

การตรวจสอบวิธีของยานพาหนะจากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็น
เอสเอสแบบจลน์ภายหลัง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Validating the vehicle trajectory from Mobile Mapping System by a post-processing
GNSS kinematic mode



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 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบวิถีของยานพาหนะจากระบบการทำแผนที่ ชนิดเคลื่อนที่ด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแบบ จลน์ภายหลัง
โดย	ร.ท.ชนะชล ไพจิตรประภาภรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชงทิศ ฉายากุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน)

ชนะชล ไพจิตรประภาภรณ์ : การตรวจสอบวิถีของยานพาหนะจากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแบบจลนภายหลัง. (Validating the vehicle trajectory from Mobile Mapping System by a post-processing GNSS kinematic mode) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

ระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่อาศัยวิถียานพาหนะที่เกิดจากการประมวลผลบูรณาการข้อมูลจากเซ็นเซอร์ของ GNSS/INS/DMI ข้อมูลจากระบบสแกนเลเซอร์สามารถยึดโยงกับค่าพิกัดทางตรงกับวิถีของยานพาหนะ เพื่อใช้คำนวณค่าพิกัดของพอยท์คลาวด์ ถึงแม้ว่าการบูรณาการข้อมูลจากเซ็นเซอร์ของ GNSS/INS/DMI สามารถหาวิถียานพาหนะแบบ Real-time ได้ก็ตาม แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลแบบจลนภายหลัง

งานวิจัยนี้ เป็นการตรวจสอบวิถียานพาหนะที่ได้จากการประมวลผลในภายหลังโดยใช้ข้อมูลวงโคจรของดาวเทียมนำหนที่มีความแม่นยำสูง จำนวน 4 ประเภท ได้แก่ วงโคจรแบบ Broadcast, Ultra-rapid, Rapid และ Final ข้อมูลอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบผลกำหนดให้เป็นข้อมูลวิถียานพาหนะที่ได้จากการประมวลผลภายหลังที่ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมนำหนแบบ Final การตรวจสอบความถูกต้องแบบทางอ้อมอาศัยข้อมูลวิถียานพาหนะทั้งหมดมายึดโยงค่าพิกัดทางตรงที่ได้จากระบบสแกนเลเซอร์และเปรียบเทียบค่าพิกัดของพอยท์คลาวด์กับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ โดยพื้นที่ของการรับสัญญาณมี 2 ส่วน คือ พื้นที่ในเมืองและชานเมือง

การศึกษาพบว่า ค่าพิกัดของวิถียานพาหนะที่ได้จากการประมวลผลภายหลังมีค่าคงที่ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง ในขณะที่วิถียานพาหนะในเวลาจริง (Real-time) มีค่าไม่คงที่โดยเฉพาะขณะที่เกิดคลื่นหลุดซึ่งส่งผลต่อค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในทางราบและทางดิ่งสูงถึง 3.865 เมตรและ 2.316 เมตรตามลำดับ การหยุดนิ่งภายหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ทำให้เกิดคลื่นหลุดไม่ส่งผลต่อค่าความถูกต้องของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลัง เนื่องจากค่าพิกัดมีค่าคงที่ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง ค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ที่ได้จากวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังมีความถูกต้องทางตำแหน่งมากกว่าในเวลาจริง โดยมีค่า RMSE ของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งจากการใช้ Final orbit เท่ากับ 0.069 เมตรและ 0.123 เมตรสำหรับพื้นที่ในเมืองและ 0.055 เมตรและ 0.107 เมตรสำหรับพื้นที่ชานเมือง

การใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมที่แตกต่างกันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าพิกัดของวิถียานพาหนะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่สำรวจที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ดี ค่าต่างของพิกัดมีค่าน้อยกว่า 1 เซนติเมตร การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของวิถียานพาหนะด้วยวิธีการข้างต้นจะดำเนินการได้ก็ต่อเมื่อมีข้อมูลสแกนเลเซอร์และค่าพิกัดจุดตรวจสอบ รวมถึงจะต้องไม่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดวิถียานพาหนะอีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6272023721 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: GNSS/INS/DMI integration, Laser scanning system, Direct georeferencing

Chanachon Pajitpraporn : Validating the vehicle trajectory from Mobile Mapping System by a post-processing GNSS kinematic mode. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D.

Mobile mapping system integrates its vehicle trajectory obtained from GNSS, inertial navigation systems and a distance measuring instrument with a directly georeferencing measured from a laser scanning system to generate point clouds. These data build up a complete picture of vehicle tracking locations in real-time. A relative kinematic positioning is implemented to get precise results.

This research validates vehicle positions in post-processing using navigation message and International GNSS Services precise orbits; produced in ultra-rapid, rapid and final solutions. Inputted final products to post-processing estimations are adopted as references to other applied latencies. This is an indirect method to validate point cloud positioning solutions. Measurement areas are in two scenarios; namely, inner city and suburban areas.

Experiment results show that positioning differences of vehicle trajectories remain constant during stopping in post-processing and varies in real-time. Positioning jumps occur during signal tracking interruptions when cycle slips exhibit, producing horizontal and vertical positioning differences of 3.865 metres and 2.316 metres respectively. When the vehicle passes through built environments where cycle slips occur and later the vehicle stops, this does not affect post-processing's vehicle positioning accuracies because its position becomes constant during the vehicle stops. Point clouds are geo-corrected in post-processing and provide better positioning accuracy than in real-time. When satellite final orbit solutions are applied, the point cloud horizontal and vertical positioning RMSEs are 0.069 metres and 0.123 metres in urban areas and 0.055 metres and 0.107 metres in suburban environments.

By applying more precise satellite ephemeris could not significantly improve differences of vehicle trajectories especially in the observed area without obstacles. The positioning differences are less than 1 centimetre. The comprehensive validation occurs when no jump on vehicle routes, complete point cloud datasets and precisely determined check points are achieved.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับ ข้าพเจ้าจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, อาจารย์ ดร.ธงทิศ ฉายากุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน กรรมการภายนอก มหาวิทยาลัย จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จโดยสมบูรณ์ รวมถึงคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนปลูกฝังจิตวิญญาณของความเป็นนักสำรวจแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ พันเอก จิตรกร ไบรักษา ผู้อำนวยการกองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหาร รวมทั้งข้าราชการประจำกองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหารทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรมและเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนอบรมวิธีการใช้งานเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุน และมอบความรัก ความอบอุ่นและกำลังใจที่ดี ให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

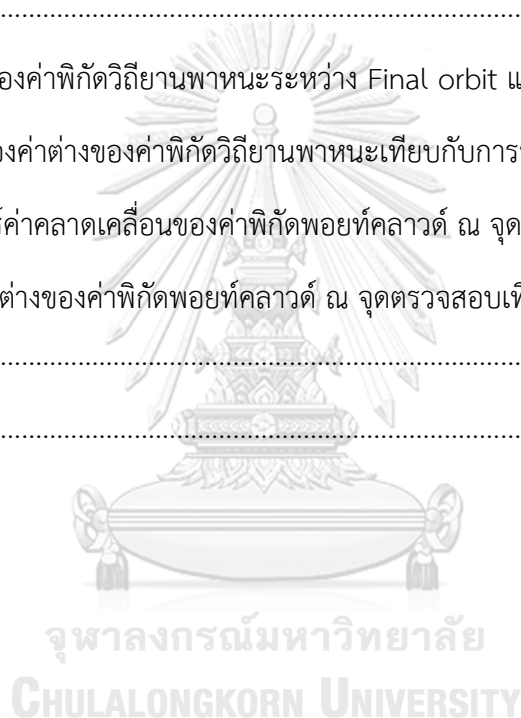
ชนะชล ไพจิตรประภาภรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา	4
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	4
1.3.3 ขอบเขตข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ระบบนำหน้ด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS.....	7
2.1.1 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning).....	8
2.1.2 ซูโดเรนจ์ (Pseudorange).....	9
2.1.3 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase).....	10

2.1.4 ค่าคลาดเคลื่อนในการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS.....	12
2.2 ระบบนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial Navigation System, INS).....	15
2.2.1 เครื่องวัดความเร่งเชิงเส้น (Linear Accelerometer).....	16
2.2.2 เครื่องวัดความเร่งเชิงมุม (Gyroscope).....	17
2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยชนิดเมมส์ (MEMS IMU).....	18
2.3 อุปกรณ์วัดรอบและอัตราเร่งของล้อรถยนต์ (Distance Measuring Indicator, DMI).....	19
2.4 การบูรณาการเซ็นเซอร์ GNSS/INS/DMI (GNSS/INS/DMI Integration).....	20
2.5 ระบบสแกนเลเซอร์.....	27
2.6 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร.....	30
2.7 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) ...	31
2.7.1 ค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (Horizontal Accuracy).....	31
2.7.2 ค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่ง (Vertical Accuracy).....	31
2.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD หรือ σ).....	31
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	33
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	37
3.1 การเตรียมข้อมูล.....	38
3.2 การประมวลผลข้อมูลวิทยานพาหนะ.....	42
3.3 การประมวลผลข้อมูลพอยท์คลาวด์.....	43
3.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล.....	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	44
4.1 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลวิทยานพาหนะ.....	44
4.1.1 ช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งและเคลื่อนที่.....	45
4.1.2 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิทยานพาหนะ.....	48
4.2 ผลการประมวลผลข้อมูลพอยท์คลาวด์.....	57

4.2.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์	57
4.2.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดข้อมูลพอยท์คลาวด์.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	59
5.1 อภิปรายผลการดำเนินงาน.....	59
5.2 สรุปผลการศึกษา	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก ก ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Final orbit และแบบอื่น ๆ.....	68
ภาคผนวก ข ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะเทียบกับการรับสัญญาณดาวเทียม GPS ..	80
ภาคผนวก ค เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบ.....	95
ภาคผนวก ง ขนาดค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบเทียบกับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ	101
ประวัติผู้เขียน.....	106



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (ดัดแปลงจาก IGS, 2020).....	3
ตารางที่ 4.1 พิสัยของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง	47
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าต่างของค่าพิกัดของข้อมูลวิถียานพาหนะ.....	56
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าต่างของค่าพิกัดของข้อมูลพอยท์คลาวด์กับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ	58
ตารางที่ ก.1 ค่าต่างของค่าพิกัดของข้อมูลวิถียานพาหนะในช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดของการ สำรวจพื้นที่ในเมือง.....	73
ตารางที่ ก.2 ค่าต่างของค่าพิกัดของข้อมูลวิถียานพาหนะในช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดของการ สำรวจพื้นที่ชานเมือง.....	79
ตารางที่ ง.1 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบของพื้นที่ในเมือง	102
ตารางที่ ง.2 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบของพื้นที่ชานเมือง	104

สารบัญรูปรภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง CUUT (IGS, 2020).....	1
รูปที่ 1.2 ชุดระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ ยี่ห้อ Trimble รุ่น MX9	2
รูปที่ 2.1 ระบบนำหน้ด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม (NovAtel Inc., 2015)	8
รูปที่ 2.2 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549).....	9
รูปที่ 2.3 การเทียบสัญญาณของรหัสระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียม (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549) ..	9
รูปที่ 2.4 การวัดระยะทางด้วยเฟสของคลื่นส่ง (Sickle, 2015)	11
รูปที่ 2.5 กระบวนการนำหน้แบบ Dead-Reckoning (DR) (Groves, 2008).....	15
รูปที่ 2.6 ระบบการนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อย (Groves, 2008).....	16
รูปที่ 2.7 เครื่องวัดความเร่งเชิงเส้น (Groves, 2008)	17
รูปที่ 2.8 หลักการของเครื่องวัดความเร่งเชิงมุม (Wang et al., 2012)	17
รูปที่ 2.9 อุปกรณ์วัดความเฉื่อยแบบเมมส์ (MEMS) ในส่วนของอุปกรณ์วัดความเร่ง(SILICON SENSING, 2017)	18
รูปที่ 2.10 อุปกรณ์วัดความเฉื่อยแบบเมมส์ (MEMS) ในส่วนของอุปกรณ์วัดความเร่งเชิงมุม (STMicroelectronics, 2011).....	19
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์วัดรอบและอัตราเร่งของล้อรถยนต์.....	19
รูปที่ 2.12 การบูรณาการเซ็นเซอร์ (ดัดแปลงจาก Scherzinger, 2001)	21
รูปที่ 2.13 การยึดโยงค่าพิกัดทางตรง.....	28
รูปที่ 2.14 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร (กรมแผนที่ทหาร, 2564).....	30
รูปที่ 2.15 พื้นที่ได้กราฟการแจกแจงแบบปกติ (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2549).....	32
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน	37
รูปที่ 3.2 วิธีของยานพาหนะและจุดตรวจสอบของพื้นที่ในเมือง	38

รูปที่ 3.3 วิธีของยานพาหนะและจุดตรวจสอบของพื้นที่ในเมือง	38
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลรังวัด GNSS จากสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง.....	39
รูปที่ 3.5 การเตรียมข้อมูลวงโคจรดาวเทียม	40
รูปที่ 3.6 การรังวัดจุดตรวจสอบ.....	41
รูปที่ 3.7 ข้อมูลวิถียานพาหนะในรูปแบบ ASCII.....	42
รูปที่ 4.1 สัญญาณดาวเทียม GPS ที่สามารถรับได้ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	44
รูปที่ 4.2 สัญญาณดาวเทียม GPS ที่สามารถรับได้ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง	45
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลัง ในช่วงที่ยานพาหนะ หยุดนิ่ง	46
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง..	47
รูปที่ 4.5 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 5260.0 ถึงวินาทีที่ 5434.8 ของการสำรวจ พื้นที่ในเมือง.....	48
รูปที่ 4.6 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 16094.6 ถึงวินาทีที่ 16301.0 ของการ สำรวจพื้นที่ในเมือง.....	49
รูปที่ 4.7 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 19826.6 ถึงวินาทีที่ 20169.4 ของการ สำรวจพื้นที่ในเมือง.....	50
รูปที่ 4.8 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 30671.8 ถึงวินาทีที่ 31079.3 ของการ สำรวจพื้นที่ในเมือง.....	51
รูปที่ 4.9 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 30671.8 ถึงวินาทีที่ 31079.3 ของการ สำรวจพื้นที่ในเมือง.....	52
รูปที่ 4.10 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 369684.3 ถึงวินาทีที่ 369722.0 ของการ สำรวจพื้นที่ในเมือง.....	53
รูปที่ 4.11 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 370516.7 ถึงวินาทีที่ 370630.1 ของการ สำรวจพื้นที่ในเมือง.....	54
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างผลการคำนวณความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์.....	57

รูปที่ ก.1 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Real-time และ Final orbit ในพื้นที่ในเมือง .	69
รูปที่ ก.2 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Broadcast orbit และ Final orbit ในพื้นที่ในเมือง.....	70
รูปที่ ก.3 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Ultra-rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ในเมือง.....	71
รูปที่ ก.4 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ในเมือง.....	72
รูปที่ ก.5 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Real-time และ Final orbit ในพื้นที่ชานเมือง.....	75
รูปที่ ก.6 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Broadcast orbit และ Final orbit ในพื้นที่ชานเมือง.....	76
รูปที่ ก.7 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Ultra-Rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ชานเมือง.....	77
รูปที่ ก.8 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ชานเมือง.....	78
รูปที่ ข.1 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time และ Broadcast orbit ในช่วงที่ 1 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	81
รูปที่ ข.2 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit และ Rapid orbit ในช่วงที่ 1 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	82
รูปที่ ข.3 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	83
รูปที่ ข.4 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	84
รูปที่ ข.5 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ 3 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	85
รูปที่ ข.6 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 3 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	86

รูปที่ ข.7 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ 4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	87
รูปที่ ข.8 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง	88
รูปที่ ข.9 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ 5 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	89
รูปที่ ข.10 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 5 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	90
รูปที่ ข.11 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Real-time ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	91
รูปที่ ข.12 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	92
รูปที่ ข.13 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	93
รูปที่ ข.14 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	94
รูปที่ ค.1 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Real-time ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	95
รูปที่ ค.2 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง	96
รูปที่ ค.3 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง	96
รูปที่ ค.4 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	97
รูปที่ ค.5 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Final orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง.....	97

รูปที่ ค.6 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Real-time ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง.....	98
รูปที่ ค.7 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง.....	98
รูปที่ ค.8 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง.....	99
รูปที่ ค.9 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง.....	99
รูปที่ ค.10 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Final orbit ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง.....	100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบนำหนด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS เป็นที่นิยมมากขึ้นในประเทศไทย เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงได้ง่ายและใช้งานได้อย่างอิสระ และได้มีการพัฒนาเทคนิคการรังวัดมาอย่างต่อเนื่องจนนำมาสู่เทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real-time Kinematics, RTK) โดยเทคนิคนี้จะต้องใช้เครื่องรับอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งเป็นสถานีฐาน (Base station) จะรังวัด ณ จุดที่ทราบค่าพิกัด และอีกเครื่องหนึ่งเป็นสถานีจร (Rover station) จะรังวัด ณ จุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด เทคนิคการรังวัดนี้จะให้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องในระดับเซนติเมตร แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐานและสถานีจร ซึ่งส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของค่าพิกัด ณ สถานีจร (Omogunloye et al., 2017) จึงมีการอาศัยโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Station, CORS) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 1.1 เพื่อลดข้อจำกัดข้างต้น โดยการรังวัดด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีด้วยโครงข่ายสถานีฐาน (Network-Based RTK, NRTK) โดยปัจจุบันมีโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องจากหลายหน่วยงานที่ได้มีการบูรณาการกัน เช่น กรมแผนที่ทหาร กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นต้น เพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้งานทั้งภาครัฐและเอกชนได้อย่างครอบคลุมทั่วประเทศ



รูปที่ 1.1 สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง CUUT (IGS, 2020)

เทคโนโลยีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner, TLS) อาศัยการส่งคลื่นเลเซอร์ออกไปกระทบกับพื้นผิวหรือวัตถุ แล้วสะท้อนกลับมายังเครื่อง แล้วทำการคำนวณระยะทางจากเซ็นเซอร์ไปยังวัตถุ ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในลักษณะของพอยท์คลาวด์ (Point cloud) ที่มีค่าพิกัดจุด 3 มิติ เป็นจำนวนมาก และต่อมาได้มีการพัฒนาโดยการนำเครื่องสแกนเลเซอร์ไปติดตั้งบนยานพาหนะประกอบกับเซ็นเซอร์ (Sensor) อื่น ได้แก่ กล้องถ่ายภาพรอบทิศทาง 360 องศา ความละเอียดสูง, ระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial Navigation Systems, INS), อุปกรณ์วัดรอบและอัตราเร่งของล้อรถยนต์ (Distance Measuring Instrument, DMI), และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ซึ่งระบบที่บูรณาการเซ็นเซอร์ดังกล่าวนี้เรียกว่า ระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ (Mobile Mapping System, MMS) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 1.2 ระบบนำหนด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS มีข้อจำกัดในเรื่องของสภาพแวดล้อมที่จะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องทางตำแหน่ง จึงได้มีการบูรณาการเซ็นเซอร์ GNSS/INS/DMI เพื่อให้สามารถคำนวณวิถีของยานพาหนะ (Trajectory) ได้ในทุกสภาพแวดล้อม และนำวิถีของยานพาหนะมาตัดโยงค่าพิกัดทางตรงกับระบบสแกนเลเซอร์ เพื่อคำนวณค่าพิกัดจุดของวัตถุ ถึงแม้ว่าการบูรณาการเซ็นเซอร์จะสามารถคำนวณวิถีของยานพาหนะได้แบบ Real-time ก็ตาม แต่ปกติแล้วจะนำข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ไปประมวลผลภายหลัง (Post-processed) โดยอาศัยข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ณ สถานีฐานในภูมิภาคประเทศนำมาประมวลผลภายหลังร่วมกับข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ เพื่อให้ได้วิถีของยานพาหนะ แล้วนำไปคำนวณค่าพิกัดของพอยท์คลาวด์ ซึ่งการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ณ สถานีฐานในภูมิภาคประเทศนั้นจะต้องเสียงบประมาณเพิ่มเติม เช่น ค่าจ้างเจ้าหน้าที่สำรวจ, เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS, และการเดินทางของเจ้าหน้าที่ เป็นต้น การใช้ข้อมูลจากสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถประหยัดงบประมาณในส่วนนี้ได้



รูปที่ 1.2 ชุดระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ ยี่ห้อ Trimble รุ่น MX9

นอกจากนี้ในการประมวลผลข้อมูลวิถีของยานพาหนะจะใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมมาประมวลผลร่วมด้วย เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมในการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยข้อมูลวงโคจรดาวเทียมนั้นสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ขององค์กรที่ให้บริการ เช่น International GNSS Service (IGS) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลวงโคจรดาวเทียมมี 4 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit แต่ละข้อมูลจะมีการให้บริการในช่วงเวลาภายหลังการรังวัด GNSS และมีความถูกต้องของข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1.1 ยิ่งข้อมูลวงโคจรดาวเทียมที่มีความถูกต้องมาก ยิ่งใช้เวลานานในการให้บริการข้อมูล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประมวลผลข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ เนื่องจากต้องรอข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงเพื่อที่จะนำมาประมวลผลร่วมด้วย ความถูกต้องของข้อมูลที่ได้นั้น อาจไม่คุ้มค้ำกับเวลาที่เสียไป

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (ดัดแปลงจาก IGS, 2020)

Type	Accuracy	Latency
Broadcast orbit	~100 cm	real time
Ultra-rapid orbit (Predicted half)	~5 cm	real time
Ultra-rapid orbit (Observed half)	~3 cm	3 – 9 hours
Rapid orbit	~2.5 cm	17 – 41 hours
Final orbit	~2.5 cm	12 – 18 days

งานวิจัยนี้จึงจะเปรียบเทียบข้อมูลวิถียานพาหนะที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลการสำรวจภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์แบบติดตั้งบนรถยนต์ทั้งแบบ Real-time และแบบประมวลผลภายหลัง โดยการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม 4 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อตรวจสอบวิถีของยานพาหนะแบบ Real-time และแบบประมวลผลภายหลังที่ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม 3 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, และ Rapid orbit โดยเปรียบเทียบกับวิถีของยานพาหนะที่ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final orbit

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

- 1) ศึกษากระบวนการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่
- 2) ศึกษาการนำข้อมูลรังวัด GNSS/INS/DMI จากกระบวนการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ มาการประมวลผลแบบสัมพัทธ์ ด้วยโปรแกรม Position and Orientation System Post-processing Package Mobile Mapping Suite (POSPac MMS) 8 เพื่อให้ได้วิถีของยานพาหนะ
- 3) ศึกษาการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงข้อมูลสแกนเลเซอร์ที่ได้จากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่กับข้อมูลวิถีของยานพาหนะด้วยโปรแกรม Trimble Business Center (TBC) 5.40

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษานี้จะอาศัยข้อมูลการสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์ (LiDAR) แบบติดตั้งบนรถยนต์ของกรมแผนที่ทหาร ซึ่งได้มีการสำรวจใน 2 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ในกรุงเทพมหานคร โดยผ่านเขตคลองเตย, เขตยานนาวา, เขตราชบุรีบูรณะ, เขตบางมด, เขตปทุมวัน, เขตราชเทวี, และเขตพญาไท โดยเส้นทางสำรวจส่วนใหญ่เป็นถนนที่อยู่บริเวณเลียบบางพิเศษ ทำให้รับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ไม่ดี และพื้นที่ชานเมือง ซึ่งมีเส้นทางสำรวจเป็นถนนบริเวณโดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ มีลักษณะที่ท้องฟ้าเปิดโล่ง ทำให้รับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ค่อนข้างดี

1.3.3 ขอบเขตข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ของกรมแผนที่ทหาร
- 2) ข้อมูลค่าพิกัดจุดตรวจสอบ
- 3) ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS จากโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร ณ สถานี SBKK ในช่วงเวลาเดียวกันกับข้อมูลการสำรวจความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์แบบติดตั้งบนรถยนต์
- 4) ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากหน่วยงาน International GNSS Service (IGS)

1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) POSPac MMS 8 เป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่บริษัท Applanix Inc. เป็นผู้พัฒนา ซึ่งสามารถประมวลผลข้อมูล GNSS/INS/DMI เพื่อคำนวณวิถีของยานพาหนะได้
- 2) TBC 5.40 เป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่บริษัท Trimble Inc. เป็นผู้พัฒนา ซึ่งสามารถสร้างพอยท์คลาวด์จากข้อมูลสแกนเลเซอร์โดยการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับวิถีของยานพาหนะจากข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ (Trimble, 2020)
- 3) CloudCompare 2.11.3 เป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิด สามารถใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลพอยท์คลาวด์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ในการคำนวณความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์
- 4) MATrix LABoratory (MATLAB) R2021a เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกออกแบบมาเพื่อจัดเก็บข้อมูลในลักษณะเมทริกซ์ และมีภาษาเฉพาะตัวในการเขียนโปรแกรม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ในการเขียนสคริปต์เพื่อคำนวณค่า RMSE ในการเปรียบเทียบข้อมูลวิถียานพาหนะและข้อมูลพอยท์คลาวด์

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ รวมถึงการใช้งานเครื่องมือระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ยี่ห้อ Trimble รุ่น MX9 และการใช้งานโปรแกรม POSPac MMS 8 และ TBC 5.40 เพื่อใช้ในการประมวลผลข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่
- 1.4.2 ตรวจสอบ รวบรวม จัดเก็บข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ของกรมแผนที่ทหาร, ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากหน่วยงาน IGS
- 1.4.3 นำข้อมูลรังวัด GNSS/INS/DMI จากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่มาการประมวลผลแบบสัมพัทธ์ด้วยโปรแกรม POSPac MMS 8 เพื่อให้ได้ข้อมูลวิถีของวิถียานพาหนะ โดยแบ่งเป็น 2 พื้นที่ทดสอบ ได้แก่ พื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมือง แต่ละพื้นที่ทดสอบประมวลผลโดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมทั้ง 4 ประเภท ได้แก่

Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit จะได้วิถีของยานพาหนะจำนวน 4 วิถีของแต่ละพื้นที่ทดสอบ

- 1.4.4 ยึดโยงค่าพิกัดทางตรงข้อมูลสแกนเลเซอร์ที่ได้จากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่กับข้อมูลวิถีของยานพาหนะที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.4.3 ของพื้นที่ทดสอบทั้งสองพื้นที่ทดสอบด้วยโปรแกรม TBC 5.40 จะได้ชุดข้อมูลพอยท์คลาวด์จำนวน 5 ชุดของแต่ละพื้นที่ทดสอบ
- 1.4.5 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการวิจัยด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง โดยเปรียบเทียบค่าพิกัดทั้งทางราบและทางตั้งของข้อมูลวิถีของยานพาหนะที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.4.3 และข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.4.4 โดยการเปรียบเทียบข้อมูลวิถีของยานพาหนะนั้น จะใช้ข้อมูลวิถีของยานพาหนะที่ได้จากการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final orbit เป็นข้อมูลอ้างอิงเปรียบเทียบกับข้อมูลวิถีของยานพาหนะแบบ Real-time และวิถีของยานพาหนะที่ได้จากข้อมูลการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมอื่นอีก 3 ประเภท และในส่วนของข้อมูลพอยท์คลาวด์จะเปรียบเทียบโดยใช้ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบจำนวน 20-30 จุด ที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีด้วยเครือข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิถียานพาหนะจากการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงของข้อมูลสแกนเลเซอร์กับวิถียานพาหนะ
- 1.4.6 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย
- 1.4.7 เขียนรายงานและจัดพิมพ์งานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบถึงวิถีของยานพาหนะที่ได้จากการใช้วงโคจรดาวเทียมที่ใกล้ปัจจุบันมากที่สุดที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิถีของยานพาหนะที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final orbit

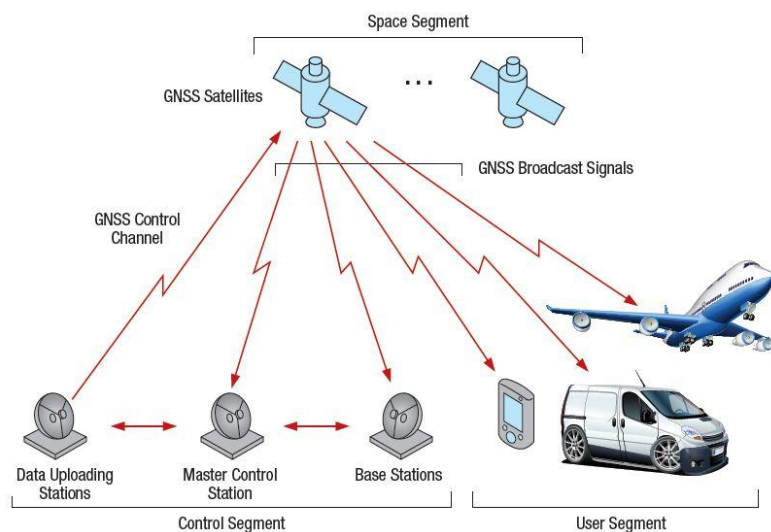
บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการเปรียบเทียบวิถียานพาหนะจากการประมวลผลข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่แบบ Real-time และแบบประมวลผลภายหลังโดยการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม 4 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit โดยใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ในการเปรียบเทียบผล ซึ่งมีแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ระบบนำหน้ด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS

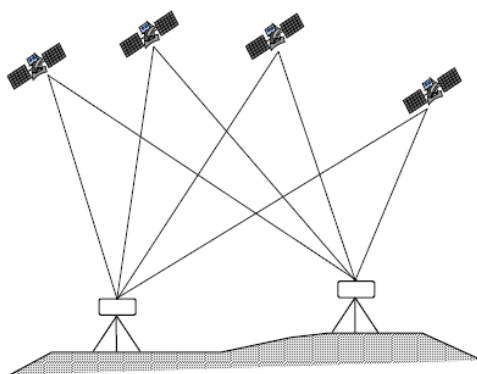
ระบบนำหน้ด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียมได้เป็นที่นิยมและมีการใช้ในงานสำรวจรังวัดอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำงานได้ทุกสภาพอากาศ ทั้งกลางวันและกลางคืนตลอด 24 ชั่วโมง และมีข้อได้เปรียบมากกว่างานสำรวจรังวัดแบบเดิม นั่นคือ ไม่จำเป็นต้องเลือกตำแหน่งจุดรังวัดให้มองเห็นกัน อีกทั้งไม่มีการเสียค่าใช้จ่ายในการรับสัญญาณดาวเทียม แต่จะเสียค่าใช้จ่ายในส่วน of เครื่องมือที่ใช้ในการรังวัดและโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่มีความถูกต้องตามที่ผู้ต้องการ ซึ่งคำว่า Global Navigation Satellite Systems หรือเรียกโดยย่อว่า GNSS นั้นเป็นคำที่ใช้แทนระบบการหาตำแหน่งด้วยดาวเทียมที่ประกอบด้วยดาวเทียมตั้งแต่ 2 ระบบขึ้นไป ซึ่งในปัจจุบันมีระบบดาวเทียมที่ได้พัฒนาขึ้น เช่น ระบบดาวเทียม GPS ของประเทศสหรัฐอเมริกา, ระบบดาวเทียม GLONASS ของประเทศรัสเซีย, ระบบดาวเทียม Galileo ของสหภาพยุโรป, ระบบดาวเทียม Beidou ของประเทศจีน, ระบบดาวเทียม QZSS ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบจะมีส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนอวกาศ (Space segment), ส่วนควบคุม (Control segment), และส่วนผู้ใช้ (User segment) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบนำหนด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม (NovAtel Inc., 2015)

2.1.1 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

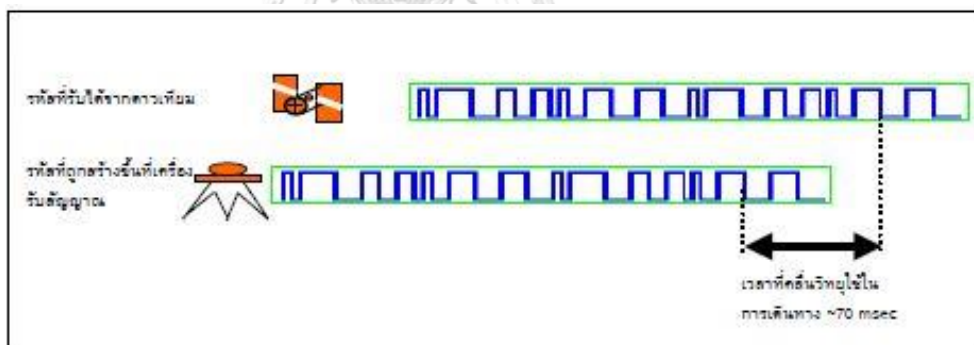
เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องทางตำแหน่งสูง ซึ่งจะเป็นการหาตำแหน่งแบบเปรียบเทียบระหว่างสองจุด โดยใช้ตำแหน่งสัมบูรณ์ที่ทราบค่าแล้วอย่างน้อยหนึ่งจุด เพื่อคำนวณหาตำแหน่งสัมบูรณ์ของจุดอื่น ๆ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS อย่างน้อย 2 เครื่อง ดังรูปที่ 2.2 โดยเครื่องหนึ่งจะตั้งรับสัญญาณ ณ จุดที่ทราบค่าพิกัด เรียกว่า สถานีฐาน (Base Station) หรือสถานีอ้างอิง (Reference Station) ส่วนเครื่องรับอีกเครื่องหนึ่งจะตั้งรับสัญญาณ ณ จุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด เรียกว่า สถานีผู้ใช้ (User Station) หรือสถานีจร (Roving Station) การหาตำแหน่งด้วยวิธีการนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งสถานีฐานและสถานีจรจะต้องรับข้อมูล จากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวงในช่วงเวลาเดียวกัน ด้วยการทำงานในลักษณะดังกล่าว ความคลาดเคลื่อนมีระบบ (Systematic errors) หลายชนิด เช่น ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจร ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกา ดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ เป็นต้น จะถูกหักล้างกันไปทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้มีดีขึ้น ในการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ด้วยการใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน ค่าความถูกต้องจะอยู่ระหว่าง 0.5 – 5 เมตร ในกรณีที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตร ก็จะต้องใช้วิธีการวัดเฟสของคลื่นส่ง (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)



รูปที่ 2.2 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

2.1.2 ซูโดเรนจ์ (Pseudorange)

ซูโดเรนจ์ คือ ระยะทางระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียม ซึ่งหาได้จากการถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียมเปรียบเทียบกับรหัสที่เครื่องรับสร้างขึ้น โดยเครื่องรับจะทำการเลื่อนรหัสไปมาจนกระทั่งรหัสทั้งสองชุดตรงกันดังรูปที่ 2.3 ซึ่งค่าเลื่อนระหว่างรหัสทั้งสองชุดคือระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)



รูปที่ 2.3 การเทียบสัญญาณของรหัสระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียม

(เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

เมื่อนำระยะเวลาดังกล่าวมาคูณกับความเร็วแสง จะได้ระยะทางระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียมเรียกว่า ซูโดเรนจ์ ซึ่งจะคลาดเคลื่อนไปจากระยะทางจริง อันเนื่องมาจากค่าคลาดเคลื่อนหลายชนิด เช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม, ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ, ค่าคลาดเคลื่อนจากการล่าช้าของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ เป็นต้น โดยซูโดเรนจ์มีสมการดังนี้ (Leick et al., 2015; Rizos, 1997; Teunissen & Kleusberg, 1998)

$$R = \rho_r^S + c(\Delta\delta_r - \Delta\delta^S) + \Delta r + d_{ion} + d_{trop} + dm_R + \varepsilon_R \quad (2.1)$$

โดยที่

- R คือ ชูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัส (เมตร)
 ρ_r^S คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างเครื่องรับและดาวเทียม
 c คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตรต่อวินาที)
 $\Delta\delta_r$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
 $\Delta\delta^S$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
 Δr คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
 d_{ion} คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
 d_{trop} คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)
 dm_R คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
 ε_R คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในชูโดเรนจ์ที่วัดได้ของรหัส (เมตร)

ระยะทางเรขาคณิตระหว่างเครื่องรับและดาวเทียม (ρ_r^S) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

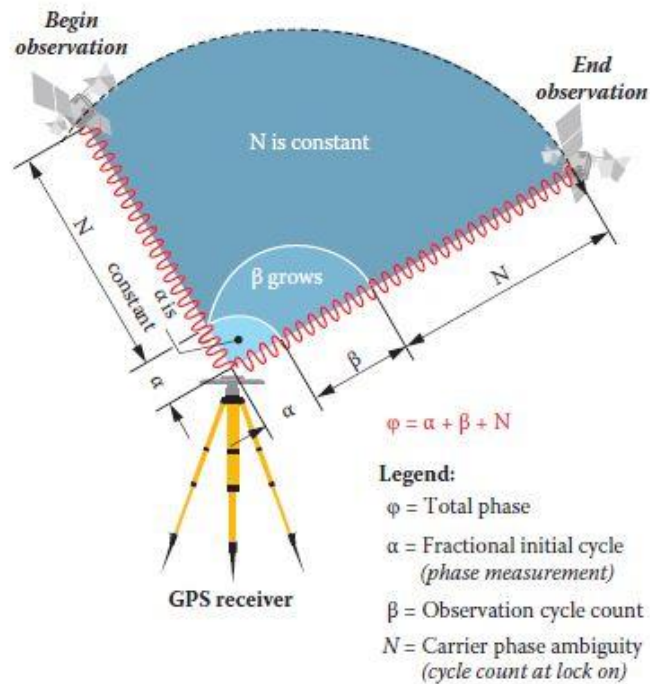
$$\rho_r^S = \sqrt{(X^S - X_r)^2 + (Y^S - Y_r)^2 + (Z^S - Z_r)^2} \quad (2.2)$$

โดยที่

- ρ_r^S คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างเครื่องรับและดาวเทียม (เมตร)
 X^S, Y^S, Z^S คือ ค่าพิกัดของดาวเทียม (เมตร)
 X_r, Y_r, Z_r คือ ค่าพิกัดของเครื่องรับ (เมตร)

2.1.3 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)

ในงานสำรวจที่ต้องการความถูกต้องของค่าพิกัดในระดับเซนติเมตรนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องวัดระยะด้วยการวัดเฟสของคลื่นส่ง ซึ่งการวัดเฟสของคลื่นส่งในเครื่องรับเป็นการวัดเปรียบเทียบหรือหาค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมา กับเฟสของคลื่นความถี่ f_0 ที่เครื่องรับสร้างขึ้นมา โดยคลื่นส่งที่ส่งลงมาจาดาวเทียมนั้นสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนของคลื่นจำนวนเต็มรอบ (Integer cycle part) และส่วนของคลื่นที่ไม่เต็มรอบ (Fractional part) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การวัดระยะทางด้วยเฟสของคลื่นส่ง (Sickle, 2015)

เครื่องรับจะไม่สามารถนับจำนวนเต็มรอบของคลื่นที่ส่งมาได้ โดยที่จำนวนเต็มรอบของคลื่นสามารถประมาณค่าได้จากการคำนวณในภายหลัง ซึ่งค่านี้เรียกว่า เลขปริศนา (Ambiguity) ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการประมาณค่าเลขปริศนาได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ การประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนจริง (Ambiguity – Float Solution) และการประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนเต็มตามทฤษฎี (Ambiguity – Fixed Solution) โดยการประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนเต็มนั้น เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับว่าให้ค่าความถูกต้องที่สูงกว่าเลขจำนวนจริง และนิยมใช้กันในซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ โดยสามารถเขียนสมการค่าสังเกตของการวัดเฟสของคลื่นส่งได้ดังนี้ (Leick et al., 2015; Rizos, 1997; Teunissen & Kleusberg, 1998)

$$\varphi = \rho_r^s + c(\Delta\delta_r - \Delta\delta^s) + \lambda N + \Delta r - d_{ion} + d_{trop} + dm_\varphi + \varepsilon_\varphi \quad (2.3)$$

โดยที่

- φ คือ ชูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่ง (เมตร)
- ρ_r^s คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างเครื่องรับและดาวเทียม
- c คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตรต่อวินาที)
- $\Delta\delta_r$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
- $\Delta\delta^s$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

λ	คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)
N	คือ เลขปริศนาของคลื่นส่ง
Δr	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
d_{ion}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
d_{trop}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)
dm_{ϕ}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
ε_{ϕ}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวน (เมตร)

จากสมการ (2.1) และ (2.3) จะพบว่าไม่มีตัวแปรไม่ทราบค่า คือ ค่าพิกัดของเครื่องรับ และค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะสามารถจัดหรือลดได้ด้วยวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เรียกว่าเทคนิคการหาค่าต่าง (Differencing technique) ซึ่งสามารถทำได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ ระหว่างเครื่องรับ (Between receivers), ระหว่างดาวเทียม (Between satellites) และระหว่างเวลา (Between epochs) โดยปกติแล้วมักจะจำแนกเทคนิคการหาค่าต่างตามจำนวนครั้งของการหาค่าต่าง ได้แก่ การหาค่าต่างครั้งที่หนึ่ง (Single differencing), การหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นสมการค่าสังเกตในการคำนวณปรับแก้ และการหาค่าต่างครั้งที่สาม (Triple differencing) ซึ่งนิยมใช้ในการตรวจหาคycle slip (Cycle slip)

2.1.4 ค่าคลาดเคลื่อนในการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS

ในการสำรวจรังวัดย่อมมีค่าคลาดเคลื่อนแฝงอยู่ โดยในงานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS สามารถแบ่งชนิดของค่าคลาดเคลื่อนได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียม, ค่าคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม, ค่าคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของสัญญาณ และค่าคลาดเคลื่อนอื่น ๆ

2.1.4.1 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียม

ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมเกิดจากการที่สถานีควบคุมหลักซึ่งมีหน้าที่คำนวณข้อมูลวงโคจรดาวเทียมโดยอาศัยข้อมูลการติดตามดาวเทียมที่กระจายตัวอยู่ทั่วโลก โดยจะมีการทำนายวงโคจรดาวเทียมล่วงหน้าและส่งข้อมูลที่ทำนายไปยังดาวเทียมเพื่อให้ดาวเทียมส่งมาให้กับผู้ใช้ในรูปแบบของข้อมูลนำหน (Navigation message) ที่มาพร้อมกับสัญญาณดาวเทียม อย่างไรก็ตาม แรงต่าง ๆ ที่มากระทำต่อดาวเทียมนั้นจะส่งผลต่อตำแหน่งของดาวเทียมทำให้การทำนายวงโคจรดาวเทียมนั้นจะมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งสามารถลด

ค่าคลาดเคลื่อนได้โดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงจากหน่วยงาน IGS หรือการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

ข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม, ความไม่เสถียรของมาตรฐานความถี่, และอัตราดริฟท์ของนาฬิกาแต่ละดวงจะอยู่ในข้อมูลนำหนเช่นเดียวกันกับข้อมูลวงโคจรดาวเทียมซึ่งเกิดจากการคำนวณล่วงหน้าจากสถานีควบคุมหลัก ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้โดยใช้ข้อมูลค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงจากหน่วยงาน IGS หรือการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

2.1.4.2 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาเครื่องรับ เนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับเป็นนาฬิกาควอตซ์ซึ่งมีเสถียรภาพต่ำกว่านาฬิกาที่ใช้ในดาวเทียมซึ่งเป็นนาฬิกาอะตอมอยู่มาก จึงทำให้เวลาในเครื่องรับผิดไปจากเวลา GPS ค่อนข้างมาก ทำให้ระยะทางที่คำนวณได้มีค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้โดยกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและทำการประมาณค่าในการประมวลผลข้อมูล หรือการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

ค่าคลาดเคลื่อนจากการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ ข้อมูลระยะทางในการวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS จะเป็นระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวส่งคลื่นสัญญาณในดาวเทียมกับจุดศูนย์กลางอิเล็กทรอนิกส์ของเสาอากาศเครื่องรับ ซึ่งในทางอุดมคติจุดศูนย์กลางที่วัดได้ในทางกายภาพจะต้องเป็นจุดเดียวกันกับจุดศูนย์กลางอิเล็กทรอนิกส์ของเสาอากาศเครื่องรับ แต่ในความเป็นจริงจุดทั้งสองจะมีความต่างกัน แปรเปลี่ยนไปตามทิศทางและความแรงของคลื่นสัญญาณที่เข้ามายังเสาอากาศ ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้โดยการใช้เสาอากาศที่มีคุณภาพสูง, การใช้เสาอากาศชนิดเดียวกันในการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ หรือเลือกใช้แบบจำลองค่าแก้ของการแปรเปลี่ยนจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศจากหน่วยงาน NGS

ค่าคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนในเครื่องรับ มีขนาดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนระหว่างความแรงของสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) และ tracking bandwidth เป็นต้น ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจึงไม่สามารถขจัดออกไปได้ด้วยแบบจำลองการปรับแก้ จึงทำได้เพียงใช้เครื่องรับที่มีคุณภาพสูง

ค่าคลาดเคลื่อนจากค่าพิกัดของสถานีฐาน ในการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์จะต้องทราบตำแหน่งสัมบูรณ์อย่างน้อยหนึ่งจุดเพื่อใช้หาตำแหน่งของจุดอื่นในการประมวลผลเส้นฐานโดยการตรึงค่าพิกัดสถานีฐาน ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนจากค่าพิกัดของสถานีฐานก็จะส่งผลให้ค่าระยะเส้นฐานที่คำนวณได้ผิดพลาดไปด้วย ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้โดยการถ่ายค่าพิกัดจากจุดที่ทราบ หรือเลือกใช้จุดที่ทราบค่าพิกัดเป็นสถานีฐาน

2.1.4.3 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของสัญญาณ

การล่าช้าเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในชั้นบรรยากาศนี้มีอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งส่งผลต่อความเร็วของคลื่นสัญญาณ GNSS โดยจะทำให้ซูโดเรนจ์เดินทางได้ช้าลง ระยะที่วัดได้จะยาวกว่าที่ควรจะเป็น แต่จะทำให้เฟสของคลื่นเดินทางได้เร็วขึ้น ระยะที่วัดได้จึงสั้นลงกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้โดยการใช้เครื่องรับแบบสองความถี่ เนื่องจากการหักเหของคลื่นในชั้นไอโอโนสเฟียร์แปรผันกับความถี่, ใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์, ใช้แบบจำลองปรับแก้ ซึ่งเหมาะกับผู้ใช้เครื่องรับความถี่เดียว หรือพยายามรับสัญญาณดาวเทียมในช่วงเวลากลางคืน

การล่าช้าเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ ในชั้นบรรยากาศนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแห้งร้อยละ 90 ของการหักเหในชั้นบรรยากาศ และส่วนชื้นร้อยละ 10 ของการหักเหในชั้นบรรยากาศ โดยทั่วไปจะสามารถหาค่าคลาดเคลื่อนจากการหักเหจากส่วนแห้งได้ดี แต่จะยากที่จะหาส่วนชื้นได้อย่างถูกต้อง การหักเหในชั้นบรรยากาศนี้จะทำให้คลื่นเดินทางช้า ส่งผลให้ระยะทางที่คำนวณได้ยาวกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้โดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์, ใช้แบบจำลองในการปรับแก้, หรือกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี เกิดจากการแพร่ของคลื่นที่มีการสะท้อนตั้งแต่หนึ่งครั้งขึ้นไป โดยคลื่นสัญญาณดาวเทียมที่ส่งจากดาวเทียมที่มีความสูงต่ำมีโอกาสเกิดคลื่นหลายวิถีมากกว่าดาวเทียมที่มีความสูง และเนื่องจากเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม จึงไม่สามารถใช้เทคนิคการหาค่าต่างในการขจัดค่าคลาดเคลื่อนได้ ทำได้เพียงพยายามเลือกบริเวณที่ไม่มีพื้นผิวสะท้อนอยู่ใกล้กับจุดที่ทำการรังวัด, ใช้เครื่องรับที่สามารถกรองคลื่นหลายวิถีออกไปได้

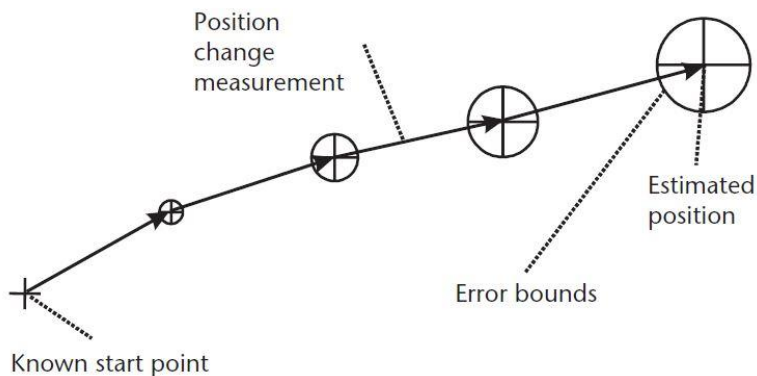
2.1.4.4 ค่าคลาดเคลื่อนอื่น ๆ

ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลุด ซึ่งเกิดจากการที่มีสิ่งกีดขวางบังเสาอากาศของเครื่องรับหรืออาจเกิดจากการที่มีคลื่นรบกวนขนาดใหญ่จนทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่งเปลี่ยนไปจากเดิม โดยทั่วไปจะตรวจหาคคลื่นหลุดโดยใช้เทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สาม พร้อมทั้งหาขนาดของคลื่นหลุดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่นการใช้วิธี Linear regression หรือ Least squares เป็นต้น และซ่อมแซมคลื่นหลุดโดยนำขนาดคลื่นหลุดที่หาได้มาบวกกับข้อมูลเฟสหลังจากที่เกิดคลื่นหลุด ในกรณีไม่สามารถตรวจหาและซ่อมแซมได้จะถือว่ามิเลขปริศนาใหม่เกิดขึ้นในข้อมูลดาวเทียมดวงนั้น

ค่าเลขปริศนา ในการหาระยะทางที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงจะอาศัยการวัดเฟส โดยการหาค่าเลขปริศนามีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในทางทฤษฎีแล้วค่าเลขปริศนาแต่ละค่าจะคงที่ตราบใดที่มีการรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องและไม่เกิดคลื่นหลุด โดยการหาค่าเลขปริศนาจะเป็นขั้นตอนหลังจากที่ได้ขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ และซ่อมแซมคลื่นหลุดในข้อมูลแล้ว ในการขจัดเลขปริศนาทำได้ด้วยเทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สาม หรือกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าและประมาณค่าในการประมวลผล

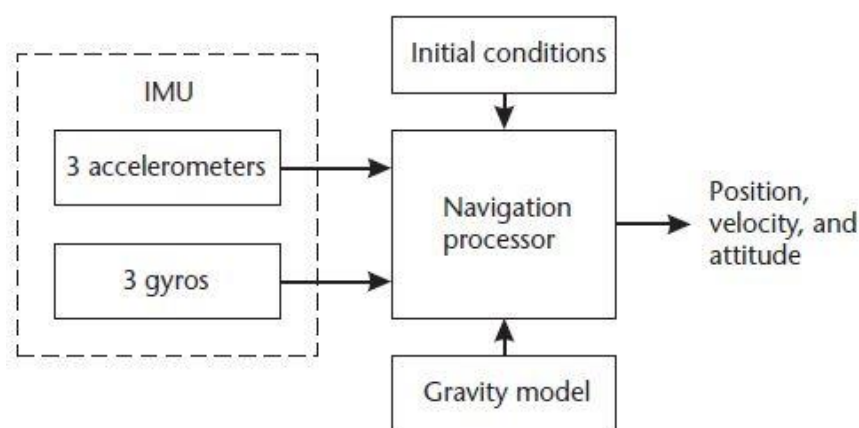
2.2 ระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial Navigation System, INS)

ระบบการนำหนด้วยการวัดความเฉื่อยเป็นการหาพิกัดปัจจุบันโดยอาศัยการวัดระยะสัมพัทธ์ออกจากพิกัดที่ทราบแล้วก่อนหน้าสะสมไปเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะทำได้ค่าพิกัดที่เป็นปัจจุบันในวิถีของการนำหนเราเรียกกระบวนการนี้ว่า Dead Reckoning (DR) (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553) โดยตำแหน่งที่ได้จะมีค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นตามระยะทาง



รูปที่ 2.5 กระบวนการนำหนแบบ Dead-Reckoning (DR) (Groves, 2008)

ระบบการนำหนด้วยการวัดความเฉื่อยอาศัยหลักการวัดความเฉื่อยที่เกิดจากการที่มวลสารเปลี่ยนแปลงสถานะตำแหน่งและความเร็ว ซึ่งจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดความเร่ง ที่สามารถตรวจวัดได้ในรูปของแรงเฉื่อย (Inertia force) (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553) และเมื่อหาปฏิยานุพันธ์ (Integral) ของความเร่ง (Acceleration) ก็จะได้ความเร็ว (Velocity) และการหาปฏิยานุพันธ์ของความเร็วก็จะได้การกระจัด (Displacement) ซึ่งจะสามารถนำการกระจัดนี้ไปคำนวณตำแหน่งปัจจุบันได้จากการอ้างอิงตำแหน่งสะสมจากตำแหน่งก่อนหน้า



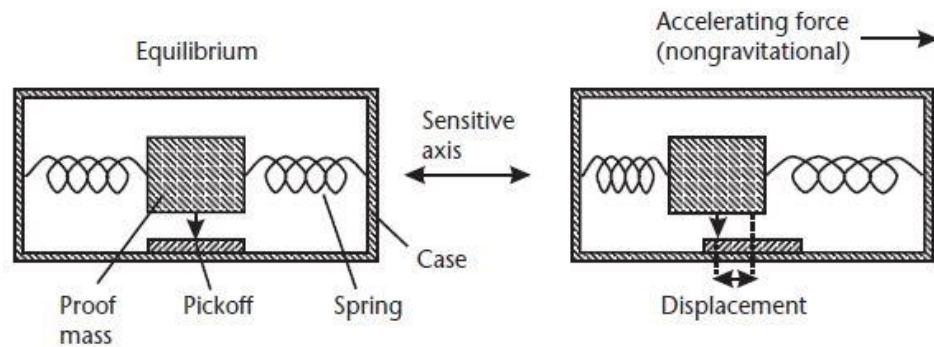
รูปที่ 2.6 ระบบการนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย (Groves, 2008)

จากรูปที่ 2.6 ระบบการนำหนด้วยการวัดความเฉื่อยประกอบด้วยหน่วยประมวลผล (Navigation processor) และอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit, IMU) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) 3 ตัว โดยวางตัวตั้งฉากซึ่งกันและกัน และเครื่องวัดความเร่งเชิงมุม (Gyroscope) 3 ตัว โดยวางตัวในแนวเดียวกันกับเครื่องวัดความเร่ง หน่วยประมวลผลจะคำนวณตำแหน่ง, ความเร็ว และการวางตัวของระบบจาก IMU

2.2.1 เครื่องวัดความเร่งเชิงเส้น (Linear Accelerometer)

เครื่องวัดความเร่งเชิงเส้นพัฒนามาบนพื้นฐานของการจับการเคลื่อนไหวของมวลทดสอบ (Proof mass) มวลทดสอบจะถูกจับยึดกับอุปกรณ์ด้วยสปริงทั้งสองข้างให้มีความอิสระหากมีแรงกระทำในแนวใด ๆ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลทดสอบ จะมีการออกแบบกลไกแม่เหล็กไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจจับการเคลื่อนที่เรียกว่า pick-off ดังรูปที่

2.7



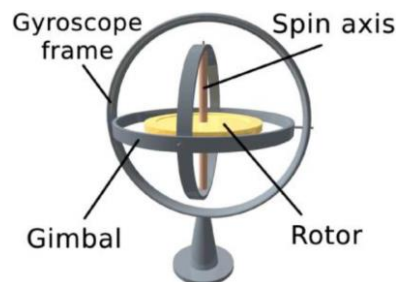
รูปที่ 2.7 เครื่องวัดความเร่งเชิงเส้น (Groves, 2008)

การวัดความเร่งเชิงเส้นจะใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนที่ของพาหนะในรูปความเร่ง \vec{a} ในกรณีมีแรงดึงดูดของโลกเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้เกิดความเร่ง \vec{g} ในทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางโลกเรียกว่า Gravitation acceleration ดังนั้นค่าความเร่งจริงของพาหนะ \vec{f} จะต้องนำมาลบด้วยความเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก \vec{g} เสียก่อนจึงจะได้ความเร่งของพาหนะ \vec{a} ดังสมการที่ 2.4 เพราะฉะนั้นในการวัดความเร่ง จะต้องคำนึงถึงกายภาพของโลกและกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ในทางฟิสิกส์

$$\vec{a} = \vec{f} - \vec{g} \quad (2.4)$$

2.2.2 เครื่องวัดความเร่งเชิงมุม (Gyroscope)

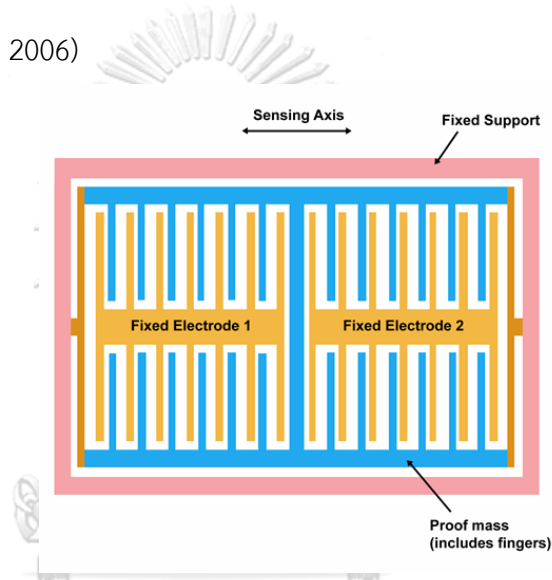
เครื่องวัดความเร่งเชิงมุมเรียกว่า ไจโรสโคป (Gyroscope) หรือ ไจโร (Gyro) มีลักษณะดังรูปที่ 2.8 ใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงการหมุนของวัตถุที่พยายามอนุรักษ์โมเมนตัมการหมุนไว้หากไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ระบบของเครื่องวัดความเร่งเชิงมุมดั้งเดิมนั้น ได้จากการใช้มวลหมุนที่เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ติดตั้งบนแกนยึดบนฐานของอุปกรณ์ (Gyroscope frame) โดยที่มวลทดสอบติดอยู่กับแกนหมุน (Spin axis) เมื่อวัตถุที่ใช้ในการคงสภาพไจโรไว้ ก็จะสามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมเทียบกับแกนหมุนได้



รูปที่ 2.8 หลักการของเครื่องวัดความเร่งเชิงมุม (Wang et al., 2012)

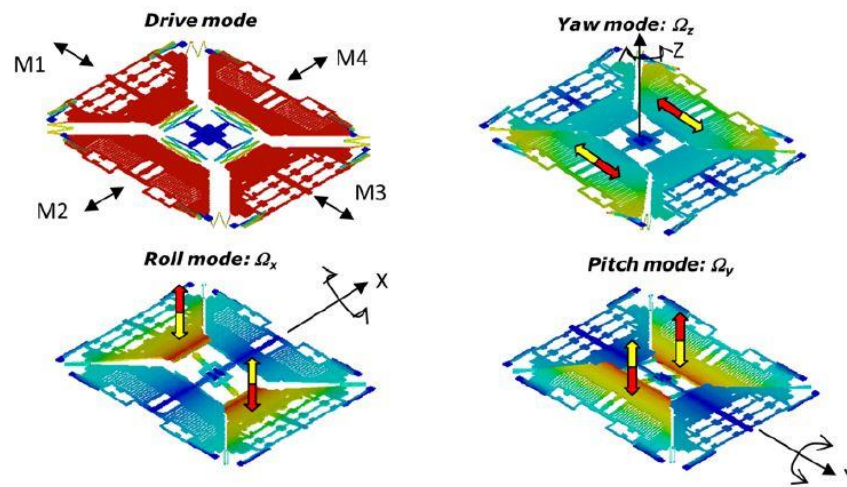
2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยชนิดเมมส์ (MEMS IMU)

อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยชนิดเมมส์ (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS IMU) มีลักษณะดังรูปที่ 2.9 เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยที่พัฒนาขึ้นล่าสุดให้มีขนาดเล็กกลง, น้ำหนักเบา และมีราคาที่ถูกกลง มีการนำเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ โดยส่วนของอุปกรณ์วัดความเร่งประกอบด้วยมวลทดสอบซึ่งติดตั้งอยู่ตรงกลางระหว่างอิเล็กโทรด (electrode) สองตัวที่ทำจากซิลิคอน (silicon) การเคลื่อนที่ของมวลทดสอบจะทำให้ความจุไฟฟ้าเปลี่ยน ซึ่งทำให้สามารถวัดขนาดของแรงที่ทำให้มวลทดสอบเกิดการกระจัดได้ หรืออีกกระบวนการหนึ่งคือการวัดแรงที่ใช้ในการรักษามวลทดสอบไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ (Godha, 2006)



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์วัดความเฉื่อยแบบเมมส์ (MEMS) ในส่วนของอุปกรณ์วัดความเร่ง (SILICON SENSING, 2017)

ในส่วนของอุปกรณ์วัดความเร่งเชิงมุมจะประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับการสั่นด้วยอัตราคงที่ ซึ่งควบคุมด้วยมอเตอร์ที่รักษาสภาพการสั่นไว้ หากมีแรง Coriolis ที่ทำให้เกิดการหมุนที่อยู่นอกแกนของการสั่น ก็จะนำมาคำนวณความเร่งเชิงมุมได้ (Godha, 2006) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์วัดความเฉื่อยแบบเมมส์ (MEMS) ในส่วนของอุปกรณ์วัดความเร็วเชิงมุม (STMicroelectronics, 2011)

2.3 อุปกรณ์วัดรอบและอัตราเร็วของล้อรถยนต์ (Distance Measuring Indicator, DMI)

อุปกรณ์วัดรอบและอัตราเร็วของล้อรถยนต์เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งเข้ากับระบบล้อรถยนต์ดังรูปที่ 2.11 เพื่อตรวจนับรอบรถยนต์จากการหมุนของล้อ DMI มีรูปแบบการติดตั้งภายนอก (External DMI) และติดตั้งกับโครงสร้างระบบขับเคลื่อนภายใน (Internal Rim DMI) ของรถยนต์ เมื่อติดตั้งแล้วจะมีการวัดสอบ (Calibrate) ด้วยระยะทางที่ทราบระยะแน่นอน จากนั้นนำค่าจำนวนพัลส์ (Pulse) ไปหารด้วยระยะทางที่รู้วัดได้ ก็จะได้ค่าพัลส์ต่อระยะทาง ระหว่างวิ่งรถยนต์นั้น ระบบจะมีข้อมูลการกระจัด ซึ่งจะนำมาเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในระบบนำหน (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553)



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์วัดรอบและอัตราเร็วของล้อรถยนต์

2.4 การบูรณาการเซ็นเซอร์ GNSS/INS/DMI (GNSS/INS/DMI Integration)

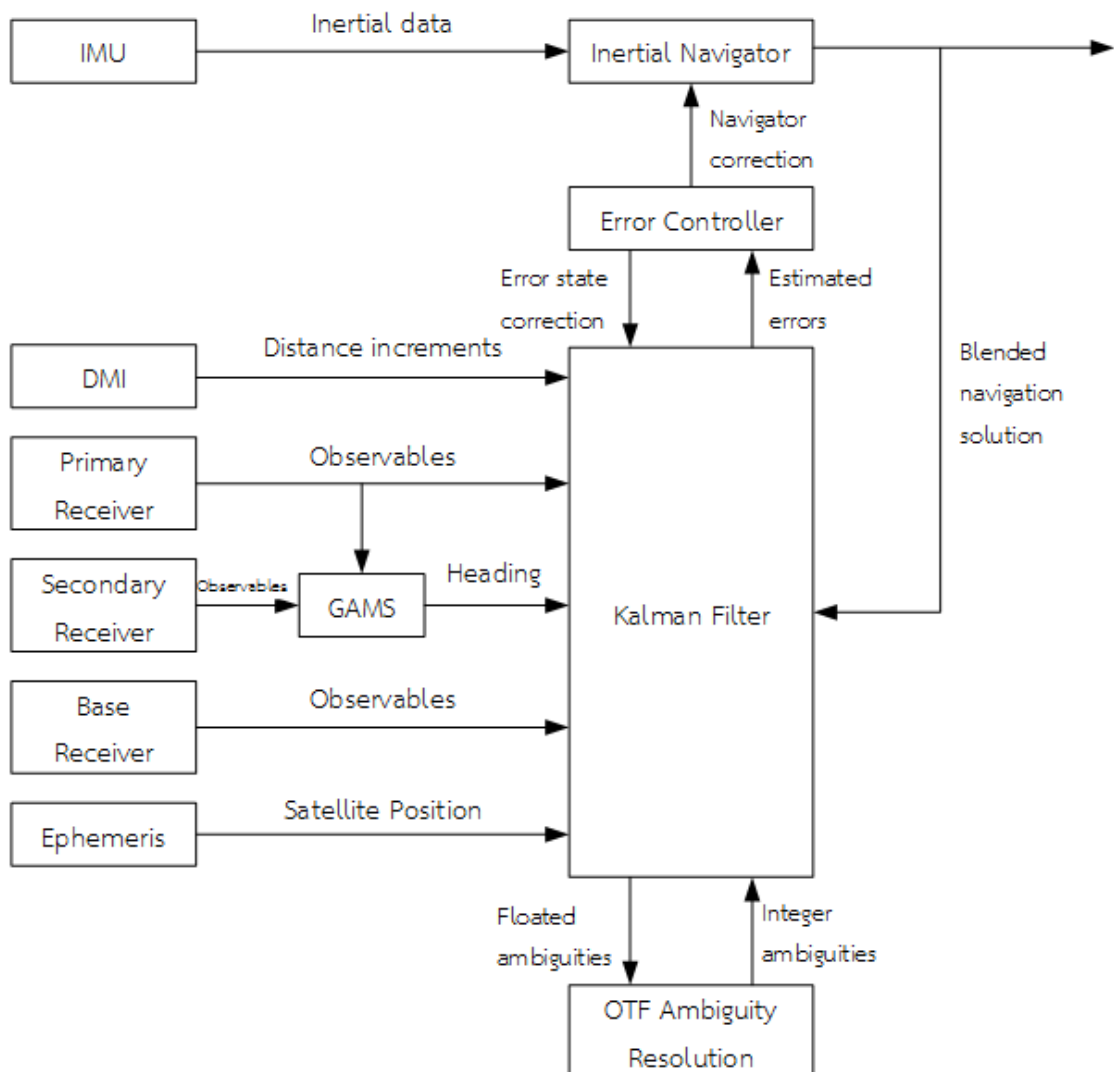
จากรูปที่ 2.12 แสดงถึงระบบการบูรณาการเซ็นเซอร์ ซึ่งประกอบด้วย IMU, เครื่องรับ GNSS สถานีจรและสถานีฐาน, และDMI โดย IMU ให้ค่าเร่งวัดของการเพิ่มขึ้นของความเร็วและมุมในกรอบพิกัดของเซ็นเซอร์ IMU, เครื่องรับสถานีฐานและสถานีจรให้ข้อมูลสำรวจและข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณได้, และ DMI ให้ข้อมูลรั้วครอบของล้อซึ่งจะสามารถคำนวณระยะทางได้

การบูรณาการเซ็นเซอร์จะประกอบด้วยขั้นตอนการประมวลผลได้แก่ การนำหนแบบเฉื่อย (inertial navigator), ตัวกรองคาลมาน, error controller และ การหาค่าเลขปริศนาแบบ On-The-Fly (OTF) การนำหนแบบเฉื่อยจะเป็นการคำนวณค่าตำแหน่ง, ความเร็ว, และการวางตัวของเซ็นเซอร์จากข้อมูล IMU ในส่วนของตัวกรองคาลมานจะเป็นการประมาณค่าคลาดเคลื่อนของการนำหนแบบเฉื่อย, IMU, DMI, และเครื่องรับ GNSS ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

- Inertial navigator errors (Scherzinger, 1996)
- Gyro และ accelerometer bias
- DMI scale factor and alignment errors
- Floated phase DD ambiguities

ซึ่งอาศัยสมการค่าเร่งวัดได้ดังนี้

- Inertial-GNSS DD pseudoranges
- Inertial-GNSS DD wide-lane phases
- Inertial-DMI integrated speed



รูปที่ 2.12 การบูรณาการเซ็นเซอร์ (ดัดแปลงจาก Scherzinger, 2001)

โดย DD หมายถึงการหาค่าต่างครั้งที่ 2 ระหว่างเครื่องรับสถานีฐานและสถานีจร นอกจากนี้มีการใช้ GNSS azimuth measurement system (GAMS) ซึ่งให้ข้อมูลรังวัดค่า heading กล่าวคือค่า latitude ที่เป็นอิสระจากค่าคลาดเคลื่อน heading จากการนำหนแบบเฉื่อย โดยอาศัย DGNSS ระหว่างเครื่องรับหลักและรอง แล้วนำค่าพิกัดที่ได้มาคำนวณ Azimuth ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$Azimuth = \tan^{-1} \frac{\Delta E}{\Delta N} \quad (2.5)$$

ΔE คือ ค่าต่างของค่าพิกัด Easting ระหว่างเครื่องรับทั้งสอง (เมตร)

ΔN คือ ค่าต่างของค่าพิกัด Northing ระหว่างเครื่องรับทั้งสอง (เมตร)

แต่ค่า Heading ของวิทยานพาหนะจะอ้างอิงกับทิศทางที่ชี้ไปยังแนวการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของยานพาหนะ เพราะฉะนั้นจะต้องนำค่า Azimuth ที่ได้ไปคำนวณกับค่าการวางตัวสัมพัทธ์ระหว่าง IMU, เครื่องรับหลัก, และเครื่องรับรอง จึงจะได้ค่า Heading

การหาค่าต่างครั้งที่ 2 ของสถานีฐานและสถานีจรสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.6) (Scherzinger, 2001) โดย SNV ย่อมาจาก Sensor Navigator Vehicle ซึ่งหมายถึงเป็นค่าของวิทยานพาหนะ, $base$ หมายถึงเป็นค่าของสถานีฐานซึ่งเป็นค่าคงที่, และ SV ย่อมาจาก Satellite Vehicle ซึ่งหมายถึงเป็นค่าของดาวเทียม GNSS นอกจากนี้ตัวห้อย “0” และตัวยก “^” หมายถึงค่า priori และค่าประมาณ posteriori ตามลำดับ

$$Z_{\phi_j} = \nabla \Delta r_j(\hat{r}_{SNV}, \hat{r}_{base}) + \lambda(\nabla \Delta \phi_j - \nabla \Delta N_{j_0}) \quad (2.6)$$

โดยที่

λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

\vec{r} คือ ตำแหน่งในระบบพิกัดพื้นหลักฐาน (X, Y, Z) (เมตร)

$\nabla \Delta \phi_j$ คือ เฟสของคลื่นจากการหาค่าต่างครั้งที่ 2

$\nabla \Delta N_{j_0}$ คือ เลขจำนวนเต็มปริศนาเริ่มต้น ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 90 วินาที ถึง 10 นาทีในการหยุดนิ่งในการคำนวณ (Scherzinger, 2001)

$$\nabla \Delta r_j(\hat{r}_{SNV}, \hat{r}_{base}) = \Delta r_j(\hat{r}_{SNV}, \hat{r}_{base}) - \Delta r_b(\hat{r}_{SNV}, \hat{r}_{base}) \quad (2.7)$$

คือ ระยะทำนายของค่าต่างครั้งที่ 2 ของสถานีฐานและดาวเทียม ระหว่างดาวเทียมดวงที่ j และดาวเทียมหลัก b

$$\Delta r_j(\hat{r}_{SNV}, \hat{r}_{base}) = r_j(\hat{r}_{SNV}) - r_j(\hat{r}_{base}) \quad (2.8)$$

คือ การหาค่าต่างครั้งที่ 1 ระหว่างตำแหน่งการนำหนแบบเฉื่อยและตำแหน่งของเครื่องรับสถานีฐานของดาวเทียมดวงที่ j

$$r_j(\hat{r}_{SNV}) = \sqrt{(x_{sv_j} - \hat{x}_{SNV})^2 + (y_{sv_j} - \hat{y}_{SNV})^2 + (z_{sv_j} - \hat{z}_{SNV})^2} \quad (2.9)$$

คือ ระยะจากตำแหน่งของวิทยานพาหนะถึงดาวเทียมดวงที่ j โดยมีแบบจำลองค่ารังวัดดังนี้

$$Z_{\phi_j} = -(\vec{e}_j - \vec{e}_b) \cdot \delta \vec{r} + \lambda a_j + \eta_{\phi_j} \quad (2.10)$$

โดยที่

$\delta \vec{r}$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของวิถียานพาหนะ (เมตร)

a_j คือ เลขปริศนาของการหาค่าต่างครั้งที่ 2 ระหว่างดาวเทียมดวงที่ j และดาวเทียมหลัก b

η_{ϕ_j} คือ noise ของเฟสของการหาค่าต่างครั้งที่ 2 ระหว่างดาวเทียมดวงที่ j และดาวเทียมหลัก b (เมตร)

\vec{e}_j คือ unit line-of-sight (LOS) จากตำแหน่งของวิถียานพาหนะ ถึงดาวเทียมดวงที่ j (เมตร)
โดยที่

$$\vec{e}_j \cong \frac{\partial r_j(\hat{r}_{SNV})}{\partial \hat{r}_{SNV}} = \frac{1}{r_j(\hat{r}_{SNV_0})} \begin{bmatrix} x_{SV_j} - x_{SNV_0} \\ y_{SV_j} - y_{SNV_0} \\ z_{SV_j} - z_{SNV_0} \end{bmatrix}^T \quad (2.11)$$

Error controller เป็นขั้นตอนในการคำนวณและนำค่าตรวจแก้จากค่าประมาณของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากตัวกรองคาลมานมาตรวจแก้การนำหนแบบเฉื่อย โดยจะปิดลูปที่ควบคุมค่าคลาดเคลื่อนของการนำหนแบบเฉื่อย

OTF Ambiguity Resolution จะเป็นการหาเลขปริศนาให้เป็นจำนวนเต็มจาก floated phase DD ambiguity ซึ่งในขั้นตอนนี้จะประยุกต์กระบวนการ Fast Ambiguity Search Filter (FASF) ของ Dingsheng Chen (1994) ในตัวกรองคาลมาน

กระบวนการหาค่าเลขปริศนาจะเป็นการดำเนินการกับเวกเตอร์ย่อย \vec{a} และเมทริกซ์ย่อย P_a คือเลขปริศนาจำนวนจริงและเมทริกซ์ VCV ตามลำดับของการประมาณค่าคลาดเคลื่อนของเลขปริศนาจำนวนจริง การบูรณาการเช่นนี้เรียกว่า การบูรณาการแบบผูกแน่น (tightly-coupled ambiguity resolution) และช่วยในการหาเลขปริศนาจำนวนจริงเมื่อค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของการนำหนแบบเฉื่อยมีขนาดเล็กเพียงพอ ซึ่งได้จากสหสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสถานีจรและเลขปริศนาจำนวนจริงที่ได้จากการหาค่าต่างครั้งที่ 2 ของเฟส ข้อมูลเมทริกซ์ที่บ่งชี้ความสามารถในการประมาณสโตคาสติกจะเท่ากับอินเวอร์สของเมทริกซ์ VCV ของค่าประมาณค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งในกรณีนี้คือเมทริกซ์ย่อย P_a^{-1} บ่งชี้ความสามารถในการหาค่าเลขปริศนาจำนวนจริงซึ่งแปรผันตรงกับค่า ADOP (Ambiguity dilution of precision) (Teunissen & Odijk, 1997) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$ADOP = \left(\sqrt{\det(P_a)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.12)$$

โดยที่

$ADOP$ คือ ความแม่นยำของค่าเลขปริศนาจำนวนจริง (cycle)

P_a คือ เมทริกซ์ VCV ของเลขปริศนาจำนวนจริง

n คือ ลำดับของเมทริกซ์ความแปรปรวนของเลขปริศนา

ในการทำตัวกรองคาลมานมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \vec{x}_s \\ \vec{a} \end{bmatrix} \quad \vec{x}_s = \begin{bmatrix} \delta \vec{r} \\ \vec{x}_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยที่

\vec{x}_s คือ ค่าคลาดเคลื่อนของการนำหนแบบเฉื่อย มีขนาด n_s

\vec{x}_2 คือ เวกเตอร์ขนาด $(n_s - 3) \times 1$ ประกอบด้วยค่าคลาดเคลื่อนทางความเร็ว (เมตรต่อวินาที), ค่าคลาดเคลื่อน misalignment (เรเดียน), ค่าคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดความเร่งเชิงเส้น (เมตรต่อวินาที²), ค่าคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดความเร่งเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

$\delta \vec{r}$ คือ เวกเตอร์ขนาด 3×1 ของค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งดังสมการที่ 2.10 (เมตร)

\vec{a} คือ เวกเตอร์ขนาด $(m - 1) \times 1$ ของเลขปริศนาของเฟสในการหาค่าต่างครั้งที่ 2 ดังสมการที่ 2.10

m คือ จำนวนเฟสและชุดเรเนจที่รับวัดได้ โดยชุดเรเนจและเฟสสามารถเขียนในรูปเวกเตอร์ได้ดังสมการ (2.14) และ (2.15) (Jonge & Tiberius, 1998)

$$\vec{z}_\rho = D^T A \delta \vec{r} + \vec{\eta}_\rho = [H_s : 0] \vec{x} + \vec{\eta}_\rho \quad (2.14)$$

$$\vec{z}_\phi = D^T A \delta \vec{r} + \lambda \vec{a} + \vec{\eta}_\phi = [H_s : H_a] \vec{x} + \vec{\eta}_\phi \quad (2.15)$$

โดยที่ $H_s = [D^T A : 0_{(m-1) \times (n_s-3)}]$ (2.16)

A คือเมทริกซ์ขนาด $m \times 3$ ของแบบจำลองค่ารังวัดของการหาค่าต่างครั้งที่ 1 ซึ่งมีสมาชิกเป็น

$$\begin{bmatrix} -\frac{x_{SV_1} - x_{SNV_0}}{r_1(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{y_{SV_1} - y_{SNV_0}}{r_1(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{z_{SV_1} - z_{SNV_0}}{r_1(\vec{r}_{SNV_0})} \\ -\frac{x_{SV_2} - x_{SNV_0}}{r_2(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{y_{SV_2} - y_{SNV_0}}{r_2(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{z_{SV_2} - z_{SNV_0}}{r_2(\vec{r}_{SNV_0})} \\ -\frac{x_{SV_3} - x_{SNV_0}}{r_3(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{y_{SV_3} - y_{SNV_0}}{r_3(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{z_{SV_3} - z_{SNV_0}}{r_3(\vec{r}_{SNV_0})} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{x_{SV_m} - x_{SNV_0}}{r_m(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{y_{SV_m} - y_{SNV_0}}{r_m(\vec{r}_{SNV_0})} & -\frac{z_{SV_m} - z_{SNV_0}}{r_m(\vec{r}_{SNV_0})} \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ดาวเทียมดวงที่ 1 เป็นดาวเทียมหลักในการหาค่าต่างครั้งที่ 2

D^T คือเมทริกซ์ขนาด $(m-1) \times m$ ของตัวดำเนินการของการหาค่าต่างครั้งที่ 2 ซึ่งมีสมาชิกเป็น $[-1_{(m-1) \times 1} \ : \ I_{(m-1) \times (m-1)}]$

$H_a = \lambda I$ (เมตร)

λ คือความยาวคลื่นเฟส (เมตร)

η_ρ และ η_ϕ คือเวกเตอร์ขนาด $(m-1)$ ของค่า noise ของการวัดซูโดเรนจ์และเฟสตามลำดับ ซึ่งไม่มีสหสัมพันธ์กันระหว่าง epoch (เมตร)

R_ρ และ R_ϕ คือเมทริกซ์ VCV ขนาด $(m-1) \times (m-1)$ ของการวัดซูโดเรนจ์และเฟสตามลำดับ เราต้องการหาการแพร่ของเลขปริศนาจำนวนจริงที่ประมาณได้จากตัวกรองคาลมานหลังจากการอัปเดตการวัดเฟสจากการที่ไม่สามารถรับสัญญาณ GNSS ได้ ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลเฟส แต่สามารถหา posteriori ของเมทริกซ์ VCV ของตัวกรองคาลมานได้ดังนี้ (Scherzinger, 2001)

$$P^+ = P^- - P^- H^T (H P^- H^T + R)^{-1} H P^- \quad (2.17)$$

เมทริกซ์ VCV ทั้ง priori และ posteriori สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} P_s & P_{sa} \\ P_{sa}^T & P_a \end{bmatrix} \quad P_s = \begin{bmatrix} P_{\delta r} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

เมทริกซ์ VCV คือเมทริกซ์จัตุรัส ซึ่งมีสมาชิกในแนวทแยงเป็นค่าความแปรปรวนของตัวแปรนั้นและมีสมาชิกนอกแนวทแยงเป็นค่าที่แสดงถึงสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยที่ $P_{\delta r}$ คือ เมทริกซ์ VCV ของค่าประมาณ δr โดยในขั้นตอนการหาเลขปริศนาจำนวนจริงจะเริ่มใหม่เมื่อไม่สามารถรับสัญญาณ GNSS ได้ กล่าวคือไม่มีข้อมูลรังวัดเฟส เพราะฉะนั้น

$$P_a^- = \sigma_{a_0}^2 D^T D \quad \text{และ} \quad P_{sa}^- = 0 \quad (2.19)$$

เมทริกซ์ VCV ของการประมาณค่าอัปเดตของเลขปริศนาจำนวนจริงที่ได้จากสมการ (2.16), (2.17), และ (2.18) ดังนี้ (Scherzinger, 2001)

$$P_a^+ = P_a^- - P_a^- H_a^T R_a^{-1} H_a P_a^- \quad (2.20)$$

$$\text{โดยที่} \quad R_a = D^T A P_{\delta r} A^T D + H_a P_a^- H_a^T + R_\phi \quad (2.21)$$

ค่าที่ได้การนำหน้าแบบเฉื่อยจะถูกตรวจแก้ด้วยค่าประมาณของค่าคลาดเคลื่อนและ $P_{\delta r}^-$ เพื่อประมาณค่าที่แท้จริงของ priori ของ VCV ของค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของการนำหน้าแบบเฉื่อย และเมื่อไม่สามารถรับสัญญาณ GNSS ได้จะอาศัยวิธีการต่าง ๆ ในการประมาณค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งได้ดังนี้

- วิธีการที่ 1 ใช้ตัวกรองคาลมานในการประมวลผลข้อมูลค่ารังวัดระยะทางจาก DMI ในช่วงที่ไม่สามารถรับสัญญาณ GNSS ได้ เพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของการนำหนแบบเฉื่อย เพื่อให้ตำแหน่งเกิดการกระโดด (drift) ที่ต่ำ
- วิธีการที่ 2 ใช้ตัวกรองคาลมานในการประมาณ (extrapolate) ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจากข้อมูลค่ารังวัด GNSS สุดท้ายก่อนที่จะไม่สามารถรับสัญญาณ GNSS ได้
- วิธีการที่ 3 ใช้การปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares adjustment) กับสมการค่ารังวัดชุดโตนเรนจ์ (สมการที่ 2.14) โดยวิธีการนี้จะมีข้อจำกัดจากการเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาที่ไม่สามารถรับสัญญาณ GNSS ได้

ในวิธีการข้างต้นนี้จะให้เมทริกซ์ VCV (P_S^-) ของค่าคลาดเคลื่อน priori ทางตำแหน่งในการนำหนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงลำดับได้โดยการพิจารณาว่า ถ้าวิธีการที่ 1 ให้ค่า priori ของค่าคลาดเคลื่อนในการนำหนน้อยกว่าวิธีการที่ 2 แล้ว $P_{S_1}^- \leq P_{S_2}^-$ แสดงว่า $P_{S_2}^- - P_{S_1}^-$ เป็นเมทริกซ์ positive semi-definite เพราะฉะนั้น เราสามารถเรียงลำดับความถูกต้องของเมทริกซ์ VCV ของเลขปริศนาจำนวนจริง ซึ่งสัมพันธ์กับเมทริกซ์ VCV ของค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งดังนี้ (Scherzinger, 2001)

$$\begin{aligned} P_{a_1}^+ - P_{a_2}^+ &= P_a^- H_a^T (R_{a_2}^{-1} - R_{a_1}^{-1}) H_a P_a^- \\ &= \lambda^2 \sigma_{a_0}^4 D^T D R_{a_2}^{-1} D^T A (P_{\delta r_1}^- - P_{\delta r_2}^-) A^T D R_{a_2}^{-1} D^T D \end{aligned} \quad (2.22)$$

ฝั่งขวามือของสมการ (2.22) คือผลคูณของเมทริกซ์ positive semi-definite กับรูปแบบกำลังสองของ

$$D^T A (P_{\delta r_1}^- - P_{\delta r_2}^-) A^T D$$

เงื่อนไข $P_{a_1}^{+^{-1}} \leq P_{a_2}^{+^{-1}}$ ก็ต่อเมื่อ $P_{\delta r_1}^- \leq P_{\delta r_2}^-$ ซึ่งจะลดช่วงในการหาเลขปริศนาลงอีกด้วย ถ้าวิธีการประมาณค่า priori ของค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งมีค่าแตกต่างกันโดยค่าคลาดเคลื่อนที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

$$P_{\delta r_1}^- \leq P_{\delta r_2}^- \leq P_{\delta r_3}^- \quad (2.23)$$

แล้วเมทริกซ์ VCV ของค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่ได้จากวิธีการที่มีความถูกต้องมากกว่าสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$P_{a_1}^{+-1} \leq P_{a_2}^{+-1} \leq P_{a_3}^{+-1} \quad (2.24)$$

และช่วงการหาเลขปริศนาจะลดลงดังต่อไปนี้

$$ADOP_1 \leq ADOP_2 \leq ADOP_3 \quad (2.25)$$

อสมการข้างต้นจะเข้าใกล้การเป็นสมการก็ต่อเมื่อช่วงเวลาที่ไม่สามารถรับสัญญาณ GNSS ได้นั้นเพิ่มขึ้นและยังส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของการนำหนแบบเฉื่อย เพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่ง การศึกษานี้จะใช้วิธีที่หนึ่งเป็นหลักเนื่องจากเป็นวิธีที่มีค่า ADOP น้อยที่สุดในสามวิธี ส่งผลให้การหา ค่าเลขปริศนาที่มีความถูกต้องมากที่สุด ในสามวิธีเช่นกัน

2.5 ระบบสแกนเลเซอร์

ระบบสแกนเลเซอร์มีการทำงานหลัก คือ การส่งคลื่นเลเซอร์ไปยังวัตถุหรือภูมิประเทศ และ บันทึกลงเวลาที่วัดตั้งแต่คลื่นถูกส่งออกไปจนสะท้อนกลับยังเซ็นเซอร์ แล้วนำเวลาที่ได้มาคำนวณกับ ความเร็วแสงดังสมการที่ 2.26 ก็จะได้ระยะทางระหว่างจุดของวัตถุหรือภูมิประเทศกับเครื่องสแกน โดยทั่วไปแล้วชุดเครื่องมือจะประกอบด้วยเครื่องยิงเลเซอร์ (laser emitter), เครื่องรับเลเซอร์ (laser receiver), เครื่องจับเวลา (timing unit) (Wolf et al., 2014)

$$D = V \frac{t}{2} \quad (2.26)$$

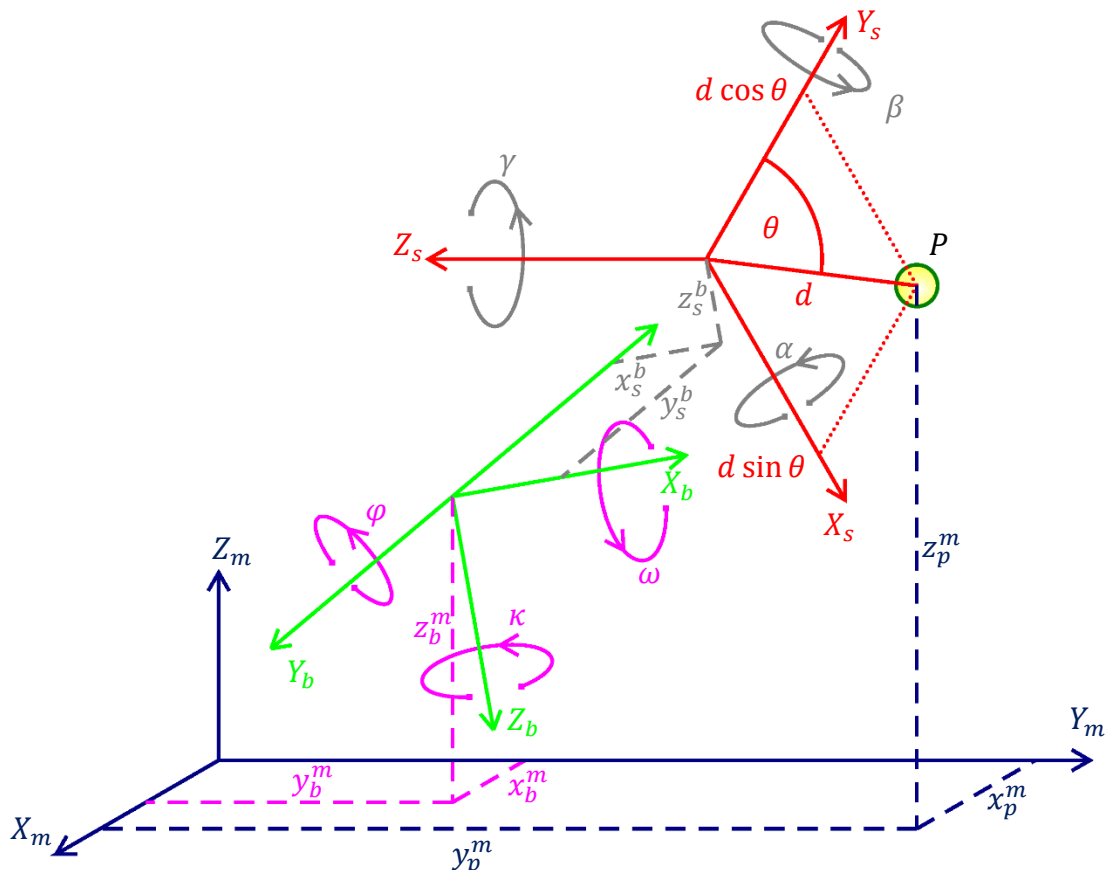
D คือ ระยะทางระหว่างจุดของวัตถุหรือภูมิประเทศกับเครื่องสแกน (เมตร)

V คือ ความเร็วแสงในบรรยากาศ (เมตรต่อวินาที)

t คือ ระยะเวลาที่คลื่นถูกส่งออกไปแล้วสะท้อนกลับมา แล้วถูกบันทึกได้ (วินาที)

การสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanning, TLS) จะทำโดยตั้งเครื่องสแกน เลเซอร์อยู่กับที่ในพื้นที่สำรวจ แล้วทำการสแกนโดยอาศัยการหมุนของหัวเครื่องสแกนเลเซอร์หรือ การใช้กระจกเพิ่มเติมเนื่องจากเครื่องสแกนเลเซอร์ตั้งอยู่กับที่ ข้อมูลที่ได้จะถูกยึดโยงค่าพิกัดด้วยที่ หมายซึ่งทราบค่าพิกัด โดยการแปลงค่าพิกัดสามมิติจากระบบพิกัดเครื่องสแกนไปยังระบบพื้น ฐาน แล้วนำมาใช้กับจุดทุกจุดที่เหลือ วิธีการยึดโยงค่าพิกัดนี้เรียกว่าการยึดโยงค่าพิกัดทางอ้อม (Indirect Georeferencing) นอกจากนี้การสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินยังสามารถยึดโยงค่าพิกัดได้โดย การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ไว้บนเครื่องสแกน ตำแหน่งของเครื่องรับจะถูกนำมาใช้ ในการแปลงค่าพิกัด (Coordinate Transformation) จากระบบพิกัดเครื่องสแกนไปยังระบบพิกัดพื้น ฐาน วิธีการยึดโยงค่าพิกัดนี้เรียกว่า การยึดโยงค่าพิกัดทางตรง (Direct Georeferencing) นอกจากนี้แล้วการสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินยังสามารถกระทำได้ในรูปแบบเคลื่อนที่โดยการติดตั้ง

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และระบบนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อยเพื่อใช้ในการยึดโยงค่าพิกัด แต่ข้อมูลที่ได้จะมีความถูกต้องน้อยกว่าการสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินแบบอยู่กับที่ และผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับารรับสัญญาณดาวเทียม (Wolf et al., 2014)



รูปที่ 2.13 การยึดโยงค่าพิกัดทางตรง

กำหนดให้ตัวห้อยและตัวยก “p”, “s”, “b”, และ “m” หมายถึง จุดของวัตถุในภูมิภาค ประเทศ, ระบบพิกัดเครื่องสแกนเลเซอร์ (สีแดง), ระบบพิกัดยานพาหนะ (สีเขียว), และระบบพิกัดพื้นหลักฐาน (สีน้ำเงิน) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงมีขั้นตอนหลักดังนี้

- 1) การแปลงค่าพิกัด (สีเทา) จุดของวัตถุ X_p^s ซึ่งอยู่ในระบบพิกัดเครื่องสแกนเลเซอร์ (s) ให้เป็นค่าพิกัดจุดของวัตถุในระบบพิกัดยานพาหนะ (b) โดยการหมุนเวกเตอร์ค่าพิกัดด้วยเมทริกซ์การหมุน R_s^b และเลื่อนขนานด้วยเวกเตอร์ T_s^b ดังแสดงในรูปที่ 2.13
- 2) การแปลงค่าพิกัด (สีชมพู) จุดของวัตถุจากข้อ 1) ซึ่งอยู่ในระบบพิกัดยานพาหนะ (b) ให้เป็นค่าพิกัดจุดของวัตถุ X_p^m ในระบบพิกัดพื้นหลักฐาน (m) โดยการหมุนเวกเตอร์ค่าพิกัดที่ได้จากข้อ 1) ด้วยเมทริกซ์ R_b^m และเลื่อนขนานด้วยเวกเตอร์ T_b^m ดังแสดงในรูปที่ 2.13

การยึดโยงค่าพิกัดทางตรงสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการได้ดังนี้ (ดัดแปลงจาก Mattheuwsen et al., 2019; Peng et al., 2020)

$$X_p^m = R_b^m(R_s^b X_p^s + T_s^b) + T_b^m \quad (2.27)$$

$X_p^m(x_p^m, y_p^m, z_p^m)$ คือ เวกเตอร์ขนาด 3×1 ของค่าพิกัดจุดของวัตถุในระบบพิกัดพื้นหลักฐาน

$T_b^m(x_b^m, y_b^m, z_b^m)$ คือ เวกเตอร์ค่าพิกัดของยานพาหนะในระบบพิกัดพื้นหลักฐาน ซึ่งใช้ในการเลื่อนขนานแกนระบบพิกัด b ไปยังแกนระบบพิกัด m

$R_b^m(\omega, \varphi, \kappa)$ คือ เมทริกซ์การหมุนด้วยมุม Roll (ω), Pitch (φ), และ Heading (κ) คือ ค่าการวางตัวของยานพาหนะในระบบพิกัดพื้นหลักฐาน ซึ่งใช้ในการหมุนแกนระบบพิกัด b ให้ขนานกับแกนระบบพิกัด m

$T_s^b(x_s^b, y_s^b, z_s^b)$ คือ เวกเตอร์ค่าพิกัดของเครื่องสแกนเลเซอร์ในระบบพิกัดยานพาหนะ ซึ่งใช้ในการเลื่อนขนานแกนระบบพิกัด s ไปยังแกนระบบพิกัด b

$R_s^b(\alpha, \beta, \gamma)$ คือ เมทริกซ์การหมุนด้วยมุม α , β , และ γ คือ ค่าการวางตัวของเครื่องสแกนเลเซอร์ในระบบพิกัดยานพาหนะ ซึ่งใช้ในการหมุนแกนระบบพิกัด s ให้ขนานกับแกนระบบพิกัด b

$X_p^s(d, \theta)$ คือ เวกเตอร์ค่าพิกัดจุดของวัตถุในระบบพิกัดเครื่องสแกนเลเซอร์ โดยที่ d และ θ คือ ระยะสแกนและมุมสแกนจากเครื่องสแกนเลเซอร์ไปยังจุดของวัตถุ

เมทริกซ์การหมุนมีลักษณะดังนี้

$$R_1^2(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ คือมุมหมุนรอบแกน X, Y, และ Z ตามลำดับ ของระบบพิกัดที่ 1 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ที่ทำให้แกนพิกัดของระบบพิกัดที่ 1 วางตัวขนานกับแกนพิกัดของระบบพิกัดที่ 2

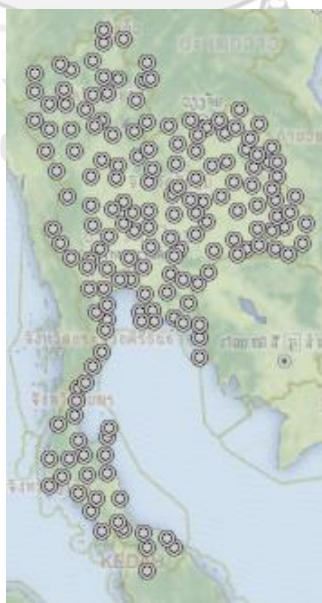
ข้อมูลสแกนเลเซอร์หรือจุดของวัตถุประกอบด้วยชุดค่าพิกัดสามมิติเรียกว่า พอยท์คลาวด์ (point cloud) โดยสี่ของพอยท์คลาวด์นั้นมาจากการแปลงพิกัดพอยท์คลาวด์จากค่าพิกัดในระบบพื้นหลักฐานให้อยู่ในระบบพิกัดภาพของกล้องพานอรามา (Panoramic camera) แล้วนำค่าสี RGB ของตำแหน่งจุดภาพ (pixel) ที่พอยท์คลาวด์อยู่มากำหนดสีของพอยท์คลาวด์แต่ละจุด

ข้อมูลพอยท์คลาวด์มีอัตราการเก็บข้อมูลสแกนที่ค่อนข้างสูง ทำให้พอยท์คลาวด์ประกอบด้วยค่าพิกัดนับล้านจุด และจากการที่คลื่นเลเซอร์สามารถทะลุผ่านพืชพรรณไม้และวัตถุอื่น ๆ ได้ ส่งผลให้แต่ละคลื่นสามารถสะท้อนออกมาได้หลายครั้ง เช่น เมื่อคลื่นถูกปล่อยออกมา ครั้งแรกอาจตกกระทบที่ใบไม้ก่อนและสะท้อนกลับมาที่เซนเซอร์ คลื่นส่วนที่เหลืออาจตกกระทบกิ่งไม้หรือ

พื้นดินแล้วสะท้อนกลับมาที่เซนเซอร์ (Wolf et al., 2014) การจัดการข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ข้อมูลเฉพาะที่ต้องการ เช่น จากตัวอย่างข้างต้นหากต้องการข้อมูลที่ภาคพื้นดินก็ทำการกรองข้อมูลที่มาจากการสะท้อนครั้งสุดท้ายเท่านั้น

2.6 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร

ปัจจุบันกรมแผนที่ทหารได้สร้างโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องจำนวน 80 สถานีครอบคลุมทั่วประเทศไทย ต่อมาได้มีการนำสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องจากหน่วยงานอื่นเข้ามาในโครงข่ายของกรมแผนที่ทหาร โดยแต่ละสถานีมีที่ตั้งดังรูปที่ 2.14 ซึ่งมีส่วนควบคุมตั้งอยู่ที่กรมแผนที่ทหาร ส่วนที่ 2 ถนนลาดพร้าว แขวงวังทองหลาง กรุงเทพมหานคร โดยศูนย์ควบคุมนั้นใช้ชุดซอฟต์แวร์ระบบ Leica GNSS Spider เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ โดยจะให้บริการดาวนำโหนดข้อมูล RINEX ของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องในโครงข่ายของกรมแผนที่ทหารตามวัน, เวลา, และสถานีที่ผู้ใช้กำหนด โดยผู้ใช้สามารถดาวนำโหนดข้อมูลย้อนหลังได้ไม่เกินสามเดือนทางเว็บไซต์ <https://cors.rtsd.mi.th/SBC/spider-business-center> และให้บริการค่าปรับแก้ให้กับสถานีผู้ใช้ในการรังวัดด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่ด้วยเครือข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง โดยให้บริการวิธีการปรับแก้ทั้ง 4 แบบ ได้แก่ VRS, FKP, MAC, และ I-MAC โดยทั้ง 4 แบบนั้นให้ค่าความถูกต้องของค่าพิกัด 5 เซนติเมตร (Laoniphon et al., 2021)



รูปที่ 2.14 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร (กรมแผนที่ทหาร, 2564)

2.7 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE)

ในงานวิจัยนี้ ใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เพื่อประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทั้งทางราบและทางตั้งของตัวอย่างพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบ ซึ่งแสดงในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้ (FGDC, 1998)

2.7.1 ค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (Horizontal Accuracy)

$$RMSE_r = \sqrt{\sum ((x_{data,i} - x_{check,i})^2 + (y_{data,i} - y_{check,i})^2) / n} \quad (2.28)$$

โดยที่

$RMSE_r$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (เมตร)
$x_{data,i}, y_{data,i}$	คือ ค่าพิกัดทางราบของพอยท์คลาวด์ (เมตร)
$x_{check,i}, y_{check,i}$	คือ ค่าพิกัดอ้างอิงทางราบ (เมตร)
i	คือ จุดตรวจสอบ
n	คือ จำนวนจุดตรวจสอบ

2.7.2 ค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง (Vertical Accuracy)

$$RMSE_z = \sqrt{\sum (z_{data,i} - z_{check,i})^2 / n} \quad (2.29)$$

โดยที่

$RMSE_z$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง (เมตร)
$z_{data,i}$	คือ ค่าพิกัดทางตั้งของพอยท์คลาวด์ (เมตร)
$z_{check,i}$	คือ ค่าพิกัดอ้างอิงทางตั้ง (เมตร)
i	คือ จุดตรวจสอบ
n	คือ จำนวนจุดตรวจสอบ

2.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD หรือ σ)

ในงานวิจัยนี้จะนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาใช้ในการวัดการกระจายของข้อมูลซึ่งจะแสดงถึงคุณภาพของข้อมูล เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีความสัมพันธ์กับความแม่นยำของการวัด กล่าวคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย (วิชัย เที่ยงวีรชน, 2549) การกระจายของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มก็น้อย หมายถึงมีการเกาะกลุ่มหรือมีความแม่นยำในการวัดสูง ในทางกลับกันค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาก อาจทำให้ผลของงานวิจัยคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.30)$$

โดยที่

SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

N คือ จำนวนตัวอย่าง

X_i คือ ค่าพิภคที่วัดได้จากกลุ่มตัวอย่าง (เมตร)

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของพิภคที่วัดได้จากกลุ่มตัวอย่าง (เมตร)

การหาค่าความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นกับจำนวนของการรังวัดที่เป็นเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2549)

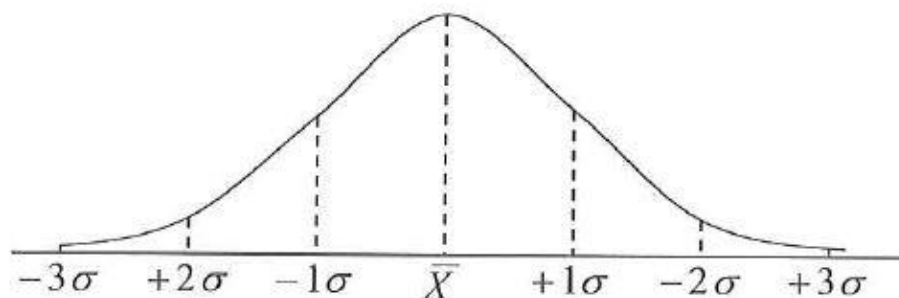
$$E_p = C_p \times \sigma_x \quad (2.31)$$

โดยที่

E_p คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มที่เป็นไปได้ที่อัตราร้อยละ p ของการวัด 1 ครั้ง

C_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ใต้กราฟการแจกแจงปกติที่อัตราส่วนร้อยละ p

σ_x คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ



รูปที่ 2.15 พื้นที่ใต้กราฟการแจกแจงแบบปกติ (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2549)

ค่าอัตราส่วนร้อยละ p จะบ่งบอกถึงระดับความเชื่อมั่น (confidence level) ของการวัด ที่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นตามสมการข้างต้น โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.5 ความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อน $p(-3\sigma \leq \varepsilon \leq +3\sigma) = 99.5\%$ เพื่อที่จะทำการคัดออก (rejecting) ข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดใหญ่ (gross error) (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2549) จากรูปที่ 2.14 แสดงพื้นที่ใต้กราฟการแจกแจงปกติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.5 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ \bar{X} ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟการแจกแจงปกติทั้งหมด คือ จำนวน การรังวัดเท่ากับร้อยละ 100 ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ $\pm 3\sigma$ จะมีพื้นที่ใต้กราฟคิดเป็นร้อยละ 99.5 ของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

2.9 เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบวิธียานพาหนะจากข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนแบบ Real-time และแบบที่ได้จากการประมวลผลภายหลังโดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม 4 ประเภท โดยจะเปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ซึ่งที่ผ่านมาได้มีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

Guan et al. (2016) ได้ตรวจสอบการใช้ระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ในการสำรวจพื้นที่ในเมือง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบในเขตเฟิงไท่ กรุงปักกิ่ง โดยแบ่งพื้นที่ทดสอบออกเป็นสองพื้นที่ ในพื้นที่ทดสอบที่หนึ่งจะมีลักษณะเป็นถนนสี่ช่องทาง บริเวณรอบข้างมีอาคารที่ปกอาศัยสูงประมาณ 5-6 ชั้นและโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เป็นห้วงๆ ตลอดเส้นทาง แต่ผู้วิจัยได้พิจารณาแล้วว่าเป็นพื้นที่ค่อนข้างเปิดโล่ง ทำให้รับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ดี และพื้นที่ทดสอบที่สองจะมีอาคารพาณิชย์สูงและอะพาร์ตเมนต์ ซึ่งจะทำให้บังสัญญาณดาวเทียม GNSS มากกว่าพื้นที่ทดสอบที่หนึ่ง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้รังวัดจุดตรวจสอบตลอดเส้นทางด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลนในทันที จำนวน 30 จุดในพื้นที่ทดสอบแรกเพื่อประเมินความถูกต้องของข้อมูลพอยท์คลาวด์ ผลการทดสอบพบว่าในการรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในพื้นที่ทดสอบที่หนึ่งมีค่า PDOP (Position Dilution Of Precision) ประมาณ 2.5 และรับสัญญาณดาวเทียมได้ 6-10 ดวง มีช่วงเวลาที่รับสัญญาณได้ 5 ดวงทำให้ความถูกต้องทางตำแหน่งลดลงจาก 1.0 เซนติเมตร เหลือ 2.1 เซนติเมตร เนื่องจากยานพาหนะขับผ่านได้สะพาน ในขณะที่พื้นที่ทดสอบที่สองมีช่วงเวลา 3 ช่วงที่รับสัญญาณ GPS ได้ไม่ดี โดยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของตำแหน่งของทั้งสามช่วงเท่ากับ 0.07 เมตรในสามแกนพิกัด ในส่วนของตำแหน่งของข้อมูลพอยท์คลาวด์เมื่อเทียบกับตำแหน่งของจุดทดสอบพบว่ามีความถูกต้องในทางราบเท่ากับ 0.02-0.03 เมตร และทางตั้งเท่ากับ 0.04-0.05 เมตร ซึ่งมีความถูกต้องเพียงพอ (ต่ำกว่า 5 เซนติเมตร) สำหรับใช้ในงานสำรวจในพื้นที่เมือง

Mattheuwsen et al. (2019) ได้ศึกษาการทำนายและการตรวจสอบความถูกต้องเชิงสัมบูรณ์และสัมพัทธ์ในเชิงทฤษฎีจากการใช้เครื่องมือระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่แบบ low-end และ hi-end ในพื้นที่เมือง, พื้นที่พักอาศัย, และพื้นที่ชนบท ในแบบจำลองการทำนายความถูกต้องจะพิจารณาจากการแพร่ค่าคลาดเคลื่อนของสมการการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงของตัวแปรทั้งหมด 17 ตัวแปร ได้แก่ ค่าพิกัดจุดของวัตถุจากระบบพิกัดสแกนเลเซอร์ 2 ตัวแปร, ค่าการวางตัวสัมพัทธ์ระหว่างเครื่องสแกนเลเซอร์และ IMU 3 ตัวแปร, ค่า Lever-arm offset ระหว่างเครื่องสแกนเลเซอร์และ IMU 3 ตัวแปร, ค่าการวางตัว (Roll, Pitch, Heading) ระหว่าง IMU และ GNSS หรือระบบพิกัดพื้น

หลักฐาน 3 ตัวแปร, ค่า Lever-arm offset ระหว่าง IMU และ GNSS 3 ตัวแปร, และค่าพิกัดของเสาอากาศ GNSS ในระบบพิกัดพื้นหลักฐาน ในการทดสอบการทำนายความถูกต้องเชิงสัมบูรณ์จะวางจุดทดสอบทุก ๆ ระยะทาง 50 – 75 เมตร ตลอดเส้นทางการสำรวจในพื้นที่เมือง, พื้นที่พักอาศัย, และพื้นที่ชนบทจะมีจุดตรวจสอบทั้งหมด 51 จุด, 67 จุด, และ 80 จุด ตามลำดับ ซึ่งจุดตรวจสอบจะใช้การรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีประกอบกับการใช้กล้องประมวลผลรวมในการขยายจุดตรวจสอบไปในพื้นที่อ้างอิงสัญญาณ GNSS และในการทดสอบการทำนายความถูกต้องเชิงสัมพัทธ์จะใช้การวัดระยะทางระหว่างจุดตรวจสอบทั้งหมด 100 คู่ โดยแต่ละคู่จะติดอยู่ที่กำแพงของสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ตรงข้ามกัน และใช้ระยะทางระหว่างจุดตรวจสอบที่ได้จากการสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน จากการทดสอบพบว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าความถูกต้องเชิงสัมบูรณ์ได้ทั้งหมด โดยในพื้นที่ชนบทซึ่งรับสัญญาณ GNSS ได้ดี แบบจำลองสามารถทำนายค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งได้ทั้ง low-end และ hi-end ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบเกินกว่าค่าที่ทำนายไว้ถึง 2 เท่า ในพื้นที่พักอาศัยและพื้นที่เมืองซึ่งรับสัญญาณ GNSS ได้ไม่ดี แบบจำลองสามารถทำนายค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดได้เฉพาะการใช้เครื่องมือ hi-end เท่านั้น ซึ่งอาจมาจากการประมาณความถูกต้องของตัวแปรที่มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ค่าจากการศึกษาที่ผ่านมาแทนการใช้ค่าที่ได้จากการผลิตซึ่งไม่มีการเผยแพร่ออกมา นอกจากนี้ในขั้นตอนการวัดจุดอาศัยข้อมูลภาพและข้อมูลพอยท์คลาวด์ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนที่ส่งผลกระทบต่อทดสอบ ซึ่งควรใช้ intensity point clouds แต่เนื่องจากพอยท์คลาวด์ที่ได้จากเครื่องมือ low-end มีความหนาแน่นไม่เพียงพอที่จะจำแนกจุดตรวจสอบได้ จึงต้องอาศัยการวัดจุดจาก Color point clouds และอีกสาเหตุหนึ่งอาจมาจากการติดตั้งเสาอากาศ GNSS ที่เครื่องมือ hi-end มีการติดตั้งสูงกว่าทำให้ลดผลกระทบจากการสำรวจในพื้นที่เมืองและพื้นที่พักอาศัยลง

Peng et al. (2020) ได้ศึกษาการใช้เครื่องมือแบบประหยัดในการทำระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ในการจัดทำแผนที่ความละเอียดสูง (High definition maps, HD maps) เพื่อรองรับยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยการประมวลผลภายหลังข้อมูล GNSS/INS เพื่อให้ได้วิถียานพาหนะ แล้วนำมายืดโยงค่าพิกัดทางตรงกับข้อมูลระบบสแกนเลเซอร์ หลังจากนั้นปรับแก้วิถียานพาหนะด้วยข้อมูลค่าพิกัดจุดควบคุมทุก ๆ 30 – 50 เมตร ซึ่งที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีประกอบกับการใช้กล้องประมวลผลรวม (Total station) และใช้กระบวนการ Normal Distribution Transform (NDT) ในการแก้ปัญหาการไม่ซ้อนทับกันของข้อมูลพอยท์คลาวด์จากการสแกนหลายครั้งในบริเวณเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าคลาดเคลื่อนของวิถี

ยานพาหนะ โดยจะวิเคราะห์ผลการทดสอบเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ความหนาแน่นของพอยท์คลาวด์ โดยสุ่มเลือกเครื่องหมายลูกศรบนพื้นถนนจำนวน 5 เครื่องหมาย, 2) ค่าต่างของค่าพิกัดทางราบระหว่าง color point clouds และ intensity point clouds โดยสุ่มเลือกเครื่องหมายลูกศรบนพื้นถนนจำนวน 5 เครื่องหมาย, 3) การประเมินความถูกต้องสัมบูรณ์ โดยใช้จุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด เป็นค่าพิกัดอ้างอิงเปรียบเทียบกับค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบ จากการทดสอบพบว่า 1) พอยท์คลาวด์จากการใช้เครื่องมือแบบประหยัดมีความหนาแน่นน้อยกว่าการใช้เครื่องมือ surveying-grade อยู่ในระดับเซนติเมตร ซึ่งมีความหนาแน่นเพียงพอในการ extract ข้อมูลความสูงภูมิประเทศความละเอียดสูงได้ 2) ค่าต่างของค่าพิกัดทางราบระหว่าง color point clouds และ intensity point clouds จากเครื่องหมายลูกศรทั้ง 5 เครื่องหมายมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.6 เซนติเมตร 3) ความถูกต้องสัมบูรณ์ของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดนั้นมีค่า RMSE ของค่าพิกัดทางราบและค่าพิกัด 3 มิติไม่เกิน 10 เซนติเมตร จากผลการทดสอบการใช้เครื่องมือแบบประหยัดสามารถสร้างพอยท์คลาวด์ที่มีความหนาแน่นเพียงพอที่จะ extract ข้อมูลความสูงภูมิประเทศความละเอียดสูงที่เพียงพอต่อการทำแผนที่ความละเอียดสูงได้ โดยมีความหนาแน่นของพอยท์คลาวด์และพอยท์คลาวด์ที่มีสีไม่ต่ำกว่า 4500 และ 1400 จุดต่อตารางเมตรตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีความถูกต้องเพียงพอที่จะทำแผนที่ความละเอียดสูงได้

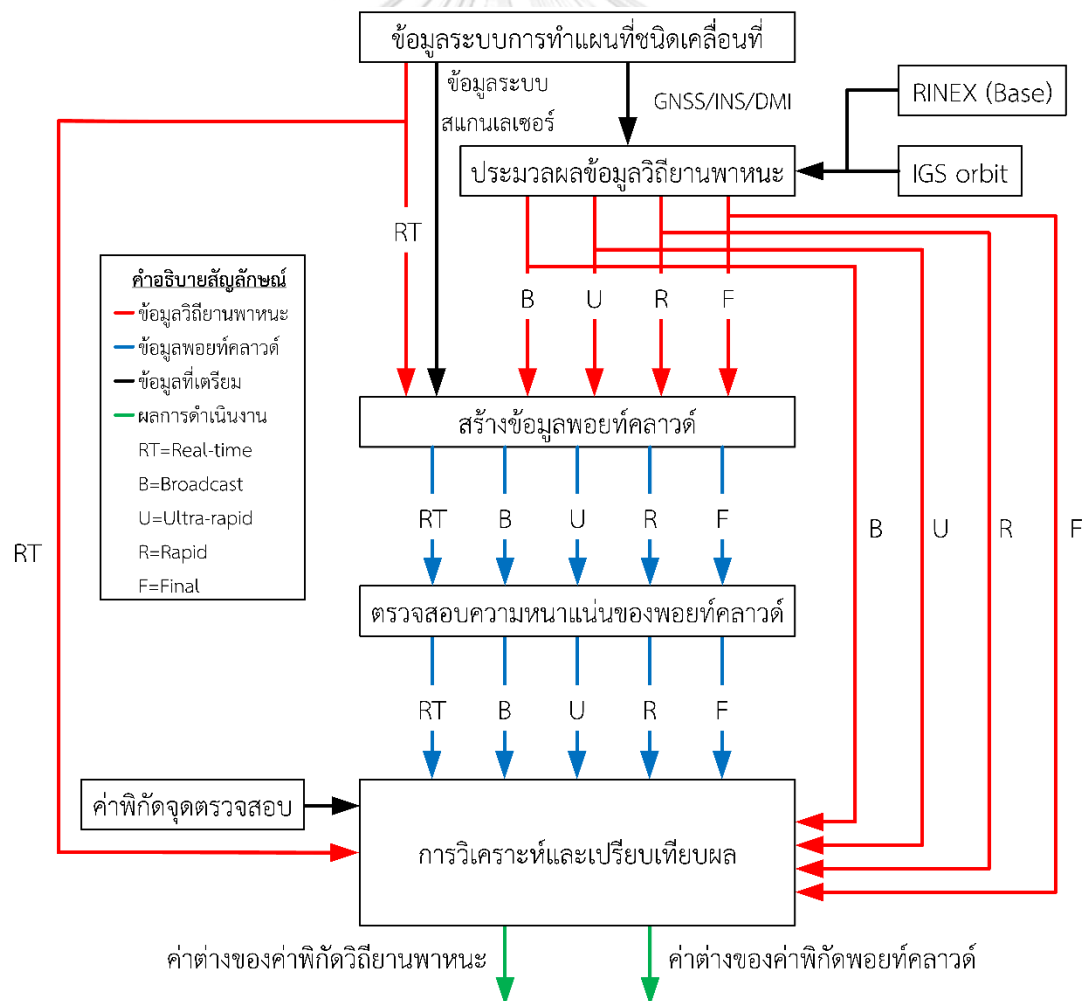
Kalvoda et al. (2020) ได้ประเมินความถูกต้องของข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ได้จากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากโฟโตแกรมเมตรี โดยทำการทดลองในสนามทดสอบที่สร้างขึ้น โดยการทดสอบจะเก็บข้อมูลเป็นระยะทาง 750 เมตร ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำนวนสองรอบ แล้ว นำข้อมูล GNSS, IMU, DMI มาประมวลผลภายหลังเพื่อคำนวณวิถีของยานพาหนะด้วยโปรแกรม POSpac แล้วนำข้อมูลวิถีของยานพาหนะที่ได้มาทำการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับข้อมูลสแกนเลเซอร์เพื่อสร้างพอยท์คลาวด์ด้วยโปรแกรม RiPROCESS และปรับแก้วิถีของยานพาหนะด้วยข้อมูลพอยท์คลาวด์และข้อมูลค่าพิกัดจุดควบคุม (Control point) จำนวน 48 จุด แล้วนำข้อมูลค่าพิกัดพอยท์คลาวด์มาเปรียบเทียบกับโปรแกรม CloudCompare กับข้อมูลค่าพิกัดภาพถ่ายที่ได้จากการปรับแก้ด้วยโปรแกรม ContextCapture โดยใช้ข้อมูลค่าพิกัดจุดควบคุมจำนวน 48 จุด โดยการเปรียบเทียบจะแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ 1) การเปรียบเทียบกับข้อมูลค่าพิกัดจุดตรวจสอบพบว่า MLS ให้ค่า Maximum absolute deviation และ 3D standard deviation เท่ากับ 0.050 เมตร และ 0.017 เมตร ตามลำดับ ในส่วนของโฟโตแกรมเมตรีให้ค่า Maximum absolute deviation และ 3D standard deviation เท่ากับ 0.230 เมตร และ 0.061 เมตร

ตามลำดับ 2) การเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงสัมพัทธ์ของข้อมูลที่เก็บมาทั้งสองชุด โดยตัวอย่างพื้นที่ทดสอบเป็นบริเวณหน้าอาคาร และบนพื้นถนน โดยใช้ข้อมูล MLS เป็นข้อมูลอ้างอิงพบว่าระหว่าง MLS สองชุด บนพื้นถนน ให้ค่า Maximum absolute deviation และ 3D standard deviation เท่ากับ 0.030 เมตร และ 0.006 เมตร, ระหว่าง MLS สองชุด บริเวณหน้าอาคาร ให้ค่า Maximum absolute deviation และ 3D standard deviation เท่ากับ 0.028 เมตร และ 0.008 เมตร, ระหว่าง MLS และโฟโตแกรมเมตรี บริเวณหน้าอาคาร ให้ค่า Maximum absolute deviation และ 3D standard deviation เท่ากับ 0.249 เมตร และ 0.164 เมตร 3) การทดสอบ Outlier ณ จุดตรวจสอบ พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 MLS มีข้อมูลร้อยละ 2.1 และร้อยละ 0.0 ที่ไม่ผ่าน ellipsoid 3D error และ Sphere 3D error ตามลำดับ ในส่วนของโฟโตแกรมเมตรี ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 มีข้อมูลร้อยละ 4.5 และร้อยละ 2.2 ที่ไม่ผ่าน ellipsoid 3D error และ Sphere 3D error ตามลำดับ ซึ่งผ่านมาตรฐานในการทำแผนที่



บทที่ 3 การดำเนินงาน

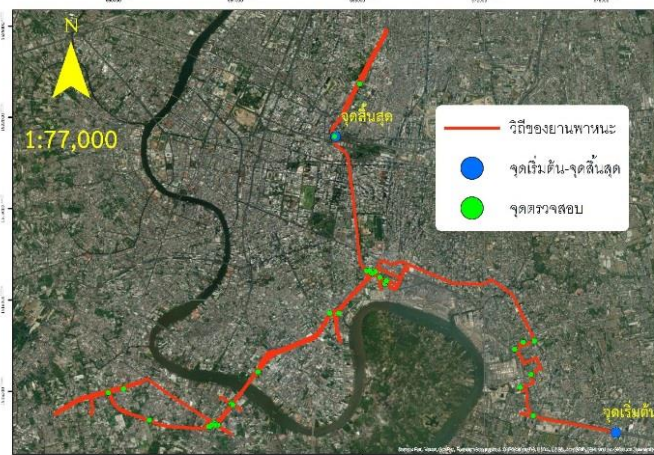
การดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย การเตรียมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีทั้งข้อมูลที่ได้รับการสนับสนุนจากกรมแผนที่ทหารและข้อมูลที่สามารถดาวน์โหลดได้ เมื่อได้ข้อมูลมาแล้วก็จะนำมาประมวลผลข้อมูลวิถีของยานพาหนะโดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมของ IGS ที่แตกต่างกัน แล้วนำข้อมูลวิถีของยานพาหนะที่ได้และข้อมูลสแกนเลเซอร์มาทำการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงเพื่อสร้างข้อมูลพอยท์คลาวด์ และนำข้อมูลวิถียานพาหนะและข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลข้างต้นของแต่ละชุดมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกัน รายละเอียดของการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้



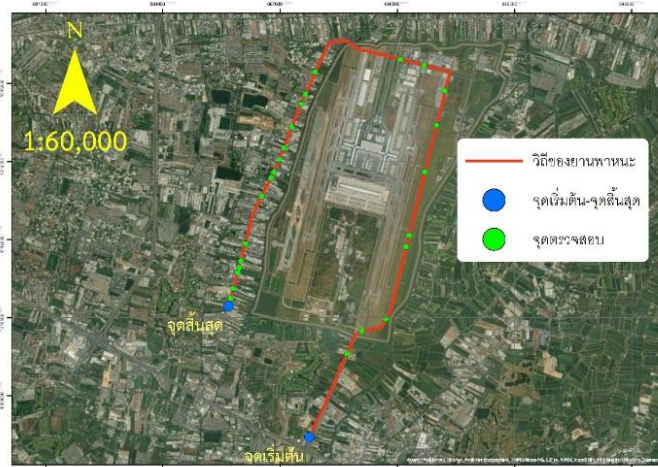
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

3.1 การเตรียมข้อมูล

3.1.1 ข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลรังวัด GNSS, INS, DMI, และข้อมูลระบบสแกนเลเซอร์ ซึ่งใช้ข้อมูลการสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์แบบติดตั้งบนรถยนต์ของกรมแผนที่ทหาร โดยข้อมูลจะแบ่งออกเป็นสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ พื้นที่ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีเส้นทางการสำรวจผ่านเขตคลองเตย, เขตยานนาวา, เขตราชวัตรบูรณะ, เขตบางมด, เขตปทุมวัน, เขตราชเทวี, และเขตพญาไท และพื้นที่ชานเมือง ซึ่งมีเส้นทางการสำรวจบริเวณโดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ซึ่งกรมแผนที่ทหารได้สำรวจเก็บข้อมูลในวันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2563 และ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 ตามลำดับ โดยมีเส้นทางการสำรวจดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

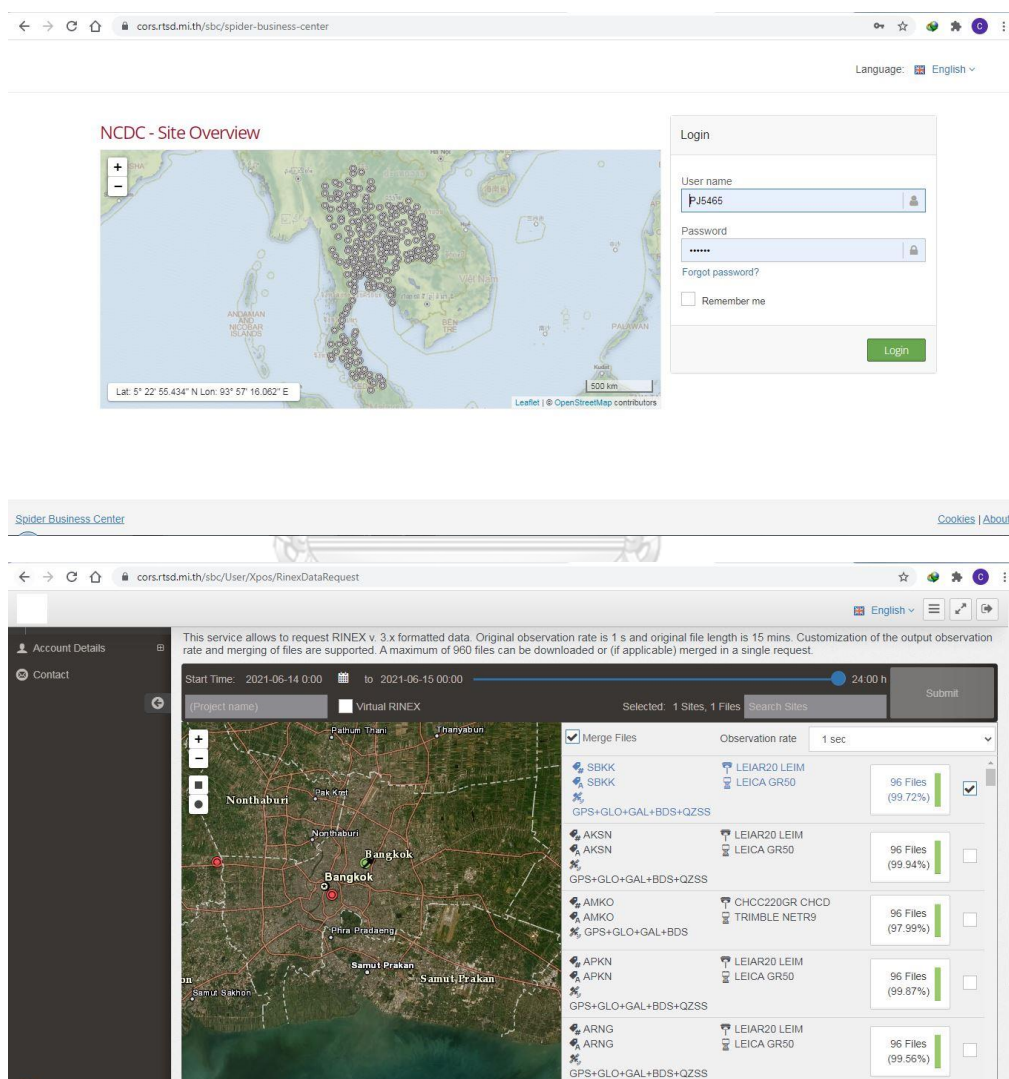


รูปที่ 3.2 วิถีขอยานพาหนะและจุดตรวจสอบของพื้นที่ในเมือง



รูปที่ 3.3 วิถีขอยานพาหนะและจุดตรวจสอบของพื้นที่ชานเมือง

3.1.2 ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS จากโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร ณ สถานี SBKK ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://cors.rtsd.mi.th/SBC/spider-business-center> ดังรูปที่ 3.4 โดยผู้ใช้งานจะต้องลงทะเบียนเพื่อเข้าใช้บริการ สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลไฟล์ RINEX v3 ของสถานี SBKK ในวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2563 และ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 ซึ่งตรงกับวันที่กรมแผนที่ทหารสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์แบบติดตั้งบนรถยนต์



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลรังวัด GNSS จากสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง

การลงทะเบียนเพื่อเข้าใช้บริการ (บน) ตัวอย่างการดาวน์โหลดข้อมูลสถานี SBKK (ล่าง)

3.1.3 ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากหน่วยงาน IGS 4 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit ซึ่งสามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้จากเว็บไซต์ <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/> ดังรูปที่ 3.5 โดยผู้ใช้งานต้องลงทะเบียนเพื่อการเข้าถึงข้อมูล ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลในวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2563 และ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 หรือวันที่ 21380 และ 21574 ในรูปแบบ GPS week ตามลำดับ

EARTHDATA LOGIN

CDDIS
Crustal Dynamics Data Information System

Username

chanachon

Password

.....

Stay signed in (this is a private workstation)

LOG IN **REGISTER**

I don't remember my username
 I don't remember my password
 Help

Why must I register?

The Earthdata Login provides a single mechanism for user registration and profile management for all EOSDIS system components (DAACs, Tools, Services). Your Earthdata login also helps the EOSDIS program better understand the usage of EOSDIS services to improve user experience through customization of tools and improvement of services. EOSDIS data are openly available to all and free of charge except where governed by international agreements.

Browser address bar: cddis.nasa.gov/archive/gps/products/2138/

igs20P21384_IGS.res.Z	2021.01.15 13:02:00	49.2KB
igs20P21384_JTR.res.Z	2021.01.15 13:02:00	17.54KB
igs20P21384_all.snx.Z	2021.01.15 13:05:00	9.45MB
igs20P21384_all.ssc.Z	2021.01.15 13:05:00	111.81KB
igs20P2138_all.ssc.Z	2021.01.15 13:05:00	121.33KB
igs21380.cik.Z	2021.01.17 20:05:46	1.34MB
igs21380.cik_30s.Z	2021.01.17 20:05:46	2.92MB
igs21380.cis.Z	2021.01.17 20:05:46	13.33KB
igs21380.sp3.Z	2021.01.17 20:05:46	95.25KB
igs21381.cik.Z	2021.01.17 20:05:46	1.34MB
igs21381.cik_30s.Z	2021.01.17 20:05:46	2.9MB
igs21381.cis.Z	2021.01.17 20:05:46	13.47KB
igs21381.sp3.Z	2021.01.17 20:05:46	95.15KB
igs21382.cik.Z	2021.01.17 20:05:46	1.39MB
igs21382.cik_30s.Z	2021.01.17 20:05:46	2.96MB
igs21382.cis.Z	2021.01.17 20:05:46	13.72KB
igs21382.sp3.Z	2021.01.17 20:05:46	95.22KB
igs21383.cik.Z	2021.01.17 20:05:46	1.36MB
igs21383.cik_30s.Z	2021.01.17 20:05:46	2.93MB
igs21383.cis.Z	2021.01.17 20:05:46	13.72KB

รูปที่ 3.5 การเตรียมข้อมูลวงโคจรดาวเทียม

การลงทะเบียนเพื่อเข้าใช้บริการ (บน) การดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (ล่าง)

3.1.4 ข้อมูลค่าพิกัดในรูปแบบของระบบพิกัด UTM ของจุดตรวจสอบของกรมแผนที่ทหาร ซึ่งได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีด้วยเครือข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร ดังรูปที่ 3.6 โดยมีตำแหน่งดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.6 การรังวัดจุดตรวจสอบ
พื้นที่ในเมือง (บน) และพื้นที่ชานเมือง (ล่าง)

3.2 การประมวลผลข้อมูลวิทยานพาหนะ

งานวิจัยนี้จะประมวลผลภายหลังข้อมูลรังวัด GNSS, INS, และ DMI ที่ได้จากการสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม POSPac MMS 8 ประกอบกับข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS จากโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร ณ สถานี SBKK และข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากหน่วยงาน IGS 4 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit โดยข้อมูลวิทยานพาหนะที่ผ่านการประมวลผลภายหลังแล้วจะอยู่ในรูปแบบไฟล์ที่มีชื่อว่า sbet_XXX.out โดยที่ XXX คือชื่อของโปรเจกชันตามที่ใช้ได้ตั้งชื่อไว้ ซึ่งไฟล์นี้จะใช้ในการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับระบบสแกนเลเซอร์ในขั้นตอน 3.3.1 ต่อไป

ในส่วนของข้อมูลวิทยานพาหนะที่จะใช้ในการเปรียบเทียบโดยอาศัยการ export ข้อมูลวิทยานพาหนะของแต่ละชุดออกมาทุก ๆ 0.1 วินาที ซึ่งอยู่ในรูปแบบ ASCII ดังรูปที่ 3.7 เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยการเขียนสคริปต์หรือ m-file ในโปรแกรม MATLAB 2021a ในการนำเข้าข้อมูลแล้วเปรียบเทียบผลต่อไป

```

*****
POS Export Utility
Copyright (C) 1997-2020 by Applinix Corporation [Jul 21 2020]
All rights reserved.
*****

Parameter setup:
POSPAC SHOT file: G:\POSPAC\SHOTS\SHOT1\Photo\shot_00001.out
Camera mid-exposure event file: G:\POSPAC\SHOTS\SHOTS\Camera\event1_00001.out
Event time shift: 0.000000 sec
Photo ID file:
Photo ID file format: 2 Fields (Time, Photo ID) Format
Offset between PHOTO ID and EVENT file timer: 0.000000 sec
PHOTO ID time tolerance: 0.300000 sec
Mission Start Time:
Date of Mission: 2020-12-27
Start Time: 00:08:49
Mapping frame epoch: 2020.986339
Mapping frame datum: WGS84; Mapping frame projection : TM;
central meridian = 99.000000 deg;
Latitude of the grid origin = 0.000000 deg; grid scale factor = 0.999600;
false easting = 500000.000000 m; false northing = 0.000000 m;
Bore sight values: tx = 0.0000 arc min, ty = 0.0000 arc min, tz = 0.0000 arc min.
Lever arm values: lx = 0.0000 m, ly = 0.0000 m, lz = 0.0000 m.
TIME, DISTANCE, EASTING, NORTHING, ELLIPSOID HEIGHT, LATITUDE, LONGITUDE, ELLIPSOID HEIGHT, ROLL, PITCH, HEADING, EAST VELOCITY, NORTH VELOCITY, UP VELOCITY, EAST SD, NORTH SD, HEIGHT SD, ROLL SD, PITCH SD, HEADING SD
(time in Sec, distance in Meters, position in Meters, lat, long in Degrees, orientation angles and SD in Degrees, velocity in Meters/Sec, position SD in Meters)
543.00000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.116 1.540 292.721 0.007 0.105 0.002 0.075 0.268 0.220 0.003 0.003 0.023
543.10000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.134 1.124 292.582 -0.014 0.011 0.004 0.075 0.267 0.220 0.003 0.003 0.023
543.20000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.126 1.127 292.582 -0.013 0.014 0.004 0.075 0.267 0.220 0.003 0.003 0.023
543.30000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.127 1.124 292.582 -0.013 0.011 0.004 0.075 0.267 0.219 0.003 0.003 0.023
543.40000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.122 1.128 292.582 -0.013 0.011 0.004 0.075 0.267 0.219 0.003 0.003 0.023
543.50000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.131 1.124 292.582 -0.014 0.008 0.004 0.075 0.267 0.219 0.003 0.003 0.023
543.60000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.130 1.127 292.582 -0.013 0.012 0.004 0.075 0.267 0.219 0.003 0.003 0.023
543.70000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.125 1.122 292.582 -0.013 0.010 0.004 0.075 0.266 0.219 0.003 0.003 0.023
543.80000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.129 1.126 292.582 -0.011 0.013 0.003 0.075 0.266 0.218 0.003 0.003 0.023
543.90000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.131 1.125 292.582 -0.011 0.009 0.003 0.075 0.266 0.218 0.003 0.003 0.023
544.00000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.125 1.128 292.582 -0.009 0.012 0.004 0.075 0.266 0.218 0.003 0.003 0.023
544.10000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.130 1.123 292.582 -0.008 0.008 0.004 0.075 0.266 0.218 0.003 0.003 0.023
544.20000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.127 1.126 292.581 -0.007 0.009 0.004 0.075 0.266 0.218 0.003 0.003 0.023
544.30000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.134 1.123 292.582 -0.008 0.008 0.004 0.075 0.265 0.217 0.003 0.003 0.023
544.40000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.129 1.128 292.581 -0.007 0.011 0.003 0.075 0.265 0.217 0.003 0.003 0.023
544.50000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.132 1.124 292.582 -0.007 0.008 0.004 0.075 0.265 0.217 0.003 0.003 0.023
544.60000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.127 1.128 292.581 -0.006 0.010 0.004 0.075 0.265 0.217 0.003 0.003 0.023
544.70000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.132 1.125 292.582 -0.006 0.007 0.004 0.075 0.265 0.217 0.003 0.003 0.023
544.80000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.128 1.127 292.581 -0.005 0.010 0.004 0.075 0.265 0.217 0.003 0.003 0.023
544.90000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.133 1.123 292.582 -0.006 0.007 0.004 0.075 0.265 0.216 0.003 0.003 0.023
545.00000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.127 1.127 292.581 -0.003 0.009 0.004 0.075 0.264 0.216 0.003 0.003 0.023
545.10000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.131 1.124 292.582 -0.003 0.007 0.003 0.075 0.264 0.216 0.003 0.003 0.023
545.20000 0.000 676313.010 1511648.283 -25.361 115.66941792 100.63016009 -25.361 -2.126 1.127 292.581 -0.002 0.009 0.003 0.075 0.264 0.216 0.003 0.003 0.023

```

รูปที่ 3.7 ข้อมูลวิทยานพาหนะในรูปแบบ ASCII

3.3 การประมวลผลข้อมูลพอยท์คลาวด์

3.3.1 การสร้างข้อมูลพอยท์คลาวด์

ขั้นตอนการสร้างข้อมูลพอยท์คลาวด์จะใช้โปรแกรม TBC 5.40 ในการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงของข้อมูลระบบสแกนเลเซอร์กับวิถีของยานพาหนะที่ได้จากการประมวลผลภายหลังด้วยโปรแกรม POSPac MMS 8 ทั้งข้อมูลวิถียานพาหนะในพื้นที่เมืองและพื้นที่ชานเมืองจากข้อ 3.2 เมื่อสร้างข้อมูลพอยท์คลาวด์แล้วก็จะ export ข้อมูลออกมาในรูปแบบ LAS (LASer) File (*.las) เพื่อนำไปคำนวณความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบด้วยโปรแกรม CloudCompare 2.11.3 ต่อไป พร้อมทั้งรังวัดพิกัดของข้อมูลพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบ ซึ่งเป็นจุดเดียวกันกับข้อ 3.1.4 โดยใช้โมดูล Measure Point แล้วบันทึกค่าพิกัดที่ได้มาใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป

3.3.2 การตรวจสอบความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์

การตรวจสอบความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์โดยเฉลี่ยในบริเวณจุดตรวจสอบเพื่อให้เพื่อให้มั่นใจว่าพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบเป็นจุดเดียวกันกับจุดที่รังวัดค่าพิกัดอ้างอิงทุกจุด โดยจะใช้ความหนาแน่นเชิงพื้นผิว (Surface density) มีหน่วยเป็น จุดต่อตารางเมตรในการตรวจสอบ ซึ่งคำนวณจากสูตร $N/(\pi \cdot R^2)$ โดย N คือจำนวนพอยท์คลาวด์ภายในพื้นที่วงกลมและ R คือรัศมีของพื้นที่วงกลม และกำหนดให้ $R = \sqrt{1/\pi} \approx 0.564$ เมตร เพื่อนับจำนวนพอยท์คลาวด์ต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตรซึ่งจะต้องไม่น้อยกว่า 1400 จุดต่อตารางเมตร โดยจะใช้โมดูล Cloud Density ของโปรแกรม CloudCompare 2.11.3 ในการคำนวณ

3.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

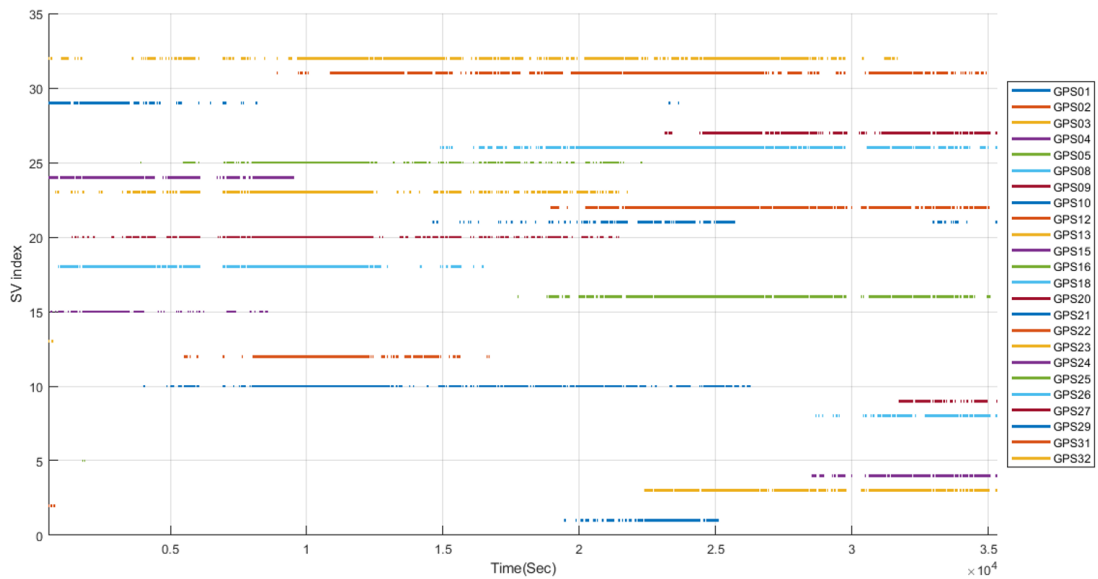
การเปรียบเทียบจะใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทั้งข้อมูลวิถียานพาหนะและข้อมูลพอยท์คลาวด์ โดยส่วนของข้อมูลวิถียานพาหนะที่ได้จากข้อ 3.2 จะเปรียบเทียบโดยการใช้ข้อมูลวิถีของยานพาหนะที่ได้จากการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final orbit เป็นข้อมูลอ้างอิงเปรียบเทียบกับข้อมูลวิถีของยานพาหนะแบบ Real-time และวิถีของยานพาหนะที่ได้จากข้อมูลการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมอื่นอีก 3 ประเภท ณ ขณะเวลาเดียวกัน ในส่วนของข้อมูลพอยท์คลาวด์จะเปรียบเทียบโดยใช้ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบ โดยใช้ข้อมูลค่าพิกัดของจุดตรวจสอบในข้อ 3.1.4 เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับค่าพิกัดของข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยข้อมูลวงโคจรดาวเทียม 4 ประเภท ณ จุดตรวจสอบ

บทที่ 4

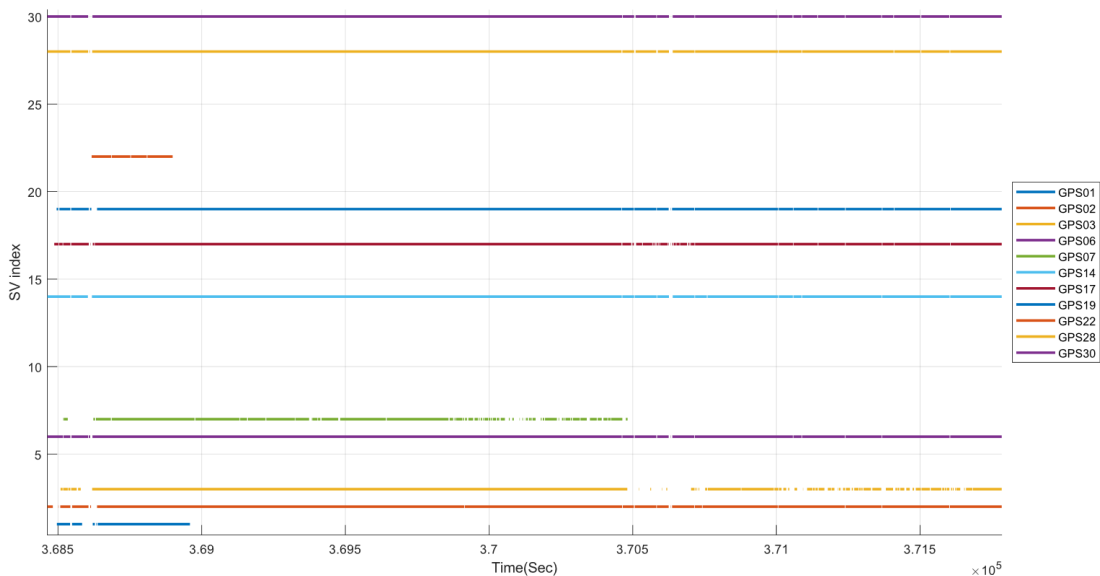
ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลวิทยานพาหนะ

การประมวลผลภายหลังข้อมูล GNSS/INS/DMI ที่ได้จากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่พบว่าข้อมูลการสำรวจในพื้นที่เมืองได้เริ่มบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 543.000 และสิ้นสุดที่วันที่ 35330.900 ของ GPS week 2138 โดยมีระยะเส้นฐานจากสถานี SBKK ประมาณ 4 ถึง 20 กิโลเมตร และในส่วนของผลการประมวลผลข้อมูลการสำรวจในพื้นที่ชานเมือง พบว่าได้เริ่มบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 368502.000 และสิ้นสุดที่วันที่ 371783.800 ของ GPS week 2157 โดยมีระยะเส้นฐานจากสถานี SBKK ประมาณ 18 ถึง 24 กิโลเมตร ในการสำรวจของพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมืองสามารถรับสัญญาณดาวเทียม GPS ได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 สัญญาณดาวเทียม GPS ที่สามารถรับได้ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง

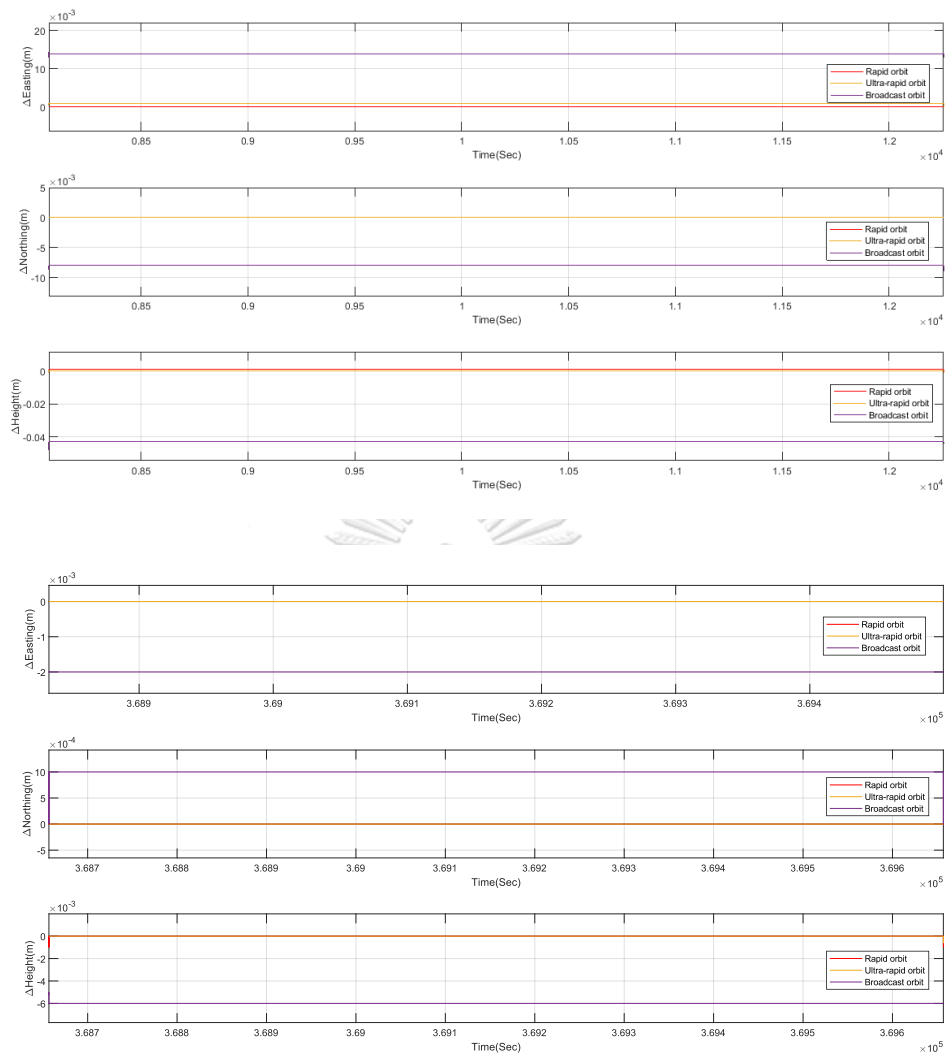


รูปที่ 4.2 สัญญาณดาวเทียม GPS ที่สามารถรับได้ของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง

เมื่อ export ข้อมูลวิถียานพาหนะของทั้งพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมืองออกมาทุก ๆ 0.1 วินาที ก็จะได้ข้อมูลวิถียานพาหนะจำนวน 347,880 epoch และ 32,819 epoch ตามลำดับ แล้วนำค่าพิกัดในระบบพิกัด UTM ของข้อมูลวิถียานพาหนะที่ได้จากการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final orbit ในการประมวลผลภายหลังเป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับค่าพิกัดของข้อมูลวิถีของยานพาหนะแบบ Real-time และ วิถีของยานพาหนะที่ได้จากการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมอื่นอีก 3 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, และ Rapid orbit ในการประมวลผลภายหลัง ณ epoch เดียวกันด้วยการหาผลต่างของค่าพิกัด เมื่อนำผลต่างของทั้งพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมืองมาพลอตกราฟจะได้ดังรูปในส่วนของภาคผนวก ก รูปที่ ก.1 ถึง ก.4 และ ก.5 ถึง ก.8 ตามลำดับ

4.1.1 ช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งและเคลื่อนที่

เมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่ยานพาหนะมีการหยุดนิ่งและการเคลื่อนที่จากการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Final orbit เป็นข้อมูลอ้างอิง พบว่าค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะของพื้นที่ศึกษาทั้งพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมืองมีลักษณะคงที่ในช่วงเวลาที่ยานพาหนะหยุดนิ่งเฉพาะข้อมูลวิถียานพาหนะแบบ ประมวลผลภายหลังด้วยข้อมูลวงโคจรดาวเทียมทั้ง 3 ประเภทดังรูปที่ 4.3 ตัวอย่างพื้นที่ในเมืองวินาทีที่ 8069.2 ถึง 12254.6 และพื้นที่ชานเมืองวินาทีที่ 368656.7 ถึง 369656.9 ตามลำดับ และจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างค่าต่างของค่าพิกัดวิทยานพาหนะแบบประมวลผลภายหลัง

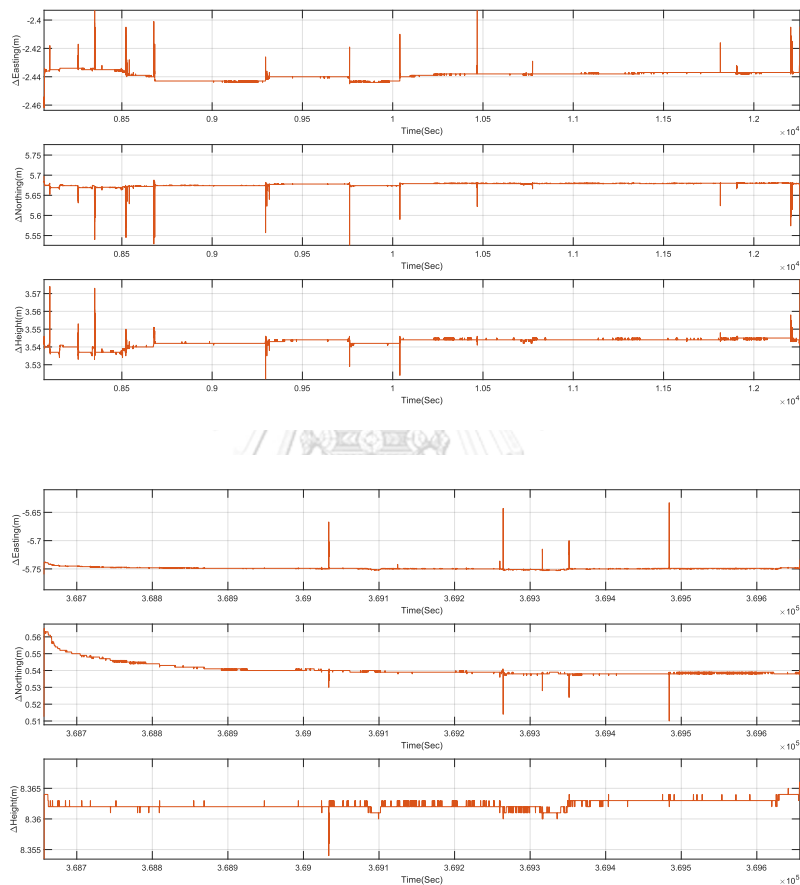
ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง

ช่วงวินาทีที่ 8069.2 ถึง 12254.6 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง (บน) และช่วงวินาทีที่ 368656.7 ถึง 369656.9 ของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง (ล่าง)

ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง ค่าต่างของค่าพิกัดวิทยานพาหนะแบบ Real-time นั้นมีค่าไม่คงที่ทั้งพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมืองดังรูปที่ 4.4 ตัวอย่างพื้นที่ในเมืองวินาทีที่ 8069.2 ถึง 12254.6 และพื้นที่ชานเมืองวินาทีที่ 368656.7 ถึง 369656.9 ตามลำดับ เมื่อนำค่าต่างของค่าพิกัดในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งมาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปลบออกจากค่าต่างของค่าพิกัดวิทยานพาหนะคำนวณเช่นนี้ในแต่ละช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง แล้วนำค่าที่คำนวณได้มาหาพิสัยจะได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิสัยของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง

ค่าพิกัด	พื้นที่ในเมือง			พื้นที่ชานเมือง		
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	พิสัย	น้อยที่สุด	มากที่สุด	พิสัย
Δ Easting (เมตร)	-0.708	1.417	2.125	-0.006	0.143	0.149
Δ Northing (เมตร)	-3.218	6.086	9.304	-0.166	0.024	0.190
Δ Height (เมตร)	-2.326	2.449	4.775	-0.179	0.005	0.184

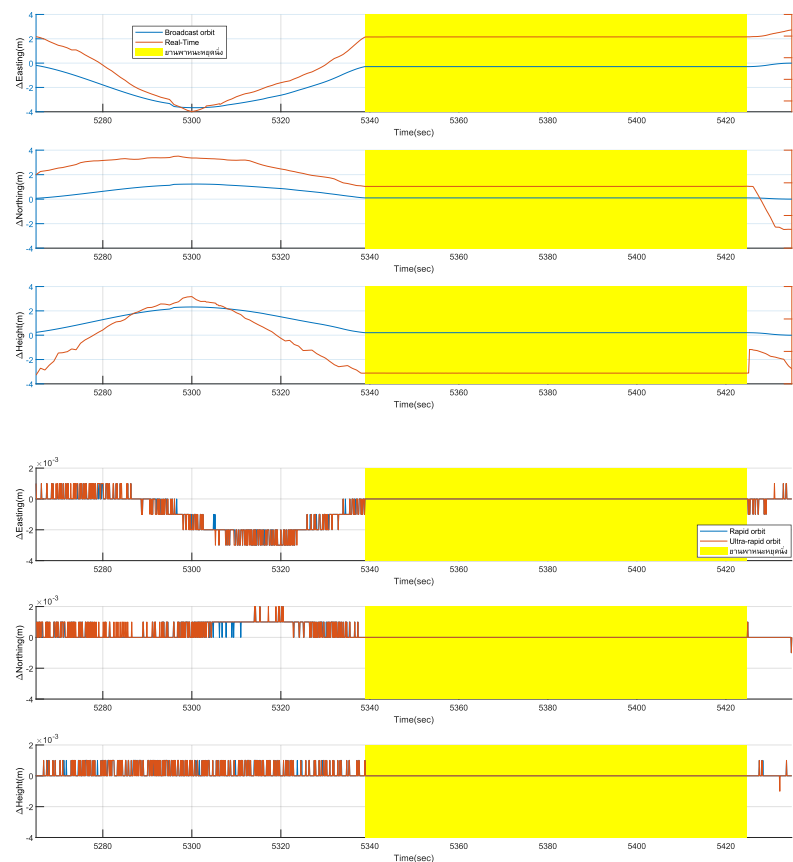


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง ช่วงวินาทีที่ 8069.2 ถึง 12254.6 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง (บน) และช่วงวินาทีที่ 368656.7 ถึง 369656.9 ของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง (ล่าง)

4.1.2 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะ

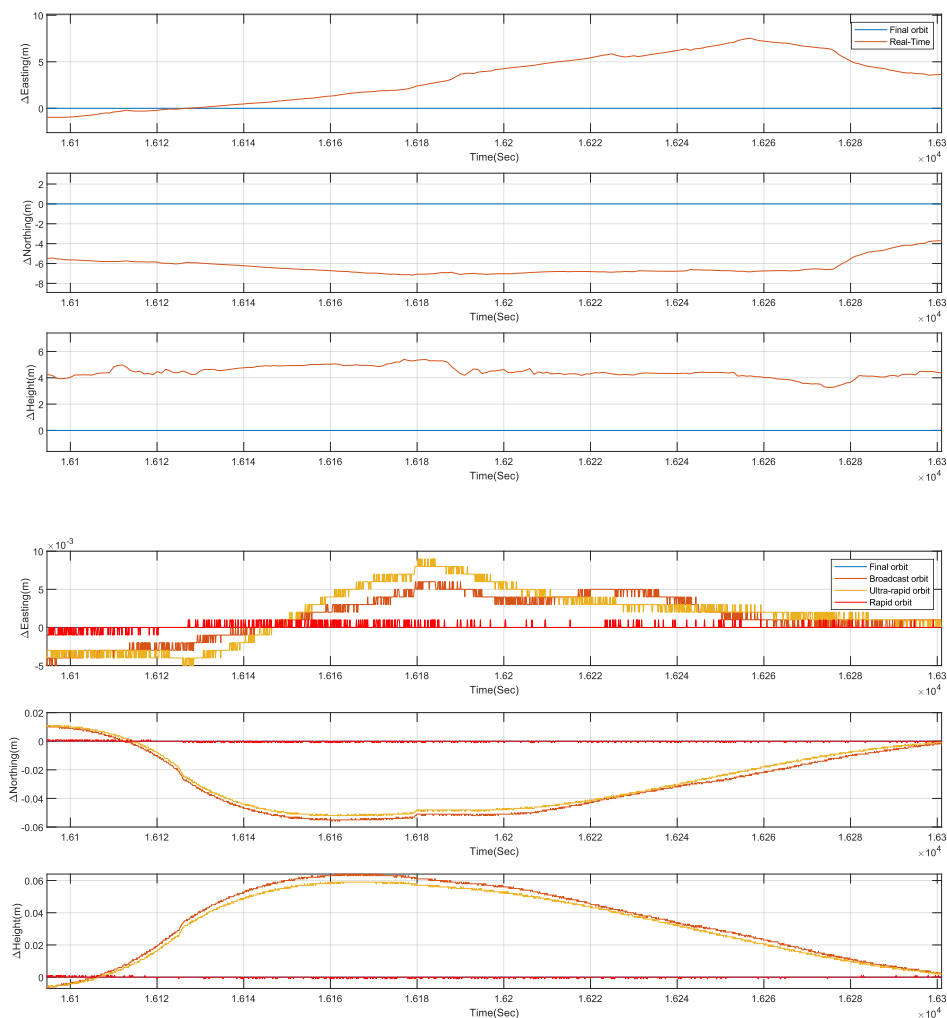
เมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังของการสำรวจพื้นที่ในเมืองพบว่ามีจำนวน 5 ช่วงดังนี้

- 1) ช่วงวินาทีที่ 5260.0 ถึงวินาทีที่ 5339.0 ค่าต่างของค่าพิกัดมีลักษณะดังรูปที่ 4.5 โดยในส่วนของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วินาทีที่ 5265.0 จนถึงวินาทีที่ 5300.0 ซึ่งมีขนาดมากที่สุด แต่ในส่วนของวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit และ Rapid orbit นั้นจะมีค่าต่างของค่าพิกัดมากที่สุด ณ วินาทีที่ 5319.700 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 5339.0 และมีค่าต่างของค่าพิกัดคงที่ถึงจนวินาทีที่ 5424.7 ซึ่งช่วงดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งแล้วเคลื่อนที่ในเวลาต่อมา ซึ่งค่าต่างของค่าพิกัดลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 5434.8



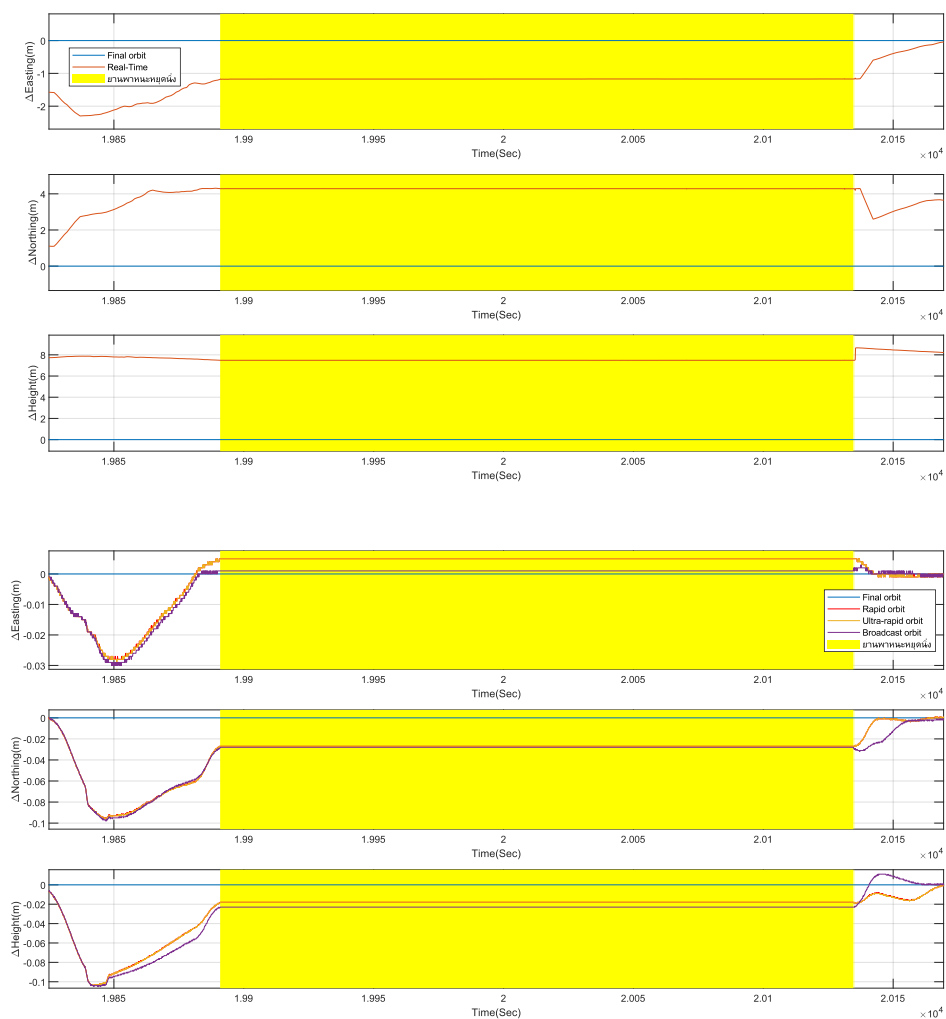
รูปที่ 4.5 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 5260.0 ถึงวินาทีที่ 5434.8 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง

2) ช่วงวินาทีที่ 16094.6 ถึงวินาทีที่ 16271.2 ค่าต่างของค่าพิกัดมีลักษณะดังรูปที่ 4.8 โดยในส่วนของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วินาทีที่ 16094.6 จนถึงวินาทีที่ 16170.7 ซึ่งมีขนาดมากที่สุด แต่ในส่วนของวิถียานพาหนะแบบ Real-time นั้นจะมีค่าต่างของค่าพิกัดมากที่สุด ณ วินาทีที่ 16257.0 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 16301.0 ในขณะที่ค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit มีขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดทั้งสามแกนมากที่สุดเท่ากับ 0.001 เมตร



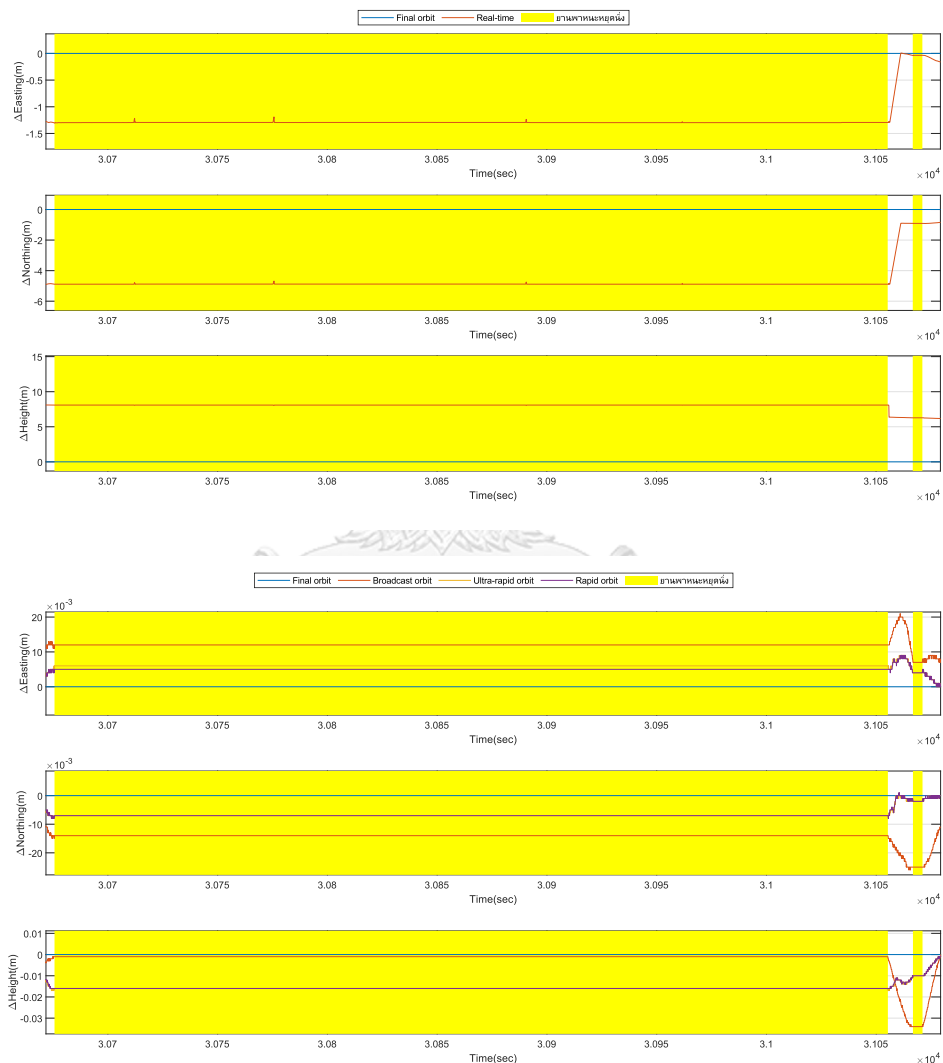
รูปที่ 4.6 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 16094.6 ถึงวินาทีที่ 16301.0 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง

- 3) ช่วงวินาทีที่ 19826.6 ถึงวินาทีที่ 20169.4 ค่าต่างของค่าพิกัดมีลักษณะดังรูปที่ 4.9 โดยในส่วนของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วินาทีที่ 19826.6 จนถึงวินาทีที่ 19846.8 ซึ่งมีขนาดมากที่สุด และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 19891.0 และมีค่าต่างของค่าพิกัดคงที่ถึงวินาทีที่ 20135.0 ซึ่งช่วงดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งแล้วเคลื่อนที่ในเวลาต่อมา ซึ่งค่าต่างของค่าพิกัดลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 20169.4



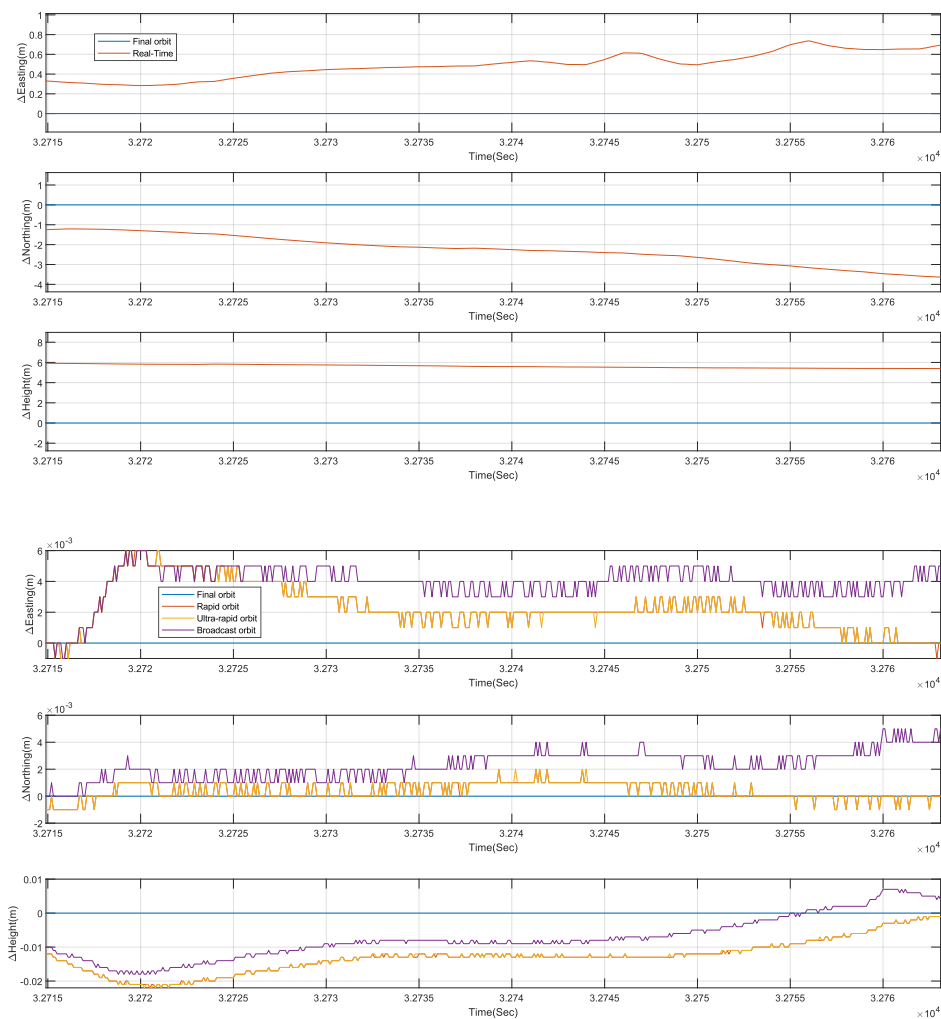
รูปที่ 4.7 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 19826.6 ถึงวินาทีที่ 20169.4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง

- 4) ช่วงวินาทีที่ 30671.8 ถึงวินาทีที่ 31079.3 ค่าต่างของค่าพิกัดมีลักษณะดังรูปที่ 4.10 โดยในส่วนของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วินาทีที่ 30671.8 จนถึงวินาทีที่ 30675.5 ซึ่งมีขนาดมากที่สุดและลดลงจนถึงวินาทีที่ 30675.7 และคงที่ในเวลาต่อมาจนถึงวินาทีที่ 31071.0 ซึ่งช่วงดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งแล้วเคลื่อนที่ในเวลาต่อมา ซึ่งค่าต่างของค่าพิกัดลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 31079.3



รูปที่ 4.8 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 30671.8 ถึงวินาทีที่ 31079.3 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง

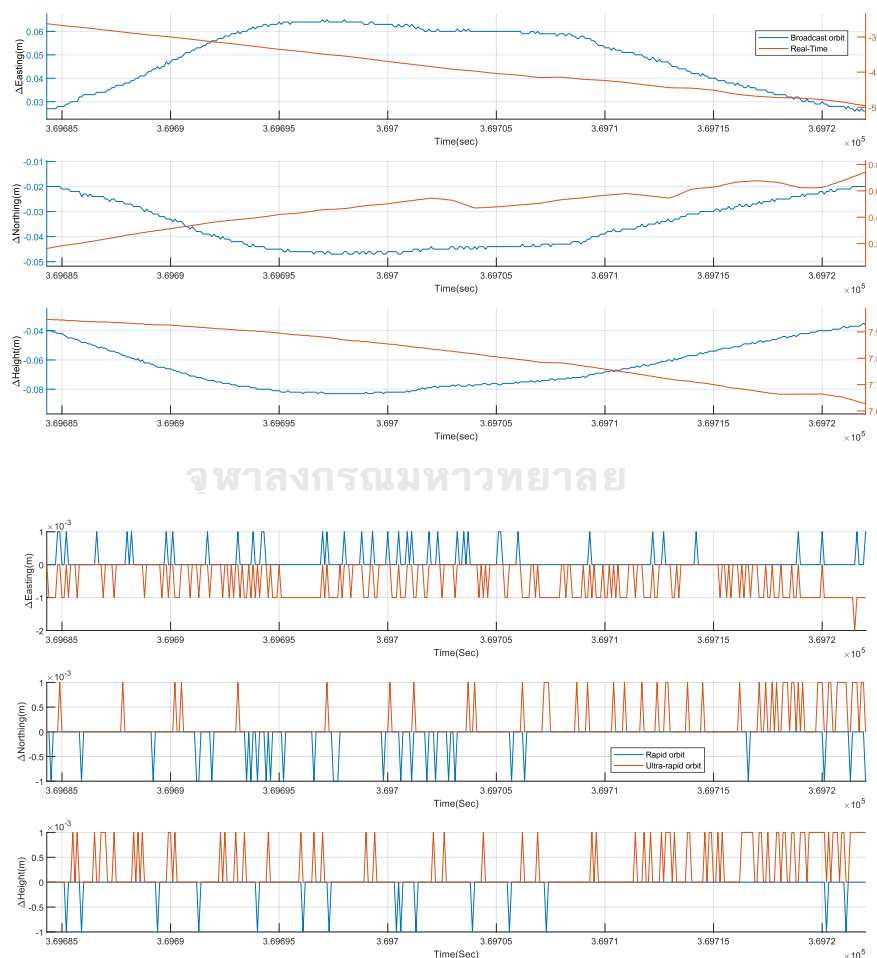
- 5) ช่วงวินาทีที่ 32714.9 ถึงวินาทีที่ 32763.1 ค่าต่างของค่าพิกัดมีลักษณะดังรูปที่ 4.11 โดยในส่วนของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่วินาทีที่ 32714.9 จนถึงวินาทีที่ 32720.2 ซึ่งมีขนาดมากที่สุด และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 32763.1 ในขณะที่ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Real-time นั้นจะมีลักษณะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 30671.8 ถึงวินาทีที่ 31079.3 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง

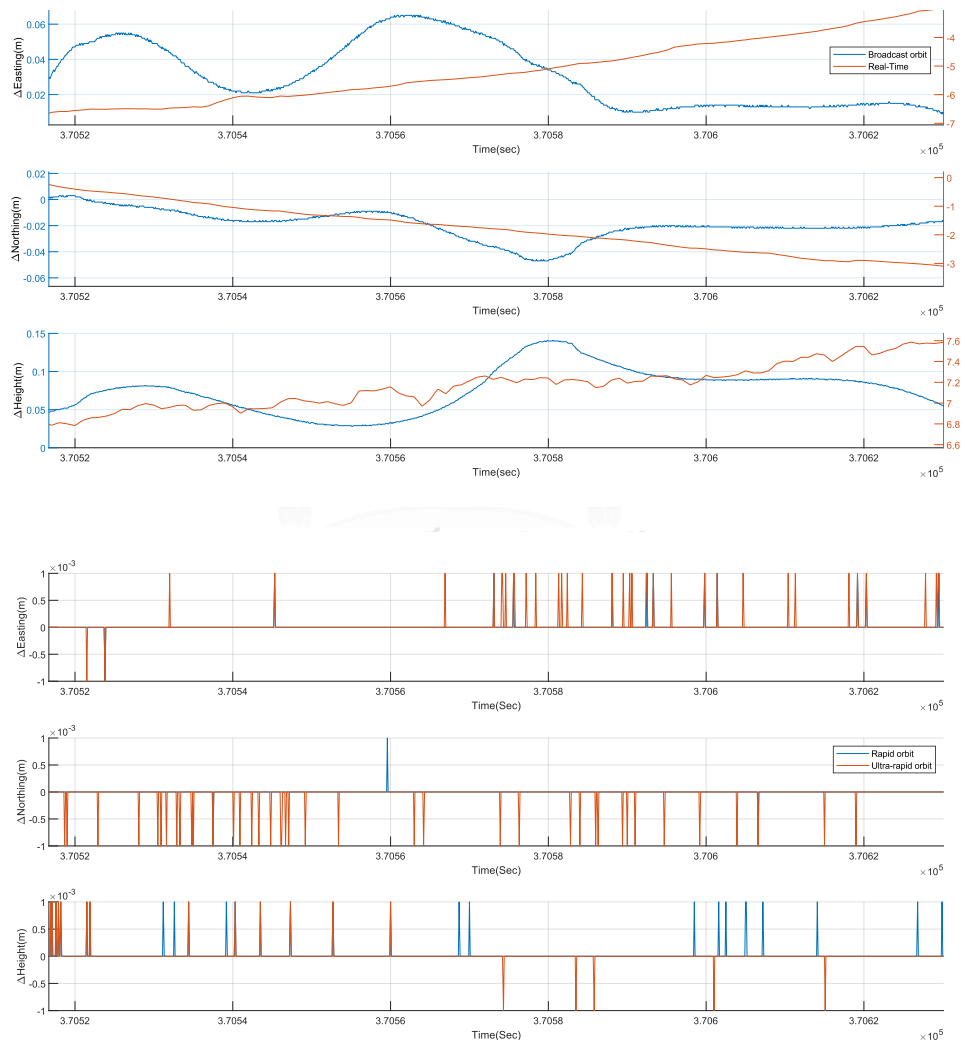
เมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ
ประมวลผลภายหลังของการสำรวจพื้นที่ซานเมืองพบว่า มีจำนวน 2 ช่วงดังนี้

- 1) ช่วงวินาทีที่ 369684.3 ถึงวินาทีที่ 369722.0 ค่าต่างของค่าพิกัดมีลักษณะดังรูปที่ 4.12 โดยในส่วนของขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วินาทีที่ 369684.3 จนถึงวินาทีที่ 369698.0 ซึ่งมีขนาดมากที่สุด และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 369722.0 ในขณะที่ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Real-time มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งสามแกน และขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit และ Rapid orbit มีขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดทั้งสามแกนมากที่สุดเท่ากับ 0.001 เมตร



รูปที่ 4.10 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 369684.3 ถึงวินาทีที่ 369722.0
ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง

2) ช่วงวินาทีที่ 370516.7 ถึงวินาทีที่ 370630.1 ค่าต่างของค่าพิกัดมีลักษณะดังรูปที่ 4.13 โดยในส่วนของขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วินาทีที่ 370516.7 จนถึงวินาทีที่ 370528.0 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 370548.9 และกลับมาเพิ่มขึ้นจนถึงวินาทีที่ 370579.9 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 370630.1 ในขณะที่ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Real-time มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งสามแกน และขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit และ Rapid orbit มีขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดทั้งสามแกนมากที่สุดเท่ากับ 0.001 เมตร



รูปที่ 4.11 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในช่วงวินาทีที่ 370516.7 ถึงวินาทีที่ 370630.1 ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง

ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิคต์วิถียานพาหนะมีรายละเอียดของค่าต่างของค่าพิคต์ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองดังตารางในส่วนของภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1 และ ก.2 ตามลำดับ และเมื่อนำช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิคต์ของวิถียานพาหนะแต่ละช่วงมาพลอตร่วมกับข้อมูลช่วงเวลาที่ได้รับสัญญาณดาวเทียม GPS ได้แต่ละดวงจะได้ดังรูปในส่วนของภาคผนวก ข รูปที่ ข.1 ถึง ข.10 และ ข.11 ถึง ข.14 ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองตามลำดับ พบว่าในช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิคต์ขึ้นทั้งพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมืองเป็นช่วงเดียวกันกับที่เกิดคลื่นหลุดขึ้นจำนวน 5 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1-4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง และช่วงที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง โดยช่วงที่ 1, 3, และ 4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองมีการหยุดนิ่งของยานพาหนะภายหลังช่วงที่เกิดคลื่นหลุดขึ้น ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งขนาดของค่าต่างของค่าพิคต์วิถียานพาหนะทั้ง 4 ประเภทไม่มีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้น แม้ว่าในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งจะไม่เกิดคลื่นหลุดขึ้นก็ตาม แต่เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ต่อมา ขนาดของค่าต่างของค่าพิคต์จะมีค่าลดลง ในช่วงที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมือง ยานพาหนะมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องผ่านช่วงที่เกิดคลื่นหลุดขึ้นโดยไม่มีการหยุดนิ่งภายหลัง พบว่าขนาดของค่าต่างของค่าพิคต์ก็จะมีค่าลดลง แต่ในส่วนของช่วงที่ 5 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง และช่วงที่ 1 ของการสำรวจพื้นที่ชานเมืองไม่พบการเกิดคลื่นหลุด

เมื่อคัดข้อมูลที่มีค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ออกด้วยเกณฑ์ 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\pm 3\sigma$) ทั้งข้อมูลวิถียานพาหนะในพื้นที่เมืองและพื้นที่ชานเมือง แล้วนำค่าต่างของค่าพิคต์ที่ได้จากการเปรียบเทียบวิถียานพาหนะมาคำนวณค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองโดย แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ขณะยานพาหนะหยุดนิ่ง, ขณะยานพาหนะเคลื่อนที่, และโดยรวมตลอดทั้งเส้นทางสำรวจ ดังตารางที่ 4.2

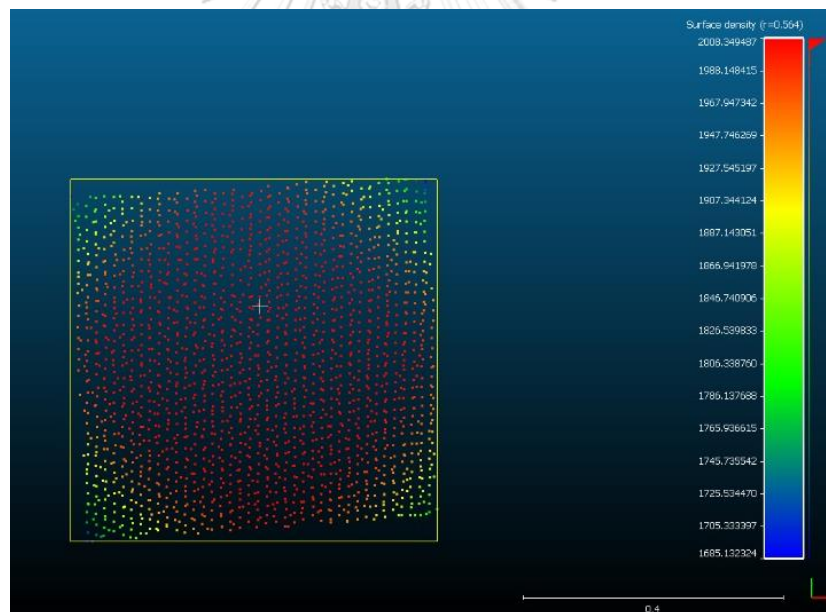
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าต่างของค่าฟังก์ชันของข้อมูลวิทยานพาหนะ

พื้นที่ศึกษา	ชุดข้อมูล	ขณะเคลื่อนที่						ขณะหยุดนิ่ง						ทั้งหมด									
		MAX (เมตร)		RMSE (เมตร)		MAX (เมตร)		RMSE (เมตร)		MAX (เมตร)		RMSE (เมตร)		MAX (เมตร)		RMSE (เมตร)							
		ราบ	ดิ่ง	ราบ	ดิ่ง	ราบ	ดิ่ง	ราบ	ดิ่ง	ราบ	ดิ่ง	ราบ	ดิ่ง	ราบ	ดิ่ง	ราบ	ดิ่ง						
ในเมือง	Real-time	17.817	7.827	5.549	5.192	9.928	6.849	4.779	4.834	14.584	7.465	5.038	4.924	0.358	0.228	0.100	0.104	0.003	0.003	0.100	0.104	0.005	0.005
	Broadcast	0.100	0.104	0.006	0.018	0.306	0.207	0.023	0.025	0.358	0.228	0.021	0.022	0.100	0.104	0.100	0.104	0.003	0.003	0.100	0.104	0.004	0.004
	Ultra-rapid	0.100	0.104	0.006	0.018	0.306	0.207	0.023	0.025	0.358	0.228	0.021	0.022	0.100	0.104	0.100	0.104	0.003	0.003	0.100	0.104	0.004	0.004
	Rapid	0.100	0.104	0.006	0.018	0.306	0.207	0.023	0.025	0.358	0.228	0.021	0.022	0.100	0.104	0.100	0.104	0.003	0.003	0.100	0.104	0.004	0.004
ชานเมือง	Real-time	8.789	5.734	3.999	5.461	5.778	8.366	5.514	8.266	5.417	5.020	3.008	4.777	0.034	0.066	0.007	0.010	0.003	0.006	0.032	0.054	0.006	0.008
	Broadcast	0.014	0.031	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.031	0.001	0.000	0.014	0.031	0.001	0.000	0.000	0.014	0.031	0.001	0.000	
	Ultra-rapid	0.014	0.031	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.031	0.001	0.000	0.014	0.031	0.001	0.000	0.000	0.014	0.031	0.001	0.000	
	Rapid	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.002	0.000	0.000	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.004	0.002	0.000	0.000	

4.2 ผลการประมวลผลข้อมูลพอยท์คลาวด์

4.2.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์

ข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงของระบบสแกนเลเซอร์และวิถียานพาหนะนั้นมีจำนวนมาก ทำให้การคำนวณความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์ทั้งหมดจะใช้เวลานาน และไม่มีความจำเป็น ผู้วิจัยจึงคัดเลือกข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่จะนำมาคำนวณเฉพาะบริเวณจุดตรวจสอบของแต่ละจุดเท่านั้น โดยใช้โมดูล Cloth Simulation Filter (CSF) (Zhang et al., 2016) ภายในโปรแกรม CloudCompare 2.11.3 ในการคัดเลือกข้อมูลพอยท์คลาวด์เฉพาะบริเวณพื้นออกมาก่อน เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการเลือกข้อมูลพอยท์คลาวด์ไม่ให้มีส่วนที่อยู่เหนือพื้นปะปน หลังจากนั้นจึงใช้โมดูล Segment ในการคัดเลือกข้อมูลพอยท์คลาวด์เฉพาะบริเวณจุดตรวจสอบ และคำนวณความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์โดยใช้โมดูล Cloud Density พบว่า ในบริเวณจุดตรวจสอบทั้งในพื้นที่เมืองและพื้นที่ชานเมืองข้อมูลพอยท์คลาวด์ในบริเวณจุดตรวจสอบมีความหนาแน่นมากกว่า 1400 จุดต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างผลการคำนวณความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์

4.2.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดข้อมูลพอยท์คลาวด์

เมื่อนำค่าพิกัดของพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบที่ได้จากการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงของระบบสแกนเลเซอร์กับวิธียานพาหนะแบบ Real-time และแบบประมวลผลภายหลังมาหาค่าต่างกับค่าพิกัดของจุดตรวจสอบที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่ด้วยเครือข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหาร ทั้ง 25 จุด จะมีขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดดังตารางที่ ง.1 และ ง.2 ในส่วนของภาคผนวก ง แล้วนำค่าต่างมาคำนวณค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองจะได้ค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าต่างของค่าพิกัดของข้อมูลพอยท์คลาวด์กับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ

พื้นที่ศึกษา	ชุดข้อมูล	MAX (เมตร)		RMSE (เมตร)	
		ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง
ในเมือง	Real-time	14.684	10.172	5.830	6.659
	Broadcast orbit	0.136	0.285	0.074	0.126
	Ultra-rapid orbit	0.162	0.268	0.073	0.125
	Rapid orbit	0.162	0.272	0.072	0.125
	Final orbit	0.136	0.273	0.069	0.123
ชานเมือง	Real-time	10.148	7.830	4.340	6.602
	Broadcast orbit	0.118	0.202	0.055	0.107
	Ultra-rapid orbit	0.115	0.202	0.055	0.102
	Rapid orbit	0.115	0.202	0.055	0.102
	Final orbit	0.115	0.202	0.055	0.102

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การตรวจสอบวิธีของยานพาหนะจากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ด้วยการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจลน์ภายหลังเป็นการศึกษาโดยการนำข้อมูลวิธียานพาหนะที่ได้จากการบูรณาการเซ็นเซอร์ GNSS/INS/DMI แบบ Real-time จากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับข้อมูลวิธียานพาหนะที่ได้จากการนำข้อมูลรีจิวต์ GNSS/INS/DMI มาประมวลผลภายหลังแบบสัมพันธ์กับข้อมูลรีจิวต์สัญญาณดาวเทียม GNSS ของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องของกรมแผนที่ทหารสถานี SBKK โดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม 4 ประเภท ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit ด้วยโปรแกรม POSPac MMS 8 แล้วนำข้อมูลวิธียานพาหนะแบบ Real-time และแบบประมวลผลภายหลังมายึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับข้อมูลระบบสแกนเลเซอร์เพื่อกำหนดค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ด้วยโปรแกรม TBC 5.40 แล้วตรวจสอบความหนาแน่นของข้อมูลพอยท์คลาวด์ด้วยโปรแกรม CloudCompare 2.11.3 ก่อนที่จะนำข้อมูลพอยท์คลาวด์มารีจิวต์ค่าพิกัด ณ จุดตรวจสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลวิธียานพาหนะ ซึ่งจากการดำเนินงานสามารถอภิปรายและสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1 อภิปรายผลการดำเนินงาน

ดาวเทียม GPS ที่สามารถรับสัญญาณได้ในระหว่างการสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งพื้นที่ชานเมืองสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าพื้นที่ในเมือง เมื่อพิจารณาการหยุดนิ่งและการเคลื่อนที่ของยานพาหนะพบว่าค่าต่างของค่าพิกัดวิธียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังมีค่าคงที่เมื่อยานพาหนะหยุดนิ่งและเปลี่ยนแปลงเมื่อเคลื่อนที่ ในขณะที่ค่าต่างของค่าพิกัดวิธียานพาหนะแบบ Real-time มีค่าไม่คงที่ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง ถึงแม้ว่าพิสัยของค่าต่างของค่าพิกัดวิธียานพาหนะของการสำรวจพื้นที่ชานเมืองจะน้อยกว่าพื้นที่ในเมืองในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง แต่ก็ยังไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงที่ค่าพิกัดของวิธียานพาหนะจะต้องคงที่ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง

การสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองมีการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิธียานพาหนะขึ้นโดยช่วงที่ 1-4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและช่วงที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ชานเมืองมีการเกิดคลื่นหลุดขึ้น ซึ่งการเกิดคลื่นหลุดจะส่งผลต่อความถูกต้องในการหาค่าเลขปริศนา ทำให้ค่าพิกัดที่ได้มีค่า

คลาดเคลื่อนเกิดขึ้น โดยช่วงที่ 1, 3, และ 4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง มีการหยุดนิ่งของยานพาหนะภายหลังการเกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะ ซึ่งขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะไม่มีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงในช่วงที่หยุดนิ่ง เพราะฉะนั้นการหยุดนิ่งภายหลังหรือในระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ที่รับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ไม่ดี ไม่ทำให้ค่าพิกัดวิถียานพาหนะมีความถูกต้องมากขึ้นหรือน้อยลง ในทางกลับกัน การเคลื่อนที่ของยานพาหนะมีโอกาที่จะทำให้ค่าพิกัดวิถียานพาหนะมีความถูกต้องมากขึ้นได้

ค่า RMSE ของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะดังตารางที่ 4.2 ของการสำรวจพื้นที่ชานเมืองมีค่าน้อยกว่าพื้นที่ในเมืองทั้งแบบ Real-time และแบบประมวลผลภายหลัง ฉะนั้นการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ดีจะทำให้วิถียานพาหนะมีความแตกต่างกันน้อยลง โดยเฉพาะการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมที่มีความถูกต้องแตกต่างกันในการประมวลผลภายหลังในพื้นที่ชานเมืองซึ่งมีค่า RMSE แตกต่างกันในระดับมิลลิเมตรเท่านั้น

การตรวจสอบค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ผิวของข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการนำวิถียานพาหนะมายึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับระบบสแกนเลเซอร์ พบว่าพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบแต่ละจุดมีความหนาแน่นมากกว่า 1400 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการวัดค่าพิกัดพอยท์คลาวด์และเปรียบเทียบกับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ

เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนจากการนำค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์จากการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงระบบสแกนเลเซอร์กับวิถียานพาหนะเทียบกับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ ดังรูปที่ ค.1 ถึง ค.10 ในภาคผนวก ค แสดงถึงขนาดและทิศทางที่ไม่แน่นอน ฉะนั้นไม่มีค่าคลาดเคลื่อนเชิงระบบแฝงอยู่ แต่จากทิศทางของลูกศรในรูปที่ ค.6 ลูกศรมีลักษณะชี้เข้าหาทำอากาศยานสำรวจอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะดังรูปที่ ก.5 ซึ่งมีค่าต่างของค่าพิกัด Easting น้อยกว่าวิถียานพาหนะแบบ Final orbit ตั้งแต่เริ่มการสำรวจจนถึงประมาณวินาทีที่ 371604 จึงเริ่มมีขนาดมากกว่าจนสิ้นสุดการสำรวจ

การตรวจสอบความถูกต้องของวิถียานพาหนะด้วยวิธีทางอ้อม โดยการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงระบบสแกนเลเซอร์กับวิถียานพาหนะ และวัดค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบแล้วหาค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์เทียบกับจุดตรวจสอบ จะได้ผลดังตารางที่ 4.3 พบว่าวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังมีความถูกต้องทางตำแหน่งมากกว่าแบบ Real-time แต่การใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมที่มีความถูกต้องแตกต่างกันไม่ทำให้วิถี

ยานพาหนะมีความถูกต้องทางตำแหน่งมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้งการสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองเมื่อเทียบกับความถูกต้องของเครื่องสแกนเลเซอร์ซึ่งมีความถูกต้อง 5 มิลลิเมตร ยิ่งไปกว่านั้นการทำ HD map จากพอยท์คลาวด์ก็ต้องการพอยท์คลาวด์ที่มีความถูกต้องไม่เกิน 5 เซนติเมตร (Guan et al., 2016) เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามค่า RMSE ของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งตลอดเส้นทางการสำรวจจากตารางที่ 4.2 ไม่สอดคล้องกับค่า RMSE ของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งจากตารางที่ 4.3 โดยค่า RMSE ของ Broadcast orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองมีค่าเท่ากับ 2 เซนติเมตร ในทางอุดมคติแล้ว ค่า RMSE ของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์จากการใช้ Broadcast orbit ควรมีความต่างจากการใช้ Final orbit อยู่ในค่าใกล้เคียงกับ 2 เซนติเมตรเช่นเดียวกัน แต่จากตารางที่ 4.3 การใช้ Broadcast orbit ได้ค่า RMSE ต่างจากการใช้ Final orbit เพียง 5 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ในส่วนของการกระโดดของค่าพิกัดวิถียานพาหนะที่เกิดขึ้นจากการใช้ Broadcast orbit มีขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดทางราบสูงถึง 3.865 เมตร และทางดิ่งสูงถึง 2.316 เมตร ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง และมีการกระโดดของค่าพิกัดทางราบสูงถึง 0.058 เมตร และทางดิ่งสูงถึง 0.141 เมตรของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง ซึ่งอาจเป็นผลจากการวางจุดตรวจสอบที่มีความถี่ไม่เพียงพอ ประกอบกับการสำรวจพื้นที่ในเมืองที่มีการเปิดใช้งานเครื่องสแกนเลเซอร์เพียงบางช่วงเท่านั้น จึงไม่สามารถตรวจสอบพอยท์คลาวด์จากการใช้วิถียานพาหนะได้ครอบคลุมตลอดเส้นทางการสำรวจ

5.2 สรุปผลการศึกษา

ผลการดำเนินงานเพื่อการตรวจสอบวิธีของยานพาหนะจากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสแบบจลน์ภายหลัง สามารถสรุปได้ดังนี้

วิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังมีค่าพิกัดคงที่ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่งในขณะที่วิถียานพาหนะแบบ Real-time มีค่าไม่คงที่ แต่พิสัยของค่าพิกัดจะมีค่าลดลงในพื้นที่ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ดี แต่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงที่ค่าพิกัดของวิถียานพาหนะจะต้องคงที่ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง

การเกิดคลื่นหลุดส่งผลต่อค่าพิกัดวิถียานพาหนะ โดยการหยุดนิ่งภายหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ทำให้เกิดคลื่นหลุดไม่ทำให้ค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังมีความถูกต้องมากขึ้นหรือลดลง เนื่องจากค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังจะมีค่าคงที่ในช่วงที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง

การประมวลผลภายหลังทำให้ข้อมูลวิถียานพาหนะมีความถูกต้องทางตำแหน่งมากขึ้น แต่การใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมที่มีความถูกต้องแตกต่างกัน ได้แก่ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit จากหน่วยงาน IGS ในการประมวลผลภายหลังแบบสัมพัทธ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในพื้นที่สำรวจที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ดี ค่าพิกัดของวิถียานพาหนะจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดวิถียานพาหนะไม่มีข้อมูลสแกนเลเซอร์และค่าพิกัดจุดตรวจสอบ จึงไม่สามารถตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของวิถียานพาหนะในช่วงเวลาดังกล่าวได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของวิถียานพาหนะโดยอาศัยการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับระบบสแกนเลเซอร์ ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบในทางอ้อมเท่านั้น เนื่องจากไม่มีการหาวิถียานพาหนะที่แท้จริง (True trajectory) ที่มีความถูกต้องสูงเพียงพอที่จะเป็นข้อมูลอ้างอิง ซึ่งในส่วนของเปรียบเทียบข้อมูลการวางตัวก็ไม่มีตรวจสอบ ดังนั้นควรมีการหาวิถียานพาหนะที่แท้จริงเพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบวิถียานพาหนะได้โดยตรง

ด้วยงบประมาณและระยะเวลาที่จำกัด ทำให้ไม่สามารถเพิ่มจุดตรวจสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ให้มีความถี่จนครอบคลุมตลอดเส้นทางการสำรวจได้ โดยเฉพาะพื้นที่ในเมืองที่สามารถวางจุดตรวจสอบได้เฉพาะในบริเวณที่โล่งแจ้งเพียงพอที่จะสามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้เท่านั้น โดยไม่มีการขยายจุดตรวจสอบโดยใช้กล้องประมวลผลรวมในพื้นที่อับสัญญาณเหมือนทดสอบของ Mattheuwsen et al. (2019) ที่มีการวางจุดตรวจสอบทุก ๆ 50 -75 เมตร หากสามารถวางจุดตรวจสอบด้วยความถี่ข้างต้น รวมถึงระยะห่างระหว่างจุดตรวจสอบและยานพาหนะ ประกอบกับการเปิดใช้งานเครื่องสแกนเลเซอร์ได้ตลอดเส้นทางการสำรวจ ก็จะทำให้ข้อสรุปมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

การประมวลผลข้อมูลวิถียานพาหนะมีการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงเพียงแค่ระบบ GPS เท่านั้น ในส่วนของระบบการนำหนด้วยระบบดาวเทียมอื่น ๆ เป็นเพียงการใช้ Broadcast orbit ในอนาคตหากหน่วยงานที่มีการให้บริการข้อมูลวงโคจรดาวเทียมสามารถคำนวณวงโคจรในระบบอื่น ๆ ได้ในระดับความถูกต้องใกล้เคียงหรือเท่ากับระดับความถูกต้องของวงโคจรดาวเทียม GPS ได้ ก็จะทำให้การศึกษามีความหลากหลายมากขึ้น

ข้อมูล GNSS/INS/DMI ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ไม่มีการควบคุมความเร็วของยานพาหนะที่ใช้ในการสำรวจ ซึ่งส่งผลต่อการบูรณาการเซ็นเซอร์และความหนาแน่นของพอยท์คลาวด์ ทำให้การวัด

ค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบมีความคลาดเคลื่อน หากมีความสามารถควบคุมความเร็วของยานพาหนะให้คงที่ รวมถึงการทดสอบในความเร็วที่แตกต่างกันก็จะทำให้ได้ข้อสรุปที่มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

การศึกษานี้ไม่มีการทดสอบโดยใช้ Virtual RINEX ที่ได้จากโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องเป็นสถานีฐานในการประมวลผลภายหลังวิถีของยานพาหนะ ถึงแม้ว่า อรุณ บุรีรักษ์ (2553) จะได้ทำการทดสอบโดยใช้ Virtual RINEX เป็นสถานีฐานในการประมวลผลภายหลังวิถีของยานพาหนะและพบว่าวิถียานพาหนะที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้นแล้วก็ตาม แต่ปัจจุบันมีการบูรณาการโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องจากหน่วยงานต่าง ๆ ทำให้ระยะเส้นฐานระหว่างสถานีในโครงข่ายมีขนาดสั้นลง ซึ่งส่งผลต่อการสร้าง Virtual RINEX หากสามารถออกแบบการทดสอบที่ใช้ Virtual RINEX เป็นสถานีฐานในการประมวลผลภายหลังวิถีของยานพาหนะ ก็จะทำให้ได้ข้อสรุปที่มีความชัดเจนมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดี ควรมีการทดสอบความถูกต้องทางตำแหน่งจากการใช้ Virtual RINEX ในการหาตำแหน่งด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS เสียก่อน

การศึกษานี้ไม่ได้มีการควบคุมหรือตรวจสอบผลกระทบของระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐานและยานพาหนะ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้องของ GNSS ในการคำนวณวิถียานพาหนะ หากสามารถออกแบบการทดสอบที่มีการควบคุมระยะเส้นฐานในระยะต่าง ๆ ได้ก็จะทำให้ข้อสรุปมีความชัดเจนมากขึ้น

การศึกษานี้ใช้การประมวลผลภายหลังแบบสัมพัทธ์เท่านั้น ไม่มีการตรวจสอบวิถีของยานพาหนะจากการประมวลผลภายหลังแบบสัมบูรณ์ เช่น PPP (Precise Point Positioning) ซึ่งเป็นวิธีการประมวลผลภายหลังที่ไม่ต้องใช้สถานีฐาน ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสำรวจลดลง หากมีการออกแบบการทดสอบด้วยการประมวลผลภายหลังแบบสัมบูรณ์ด้วยก็จะทำให้การศึกษามีความหลากหลายมากขึ้น

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่มีความหลากหลายปะปนกัน ทำให้การทดสอบมีข้อจำกัดในส่วนของพื้นที่ทดสอบและไม่เป็นตัวแทนของทุกสภาพแวดล้อม หากสามารถออกแบบการทดสอบที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมแต่ละรูปแบบได้ เช่น สามารถควบคุมระยะเวลาและความเร็วที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ที่ไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ เป็นต้น ก็จะทำให้ได้ข้อสรุปที่มีความชัดเจนมากขึ้น

บรรณานุกรม

- Dingsheng Chen. (1994). Development of a fast ambiguity search filtering (FASF) method for GPS carrier phase ambiguity resolution. In.
- FGDC. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards. In *Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. Virginia: Federal Geographic Data Committee Secretariat.
- Godha, S. (2006). *Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application*. (MSc Thesis). University of Calgary, Alberta, Canada.
- Groves, P. D. (2008). *Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems*. London: Artech House.
- Guan, H., Li, J., Yu, Y., & Liu, Y. (2016). *Geometric validation of a mobile laser scanning system for urban applications* (Vol. 9901): SPIE.
- IGS. (2020). IGS website. Retrieved from <https://www.igs.org/>
- Jonge, P., & Tiberius, C. C. J. M. (1998). The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. *Delft Geodetic Computing Centre LGR Series*, 12.
- Kalvoda, P., Nosek, J., Kuruc, M., Volarik, T., & Kocmanova, P. (2020). *Accuracy Evaluation and Comparison of Mobile Laser Scanning and Mobile Photogrammetry Data*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Laoniphon, C., Thongtan, T., & Satirapod, C. (2021). *Performance Assessments of Correction Models in GNSS Network-based RTK Positioning*. Paper presented at the 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2021), Chiang Mai, Thailand.
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying* (4th ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Mattheuwsen, L., Bassier, M., & Vergauwen, M. (2019). THEORETICAL ACCURACY

- PREDICTION AND VALIDATION OF LOW-END AND HIGH-END MOBILE MAPPING SYSTEM IN URBAN, RESIDENTIAL AND RURAL AREAS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W18*, 121-128. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-121-2019
- NovAtel Inc. (2015). *An Introduction to GNSS; GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems* (2nd ed.). Canada: NovAtel Inc.
- Omogunloye, O. G., Okorochoa, C. V., Ojebile, B. M., Odumosu, J. O., & Ajayi, O. G. (2017). Comparative analysis of the standard error in relative GNSS positioning for short, medium and long baselines. *Journal of Geomatics*, 11(2), 207-217.
- Peng, C.-W., Hsu, C.-C., & Wang, W.-Y. (2020). Cost Effective Mobile Mapping System for Color Point Cloud Reconstruction. *Sensors*, 20(22), 6536. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/22/6536>
- Rizos, C. (1997). *Principles and Practice of GPS Surveying Monograph 17*. Australia: School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales.
- Scherzinger, B. (1996). *Inertial navigator error models for large heading uncertainty*. Paper presented at the Proceedings of the 1996 Positioning, Location and Navigation Symposium (PLANS), Atlanta.
- Scherzinger, B. (2001). *Robust Inertially-Aided RTK Position Measurement*. Paper presented at the Proceedings of KIS2001, Banff, Canada.
- Sickle, J. V. (2015). *GPS for Land Surveyors* (4th ed.). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC.
- SILICON SENSING. (2017). MEMS Accelerometers. Retrieved from <https://www.siliconsensing.com/technology/mems-accelerometers/>
- STMicroelectronics. (2011). *Everything about STMicroelectronics' 3-axis digital MEMS gyroscopes*. Retrieved from
- Teunissen, P. J. G., & Kleusberg, A. (1998). *GPS for Geodesy* (2nd ed.). Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Teunissen, P. J. G., & Odijk, D. (1997). *Ambiguity Dilution of Precision: Definition, Properties and Application*. Paper presented at the Proceedings of ION-GPS-97, Salt Lake City.
- Trimble. (2020). Processing Trimble MX9 Mobile Mapping Data. In *Trimble Business*

Center. California: Trimble Inc.

Wang, Z. H., C., Wang, W., Si, X., & Zhou, Z. (2012). *An Off-online Fuzzy Modelling Method for Fault Prognosis with an Application*. Paper presented at the Prognostics & System Health Management Conference, Beijing.

Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS* (4th ed.): McGraw-Hill Education.

Zhang, W., Qi, J., Peng, W., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 8, 501. doi:10.3390/rs8060501

กรมแผนที่ทหาร. (2564). ตำแหน่งสถานีฐาน (CORS Station) ในประเทศไทย. Retrieved from <https://cors.rtsd.mi.th/SBC/spider-business-center>

เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2549). เอกสารคำสอนวิชา 2108631 *Advanced GPS Satellite Surveying* งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2553). เอกสารคำสอนวิชาการรังวัดด้วยภาพในทางปฏิบัติ. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2549). การสำรวจรังวัด ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรุณ บุรีรักษ์. (2553). การศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.



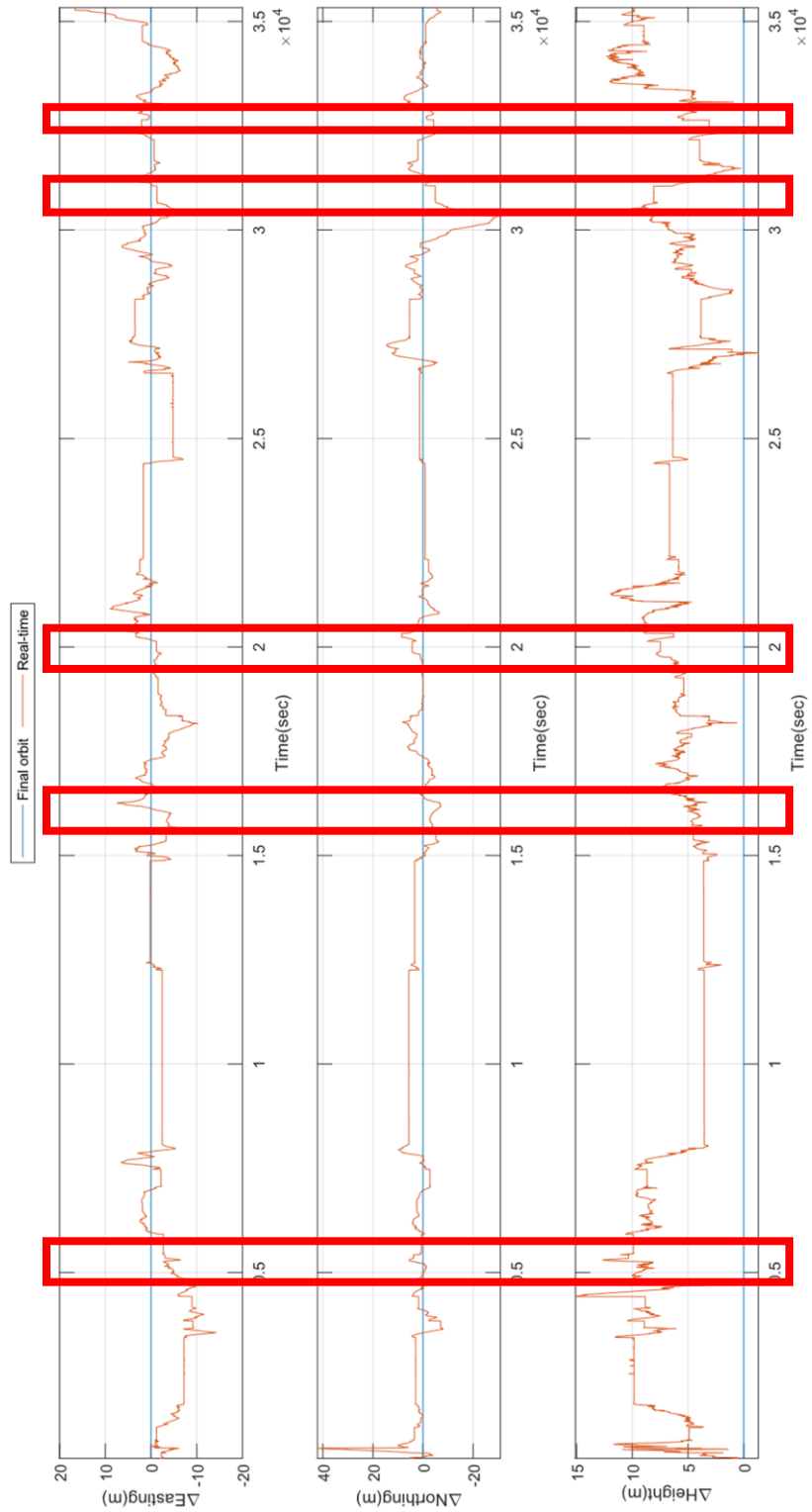
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

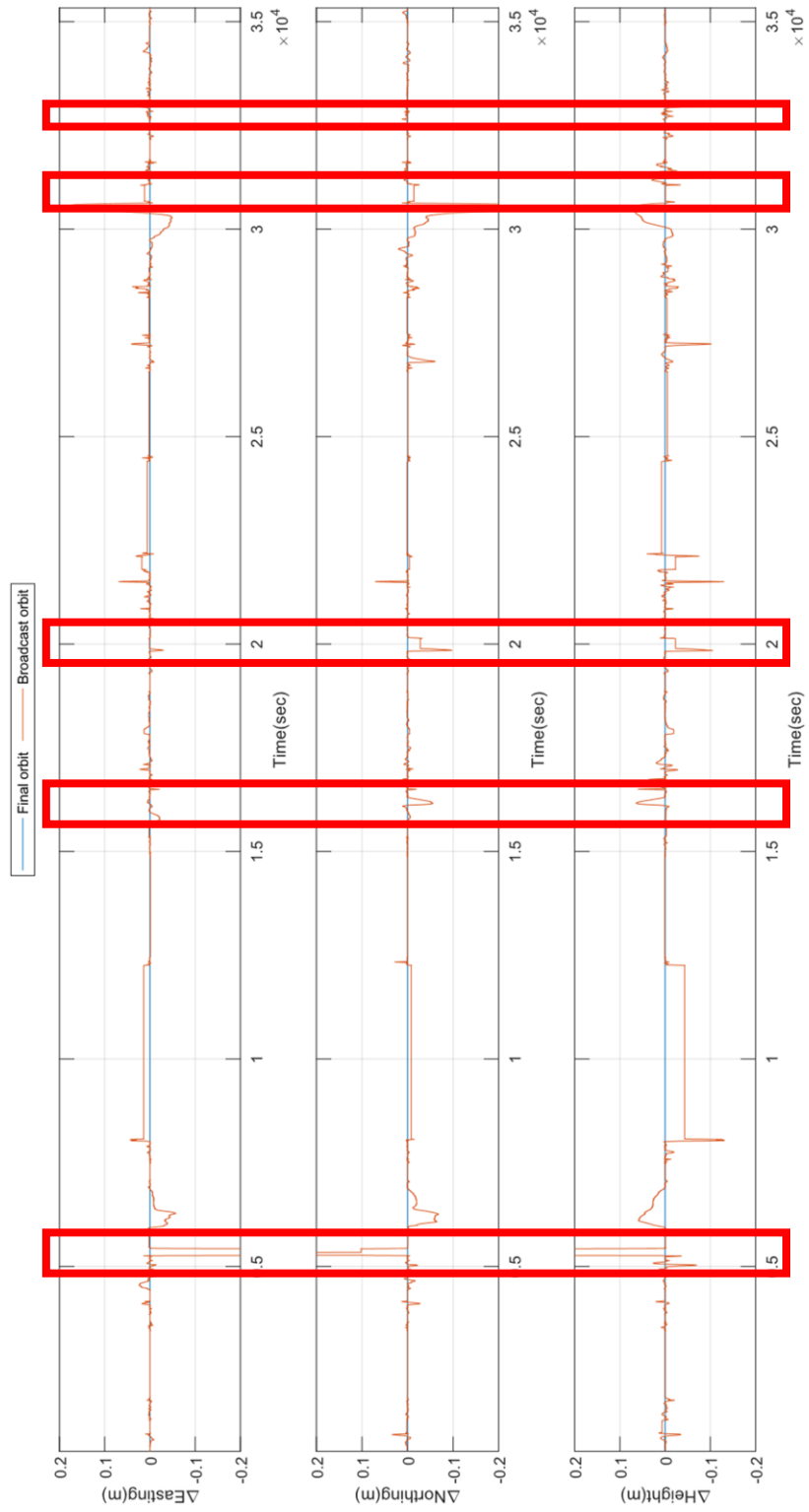
ภาคผนวก ก

ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Final orbit และแบบอื่น ๆ

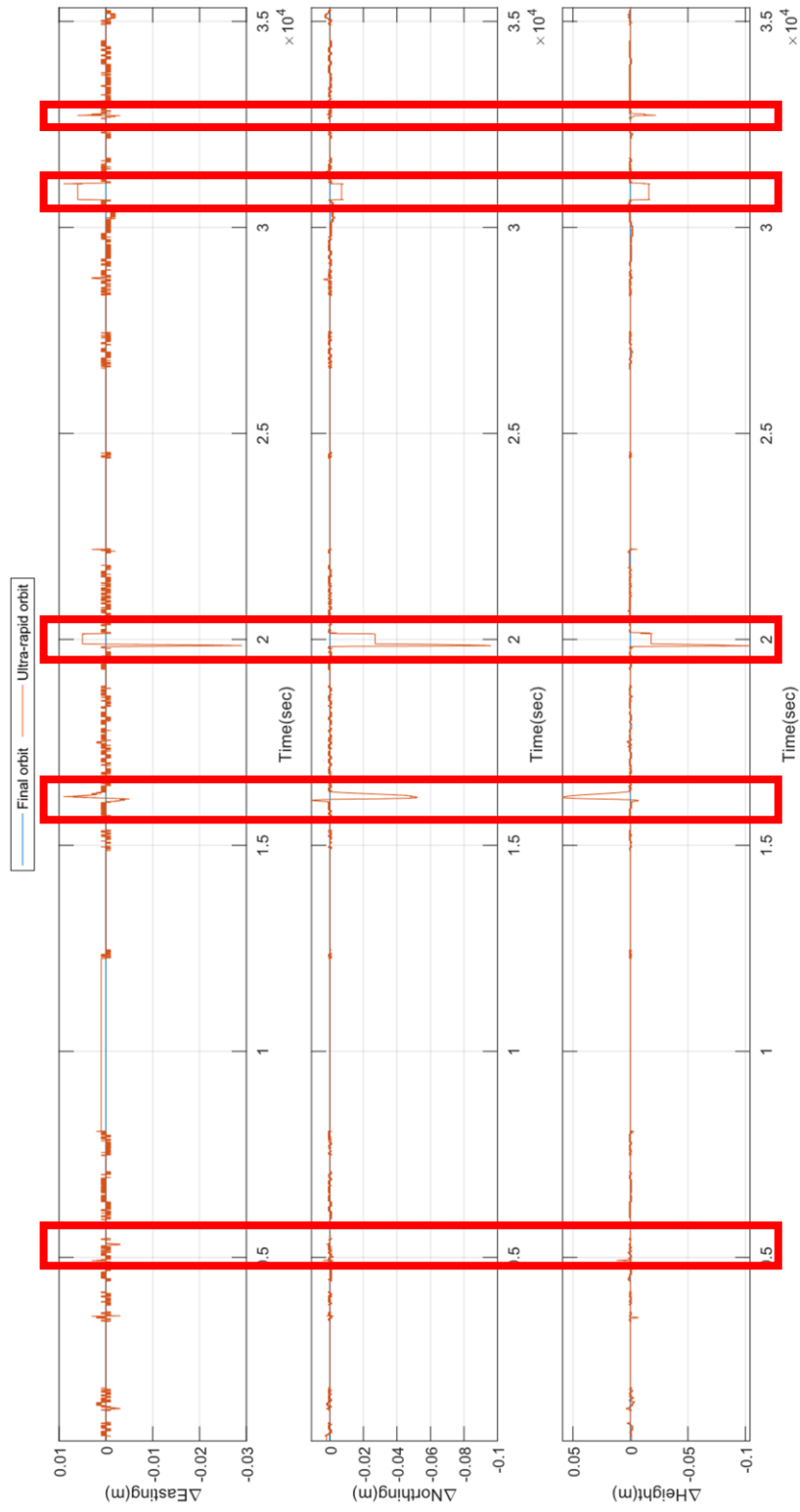
ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะทั้งสามแกน (Δ Easting, Δ Northing, และ Δ Height) ระหว่างวิถียานพาหนะแบบ Real-time และวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังที่ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, และ Rapid orbit เปรียบเทียบกับวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังที่ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง ดังแสดงในรูปที่ ก.1 ระหว่างแบบ Real-time และแบบ Final orbit, รูปที่ ก.2 ระหว่างแบบ Broadcast orbit และแบบ Final orbit, รูปที่ ก.3 ระหว่างแบบ Ultra-rapid orbit และแบบ Final orbit, และรูปที่ ก.4 ระหว่างแบบ Rapid orbit และแบบ Final orbit และการสำรวจพื้นที่ชานเมือง ดังแสดงในรูปที่ ก.5 ระหว่างแบบ Real-time และแบบ Final orbit, รูปที่ ก.6 ระหว่างแบบ Broadcast orbit และแบบ Final orbit, รูปที่ ก.7 ระหว่างแบบ Ultra-rapid orbit และแบบ Final orbit, และ รูปที่ ก.8 ระหว่างแบบ Rapid orbit และแบบ Final orbit ภายในกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงของรูปตั้งแต่รูปที่ ก.1 ถึงรูปที่ ก.8 คือช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะในแต่ละช่วงเวลามีรายละเอียดดังคำอธิบายในข้อที่ 4.1.2 ซึ่งในการสำรวจพื้นที่ในเมืองมีการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังจำนวน 5 ช่วงเวลา และในการสำรวจพื้นที่ชานเมืองมีการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังจำนวน 2 ช่วงเวลา โดยแต่ละช่วงเวลาของแต่ละช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะของแต่ละพื้นที่สำรวจที่กล่าวถึงในข้อที่ 4.1.2 มีค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะดังแสดงในตารางที่ ก. 1 และ ก.2 ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและพื้นที่ชานเมืองตามลำดับ



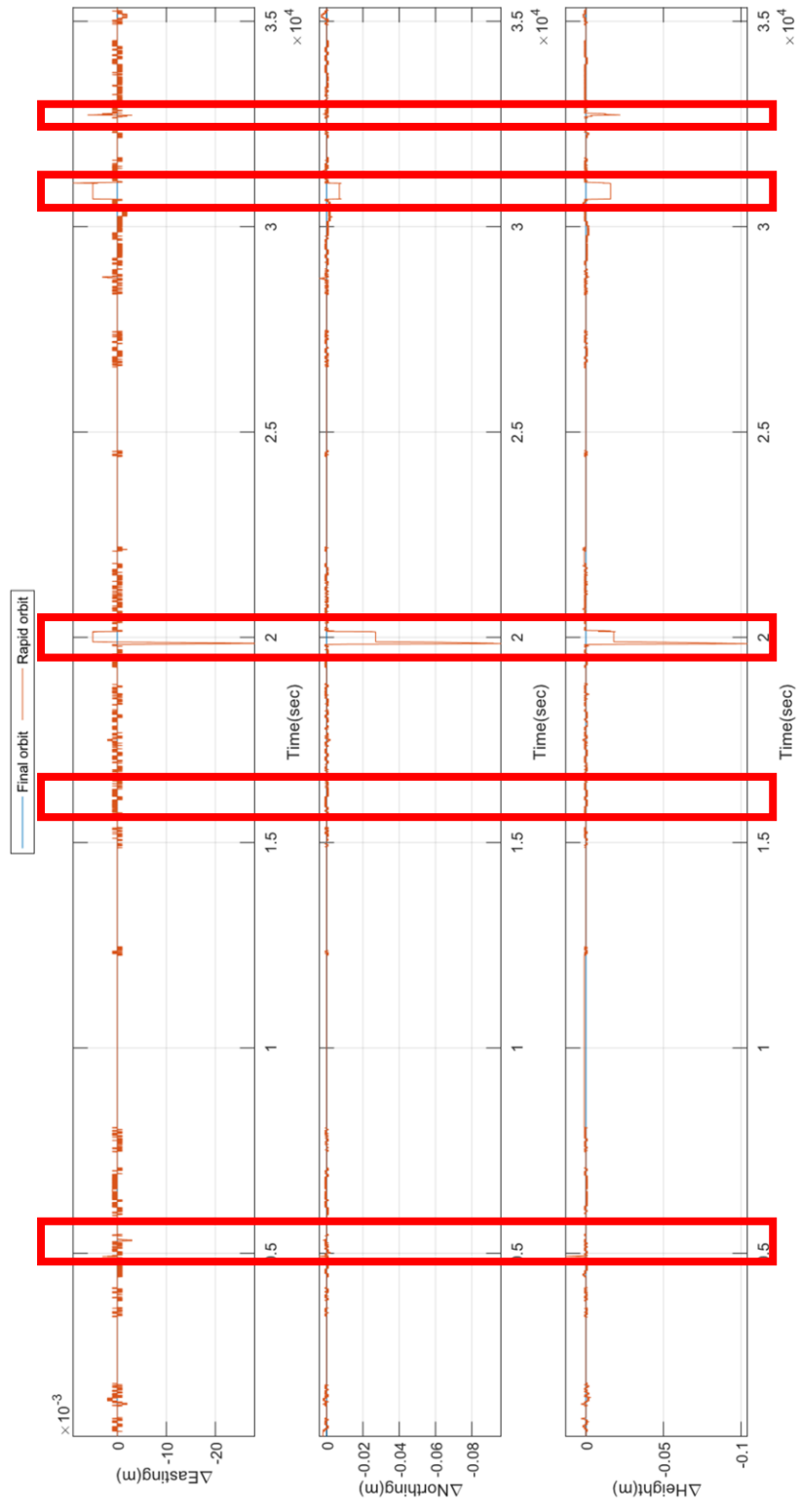
รูปที่ ก.1 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียามพาทนระหว่าง Real-time และ Final orbit ในพื้นที่ในเมือง



รูปที่ ก.2 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะระหว่าง Broadcast orbit และ Final orbit ในพื้นที่ในเมือง



รูปที่ ก.3 ค่าต่างของค่าพิทักิวเลียนพหุระหว่าง Ultra-rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ในเมือง



รูปที่ ก.4 ค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพหุระหว่ง Rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ในตัวเอง

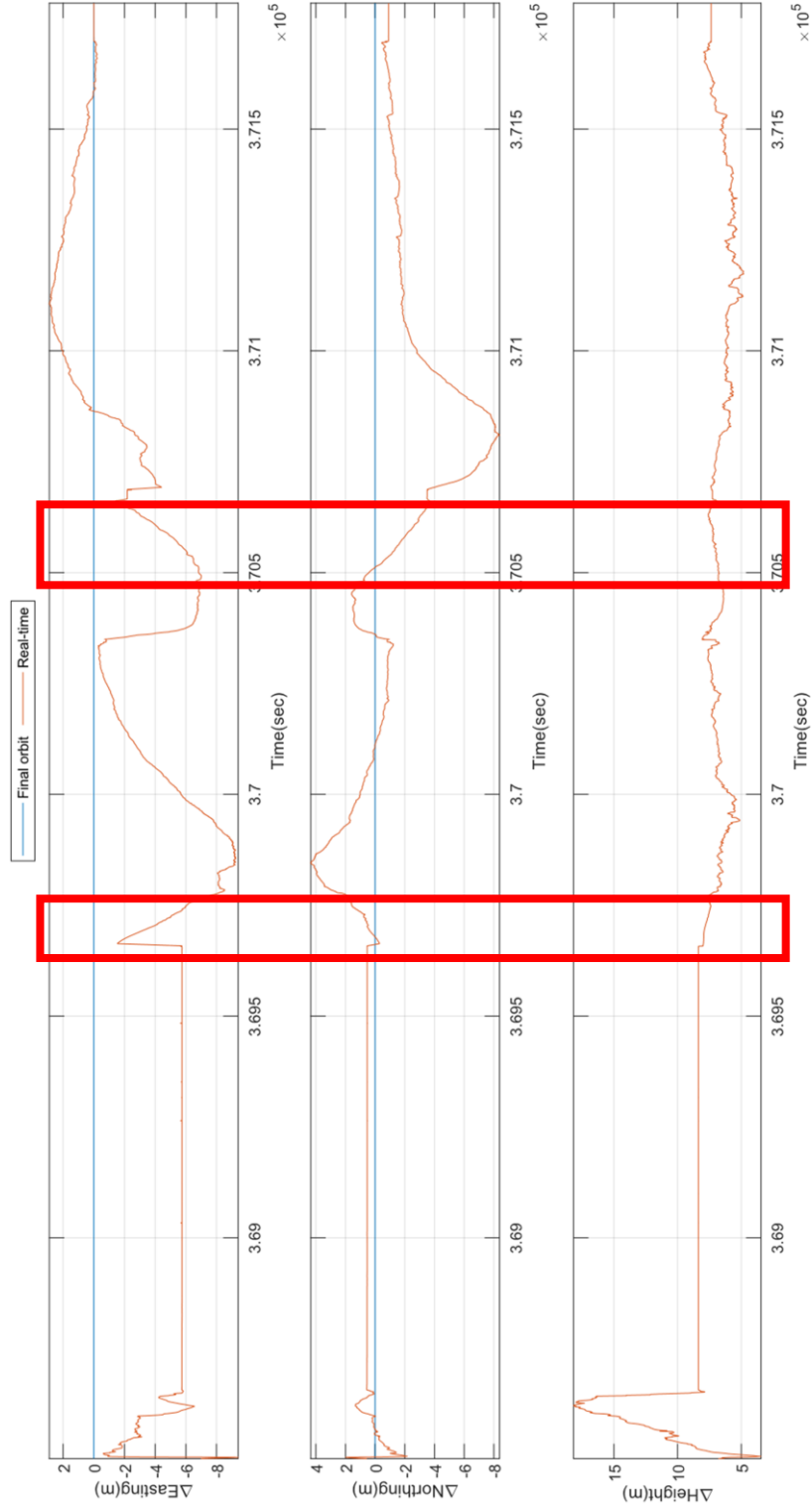
ตารางที่ ก.1 ค่าต่างของค่าพีคัดของข้อมูลวิธียานพาหนะในช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพีคัดของการสำรวจพื้นที่ในเมือง

ช่วงเวลา	Epoch	ชุดข้อมูล														
		Real-Time			Broadcast orbit			Ultra-rapid orbit			Rapid orbit					
		ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
ช่วงที่ 1	5265.0	-3.024	4.500	10.269	-0.183	0.068	0.232	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000
	5300.0	-6.488	5.519	12.688	-3.664	1.232	2.316	-0.002	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.000	-0.002	0.000	0.000
	5319.7	-5.171	4.864	11.434	-2.660	0.873	1.531	-0.003	0.002	0.001	-0.003	0.002	0.001	-0.003	0.002	0.001
	5339.0	-3.044	3.775	10.333	-0.288	0.102	0.206	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ช่วงที่ 2	5424.7	-3.036	3.790	10.331	-0.288	0.102	0.206	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5434.8	-2.709	1.149	10.462	-0.002	0.002	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	16094.6	-0.952	-5.472	4.219	-0.005	0.010	-0.006	-0.004	0.010	-0.006	-0.004	0.010	-0.006	-0.001	0.000	0.001
	16170.7	1.843	-6.979	4.867	0.004	-0.055	0.064	0.007	-0.052	0.059	0.007	-0.052	0.059	0.001	-0.001	0.000
ช่วงที่ 3	16257.0	7.513	-6.832	4.145	0.002	-0.023	0.025	0.003	-0.020	0.022	0.003	-0.020	0.022	0.000	0.000	0.000
	16301.0	3.632	-3.716	4.364	0.001	-0.002	0.002	0.000	-0.001	0.002	0.000	-0.001	0.002	0.000	0.000	0.000
	19826.6	-1.582	1.098	7.743	-0.003	-0.002	-0.011	-0.003	-0.003	-0.012	-0.003	-0.003	-0.012	-0.003	-0.003	-0.012
	19846.8	-2.203	2.978	7.845	-0.028	-0.098	-0.103	-0.027	-0.096	-0.101	-0.027	-0.096	-0.101	-0.027	-0.096	-0.101
ช่วงที่ 3	19891.0	-1.171	4.281	7.488	0.001	-0.028	-0.023	0.005	-0.027	-0.018	0.005	-0.027	-0.018	0.005	-0.027	-0.018
	20135.0	-1.170	4.281	7.486	0.001	-0.028	-0.023	0.005	-0.027	-0.018	0.005	-0.027	-0.018	0.005	-0.027	-0.018
	20169.4	-0.044	3.648	8.217	0.000	-0.002	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.000	0.000	-0.001

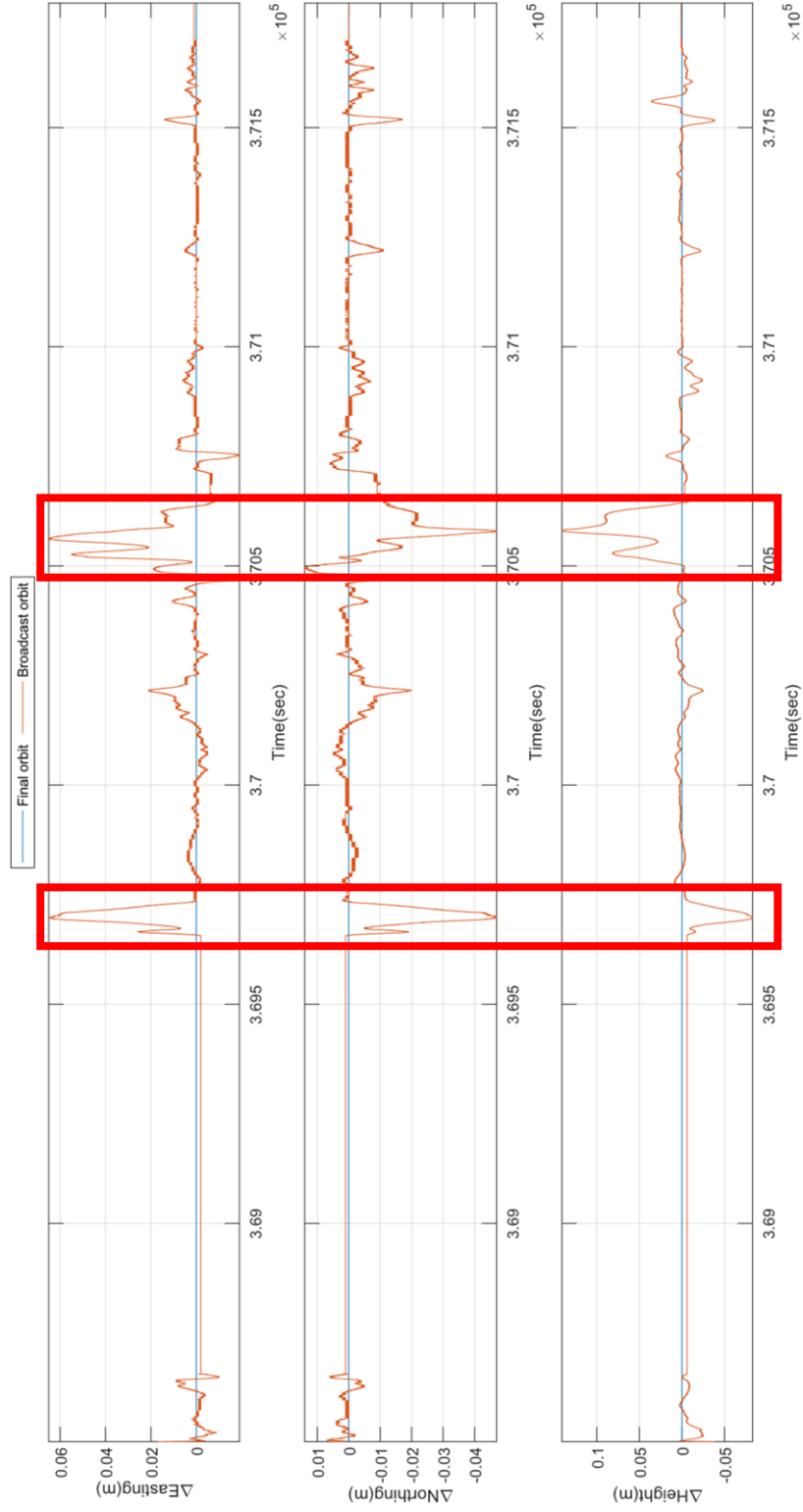
ตารางที่ ก.1 ค่าต่างของค่าพีคัดของข้อมูลวิธียานพาหนะในช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพีคัดของการสำรวจพื้นที่ในเมือง (ต่อ)

ช่วงเวลา	Epoch	ชุดข้อมูล														
		Real-Time			Broadcast orbit			Ultra-rapid orbit			Rapid orbit					
		ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
ช่วงที่ 4	30671.8	-1.274	-4.903	8.108	0.011	-0.011	-0.004	0.003	-0.006	-0.013	0.003	-0.005	-0.012			
	30675.5	-1.299	-4.882	8.092	0.012	-0.015	-0.001	0.006	-0.008	-0.017	0.005	-0.008	-0.016			
	30675.7	-1.306	-4.888	8.089	0.012	-0.014	-0.001	0.006	-0.007	-0.016	0.005	-0.007	-0.016			
ช่วงที่ 5	31071.0	-0.036	-0.909	6.278	0.007	-0.025	-0.034	0.004	-0.002	-0.010	0.004	-0.002	-0.010			
	31072.6	-0.044	-0.913	6.248	0.008	-0.024	-0.029	0.004	-0.001	-0.009	0.004	-0.001	-0.009			
	31079.3	-0.159	-0.841	6.174	0.007	-0.011	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.001			
ช่วงที่ 5	32714.9	0.330	-1.247	5.918	0.000	0.000	-0.010	0.000	-0.001	-0.012	0.000	-0.001	-0.012			
	32720.2	0.284	-1.306	5.827	0.006	0.002	-0.018	0.006	0.001	-0.022	0.006	0.001	-0.021			
	32751.7	0.541	-2.804	5.459	0.004	0.002	-0.004	0.002	0.000	-0.011	0.002	0.000	-0.012			
	32763.1	0.692	-3.634	5.395	0.005	0.005	0.004	0.002	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.001			

* Δ คือค่าต่างของค่าพีคัด, E คือ Easting (เมตร), N คือ Northing (เมตร), และ H คือ Height (เมตร)



รูปที่ ก.5 ค่าต่างของค่าพิสัยยานพาหนะระหว่าง Real-time และ Final orbit ในพื้นที่ขามเือง



รูปที่ ก.6 ค่าต่างของค่าพิกัดวิทยานพามาบรรเทาระหว่าง Broadcast orbit และ Final orbit ในพื้นที่ขามเมือง



รูปที่ ก.7 ค่าต่างของค่าพิกัดวิธานพหุระหว่าง Ultra-Rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ชานเมือง



รูปที่ ก.8 ค่าต่างของค่าพิคดิเลียนพหุนามระหว่าง Rapid orbit และ Final orbit ในพื้นที่ขานเมือง

ตารางที่ ก.2 ค่าต่างของค่าพิกัดของข้อมูลวิธียามพหุหะในช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดของการสำรวจพื้นที่ขามเมือง

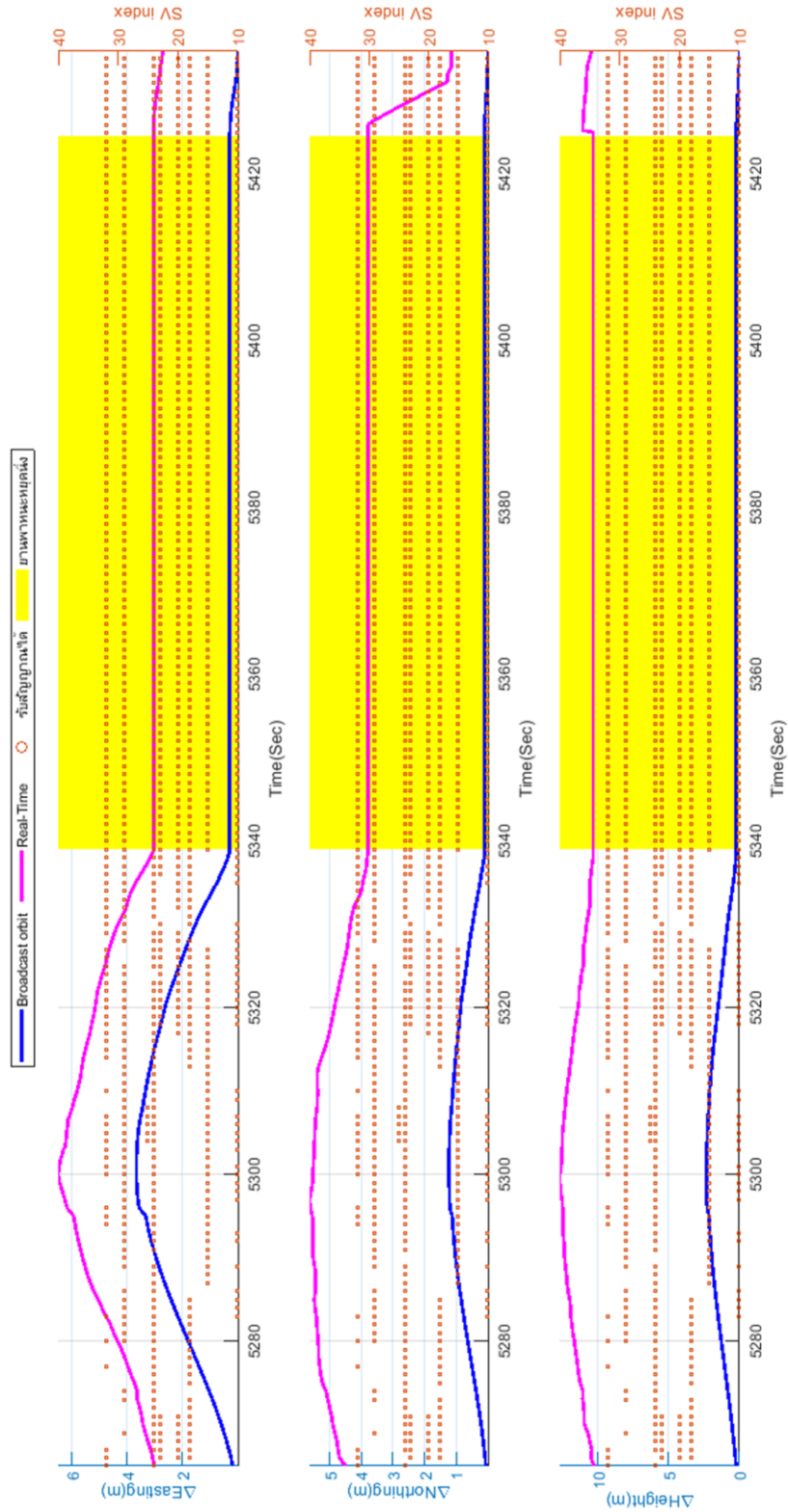
ช่วงเวลา	Epoch	ชุดข้อมูล											
		Real-time			Broadcast orbit			Ultra-rapid orbit			Rapid orbit		
		ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
ช่วงที่ 1	369684.3	-2.622	0.162	7.946	0.027	-0.020	-0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	369698.0	-3.542	0.465	7.869	0.065	-0.046	-0.083	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	369722.0	-4.956	0.741	7.627	0.026	-0.020	-0.036	-0.001	0.000	0.001	0.001	-0.001	0.000
ช่วงที่ 2	370516.7	-6.647	-0.242	6.794	0.030	0.001	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	370528.0	-6.497	-0.625	6.977	0.054	-0.006	0.081	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	370548.9	-6.021	-1.273	7.024	0.029	-0.015	0.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	370579.9	-5.103	-1.971	7.242	0.034	-0.047	0.141	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	370630.1	-3.002	-3.100	7.585	0.010	-0.017	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

* Δ คือค่าต่างของค่าพิกัด, E คือ Easting (เมตร), N คือ Northing (เมตร), และ H คือ Height (เมตร)

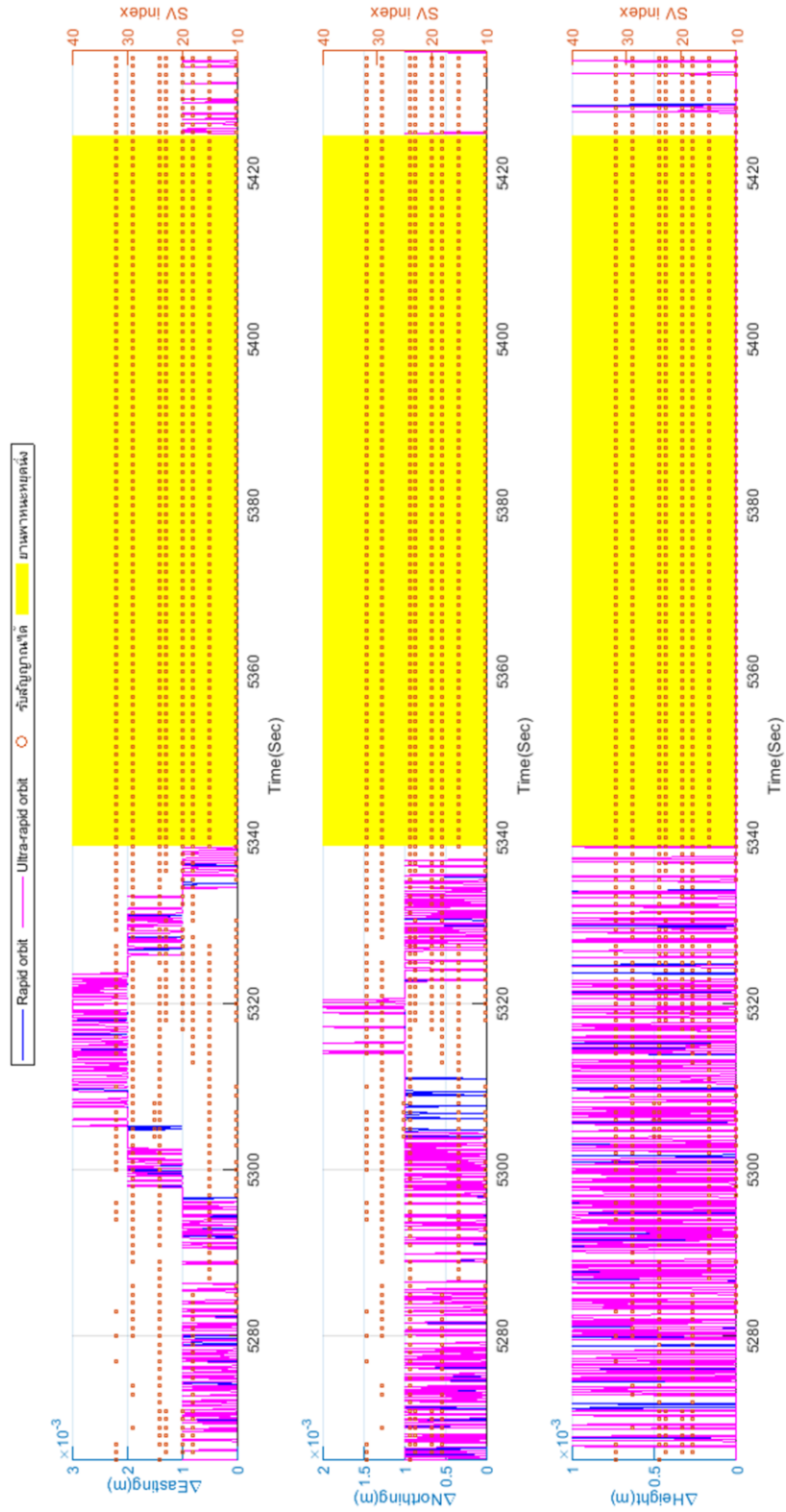
ภาคผนวก ข

ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะเทียบกับการรับสัญญาณดาวเทียม GPS

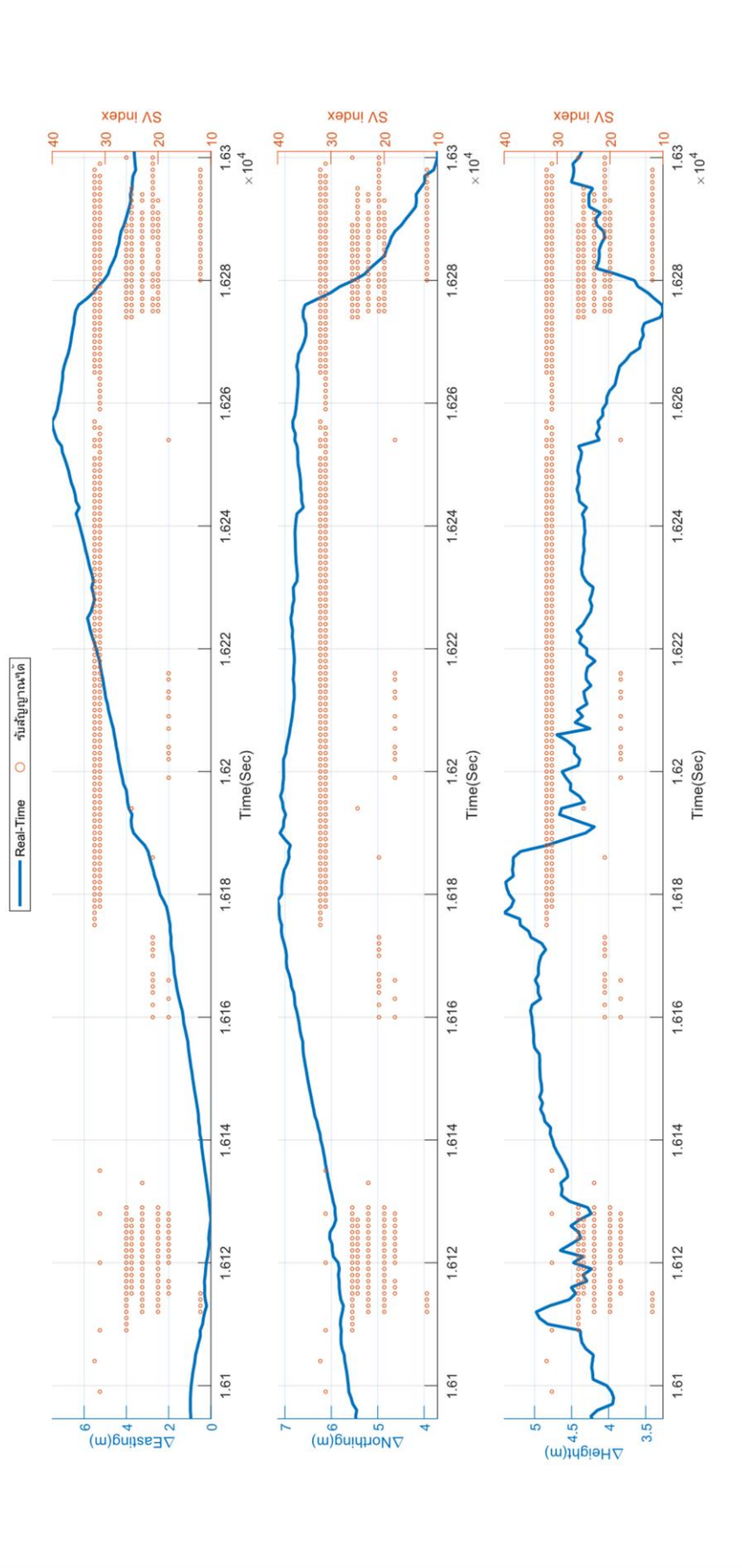
ช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังดังแสดงในรูปที่อยู่ในภาคผนวก ก เมื่อนำมาพลอตรวมกันกับดาวเทียม GPS แต่ละดวงที่เครื่องรับของยานพาหนะสามารถรับสัญญาณได้ในแต่ละช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังจะได้กราฟขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะดังแสดงในรูปที่ ข.1 ช่วงเวลาที่ 1 แบบ Real-time และแบบ Broadcast orbit, รูปที่ ข.2 ช่วงเวลาที่ 1 แบบ Ultra-rapid orbit และแบบ Rapid orbit, รูปที่ ข.3 ช่วงเวลาที่ 2 แบบ Real-time, รูปที่ ข.4 ช่วงเวลาที่ 2 แบบประมวลผลภายหลัง, รูปที่ ข.5 ช่วงเวลาที่ 3 แบบ Real-time, รูปที่ ข.6 ช่วงเวลาที่ 3 แบบประมวลผลภายหลัง, รูปที่ ข.7 ช่วงเวลาที่ 4 แบบ Real-time, รูปที่ ข.8 ช่วงเวลาที่ 4 แบบประมวลผลภายหลัง, รูปที่ ข.9 ช่วงเวลาที่ 5 แบบ Real-time, และรูปที่ ข.10 ช่วงเวลาที่ 5 แบบประมวลผลภายหลัง ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและการสำรวจพื้นที่ชานเมือง ดังแสดงในรูปที่ ข.11 แบบ Real-time, รูปที่ ข.12 แบบ Broadcast orbit, รูปที่ ข.13 แบบ Ultra-rapid orbit, และรูปที่ ข.14 แบบ Rapid orbit โดยกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงในรูปที่ ข.11, ข.12, ข.13, และข.14 คือช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังของการสำรวจพื้นที่ในเมือง ซึ่งช่วงเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังที่เกิดคลื่นหลุดขึ้นด้วย ได้แก่ช่วงเวลาที่ 1, 3, และ 4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง และช่วงเวลาที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง



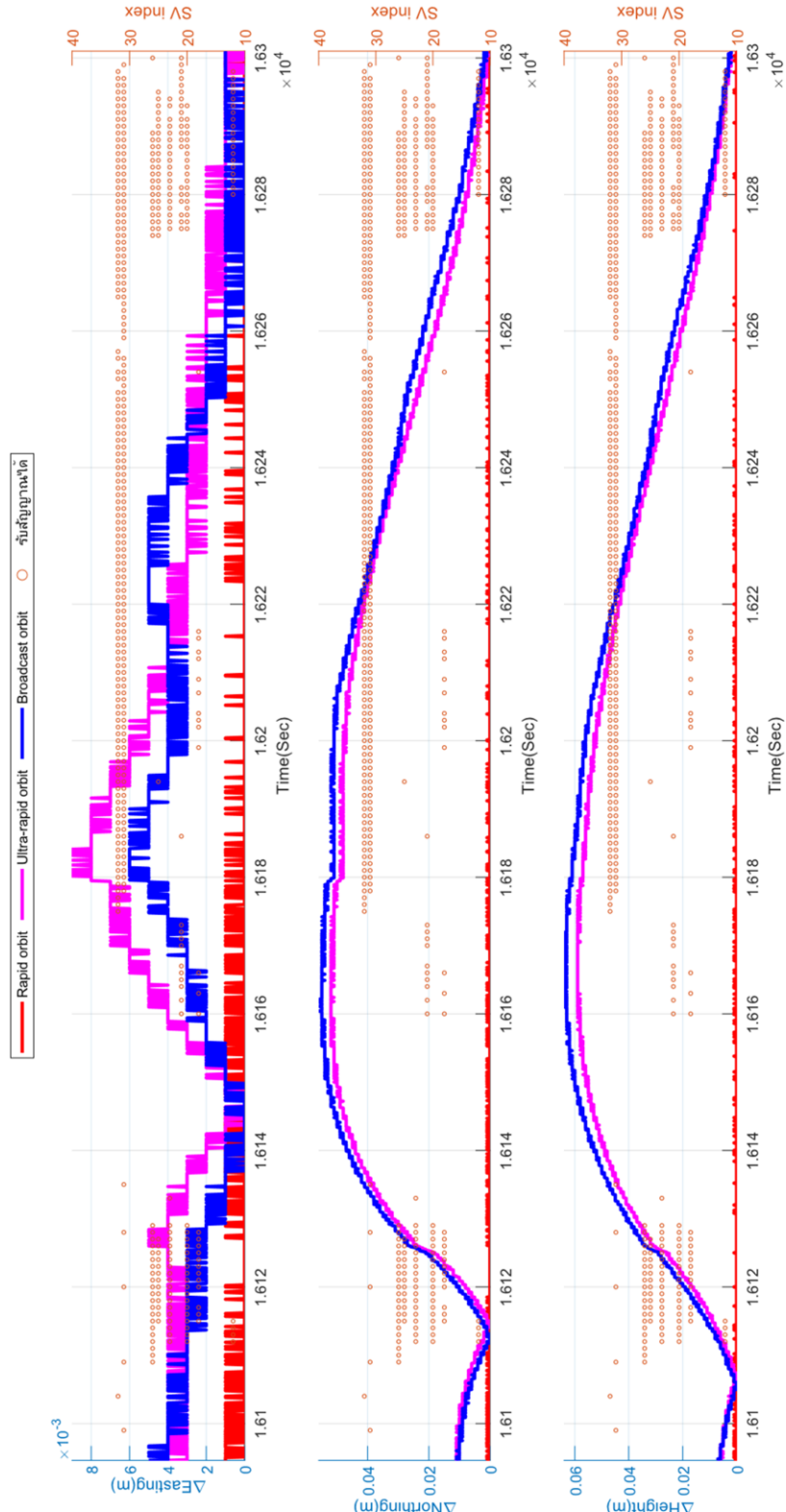
รูปที่ ข.1 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time และ Broadcast orbit ในช่วงที่ 1 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



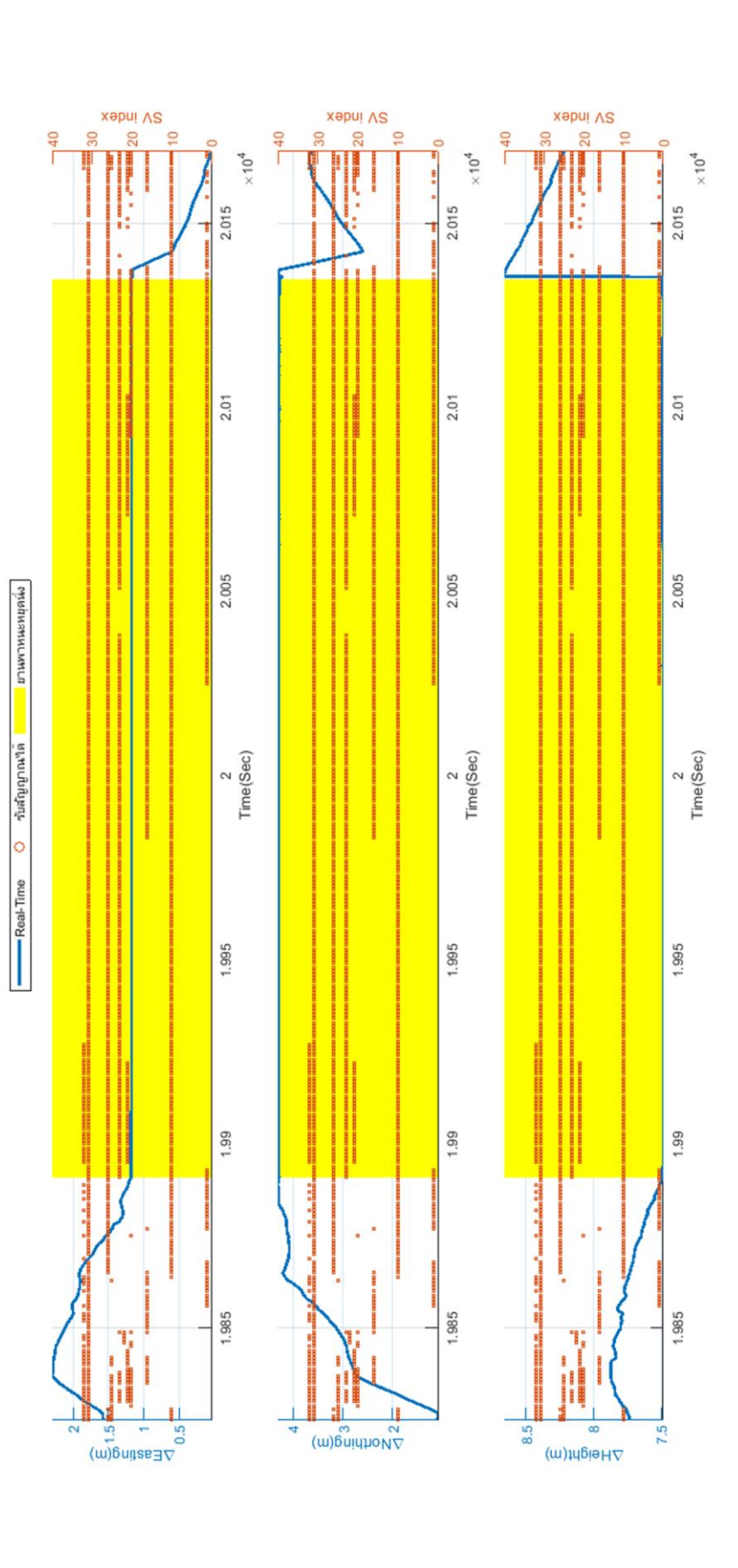
รูปที่ ข.2 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าที่กัวิตถิยามพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit และ Rapid orbit ในช่วงที่ 1 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



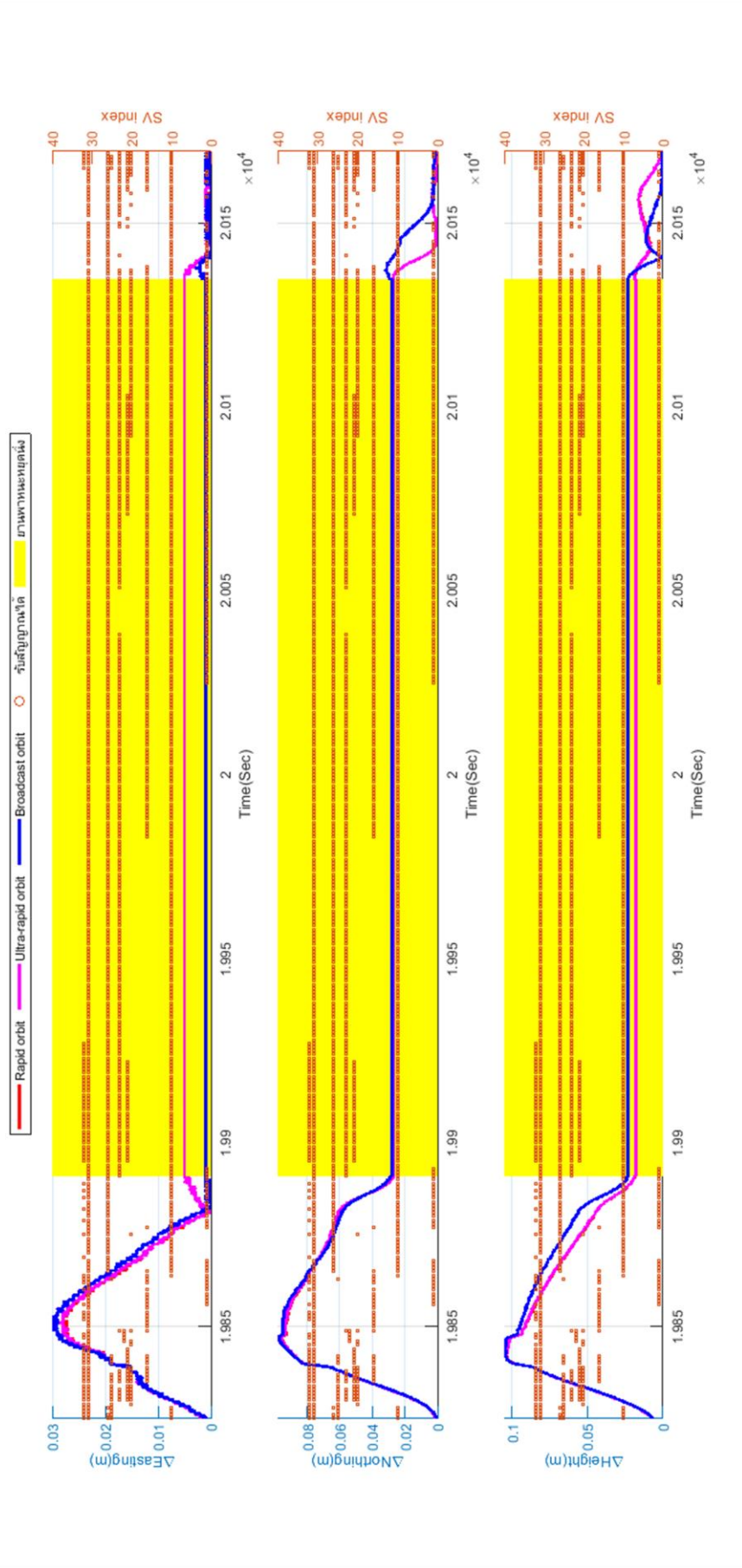
รูปที่ ข.3 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



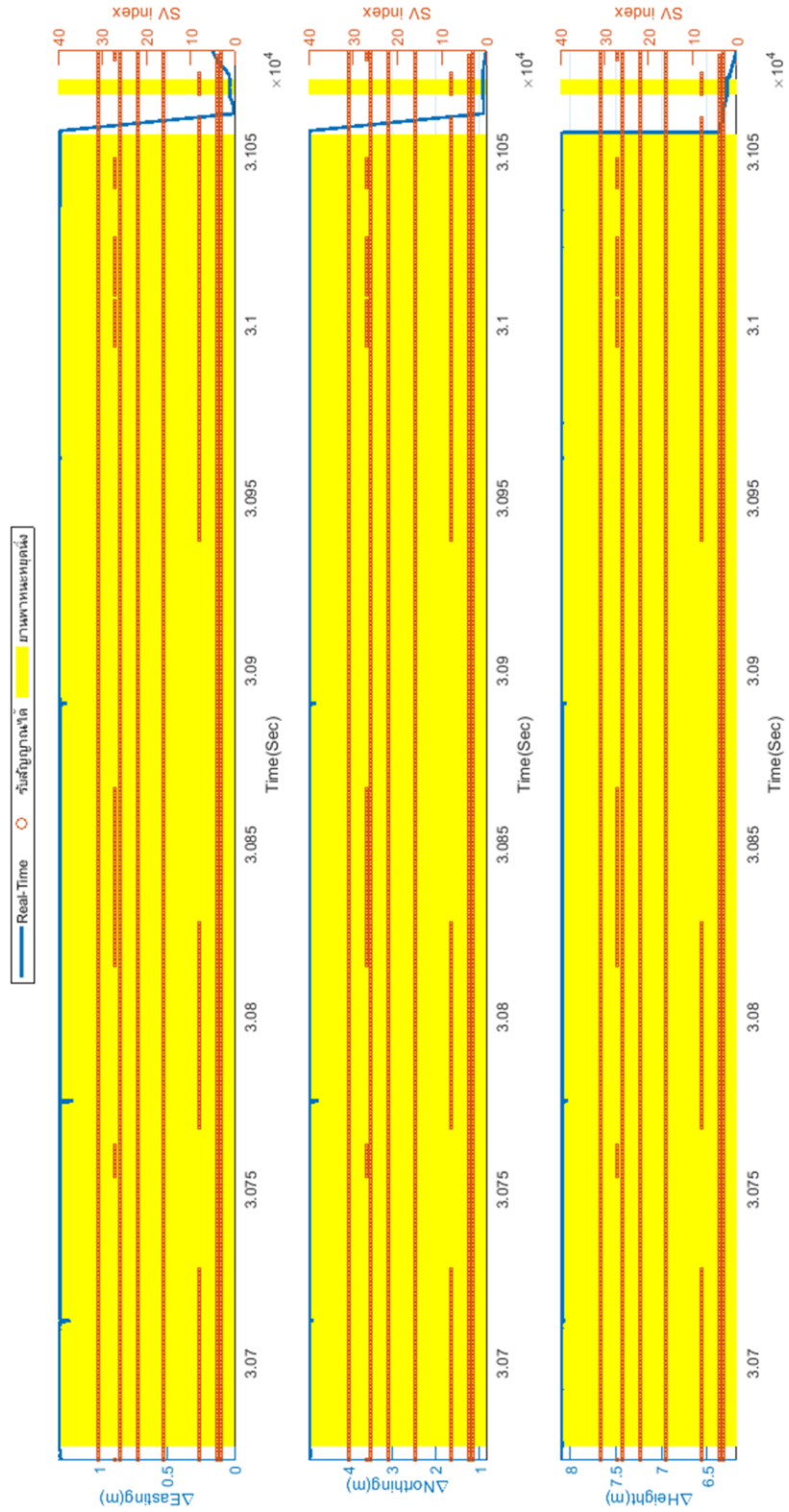
รูปที่ ข.4 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพีคที่วิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 2 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



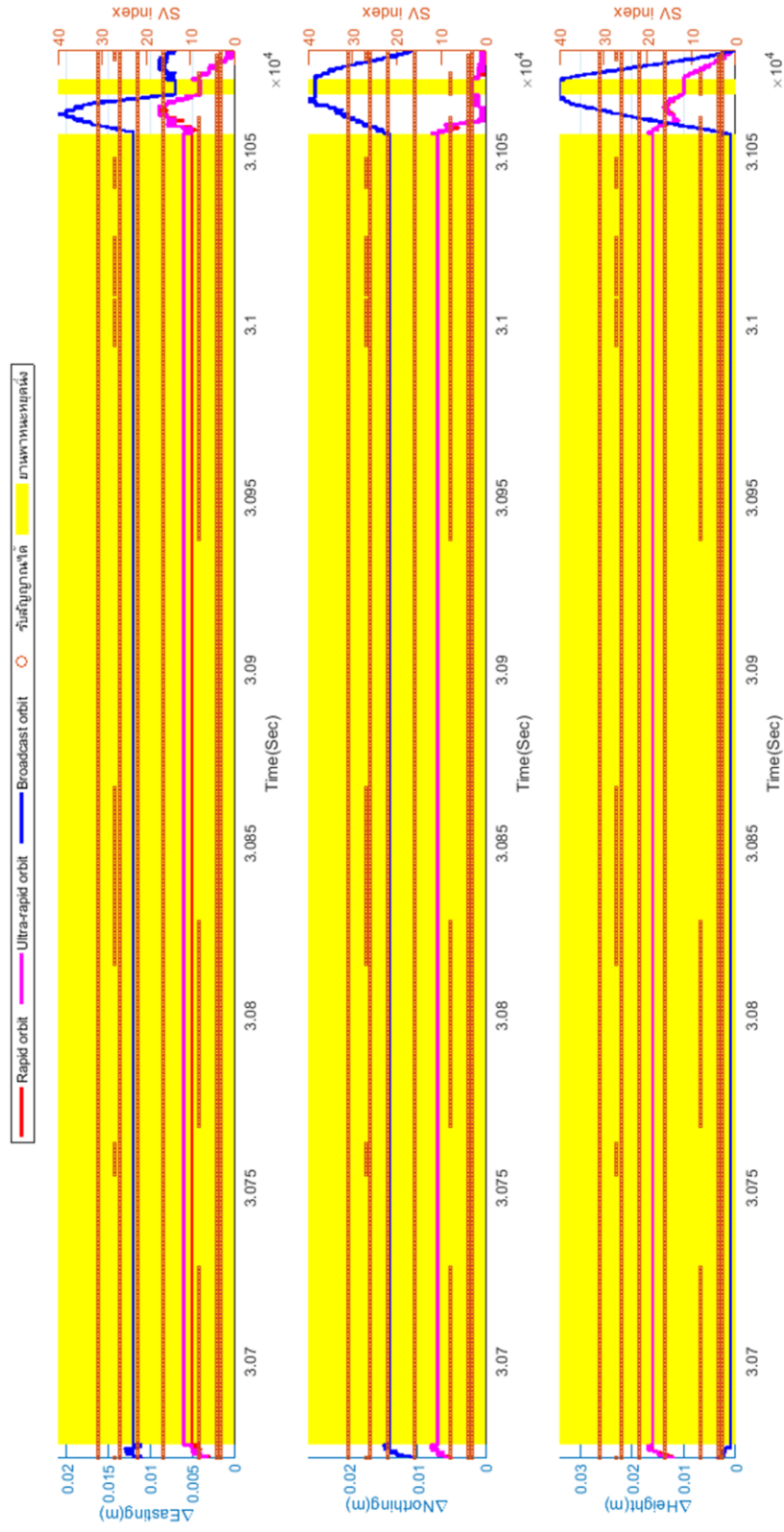
รูปที่ ข.5 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ 3 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



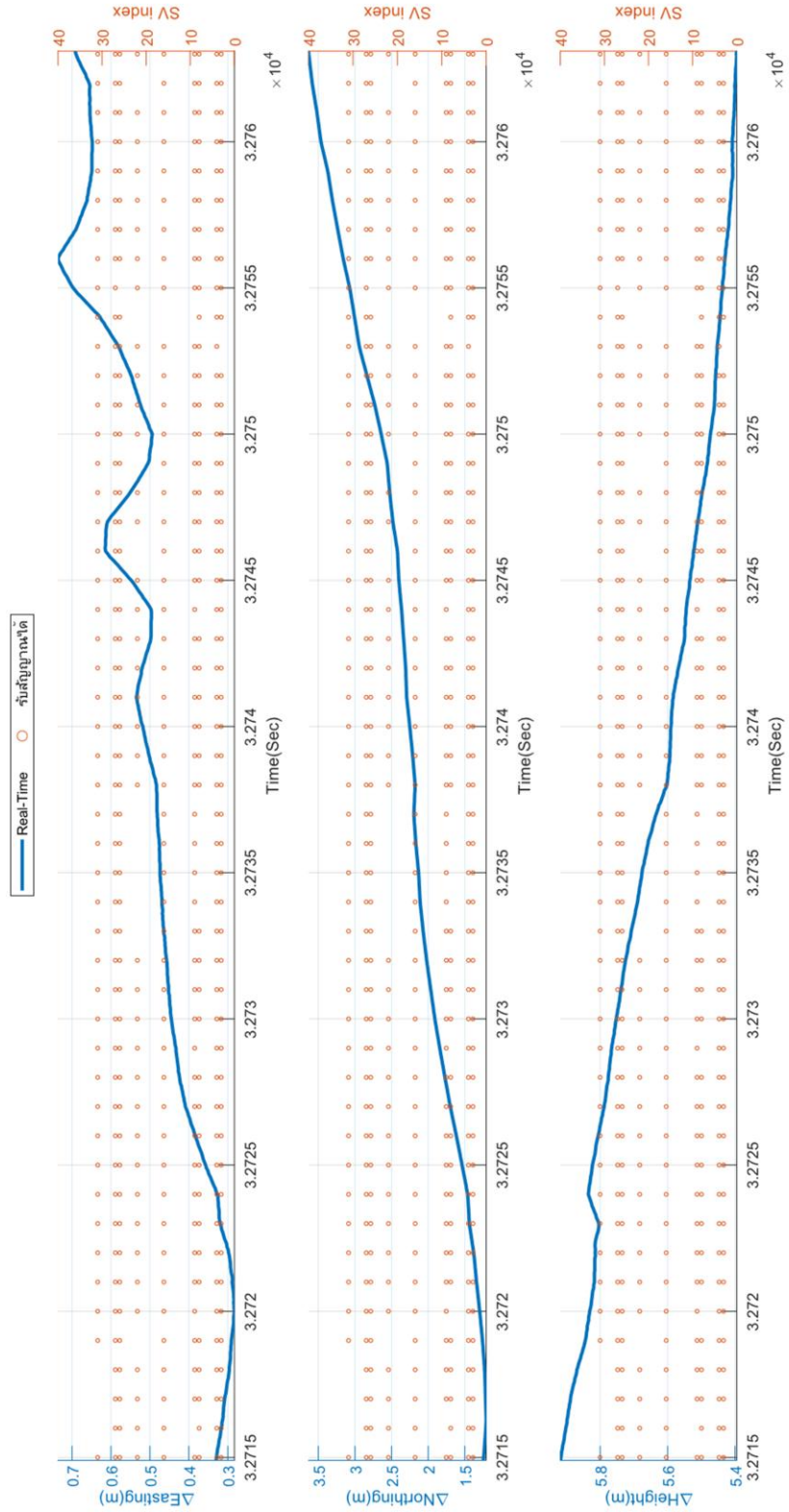
รูปที่ ข.6 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าต่างของค่าพีคิวดิยามพหุแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 3 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



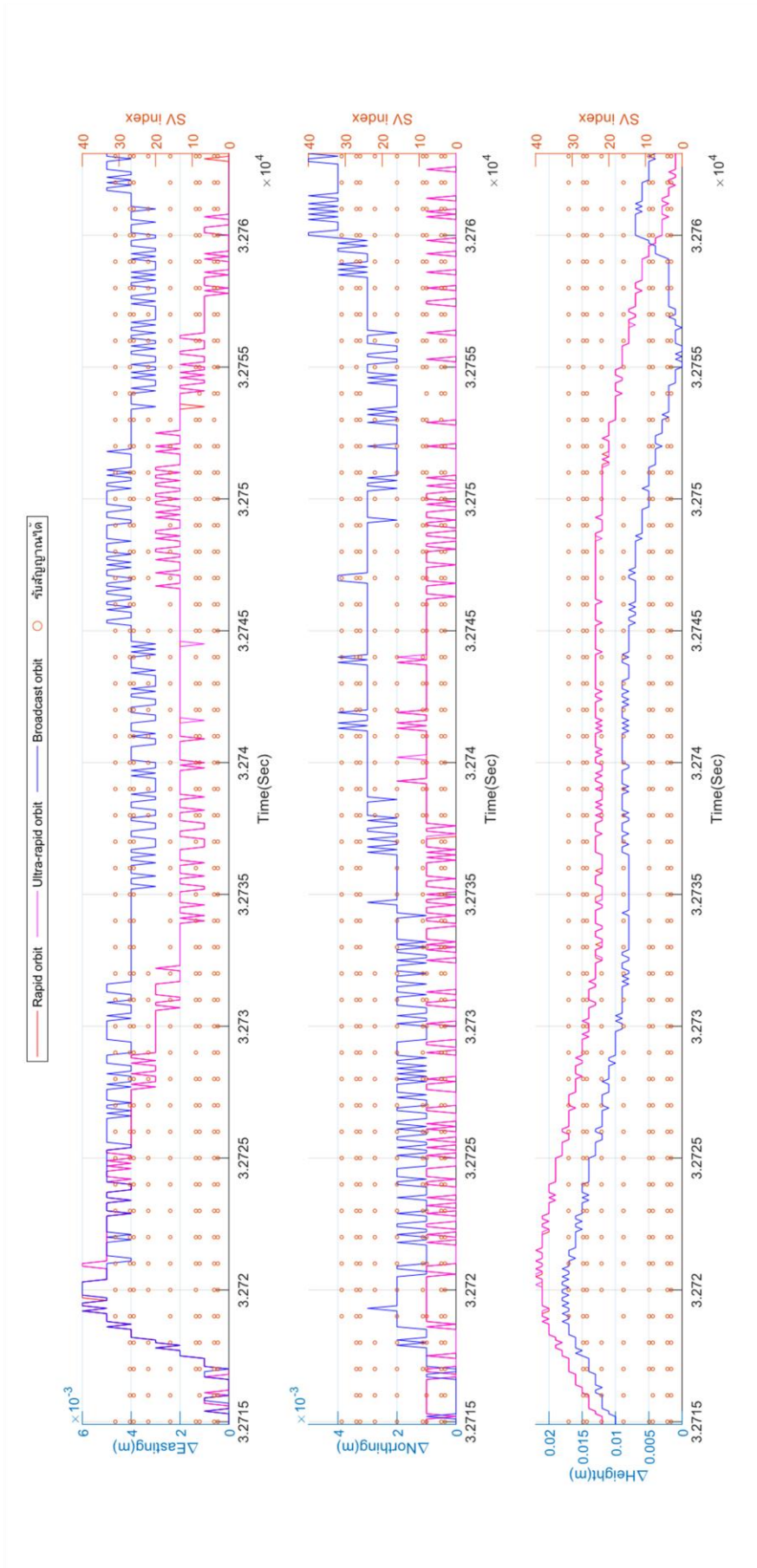
รูปที่ ข.7 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพีคั้วัดวิทยานพหุแบบ Real-time ในช่วงที่ 4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



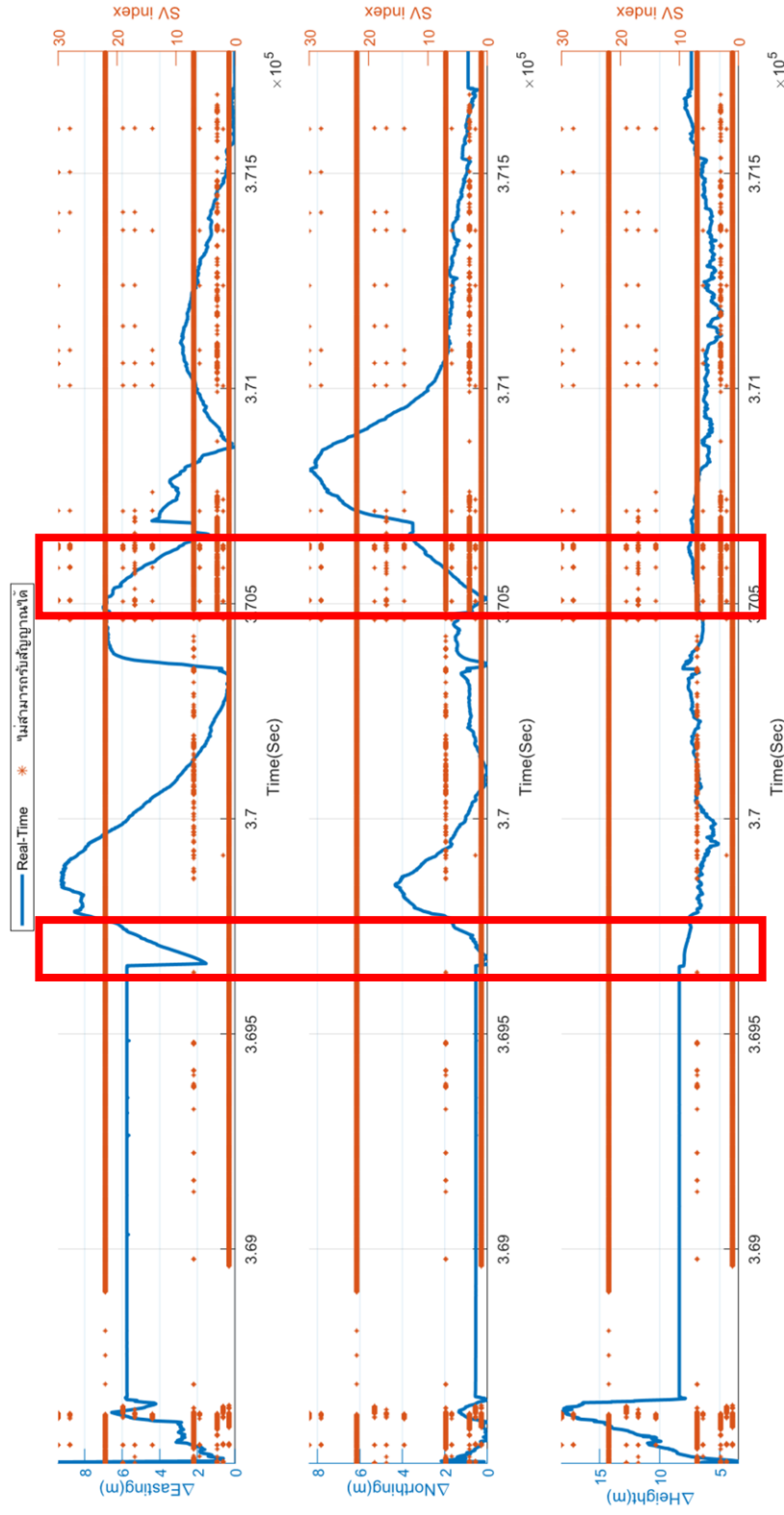
รูปที่ ข.8 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 4 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



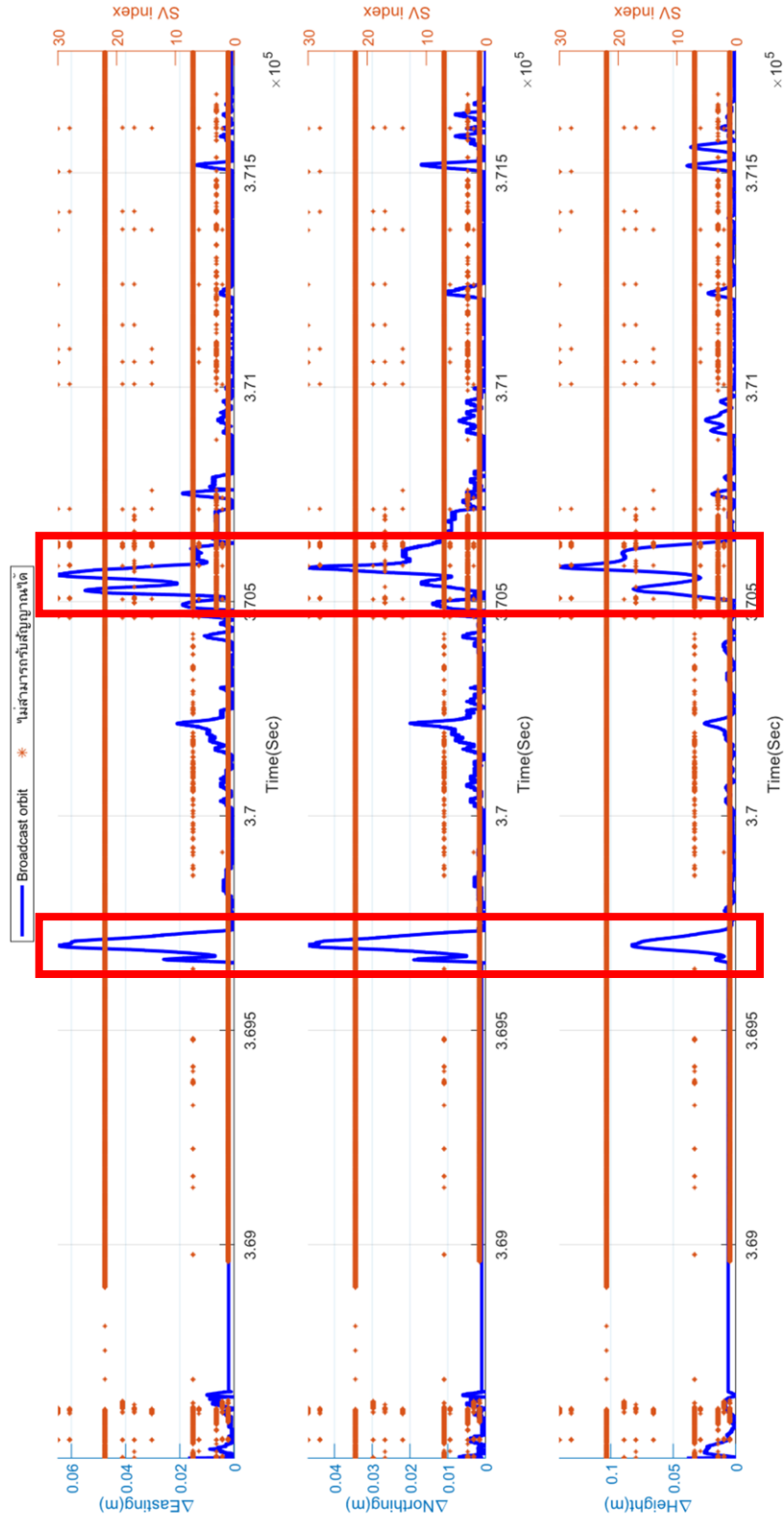
รูปที่ ๑.๑ ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดของวิถียานพาหนะแบบ Real-time ในช่วงที่ 5 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



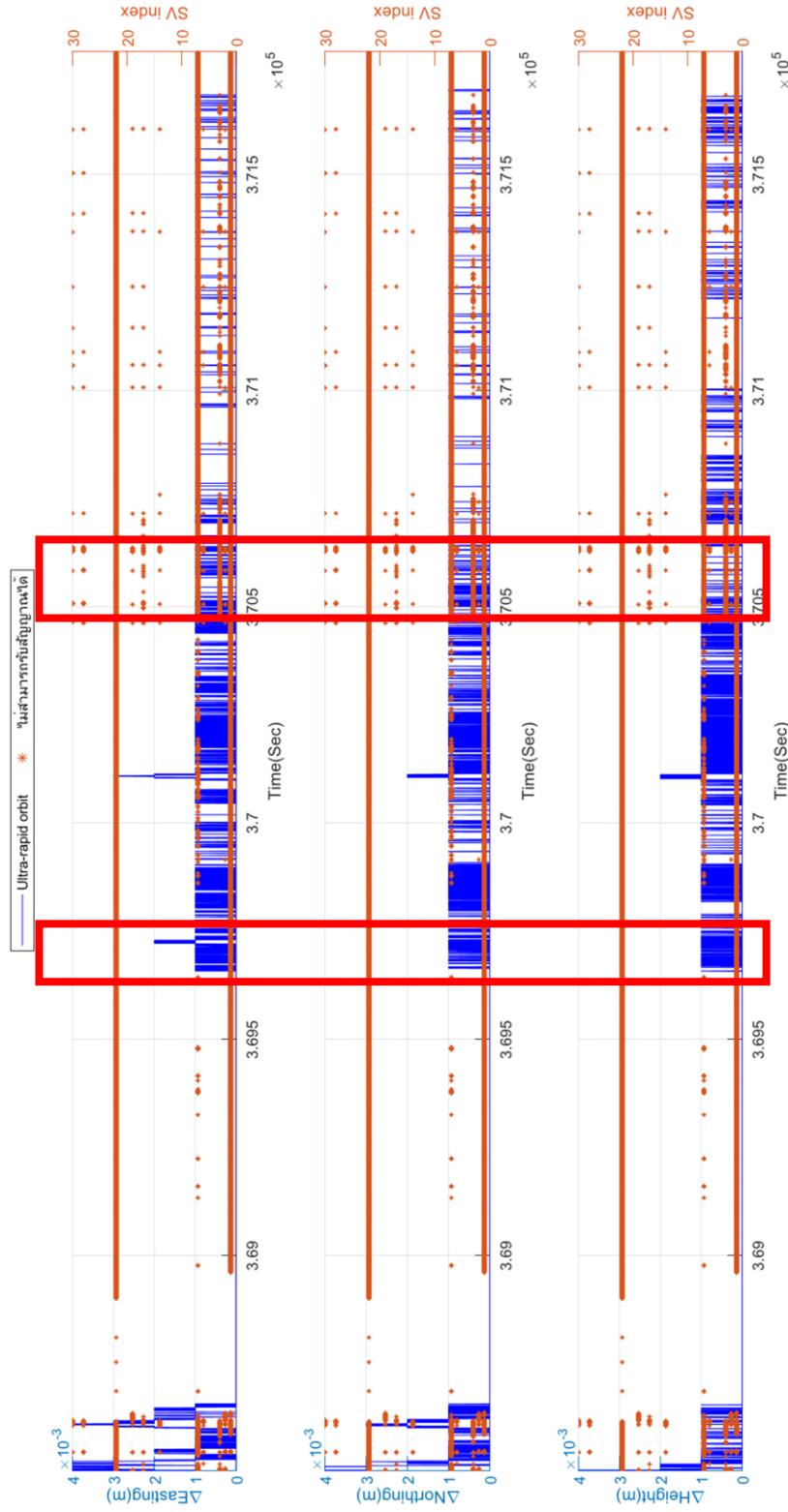
รูปที่ ข.10 ช่วงที่เกิดการกระโดดของค่าพีคของวิถียานพาหนะแบบประมวลผลภายหลังในช่วงที่ 5 ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



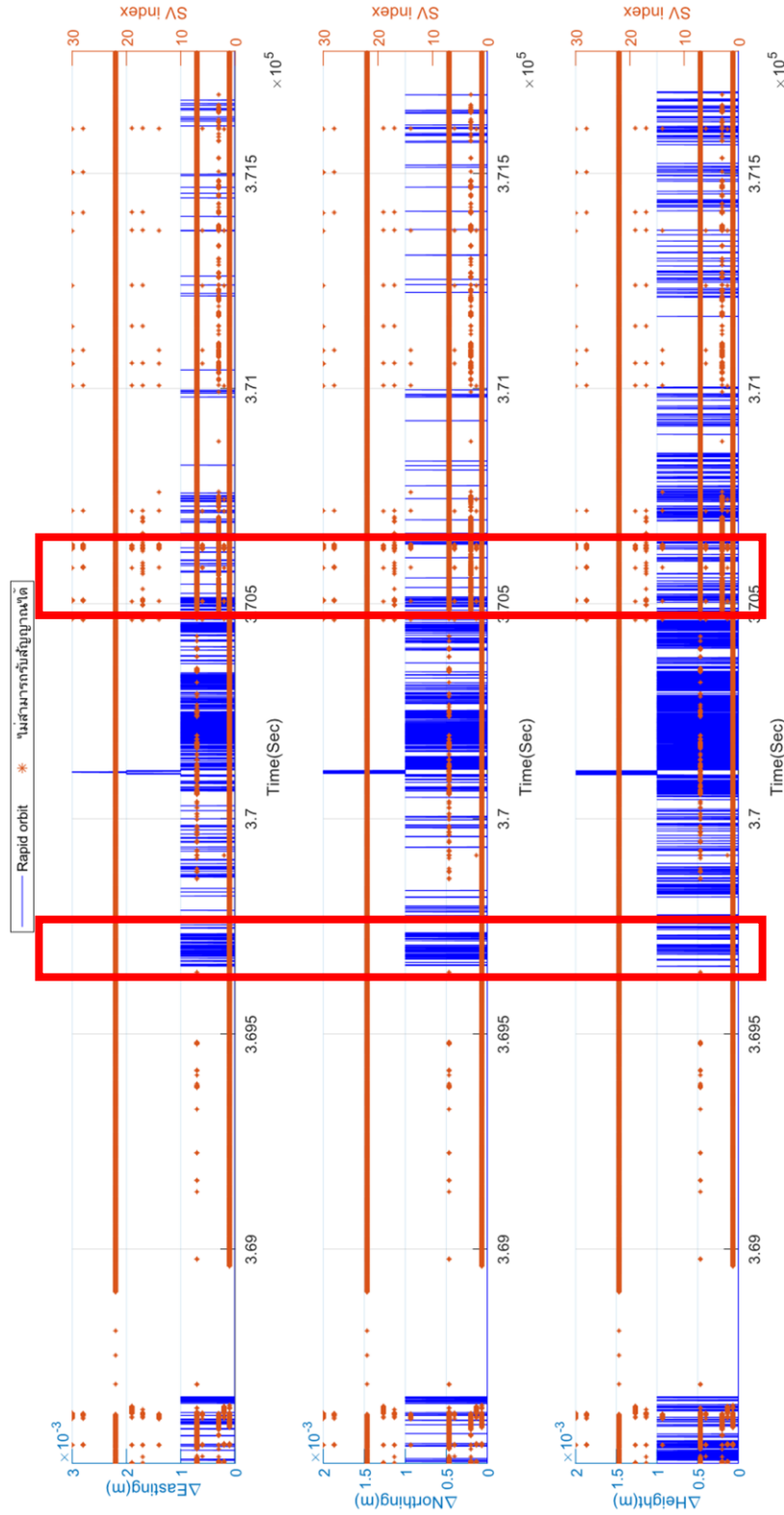
รูปที่ ข.11 ขนาดของค่าต่างของค่าพิทักของวิธียานพาหนะแบบ Real-time ของการสำรวจพื้นที่ขามเมือง



รูปที่ ข.12 ขนาดของค่าต่างของค่าพีคัวิตียามพหุแบบ Broadcast orbit ของการสำรวจพื้นที่ขานเมือง



รูปที่ ข.13 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ขามเมือง

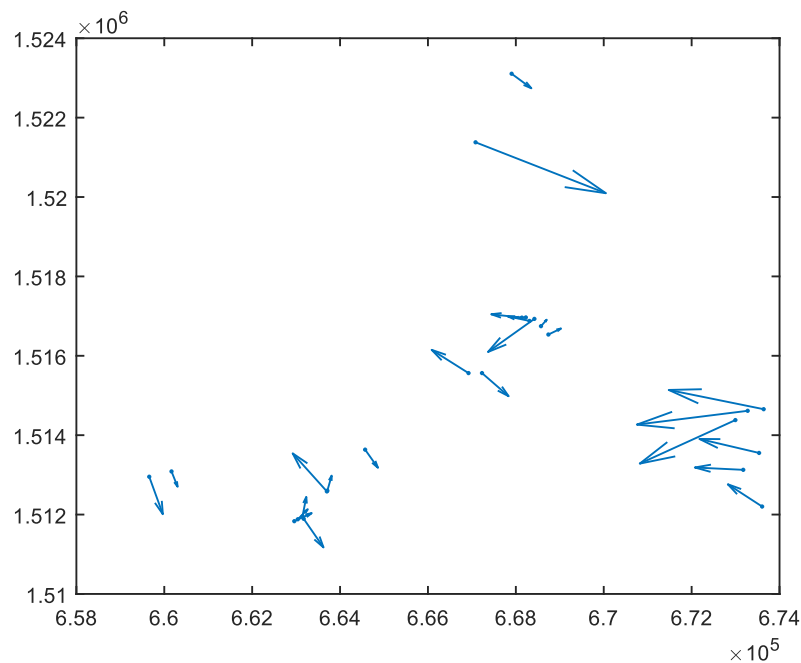


รูปที่ ข.14 ขนาดของค่าต่างของค่าพิคทีวียนพหุแบบ Rapid orbit ของการสำรวจพื้นที่ขามเมือง

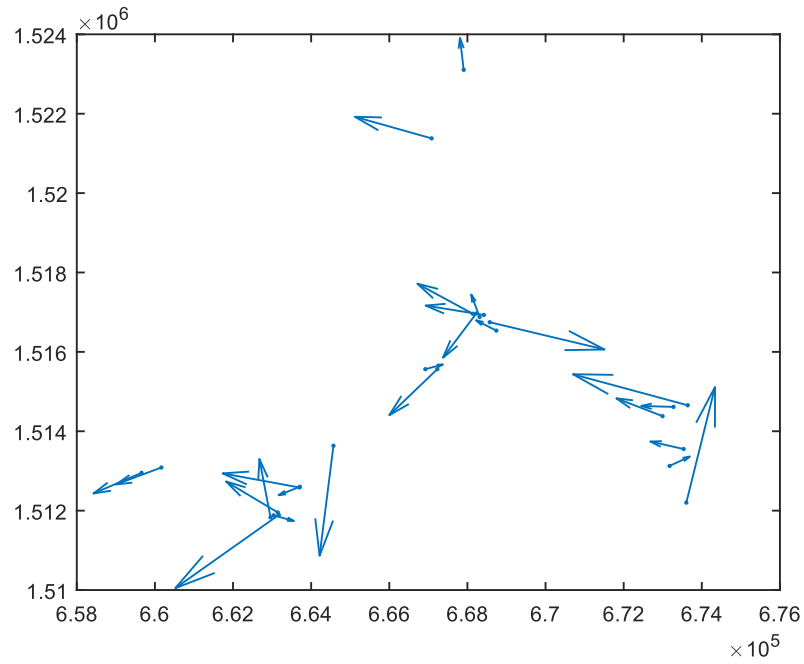
ภาคผนวก ค

เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบ

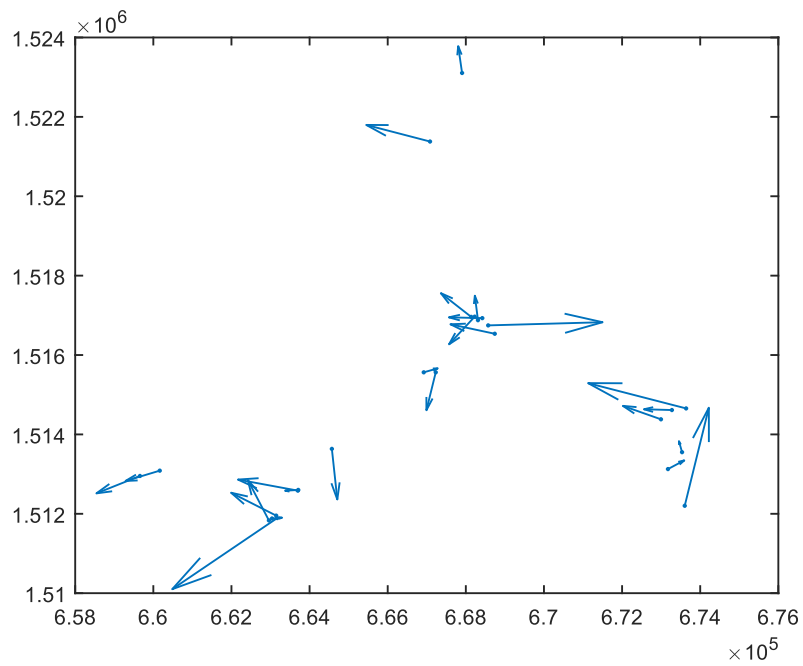
ค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบและค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบที่ได้จากการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงของระบบสแกนเลเซอร์กับวิธียานพาหนะสามารถนำมาพลอตเวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนจากการใช้วิธียานพาหนะแบบต่าง ๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ ค.1 แบบ Real-time, รูปที่ ค.2 แบบ Broadcast orbit, รูปที่ ค.3 แบบ Ultra-rapid orbit, รูปที่ ค.4 แบบ Rapid orbit, และรูปที่ ค.5 แบบ Final orbit ของทั้งการสำรวจพื้นที่ในเมืองและการสำรวจพื้นที่ชานเมืองดังแสดงในรูปที่ ค.6 แบบ Real-time, รูปที่ ค.7 แบบ Broadcast orbit, รูปที่ ค.8 แบบ Ultra-rapid orbit, รูปที่ ค.9 แบบ Rapid orbit, รูปที่ ค.10 แบบ Final orbit ซึ่งขนาดและทิศทางของเวกเตอร์คือขนาดและทิศทางจากค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบไปยังค่าพิกัดจุดตรวจสอบ โดยจะนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความผิดปกติอื่น ๆ ของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์จากการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับวิธียานพาหนะแบบต่าง ๆ



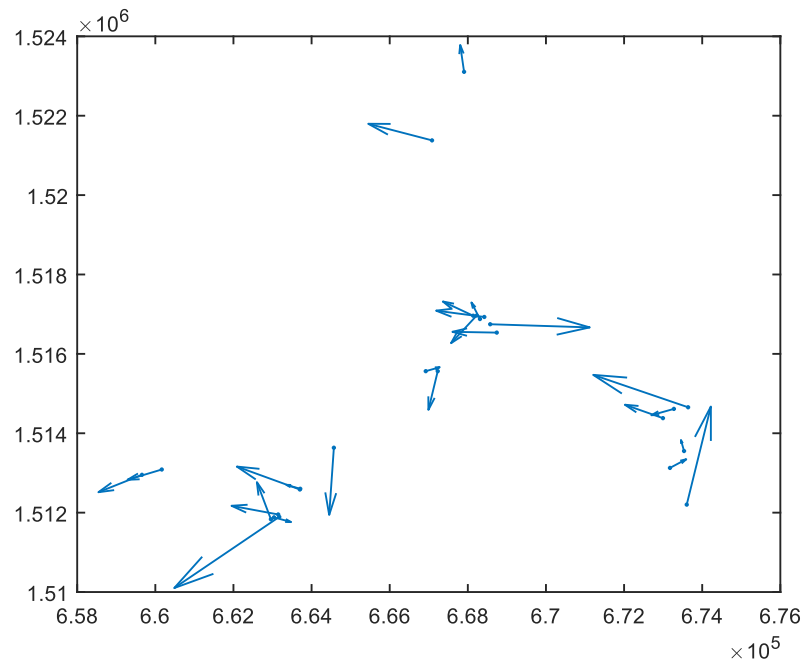
รูปที่ ค.1 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิธียานพาหนะแบบ Real-time ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



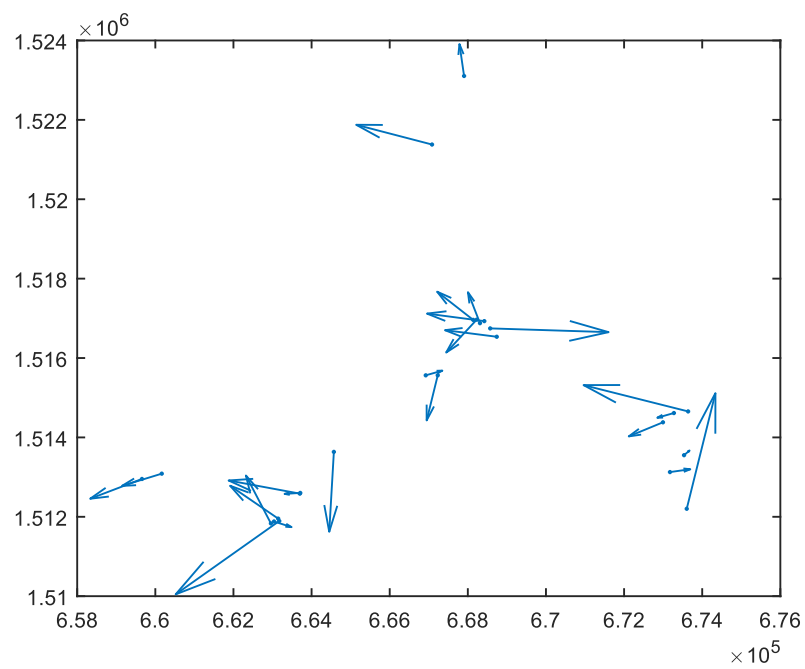
รูปที่ ค.2 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit
ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



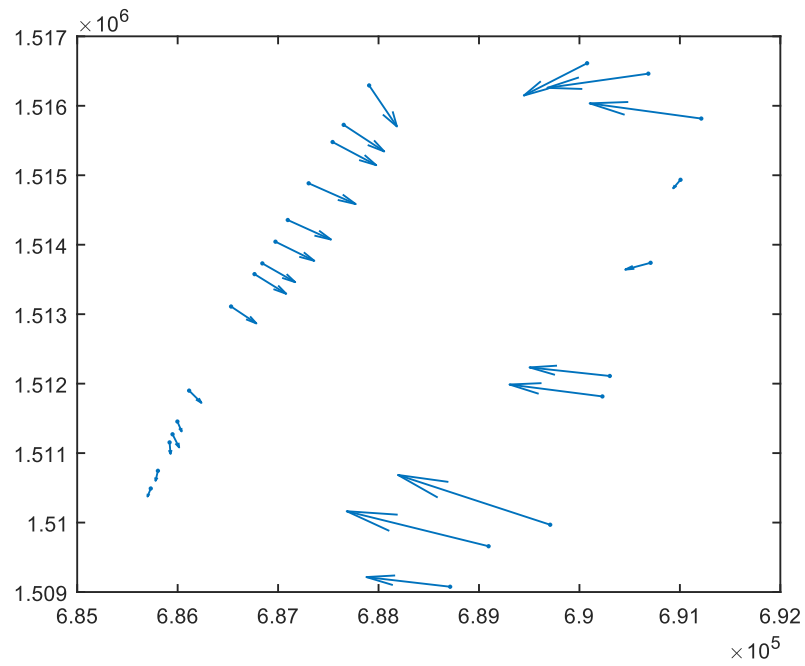
รูปที่ ค.3 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit
ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



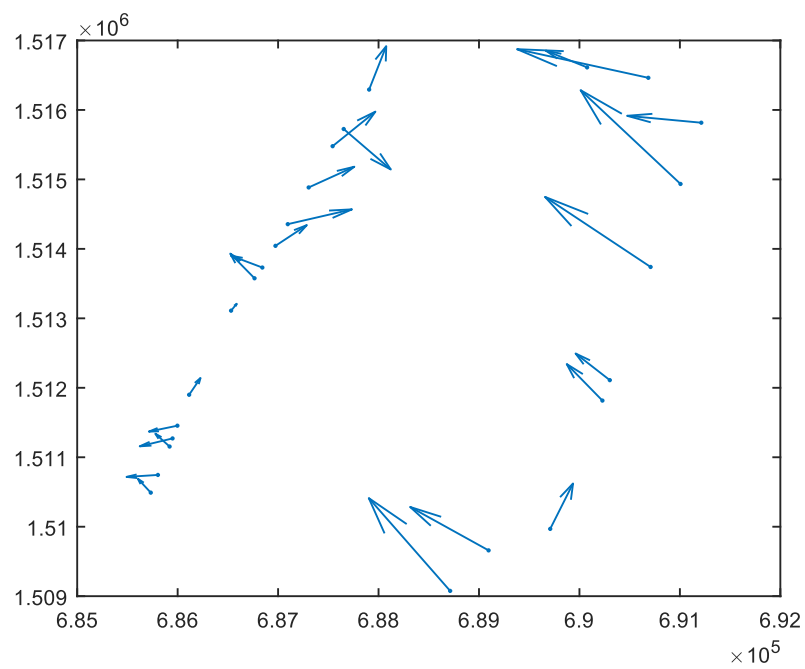
รูปที่ ค.4 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit
ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



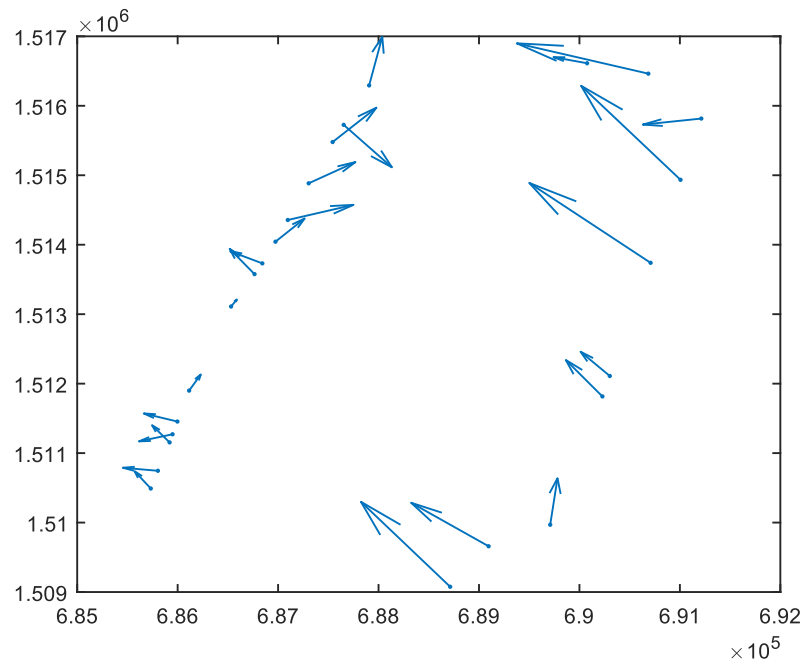
รูปที่ ค.5 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Final orbit
ของการสำรวจพื้นที่ในเมือง



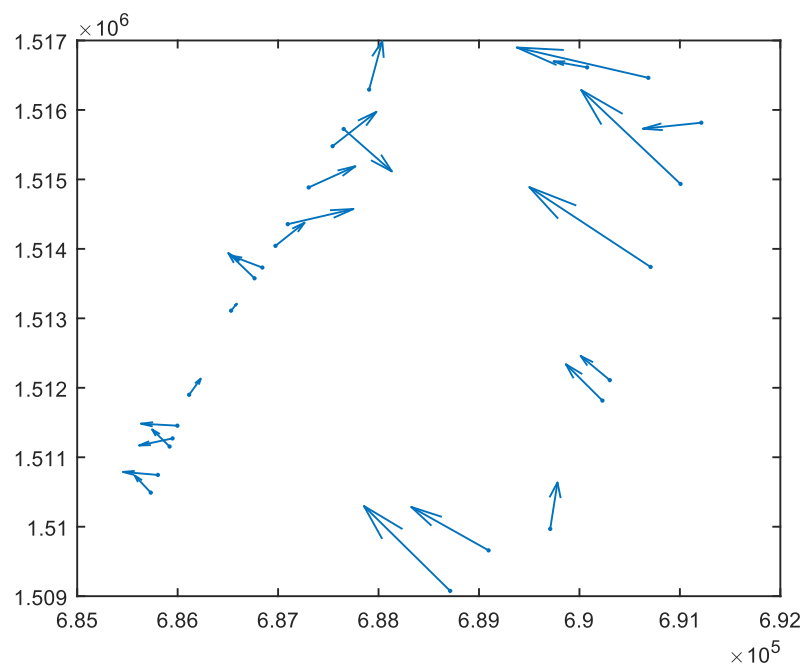
รูปที่ ค.6 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Real-time
ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง



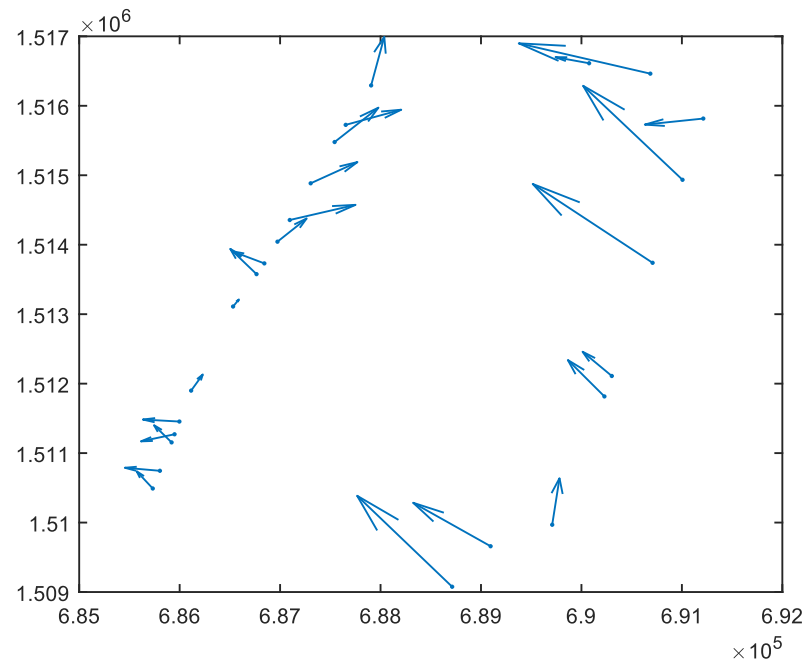
รูปที่ ค.7 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Broadcast orbit
ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง



รูปที่ ค.8 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Ultra-rapid orbit
ของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง



รูปที่ ค.9 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Rapid orbit
ของการสำรวจพื้นที่ชานเมือง



รูปที่ ค.10 เวกเตอร์ค่าคลาดเคลื่อนบนระนาบ E-N ของวิถียานพาหนะแบบ Final orbit
ของการสำรวจพื้นที่ซานเมือง

ภาคผนวก ง

ขนาดค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบเทียบกับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ

ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบและค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบจากการยึดโยงค่าพิกัดทางตรงกับวิธียานพาหนะแบบ Real-time และแบบประมวลผลภายหลังโดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Broadcast orbit, Ultra-rapid orbit, Rapid orbit, และ Final orbit ของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองมีค่าดังตารางที่ ง.1 และ ง.2 ตามลำดับ โดยทั้งการสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองใช้ค่าพิกัดจุดตรวจสอบจำนวน 25 จุดที่อยู่ตามเส้นทางการสำรวจ ซึ่งขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบและค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบ จะนำมาใช้ในการคำนวณค่า RMSE ของค่าพิกัดและระยะคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดทั้งทางราบและทางตั้ง ดังตารางที่ 4.3 โดยนำค่าต่างของค่าพิกัด $\Delta Easting$ และ $\Delta Northing$ นำมาคำนวณระยะคลาดเคลื่อนทางราบจากสูตร $\sqrt{\Delta Easting^2 + \Delta Northing^2}$ เพื่อหาค่าระยะคลาดเคลื่อนทางราบที่มากที่สุดของชุดค่าต่างของค่าพิกัดและคำนวณค่า RMSE ของค่าพิกัดทางราบด้วยสมการที่ 2.28 และค่า $\Delta Height$ คือระยะทางตั้ง ซึ่งสามารถนำมาหาค่าระยะคลาดเคลื่อนทางตั้งที่มากที่สุดของชุดค่าต่างของค่าพิกัดและคำนวณค่า RMSE ของค่าพิกัดทางตั้งด้วยสมการที่ 2.29 เมื่อคำนวณด้วยวิธีการข้างต้นทั้งขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบและค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบของการสำรวจพื้นที่ในเมืองและชานเมืองก็จะได้ค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ ง.1 ขนาดของค่าต่างของค่าฟังก์ชันของดาวฤกษ์ที่ในเมื่อง

จุดตรวจสอบ	Final orbit			Rapid orbit			Ultra-rapid orbit			Broadcast orbit			Real-time		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
1	0.006	0.005	0.138	0.004	0.014	0.139	0.004	0.014	0.140	0.036	0.008	0.154	6.174	1.603	8.103
2	0.031	0.123	0.100	0.031	0.124	0.101	0.031	0.124	0.101	0.031	0.123	0.100	3.547	2.549	4.912
3	0.022	0.003	0.091	0.021	0.011	0.090	0.021	0.011	0.090	0.022	0.010	0.088	5.009	0.268	5.929
4	0.037	0.015	0.195	0.049	0.017	0.212	0.049	0.017	0.211	0.050	0.019	0.212	9.887	4.984	8.329
5	0.018	0.005	0.016	0.029	0.008	0.022	0.036	0.001	0.021	0.035	0.001	0.021	11.458	1.578	8.140
6	0.113	0.028	0.165	0.122	0.041	0.169	0.126	0.032	0.166	0.124	0.033	0.171	9.813	2.203	9.240
7	0.056	0.007	0.037	0.057	0.001	0.035	0.057	0.012	0.036	0.022	0.011	0.035	1.309	0.694	9.659
8	0.128	0.004	0.127	0.128	0.004	0.127	0.147	0.004	0.125	0.124	0.029	0.119	0.597	0.741	9.640
9	0.062	0.008	0.094	0.062	0.008	0.094	0.043	0.001	0.105	0.063	0.010	0.098	4.800	3.788	4.477
10	0.012	0.048	0.122	0.012	0.049	0.122	0.012	0.048	0.123	0.052	0.049	0.122	2.757	2.653	5.086
11	0.013	0.033	0.002	0.011	0.021	0.004	0.004	0.031	0.001	0.009	0.024	0.001	2.258	0.532	6.091
12	0.039	0.030	0.044	0.039	0.018	0.042	0.039	0.030	0.044	0.060	0.032	0.043	3.172	0.389	6.055
13	0.018	0.005	0.027	0.018	0.005	0.026	0.018	0.005	0.026	0.019	0.005	0.023	3.814	2.664	5.165
14	0.005	0.085	0.273	0.006	0.085	0.272	0.007	0.064	0.268	0.015	0.117	0.285	1.327	2.080	7.527
15	0.033	0.035	0.191	0.033	0.035	0.192	0.033	0.035	0.192	0.036	0.047	0.215	1.081	0.011	6.368

ตารางที่ ง.1 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบของพื้นที่ในเมือง (ต่อ)

จุดตรวจสอบ	Final orbit			Rapid orbit			Ultra-rapid orbit			Broadcast orbit			Real-time		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
16	0.017	0.001	0.100	0.018	0.005	0.099	0.017	0.001	0.100	0.023	0.009	0.098	0.448	1.727	4.977
17	0.077	0.014	0.020	0.081	0.029	0.021	0.077	0.014	0.020	0.083	0.015	0.024	3.538	4.357	4.968
18	0.052	0.035	0.077	0.060	0.011	0.079	0.058	0.029	0.079	0.056	0.033	0.073	0.394	2.238	4.179
19	0.112	0.078	0.117	0.135	0.090	0.130	0.135	0.090	0.130	0.112	0.078	0.116	2.049	3.281	4.554
20	0.019	0.006	0.134	0.022	0.006	0.135	0.013	0.001	0.131	0.022	0.006	0.135	1.033	1.147	2.104
21	0.027	0.051	0.168	0.018	0.047	0.168	0.027	0.051	0.168	0.012	0.062	0.162	1.806	0.923	2.549
22	0.056	0.021	0.110	0.056	0.022	0.110	0.056	0.022	0.110	0.052	0.022	0.103	1.408	4.290	3.519
23	0.043	0.013	0.128	0.044	0.013	0.127	0.044	0.013	0.127	0.049	0.018	0.116	0.631	1.757	4.561
24	0.082	0.021	0.102	0.082	0.021	0.102	0.082	0.021	0.102	0.083	0.023	0.101	13.477	5.829	9.886
25	0.005	0.034	0.072	0.005	0.034	0.072	0.005	0.034	0.072	0.004	0.034	0.069	2.045	1.668	10.172

* Δ คือขนาดของค่าต่างของค่าพิกัด, E คือ Easting (เมตร), N คือ Northing (เมตร), และ H คือ Height (เมตร)

ตารางที่ ๓.2 ขนาดของค่าต่างของค่าฟังก์ชันของดาวฤกษ์ที่สามเมือง

จุดตรวจสอบ	Final orbit			Rapid orbit			Ultra-rapid orbit			Broadcast orbit			Real-time		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
1	0.065	0.090	0.107	0.059	0.084	0.108	0.061	0.084	0.108	0.057	0.094	0.073	5.048	0.844	7.714
2	0.053	0.043	0.032	0.053	0.043	0.032	0.053	0.043	0.032	0.055	0.044	0.025	8.549	3.050	6.809
3	0.005	0.046	0.066	0.005	0.046	0.066	0.005	0.046	0.067	0.016	0.046	0.069	9.174	4.338	6.463
4	0.025	0.036	0.004	0.025	0.036	0.004	0.025	0.036	0.004	0.025	0.037	0.006	5.600	1.038	6.100
5	0.020	0.024	0.011	0.020	0.024	0.011	0.020	0.024	0.011	0.024	0.027	0.018	4.838	0.746	6.787
6	0.082	0.078	0.140	0.083	0.079	0.141	0.083	0.079	0.141	0.074	0.071	0.133	1.531	0.592	7.417
7	0.068	0.093	0.160	0.068	0.093	0.160	0.068	0.093	0.160	0.070	0.095	0.165	0.444	0.744	7.755
8	0.040	0.006	0.129	0.040	0.006	0.129	0.040	0.006	0.129	0.052	0.007	0.135	6.728	1.324	6.712
9	0.090	0.030	0.112	0.090	0.030	0.112	0.090	0.030	0.112	0.092	0.029	0.149	6.089	1.239	7.150
10	0.023	0.006	0.074	0.023	0.006	0.074	0.023	0.006	0.074	0.029	0.017	0.164	3.814	2.816	7.542
11	0.009	0.048	0.009	0.009	0.048	0.009	0.009	0.048	0.009	0.012	0.044	0.019	1.675	3.580	6.117
12	0.038	0.015	0.092	0.033	0.042	0.088	0.033	0.042	0.088	0.033	0.041	0.088	2.444	2.319	5.968
13	0.030	0.034	0.117	0.030	0.034	0.117	0.030	0.034	0.117	0.030	0.035	0.117	2.630	2.019	6.037
14	0.032	0.021	0.047	0.032	0.021	0.047	0.032	0.021	0.047	0.032	0.021	0.047	2.837	1.814	4.912
15	0.044	0.015	0.114	0.044	0.015	0.114	0.044	0.015	0.114	0.044	0.015	0.115	2.605	1.704	4.757

ตารางที่ ง.2 ขนาดของค่าต่างของค่าพิกัดพอยท์คลาวด์ ณ จุดตรวจสอบของพื้นที่ขานเมือง (ต่อ)

จุดตรวจสอบ	Final orbit			Rapid orbit			Ultra-rapid orbit			Broadcast orbit			Real-time		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
16	0.020	0.023	0.084	0.020	0.023	0.084	0.020	0.023	0.084	0.022	0.021	0.092	2.345	1.671	5.511
17	0.022	0.012	0.011	0.022	0.012	0.011	0.022	0.012	0.011	0.022	0.012	0.010	1.982	1.637	6.135
18	0.018	0.025	0.202	0.018	0.025	0.202	0.017	0.025	0.202	0.017	0.025	0.202	1.913	1.717	5.862
19	0.004	0.007	0.195	0.004	0.007	0.195	0.004	0.007	0.195	0.004	0.007	0.198	1.528	1.476	5.904
20	0.008	0.016	0.143	0.008	0.016	0.143	0.008	0.016	0.143	0.008	0.017	0.143	0.746	1.068	6.471
21	0.025	0.002	0.069	0.025	0.002	0.069	0.023	0.008	0.068	0.020	0.006	0.086	0.256	0.865	6.346
22	0.023	0.007	0.090	0.023	0.007	0.090	0.023	0.007	0.090	0.023	0.008	0.066	0.400	1.149	6.998
23	0.013	0.017	0.062	0.013	0.017	0.062	0.013	0.017	0.062	0.011	0.013	0.053	0.056	1.005	7.008
24	0.024	0.003	0.052	0.024	0.003	0.052	0.024	0.003	0.052	0.022	0.002	0.058	0.142	0.877	7.462
25	0.011	0.017	0.001	0.011	0.017	0.001	0.011	0.017	0.001	0.009	0.014	0.003	0.196	0.705	7.830

* Δ คือขนาดของค่าต่างของค่าพิกัด, E คือ Easting (เมตร), N คือ Northing (เมตร), และ H คือ Height (เมตร)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ร.ท. ชนะชล ไพจิตรประภาภรณ์
วัน เดือน ปี เกิด	18 ตุลาคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมแผนที่ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ที่อยู่ปัจจุบัน	199/8 ซอยเพชรบุรี 5 ถนนเพชรบุรี แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กทม. 10400
ผลงานตีพิมพ์	Paijitprapaporn, C., Thongtan, T., & Satirapod, C. (2021). Accuracy assessment of integrated GNSS measurements with LIDAR mobile mapping data in urban environments. <i>Measurement: Sensors</i> , 18, 100078. doi: https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100078