

ประสิทธิภาพและความถูกต้องทางตำแหน่งจากเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบสองความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง
THE PERFORMANCE AND ACCURACY EVALUATION OF LOW COST DUAL FREQUENCY GNSS RECEIVER & ANTENNA USED FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE APPLICATION BY USING PRECISE POINT POSITIONING TECHNIQUE

เจตนิพัทธ์ กิตติบุญเกศ¹, ธิทัต เจริญกาลัญญา¹, ไพศาล สันติธรรมนนท์¹, ธีรรัชช์ มณีนาถ²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

² บริษัทอินฟราพลัสจำกัด, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

*Corresponding author address: 6270376921@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบนำทางด้วยดาวเทียม (GNSS) กับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กในงานสำรวจ ความถูกต้องของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศขึ้นกับความถูกต้องทางตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดินและตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมบนอากาศยาน แม้การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมพัทธ์ สามารถให้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูง แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่ เช่น ความถูกต้องที่ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากสถานีฐาน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ที่ใช้เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวและความถูกต้องไม่ขึ้นกับระยะจากสถานีฐานใด ๆ โดยทำการทดสอบเครื่องรับ (u-blox F9P) และเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดทั้งในการรังวัดแบบสถิตและแบบจลน์ ในการรังวัดแบบจลน์ทดสอบโดยติดตั้งเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดคู่กับเครื่องรับและเสาอากาศแบบยี่ห้อเด็กคุณภาพสูงบนรถยนต์แล้วรับสัญญาณบนทางด่วน เป็นการจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก ที่ความเร็วเฉลี่ย 10 และ 20 เมตรต่อวินาที เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดเมื่อเทียบกับเครื่องรังวัดแบบยี่ห้อเด็กคุณภาพสูงเมื่อประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง พบว่าความถูกต้องทางตำแหน่งจากการรังวัดแบบสถิตของเครื่องรับและเสาอากาศราคาประหยัดสามารถให้ความถูกต้องในทางราบและทางตั้งดีกว่า 5 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับเครื่องรับแบบยี่ห้อเด็กและในการรังวัดแบบจลน์ความถูกต้องทางราบอยู่ในระดับ 0.12-0.53 เมตร และทางตั้งอยู่ในระดับ 0.17-0.8 เมตร

คำสำคัญ: การหาตำแหน่งจุดเดี่ยว ความละเอียดสูง, การประเมินประสิทธิภาพ, เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด, อากาศยานไร้คนขับ, ระบบนำทางด้วยดาวเทียม

Abstract

Nowadays, Global Navigation Satellite Systems and small Unmanned Aerial Vehicles (sUAV) technologies are applying to surveying. The aerial photogrammetric mapping accuracy depends on the accuracy of ground control point (GCP) and Aircraft's GNSS position. Even the relatively surveying technique, can provide high accuracy coordinates. However, there is still some limitation of use. For example, the accuracy result depends on the distance from base station. In this research, Precise Point Positioning technique is using single receiver. Moreover, the accuracy is independent of base station distance. The test will be conducted on GNSS receiver (u-blox F9P) and Antenna including static and kinematic survey. The kinematic surveying will be tested in highway by installing low-cost GNSS receiver (u-blox F9P) and Antenna with high quality geodetic on vehicle. It is the UAV working simulation at average speed at 10 and 20 meters per second. The research's purpose is to compare the positioning accuracy between low-cost receiver & antennas and high-quality geodetic receiver & antenna by using the PPP technique. Found out that the positioning accuracy from low-cost receiver in statistic survey achieved the better accuracy of 5 centimeters in both directions including horizontal and vertical. It is the same accuracy level by using high quality geodetic receiver. A kinematic survey, the accuracy is 0.12-0.53 meters in horizontal and 0.17-0.8 meters in vertical.

Keywords: Precise Point Positioning Technique, Performance, Low-cost GNSS receiver, Unmanned Aerial Vehicle

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบนำทางด้วยดาวเทียม GNSS ถูก

ประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย การหาค่าพิกัดด้วยการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS มีวิธีการได้มาซึ่งข้อมูลและวิธีประมวลผลที่ใช้กันทั่วไปหลายรูปแบบตามความละเอียด

ถูกต้องที่ต้องการและคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ ปัจจุบันมีการพัฒนา เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมให้มีราคาถูกลง น้ำหนักเบา และใช้พลังงานน้อยลง [1] ไม่กี่ปีที่ผ่านมาเครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียม ราคาประหยัดที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้หลายระบบ ประเภทสองความถี่และเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมหลากหลาย แบบเข้าสู่ตลาดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นที่สนใจของผู้ใช้ทั่วไป นักวิจัย และคนในวงการสำรวจที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานสำรวจจริงวัด เช่น การตรวจจับการเคลื่อนตัวของพื้นดินหรือสิ่งปลูกสร้าง [2] การหาค่าคลาดเคลื่อนรวมทางตั้งจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก (sUAV) สามารถประหยัดเวลาและมีความยืดหยุ่นในการทำงาน [5] ซึ่งความละเอียดถูกต้องของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก UAV เช่น แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ ขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จาก GNSS บนอากาศยาน [6] ซึ่งใช้สำหรับการหาตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพหรืออุปกรณ์อื่น ๆ รวมไปถึงความถูกต้องของจุดความคุมภาคพื้นดิน ความถูกต้องที่ได้จาก GNSS บนอากาศยานช่วยลดความต้องการใช้จุดความคุมภาคพื้นดินได้ด้วย [7] ซึ่งจะยังประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายได้ โดยทั่วไปการบินถ่ายภาพหรือเก็บข้อมูลของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กแบบปีกหมุน (multi-rotor) ใช้ความเร็วบินประมาณ 10 เมตรต่อวินาที และแบบปีกตรึง (Fixed-wing / VTOL) ใช้ความเร็วบินประมาณ 20 เมตรต่อวินาที สำหรับการถ่ายภาพภูมิประเทศ 1:1000 หรือ 1:500 ต้องการจุดควบคุมภาคพื้นดิน ขนาด 5 เซนติเมตร ความละเอียดถูกต้องในการระบุตำแหน่งทางราบและทางตั้งเท่ากับ 0.25 หรือ 0.125 เมตร [8] ตามความต้องการในการใช้งาน

แม้ในปัจจุบันจะมีการใช้การรังวัดด้วยดาวเทียมในการหาตำแหน่งของอากาศยานด้วยการรังวัดแบบจลน์ทันที (RTK) ที่สามารถให้ค่าพิกัดได้ทันทีและมีความถูกต้องสูง ซึ่งสามารถให้ความถูกต้องทางราบที่ 2-3 เซนติเมตร และทางตั้งที่ 2-10 เซนติเมตร [9] และการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (PPK) ที่ให้ความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง 1.5 - 2.2 เซนติเมตร [10] แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่บ้าง เช่น ความถูกต้องที่ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากสถานีฐาน ยิ่งไกลจากสถานี ความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือจะยิ่งลดลง การทำงานแบบ RTK ต้องมีการสื่อสารกับสถานีฐานผ่านคลื่นวิทยุหรืออินเทอร์เน็ต ซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มทำให้มีค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น และประสิทธิภาพการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและสัญญาณคลื่นวิทยุยังขึ้นอยู่กับพื้นที่และหากใช้ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (NRTK) พื้นที่ที่สามารถใช้งานบริการนี้จะถูกจำกัดอยู่เฉพาะพื้นที่ของโครงข่ายและยังต้องเสียค่าบริการหรือต้องขอรหัสผู้ใช้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงสนใจการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise point positioning: PPP) ที่สามารถใช้

เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวก็สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติม อาศัยเพียงข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง และค่าแก้ค่าพิกัดดาวเทียม ซึ่งมีหน่วยงานที่เผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย เช่น International GNSS Service (IGS) เป็นต้น ข้อมูลจะถูกนำมาใช้ในการประมวลผลเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยไม่ขึ้นกับระยะจากสถานีฐานใด ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์มากสำหรับการใช้งานในพื้นที่ใหญ่ หรือพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นทางยาว เช่นงานสำรวจเส้นทาง หรือการเก็บข้อมูลภูมิประเทศเพื่อทำการออกแบบแนว

งานวิจัยจึงนี้มุ่งประเด็นไปที่การเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำทางตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด (ยี่ห้อ u-blox รุ่น F9P) รวมไปถึงประสิทธิภาพของเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด ในการทดสอบใช้เครื่องรับราคาประหยัดร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด (ยี่ห้อ Beitian รุ่น BT-147 และ ยี่ห้อ Haxox รุ่น HX-CH6601A) ทั้งในการรังวัดแบบสถิตและแบบจลน์ และประเมินความแม่นยำทางตำแหน่งที่ได้จากการรังวัดแบบจลน์ โดยทำการจำลองลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก ในการเก็บข้อมูลที่ความเร็วเคลื่อนที่เฉลี่ย 10 และ 20 เมตรต่อวินาที โดยทำการติดตั้งเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดคู่กับเครื่องรับและเสาอากาศแบบยี่ห้อคุณภาพสูงบนรถยนต์ และขับรถรับสัญญาณบนทางด่วน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำรวจรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับทั้งในงานภาพถ่ายทางอากาศ งานสำรวจทางและอื่น ๆ ตามมาตรฐานความถูกต้องทางตำแหน่งการรังวัด

2. เครื่องมือที่ใช้และการรวบรวมข้อมูล

2.1. เครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด

เครื่องรับ SparkFun RTK Surveyor ซึ่งใช้โมดูล ZED-F9P สามารถรับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมได้ 4 กลุ่ม คือ GPS, GLONASS, Galileo และ BeiDou ทำการเชื่อมต่อเครื่องรับกับแล็ปท็อปคอมพิวเตอร์ด้วยสาย usb type C เพื่อตั้งค่าบอร์ดรับสัญญาณและบันทึกข้อมูล ด้วยโปรแกรม U-center 20.10 เชื่อมต่อกับเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัด 2 รุ่น คือ เสาอากาศราคาประหยัด ยี่ห้อ Beitian รุ่น BT-147 ราคาประมาณ 70 USD เชื่อมต่อกับบอร์ดด้วยสาย TNC-SMA และ เสาอากาศประเภท helix ยี่ห้อ haxox รุ่น HX-CH6601A ราคาประมาณ 100 USD เชื่อมต่อกับบอร์ดด้วยสาย SMA-SMA ซึ่งเสาอากาศทั้ง 2 รุ่น ผู้ผลิตได้ให้ข้อมูล Phase center offset (PCO) ของ L1 และ L2 ช่วย เพิ่มความถูกต้องทางตั้ง

2.2. ข้อมูลสถานีอ้างอิงดาว

ใช้ข้อมูลสัญญาณดาวเทียม 1 Hz จากสถานี DPT9 ซึ่งเป็น

สถานีอ้างอิงถาวรของกรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นสถานีฐานในการประมวลผลเส้นฐานแบบสถิตสำหรับหมุดตรวจสอบ 3 หมุด (SV1, SV2 และ SV3) อยู่บริเวณตาดฟ้าอาคารศาลวิชานินเทส (ตึกวิศวกรรมสำรวจ) มีค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ CHC รุ่น i80 รูปที่ 1 รับสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต 3 ชั่วโมง ประมวลผลเส้นฐานแบบสถิต ระยะเส้นฐาน 5 กิโลเมตร และใช้ข้อมูลสัญญาณดาวเทียม 1 Hz จากสถานี PKKT ซึ่งเป็นสถานีอ้างอิงถาวรของกรมที่ดิน เป็นสถานีฐานในการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (Post Processed Kinematic: PPK) โดยค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงถาวร DTP9 และ PKKT ได้จากประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจากข้อมูลต่อเนื่อง 7 วัน ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GIPSY ค่าพิกัดอยู่บนกรอบระบบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF 2014 epoch 2020.17 ค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงถาวรแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าพิกัด E N และความสูงเหนือทรงรีของสถานีฐานที่ใช้ในการประมวลผลจุดตรวจสอบ หน่วยเป็นเมตร

สถานี	E	N	height
DPT9	670087.789	1521382.867	38.019
PKKT	666394.581	1538584.310	13.402



รูปที่ 1 การรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิตสำหรับหมุดตรวจสอบด้วย CHC i80 บริเวณตาดฟ้าอาคารศาลวิชานินเทส (ตึกวิศวกรรมสำรวจ) หมุด SV01 SV02 SV03 ตามลำดับจากซ้ายไปขวา

2.3. การเก็บข้อมูลภาคสนาม

2.3.1. การรังวัดแบบสถิต

วันที่ 28-29 มกราคม 2564 รังวัดแบบสถิต ที่หมุดบริเวณ

ตาดฟ้าอาคารศาลวิชานินเทส (ตึกวิศวกรรมสำรวจ) จำนวน 3 หมุด (SV1, SV2 และ SV3) ดังรูปที่ 2 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 ทำการบันทึกข้อมูลทุก 15 วินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับจากเครื่องรับราคาประหยัด u-blox ZED-F9P ที่ใช้ร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัด เปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณแบบยี่ห้อเดคิกคุณภาพสูง Trimble R7 ที่ใช้ร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณรุ่น Zephyr Model 2 โดยในการรับสัญญาณเลือกรับเฉพาะดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 2 การรับสัญญาณดาวเทียมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

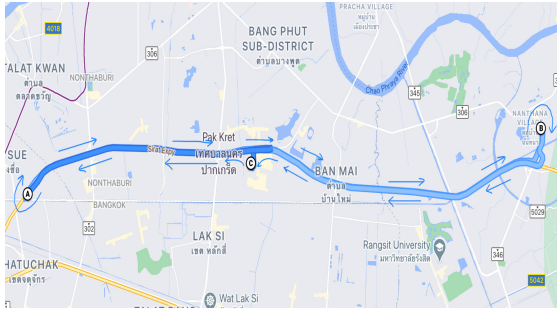
ตารางที่ 2 แสดงอุปกรณ์รับสัญญาณประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณกับเสาอากาศรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

Point	Receiver	Antenna
SV1	u-blox ZED F9P	BT-147
SV2	u-blox ZED F9P	Helix HX-CH6601A
SV3	Trimble R7	Trimble Zephyr 2

2.3.2. การรังวัดแบบจลน์

การทดสอบแบบจลน์ทำการเก็บข้อมูลบนทางด่วนบริเวณเมืองทองธานี (ทางพิเศษช่อครีถยา ด่านประชาชื่น ถึงด่านบางขุน) แสดงเส้นทางการรับสัญญาณ ดังรูปที่ 3 ทดสอบโดยติดตั้งเสาอากาศรับสัญญาณที่คานเหล็กบนหลังคนรถ และขับรถรับสัญญาณที่มีความเร็วประมาณ 10 m/s หรือ 36km/h และที่ความเร็วประมาณ 20 m/s หรือ 72 km/h เพื่อจำลองการทำงานของ UAV โดยด้านหน้าใช้เครื่องรับสัญญาณ F9P คู่กับเสาอากาศรับสัญญาณ BT-147 และด้านหลังใช้เครื่องรับแบบยี่ห้อเดคิก Trimble

R7 คู่กับเสาอากาศรับสัญญาณ Trimble Zephyr 2 ดังรูปที่ 4 ทำการรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GPS และ GLONASS บันทึกข้อมูลทุก 0.2 วินาที โดยเริ่มขับออกจากลานจอดรถเมืองทองธานี (จุด C) ไปถึงด่านประชาชื่น (จุด A) เป็นระยะทางประมาณ 11 กิโลเมตร กลับรถและขับรับสัญญาณจากด่านประชาชื่น จุด A ไปจนถึงด่านบางพูน (จุด B) เป็นระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร กลับรถและขับรับสัญญาณกลับจากด่านบางพูนไปจอดรถที่จุดเริ่มต้นสำรวจ ทำการรับสัญญาณดาวเทียม 4 รอบ ดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 เส้นทางการวิ่งรับสัญญาณทางพิเศษอุดรรัถยา จุด A B และ C คือด่านประชาชื่น ด่านบางพูน ลานจอดรถเมืองทองธานี ตามลำดับ



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์บนรถหลังการถยนต์เพื่อทำการวิ่งวัดแบบจลน์

ตารางที่ 3 ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่เพื่อเก็บข้อมูลและอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหลังการถยนต์

รอบที่	ความเร็ว	อุปกรณ์ หน้า, หลัง
1	10 m/s	F9P + BT-147, R7 + Zephyr 2
2	20 m/s	F9P + BT-147, R7 + Zephyr 2
3	10 m/s	F9P + helix, R7 + Zephyr 2
4	20 m/s	F9P + helix, R7 + Zephyr 2

3. การประมวลผลและผลการศึกษา

ใช้โปรแกรมประมวลผลเชิงพิกัด inertial explorer 8.7 ในการประมวลผลข้อมูลดิบจากการวิ่งสัญญาณดาวเทียมทุกแบบ

3.1. ข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบ

3.1.1. ค่าพิกัดหมุดตรวจสอบ

ประมวลผลเส้นฐานแบบสถิต โดยใช้สถานี DPT9 เป็นสถานีฐาน ค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบยี่ห้อเดคิกคุณภาพสูง CHC i80 ซึ่งใช้เป็นจุดตรวจสอบ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าพิกัดและความสูงเหนือทรวงรีของจุดตรวจสอบ SV1 SV2 และ SV3 หน่วยเป็นเมตร บนกรอบอ้างอิง ITRF2014 epoch 2020.17

สถานี	E	N	height
SV1	665679.329	1518994.258	-14.1576
SV2	665680.195	1518993.036	-14.1798
SV3	665681.015	1518991.792	-14.1711

3.1.2. ตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการทดสอบแบบจลน์

ใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณแบบยี่ห้อเดคิกคุณภาพสูง Trimble R7 ที่ประมวลผลแบบ PPK เป็นตำแหน่งอ้างอิง ใช้ข้อมูลช่วงที่รับสัญญาณได้ต่อเนื่องและมีผลลัพธ์เป็น Fixed เนื่องจากการรับสัญญาณบนทางด่วนในบางจุดมีป้ายบอกทางขนาดใหญ่และมีตึกสูงด้านข้าง อาจทำให้เกิดคลื่นหลุดได้ โดยระยะห่างของจุดศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณ (Phase center) ของเสาอากาศอ้างอิงจาก Zephyr 2 ไปถึงเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดแสดงในตารางที่ 5 ความถูกต้องของระยะห่างทางราบและทางตั้งที่ได้เทียบกัน epoch ต่อ epoch โดยระยะห่างทางราบและทางตั้งที่ใช้เป็นระยะอ้างอิง ได้จากเอกสารข้อมูลของอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหลังการถยนต์ Trimble MX2 และการวัดระยะด้วยเทป

ตารางที่ 5 ระยะห่างทางราบและทางตั้งจากจุดศูนย์กลางเฟสรับสัญญาณของเสาอากาศ (Phase Center) ที่ติดตั้งบนหลังการถยนต์ หน่วยเป็นเมตร

Ant#1	Ant#2	ทางราบ	ทางตั้ง
BT-147	Zephyr 2	1.9565	0.0995
HX-CH6601A	Zephyr 2	1.9565	0.0538

3.2. ประมวลผลและเปรียบเทียบผลลัพธ์

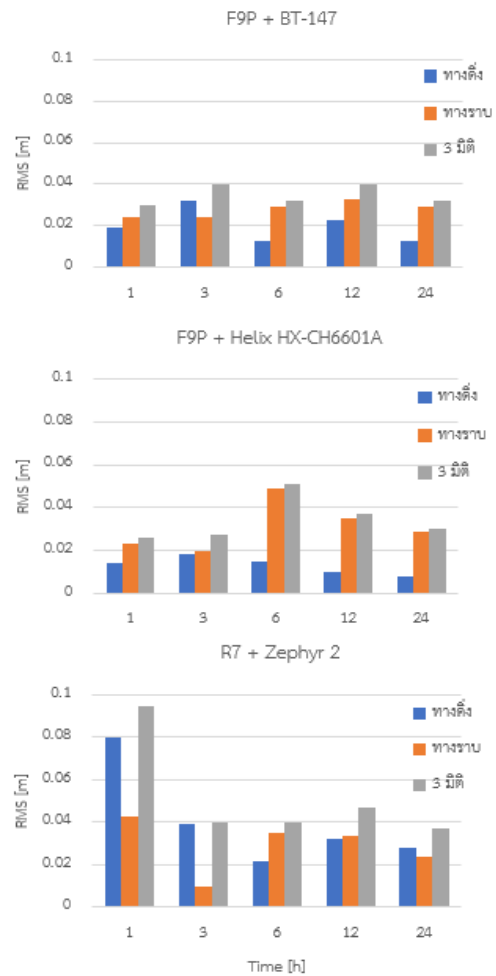
3.2.1. แบบสถิต

ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดใช้โปรแกรม RTKCONV ver.demo5 b33f แปลงไฟล์นามสกุล .ubx ให้เป็น RINEX จะได้ไฟล์ข้อมูล .obs และ .nav ทำการตัดข้อมูลเป็นช่วงเวลา 1/3/6/12/24 ชั่วโมงด้วยโปรแกรม TEQC แล้วประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ใช้ค่าแก้ค่าพิกัดดาวเทียมและวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง (CODE Final Product) จาก International GNSS Service (IGS) แล้วคำนวณหาค่าความถูกต้องในรูปแบบของค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง

ของความคลาดเคลื่อน (RMSE) ทางตำแหน่ง ในทางตั้ง ทางราบ และใน 3 มิติ แสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 5 พบว่าข้อมูลจากเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดที่ประมวลผลด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง สามารถให้ความถูกต้องได้ดีในระดับเดียวกับเครื่องรับแบบยี่ห้อเด็กคุณภาพสูง โดยเครื่องรับ F9P ที่ใช้คู่กับเสาอากาศราคาประหยัดทั้งสองรุ่น สามารถให้ความถูกต้องทางตั้งได้ในระดับ 0.8-3.2 เซนติเมตร และทางราบในระดับ 2-4.9 เซนติเมตร

ตารางที่ 6 ค่า RMS ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งใน ทางราบ ทางตั้ง และ 3 มิติ จากข้อมูลที่ได้รับสัญญาณเป็นเวลา 1/3/6/12/24 ชั่วโมง หน่วยเป็นเมตร

อุปกรณ์	เวลา	1D	2D	3D
F9P, BT-147	1h	0.019	0.024	0.030
	3h	0.032	0.024	0.040
	6h	0.013	0.029	0.032
	12h	0.023	0.033	0.040
	24h	0.013	0.029	0.032
F9P, Helix	1h	0.014	0.023	0.026
	3h	0.018	0.020	0.027
	6h	0.015	0.049	0.051
	12h	0.010	0.035	0.037
	24h	0.008	0.029	0.030
R7, Zephyr2	1h	0.080	0.043	0.095
	3h	0.039	0.010	0.040
	6h	0.022	0.035	0.040
	12h	0.032	0.034	0.047
	24h	0.028	0.024	0.037



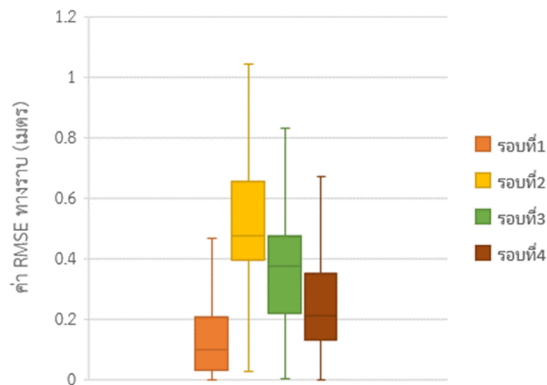
รูปที่ 5 กราฟแสดงค่า RMSE ทางตำแหน่งจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

3.2.2. แบบจำลอง

เปรียบเทียบระยะห่างทางราบและทางตั้งของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจากการรังวัดแบบจลน์ (Kinematic PPP) กับการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (PPK) โดยใช้ตำแหน่งอ้างอิงที่ด้วยวัดด้วยเทปจากตำแหน่งศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบประหยัด ไปถึงศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบยี่ห้อเด็กคุณภาพสูง Zephyr2 ตารางที่ 7 แสดงค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (RMSE) ทางตำแหน่ง ที่ได้จากการประมวลผลแบบ PPP kinematic โดยเปรียบเทียบข้อมูลเฉพาะช่วงที่รับสัญญาณได้ต่อเนื่องและประมวลผลแบบ PPK ได้ผลลัพธ์แบบ fixed ambiguity จากการทดสอบด้วยเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดรุ่น BT-147 พบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ของระยะห่างทางราบน้อยที่สุด 0.126 เมตร และทางตั้ง 0.171 เมตร ที่การรับสัญญาณที่มีความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที และจากการทดสอบด้วยเสาอากาศรับสัญญาณราคาประหยัดประเภท Helix รุ่น HX-CH6601A พบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ของระยะห่างทางราบน้อยที่สุด 0.242 เมตร และทางตั้ง 0.293 เมตร ที่การรับสัญญาณที่มีความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ย RMSE ระยะห่างทางราบและทางตั้ง จากการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ หน่วยเป็น เมตร

รอบที่	อุปกรณ์	ความเร็ว	ทางตั้ง	ทางราบ
1	F9P, BT-147	10 m/s	0.171	0.126
2	F9P, BT-147	20 m/s	0.799	0.534
3	F9P, Helix	10 m/s	0.584	0.346
4	F9P, Helix	20 m/s	0.293	0.242



รูปที่ 6 ค่า RMSE แสดงความถูกต้องทางราบ (2มิติ) ที่ได้จากการทดสอบรับวัดแบบจลน์ทั้ง 4 รอบ ด้วยแผนภูมิบ็อกซ์และวิสกเกอร์ โดยมีการตัดข้อมูลที่เป็ค่าผิดปกติ (outlier) ออก

4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการรับวัดด้วยดาวเทียมเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบประหยัดแบบสองความถี่ที่ใช้ร่วมกับเสาอากาศรับสัญญาณราคาต่ำในการรับวัดแบบสถิต แล้วประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง สามารถให้ความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับเดียวกับเครื่องรับสัญญาณแบบยี่ห้อเดดิก ซึ่งให้ความถูกต้องทางราบดีกว่า 5 เซนติเมตร ความถูกต้องทางตั้งดีกว่า 10 เซนติเมตร หากรับวัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่าความถูกต้องทางตั้งที่ได้จะดีกว่า 4 เซนติเมตร

ในการรับวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ด้วยเครื่องรับและเสาอากาศราคาประหยัดเมื่อเทียบกับเครื่องรับแบบยี่ห้อเดดิกคุณภาพสูง ที่ความเร็วเฉลี่ย 10 และ 20 เมตรต่อวินาที พบว่าสามารถให้ความถูกต้องทางราบเฉลี่ยอยู่ที่ 30 เซนติเมตร โดยมีค่าคลาดเคลื่อนในทางราบมากสุดในระดับเมตรในการทดสอบที่ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที ซึ่งอาจเกิดจากสิ่งบดบังการรับสัญญาณดาวเทียมเช่นป้ายบอกทางขนาดใหญ่บนทางด่วนหรือตึกสูงรอบข้าง เป็นต้น หากทำการทดสอบด้วยการบิน UAV ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งใดบดบังสัญญาณ อาจทำให้ความถูกต้องที่ได้ดีกว่านี้

จะเห็นได้ว่าเครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดมีประสิทธิภาพมากเพียงพอในการใช้งาน เมื่อเทียบกับราคาที่ถูกกว่าเครื่องรับแบบยี่ห้อเดดิกอย่างมาก โดยในการรับวัดแบบสถิตสามารถให้ความละเอียดถูกต้องในการระบุตำแหน่งทางราบและตั้งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ ASPRS ในการทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:500 สามารถใช้ในการระบุตำแหน่งของจุด GCP ได้ และในการรับวัดแบบจลน์ยังต้องอาศัยอุปกรณ์อื่นร่วมด้วยเช่น IMU เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับและเสาอากาศราคาประหยัดในการทำงานเพียงเครื่องเดียวต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ธีทัต เจริญภาสัชญาต ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร. ไพศาล สันติธรรมน ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความกรุณาแนะนำให้ค่าปรึกษา จนบทความการศึกษานี้สำเร็จลุล่วง และขอขอบคุณ บริษัท อินฟราพลัส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลและอุปกรณ์ในการศึกษา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lu, L. G., Ma, L. Y., Wu, T. T., & Chen, X. Y. (2019). Performance Analysis of Positioning Solution Using Low-Cost Single Frequency U-Blox Receiver Based on Baseline Length Constraint. *Sensors*, 19(19). DOI: ARTN435210.3390/s19194352
- [2] Hamza, V., Stopar, B., Ambrozic, T., Turk, G., & Sterle, O. (2020). Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring Purposes. *Sensors*, 20(16). DOI: ARTN437510.3390/s20164375
- [3] Kriemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., & ten Veldhuis, M. C. (2020). High Quality Zenith Tropospheric Delay Estimation Using a Low-Cost Dual-Frequency Receiver and Relative Antenna Calibration. *Remote Sensing*, 12(9). DOI: ARTN139310.3390/rs12091393
- [4] Liu, F., Liu, Y., Nie, Z. X., & Gao, Y. (2021). Precise Single-Frequency Positioning Using Low-Cost Receiver with the Aid of Lane-Level Map Matching for Land Vehicle Navigation. *Journal of Navigation*, 74(1), 24-37. DOI: 10.1017/S0373463320000375
- [5] Sun, H. X., Li, L. L., Ding, X. W., & Guo, B. X. (2016). The precise multimode GNSS positioning for UAV and its application in large scale photogrammetry. *Geo-Spatial Information Science*, 19(3), 188-194. DOI: 10.1080/10095020.2016.1234705

- [6] Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2014). Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738-2745. DOI: 10.1109/Tgrs.2013.2265295
- [7] Grayson, B., Penna, N. T., Mills, J. P., & Grant, D. S. (2018). GPS precise point positioning for UAV photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 33(164), 427-447. DOI: 10.1111/phor.12259
- [8] American Society for Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (ASPRS), 2015, "ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (Edition 1, Version 1.0., November, 2014)," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 81 (3), pp. A1-A26.
- [9] Benassi, F., et al., (2017). Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with GNSS-supported aerial triangulation. *Remote sensing*, 9 (2), 172. <https://doi.org/10.3390/rs9020172>.
- [10] He, K., et al., (2016). GNSS precise kinematic positioning for multiple kinematic stations based on a priori distance constraints. *Sensors*, 16 (4), 470.