญาณ BT-147 และตำแหน่งศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณ	23
รูปที่ 8 อุปกรณ์รับสัญญาณ Trimble R7 และ Antenna Zephyr model 2	24
รูปที่ 9 การติดตั้งเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมบนราวเหล็กหลังคารถยนต์	24
รูปที่ 10 การหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูงในปัจจุบัน (ที่มา : https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-022-00089-9)	27
รูปที่ 11 ตำแหน่งสถานีรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องอ้างอิงถาวรและสถานีติดตามดาวเทียมของ IGS	27
รูปที่ 12 การหาตำแหน่งด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง	30
รูปที่ 13 การหาตำแหน่งด้วยวิธีแบบสัมพัทธ์	31
รูปที่ 14 แผนผังขั้นตอนการทําวิจัย	41
รูปที่ 15 การรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิตเพื่อหาค่าพิกัดหมุดอ้างอิงด้วย CHC i80 บริเวณ ศาลาว่าการศาลาภิรมย์ (ตึกวิศวกรรมสำรวจ) วันที่ 21 มกราคม 2564	43
รูปที่ 16 การรับสัญญาณดาวเทียมแบบสถิตที่หมุด SV1 SV2 SV3 ตามลำดับจากซ้ายไปขวา วันที่ 26-29 มกราคม 2564	44
รูปที่ 17 เส้นทางการรับสัญญาณทางพิเศษอุดรรัถยา	45

รูปที่ 18 การติดตั้งอุปกรณ์บนราวหลังคารถยนต์เพื่อทำการรังวัดแบบจลน์.....	46
รูปที่ 19 อากาศยานไร้คนขับ Loong VTOL ติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณ GNSS U-blox F9P พร้อมเสาอากาศประเภท Helical.....	47
รูปที่ 20 ระยะห่างระหว่างเสาอากาศที่ติดตั้งบนหลังคารถยนต์.....	49
รูปที่ 21 ตรวจสอบค่าชดเชยระยะของเสาอากาศที่ติดตั้งบนหลังคารถยนต์	50
รูปที่ 22 โปรแกรม RTKCONV ver.demo5 b33f.....	50
รูปที่ 23 ตัวอย่างการตัดแบ่งข้อมูลเป็นช่วงเวลาด้วยโปรแกรม TEQC.....	51
รูปที่ 24 ตัวอย่างข้อมูลจากโปรแกรม RTKLIB	52
รูปที่ 25 หน้าต่างโปรแกรม RTKLIB สำหรับประมวลผลแบบ PPP	53
รูปที่ 26 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางดิ่ง ทางราบ และสามมิติ โดยที่ใช้มุมกันฟ้าต่างกัน กรณีใช้ F9P/BT-147	55
รูปที่ 27 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางดิ่ง ทางราบ และสามมิติ โดยที่ใช้มุมกันฟ้าต่างกัน กรณีใช้เครื่องรับ F9P คู่กับเสาอากาศ HX-CH6601A.....	55
รูปที่ 28 เปรียบเทียบความถูกต้องค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัด Trimble R7 Zephyr256	
รูปที่ 29 ความคลาดเคลื่อนค่าพิกัดของเครื่องรับราคาประหยัด BT-147.....	61
รูปที่ 30 ผลต่างค่าพิกัดจากเครื่องรับ HX-CH6601A การประมวลผลแบบ PPK.....	61
รูปที่ 31 ผลต่างค่าพิกัดจากเครื่องรับแบบรังวัดคุณภาพสูงการประมวลผลแบบ PPK.....	62
รูปที่ 32 ค่า Standard Deviation ผลต่างค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งจากเสาอากาศ BT-147	63
รูปที่ 33 ค่า Standard Deviation ผลต่างค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งจากเสาอากาศ HX-CH6601A	63
รูปที่ 34 ค่า Standard Deviation ผลต่างค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งจากเสาอากาศ Zephyr	63
รูปที่ 35 แสดงค่า PDOP ที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยเสาอากาศ BT-147	64
รูปที่ 36 แสดงค่า PDOP ที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยเสาอากาศ HX-CH6601A.....	64
รูปที่ 37 แสดงค่า PDOP ที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยเสาอากาศ Trimble R7	64

รูปที่ 38 ดาวเทียมที่รับได้และความต่อเนื่องของข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคา ประหยัด.....	69
รูปที่ 39 กราฟแสดงข้อมูลค่าพิกัดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 1.....	70
รูปที่ 40 กราฟแสดงข้อมูลค่าระดับขณะบินในเที่ยวบินที่ 1.....	71
รูปที่ 41 กราฟแสดงข้อมูลค่า PDOP ตลอดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 1.....	71
รูปที่ 42 กราฟแสดงข้อมูลค่าพิกัดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 2.....	72
รูปที่ 43 กราฟแสดงข้อมูลค่าระดับขณะบินในเที่ยวบินที่ 2.....	72
รูปที่ 44 กราฟแสดงข้อมูลค่า PDOP ตลอดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 2.....	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีระบบนำหนด้วยดาวเทียม GNSS ถูกประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในงานสำรวจรังวัดและจัดทำแผนที่ ที่มีความสำคัญกับการใช้งาน GNSS มาอย่างต่อเนื่อง การระบุค่าพิกัดด้วยการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS มีวิธีการได้มาซึ่งข้อมูลและวิธีประมวลผลที่ใช้กันทั่วไปหลายรูปแบบตามงบประมาณ คุณภาพเครื่องมือที่ใช้และความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งที่ต้องการ การพัฒนาเทคโนโลยีที่รวดเร็วในปัจจุบันทำให้มีการพัฒนาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมให้มีราคาถูกลง ขนาดเล็กลง น้ำหนักเบา และใช้พลังงานน้อยลง (Lu et al., 2019) และในไม่กี่ปีที่ผ่านมาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้หลายระบบและรับสัญญาณได้หลายความถี่ รวมถึงยังมีเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมหลายรูปแบบเริ่มวางจำหน่ายตามท้องตลาดซึ่งสามารถขยายขอบเขตของการทำงานได้หลากหลายมากขึ้น ทำให้เป็นที่สนใจของผู้ใช้งานในวงการสำรวจที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานสำรวจรังวัด ผู้ใช้ทั่วไป และนักวิจัย เช่น การใช้งานในระบบนำหนของอากาศยานไร้คนขับ การตรวจจับการเคลื่อนตัวของพื้นดินหรือสิ่งปลูกสร้าง (Hamza et al., 2020) รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Liu et al., 2021) เป็นต้น

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก (sUAV) ในการสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ เช่น การจัดทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ไม่ว่าจะเป็น พอยต์คลาวด์ (Point Cloud) แบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลข (DEM) แบบจำลองระดับพื้นผิว (DSM) แบบจำลองลักษณะภูมิประเทศ (DTM) แผนที่ภาพถ่ายออร์โธ (Ortho photo map) กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆ ส่งผลให้การใช้งานอากาศยานไร้คนขับเป็นทางเลือกการทำงานที่สามารถประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากและยังเพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงานยิ่งขึ้น การใช้เทคโนโลยีระบบนำหนด้วยดาวเทียม GNSS ควบคู่ไปด้วยนั้นเป็นส่วนสำคัญทั้งในการนำหนหรือควบคุมการบิน อีกทั้งใช้ในการระบุตำแหน่งของอากาศยานนั้นเพื่อให้ได้วิถีของอากาศยานที่มีความถูกต้องสูง (Precise Trajectory) การระบุตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน รวมถึงใช้ในการระบุค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพของกล้องบนอากาศยานฯ ณ ขณะถ่ายภาพอีกด้วย ซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศโดยเฉพาะกระบวนการโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

(Aerial Triangulation) ที่เป็นกระบวนการปรับแก้และหาค่าการจัดวางภายนอกของภาพที่มีความสำคัญอย่างมากต่อตำแหน่งของวัตถุที่รังวัดซึ่งส่งผลต่อความละเอียดถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Benassi et al., 2017) ดังนั้น ความถูกต้องทางตำแหน่งของจุดควบคุมภาคพื้นดิน และตำแหน่งของอากาศยานฯ ดังกล่าวจึงเป็นอีกหนึ่งส่วนสำคัญต่อความถูกต้องทางตำแหน่งของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากงานสำรวจด้วยอากาศยานนี้ (Turner et al., 2013) อีกทั้งความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จาก GNSS บนอากาศยานฯ จะช่วยลดจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ต้องการได้ด้วย (Grayson et al., 2018) ทำให้ยิ่งประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายได้มาก โดยปัจจัยที่จะทำให้ได้ตำแหน่งที่รังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS มีความถูกต้องสูง ได้แก่ เทคนิคหรือวิธีการรังวัดดาวเทียม GNSS ที่ใช้ ชนิดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่ใช้ในการรังวัด และ ระยะเวลาในการรับข้อมูลสัญญาณดาวเทียม เป็นต้น (Farah, 2017)

แม้ปัจจุบันจะมีการใช้เทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมพัทธ์ในการหาตำแหน่งของอากาศยานฯ ด้วยเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ คือเทคนิค RTK (Real Time Kinematic) ที่สามารถให้ค่าพิกัดได้ทันทีและมีความถูกต้องสูง ซึ่งการประยุกต์ใช้ในงานแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศสามารถให้ความถูกต้องทางราบที่ 2-3 เซนติเมตร และทางดิ่งที่ 2-10 เซนติเมตร (Benassi et al., 2017) หรือเทคนิค PPK (Post Processing Kinematic) ที่ให้ความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง 1.5 - 2.2 เซนติเมตร (He et al., 2016) อย่างไรก็ตามเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK และ PPK นั้นยังคงมีข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานการผลิตแผนที่ภาพถ่ายอยู่บ้าง เช่น ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับขึ้นอยู่กับระยะห่างจากสถานีฐานถึงตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินหรือตำแหน่งของอากาศยานนั้น หากระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการรังวัดยิ่งไกลจากสถานีฐาน ความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดที่ได้จะยิ่งลดลง ซึ่งจะทำให้อากาศยานไร้คนขับถูกจำกัดระยะทางในการทำงาน อีกทั้งการทำงานแบบ RTK ต้องมีการสื่อสารกับสถานีฐานผ่านคลื่นวิทยุหรืออินเทอร์เน็ตที่ต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มทำให้มีค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น รวมถึงประสิทธิภาพการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและสัญญาณคลื่นวิทยุยังขึ้นอยู่กับพื้นที่และหากใช้ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (NRTK) พื้นที่ที่สามารถใช้งานบริการนี้จะถูกจำกัดอยู่เฉพาะพื้นที่ของโครงข่ายและยังต้องเสียค่าบริการหรือต้องขอรหัสผู้ใช้อยู่ อีกทั้งในการประยุกต์ใช้ GNSS บนอากาศยานไร้คนขับในกรณีที่หาตำแหน่งแบบจลน์ทันทีด้วยเทคนิค RTK หรือ NRTK เพื่อนำหน้มาพบปัญหาของอาการคลื่นหลุดอาจเกิดจากกรณีที่มีการสื่อสารระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้เกิดการขัดข้องหรือมีการรบกวนการสื่อสารหรือปัญหาคลื่นหลุดที่อาจเกิดจากความรบกวนสะสมภายในอุปกรณ์รังวัดก็เป็นได้

เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise point positioning: PPP) ที่สามารถใช้เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวในการทำงานได้ โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติม อาศัยเพียงข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงและค่าแก้ทางพิคา ดาวเทียมในการหาวิธีการบินความถูกต้องสูง ข้อมูลจะถูกนำมาใช้ในการประมวลผลภายหลังเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้ จะไม่ขึ้นกับระยะจากสถานีฐาน ใด ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์มากสำหรับการใช้งานในพื้นที่ใหญ่ หรือพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นทางยาว เช่นงานสำรวจเส้นทาง งานสำรวจแนวท่อ เป็นต้น

ที่ผ่านมาในงานวิจัยไม่มากที่ทดสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องทางตำแหน่งของวิธีการเคลื่อนที่ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดโดยเปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงในลักษณะการทำงานของอากาศยานขนาดเล็ก ด้วยการประมวลผลหาค่าพิกัดด้วยวิธีการประมวลผลวิธีหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูงและศึกษาข้อจำกัดในการทำงานและการประมวลผลเช่นการใช้มุมกันฟ้าที่เหมาะสม ผลกระทบของความร้อนสะสมในสภาพแวดล้อมการทำงานจริงของประเทศไทย ที่อาจส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS จากเครื่องรับราคาประหยัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาประหยัดแบบหลายความถี่ ด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูง เพื่อเป็นที่ยืนยันความถูกต้องแม่นยำทางตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดเมื่อใช้ร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดทั้งในการรังวัดแบบสถิตและในการรังวัดแบบจลน์โดยมีค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดที่มีคุณภาพสูงกว่า ในการทดสอบรังวัดแบบจลน์แบบมีค่าพิกัดอ้างอิงนั้นจะทำการจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เนื่องจากข้อจำกัดของอากาศยานไม่สามารถบรรทุกน้ำหนักของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการบินถ่ายภาพหรือเก็บข้อมูลของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กชนิดปีกหมุน (multi-rotor) ใช้ความเร็วบินสูงสุดประมาณ 10 เมตรต่อวินาที และชนิดปีกตรึง (Fixed-wing / VTOL) ใช้ความเร็วบินประมาณ 20 เมตรต่อวินาที ในงานวิจัยนี้จึงทำการติดตั้งเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดคู่กับเครื่องรับและเสาอากาศแบบรังวัดคุณภาพสูงบนรถยนต์แล้วขับรถรับสัญญาณบนทางพิเศษยกระดับเป็นระยะทางยาวอย่างน้อย 20 กิโลเมตรเพื่อจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นทางยาว จากนั้นทำการเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากอุปกรณ์ราคาประหยัดเทียบกับเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดคุณภาพสูง อีกทั้งทดสอบติดตั้ง

เครื่องรับราคาประหยัดบนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อดูความต่อเนื่องของข้อมูลและวิธีการเคลื่อนที่ในการทำงานจริง รวมถึงทดสอบรับสัญญาณแบบสถิตเป็นเวลานานเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการรับสัญญาณในสภาพอากาศร้อนของประเทศไทยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำรวจรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับทั้งในงานภาพถ่ายทางอากาศ งานสำรวจทาง และอื่น ๆ ตามความถูกต้องทางตำแหน่งที่ต้องการได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาประหยัดเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงทั้งในการรังวัดแบบสถิตและแบบจลน์

1.2.2 เพื่อทราบถึงข้อจำกัดและวิธีการใช้งาน รวมถึงวิธีการประมวลผลข้อมูลจากอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดได้อย่างเหมาะสม

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดในการให้คำพิทักษ์วิทยานพเคราะห์สำหรับรูปแบบการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กด้วยวิธีหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

1.3.1.1 ศึกษาแบบวิธีการรังวัดสัญญาณดาวเทียมและวิธีการประมวลผลข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบหลายความถี่

1.3.1.2 ศึกษาวิธีการประมวลผลข้อมูลจากการรังวัดแบบสถิตและแบบจลน์โดยการประมวลผลภายหลังด้วยวิธีสัมพัทธ์และวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงด้วยโปรแกรมประมวลผลเชิงพาณิชย์ Inertial Explorer 8.7 และโปรแกรมรหัสเปิด RTKLIB

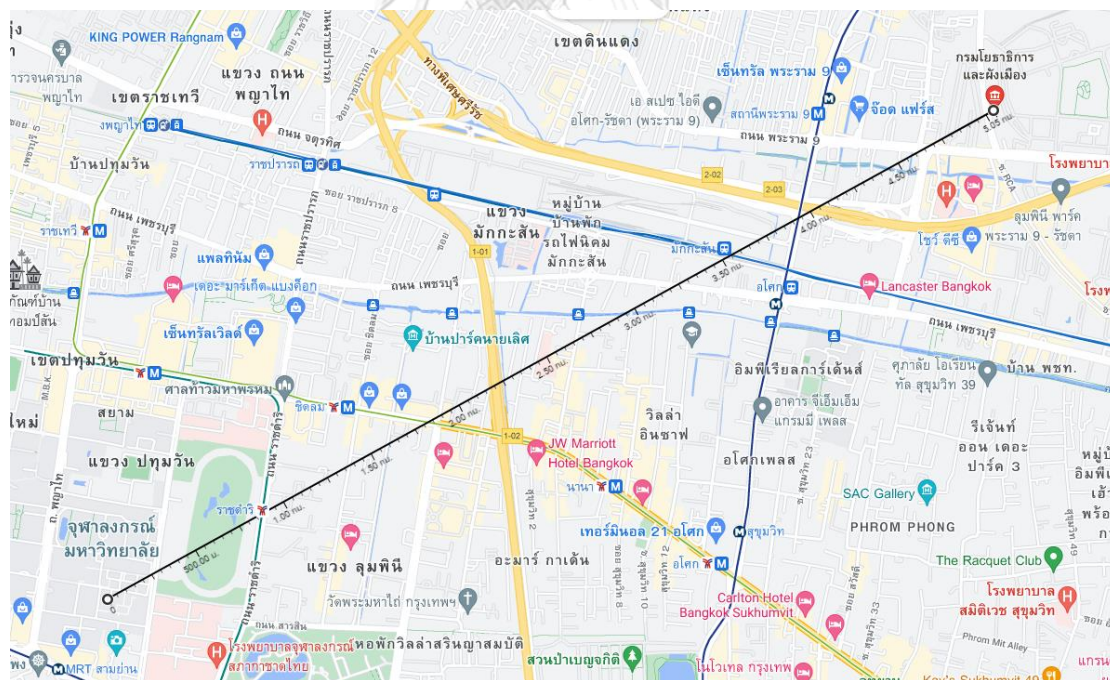
1.3.1.3 เปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในการรังวัดแบบสถิตและแบบจลน์โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดจากค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง เปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงที่ได้จากอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมคุณภาพสูงที่ประมวลผลด้วยวิธีการประมวลผลแบบสัมพัทธ์

1.3.1.5 ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดเพื่อนำประยุกต์ใช้ในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก ในส่วนของวิธีการเคลื่อนที่แม่นยำสูง และความถูกต้องแม่นยำของจุดควบคุมภาคพื้นดิน

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในงานวิจัยนี้พื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 3 พื้นที่ สำหรับการทดสอบ 3 รูปแบบ คือการทดสอบรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต การทดสอบรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์บนรถยนต์ เพื่อจำลองการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก และการทดสอบรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์บนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

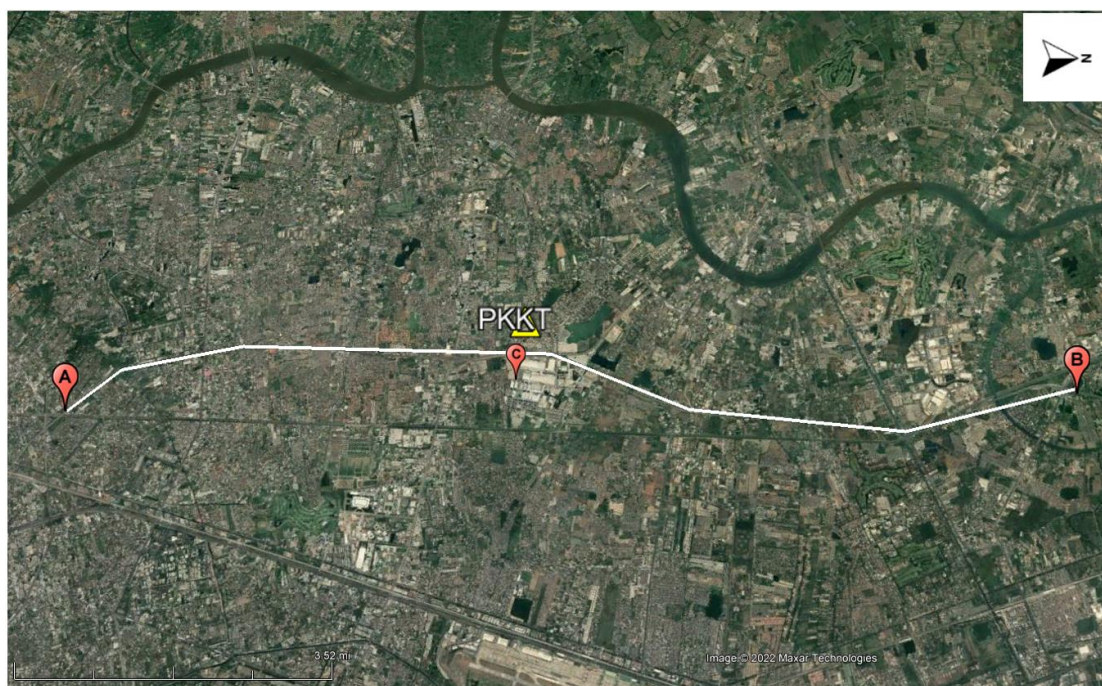
ในส่วนของการทดสอบรังวัดแบบสถิต เลือกพื้นที่บริเวณตลาดฟ้าตัดภาควิชาวิศวกรรมสำรวจเพราะมีความมั่นคงปลอดภัย มีไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมที่ตั้งรับสัญญาณเป็นเวลาหลายวันและมีหมุดที่มั่นคงถาวรสำหรับการหาพิคต์อ้างอิง (Ground Truth) โดยใช้สถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร DPT9 เป็นสถานีฐานในการประมวลผลเส้นฐานแบบสัมพัทธ์ ที่มีระยะเส้นฐาน 5 กิโลเมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ทดสอบรับสัญญาณแบบสถิตกับสถานี CORS DPT9 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง

สำหรับการทดสอบการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์บนรถยนต์ ต้องการจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กประเภทหลายใบพัดและประเภทปีกตรึงที่

เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 10 และ 20 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ โดยจะต้องเป็นพื้นที่เปิดโล่งสามารถเคลื่อนที่รับสัญญาณได้ด้วยความเร็วคงที่ มีลักษณะเป็นทางยาวอย่างน้อย 20 กิโลเมตร และอยู่ใกล้กับสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรเพื่อใช้เป็นสถานีฐานในการประมวลผลเพื่อหาวิถีการเคลื่อนที่อ้างอิง (Reference trajectory) จึงเลือกเก็บข้อมูลบนทางพิเศษอุดรรัถยาตั้งแต่ด่านประชาชื่นจนถึงด่านบางพูนที่มีสถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร PKKT (ปากเกร็ด) ของกรมที่ดิน อยู่บริเวณกึ่งกลางของเส้นทางนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เส้นทางทดสอบรับสัญญาณดาวเทียมบนรถยนต์

และพื้นที่สำหรับทดสอบรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อแสดงให้เห็นถึงความต่อเนื่องของข้อมูลที่ได้จากการทำงานจริง พื้นที่บินทดสอบอยู่ที่ตำบลเมืองเก่า อำเภอบินทร์บุรี จังหวัดปทุมธานี เส้นทางการบินแสดงใน รูปที่ 3

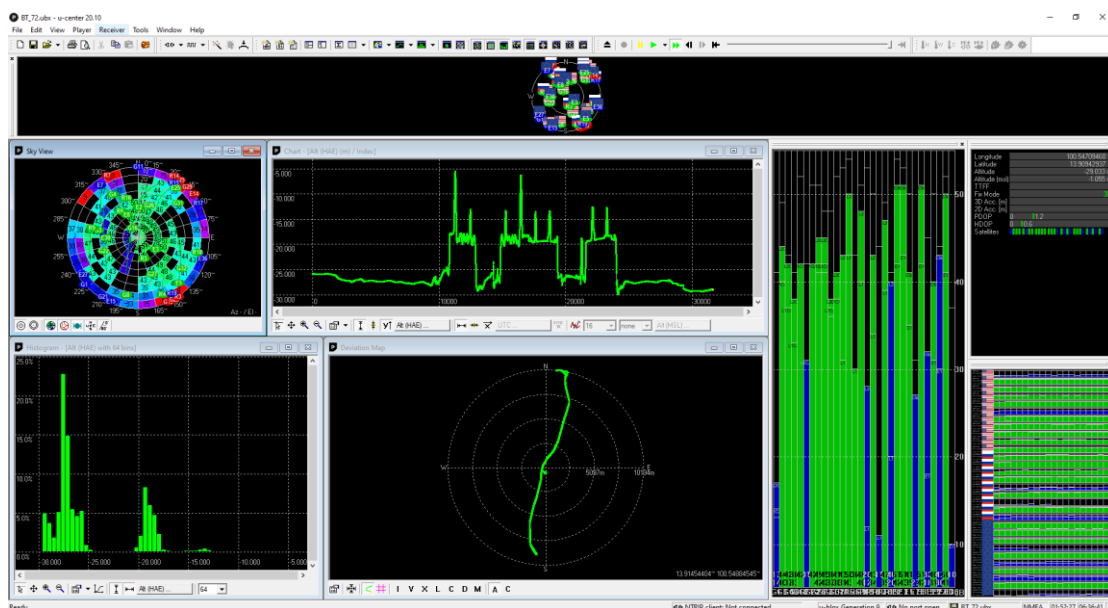


รูปที่ 3 เส้นทางการบินรับสัญญาณดาวเทียมของอากาศยานไร้คนขับที่อำเภอภักดีชุมพล

1.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.3.3.1 ซอฟต์แวร์

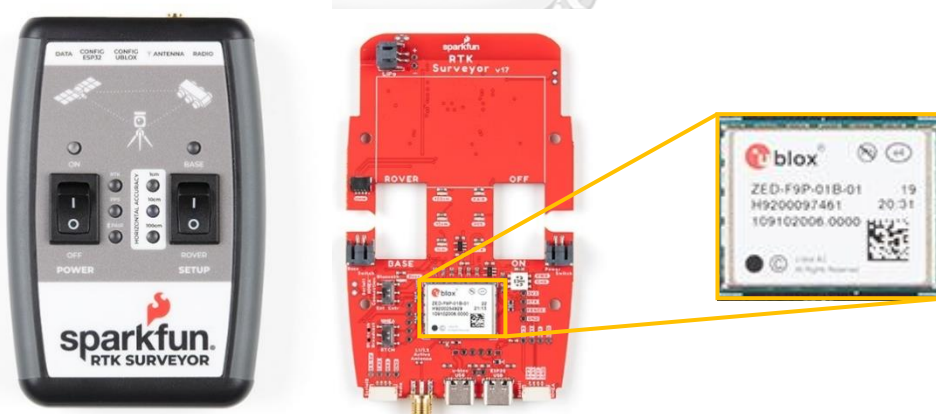
ใช้โปรแกรม U-center 20.10 รูปที่ 4 สำหรับการตั้งค่าเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด โดยเลือกรับดาวเทียมเฉพาะ GPS GLONASS GALILEO ตั้งค่า baud rate ที่ 115200 เปิดใช้งานข้อมูล RXM-RAWX และ RXM-SFRBX ซึ่งทำให้สามารถนำข้อมูลดิบจากการรับสัญญาณดาวเทียมที่บันทึกเป็นไฟล์สกุล .ubx มาแปลงไฟล์รูปแบบของ Receiver Independent Exchange file (RINEX) ด้วยโปรแกรม RTKCONV (RTKLIB version 2.4.3 b33f) สำหรับข้อมูลรับสัญญาณแบบสถิติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใช้โปรแกรม Translate, Edit, Quality Check (TEQC) (Estey & Meertens, 1999) ในการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลและตัดช่วงข้อมูลเป็นระยะเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง และใช้โปรแกรม Inertial Explorer / Waypoint version 8.7 (IE 8.7) ซึ่งเป็นโปรแกรมประมวลผลเชิงพาณิชย์ที่มีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับประมวลผลหาค่าพิกัดอ้างอิงของการรังวัดแบบสถิติและประมวลผลหาค่าพิกัดวิธีการเคลื่อนที่อ้างอิงของการรังวัดแบบจลน์ และใช้โปรแกรมรหัสเปิด RTKLIB ในการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP) เพื่อหาค่าพิกัดของวิธีการเคลื่อนที่ในการทดสอบรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์



รูปที่ 4 โปรแกรม U-center 20.10

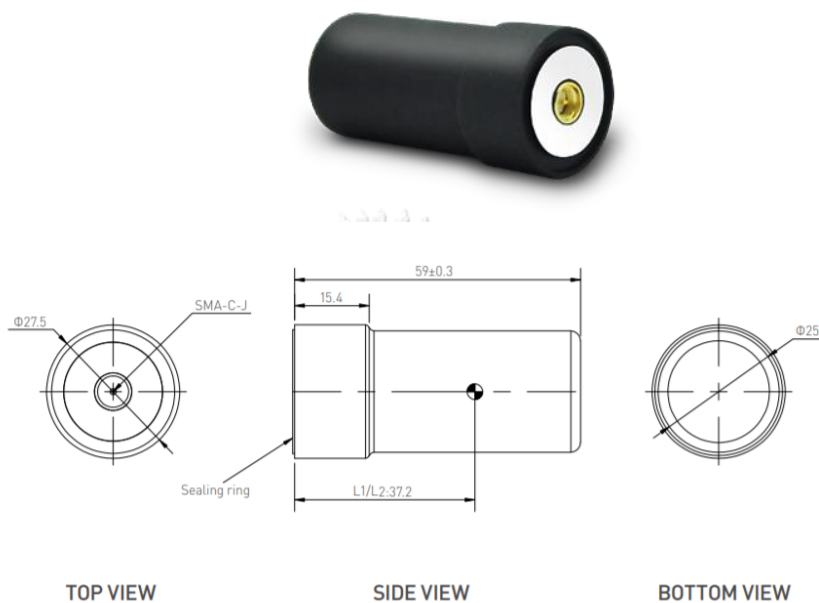
1.3.3.2 อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาประหยัดที่ใช้ชิปเซตรับสัญญาณดาวเทียม U-blox รุ่น ZED-F9P รูปที่ 5 ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้หลายความถี่ในการทดสอบ เฉพาะบอร์ดรับสัญญาณราคาประมาณ 200 USD



รูปที่ 5 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ SparkFun รุ่น RTK surveyor ใช้ชิปรับสัญญาณ U-blox ZED-F9P

ใช้เสาอากาศรับสัญญาณ 2 รุ่น คือ รุ่น HX-CH6601A ประเภท Helical ตำแหน่งของศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณแสดงในรูปที่ 6 ราคาประมาณ 100 USD พร้อมสายเชื่อมต่อประเภท SMA และใช้เสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมรุ่น BT-147 รูปที่ 7 ราคาประมาณ 70 USD พร้อมสายเชื่อมต่อประเภท TNC-SMA คุณสมบัติเฉพาะของเสาอากาศรับสัญญาณแสดงในตารางที่ 1

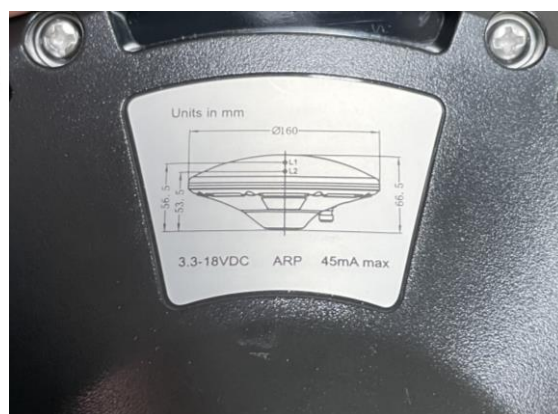


รูปที่ 6 เสาอากาศรับสัญญาณประเภท Helical Coil รุ่น HX-CH6601A และตำแหน่งศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณ

(ที่มา : https://en.harxon.com/u_file/product/21_07_20/Harxon%20HX-CH6601A%20Brochure.pdf)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเฉพาะเสาอากาศ รุ่น HX-CH6601A

Specifications		
รุ่น	HX-CH6601A	BT-147
Frequency Range	GPS L1/L2	GPS L1/L2
	GLONASS L1/L2	GLONASS L1/L2
	BDS B1/B2	BDS B1/B2/B3
	GALILEO E1 QZSS L1/L2 SBAS L1	GALILEO E1/E5b
Cost (USD)	100	70
Gain(dB)	<2.5	<5.5
Phase center error(mm)	±2	±2
Polarization	Right-hand circular polarization	Right-hand circular polarization
Operating voltage(V)	3.3V-12.0V	3.0V-18.0V
Operating current	≤55mA	≤45mA
Connector type	TNC-K	TNC-SMA
Weight(g)	25	400
Antenna size(mm)	Φ27.5*59	Φ160*66.5
Operating temperature(°C)	-40 to +70	-40 to +70



รูปที่ 7 เสาอากาศรับสัญญาณ BT-147 และตำแหน่งศูนย์กลางเฟลรับสัญญาณ

ในการหาพิกัดอ้างอิงจากการทดสอบแบบจลน์บนรถยนต์ ใช้เครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดคุณภาพสูง Trimble R7 พร้อม Antenna รุ่น Zephyr2 และรถยนต์พร้อมราวเหล็กหลังคา (Trimble MX-2)



รูปที่ 8 อุปกรณ์รับสัญญาณ Trimble R7 และ Antenna Zephyr model 2



รูปที่ 9 การติดตั้งเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมบนราวเหล็กหลังคารยนต์

ในการรังวัดหาค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดทดสอบในการทดสอบรังวัดแบบสถิติ ใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้หลายระบบและรับได้หลายความถี่ (Multi Frequency) ในการรังวัดแบบสถิติความละเอียดถูกต้องทางราบอยู่ที่ 2.5 mm + 0.1 ppm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพและความถูกต้องที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณประเภทหลายความถี่ราคาประหยัดและเสาอากาศราคาประหยัดในการรังวัดแบบสถิตและการรังวัดแบบจลน์ในระยะทางไกลโดยไม่ใช้ IMU

1.4.2 สามารถนำเครื่องรับสัญญาณประเภทหลายความถี่ราคาประหยัดและเสาอากาศราคาประหยัดไปใช้ในงานสำรวจรังวัดทั้งแบบสถิตและแบบจลน์สำหรับประยุกต์ใช้กับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กได้

1.4.3 ได้ทราบข้อจำกัดในการทำงานด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและเสาอากาศราคาประหยัด

1.4.4 ทราบถึงความสามารถและข้อจำกัดของโปรแกรมประมวลผลรหัสเปิด RTKLIB ในการประมวลผลวิธีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยเทคนิคจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดพื้นฐานของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบหลายความถี่เพื่อหาความถูกต้องแม่นยำของค่าพิกัดที่ได้ ทั้งจากการรังวัดแบบสถิตและการรังวัดแบบจลน์ในการประยุกต์ใช้สำหรับจัดทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศหรือการทำงานอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบดาวเทียมนำราคาประหยัดเพื่อสนับสนุนการทำงานด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อให้ได้ค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและวิธีการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่มีความแม่นยำสูง เนื่องจากความถูกต้องของค่าพิกัดวิธีการบินจากอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กมีความสำคัญในกระบวนการคำนวณปรับแก้โครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ หากสามารถทราบค่าพิกัดที่ถูกต้องแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากเพียงพอ การผลิตแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กในจะใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินน้อยลงและไม่จำเป็นต้องใช้ MEMS IMU ซึ่งการใช้ IMU ราคาต่ำเช่น MEMS ไม่มีประโยชน์มากนักในการปรับแก้ (Sun et al., 2016) โดยในการศึกษานี้จะเปรียบเทียบค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground truth) จากเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดที่มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือสูงกว่า โดยในการทดสอบจะจำลองรูปแบบการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกันระหว่าง

อากาศยานฯประเภทหลายใบพัดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 10 เมตร/วินาทีและอากาศยานชนิดปีกตรึงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 เมตร/วินาที รวมถึงเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆที่เป็นปัจจัยในการประมวลผลเช่นการกำหนดมุมกันฟ้าที่ต่างกัน การใช้ค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง (Precise file) ที่ต่างกัน และทดสอบรับสัญญาณกลางแจ้งเพื่อวิเคราะห์ข้อจำกัดของเครื่องรับแบบประหยัดว่าสามารถให้ค่าพิกัดได้ต่อเนื่องหรือมีผลกระทบจากความร้อนสะสมในการทำงานจริงในสภาพอากาศร้อนของประเทศไทยหรือไม่

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

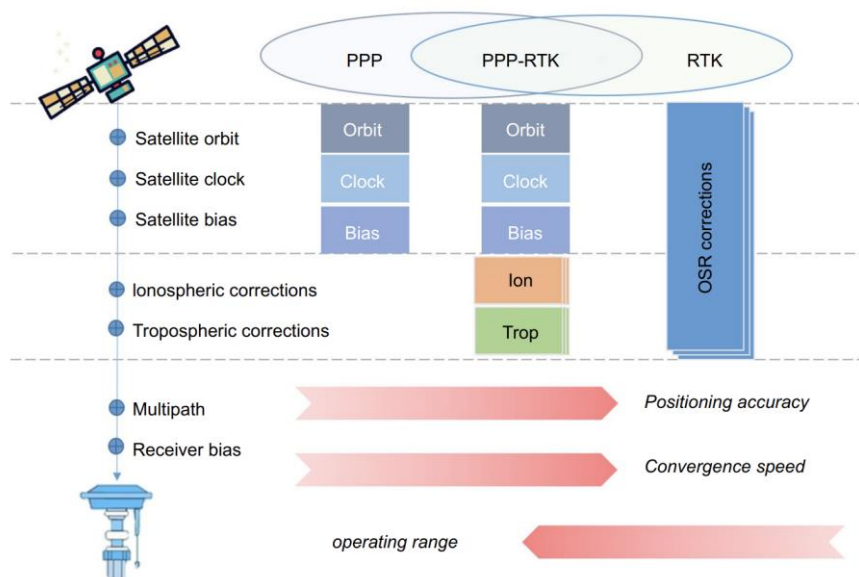
2.2.1 ระบบดาวเทียมนำหน GNSS (Global Navigation Satellite Systems)

เป็นชื่อเรียกสากลของระบบดาวเทียมสำหรับนำหนของโลก สามารถให้บริการในการนำหนระบุตำแหน่งได้ตลอด 24 ชั่วโมง ครอบคลุมทุกพื้นที่ทั่วโลก ประกอบด้วยดาวเทียมในระบบ GPS (Global Positioning System) ของสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นดาวเทียมระบบแรกที่เปิดให้บริการแรกเริ่มถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทหาร ต่อมาได้มีการนำมาใช้งานทั่วไปในเชิงพาณิชย์ ระบบดาวเทียม GLONASS ของสหพันธรัฐรัสเซีย ระบบดาวเทียม Galileo ของกลุ่มสหภาพยุโรป ระบบดาวเทียม BDS (BeiDou Navigation Satellite System) ของสาธารณรัฐประชาชนจีน เป็นต้น

2.2.2 การหาตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)

การหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูง เป็นเทคนิคการหาค่าพิกัดตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ต้องการความถูกต้องสูง จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียมด้วยเครื่องรับเพียงเครื่องเดียว โดยไม่จำเป็นต้องมีสถานีฐานหรือสถานีอ้างอิง หากต้องการความถูกต้องสูงจะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณได้ตั้งแต่ 2 ความถี่ขึ้นไป ซึ่งจะสามารถขจัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้จากสมการ Ionosphere-Free combination ในการรังวัดสัญญาณดาวเทียมเป็นการวัดทั้งข้อมูลรหัส (code) ซึ่งเป็นข้อมูลชุดโคเรนจ์ และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase) ในส่วนของการประมวลผลต้องมีการประมาณค่าคลาดเคลื่อนเพื่อขจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆออกไปโดยใช้ข้อมูลปรับแก้ต่างๆ เช่นข้อมูลค่าแกว่งโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง ค่าแกว่งนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงและอื่นๆ รูปที่ 10 ที่เผยแพร่โดยหน่วยงานต่างๆ เช่น IGS (International GNSS Service) ที่มีสถานีติดตามดาวเทียมอยู่ทั่วโลก รูปที่ 11 สามารถให้ความถูกต้องในระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตร ขึ้นกับระยะเวลารับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมและค่าแก้ที่ใช้ ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือต้องการระยะเวลารับสัญญาณที่นานเพื่อให้ค่าพิกัดลู่เข้า หากใช้เครื่องรับสัญญาณชนิดความถี่เดียวต้องใช้เวลานานกว่า 10 นาที ไปจนถึงหลักชั่วโมง (WiŚniewski et al.,

2013) และข้อจำกัดของการรับสัญญาณด้วยเครื่องรับเพียงเครื่องเดียวนั้นจะไม่สามารถหาเลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็มได้ (Integer Ambiguity) ซึ่งในปัจจุบันมี PPP-RTK ที่ใช้ค่าปรับแก้ชั้นบรรยากาศร่วมด้วย ซึ่งเป็นการประสานแนวคิดของการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงและการหาตำแหน่งแบบจลนในทันที (Real-Time Kinematic: RTK) สามารถให้ความถูกต้องทางตำแหน่งได้ในระดับเซนติเมตรโดยไม่จำกัดจำนวนผู้ใช้ (Li et al., 2022)



รูปที่ 10 การหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในปัจจุบัน (ที่มา : <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-022-00089-9>)



รูปที่ 11 ตำแหน่งสถานีรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องอ้างอิงดาวเทียมและสถานีติดตามดาวเทียมของ IGS

ตัวอย่างข้อมูลที่สามารถเข้าถึงได้เช่น ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง (Final Precise orbit) ที่มีความถูกต้องในระดับดีกว่า 2.5 เซนติเมตร และข้อมูลค่าแก้ทางดาวเทียม (Final product) ที่มีความละเอียดสูงกว่า 20 พิโควินาที ดังที่แสดงในตารางที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับชนิดรับได้หลายดาวเทียมและหลายความถี่ จะสามารถสร้างสมการค่าสังเกตของการรังวัดรหัสและเฟสของคลื่นส่ง ที่ความถี่ i โดยที่ $i = 1, 2$ (Cai et al., 2015) ดังนี้

$$P_i^j = \rho^j + c(dt - dT^j) + d_{orb}^j + d_{trop}^j + d_{ion/Li}^j + b_{Pi}^j + \varepsilon_{Pi}^j \quad (1)$$

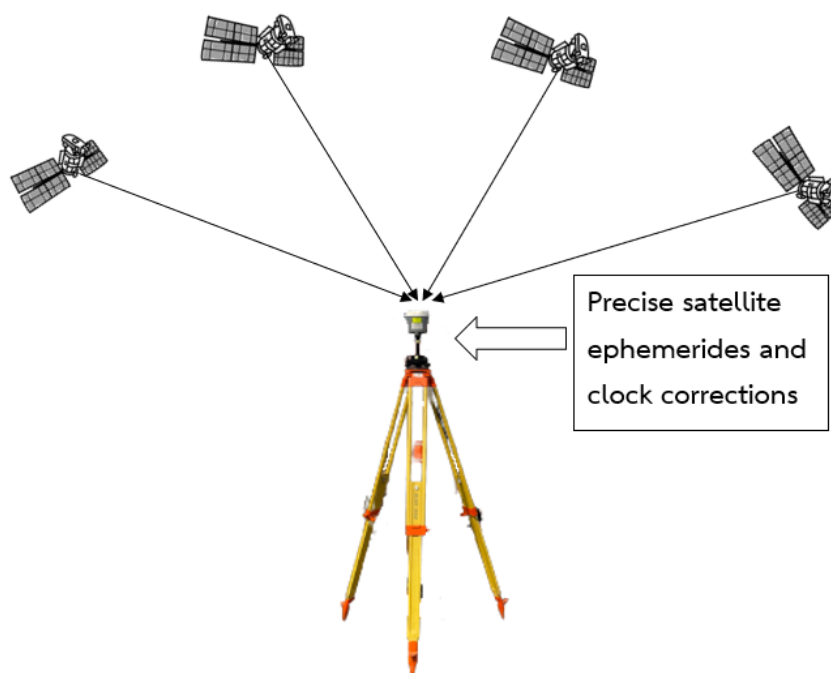
$$\phi_i^j = \rho^j + c(dt - dT^j) + d_{orb}^j + d_{trop}^j + d_{ion/Li}^j + B_i^j + \varepsilon_{\phi i}^j \quad (2)$$

โดยที่

j	คือ ดาวเทียม
P_i	คือ ระยะทางจากการวัดซูโดเรนจ์ หน่วยเมตร
ϕ_i	คือ ระยะทางจากการวัดด้วยเฟสคลื่นส่งที่ความถี่ i หน่วยเมตร
ρ	คือ ระยะทางจีโอเมตริกระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ หน่วยเมตร
c	คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ หน่วย เมตรต่อวินาที
dt	คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม หน่วยวินาที
dT	คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม หน่วยวินาที
d_{orb}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม หน่วยเมตร
d_{trop}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากความล่าช้าชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หน่วยเมตร
$d_{ion/Li}$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากความล่าช้าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ความถี่ i หน่วยเมตร
b_{Pi}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์จากข้อมูลรหัสที่ความถี่ i หน่วยเมตร
B_i	คือ เทอมของเลขปริศนาบนความถี่ i รวมถึงความล่าช้าจากอุปกรณ์
ε_{Pi} และ $\varepsilon_{\phi i}$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ เช่น คลื่นรบกวน คลื่นหลายวิถี หน่วยเมตร

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลค่าแก้ที่สามารถดาวน์โหลดได้จาก IGS

Type		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits	~100 cm	real time	—	daily
	Sat. clocks	~5 ns RMS			
		~2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~3 ns RMS			
		~1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~3 cm	3 – 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~150 ps RMS			
		~50 ps SDev			
Rapid	orbits	~2.5 cm	17 – 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS			5 min
		~25 ps SDev			
Final	orbits	~2.5 cm	12 – 18 days	every Thursday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS			Sat.: 30s
		~20 ps SDev			Stn.: 5 min



รูปที่ 12 การหาตำแหน่งด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

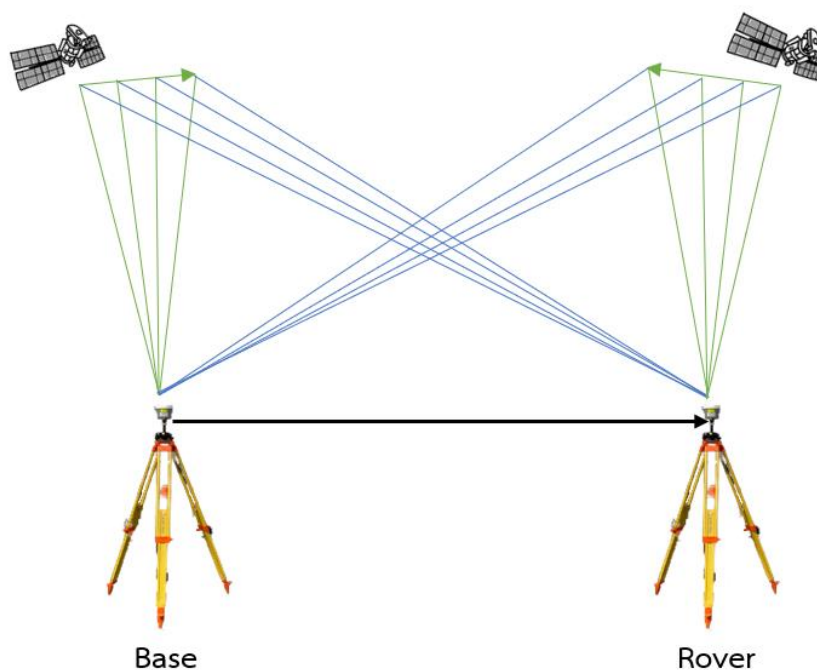
2.2.3 การหาค่าพิกัดด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning)

เป็นวิธีการหาค่าพิกัดจากข้อมูลรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพียงเครื่องเดียว โดยที่เครื่องรับมีการเคลื่อนที่ ในการประมวลผลใช้ทั้งข้อมูลชุดโคเรกชันและข้อมูลเฟสคลื่นส่ง อีกทั้งใช้ข้อมูลค่าแก้ทางพิกัดและวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงเช่นเดียวกับการรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง วิธีการนี้สามารถให้ความถูกต้องได้ในระดับเซนติเมตร (Parajuli, 2020) ข้อแตกต่างในการทำงานจากวิธีการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดแบบสถิตคือต้องมีการตั้งรับอยู่กับที่ก่อนเป็นเวลาอย่างน้อย 15-30 นาทีเพื่อให้ข้อมูลค่าพิกัดที่ได้มีการลู่เข้าก่อนจึงจะเริ่มเคลื่อนที่ (Gross et al., 2016)

2.2.4 การหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

เป็นการหาตำแหน่งสำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูง ซึ่งจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งสัมบูรณ์แล้วอย่างน้อย 1 จุด การหาค่าพิกัดในลักษณะนี้เป็นการหาตำแหน่งเปรียบเทียบจุดหนึ่งกับอีกจุดหนึ่ง บางครั้งเรียกว่าการหาตำแหน่งแบบ Differential ทำได้โดยการใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อยสองเครื่องขึ้นไป โดยใช้เครื่องรับสัญญาณเครื่องหนึ่งเป็นสถานีฐาน (Base Station) หรือสถานี

อ้างอิง (Reference Station) ตั้งรับสัญญาณดาวเทียมไว้ที่จุดซึ่งทราบค่าพิกัดแน่นอนแล้ว ส่วนเครื่องรับสัญญาณที่เหลือนำไปวางไว้ในตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัดเป็นสถานีผู้ใช้ (User Station) หรือสถานีจร (Roving Station) วิธีนี้ทั้งเครื่องรับสัญญาณที่สถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานจะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวง วิธีนี้ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่มีระบบหลายชนิดถูกหักล้างไป เช่น ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมและเครื่องรับ เป็นต้น สามารถจำแนกวิธีการหาตำแหน่งตามชนิดของข้อมูลที่รับวัดได้ 2 แบบคือการหาตำแหน่งสัมพัทธ์ด้วยข้อมูลชุดเดียวที่ให้ความถูกต้องในระดับหลายเดซิเมตรถึงหลายเมตร และการหาตำแหน่งสัมพัทธ์ด้วยข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง สามารถให้ความละเอียดถูกต้องสูงในระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตร



รูปที่ 13 การหาตำแหน่งด้วยวิธีแบบสัมพัทธ์

2.2.5 การระบุพิกัดโลกด้วยการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลภายหลัง (Post-Processing Kinematic : PPK)

เป็นการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์เป็นวิธีที่ใช้สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูง ต้องใช้เครื่องรับอย่างน้อย 2 เครื่องในการทำงาน โดยเครื่องที่หนึ่งไปวางไว้ที่จุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว เรียกว่า สถานีฐาน หรือสถานีอ้างอิง ส่วนเครื่องที่เคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ไปยังจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดหรือติดตั้งบนอากาศยาน เรียกว่าสถานีจร วิธีนี้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานี

จรรยาต้องรับสัญญาณดาวเทียมดวงเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง การทำงานในลักษณะดังกล่าวจะหักล้างความคลาดเคลื่อนที่มีระบบได้หลายชนิด วิธีการนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่ง 1-3 เซนติเมตร สำหรับเส้นทางที่ยาวไม่เกิน 20 กิโลเมตร

2.2.6 ค่าคลาดเคลื่อนในการรับวัดดาวเทียม

ค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการรับสัญญาณ จะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของตำแหน่ง จึงต้องมีการลดหรือขจัดค่าคลาดเคลื่อนเหล่านี้ออกไป ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้รับวัดหรือเป็นผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมในการรับสัญญาณ เช่น

2.2.4.1 ค่าคลาดเคลื่อนจากดาวเทียม ประกอบไปด้วยค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbit Bias) ถูกคำนวณโดยสถานีติดตามดาวเทียมภาคพื้นดินทำการคำนวณวงโคจรของดาวเทียมไว้ล่วงหน้าและส่งข้อมูลไปยังดาวเทียมเพื่อส่งข้อมูลให้กับผู้ใช้ในรูปแบบข้อมูลนำหนและค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้โดยการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงร่วมด้วยในการประมวลผล

2.2.4.2 ค่าคลาดเคลื่อนจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ประกอบไปด้วยค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาของเครื่องรับ ซึ่งเกิดจากคุณภาพของนาฬิกาเครื่องรับ สามารถขจัดได้โดยกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าในการประมวลผลโดยใช้เทคนิคการหาค่าต่าง ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดสถานีฐาน การเกิดการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศสามารถลดได้โดยการใช้เสาอากาศที่มีคุณภาพสูง และใช้แบบจำลองปรับแก้การเกิดการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศและการเกิดสัญญาณรบกวน เป็นค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ไม่สามารถขจัดออกไปได้แต่ วิธีการลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้คือการใช้เครื่องรับสัญญาณที่มีคุณภาพสูง

2.2.4.3 ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศ ประกอบไปด้วย การล่าช้าของคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) เนื่องจากชั้นบรรยากาศนี้มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มาก ทำให้คลื่นสัญญาณดาวเทียมเดินทางด้วยความเร็วต่างจากความเร็วแสง และการล่าช้าของคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) ซึ่งประกอบไปด้วยไอน้ำ วิธีลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้คือการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ Ionosphere-Free Combination สำหรับเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่ขึ้นไป

2.2.4.4 ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี เกิดจากการสะท้อนของคลื่นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากดาวเทียมแล้วสะท้อนกับพื้นผิวต่าง ๆ เช่น ผนังอาคาร พื้น น้ำ เป็นต้น ก่อนที่สัญญาณจะเข้าเครื่องรับ เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่สามารถขจัดออกไปได้ แต่สามารถลดได้โดยการเลือกพื้นที่ที่

เปิดโล่ง หลีกเลี่ยงการรับสัญญาณในพื้นที่ใกล้อาคารและพื้นผิวสะท้อน และเลือกเสาอากาศเครื่องรับที่สามารถรองรับคลื่นหลายวิถีได้

2.2.4.5 ค่าคลาดเคลื่อนคลื่นหลุด (Cycle slip) เกิดจากมีสิ่งกีดขวางการรับสัญญาณทำให้สัญญาณมีการขาดช่วงหรือเกิดคลื่นรบกวนที่มีขนาดใหญ่ หากเกิดคลื่นหลุดจะทำให้ค่าเลขปริศนาเปลี่ยนไป ซึ่งในการประมวลผลค่าเลขปริศนาต้องเป็นจำนวนเต็มและคงที่ สามารถใช้เทคนิคการหาค่าต่างและกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในระหว่างการประมวลผลโดยกำหนดให้เป็นเลขจำนวนเต็ม

2.2.7 เรขาคณิตดาวเทียม (Satellite Geometry)

การกระจายตัวของดาวเทียมส่งผลต่อความแม่นยำทางตำแหน่งที่ได้ โดยการเรียงตัวของดาวเทียมขณะที่รับสัญญาณอยู่นั้น สามารถระบุได้ด้วยค่าความไม่แน่นอนด้านตำแหน่ง หรือ DOP (Dilution Of Precision) ค่าในอุดมคติเท่ากับ 1 หมายความว่าดาวเทียมกระจายตัวที่ดี ค่า DOP ยิ่งน้อยยิ่งดี หากมีค่ามากกว่า 20 คือไม่น่าเชื่อถือ องค์ประกอบของเรขาคณิตดาวเทียม ประกอบด้วย HDOP (Horizontal Dilution of Precision) บ่งชี้ความแม่นยำทางราบ, VDOP (Vertical Dilution of Precision) บ่งชี้ความแม่นยำทางตั้ง, PDOP (Position Dilution of Precision) บ่งชี้ความถูกต้องแม่นยำตำแหน่งในสามมิติ, TDOP (Time Dilution of Precision) บ่งชี้ความแม่นยำของเวลาที่ได้จากการรับสัญญาณดาวเทียม, GDOP (Geometric Dilution of Precision) บ่งชี้ความแม่นยำทางตำแหน่งโดยรวม ความสัมพันธ์ของค่า DOP คือ

$$(PDOP)^2 = (HDOP)^2 + (VDOP)^2$$

$$(GDOP)^2 = (PDOP)^2 + (TDOP)^2$$

2.2.8 สถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Stations : CORS)

เป็นสถานีรับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมดาวเทียมคุณภาพสูงชนิดหลายความถี่และใช้เสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมคุณภาพสูงที่สามารถลดและป้องกันคลื่นหลายวิถีได้ สามารถรับสัญญาณและประมวลผลดาวเทียมได้ทุกระบบ ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มั่นคงถาวร ไม่มีสิ่งบดบังสัญญาณ สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้รอบทิศทางตลอด 24 ชั่วโมง และส่งข้อมูลสัญญาณดาวเทียมไปเก็บและประมวลผลยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางตลอดเวลา

2.2.9 กรอบอ้างอิงสากล (International Terrestrial Reference Frame : ITRF)

กรอบอ้างอิงสากล International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

ใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงต้องใช้ค่าพิกัดหรือระบบอ้างอิงที่ขึ้นกับเวลาด้วย เพราะเปลือกโลกมีการเคลื่อนตัวอยู่ตลอดเวลา ค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงในกรอบอ้างอิงนี้มีความถูกต้องสูงมากในระดับมิลลิเมตร มีหน่วยงาน International Earth Rotation Service (IERS) ดูแลและติดตามกรอบอ้างอิง ITRF รวมถึงดูแลระบบอ้างอิงพิกัดฟ้านานาชาติ International Celestial Reference Service (ICRS) และหาความสัมพันธ์ระหว่าง ITRF และ ICRS

2.2.10 การผลิตแผนที่ทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับมีหลายประเภทสามารถแบ่งตามลักษณะเช่น อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (Fixed wing) อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุน (Multirotor) และอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงขึ้นลงแนวตั้ง (Vertical takeoff and landing : VTOL) ซึ่งแต่ละประเภทต่างมีข้อจำกัดและข้อดีต่างกันที่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานทั้งความเร็ว ระยะเวลา รัศมีทำการ และความสามารถในการบรรทุกน้ำหนัก สำหรับการผลิตแผนที่ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างเช่นการวางแผนการบิน การสร้างจุดควบคุมภาพถ่ายที่ต้องเด่นชัดบนภาพสามารถใช้โยยียึดภาพถ่ายได้ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ และการประมวลผลภาพถ่ายที่ต้องปรับแก้ข้อมูลค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกและจับคู่ภาพสร้างจุดโยยียึดเป็นต้น ในส่วนการวางแผนการบินต้องกำหนดขนาดของ GSD (Ground sampling distance) จากนั้นกำหนดความสูงบิน วางแผนเส้นทาง ความเร็วบินและความถี่การบินที่ถ่ายภาพ เพื่อให้ได้ส่วนซ้อนและส่วนเกยตามที่ต้องการ กำหนดความละเอียดถูกต้องที่ต้องการตามความสามารถของอุปกรณ์ โดยที่ความสูงบินสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H = \frac{GSD \times f \times IW}{SW \times 100}$$

โดยที่

H คือความสูงการบิน (เมตร)

GSD คือ ระยะบนพื้นต่อพิกเซล (เซนติเมตร/พิกเซล)

SW คือ ระยะด้านกว้างของเซนเซอร์ (Sensor width) (มิลลิเมตร)

f คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ (มิลลิเมตร)

IW คือ จำนวนพิกเซลด้านกว้าง (พิกเซล)

2.2.11 รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error :

RMSE)

เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งเชิงพื้นที่ของการรังวัดเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงที่มีความถูกต้องสูงกว่าซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงที่ประมวลหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ สามารถเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบ (3) ทางตั้ง (4) และในสามมิติ (5) ในการทดสอบรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์หาค่า RMSE ทางราบและทางตั้ง ได้จากสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ จากนั้นใช้ค่า RMSE มาคำนวณค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน NSSDA เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์เชิงตำแหน่ง

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((N_{i(ref)} - N_{i(obs)})^2 + (E_{i(ref)} - E_{i(obs)})^2 \right)} \quad (3)$$

$$RMSE_u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((H_{i(ref)} - H_{i(obs)})^2)} \quad (4)$$

$$RMSE_{3D} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta N_i^2 + \Delta E_i^2 + \Delta H_i^2)} \quad (5)$$

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(1.9565 - \sqrt{\Delta N_i^2 + \Delta E_i^2} \right)^2 \right)} \quad (6)$$

$$RMSE_u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((H_{i(ref)} - (H_{i(obs)} + H_{correction}))^2)} \quad (7)$$

โดยที่

$RMSE_r$ คือ ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตำแหน่งทางราบ หน่วยเมตร

$RMSE_u$ คือ ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตำแหน่งทางตั้ง หน่วยเมตร

$RMSE_{3D}$ คือ ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตำแหน่งในสามมิติ หน่วยเมตร

N_{ref} คือ ค่าพิกัดอ้างอิงในแนวทิศเหนือ-ใต้ หน่วยเมตร

N_{obs} คือ ค่าพิกัดของการรังวัดในแนวทิศเหนือ-ใต้ หน่วยเมตร

E_{ref} คือ ค่าพิกัดอ้างอิงในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก หน่วยเมตร

E_{obs} คือ ค่าพิกัดของการรังวัดในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก หน่วยเมตร

H_{ref} คือ ความสูงอ้างอิง หน่วยเมตร

H_{obs} คือ ความสูงจากการรังวัด หน่วยเมตร

- $H_{correcton}$ คือ ค่า offset ความสูงระหว่างศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณของเสาอากาศแบบรังวัด Zephyr 2 กับเสาอากาศรับสัญญาณ BT-147 และ HX-CH6601A เท่ากับ 0.0995 และ 0.0532 ตามลำดับ หน่วยเมตร
- ΔN คือ ผลต่างระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงกับค่าพิกัดรังวัดในแนวทิศเหนือ-ใต้ หน่วยเมตร
- ΔE คือ ผลต่างระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงกับค่าพิกัดรังวัดในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก หน่วยเมตร
- i คือ ข้อมูลแต่ละ epoch ตั้งแต่ epoch ที่ 1 ถึง n
- n คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Farah, 2017) ได้ทำการประเมินความถูกต้องที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ราคาต่ำประเภทความถี่เดียวรุ่น ProMark3 โดยทดสอบรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิตเป็นเวลา 65 นาทีในสภาพแวดล้อมเปิดโล่งแล้วประมวลผลโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง ทำการประมวลผลแบบออนไลน์ด้วย CSRS-PPP โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่เริ่มต้นถึง 5,10,15 นาทีไปจนถึง 65 นาที ได้ข้อมูลทั้งหมด 13 ช่วง พบว่าความถูกต้องที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการรับสัญญาณ โดยเมื่อรับสัญญาณเฉพาะดาวเทียม GPS ในสภาพแวดล้อมที่เปิดโล่งปกติ ต้องการระยะเวลาขั้นต่ำสำหรับการเข้าสู่ของค่าพิกัดอย่างน้อย 30 นาที อีกทั้งความถูกต้องที่ได้ยังขึ้นกับวิธีการรังวัด ระยะเวลารังวัด คุณภาพของเครื่องรับสัญญาณรวมถึงเสาอากาศที่ใช้และความถูกต้องของตำแหน่งวงโคจรดาวเทียมและข้อมูลค่าแก้ค่าเป็นสำคัญ โดยการรับสัญญาณแบบสถิตโดยใช้เฉพาะข้อมูล L1 เป็นเวลา 20 นาที สามารถทำให้ความถูกต้องดีขึ้นเฉลี่ยถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับการรับสัญญาณ 5 นาทีที่ความถูกต้องอยู่ที่ประมาณ 1.65 เมตรในทางราบและ 4 เมตรในทางตั้ง เมื่อใช้ระยะเวลาการรับสัญญาณ 1 ชั่วโมง ความถูกต้องทางราบอยู่ที่ 50 เซนติเมตร และทางตั้ง 1.2 เมตร

(Hamza et al., 2020) ทดสอบเครื่องรับสัญญาณราคาต่ำ u-blox F9P ใช้ร่วมกับเสาอากาศ ANN-MB-00 เพื่อหาระยะเวลาการจัดที่อุปกรณ์ราคาประหยัดสามารถตรวจจับได้ เพื่อใช้ในการเฝ้าติดตามการเคลื่อนตัวของพื้นที่หรือสิ่งก่อสร้างเช่น สะพาน เขื่อน เนื่องจากการใช้เครื่องรับที่มีราคาสูงนั้นเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายหากพื้นดินมีการเคลื่อนตัวในการใช้เฝ้าระวังเตือนภัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ทดสอบหาความแม่นยำทางตำแหน่ง (Precision) จากการรังวัดแบบสถิตและระยะการจัดที่สามารถตรวจจับได้ โดยทั้ง 2 กรณีศึกษาใช้วิธีเส้นฐานสั้นและประมวลผลภายหลังแบบสัมพัทธ์ ผลการทดสอบรังวัดแบบสถิตเส้นฐานสั้นพบว่าความแม่นยำค่าพิกัดทางราบของเครื่องมือราคาประหยัด

นั้นอยู่ในระดับดีกว่า 2 มิลลิเมตร และผลการทดสอบแบบจลน์ 30 นาที พบว่าเครื่องรับราคาประหยัดจะสามารถตรวจจับความเคลื่อนไหวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตรขึ้นไปได้อย่างดี

(Hamza et al., 2021) ต้องการเปรียบเทียบคุณภาพของเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด โดยทดสอบหาขนาดของคลื่นรบกวนจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด ZED F9P เมื่อใช้ร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดที่ต่างกัน 2 แบบคือ รุ่น Survey ยี่ห้อ ArduSimple ราคาประมาณ 90 EUR และ Tallysman TW3882 ราคาประมาณ 290 EUR จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าพิกัดกับเครื่องรับแบบรังวัดคุณภาพสูง ผลลัพธ์จากการทดสอบ zero baseline ประมวลผลภายหลังแบบสัมพัทธ์หลังจากตัด outlier พบว่าเครื่องรับ F9P มีขนาดคลื่นรบกวนต่ำในระดับต่ำกว่ามิลลิเมตร

(Xue et al., 2021) งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพและระดับสัญญาณรบกวนจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาต่ำเปรียบเทียบกับเครื่องรับแบบยี่ห้อเกรดราคาสูง ในสถานการณ์และตัวแปรที่ต่างกันเช่น วิธีการรังวัด คุณภาพเสาอากาศ กลุ่มดาวเทียม โดยทดสอบแบบ zero baseline และ short baseline และยังทดสอบวิธีการใหม่กับเครื่องรับแบบสองความถี่ราคาต่ำโดยตั้งรับสัญญาณใกล้กันประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ เช่นคลื่นหลายวิถี ค่าคลาดเคลื่อนดาวเทียม และลดขนาดของสัญญาณรบกวน

(Wielgocka et al., 2021) ทดสอบประสิทธิภาพการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด u-blox ZED-F9P ต่อกับเสาอากาศราคาประหยัด u-blox ANN-MB-00-00 ในการรังวัดหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์และสัมบูรณ์พบว่าสัญญาณดาวเทียมที่รับได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดมีความแรงของสัญญาณได้น้อยกว่าเครื่องรับแบบรังวัดถึง 7 dB Hz โดยเฉพาะในกรณีที่รับสัญญาณดาวเทียมในมุมต่ำ ในการทำงานแบบสถิติเครื่องรับสัญญาณราคาประหยัดมีอัตราการหาเลขปริศนาได้ถึง 80% โดยความถูกต้องทางราบจากการรับสัญญาณ 1 ชั่วโมงอยู่ในระดับเซนติเมตร และความถูกต้องใกล้เคียงกับการใช้เทคนิคจุดเดียวความละเอียดสูงที่ทำการรับสัญญาณอย่างน้อย 2.5 ชั่วโมง ในการรังวัดด้วยวิธี RTK และ NRTK ได้ความถูกต้องทางราบดีกว่า 5 เซนติเมตร และทางดิ่งดีกว่า 10 เซนติเมตร ถ้าหากใช้เครื่องรับสัญญาณราคาประหยัดเป็นสถานีฐานด้วยจะทำให้ความถูกต้องทางราบจะแยกลงถึง 2 เท่า

(Grayson et al., 2018) ใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูงด้วยข้อมูลดาวเทียม GPS ด้วยเครื่องรับ Septentrio AsteRx-m2 ปัจจุบันราคาประมาณ 380 USD และใช้เสาอากาศ maxtena m1227hct-a2-sma ปัจจุบันราคาประมาณ 200 USD บนอากาศยานไร้คนขับ

ประเภทปิกตรึงโดยค่าพิกัดที่ได้ใช้สำหรับการประมาณตำแหน่งจุดถ่ายภาพซึ่งนำไปใช้หาตำแหน่งของภาพถ่ายในการประมวลผลปรับแก้ Bundle Block Adjustment ในการทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ พบว่าความถูกต้องทางตำแหน่งของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศในทางราบอยู่ในระดับเซนติเมตรและทางดิ่งอยู่ในระดับเดซิเมตรจากการบินถ่ายภาพ 25-30 นาที โดยยังต้องการจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) ความถูกต้องสูงร่วมด้วยในการประมวลผล เพื่อทำการหาค่าการวางตัวของภาพในการคำนวณถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ซึ่งการทำ GCP ต้องใช้เวลาและเสียค่าใช้จ่าย รวมถึงมีข้อจำกัดในบางสภาพภูมิประเทศอีกด้วย การใช้ GPS PPP ช่วยลดการใช้งานสถานีอ้างอิงภาคพื้นดินและ GCP ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากในการทำงานได้มาก ในกรณีที่ไม่มี GCP ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของ UAV point cloud คือความถูกต้องทางตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพ หากสามารถให้ความถูกต้องระดับเซนติเมตรก็จะส่งผลให้ความถูกต้องของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศมีความถูกต้องในระดับเซนติเมตรด้วย การใช้ข้อมูล GPS ความถี่เดียวสามารถให้ความถูกต้องในระดับ 5-10 เมตร หากต้องการ 0.5-1 เมตร จะต้องใช้ GPS 2 ความถี่ ปัญหาหลักของวิธีการประมวลผลแบบจุดเดียวคือการหาเลขปริศนา (integer ambiguity resolution) ไม่สามารถทำได้ด้วยการใช้เครื่องรับเพียงเครื่องเดียวโดยไม่มีข้อมูลจากสถานีอ้างอิง ทำให้ผลลัพธ์จะออกมาเป็น float ambiguity ดังนั้นในงานแผนที่ภาพถ่ายมาตราส่วนใหญ่จึงยังต้องอาศัยจุด GCP ร่วมด้วย งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเก็บข้อมูลพื้นที่เล็กขนาดประมาณ 250เมตร x 600เมตร บินที่ความสูง 120 เมตร หาความถูกต้องทางตำแหน่งของ GPS PPP kinematic บน UAV จากวิธีการเคลื่อนที่อ้างอิงโดยประมวลผลแบบ GPS PPK กับสถานีฐานอ้างอิงในพื้นที่ ด้วยโปรแกรม PANDA ใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดทำการคำนวณวนรอบซ้ำ จนไม่เหลือ outlier และความถูกต้องของตำแหน่งที่ได้มีความถูกต้องเหมือนกับที่ได้จากตำแหน่งของวิธีการเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้สามารถถ่วงน้ำหนักเท่ากันในการปรับแก้ bundle block ในส่วนของการประมวลผลการใช้มุมกันฟ้าต่ำ (5องศา) ได้ผลดีกว่าการใช้มุมกันฟ้าสูง (15องศา) วิจัยนี้เป็นการใช้ direct georeferencing ไม่มี GCP ได้ความถูกต้องแม่นยำทางราบระดับเซนติเมตรเทียบเท่ากับการใช้ GPS PPK แต่ทางดิ่งยังต่างจาก PPK ประมาณ 10 เซนติเมตร ซึ่งคาดว่าเกิดจาก antenna phase center variation และความล่าช้าที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

(Sun et al., 2016) งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ดาวเทียม GNSS หลายระบบ (GPS BDS และ GLONASS) แทนการใช้เฉพาะดาวเทียม GPS อย่างเดียว ใช้เครื่องรับสัญญาณ AGS200 บนอากาศยานปิกตรึง (ปัจจุบันราคาประมาณ 3,624 USD) น้ำหนัก 380 กรัม ทดสอบหาค่าพิกัดของจุดเปิด

ถ่ายภาพบนอากาศยานประมวลผลแบบสัมพัทธ์ภายหลัง เพื่อหาค่าการวางตัวภายนอกในการทำซ้ำสามเหลี่ยมทางอากาศ ในพื้นที่ 20 ตารางกิโลเมตร ซึ่งการใช้ดาวเทียมหลายระบบทำให้การกระจายตัวทางเรขาคณิตของดาวเทียมดีขึ้นมาก ความถูกต้องและความเสถียรก็ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ดาวเทียม GPS เพียงกลุ่มเดียว จากการผลการทดลองพบว่าอัตราการหาเลขจำนวนเต็มปริศนาทำได้ดีขึ้นกว่า 37.7% เมื่อเทียบกับการใช้เพียงดาวเทียม GPS เมื่อมีจำนวนดาวเทียมน้อยและอยู่ในมุมต่ำในการประมวลผลใช้ซ้ำสามเหลี่ยมทางอากาศและจุดควบคุมภาคพื้นดิน 10 จุดร่วมกัน สามารถได้ความถูกต้องทางราบและทางตั้ง ± 18 และ ± 23 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งเทียบได้กับการปรับแก้ bundle block แบบเดิมที่ต้องใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินหนาแน่นกว่ามาก ซึ่งความถูกต้องที่ได้สามารถนำไปใช้กับงานแผนที่ภูมิประเทศ 1:500 ได้ (มาตรฐานของประเทศจีน CH/Z3003-2010) โดยใช้ GCP น้อยกว่าเดิมถึง 84%

(El-Mowafy, 2011) งานวิจัยนี้ได้อภิปรายฟังก์ชันและแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยทดสอบด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กแบบปีกตรึง โดยเปรียบเทียบค่าพิกัดของเส้นทางการบินจากการประมวลผลด้วยชุดข้อมูลเดียวกัน วิธีแรกใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง วิธีที่สองหาค่าพิกัดโดยเทคนิคการหาค่าต่างโดยมีสถานีอ้างอิงภาคพื้นดินที่อยู่กลางพื้นที่ในการบินทดสอบ ความแม่นยำของวิธีประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงสรุปอยู่ในรูปแบบของค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ได้ความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบอยู่ในระดับเซนติเมตรถึงเดซิเมตร และความถูกต้องในทางตั้งมีค่าประมาณ 2 เท่าของทางราบ

(Gurturk & Soycan, 2022) ทำการทดสอบประมวลผลข้อมูล GNSS ที่ได้จากการบินสำรวจทางอากาศ 2 เที่ยวบิน โดยประมวลผลด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP-AR) และวิธีประมวลผลภายหลัง (PPK) ด้วยโปรแกรมต่างๆ ได้แก่ RTKLIB, gLAB, CSRS-PPP, และ GRAFNAV เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกันระหว่างวิธี PPP-AR และ PPK พบว่า ความต่างค่าพิกัดในสามมิติ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 6 เซนติเมตร

(Liu et al., 2021) ในงานวิจัยนี้เสนอวิธีการอ้างอิงค่าพิกัดจุดถ่ายภาพโดยตรง (Direct georeferencing) จากเครื่องรับสัญญาณ GPS ประมวลผลด้วยวิธีแบบสัมพัทธ์ ได้ความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับ 0.1-0.2 เมตร ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศซึ่งทดสอบประมวลผลภาพถ่ายด้วยโปรแกรมที่ต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของจุดตรวจสอบจาก

โปรแกรม Photoscan สามารถให้ความถูกต้องเฉลี่ยดีที่สุดถึง 0.11 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.02 เมตร

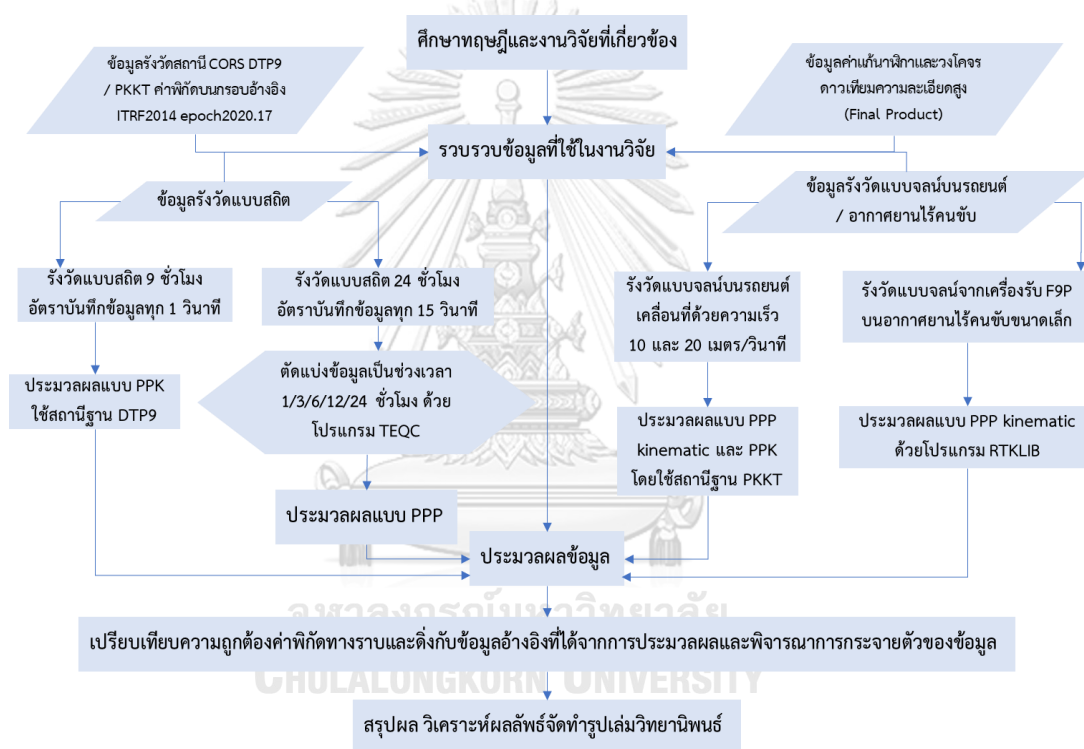
(Benassi et al., 2017) งานวิจัยนี้ทดสอบการใช้ GNSS ความถี่คู่สำหรับช่วยจัดวางองค์ประกอบจุดเปิดถ่ายภาพในการผลิตภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับโดยไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน ในการทดสอบใช้อากาศยานไร้คนขับรุ่น senseFly eBee กำหนดความสูงบินที่ 80 เมตรหาตำแหน่งด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ทันที (RTK) เมื่อตรวจสอบความถูกต้องกับจุดตรวจสอบภาคพื้นดินพบว่าสามารถให้ความถูกต้องทางราบในระดับ 2-3 เซนติเมตรและความถูกต้องทางตั้ง 2-10 เซนติเมตร เมื่อใช้ GCP อย่างน้อย 1 จุด พบว่าความถูกต้องทางราบอยู่ในระดับเดียวกับการทำงานแบบดั้งเดิม แต่ความถูกต้องทางตั้งแยกว่าเล็กน้อย

(Gross et al., 2016) วิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ที่ติดตั้งอยู่ในอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กประมวลผลด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ ที่มีข้อมูลการบิน 5 นาที ด้วยวิธีต่างๆเช่นการถ่วงน้ำหนักข้อมูลที่ต่างกัน และใช้สองโปรแกรมในการประมวลผลคือ RTKLIB และ GIPSY แล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการประมวลผลแบบสัมพัทธ์ซึ่งในงานวิจัยนี้ให้เป็นค่าอ้างอิง พบว่าความถูกต้องที่ได้อยู่ในระดับเดซิเมตรถึงเมตร

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวข้องกับการดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล ทั้งในส่วนของการรังวัดทั้งแบบสถิติและแบบจลน์ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด รวมถึงข้อมูลที่มีผู้ให้บริการจัดเก็บและรวบรวมไว้แล้ว เช่นข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมตลอด 24 ชั่วโมงของสถานีฐานรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร (CORS) และข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียม รวมถึงการประมวลผลข้อมูลรังวัดดาวเทียมด้วยโปรแกรมต่างๆ



รูปที่ 14 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย

3.1 การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ข้อมูลสถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร

ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS จากสถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวรของกรมโยธาธิการและผังเมือง สถานี DPT9 วันที่ 21 และ 26-29 มกราคม 2564 บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที เพื่อใช้เป็นสถานีฐานในการประมวลผลเส้นฐานแบบสถิติสำหรับให้ค่าพิทักอ้างอิง (Ground Truth) สำหรับหาค่าตรวจสอบ 3 ชุด ได้แก่ชุด SV1, SV2 และ SV3 ในการทดสอบรังวัดแบบสถิติ

ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS จากสถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวรของกรมที่ดิน สถานี PKKT วันที่ 18 มกราคม 2564 บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที เพื่อใช้เป็นสถานีฐานในการประมวลผลข้อมูลรังวัดแบบจลน์ในภายหลัง (Post Processed Kinematic: PPK) เป็นค่าพิกัดวิถีการเคลื่อนที่อ้างอิง (Reference trajectory) สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงที่ติดตั้งบนรถยนต์สำหรับการทดสอบรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์บนทางด่วนเพื่อจำลองสภาพการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

ค่าพิกัดของสถานี DTP9 และ PKKT ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจากข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง 7 วัน ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GIPSY ค่าพิกัดอยู่บนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF 2014 epoch 2020.17 ค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงถาวรแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร DTP9 และ PKKT

สถานี	ค่าพิกัดทางตะวันออก (ม.)	ค่าพิกัดทางเหนือ (ม.)	ความสูงเหนือทรวงรี (ม.)
DTP9	670087.789	1521382.867	38.019
PKKT	666394.581	1538584.310	13.402

3.1.2 ข้อมูลการรังวัดแบบสถิต

วันที่ 21 มกราคม 2564 ทำการรังวัดแบบสถิต เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ที่หอดูดาวบริเวณหาดฟ้าอากาศราศีวิธานนิต (ตึกภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ) จำนวน 3 หอดูดาว ได้แก่ หอดูดาว SV1, SV2 และ SV3 ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูง รุ่น CHC i80 จำนวน 3 เครื่อง รูปที่ 15 จากนั้นประมวลผลแบบเส้นฐานโดยใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร DTP9 ที่มีระยะเส้นฐาน 5 กิโลเมตร เป็นสถานีฐานในการประมวลผล เพื่อหาค่าพิกัดอ้างอิงของจุดตรวจสอบ (Ground Truth)



รูปที่ 15 การรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิตเพื่อหาค่าพิกัดหมุดอ้างอิงด้วย CHC i80 บริเวณ
ดาดฟ้าอาคารศาลิธานนิเทศ (ตึกวิศวกรรมสำรวจ) วันที่ 21 มกราคม 2564

วันที่ 26-29 มกราคม 2564 รังวัดแบบสถิตที่หมุด SV1, SV2 และ SV3 รูปที่ 16 อุปกรณ์ที่ใช้ในการรังวัดเพื่อทดสอบ แสดงในตารางที่ 4 ทำการบันทึกข้อมูล 2 ชุด ข้อมูลชุดที่หนึ่ง บันทึกข้อมูลทุก 15 วินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับจากเครื่องรับราคาประหยัด U-blox ZED-F9P ที่ใช้ร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัด 2 รุ่น ได้แก่ BT-147 และ HX-CH6601A เปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณแบบยี่ห้อเดดิกคุณภาพสูง Trimble R7 ที่ใช้ร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณรุ่น Zephyr 2 ที่จะใช้เป็นเครื่องรับสัญญาณอ้างอิงในการทดสอบรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์ และข้อมูลชุดที่ 2 บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที เป็นเวลา 9 ชั่วโมง สำหรับการประมวลผลภายหลังแบบจลน์ เพื่อใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลค่าพิกัด (variation) และประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดด้านความต่อเนื่องของข้อมูลที่บันทึกได้ ในสภาพการทำงานจริงในประเทศไทยที่มักจะมีความร้อนสะสมจากสภาพอากาศและจากการทำงานของอุปกรณ์ โดยในการรับสัญญาณเลือกรับเฉพาะดาวเทียม GPS และ GLONASS



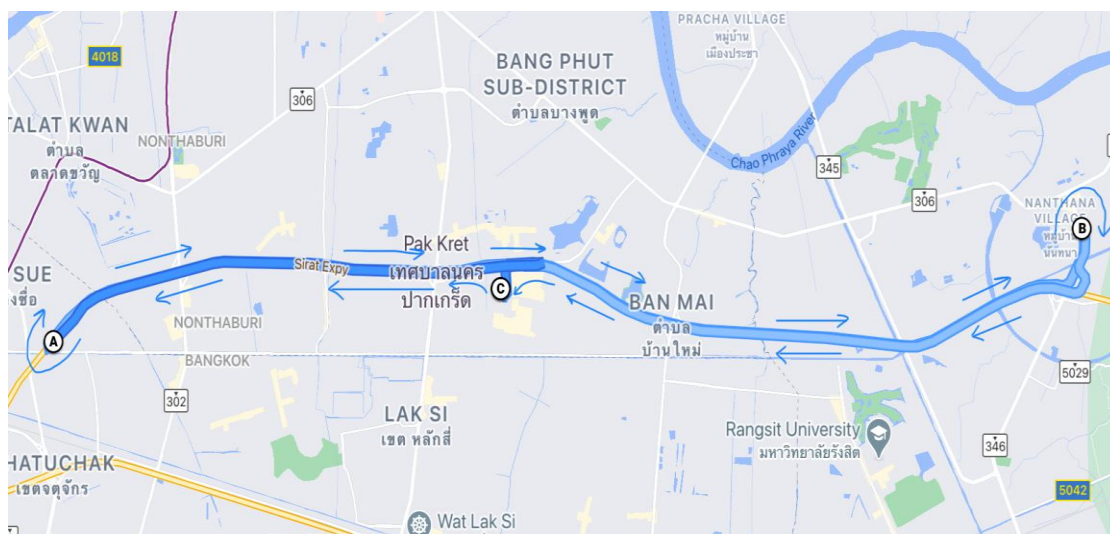
รูปที่ 16 การรับสัญญาณดาวเทียมแบบสถิตทั้งหมด SV1 SV2 SV3 ตามลำดับจากซ้ายไปขวา วันที่ 26-29 มกราคม 2564

ตารางที่ 4 อุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต

หมู่ตรางวัด	เครื่องรับสัญญาณ	เสาอากาศรับสัญญาณ
SV1	U-blox ZED F9P	BT-147
SV2	U-blox ZED F9P	HX-CH6601A
SV3	Trimble R7	Trimble Zephyr 2

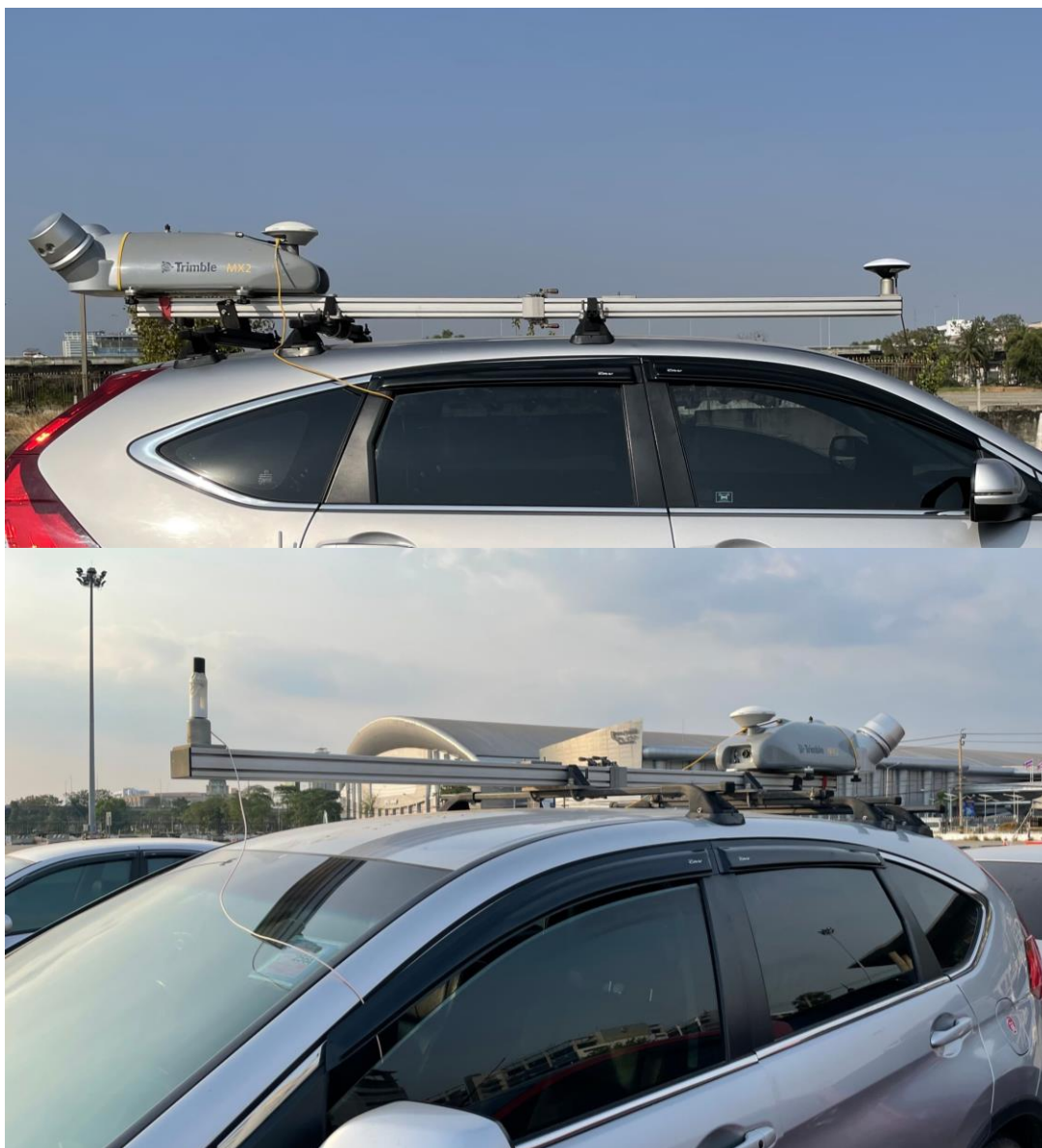
3.1.3 ข้อมูลการรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์

การทดสอบแบบจลน์ทำการเก็บข้อมูลบนดาวน์เพื่อจำลองสภาพการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ ใช้เส้นทางพิเศษอุดรรัถยา ด้านประชาชื่น ถึงด้านบางพูน รูปที่ 17 แสดงเส้นทางการรับสัญญาณ โดยที่ จุด A B และ C คือด้านประชาชื่น ด้านบางพูน ลานจอดรถเมืองทองธานี ตามลำดับ



รูปที่ 17 เส้นทางารับสัญญาณทางพิเศษอุดรรัถยา

ทำการติดตั้งเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมที่คานเหล็กบนหลังคารถยนต์ (Trimble MX-2) ในการทดสอบเริ่มจากการจ่อรับสัญญาณแบบสถิตเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพราะการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคจุดเดียวความละเอียดสูงต้องการเวลาในการลู่เข้าของข้อมูลตำแหน่ง จากนั้นจึงเริ่มเคลื่อนที่เพื่อรับสัญญาณต่อ ตั้งค่าอัตราการบันทึกข้อมูลที่ 0.2 วินาที (5Hz) มุมกันฟ้า 5 องศา ทำการรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GPS GLONASS และ Galileo โดยทดสอบเก็บข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมที่ระดับความเร็วประมาณ 10 เมตร/วินาที หรือ 36 กิโลเมตร/ชั่วโมง และที่ความเร็วประมาณ 20 เมตร/วินาที หรือ 72 กิโลเมตร/ชั่วโมง เพื่อจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ในการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กประเภทหลายใบพัด (multi rotor) และประเภทปีกตรึง (Fixed wing) ตามลำดับ บริเวณด้านหน้าของคานเหล็กบนหลังคารถยนต์ใช้เครื่องรับสัญญาณ U-blox ZED-F9P คู่กับเสาอากาศรับสัญญาณ BT-147 และ HX-CH6601A ส่วนด้านหลังของราวเหล็กบนหลังคารถยนต์ใช้เครื่องรับคุณภาพสูงแบบรังวัด Trimble R7 ใช้คู่กับเสาอากาศรับสัญญาณ Trimble Zephyr 2 ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การติดตั้งอุปกรณ์บนราวหลังการยนต์เพื่อทำการรังวัดแบบจลน์

เริ่มขับออกจากลานจอดรถเมืองทองธานี (จุด C) ไปถึงด่านประชาชื่น (จุด A) เป็นระยะทางประมาณ 11 กิโลเมตร กลับรถและขับรับสัญญาณจากด่านประชาชื่น (จุด A) ไปจนถึงด่านบางพูน (จุด B) เป็นระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร กลับรถและขับรับสัญญาณกลับจากด่านบางพูนไปจอดรถที่จุดเริ่มต้นสำรวจ ทำการทดสอบรับสัญญาณดาวเทียม 4 รอบ ดังที่แสดงในตารางที่ 5 เพื่อประมวลผลค่าพิกัดวิถีการเคลื่อนที่ของพาหนะจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดด้วยวิธีหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดวิถีการเคลื่อนที่อ้างอิงจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงที่ประมวลผลแบบจลน์ภายหลัง (PPK)

ตารางที่ 5 ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ในการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS และอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหลังการถยนต์

รอบที่	ความเร็วเฉลี่ย	อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม หน้า, หลัง
1	10 m/s	F9P + BT-147, Trimble R7 + Zephyr 2
2	20 m/s	F9P + BT-147, Trimble R7 + Zephyr 2
3	10 m/s	F9P + HX-CH6601A , Trimble R7 + Zephyr 2
4	20 m/s	F9P + HX-CH6601A , Trimble R7 + Zephyr 2

3.1.4 ข้อมูลการรังวัดแบบจลน์บนอากาศยานไร้คนขับ

ใช้อากาศยานไร้คนขับรุ่น Foxtech Loong 2160 เป็นอากาศยานปีกตรึงยัดที่มีการขึ้นลงทางตั้งหรือ VTOL (Vertical Take-off and Landing) ติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม GNSS บนตัวอากาศยานแบบหลายความถี่ใช้ชิพเซิร์บสัญญาณ U-blox ZED-F9P ในการบันทึกข้อมูลค่าพิกัดเพื่อประมวลผลในรูปแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อพิจารณาความต่อเนื่องของข้อมูลค่าพิกัดที่ได้จากการรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดบนอากาศยานไร้คนขับ ทำการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมทุก 0.2 วินาที ระยะเส้นทางบินไป-กลับรวม 20 กิโลเมตร พื้นที่สำรวจอยู่ที่ตำบลเมืองเก่า อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี



รูปที่ 19 อากาศยานไร้คนขับ Loong VTOL ติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณ GNSS U-blox F9P พร้อมเสาอากาศประเภท Helical

3.2 การประมวลผลข้อมูลรังวัดดาวเทียม GNSS

3.2.1 ข้อมูลค่าพิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการตรวจสอบ

ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลแบบสัมพัทธ์ภายหลังด้วยซอฟต์แวร์ประมวลผลเชิงพาณิชย์ Inertial Explorer 8.7 ที่มีความน่าเชื่อถือสูง ใช้เป็นค่าพิกัดอ้างอิงทั้งในการทดสอบแบบสถิตและแบบจลน์

3.2.1.1 ค่าพิกัดหมุดตรวจสอบกรณีรับสัญญาณแบบสถิต

ประมวลผลเส้นฐานแบบสถิต ด้วยโปรแกรม IE 8.7 โดยใช้สถานี DPT9 เป็นสถานีฐาน ค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรับวัดคุณภาพสูง CHC i80 ซึ่งใช้เป็นจุดตรวจสอบ แสดงในตารางที่ 6 ค่าอยู่บนกรอบอ้างอิง ITRF2014

ตารางที่ 6 แสดงค่าพิกัดและความสูงเหนือทรีของจุดตรวจสอบ SV1 SV2 และ SV3

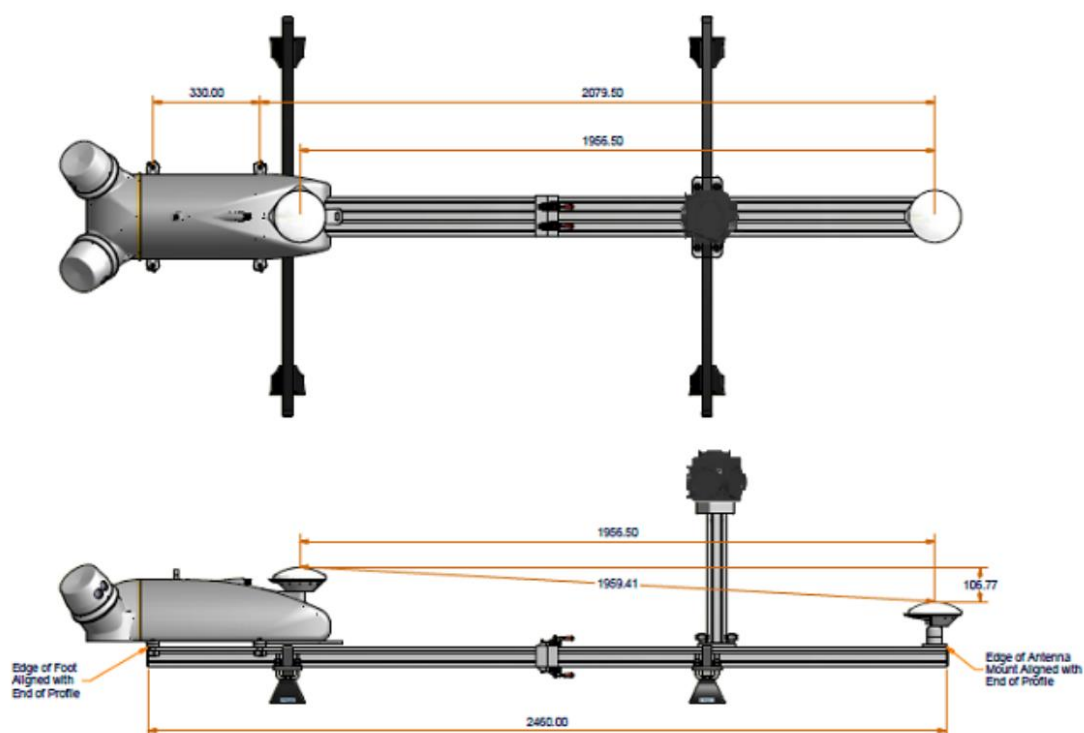
สถานี	ค่าพิกัดทางตะวันออก (ม.)	ค่าพิกัดทางเหนือ (ม.)	ความสูงเหนือทรี (ม.)
SV1	665679.329	1518994.256	-14.155
SV2	665680.194	1518993.035	-14.176
SV3	665681.014	1518991.792	-14.184

3.2.1.2 ค่าพิกัดอ้างอิงสำหรับการทดสอบแบบจลน์บนรถยนต์

ใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณแบบรับวัดคุณภาพสูง Trimble R7 ที่ประมวลผลภายหลังแบบจลน์เป็นวิธีการเคลื่อนที่อ้างอิง (Reference Trajectory) เลือกใช้ข้อมูลช่วงที่รับสัญญาณได้ต่อเนื่อง ผลลัพธ์ในการหาเลขปริศนาเป็น Fixed และสามารถรับดาวเทียมได้มากกว่า 5 ดวง โดยระยะห่างของจุดศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณ (Phase center) ของเสาอากาศอ้างอิงจาก Zephyr 2 ไปถึงเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดทั้งสองรุ่นดังที่แสดงในตารางที่ 7 ความถูกต้องของระยะห่างทางราบและดิ่งที่ได้เปรียบเทียบกับ epoch ต่อ epoch โดยระยะห่างทางราบและทางดิ่งที่ใช้เป็นระยะอ้างอิง ได้จากเอกสารข้อมูลของอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหลังการถยนต์ Trimble MX2 รูปที่ 20 และมีการวัดค่าชดเชยระยะด้วยเทปเพื่อยืนยันความถูกต้องดังรูปที่ 21 การประมวลผลแบบสัมพัทธ์ด้วยข้อมูลที่ได้จากการรังวัดแบบสถิตก่อนเริ่มเคลื่อนที่รับสัญญาณเป็นเวลา 30 นาทีของการทดสอบแต่ละรอบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ MX-2 และเพื่อให้ผลลัพธ์ค่าพิกัดจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวมีความละเอียดสูงมีค่าลู่เข้า

ตารางที่ 7 ระยะห่างทางราบและทางตั้งจากจุดศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณของเสาอากาศ (Phase Center) ที่ติดตั้งบนหลังคารถ หน่วยเป็นเมตร

เสาอากาศที่ทดสอบ	เสาอากาศอ้างอิง	ระยะห่างทางราบ	ระยะห่างทางตั้ง
BT-147	Zephyr 2	1.9565	0.0995
HX-CH6601A	Zephyr 2	1.9565	0.0532



รูปที่ 20 ระยะห่างระหว่างเสาอากาศที่ติดตั้งบนหลังคารถยนต์

(ที่มา: [https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-](https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-667718/Trimble%20MX2%20Installation%20&%20Operation%20Manual%20v_10.pdf)

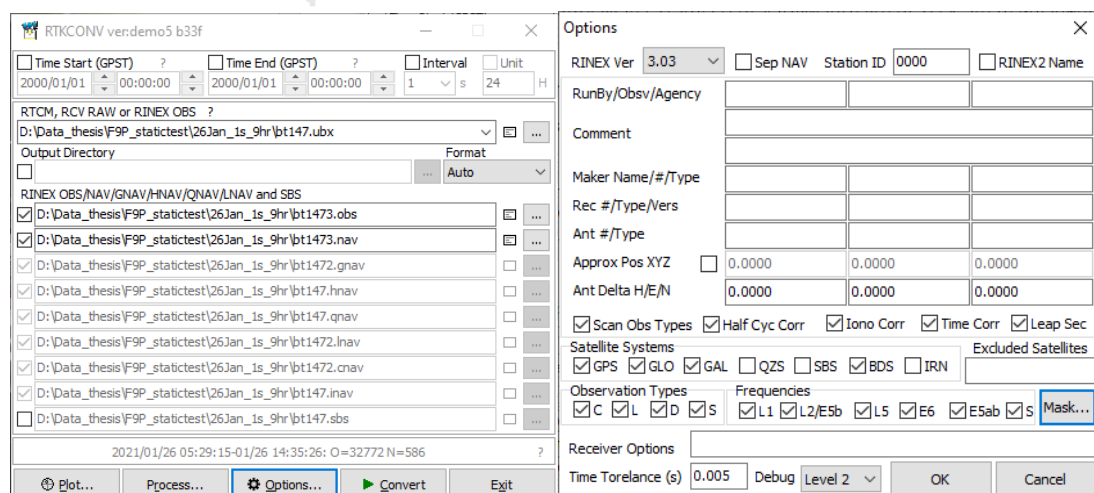
667718/Trimble%20MX2%20Installation%20&%20Operation%20Manual%20v_10.pdf)



รูปที่ 21 ตรวจสอบค่าขดเชยระยะของเสาอากาศที่ติดตั้งบนหลังคารถยนต์

3.2.2 การประมวลผลภายหลังจากข้อมูลรังวัดแบบสถิต

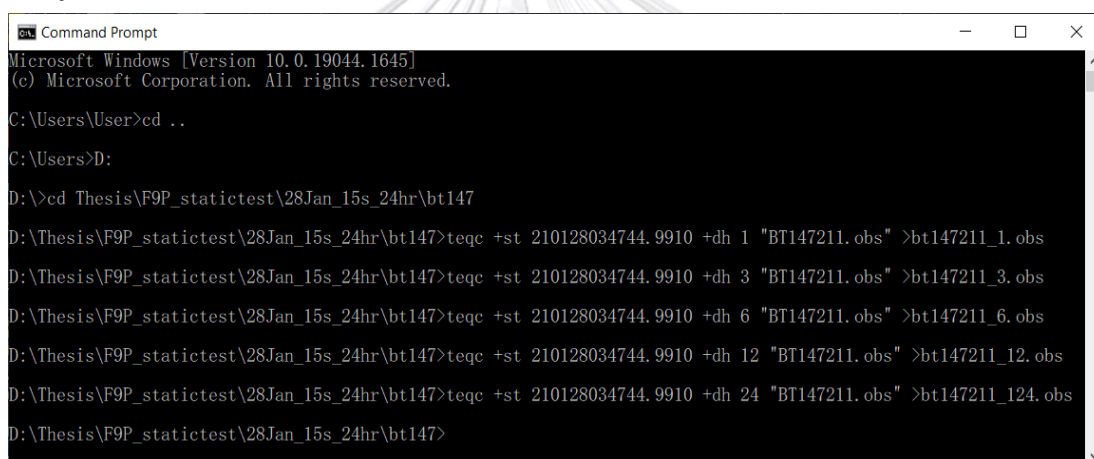
การเตรียมข้อมูลเพื่อประมวลผลภายหลังจากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด ใช้โปรแกรม RTKCONV ver.demo5 b33f เพื่อแปลงไฟล์นามสกุล .ubx ให้เป็นไฟล์ประเภท RINEX 3.03 และ 2.11 จะได้ไฟล์ข้อมูล .obs และ .nav ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 โปรแกรม RTKCONV ver.demo5 b33f

ใช้ข้อมูลรังวัดด้วยดาวเทียมจากสถานี CORS DPT9 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง เป็นสถานีฐานในการประมวลผลภายหลังแบบสัมพันธ์กับข้อมูลที่รังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบประหยัดที่บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที เป็นเวลา 9 ชั่วโมง นำมาประมวลผลแบบ PPK เพื่อความต่อเนื่องของผลลัพธ์ค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณราคาประหยัดในแต่ละ epoch เมื่อใช้งานเป็นเวลานานในสภาพอากาศร้อนของประเทศไทย

จากนั้นทำการตัดแบ่งข้อมูลที่รังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดที่บันทึกข้อมูลรับสัญญาณทุก 15 วินาที ที่รับสัญญาณเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง มาแบ่งเป็นช่วงเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมงจากเวลาเริ่มต้นรับสัญญาณด้วยโปรแกรม Translate, Edit, Quality Check (TEQC) รูปที่ 23 โดยใช้ข้อมูล RINEX 2.11 แล้วนำมาประมวลผลแบบแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ด้วยโปรแกรม INERTIAL EXPLORER 8.7 โดยใช้มุมก้นฟ้าต่างกันคือ 5/7.5/10/15 องศา ค่าพิกัดที่ได้ขึ้นอยู่กับกรอบอ้างอิง ITRF2014



```

Microsoft Windows [Version 10.0.19044.1645]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\User>cd ..
C:\Users>D:
D:\>cd Thesis\F9P_statictest\28Jan_15s_24hr\bt147
D:\Thesis\F9P_statictest\28Jan_15s_24hr\bt147>teqc +st 210128034744.9910 +dh 1 "BT147211.obs" >bt147211_1.obs
D:\Thesis\F9P_statictest\28Jan_15s_24hr\bt147>teqc +st 210128034744.9910 +dh 3 "BT147211.obs" >bt147211_3.obs
D:\Thesis\F9P_statictest\28Jan_15s_24hr\bt147>teqc +st 210128034744.9910 +dh 6 "BT147211.obs" >bt147211_6.obs
D:\Thesis\F9P_statictest\28Jan_15s_24hr\bt147>teqc +st 210128034744.9910 +dh 12 "BT147211.obs" >bt147211_12.obs
D:\Thesis\F9P_statictest\28Jan_15s_24hr\bt147>teqc +st 210128034744.9910 +dh 24 "BT147211.obs" >bt147211_124.obs
D:\Thesis\F9P_statictest\28Jan_15s_24hr\bt147>
  
```

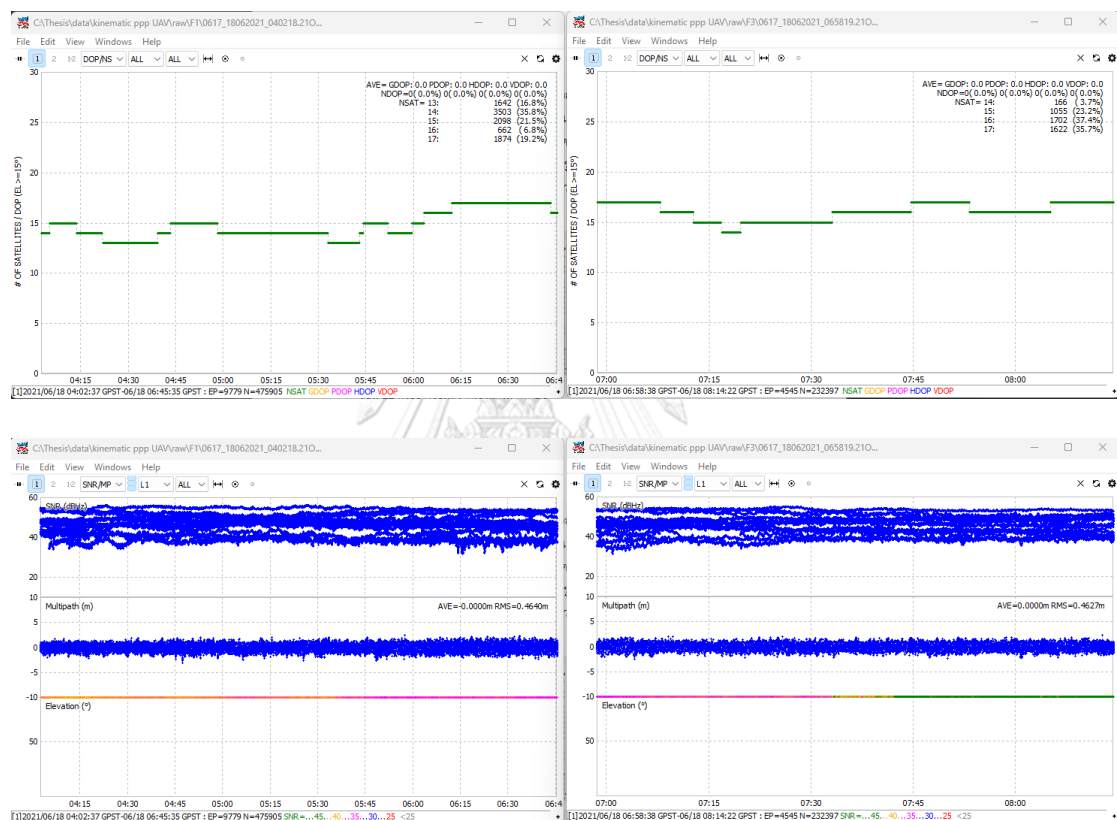
รูปที่ 23 ตัวอย่างการตัดแบ่งข้อมูลเป็นช่วงเวลาด้วยโปรแกรม TEQC

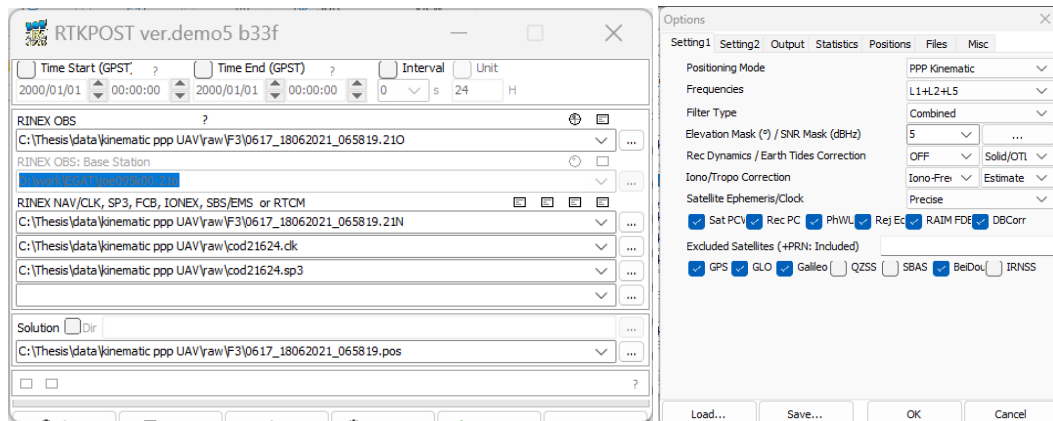
3.2.3 การประมวลผลข้อมูลรังวัดแบบจลน์จากอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนรถยนต์

ในส่วนของคุณข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดที่ติดตั้งบนรถยนต์ ใช้โปรแกรม INERTIAL EXPLORER 8.7 และใช้โปรแกรมแบบรหัสเปิด RTKLIB ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) ส่วนข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณรุ่น Trimble R7 ประมวลผลภายหลังแบบจลน์ (PPK) โดยใช้สถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวรของกรมที่ดิน สถานี PKKT เป็นสถานีฐานในการประมวลผลด้วยโปรแกรม IE 8.7 จากนั้นทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดเพื่อหาค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

3.2.4 การประมวลผลข้อมูลรังวัดแบบจลน์บนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

ประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงด้วยโปรแกรมรหัสเปิด RTKLIB จากนั้นนำค่าพิกัดที่ได้มาวิเคราะห์ความต่อเนื่องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลค่าพิกัดและวิธีการเคลื่อนที่ในการทดสอบใช้งานจริง แสดงในรูปแบบของค่า Position Dilution of Precision (PDOP) จำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ และตรวจสอบความต่อเนื่อง การกระจายตัวของข้อมูลค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง





รูปที่ 25 หน้าต่างโปรแกรม RTKLIB สำหรับประมวลผลแบบ PPP

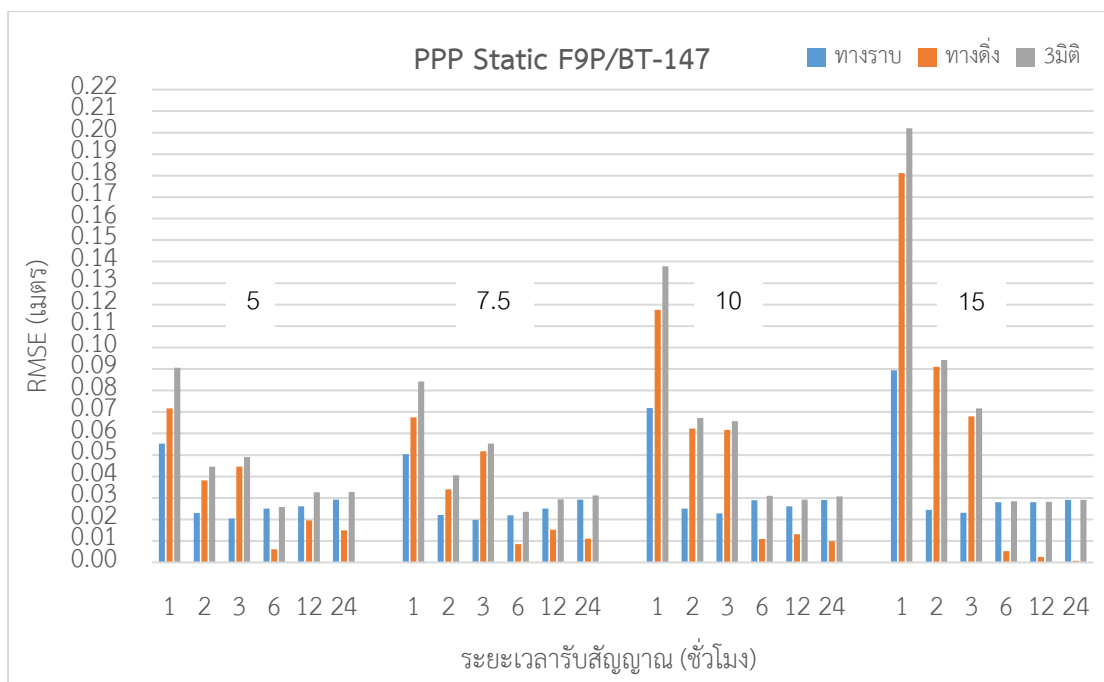


บทที่ 4

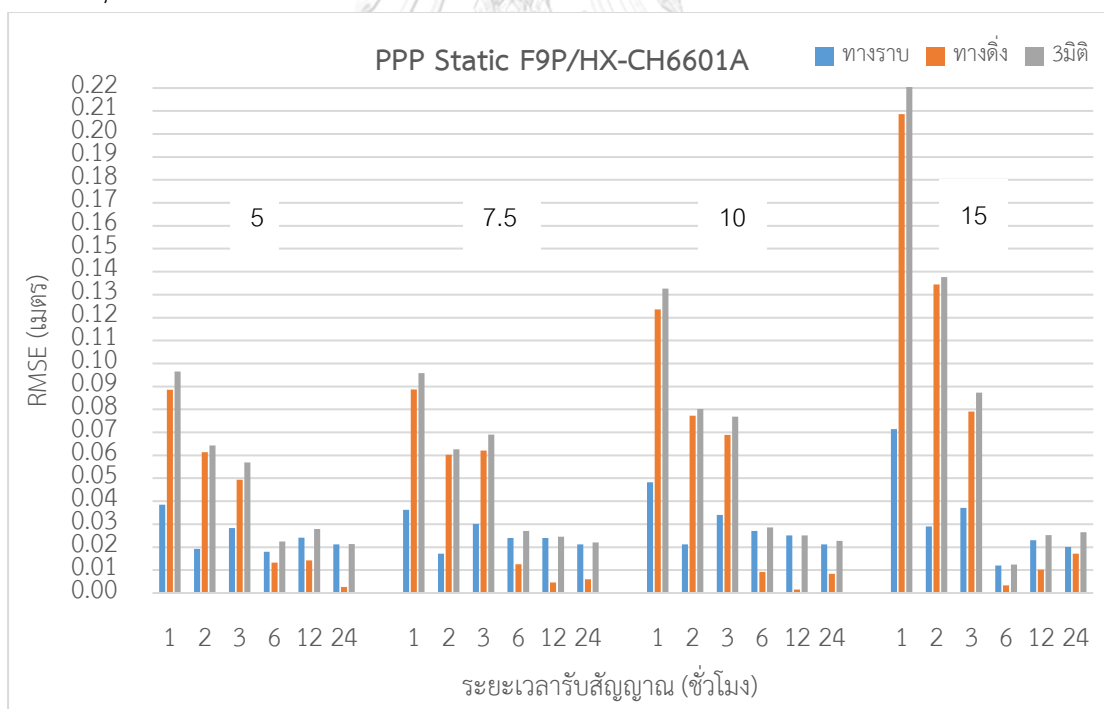
ผลการศึกษา

4.1 เปรียบเทียบค่าพิกัดจากการรังวัดแบบสถิติแล้วประมวลผลภายหลังแบบจุดเดียวความละเอียดสูง

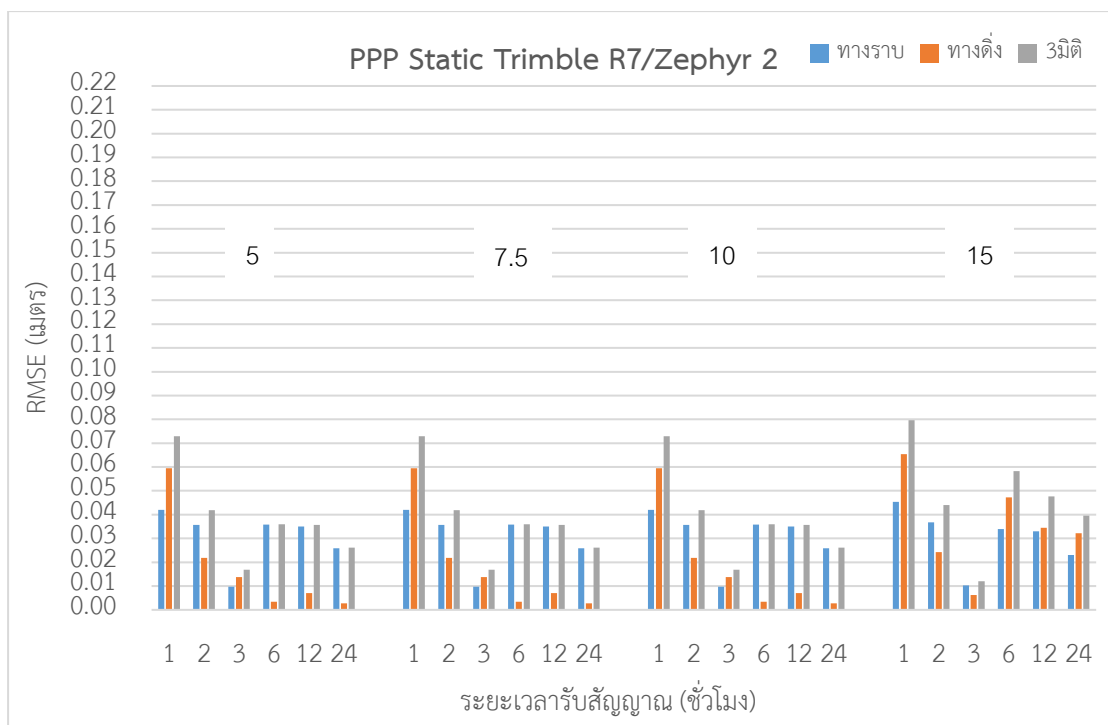
จากข้อมูลการรังวัดแบบสถิติด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดและอุปกรณ์แบบรังวัดคุณภาพสูง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราบันทึกข้อมูลทุก 15 วินาที และทำการตัดแบ่งข้อมูลเป็นช่วงเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ด้วยโปรแกรม TEQC เมื่อประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง ด้วยโปรแกรม IE 8.7 โดยที่ใช้มุมกันฟ้า (Elevation mask) ต่างกันคือ 5, 7.5, 10, 15 องศา ใช้ค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง Final Product จาก Center for Orbit Determination in Europe (CODE) คำนวณหาค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในรูปแบบของค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (RMSE) พบว่าผลลัพธ์ค่าพิกัดจากเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดที่ประมวลผลด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูงมีความถูกต้องมากขึ้นตามระยะเวลาที่รับสัญญาณโดยมุมกันฟ้าที่เหมาะสมในการใช้รับสัญญาณแบบสถิติด้วยเครื่องรับสัญญาณราคาประหยัดคือต่ำกว่า 7.5 องศา จะทำให้ในการรับสัญญาณเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถให้ความถูกต้องทางตำแหน่งในสามมิติดีกว่า 10 เซนติเมตร เมื่อรับสัญญาณเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบดีกว่า 4 เซนติเมตร และเมื่อรับสัญญาณเป็นเวลา 6 ชั่วโมงขึ้นไปจนถึง 24 ชั่วโมง อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดสามารถให้ความถูกต้องทางราบ ทางดิ่งและในสามมิติได้ดีกว่า 3 เซนติเมตร



รูปที่ 26 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางตั้ง ทางราบ และสามมิติ โดยที่ไข่มุกกันฟ้าต่างกัน กรณีใช้ F9P/BT-147



รูปที่ 27 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางตั้ง ทางราบ และสามมิติ โดยที่ไข่มุกกันฟ้าต่างกัน กรณีใช้เครื่องรับ F9P คู่กับเสาอากาศ HX-CH6601A



รูปที่ 28 เปรียบเทียบความถูกต้องค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณแบบรับวัด Trimble R7 Zephyr2

ตารางที่ 8 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนในทางราบทางตั้งและ 3มิติ จากข้อมูลที่รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมกันฟ้า 5 องศา

อุปกรณ์	RMSE (เมตร)	ระยะเวลาับสัญญาณ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	6	12	24
BT-147	ทางราบ	0.055	0.023	0.020	0.025	0.026	0.029
	ทางตั้ง	0.072	0.038	0.045	0.006	0.020	0.015
	สามมิติ	0.091	0.045	0.049	0.026	0.033	0.033
HX-CH6601A	ทางราบ	0.039	0.019	0.028	0.018	0.024	0.021
	ทางตั้ง	0.088	0.061	0.049	0.013	0.014	0.003
	สามมิติ	0.097	0.064	0.057	0.022	0.028	0.021

ตารางที่ 9 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบทางดิ่งและ 3มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมก้นฟ้า 7.5 องศา

อุปกรณ์	RMSE (เมตร)	ระยะเวลาสัญญาณ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	6	12	24
BT-147	ทางราบ	0.050	0.022	0.020	0.022	0.025	0.029
	ทางดิ่ง	0.067	0.034	0.052	0.009	0.015	0.011
	สามมิติ	0.084	0.041	0.055	0.024	0.029	0.031
HX-CH6601A	ทางราบ	0.036	0.017	0.030	0.024	0.024	0.021
	ทางดิ่ง	0.089	0.060	0.062	0.012	0.005	0.006
	สามมิติ	0.096	0.063	0.069	0.027	0.024	0.022

ตารางที่ 10 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบทางดิ่งและ 3มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมก้นฟ้า 10 องศา

อุปกรณ์	RMSE (เมตร)	ระยะเวลาสัญญาณ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	6	12	24
BT-147	ทางราบ	0.072	0.025	0.023	0.029	0.026	0.029
	ทางดิ่ง	0.118	0.062	0.062	0.011	0.013	0.010
	สามมิติ	0.138	0.067	0.066	0.031	0.029	0.031
HX-CH6601A	ทางราบ	0.048	0.021	0.034	0.027	0.025	0.021
	ทางดิ่ง	0.124	0.077	0.069	0.009	0.002	0.008
	สามมิติ	0.133	0.080	0.077	0.029	0.025	0.023
Zephyr2	ทางราบ	0.042	0.036	0.010	0.036	0.035	0.026
	ทางดิ่ง	0.059	0.022	0.014	0.003	0.007	0.003
	สามมิติ	0.073	0.042	0.017	0.036	0.036	0.026

ตารางที่ 11 ค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบทางดิ่งและ 3 มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/2/3/6/12/24 ชั่วโมง ใช้มุมก้นฟ้า 15 องศา

อุปกรณ์	RMSE (เมตร)	ระยะเวลาสัญญาณ (ชั่วโมง)					
		1	2	3	6	12	24
BT-147	ทางราบ	0.089	0.024	0.023	0.028	0.028	0.029
	ทางดิ่ง	0.181	0.091	0.068	0.005	0.003	0.001
	สามมิติ	0.202	0.094	0.072	0.029	0.028	0.029
HX-CH6601A	ทางราบ	0.071	0.029	0.037	0.012	0.023	0.020
	ทางดิ่ง	0.209	0.134	0.079	0.003	0.010	0.017
	สามมิติ	0.221	0.138	0.087	0.012	0.025	0.026
Zephyr2	ทางราบ	0.045	0.037	0.010	0.034	0.033	0.023
	ทางดิ่ง	0.065	0.024	0.006	0.047	0.034	0.032
	สามมิติ	0.080	0.044	0.012	0.058	0.048	0.040

ตารางที่ 12 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบและทางตั้งจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว ความละเอียดสูงแบบสถิต

cutoff angle	Duration (h)	SD Horizontal (m)			SD Height (m)		
		BT-147	HX-CH6601A	Zephyr2	BT-147	HX-CH6601A	Zephyr2
5	1	0.017	0.018	-	0.017	0.017	-
	2	0.007	0.012	-	0.012	0.014	-
	3	0.004	0.008	-	0.006	0.007	-
	6	0.004	0.005	-	0.004	0.005	-
	12	0.002	0.002	-	0.002	0.003	-
	24	0.002	0.002	-	0.002	0.002	-
7.5	1	0.018	0.020	-	0.022	0.023	-
	2	0.007	0.012	-	0.015	0.019	-
	3	0.005	0.008	-	0.007	0.009	-
	6	0.004	0.006	-	0.005	0.005	-
	12	0.002	0.002	-	0.002	0.004	-
	24	0.002	0.002	-	0.002	0.003	-
10	1	0.020	0.021	0.022	0.028	0.030	0.033
	2	0.008	0.012	0.008	0.018	0.023	0.012
	3	0.005	0.008	0.005	0.008	0.009	0.007
	6	0.004	0.006	0.004	0.005	0.006	0.004
	12	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.003
	24	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002
15	1	0.022	0.022	0.023	0.033	0.033	0.038
	2	0.008	0.013	0.009	0.020	0.024	0.013
	3	0.005	0.009	0.005	0.009	0.011	0.008
	6	0.005	0.006	0.004	0.006	0.007	0.005
	12	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.003
	24	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.003

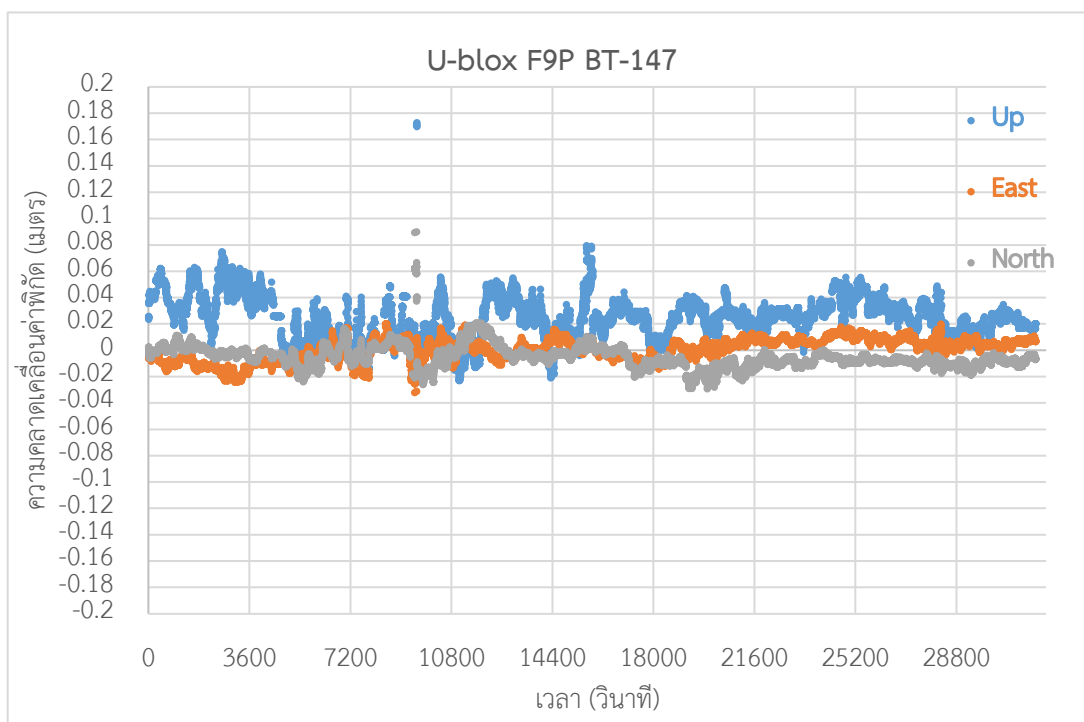
4.2 เปรียบเทียบค่าพิกัดจากการรังวัดแบบสถิตแล้วประมวลผลภายหลังแบบจลน์ (PPK)

จากข้อมูลการรังวัดแบบสถิตด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดและอุปกรณ์แบบรังวัดคุณภาพสูงเป็นเวลา 9 ชั่วโมง อัตราบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที เมื่อประมวลผลภายหลังแบบจลน์ด้วยโปรแกรมประมวลผลเชิงพาณิชย์ IE 8.7 แล้วนำมา plot ดูการกระจายตัวทางตำแหน่งของพิกัดตำแหน่งในแต่ละ epoch เปรียบเทียบกับค่าพิกัดของจุดอ้างอิง พบว่าเมื่อพิจารณาค่าพิกัดที่ได้

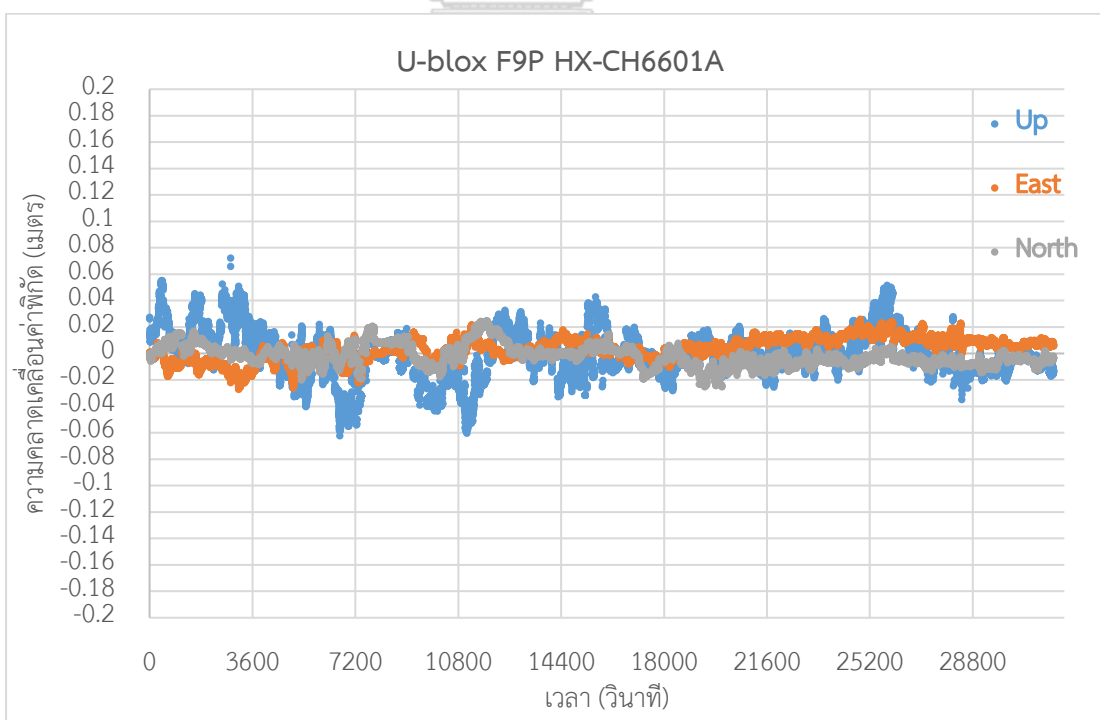
จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด U-blox ZED-F9P ที่ใช้ร่วมกับเสาอากาศรุ่น BT-147 สามารถให้ค่าพิกัดทางตะวันออกและทางเหนือที่มีความต่อเนื่องและกว้างตัวอยู่ในกรอบไม่เกิน 4 เซนติเมตร ในขณะที่รับสัญญาณจนถึงเวลา 4 ชั่วโมง ค่าพิกัดทางตะวันออกและทางเหนือมีค่าต่างมากขึ้นเป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งมีค่าต่างพิกัดทางตะวันออกและทางเหนืออยู่ที่ 10 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลต่างค่าพิกัดทางตะวันออกและทางเหนือเฉลี่ยตลอดการรับสัญญาณอยู่ที่ 1.5 และ 1.1 เซนติเมตรตามลำดับ และผลต่างพิกัดทางดิ่งมีค่าประมาณ 2 เท่าของทางราบ ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.7 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งอยู่ที่ 2.2 และ 3.9 เซนติเมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดที่ได้จากเสาอากาศ HX-CH6601A สามารถให้พิกัดทางตะวันออกและทางเหนือที่มีความต่อเนื่องและกว้างตัวอยู่ในกรอบไม่เกิน 3 เซนติเมตร ค่าต่างพิกัดตะวันออกและทางเหนือมีค่าเฉลี่ยที่ 0.6 และ 0.8 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าต่างพิกัดทางดิ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.1 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งอยู่ที่ระดับ 0.5 และ 1.8 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดกับอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัด จะพบว่าค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับแบบรังวัดมีความต่อเนื่องมากกว่าเครื่องรับราคาประหยัด ค่าต่างพิกัดทางเหนือและทางตะวันออกมีค่าอยู่ในช่วง 1-2 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยที่ 0.7 และ 0.8 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าต่างพิกัดทางดิ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.6 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งอยู่ที่ระดับ 0.6 และ 1.8 เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 13 ผลลัพธ์การประมวลผลภายหลังแบบจลน์จากข้อมูลรับสัญญาณแบบสถิตด้วยเครื่องรับสัญญาณ U-blox F9P

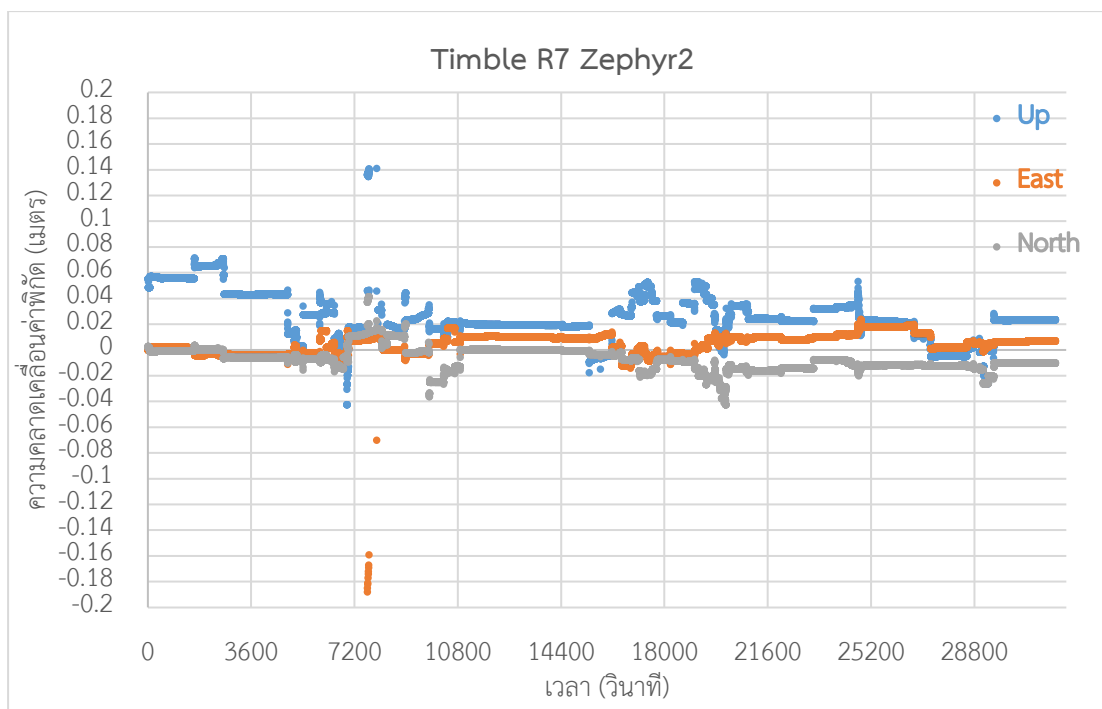
Receiver/Antenna	Descriptive Statistics	Up (m.)	Horizontal (m.)	3D (m.)
U-blox F9P/BT-147	Mean	0.027	0.013	0.032
	SD	0.039	0.022	0.043
U-blox F9P/HX-CH6601A	Mean	-0.001	0.011	0.019
	SD	0.018	0.005	0.010
Trimble R7/Zephyr2	Mean	0.026	0.013	0.032
	SD	0.018	0.006	0.014



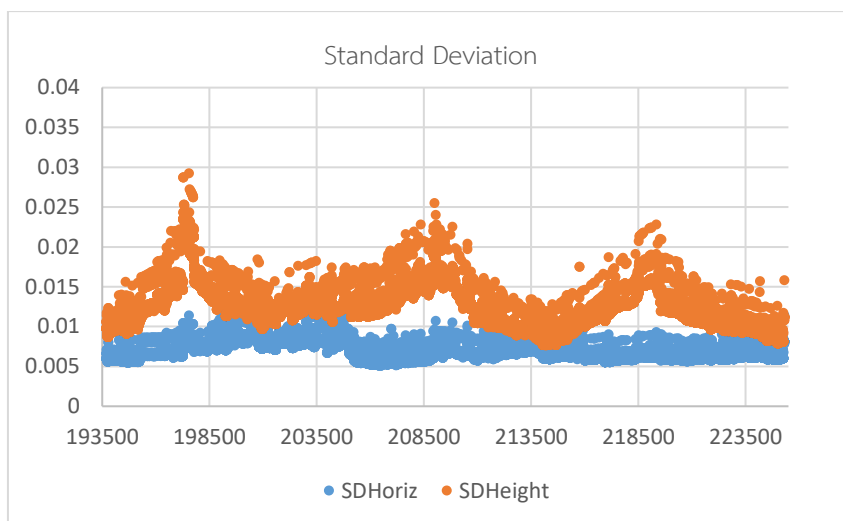
รูปที่ 29 ความคลาดเคลื่อนค่าพิกัดของเครื่องรับราคาประหยัด BT-147



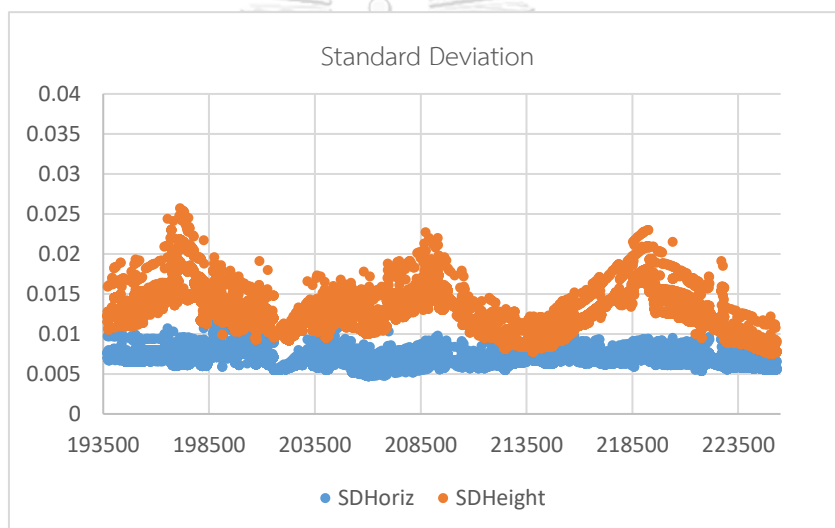
รูปที่ 30 ผลต่างค่าพิกัดจากเครื่องรับ HX-CH6601A การประมวลผลแบบ PPK



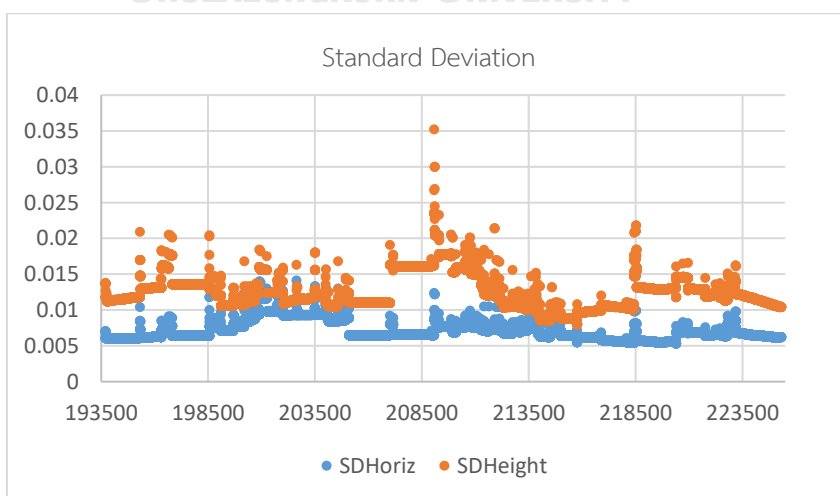
รูปที่ 31 ผลต่างค่าพิกัดจากเครื่องรับแบบรับวัดคุณภาพสูงการประมวลผลแบบ PPK



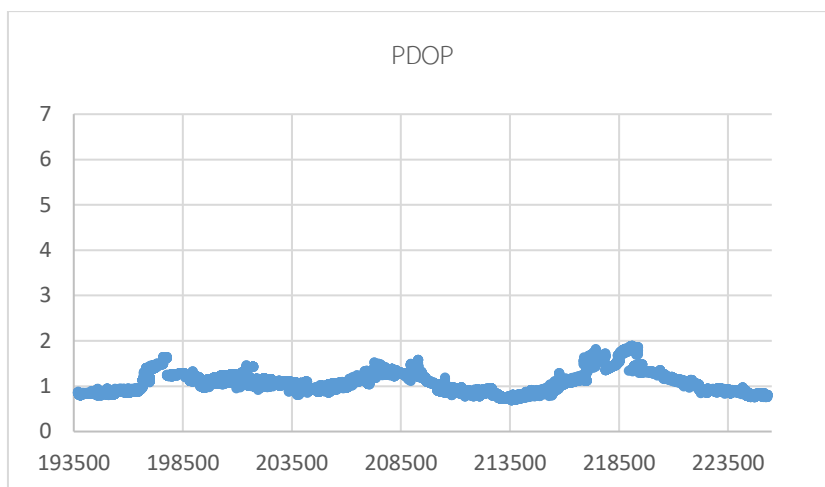
รูปที่ 32 ค่า Standard Deviation ผลต่างค่าพิกัดทางราบและทางตั้งจากเสาอากาศ BT-147



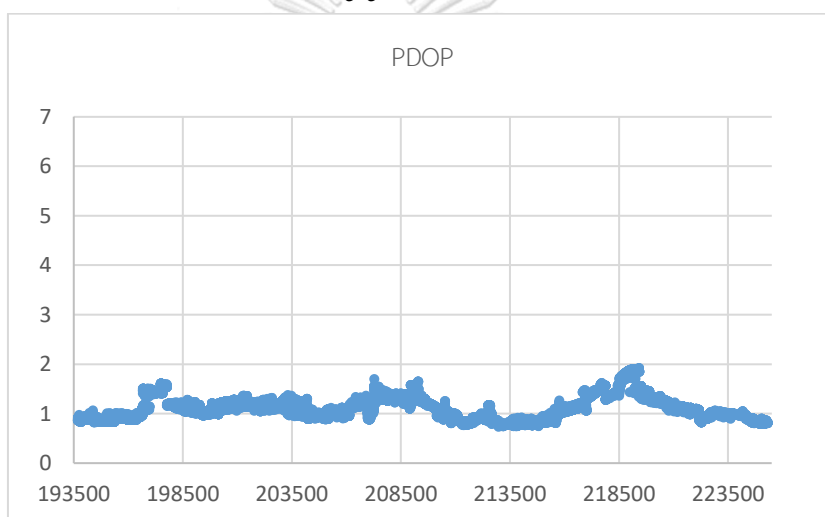
รูปที่ 33 ค่า Standard Deviation ผลต่างค่าพิกัดทางราบและทางตั้งจากเสาอากาศ HX-CH6601A



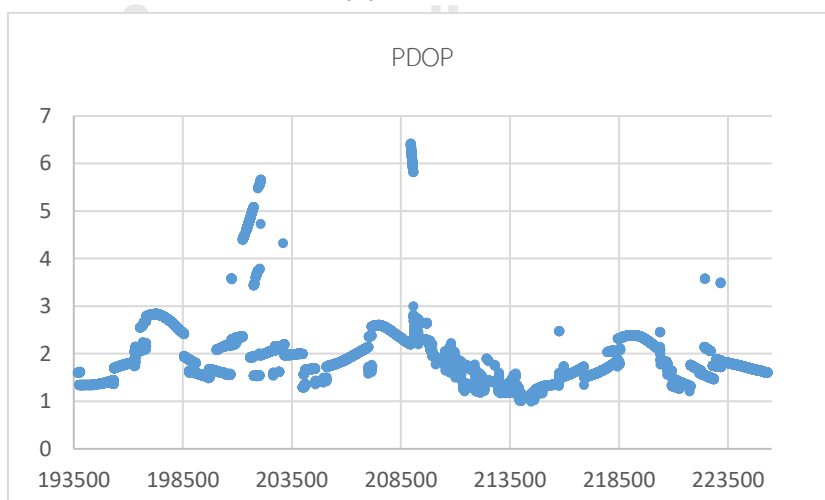
รูปที่ 34 ค่า Standard Deviation ผลต่างค่าพิกัดทางราบและทางตั้งจากเสาอากาศ Zephyr



รูปที่ 35 แสดงค่า PDOP ที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยเสาอากาศ BT-147



รูปที่ 36 แสดงค่า PDOP ที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยเสาอากาศ HX-CH6601A



รูปที่ 37 แสดงค่า PDOP ที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยเสาอากาศ Trimble R7

เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าพิกัดทางตะวันออก ทางเหนือและทางตั้งของแต่ละอุปกรณ์ ได้แก่ BT-147 , HX-CH6601A และ Trimble R7 ในการรังวัดแบบสถิติประมวลผลแบบ PPK ประมวลผลด้วยโปรแกรม IE 8.7 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground truth) พบว่า BT-147 ค่าต่างค่าพิกัดทางตะวันออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.015 เมตร มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.038 และ -0.113 เมตร ตามลำดับ ค่าต่างพิกัดทางเหนือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.011 เมตร มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.019 และ -0.043 เมตร ตามลำดับ ค่าต่างพิกัดทางตั้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 เมตร มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.079 และ -0.383 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ HX-CH6601A ค่าต่างพิกัดทางตะวันออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.004 เมตร มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.025 และ -0.023 เมตร ตามลำดับ ค่าต่างพิกัดทางเหนือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.001 เมตร มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.082 และ -0.031 เมตร ตามลำดับ ค่าต่างพิกัดทางตั้งมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ -0.012 มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.223 และ -0.085 ตามลำดับ และ Trimble R7 ค่าต่างค่าพิกัดทางตะวันออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.005 เมตร มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.024 และ -0.012 เมตร ตามลำดับ ค่าต่างพิกัดทางเหนือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.008 เมตร มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.021 และ -0.043 เมตร ตามลำดับ ค่าต่างพิกัดทางตั้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.029 มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 0.019 และ -0.080 เมตร ตามลำดับ

4.3 เปรียบเทียบค่าพิกัดจากรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์

จากข้อมูลการรังวัดแบบจลน์ด้วยอุปกรณ์แบบประหยัดและอุปกรณ์แบบรังวัดคุณภาพสูงที่ติดตั้งบนหลังการถยนต์แล้วรับสัญญาณบนทางด่วนยกระดับ เพื่อจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ ที่ความเร็วเฉลี่ย 10 เมตร/วินาที และ 20 เมตร/วินาที อัตราบันทึกข้อมูลทุก 0.2 วินาที ตั้งค่าการรับสัญญาณดาวเทียมด้วยมุมกันฟ้า 0 องศา ใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์แบบรังวัดคุณภาพสูง Trimble R7 ประมวลผลภายหลังแบบจลน์ (PPK) ด้วยโปรแกรม IE 8.7 เพื่อใช้เป็นวิธีการเคลื่อนที่อ้างอิง และประมวลผลข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด U-blox ZED-F9P แบบจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP) ด้วยโปรแกรม IE 8.7 ที่ใช้ค่าแก้วงโคจรและนาฬิกา ดาวเทียมความละเอียดสูงต่างกัน ได้แก่ ใช้ค่าแก้จาก CODE ใช้ค่าแก้จาก MGEX และใช้ค่าแก้ของทั้ง CODE+MGEX รวมทั้งการเลือกทิศทางการประมวลผลที่ต่างกัน แล้วเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด พบว่าการใช้ค่าแก้จาก MGEX ในการประมวลผลในทิศทางทั้งไปและกลับ (combine) สามารถให้ผลลัพธ์ค่าพิกัดที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตั้งแต่ 0-1.00 เมตรได้มากที่สุด คือ 80.8% แบ่งเป็นค่า SD 0.10-0.30 เมตร 34.3% และ 0.30-1.00 เมตร 46.5% ดังที่แสดงในตารางที่

14 จากนั้นเปรียบเทียบข้อมูลระยะห่างทางราบและทางดิ่งของค่าพิกัดจากตำแหน่ง ศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบประหยัดที่ประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงจากการรังวัดแบบจลน์ (Kinematic PPP) กับค่าพิกัดตำแหน่งศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูง Zephyr2 ที่รังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (PPK) โดยเปรียบเทียบข้อมูลเฉพาะช่วงที่รับสัญญาณได้ต่อเนื่องและประมวลผลแบบ PPK ได้ผลลัพธ์แบบ fixed ambiguity ดังแสดงในตารางที่ 16 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (RMSE) ทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ของข้อมูลรังวัดในแต่ละรอบการทดสอบ สามารถแบ่งข้อมูลได้เป็น 4 ช่วงได้แก่ 1. ขณะจอดรับสัญญาณแบบสถิต 2. ข้อมูลช่วงขึ้นทางพิเศษยกระดับด้านเมืองทองธานีไปจนถึงทางลงด้านประชาชื่น 3. ข้อมูลช่วงขึ้นทางพิเศษยกระดับจากด้านประชาชื่นไปจนถึงทางลงด้านบางพูน 4. ข้อมูลช่วงขึ้นทางพิเศษยกระดับด้านบางพูนไปจนถึงทางลงด้านเมืองทองธานี จากการทดสอบด้วยเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดรุ่น BT-147 เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการรับสัญญาณที่ความเร็วเคลื่อนที่ 10 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ของระยะห่างทางราบและทางดิ่งอยู่ที่ 0.255 เมตร และ 0.715 เมตรตามลำดับ และข้อมูลจากการรับสัญญาณที่ความเร็วเคลื่อนที่ 20 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ของระยะห่างทางราบและทางดิ่งอยู่ที่ 0.606 เมตร และ 1.155 เมตรตามลำดับ จากการทดสอบด้วยเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดประเภท Helical รุ่น HX-CH6601A เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการรับสัญญาณที่ความเร็วเคลื่อนที่ 10 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ของระยะห่างทางราบและทางดิ่งอยู่ที่ 0.436 เมตร และ 0.923 เมตรตามลำดับ และข้อมูลจากการรับสัญญาณที่ความเร็วเคลื่อนที่ 20 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ของระยะห่างทางราบและทางดิ่งอยู่ที่ 0.341 เมตร และ 0.647 เมตรตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 14 แสดงร้อยละของจำนวนข้อมูล SD ในแต่ละช่วงตามทิศทางการประมวลผลและข้อมูลค่าแก้ไข

precise file	Processing Direction	Position Standard Deviation Percentages:				
		0.00 - 0.10 m:	0.10 - 0.30 m:	0.30 - 1.00 m:	1.00 - 5.00 m:	5.00 m + over:
CODE	multi-pass	0.00%	0.00%	59.70%	25.50%	14.70%
	forward	0.00%	5.20%	53.50%	29.10%	12.30%
	reverse	0.00%	0.00%	40.50%	44.20%	15.30%
	combine	0.00%	5.20%	66.90%	21.90%	6.00%
MGEX	multi-pass	0.00%	13.00%	60.20%	13.00%	13.70%
	forward	0.00%	22.20%	47.90%	23.30%	6.60%
	reverse	0.00%	5.10%	54.40%	32.20%	8.30%
	combine	0.00%	34.30%	46.50%	13.80%	5.30%
CODE +MGEX	multi-pass	0.00%	0.00%	59.80%	25.90%	14.40%
	forward	0.00%	13.90%	49.10%	28.20%	8.70%
	reverse	0.00%	0.00%	46.00%	42.90%	11.20%
	combine	0.00%	15.60%	57.00%	21.50%	5.90%

ตารางที่ 15 ค่า RMSE ทางราบและทางตั้ง จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์

อุปกรณ์ รับ สัญญาณ	ความเร็ว เคลื่อนที่	RMSE (ม.)							
		ช่วงที่ 1		ช่วงที่ 2		ช่วงที่ 3		ช่วงที่ 4	
		ราบ	ตั้ง	ราบ	ตั้ง	ราบ	ตั้ง	ราบ	ตั้ง
F9P, BT-147	10 m/s	0.059	0.206	0.263	0.912	0.243	0.773	0.260	0.461
	20 m/s	0.117	0.257	0.813	1.667	0.755	1.209	0.249	0.588
F9P, Helix	10 m/s	0.064	0.093	0.328	0.604	0.462	0.710	0.519	1.455
	20 m/s	0.081	0.381	0.469	0.691	0.345	0.721	0.209	0.529

ตารางที่ 16 ค่า SD ของค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์

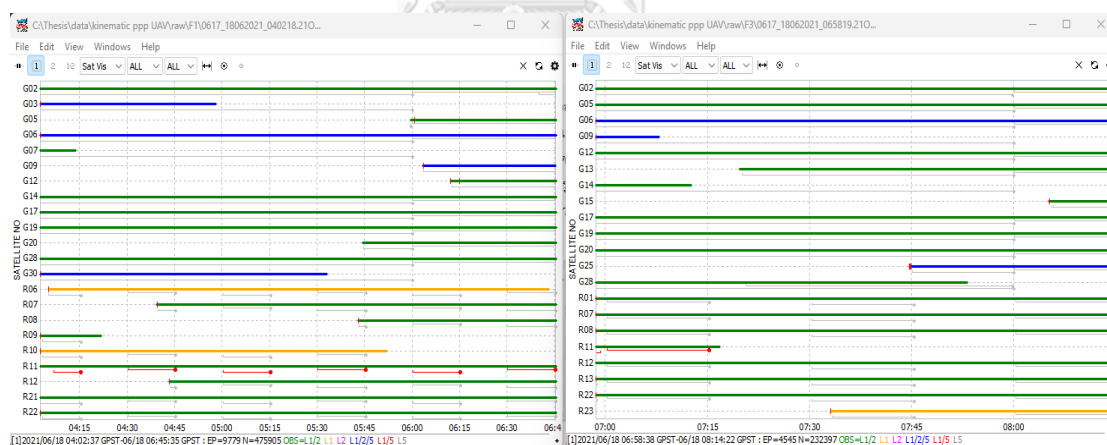
อุปกรณ์ รับ สัญญาณ	ความเร็ว เคลื่อนที่	SD (ม.)							
		ช่วงที่ 1		ช่วงที่ 2		ช่วงที่ 3		ช่วงที่ 4	
		ราบ	ตั้ง	ราบ	ตั้ง	ราบ	ตั้ง	ราบ	ตั้ง
F9P, BT-147	10 m/s	0.047	0.069	0.205	0.309	0.249	0.378	0.234	0.269
	20 m/s	0.075	0.086	0.344	0.450	0.421	0.506	0.199	0.318
F9P, Helix	10 m/s	0.056	0.069	0.275	0.453	0.259	0.315	0.230	0.268
	20 m/s	0.090	0.124	0.264	0.427	0.316	0.513	0.183	0.245

ตารางที่ 17 ค่า RMSE ของระยะอ้างอิงจุดในการทดสอบ

		F9P, BT-147		F9P, Helix	
		10 m/s	20 m/s	10 m/s	20 m/s
ค่า RMSE เฉลี่ยช่วงที่ 2-4	ราบ	0.255	0.606	0.436	0.341
	ตั้ง	0.715	1.155	0.923	0.647
ค่า RMSE เฉลี่ย ตลอดการรับสัญญาณ	ราบ	0.074	0.301	0.147	0.131
	ตั้ง	0.255	0.508	0.370	0.126

4.4 เปรียบเทียบความต่อเนื่องข้อมูลค่าพิกัดของวิถีการเคลื่อนที่ (Trajectory) จาก เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดในการทดสอบบนอากาศยานไร้คนขับ

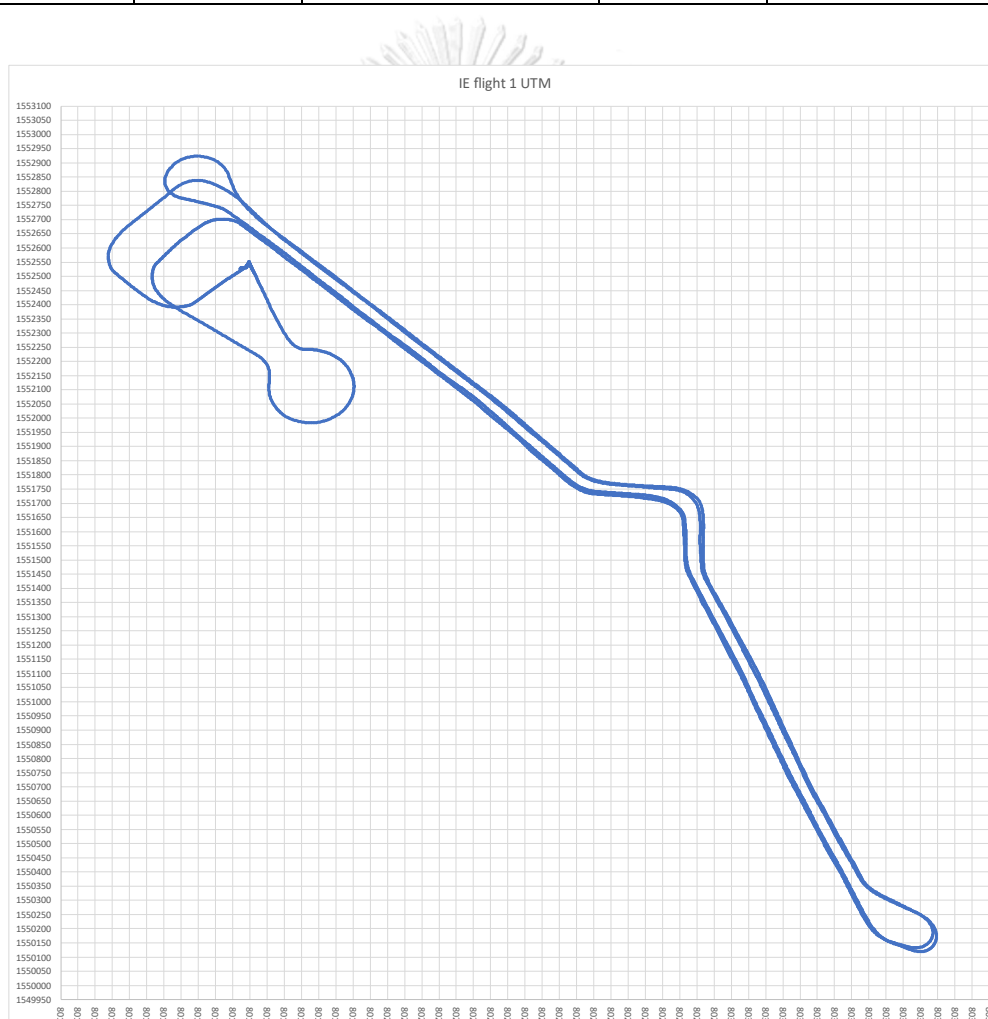
จากข้อมูลการรังวัดแบบจลน์ด้วยอุปกรณ์แบบประหยัดที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ ที่ความเร็วเฉลี่ย 10 เมตร/วินาที และ 20 เมตร/วินาที อัตราบันทึกข้อมูลทุก 0.2 วินาที ประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงด้วยโปรแกรม IE 8.7 และ RTKLIB พบว่าสามารถให้ค่าพิกัดได้ต่อเนื่องทุก 0.2 วินาที ครบทุก Epoch ไม่พบคลื่นหลุดหรือข้อมูลขาดหาย ในเที่ยวบินที่ 1 กำหนดความสูงบินคงที่ 150 เมตร สามารถให้ค่า PDOP เฉลี่ยอยู่ที่ 1.28 ค่าระดับเฉลี่ยจากการประมวลผลอยู่ที่ 142.81 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางดิ่งอยู่ที่ 2.76 เมตร และในเที่ยวบินที่ 2 กำหนดความสูงบินสำรวจ 200 และ 120 เมตร สามารถให้ค่า PDOP เฉลี่ยอยู่ที่ 1.39 ค่าระดับช่วงที่กำหนดความสูงบิน 200 เมตร มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 183.52 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางดิ่งอยู่ที่ 2.65 เมตร ในขณะที่ค่าระดับช่วงที่กำหนดความสูงบิน 120 เมตร มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 108.19 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางดิ่งอยู่ที่ 3.22 เมตร จะเห็นได้ว่าค่าระดับที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดที่ติดตั้งบนอากาศยานเมื่อประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงมีการกระจายตัวจากค่าเฉลี่ยค่อนข้างสูง



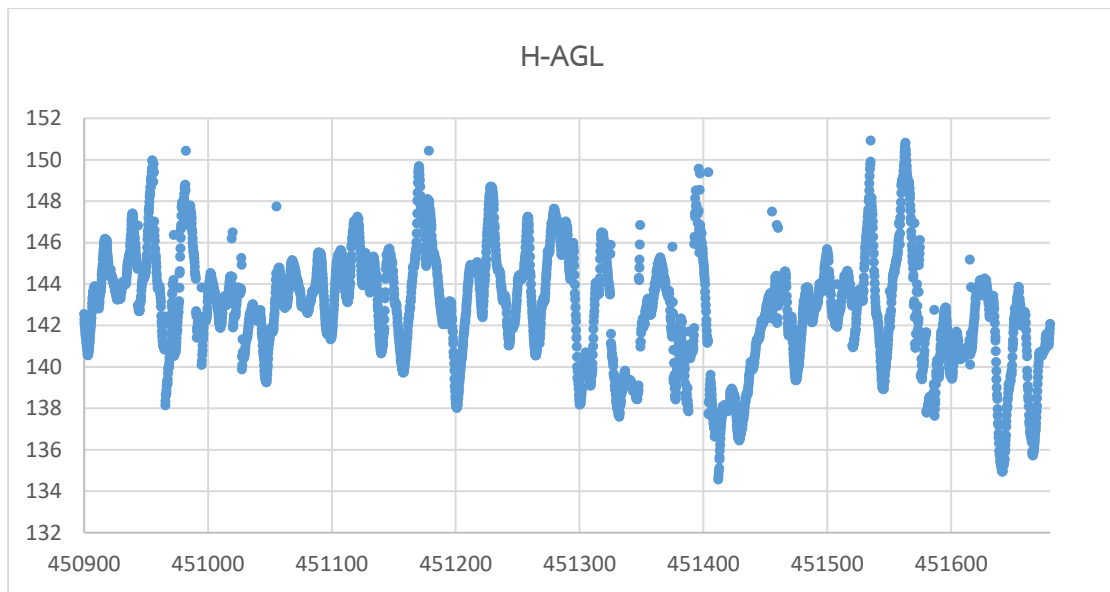
รูปที่ 38 ดาวเทียมที่รับได้และความต่อเนื่องของข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคา
ประหยัด

ตารางที่ 18 จำนวนดาวเทียมที่รับได้ในแต่ละEpochของ 2 เที่ยวบิน

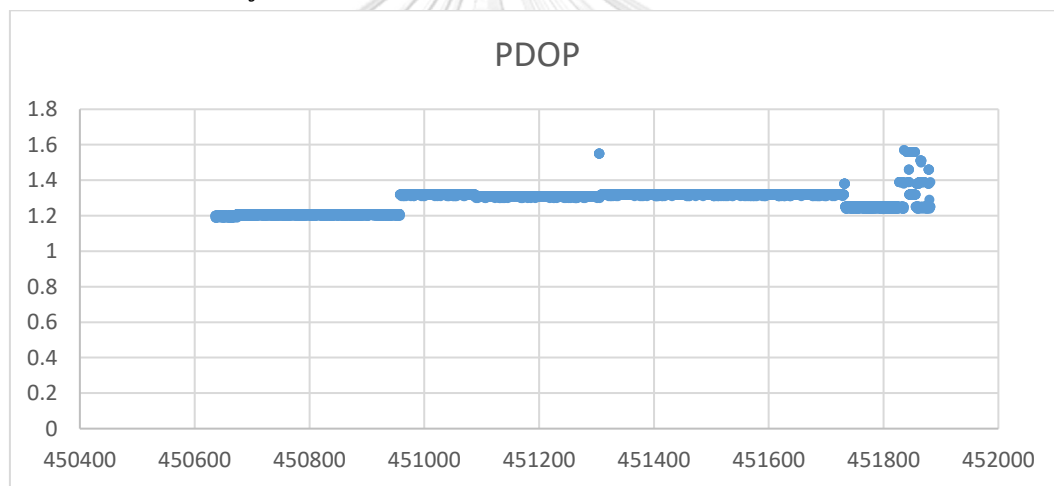
จำนวนดาวเทียม	เที่ยวบินที่ 1		เที่ยวบินที่ 2	
	Total (Epoch)	Percentage	Total	Percentage
14	3503	35.8%	166	3.7%
15	2098	21.5%	1055	23.2%
16	622	6.8%	1702	37.4%
17	1877	19.2%	1622	35.7%



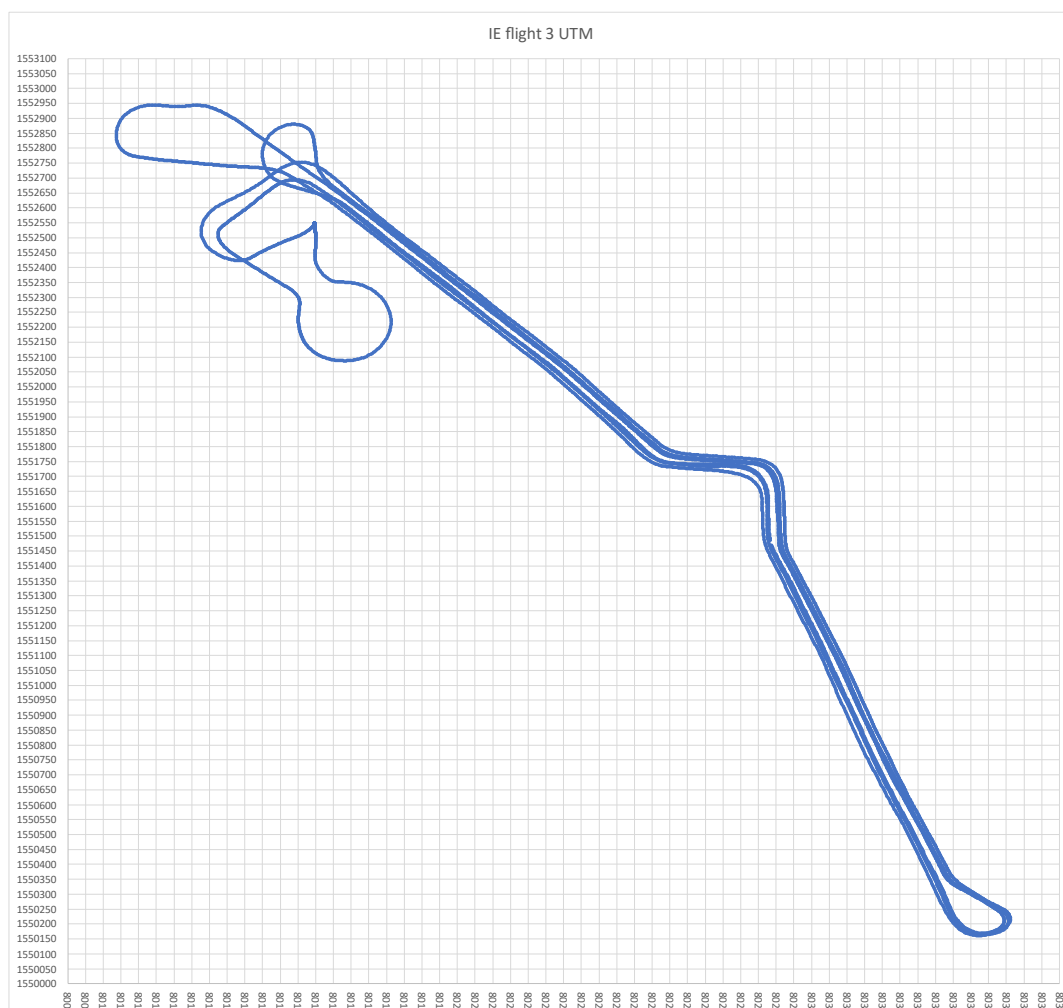
รูปที่ 39 กราฟแสดงข้อมูลค่าพิกัดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 1



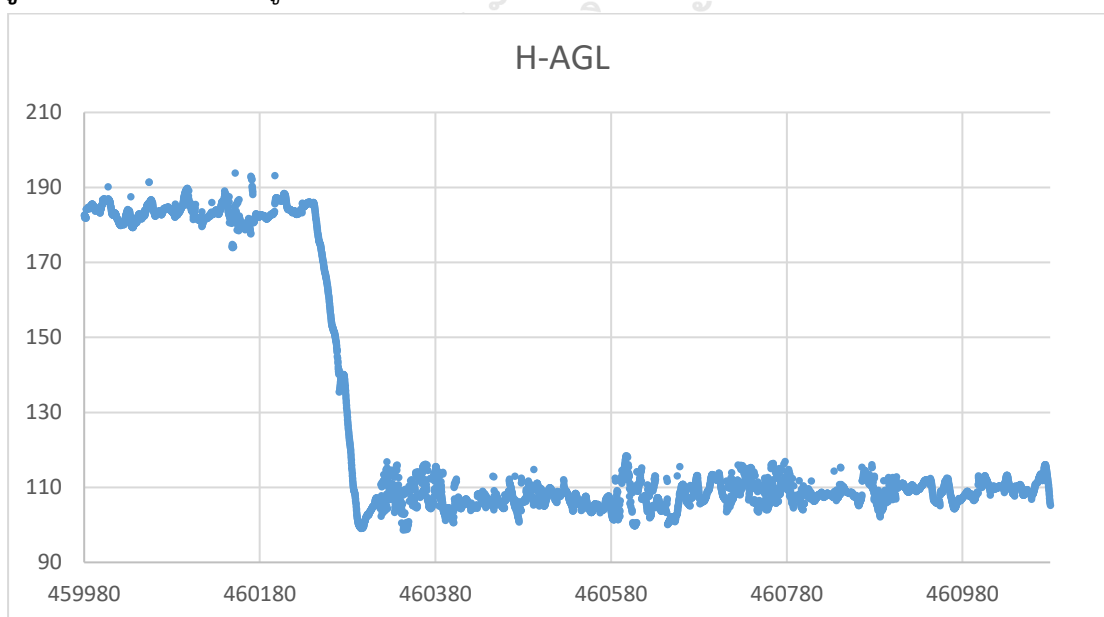
รูปที่ 40 กราฟแสดงข้อมูลค่าระดับขณะบินในเที่ยวบินที่ 1



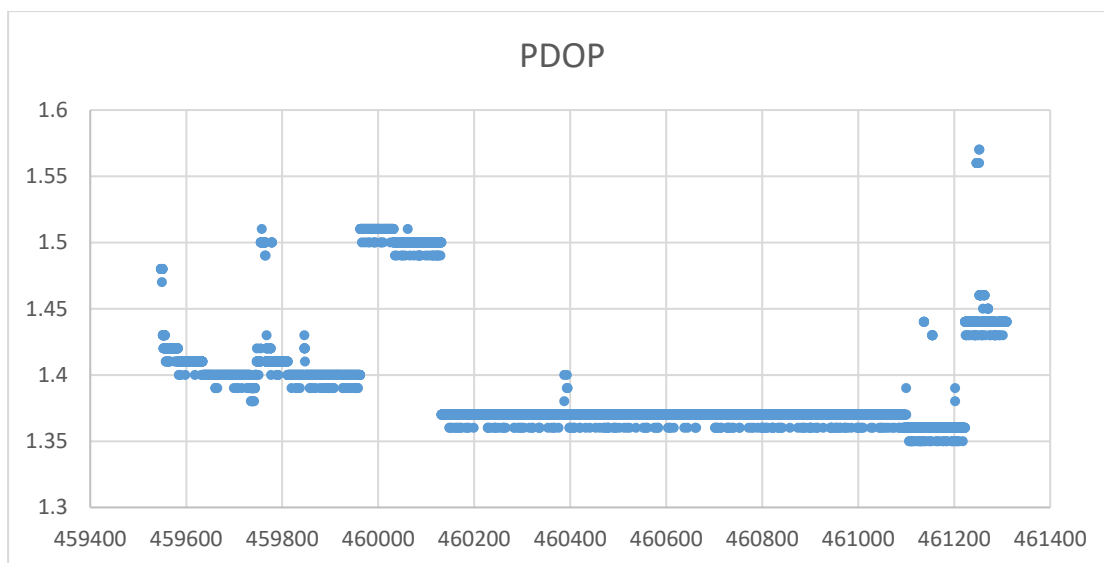
รูปที่ 41 กราฟแสดงข้อมูลค่า PDOP ตลอดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 1



รูปที่ 42 กราฟแสดงข้อมูลค่าพิกัดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 2



รูปที่ 43 กราฟแสดงข้อมูลค่าระดับขณะบินในเที่ยวบินที่ 2



รูปที่ 44 กราฟแสดงข้อมูลค่า PDOP ตลอดเส้นทางการบินในเที่ยวบินที่ 2



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ในงานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นที่การศึกษาความถูกต้องและความต่อเนื่องของข้อมูลค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดที่ประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงโดยทดสอบทั้งการรังวัดแบบสถิติและการรังวัดแบบจลน์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดสำหรับประยุกต์ใช้ในการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก โดยสามารถสรุปประเด็นการศึกษาในกรณีต่างๆได้ดังนี้

5.1.1 การทดสอบรังวัดแบบสถิติ

จากกรณีการรังวัดแบบสถิติด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแล้วประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลเชิงพาณิชย์ IE 8.7 โดยวิธีหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง มีค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัด CHC i80 พบว่าค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดที่ใช้วิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) บันทึกข้อมูลทุก 15 วินาทีเครื่องรับทั้ง 2 ประเภทสามารถให้ความถูกต้องมากขึ้นตามระยะเวลารับสัญญาณ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งต่ำกว่า 3 เซนติเมตร เมื่อรับสัญญาณเป็นเวลา 6 ชั่วโมงขึ้นไป และจากการทดสอบใช้มุมกันฟ้าที่ต่างกันในช่วงตอนการประมวลผล พบว่ามุมกันฟ้าที่เหมาะสมคือต่ำกว่า 7.5 องศา โดยอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดสามารถให้ความถูกต้องในระดับเดียวกับการใช้เครื่องรับแบบรังวัด Trimble R7 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวข้อมูลค่าพิกัดที่รังวัด 9 ชั่วโมงบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาทีจากการประมวลผลแบบจลน์ภายหลัง (PPK) พบว่าข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด U-blox F9P ที่ใช้ร่วมกับเสาอากาศ BT-147 มีค่าพิกัดทางราบและดิ่งมีการกระจายตัวเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำกว่า 2 เซนติเมตร และค่าพิกัดที่ได้จากเสาอากาศ HX-CH6601A มีการกระจายตัวทางราบเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำกว่า 1 เซนติเมตรและทางดิ่งมีเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำกว่า 2 เซนติเมตร ซึ่งถือว่าเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดสามารถให้ผลลัพธ์ค่าพิกัดที่มีความแม่นยำได้ในระดับที่ดีมาก สามารถให้ข้อมูลได้ต่อเนื่องทุกวินาทีไม่พบคลื่นหลุด แต่มีการแกว่งตัวมากเมื่อรับสัญญาณกลางแดดจัดเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง นับว่ามีประสิทธิภาพสูงและความคุ้มค่ามากเมื่อเทียบกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดที่มีราคาสูงกว่าหลายเท่า สามารถ

นำไปใช้งานรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายหรือใช้ในการหาค่าพิกัดหมุดสถานีฐานในการรังวัดด้วยดาวเทียมในพื้นที่ที่ไม่มีหมุดอ้างอิงอื่นใกล้เคียงหรือพื้นที่ห่างไกลได้เป็นอย่างดี

5.1.2 การทดสอบรังวัดแบบจลน์

5.1.2.1 การทดสอบบนรถยนต์เพื่อจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

กรณีทดสอบบนรถยนต์เพื่อจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงเพื่อเป็นค่าพิกัดอ้างอิงให้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดในการหาความถูกต้องข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เก็บข้อมูลที่ความเร็วเฉลี่ย 10 เมตร/วินาที และ 20 เมตร/วินาที จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลเชิงพาณิชย์ IE 8.7 พบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะตอนที่พาหนะมีการเคลื่อนที่ความถูกต้องทางราบที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดทั้งสองรุ่นดีกว่า 0.6 เมตร ทั้งในการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 10 และ 20 เมตรต่อวินาที ในส่วนของความถูกต้องทางตั้งข้อมูลจากเสาอากาศรับสัญญาณ BT-147 สามารถให้ความถูกต้องทางตั้งดีกว่า 1.2 เมตร และเสาอากาศรับสัญญาณ HX-CH6601A สามารถให้ความถูกต้องทางตั้งดีกว่า 1 เมตร เมื่อพิจารณาในช่วงที่จอดรับสัญญาณเพื่อให้ข้อมูลเข้าสู่เป็นเวลา 30 นาที เสาอากาศทั้ง 2 รุ่น สามารถให้ความถูกต้องทางราบได้ดีกว่า 9 เซนติเมตร และให้ความถูกต้องทางตั้งได้ดีกว่า 13 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าในการทดสอบที่ความเร็วต่างกันนั้น ความถูกต้องที่ได้จะเสาอากาศทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เป็นค่าแก้และทิศทางการประมวลผลที่ส่งผลต่อความถูกต้องมากกว่า ซึ่งการใช้ค่าแก้ MGEX ร่วมกับการประมวลทั้งไปและกลับ (Combine solution) สามารถให้ความถูกต้องได้ดีที่สุดทางราบดีกว่า 1 เมตรและทางตั้งดีกว่า 1.2 เมตร อย่างไรก็ตามความถูกต้องที่ได้มานั้นอาจยังไม่เพียงพอสำหรับการใช้ระบุตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่มีความละเอียดสูงหรือการหาวิถีการเคลื่อนที่ความถูกต้องสูงสำหรับการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่ต้องการความถูกต้องสูงมากหรือต้องการอ้างอิงค่าพิกัดโดยตรง (Direct Georeferencing) ต้องมีการทดสอบประมวลผลรวมกับการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายในกระบวนการถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศต่อไป

5.1.2.2 การทดสอบบนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

กรณีทดสอบรับสัญญาณดาวเทียม GNSS บนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจากการประมวลผลด้วยโปรแกรมรหัสเปิด RTKLIB สามารถให้ผลลัพธ์ค่าพิกัดได้ทุก

0.2 วินาที ไม่พบคลื่นหลุด ค่า PDOP เฉลี่ยของทั้ง 2 เทียวบินอยู่ที่ 1.28 และ 1.39 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการทำงานจริงบนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กสามารถรับดาวเทียมได้มากและข้อมูลมีความต่อเนื่องมากกว่าการทดสอบบนรถยนต์ ผลลัพธ์ค่าพิกัดมีความต่อเนื่องดีไม่พบคลื่นหลุด แต่ข้อมูลค่าระดับที่ได้มีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้

จากผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดมีศักยภาพเพียงพอที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานสนับสนุนการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับฯ ในส่วนภาคพื้นดิน ที่ยังคงต้องการจุดควบคุมภาพถ่ายที่มีความละเอียดถูกต้องสูงอยู่ โดยสามารถให้ความถูกต้องได้ในระดับเดียวกับเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดในการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูง ซึ่งเป็นประโยชน์มากสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ที่ไม่มีหมุดอ้างอิงหรือหมุดควบคุมใกล้เคียง อีกทั้งการหาตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ยังสามารถให้ความถูกต้องทางราบได้ในระดับ 1 เมตร ซึ่งเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้อีกมาก

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ

5.2.1 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดที่ใช้เพื่อหาค่าอ้างอิงในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม BEIDOU ได้ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบข้อมูลดิบในการรังวัดได้โดยตรง เช่นจำนวนดาวเทียมที่รับได้ ค่า PDOP เป็นต้น

5.2.3 ต้องมีการเตรียมแบตเตอรี่สำรองให้กับเครื่องรับแบบรังวัดในการรับสัญญาณต่อเนื่องหลายวัน

5.2.3 ในการทดสอบพบว่าคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลรังวัดมีปัญหาในการจ่ายไฟไม่ต่อเนื่อง จึงต้องเปลี่ยนเครื่องและทำการรังวัดใหม่

5.2.4 พื้นที่ทดสอบการรังวัดแบบจลน์บนรถยนต์มีบางจุดที่มีป้ายบอกทางขนาดใหญ่และสะพานที่อาจบดบังสัญญาณดาวเทียม ส่งผลต่อความถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง

5.2.5 เสาอากาศชนิด helical coil ต้องใช้ตัวจับเฉพาะเพื่อให้ติดตั้งบนหลังคาารถได้ ต้องทำการพิมพ์ 3 มิติก่อน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เส้าอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ยังไม่ได้ผ่านการ calibrate หา PCV หากต้องการความถูกต้องที่มากขึ้น ควรมีการ calibrate ก่อน

5.3.2 ต้องระมัดระวังเรื่องการวัดความสูงของเส้าอากาศและต้องใส่ความสูงของเส้าอากาศในโปรแกรมประมวลผลให้ถูกต้องเนื่องจากโปรแกรมประมวลผลไม่รู้จัก Antenna Profile ของเส้าอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด แนะนำให้ใช้ความสูงถึงศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณของเส้าอากาศ (Antenna Phase Center : APC) แทนการใช้จุดอ้างอิงเส้าอากาศ (Antenna reference point : ARP)

5.3.3 ในงานวิจัยนี้ไม่ได้รับสัญญาณดาวเทียมครบทุกระบบ ดังนั้นควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของการรับสัญญาณจากการรับสัญญาณดาวเทียมครบทุกระบบด้วย

5.3.4 หากมีการประยุกต์ใช้ IMU ในการรังวัดแบบจลน์จะมีส่วนช่วยให้ข้อมูลดีขึ้นเมื่อผ่านสิ่งบดบังสัญญาณ

5.3.5 ในการรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงเป็นการใช้ค่าแก่นาฬิกาและวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงเป็นสำคัญ หากใช้ค่าแก้ที่ให้บริการโดย IGS ค่าพิกัดที่ได้จะอยู่บนกรอบอ้างอิงในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล โดยจะมีความแตกต่างกับกรอบอ้างอิงจากผู้ให้บริการสถานี CORS ในประเทศไทย ขณะที่ทำการเก็บข้อมูลวิจัยนั้น กรมที่ดินใช้ค่าพิกัดอยู่บนกรอบอ้างอิง ITRF2005 epoch2008.11 และกรมแผนที่ทหารใช้ค่าพิกัดอยู่บนกรอบอ้างอิง ITRF2008 epoch2013.8 แต่ในปัจจุบันนี้กรมแผนที่ทหารได้มีการประกาศใช้ ITRF2014 epoch 2020.17 เป็นกรอบอ้างอิงของไทยเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมประมวลผลเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีการตั้งค่าเพื่อแปลงกรอบค่าพิกัดได้ แต่หากใช้โปรแกรมประมวลผลรหัสเปิดเช่น RTKLIB ผลลัพธ์ค่าพิกัดที่ได้จากขึ้นอยู่กับกรอบอ้างอิงค่าพิกัดของข้อมูลค่าแก้ ดังนั้นผู้ใช้ต้องตระหนักถึงความต่างของค่าพิกัดที่ได้เพื่อแปลงค่าพิกัดให้สอดคล้องกับกรอบพิกัดอ้างอิงที่ใช้งานด้วย

บรรณานุกรม

- Benassi, F., Dall'Asta, E., Diotri, F., Forlani, G., Morra di Cella, U., Roncella, R., & Santise, M. (2017). Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with GNSS-supported aerial triangulation. *Remote Sensing*, 9(2), 172.
- Cai, C. S., Gao, Y., Pan, L., & Zhu, J. J. (2015). Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. *Advances in Space Research*, 56(1), 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.04.001>
- El-Mowafy, A. (2011). Precise Point Positioning in the airborne mode. International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology,
- Estey, L. H., & Meertens, C. M. (1999). TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS solutions*, 3(1), 42-49.
- Farah, A. (2017). Variation of static-PPP positioning accuracy using GPS-single frequency observations (Aswan, Egypt). *Artificial Satellites*, 52(2), 19-26.
- Grayson, B., Penna, N. T., Mills, J. P., & Grant, D. S. (2018). GPS precise point positioning for UAV photogrammetry. *The photogrammetric record*, 33(164), 427-447.
- Gross, J. N., Watson, R. M., D'Urso, S., & Gu, Y. (2016). Flight-Test Evaluation of Kinematic Precise Point Positioning of Small UAVs. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 1259893. <https://doi.org/10.1155/2016/1259893>
- Gurturk, M., & Soykan, M. (2022). Accuracy assessment of kinematic PPP versus PPK for GNSS flights data processing. *Survey Review*, 54(382), 48-56.
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Turk, G., & Sterle, O. (2020). Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring Purposes. *Sensors*, 20(16), 4375.
- Hamza, V., Stopar, B., & Sterle, O. (2021). Testing the performance of multi-frequency low-cost gnss receivers and antennas. *Sensors*, 21(6), 2029.
- He, K., Xu, T., Förste, C., Petrovic, S., Barthelmes, F., Jiang, N., & Flechtner, F. (2016). GNSS precise kinematic positioning for multiple kinematic stations based on a priori distance constraints. *Sensors*, 16(4), 470.
- Li, X., Huang, J., Li, X., Shen, Z., Han, J., Li, L., & Wang, B. (2022). Review of PPP-RTK:

- achievements, challenges, and opportunities. *Satellite Navigation*, 3(1), 28.
<https://doi.org/10.1186/s43020-022-00089-9>
- Liu, F., Liu, Y., Nie, Z., & Gao, Y. (2021). Precise single-frequency positioning using low-cost receiver with the aid of lane-level map matching for land vehicle navigation. *The Journal of Navigation*, 74(1), 24-37.
- Lu, L., Ma, L., Wu, T., & Chen, X. (2019). Performance Analysis of Positioning Solution Using Low-Cost Single-Frequency U-Blox Receiver Based on Baseline Length Constraint. *Sensors*, 19(19), 4352.
- Parajuli, B. (2020). Performance analysis of different positioning modes in RTKLIB Software. In.
- Sun, H., Li, L., Ding, X., & Guo, B. (2016). The precise multimode GNSS positioning for UAV and its application in large scale photogrammetry. *Geo-spatial Information Science*, 19(3), 188-194.
- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2013). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738-2745.
- Wielgocka, N., Hadas, T., Kaczmarek, A., & Marut, G. (2021). Feasibility of Using Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receivers for Land Surveying. *Sensors*, 21(6), 1956.
- Wiśniewski, B., Bruniecki, K., & Moszyński, M. (2013). Evaluation of RTKLIB's Positioning Accuracy Using low-cost GNSS Receiver and ASG-EUPOS. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7(1), 79--85.
- Xue, C., Psimoulis, P., Zhang, Q., & Meng, X. (2021). Analysis of the performance of closely spaced low-cost multi-GNSS receivers. *Applied Geomatics*, 1-21.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เจตนิพัทธ์ กิตติบุญเกศ
วัน เดือน ปี เกิด	21 ธันวาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	82/131 หมู่ 20 ต.บางพลีใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ
ผลงานตีพิมพ์	เจตนิพัทธ์ กิตติบุญเกศ, ธิทัต เจริญกาลัญญูตา, ไพศาล สันติธรรมนนท์และ ธีรรัช มณีนาค (2564) "การประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้องของ เครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบสองความถี่ สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานด้านอากาศยานไร้คนขับ ด้วยวิธีการหา ตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติครั้งที่ 26, 23-25 มิถุนายน 2564