

การประเมินระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้จากสถานีอ้างอิงเสมือน สำหรับการรังวัดด้วยโครงข่าย
ดาวเทียมแบบจลน์ในเวลาจริง สำหรับประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ASSESSMENTS OF APPLICABLE OBSERVATION TIME AND ACCURACY FROM VIRTUAL
REFERENCE STATIONS FOR RTK GNSS NETWORK SURVEYING IN THAILAND



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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้จากสถานี อ้างอิงเสมือน สำหรับการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบ จลน์ในเวลาจริง สำหรับประเทศไทย
โดย	ร.ท.นำพล ศักดิ์สินิท
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกมลัญญา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกมลัญญา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

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

นำพล ศักดิ์สินีท : การประเมินระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้จากสถานีอ้างอิงเสมือน สำหรับการรังวัดด้วย
 โครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในเวลาจริง สำหรับประเทศไทย. (ASSESSMENTS OF APPLICABLE OBSERVATION
 TIME AND ACCURACY FROM VIRTUAL REFERENCE STATIONS FOR RTK GNSS NETWORK SURVEYING IN
 THAILAND) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สถิระพจน

โครงข่ายการระบุพิกัดที่แม่นยำด้วยจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในเวลาจริงเริ่มที่จะใช้งานได้ครอบคลุมทั่วประเทศแล้ว
 หลายโครงข่ายโดยจากหน่วยงานต่างๆ ของภาครัฐ กรมที่ดินดำเนินการโครงข่ายที่ประกอบด้วยสถานีฐานรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอ
 สอย่างต่อเนื่องที่กระจายอยู่ทั่วประเทศรวมไปถึงศูนย์ข้อมูลกลาง ระเบียบวิธีการหนึ่งสำหรับประมวลผลใช้การหาค่าพิกัดแบบ
 สัมพันธ์ด้วยสัญญาณจีเอ็นเอสเอสคลื่นพาหะที่มีหลายความถี่และสร้างสถานีอ้างอิงเสมือนในเวลาจริงเพื่อการรังวัดค่าพิกัดที่แม่นยำ
 กรมที่ดินทำหน้าที่สำรวจรังวัดที่ดินในประเทศไทย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องได้ค่าความถูกต้องของค่าพิกัดที่ต่ำกว่า 4 เซนติเมตร สำหรับ
 ผลการรังวัด

การวิจัยนี้เป็นการประเมินผลเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการรังวัดที่เหมาะสมของการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบ
 จลน์ในเวลาจริง และการหาค่าความถูกต้องของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองในทางราบของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอส
 เอส ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 จากจุดทดสอบจำนวน 2,122 จุด ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบเดียวกันคือ ยี่ห้อ CHC รุ่น
 i80 การประเมินความสามารถของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงนี้ ยังพิจารณาจากการหาค่าความถูกต้องของพิกัดทางราบที่วัดจากค่า
 คลาดเคลื่อนรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย โดยสร้างวงรอบสามเหลี่ยมจำนวน 143 วง และแบ่งเป็น 4 ระยะคือ 30 ถึง 50, 50 ถึง
 70, 70 ถึง 90 และ 90 ถึง 110 กิโลเมตร ตามระยะทางเฉลี่ยของสถานีฐานอ้างอิง ส่วนค่าพิกัดอ้างอิงนั้นหาจากการรังวัดแบบสถิต
 เป็นเวลา 90 นาทีและได้ค่าพิกัดค่าแม่นยำสูงที่ได้จากการประมวลผลในภายหลัง การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดในทาง
 ราบที่ได้จากการอ่านผลจากเครื่องรับสัญญาณและการประมวลผลทำที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที 1 นาที 2 นาทีและ 3 นาที
 โดยทำการรับสัญญาณดาวเทียมเป็นระยะเวลา 15 นาที

การวิจัยนี้เป็นเครื่องยืนยันค่าความถูกต้องของค่าพิกัดในทางราบโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากค่าคลาดเคลื่อนรากที่สองของ
 กำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากการรังวัดและการประมวลผล ค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับระยะเวลาการรังวัดซึ่งควรจะมากกว่า 2 นาที และการ
 กำหนดขนาดของวงรอบสามเหลี่ยมที่ควรมีขนาดของด้านสั้นกว่า 90 กิโลเมตร สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องของค่าพิกัดในทาง
 ราบในระดับ 4 เซนติเมตร และความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส CHC รุ่น i80 เท่ากับ 2.27 เท่าของค่าของรากที่
 สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองในทางราบของเครื่องรับ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังกล่าวเพื่อเพิ่มค่าความ
 ถูกต้องในทางราบโดยใช้เวลาการรังวัดที่สั้นลง

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
 ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070455021 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: observation time, ground truth, Root Mean Square Error, Virtual Reference Stations

Namphon Saksanit : ASSESSMENTS OF APPLICABLE OBSERVATION TIME AND ACCURACY FROM VIRTUAL REFERENCE STATIONS FOR RTK GNSS NETWORK SURVEYING IN THAILAND. Advisor: Dr. Teetat Charoenkalunyuta Co-advisor: Prof. Dr. CHALERMCHON SATIRAPOD

GNSS Real-Time Kinematic (RTK) precise positioning networks in Thailand start to fully operate across Thailand by several government agencies. The Department of Lands (DOL) maintains a nationwide-spread network of GNSS Continuously Operating Reference Stations (CORS) and a data centre. One of processing methodologies applies relative positioning using GNSS multiple carrier frequencies and generates real-time Virtual Reference Station (VRS) observables to obtain precise positioning. DOL is in charge of cadastral surveying in Thailand; hence, a horizontal positioning accuracy of better than 4 centimetre is required.

This research is to analyses the applicable observation time and the Root Mean Square Error (RMSE) real value in horizontal position of CHC i80 receiver based on 2,122 tested points using identical rovers; CHC i80. More fully capabilities of these existing CORSs are further investigated on their horizontal positioning accuracy using RMSE by constructing 143 triangular loops and categorising into four groups based on their spacing of 30 to 50, 50 to 70, 70 to 90 and 90 to 110 kilometers. Their ground truth solutions are determined from a 90-minute static surveying and post-processing computations. The measured and computed horizontal positioning accuracy are compared based on four observed times from 30 seconds, 1 minute, 2 minutes, and 3 minutes whereby the approximated operating time is 15 minutes.

This research provides means to ensure the measured and computed horizontal positioning accuracy especially on the RMSE. It directly varies due to its observed time; should be more than 2 minutes, and assigned loop sizes; should be less than 90 kilometres in order to obtain the positioning accuracy of better than 4 centimetres horizontally. Also, the RMSE in horizontal position of CHC i80 receiver is 2.27 scale factor of RMSE real value. However, the further investigations have to be made for better horizontal accuracy in a shorter observation time.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือ แนะนำ และสนับสนุนจากหลายท่านด้วยกัน โดยเฉพาะ อ.ดร.ธีทัต เจริญกัลญฤตา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รวมถึง อ.ดร.ชัยโชค ไวกาษา ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ซึ่งทุกท่านได้กรุณาให้แนวความคิด ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณทุกท่านท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณกรมที่ดิน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจากโครงการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชิงพื้นที่ เพื่อประกอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ซึ่งผู้เขียนไม่ได้เอ่ยนาม ที่คอยอบรมให้ความรู้ในด้านวิชาการ และการปฏิบัติภาคสนาม รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่อยู่ในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจที่คอยอำนวยความสะดวกในด้านต่าง และพี่ๆเพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่อยู่ในภาค ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณครอบครัว บิดา มารดา อีกทั้งภรรยา นางสาวกันตยา ประจันตะเสน ที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้เขียนเป็นอย่างดี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ไม่มากนักน้อยและหากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้เขียนขอน้อมรับและขออภัยเป็นอย่างสูง

นำพล ศักดิ์สินิท

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	5
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา	5
1.3.2 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา.....	6
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	6
1.3.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษา	7
1.3.5 เครื่องมือรังวัดดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัย	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1.1 ระบบดาวเทียมนำหน GNSS (Global Navigation Satellite System)	9
2.1.2 การรังวัดดาวเทียมด้วยสมการค่าสังเกตของการรังวัด (Observation Equations)	10

2.1.3 องค์ประกอบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network).....	15
2.1.4 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning).....	16
2.1.5 การหาค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE).....	25
2.1.6 การสำรวจรังวัดแปลงที่ดินของกรมที่ดิน ตามระเบียบกรมที่ดิน ว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558	26
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.1 การศึกษารวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3.2 จัดเตรียมและตรวจสอบข้อมูลการรังวัด GNSS จากงานภาคสนาม.....	35
3.2.1 การรังวัดด้วยวิธีการ Static.....	35
3.2.2 การรังวัดด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS.....	35
3.2.3 ข้อมูลค่าความถูกต้อง (RMSE) ที่ได้จากเครื่องรับด้วยเทคนิค VRS.....	36
3.3 การประมวลผลการรังวัด GNSS	36
3.3.1 การประมวลผลภายหลังจากการรังวัดด้วยวิธีการ Static.....	36
3.3.2 การประมวลผล RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS.....	38
3.3.3 การประมวลผลและคำนวณค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ...	38
3.4 ทำการจำแนกข้อมูลโดยใช้ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS.....	40
3.5 การวิเคราะห์ค่าความถูกต้องทางราบโดยการเปรียบเทียบตามระยะเวลาในการรังวัด	41
3.6 การเปรียบเทียบแนวโน้มของ RMSE ในทางราบกับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80.....	42
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	43

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบโดยเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ทำการ รังวัดตั้งแต่ระยะเวลา 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที โดยมีจำนวนชุดข้อมูล 30 ชุดข้อมูล.....	43
4.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของระยะเวลาการรับสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีการรังวัดด้วย วิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS.....	45
4.3 ผลการเปรียบเทียบค่า Horizontal RMSE กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80.....	50
4.4 ผลการวิเคราะห์ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80	53
บทที่ 5 บทสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 บทสรุปการวิจัย	56
5.2 ข้อจำกัดและปัญหาที่พบ	57
5.3 ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก. : รายละเอียดของคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย.....	64
<u>เครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80</u>	65
<u>เครื่องรับ GNSS ที่ใช้สำหรับเป็นสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่อง และสถานีจร</u>	70
ภาคผนวก ข. : รายละเอียดของคุณลักษณะเฉพาะของซอฟต์แวร์ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	71
<u>CHC Precision Service</u>	72
<u>LandStar 7.....</u>	77
ภาคผนวก ค. : ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบ สำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่าย ดาวเทียมแบบจลนในทันที ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที 1 นาที 2 นาที 3 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ	80

ภาคผนวก ง. : ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจาก
 เครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที 1 นาที 2 นาที 3 นาที
 และ 15 นาที ตามลำดับ85

ภาคผนวก ฉ. : ตารางแสดงการเปรียบเทียบแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างRMSEทางราบ และ
 RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาที.....90

ประวัติผู้เขียน92



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงถึงหน่วยงานที่รับผิดชอบในการดำเนินการจัดตั้งสถานี GNSS CORS การใช้ประโยชน์ และจำนวนแผนการติดตั้งสถานี GNSS CORS ภายในประเทศไทย (รัฐบาลไทย, 2560)....2	
ตารางที่ 2 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งจากการรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (กรมที่ดิน, 2558).....27	
ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย.....70	
ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล).....81	
ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 1 นาที (15 ชุดข้อมูล)82	
ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 2 นาที (7 ชุดข้อมูล)83	
ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 3 นาที (5 ชุดข้อมูล)83	
ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 15 นาที (1 ชุดข้อมูล)84	
ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล).....86	
ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 1 นาที (15 ชุดข้อมูล).....87	

ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 2 นาที (7 ชุดข้อมูล).....88

ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 3 นาที (5 ชุดข้อมูล).....88

ตารางที่ 13 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 15 นาที (1 ชุดข้อมูล)89

ตารางที่ 14 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างRMSEทางราบ และ RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาที91



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชิงพื้นที่ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS) 3	
รูปที่ 2 แสดงพื้นที่ให้บริการของโครงข่ายสามเหลี่ยมจำนวน 143 รูป.....	5
รูปที่ 3 แสดงถึงองค์ประกอบของเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80.....	8
รูปที่ 4 แสดงวงโคจรของดาวเทียมในระบบระบบดาวเทียมนำหน GNSS	10
รูปที่ 5 การเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ GNSS (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549).....	12
รูปที่ 6 แสดงเทคนิคค่าต่างในลักษณะต่างๆ (Rizos, 1997).....	15
รูปที่ 7 แสดงการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์.....	17
รูปที่ 8 แสดงวิธีการรังวัดแบบสถิต.....	18
รูปที่ 9 ระบบการทำงานการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ด้วยเทคนิคVRS.....	20
รูปที่ 10 แสดงแนวคิดการทำงานระบบ VRS	23
รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	34
รูปที่ 12 ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center 4.1 ที่ใช้ในการประมวลผลภายหลัง Static.....	37
รูปที่ 13 แสดงการประมวลผลภายหลัง Static โดยอ้างอิงค่าพิกัดจากสถานี GNSS CORS จำนวน 2 สถานีที่มีระยะใกล้กับจุดทดสอบมากที่สุด.....	37
รูปที่ 14 ซอฟต์แวร์ CHC Precision Service ที่ใช้ในการประมวลผลแบบ Real-Time สำหรับ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS.....	38
รูปที่ 15 แสดงถึงอุปกรณ์ของเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80.....	39
รูปที่ 16 ซอฟต์แวร์ Matlab 2019 ที่ใช้ในการคำนวณค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80.....	39
รูปที่ 17 แสดงตัวอย่างของการจำแนกระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS (รูป).....	40

รูปที่ 18 แสดงวิธีการและระยะเวลาในการเปรียบเทียบของการรังวัดแบบสถิต (Static) เป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมงและ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ที่ระยะเวลา 30 วินาที ถึง 900 วินาที (จำนวน 30 ช่วง)41

รูปที่ 19 แผนผังแสดงวิธีการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางราบที่คำนวณได้จากข้อ 3.5 กับค่าความถูกต้องที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 เปรียบเทียบโดยระยะเวลา 15 นาที (จำนวน 30 ช่วง).....42

รูปที่ 20 แสดงกราฟการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบโดยเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ทำการรังวัดตั้งแต่ระยะเวลา 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที (30 ชุดข้อมูล) โดยแบ่งตามระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS44

รูปที่ 21 แสดงกราฟแสดงกราฟค่าเฉลี่ย RMSE ของตำแหน่งทางราบของขนาดลูป 30-50 และ 50-70 กิโลเมตร สำหรับการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วย RTK GNSS Network ของเทคนิค VRS ของระยะเวลาการรับสัญญาณ 0.5,1,2 และ 3นาที ตามลำดับ46

รูปที่ 22 แสดงกราฟแสดงกราฟค่าเฉลี่ย RMSE ของตำแหน่งทางราบของขนาดลูป 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร สำหรับการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วย RTK GNSS Network ของเทคนิค VRS ของระยะเวลาการรับสัญญาณ 0.5,1,2 และ 3นาที ตามลำดับ.....47

รูปที่ 23 แสดงการรับสัญญาณ ณ จุด C0164 เป็นจุดทดสอบในระยะลูป 30-50 กิโลเมตร49

รูปที่ 24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Horizontal RMSE กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยแบ่งเป็นระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล) ที่ระยะขนาดลูป 30-50 และ 50-70 กิโลเมตร50

รูปที่ 25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Horizontal RMSE กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยแบ่งเป็นระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล) ที่ระยะขนาดลูป 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร51

รูปที่ 26 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างRMSEทางราบ และ RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาที ที่ทุกระยะขนาดลูป52

รูปที่ 27 กราฟแสดงแนวโน้มของค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที53

รูปที่ 28 กราฟแสดงการประเมินความเหมาะสมของ RMSE ของเครื่องรับ GNSS ที่ระยะเวลาทำการ รังวัดที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที 1 นาที 2 นาทีและ 3 นาทีตามลำดับ ที่ลูประยะ 30-50 กม. และ 50-70 กม.	54
รูปที่ 29 กราฟแสดงการประเมินความเหมาะสมของ RMSE ของเครื่องรับ GNSS ที่ระยะเวลาทำการ รังวัดที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที 1 นาที 2 นาทีและ 3 นาทีตามลำดับ ที่ลูประยะ 70-90 กม. และ 90-110 กม.	55



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการระบุตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียมนำทางแบบสากล (กรมที่ดิน) เป็นที่นิยมในระดับนานาชาติ เนื่องจากสามารถเข้าถึงและใช้งานได้อย่างอิสระ อันเนื่องมาจากในต่างประเทศได้มีการพัฒนาและแข่งขันกันอย่างสูงในด้าน นวัตกรรม เทคโนโลยี และการวิจัย ซึ่งทั้งนี้ได้มีการติดตั้งและทดสอบสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Station - CORS) โดยในหลายๆประเทศได้ให้ความสำคัญและมีการติดตั้ง CORS เป็นระยะเวลานานแล้ว อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ตุรกี จีน และญี่ปุ่น เป็นต้น โดยการติดตั้งสถานี CORS นั้นควรถูกมองว่าเป็นโครงสร้างพื้นฐานสาธารณะที่มีความสำคัญ โดยมีลักษณะคล้ายกับถนน หรือสะพาน เป็นต้น (Rizos, 2007) สำหรับในประเทศไทย ทางรัฐบาลได้จัดให้มีการประชุมคณะกรรมการภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ซึ่งมีมติเห็นชอบแนวคิดโครงสร้างพื้นฐานระบบดาวเทียมนำทาง เพื่อเป็นการเริ่มพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานการระบุพิกัดของประเทศ (National Positioning Infrastructure) ด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากล โดยอาศัยหลักการรับสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากลด้วยโครงข่ายของสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่อง ที่ภาคพื้นดินที่เรียกว่า โครงข่าย GNSS CORS ซึ่งแต่ละโครงข่ายเป็นการดำเนินงานโดยหน่วยงานภาครัฐ ในด้านการวิจัยและพัฒนา รวมถึงภาคการศึกษาในประเทศไทยอีกหลายหน่วยงานจึงจำเป็นต้องมีการจัดตั้งศูนย์รวบรวมข้อมูลและประมวลผลหลักของประเทศ ในการรวบรวมข้อมูลและประมวลผลจากโครงข่ายสถานีอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่อง (National GNSS CORS data and analysis centre) (รัฐบาลไทย, 2560) โดยกรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบและบริหารจัดการศูนย์รวบรวมข้อมูลและประมวลผลดังกล่าว (ปีพ.ศ. 2562) เพื่อให้เป็นโครงสร้างพื้นฐานด้านภูมิสารสนเทศ ด้านการระบุตำแหน่ง การนำทาง และการระบุเวลา เพื่อช่วยในการส่งเสริมภาคเศรษฐกิจของประเทศ สำหรับภาครัฐและเอกชน ตามนโยบาย Thailand 4.0 ของรัฐบาล โดยการจัดตั้งศูนย์รวบรวมข้อมูลและประมวลผลนั้นเพื่อสนับสนุนการดำเนินการติดตั้งและใช้งานโครงข่าย GNSS CORS เพื่อให้บรรลุภารกิจของหน่วยงานต่างๆอันประกอบด้วย 5 หน่วยงานหลักภายในประเทศ ได้แก่ (1) กรมที่ดิน (2) กรมแผนที่ทหาร (3) กรมโยธาธิการและผังเมือง (4) สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) และ (5) สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี

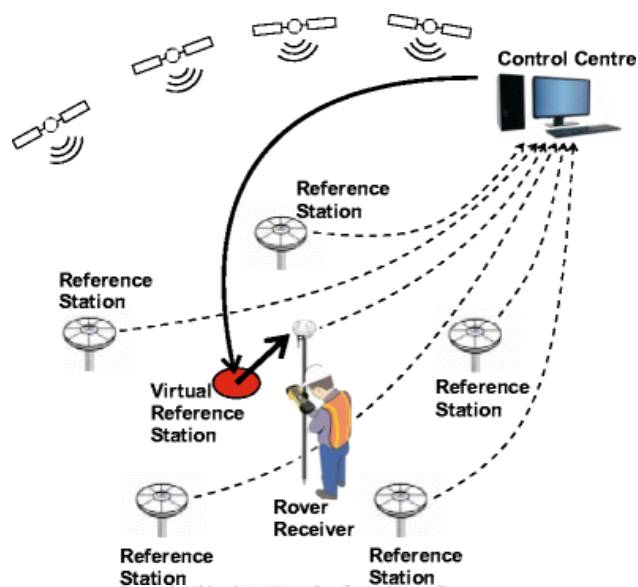
อวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยต่างๆ ดำเนินงานด้านการวิจัย และพัฒนานวัตกรรม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงถึงหน่วยงานที่รับผิดชอบในการดำเนินการจัดตั้งสถานี GNSS CORS การใช้ประโยชน์ และจำนวนแผนการติดตั้งสถานี GNSS CORS ภายในประเทศไทย (รัฐบาลไทย, 2560)

หน่วยงานที่รับผิดชอบ	ภารกิจ	จำนวนสถานีตามแผนการติดตั้ง	
		GNSS CORS	ศูนย์ควบคุม
กรมที่ดิน	การรังวัดและจัดทำรูปแบบแปลงที่ดิน	134	1
กรมแผนที่ทหาร	การสำรวจ การทำแผนที่ภูมิประเทศ และการป้องกันประเทศ	80	1
กรมโยธาธิการและผังเมือง	การผังเมือง และการจัดการเมือง	15	1
สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน)	บริหารจัดการน้ำ และภัยพิบัติ	6	1
สทอภ. และมหาวิทยาลัยต่าง ๆ	ด้านการวิจัย และพัฒนานวัตกรรม	10	1

ทั้งนี้กรมที่ดินได้ทำการติดตั้งสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Station - CORS) ในปีพ.ศ.2560 จำนวน 99 สถานี โดยเป็นสถานีฐานถาวร 92 สถานี และสถานีฐานถาวรแบบติดตั้งชั่วคราว อีกจำนวน 7 สถานี และยังได้มีการเชื่อมโยงข้อมูลจากสถานีฐานอ้างอิงฯ ของกรมโยธาธิการและผังเมือง อีกจำนวน 15 สถานี จึงทำให้กรมที่ดินได้ใช้สถานีฐานอ้างอิงฯ รวมทั้งสิ้น 114 สถานี สำหรับการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เชิงพื้นที่ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station - VRS) (กรมที่ดิน, 2562) เพื่อสนับสนุนภารกิจด้านการรังวัดและทำแผนที่ ทั้งนี้ระบบการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน ประกอบด้วย (1) สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร (CORS) ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งที่มั่นคงถาวร (2) ศูนย์ควบคุมส่วนกลาง (Control Centre) ซึ่งทำหน้าที่ในรับข้อมูลของ

สถานีฐานอ้างอิงๆ และประมวลผลค่าแก้ และ (3) ผู้ใช้งาน (User) ที่จะรับข้อมูลค่าแก้จากศูนย์ควบคุมส่วนกลาง แบบ Real time (กรมที่ดิน, 2561)



รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชิงพื้นที่ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS) (<https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-018-3581-8>)

ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้งานวิธีของสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station; VRS) โดยใช้โดยใช้ RTK GNSS Network สามารถทำการรังวัดหาตำแหน่งโดยใช้สถานีรับสัญญาณ (Rover) ภายในโครงข่ายของสถานีฐาน ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าการรังวัดแบบจลน์ในเวลาจริง (RTK) ที่ใช้การอ้างอิงจากสถานีอ้างอิงเดี่ยว (Single Base) ทำให้ระบบ RTK GNSS Network ด้วยวิธี VRS มีประสิทธิภาพมากกว่า มีขอบเขตพื้นที่การทำงานและความถูกต้องแม่นยำในการระบุตำแหน่งมากขึ้น เนื่องจากใช้การอ้างอิงและรับค่าปรับแก้จากสถานีฐานจำนวนมาก (Kim Sun & Gibbings, 2005) และในการทำการรังวัดด้วย RTK GNSS Network นั้นในเรื่องของระยะห่างของสถานีฐานนั้นเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งนั้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณจาก RTK GNSS Network นั้นจะลดลงเมื่อระยะห่างของสถานีอ้างอิงเพิ่มขึ้น (ธีทัต เจริญกาวัลญุตตา, 2555)

เนื่องด้วยในอนาคตประเทศไทยจะมีการพัฒนา RTK GNSS Network นั้นสำหรับหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชนสำหรับการติดตั้งและจัดทำโครงข่ายของ GNSS CORS ให้ครอบคลุมและเพื่อลด ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน ต้องใช้งบประมาณจำนวนมากเพื่อใช้ในการติดตั้ง จึงเป็นที่มาของการ วิจัยนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้จากการใช้งานระบบ โครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในเวลาจริง โดยใช้เทคนิคสถานีอ้างอิงเสมือน ซึ่งพิจารณาจากค่าความ ถูกต้องของค่าพิกัดในทางราบ โดยหาระยะเวลาที่เหมาะสมเพียงพอ เพื่อลดทรัพยากรด้านเวลาและ แรงงานเพื่อชดเชยงบประมาณในการติดตั้งและจัดทำสถานี GNSS CORS เหล่านี้ และประกอบด้วย การศึกษาค่าความถูกต้องที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ใช้งานกันในภาครัฐและ เอกชนในประเทศไทย เพื่อใช้เป็นปัจจัยในการประเมินคุณภาพของข้อมูลจากการรับสัญญาณ ดาวเทียมในทันที เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณฯ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาสำหรับการรับวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ด้วยเทคนิคสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ที่ให้ค่าความถูกต้องเชิงพื้นที่ ที่เหมาะสมกับเกณฑ์ งานรับวัดดาวเทียมในรูปแบบต่างๆ

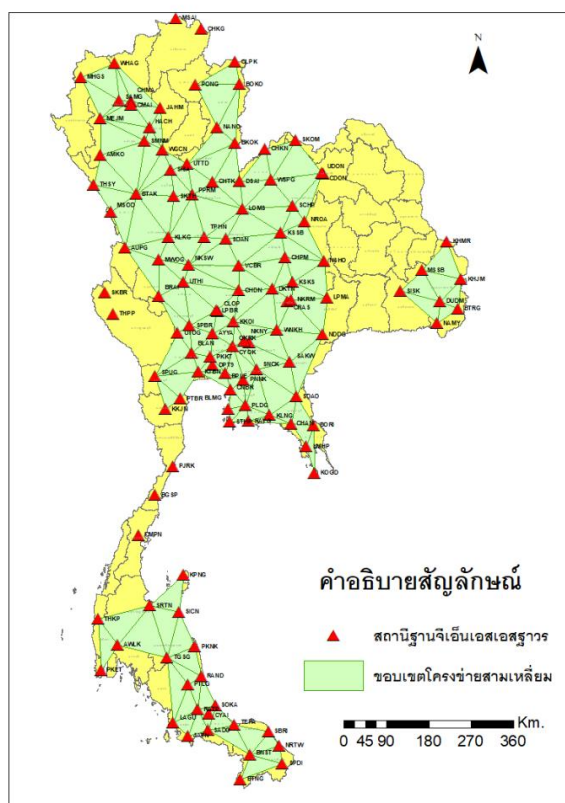
1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE) ทางราบกับค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ว่ามีผลกระทบกับระยะห่างระหว่างสถานีฐานและ ระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมหรือไม่

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาวิจัยจากพื้นที่ให้บริการของโครงข่ายสามเหลี่ยม โดยโครงข่ายสามเหลี่ยมนี้มีพื้นที่ครอบคลุม 63 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร นนทบุรี สมุทรสงคราม สมุทรปราการ อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี ลพบุรี สิงห์บุรี สระบุรี ชัยนาท จันทบุรี ระยอง ชลบุรี ฉะเชิงเทรา ตราด นครนายก ปราจีนบุรี สระแก้ว นครราชสีมา บุรีรัมย์ ศรีสะเกษ ชัยภูมิ อุบลราชธานี หนองบัวลำภู ขอนแก่น อุดรธานี หนองคาย เลย เชียงใหม่ ลำปาง ลำพูน อุดรดิตถ์ น่าน แพร่ พะเยา นครสวรรค์ แม่ฮ่องสอน อุทัยธานี ตาก กำแพงเพชร เพชรบูรณ์ สุโขทัย พิษณุโลก พิษณุโลก ราชบุรี กาญจนบุรี นครปฐม สุพรรณบุรี สมุทรสาคร เพชรบุรี นครศรีธรรมราช กระบี่ พังงา ภูเก็ต ตรัง สงขลา พัทลุง สตูล ปัตตานี ยะลา และนราธิวาส ซึ่งประกอบไปด้วยโครงข่ายสามเหลี่ยมทั้งหมด จำนวน 143 ลูป (loops) (ลูป หมายถึง ขอบเขตของโครงข่ายสามเหลี่ยมที่เกิดจากจากตำแหน่งสถานีฐานถาวร) ดังแสดงในรูปที่ 2 (กรมที่ดิน, 2562)



รูปที่ 2 แสดงพื้นที่ให้บริการของโครงข่ายสามเหลี่ยมจำนวน 143 ลูป

1.3.2 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

1.3.2.1 ศึกษาการรังวัดดาวเทียมด้วยวิธี Static เพื่อกำหนดค่าพิกัดอ้างอิง ทำการบันทึกข้อมูลการรังวัดทุกๆ 30 วินาทีและระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยใช้ จุดทดสอบจำนวน 2,122 จุด

1.3.2.2 ศึกษาการรังวัดดาวเทียมด้วยวิธี RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS เพื่อกำหนดค่าพิกัดของจุดทดสอบ ทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 วินาทีและระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียม 60 วินาที ประกอบด้วย ชุดข้อมูลจำนวน 60 ชุด ทำการรังวัดซ้ำเป็นจำนวน 15 ครั้งโดยการรับสัญญาณครั้งที่ 8 กับครั้งที่ 9 มีระยะเวลาห่างกันไม่ต่ำกว่า 30 นาทีเป็นโดยใช้ระยะเวลารวมในการรังวัดทั้งหมด 15 นาที และใช้จุดทดสอบทั้งหมด 2,122 จุด

1.3.2.3 ดำเนินการศึกษาข้อมูลตามข้อ 1.3.2.2 โดยวิเคราะห์ระยะเวลา (Measurement interval) ตั้งแต่ 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที (หรือ 900 วินาที) โดยเพิ่มระยะเวลาของการรังวัดครั้งละ 30 วินาที กล่าวคือ ประกอบด้วยจำนวนครั้งของการวัดทั้งหมด คือ 30 ครั้ง จำนวนชุดข้อมูลเทียบเท่ากับระยะเวลาของการวัดในแต่ละครั้ง กล่าวคือ ข้อมูล 1 ชุด (Measurement epoch) คือ ระยะเวลาการวัดที่ 1 วินาที เหนือในการวิเคราะห์ที่แบ่งขึ้นด้วยระยะห่างเฉลี่ยระหว่าง GNSS CORS โดยแบ่งออกเป็น 4 ระยะ ดังนี้ ระยะห่างเฉลี่ยที่ (1) 30 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร (2) 50 กิโลเมตร ถึง 70 กิโลเมตร (3) 70 กิโลเมตร ถึง 90 กิโลเมตรและ (4) 90 กิโลเมตร ถึง 110 กิโลเมตร

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นข้อมูลจากโครงการ วิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ด้วยเทคนิค VRS ซึ่งเป็นความร่วมมือทางวิชาการ ระหว่างกรมที่ดินและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วย

1.3.3.1 ข้อมูลรังวัดดาวเทียมด้วยเทคนิค Static และ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS จากการเก็บข้อมูลของหน่วยงานภาคสนามของกรมที่ดิน ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ CHC รุ่น i80

1.3.3.2 ข้อมูลหลังจากประมวลผล (Post Processing) ดาวเทียมด้วยเทคนิค Static โดยหน่วยงานวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC 4.1) เป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ และใช้ค่าแก้วงโคจรดาวเทียมแบบรายละเอียดสูง (Precise Orbit) จาก Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS)

1.3.3.3 ข้อมูลค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

1.3.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษา

1.3.4.1 การเปรียบเทียบผลพิจารณาความถูกต้องของค่าพิกัดในทางราบจากวิธีการ Static และวิธีการ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS โดยแบ่งเกณฑ์ตามระยะห่างเฉลี่ยสามด้านระหว่างสถานีฐานและระยะเวลาในการรังวัดโดยให้วิธีการ Static เป็นจุดอ้างอิงค่าพิกัด โดยวิธีการ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS เป็นจุดทดสอบ และทำการวิเคราะห์ระยะเวลาจากการรังวัดด้วยวิธีการ VRS แบ่งเป็น 3 ชุดข้อมูล คือ ระยะเวลา 30 วินาที ไปจนถึง 900 วินาที (หรือ 15 นาที) และทำการหาค่าความแปรปรวนของการรังวัดด้วยวิธีการ VRS ที่ระยะเวลา 30 วินาที 1 นาที 2 นาที และ 3 นาที

1.3.4.2 การเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองในทางราบกับมูลค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยทำการแบ่งเกณฑ์ในการวิเคราะห์ตามข้อ 1.3.4.1 โดยค่า RMSE ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการจะนำมาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

1.3.5 เครื่องมือรังวัดดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ใช้ในการรังวัดด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ซึ่งใช้เป็นสถานีผู้ใช้งาน (Rover) เป็นเครื่องรับ GNSS ที่ผลิตในประเทศจีน โดยบริษัท Shanghai Huace Navigation Technology Ltd. ที่มีความสามารถรับสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบหลายความถี่ (Multi Frequencies) ซึ่งเป็นเครื่องรับระบบ GNSS สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ทุกระบบ ได้แก่ GPS GLONASS Galileo BDS และ QZSS สามารถใช้งานการรังวัดในรูปแบบ RTK Network RTK PPK High-Precision Static และ SBAS ได้ ซึ่งสามารถทำงานในโหมด Static ที่ความละเอียดถูกต้องทางราบอยู่ที่ระดับ 2.5 mm + 0.1 ppm RMS และโหมด Network RTK

ความละเอียดถูกต้องทางราบอยู่ที่ระดับ $8 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm RMS}$ โดยใช้การติดต่อสื่อสารโดยระบบ WIFI และ Bluetooth โดยการใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ LandStar 7 ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องควบคุม (Controller) รุ่น CHC HCE300 ที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบ Android 4.4 (CHCNAV, 2018) โดยองค์ประกอบของเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 แสดงในรูปที่ (3)



รูปที่ 3 แสดงถึงองค์ประกอบของเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้งานการรังวัดดาวเทียมด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ด้วยวิธีการรังวัดแบบสถานีอ้างอิงเสมือน เพื่อช่วยในการลดทรัพยากรด้านเวลาในการทำการรังวัด

1.4.2 เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานของระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมสำหรับการรังวัดดาวเทียมด้วย ด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ด้วยวิธีการรังวัดแบบสถานีอ้างอิงเสมือน สำหรับประเทศไทย

1.4.3 เป็นแนวทางในการรังวัดดาวเทียม ด้วยหลักการของสถานีอ้างอิงเสมือน สำหรับการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในเวลาจริง ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม CHC i80 โดยพิจารณาค่า RMSE ที่ได้จากการรังวัด

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระบบดาวเทียมนำหน GNSS (Global Navigation Satellite System)

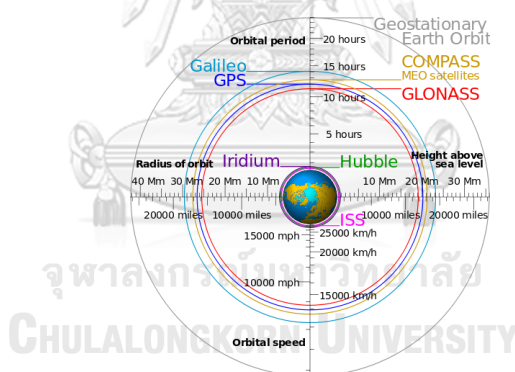
Global Navigation Satellite Systems (GNSS) เป็นชื่อที่ใช้เรียกระบบดาวเทียมที่มีมากกว่าหนึ่งกลุ่ม ซึ่งหน่วยงานด้านอวกาศได้นิยามความหมายของระบบนำร่องดาวเทียมว่า GNSS เพื่อให้ครอบคลุมระบบดาวเทียมที่มีลักษณะการใช้งานคล้ายคลึงกับระบบดาวเทียม GPS เช่น ระบบดาวเทียม GLONASS ของประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย, ระบบดาวเทียม Galileo ของสหภาพยุโรป ระบบดาวเทียม Compass ของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน, ระบบดาวเทียม QZSS ของประเทศญี่ปุ่นและระบบดาวเทียม IRNSS ของประเทศอินเดีย เป็นต้น ซึ่งเป็นระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกเพื่อสนับสนุนการให้บริการทางตำแหน่งสามมิติตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งทำหน้าที่ให้ข้อมูลพิกัดบนผิวโลกโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อคำนวณและแสดงพิกัดตำแหน่ง ณ จุดที่รับสัญญาณตั้งอยู่ โดยประกอบด้วยสามส่วนหลักๆ คือ

2.1.1.1 Space Segment เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในทุกพื้นที่ จึงต้องมั่นใจว่า GNSS มีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง การเลือกกลุ่มดาวเทียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต้องคำนึงถึงความแม่นยำทางตำแหน่งผู้ใช้งาน, ดาวเทียมที่พร้อมใช้งาน, พื้นที่ให้บริการ และ Satellite Geometry สัญญาณของดาวเทียมแต่ละดวงจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถวัด Pseudorange ระหว่างเครื่องรับไปยังดาวเทียมและ Broadcasts ของดาวเทียมจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดระยะทางจากดาวเทียมไปถึงเสาอากาศของเครื่องรับบนพื้นโลกได้โดยวิธีการ Resection

2.1.1.2 Control Segment หรือที่เรียกว่าส่วนของภาคพื้นดิน รับผิดชอบในการควบคุมทั้งระบบ รวมถึงการปรับใช้งานและการบำรุงรักษาระบบ การติดตามดาวเทียมสำหรับการวัดและคำนวณวงโคจรและ Clock Parameters การตรวจสอบข้อมูลเสริม (เช่น Ionosphere Parameters) และอัปเดตข้อมูลดาวเทียม ส่วนการควบคุมยังเป็นผู้รับผิดชอบสำหรับการเข้ารหัสข้อมูลและการป้องกันการให้บริการกับผู้ใช้งานไม่ได้รับอนุญาตโดยทั่วไปส่วนควบคุมประกอบด้วยสถานีควบคุมหลัก, Monitor Stations และ Ground Antennas ที่มีการเชื่อมโยงการสื่อสารไปยังดาวเทียม

2.1.1.3 User Segment ส่วนผู้ใช้สามารถจำแนกเป็นประเภทผู้ใช้ ตัวรับสัญญาณชนิดและบริการข้อมูลต่าง ๆ ประเภทผู้ใช้จะถูกแบ่งออกเป็นผู้ใช้ทางทหาร และพลเรือน ผู้ใช้พลเรือนจะไม่ได้รับอนุญาตให้สามารถเข้าถึงสัญญาณหรือบริการของ GNSS ทั้งหมดได้ ปัจจุบันเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมมีความหลากหลายอย่างมาก ลักษณะหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการรังวัด ได้แก่ ชนิดของ Pseudoranges การรับสัญญาณความถี่แบบหนึ่งความถี่ สองความถี่ หรือมากกว่านั้นโดยทั่วไปแล้วจะให้ข้อมูลสถานะกลุ่มดาวเทียม กำหนดเวลาและข้อมูลการโคจร

ระบบ GNSS จะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาความถูกต้องทางตำแหน่งที่ต้องการความแม่นยำสูง เนื่องจากการทำงานระหว่างระบบดาวเทียม GPS ร่วมกับระบบดาวเทียมอื่น ๆ ทำให้มีดาวเทียมที่มีสภาพพร้อมใช้งานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าทางตำแหน่งที่ดีขึ้นและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้ข้อมูลจาก GPS เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้การหาตำแหน่งมีความถูกต้องสูงและลดเวลาในการปฏิบัติงานด้านการรังวัด อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบจากข้อจำกัดเรื่องสภาพแวดล้อมที่เป็นอุปสรรคในขณะปฏิบัติงานด้านการรังวัดอีกด้วย (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2007; Lechner & Baumann, 2000; อัศวินี วงษ์สุวรรณ, 2557)



รูปที่ 4 แสดงวงโคจรของดาวเทียมในระบบระบบดาวเทียมนำหน GNSS

(<https://static1.squarespace.com/static/55f05c0ce4b03bbf99b13c15/t/5c3dee1e575d1f15625e7b60/1547562615839/GNSS+System+Orbits.png?format=500w>)

2.1.2 การรังวัดดาวเทียมด้วยสมการค่าสังเกตของการรังวัด (Observation Equations)

โดยปรกติค่ารังวัดที่ได้จากการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และนำมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่สำคัญมี 2 ชนิดคือ ซูโดเรจัน (Pseudorange) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier

phase) โดยใช้เทคนิคค่าต่าง (Differencing technique) เพื่อใช้ในการลดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ในข้อมูลที่ทำการรังวัด

2.1.2.1 ชูโตเรนจ์ (Pseudorange)

ชูโตเรนจ์คือ ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณ หาค่าได้จากการ ถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมเปรียบเทียบกับรหัสที่เครื่องรับสัญญาณสร้างขึ้น โดยจะทำการเลื่อนไปมาจนกระทั่งได้รหัสที่ตรงกัน ค่าเลื่อนระหว่างรหัสทั้งสองคือระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ (ดังแสดงในรูปที่ 5) เมื่อนำความเร็วของคลื่นวิทยุคูณด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ จะได้ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณซึ่งเรียกว่า ‘ชูโตเรนจ์’ นั่นเองโดย ชูโตเรนจ์ที่ได้นี้จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากระยะทางจริงระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนหลายชนิด เช่น ความคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม และความคลาดเคลื่อนเมื่อคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ เป็นต้น โดยมีสมการของชูโตเรนจ์ที่ได้จากรหัสและมีหน่วยเป็นระยะทางดังนี้คือ

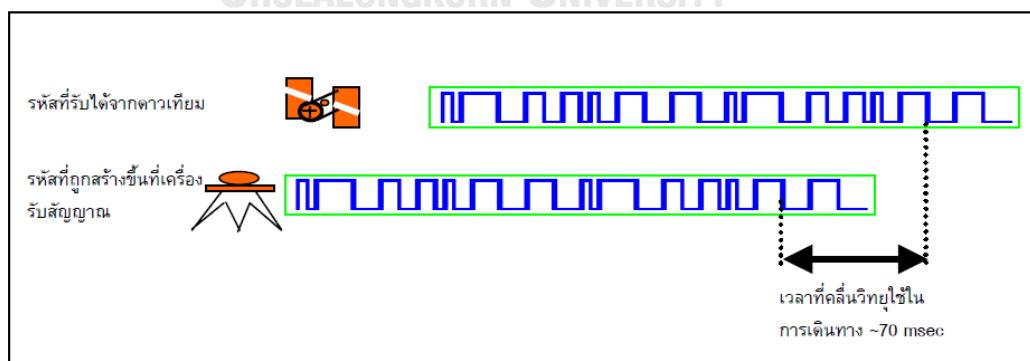
$$R_r^S(t_r, t_e) = \rho_r^S(t_r, t_e) + c(\Delta\delta^S - \Delta\delta_r) + \Delta^{orbit} + \Delta^{Iono} + \Delta^{Trop} + \Delta^{Tide} + \Delta^{Mul} + \epsilon \quad (1)$$

โดยที่

- R_r^S คือ ชูโตเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัสจากดาวเทียม S ถึงเครื่องรับ r (เมตร)
- ρ_r^S คือ ระยะทางจากดาวเทียม S ถึงเสาอากาศของเครื่องรับ r (เมตร)
- t_r คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่งของ Reference Station A (เมตร)

t_e	คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่งของสถานีเสมือน (VRS) (เมตร)
c	คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)
$\Delta\delta^S$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
$\Delta\delta_r$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
Δ^{orbit}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
Δ^{Iono}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
Δ^{Trop}	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)
Δ^{Tide}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงจากแผ่นดินและแรงจากมหาสมุทร (Earth Tide and Ocean Loading) (เมตร)
Δ^{Mul}	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
ϵ	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในซอฟต์แวร์ที่วัดได้ของรหัส และค่าคลาดเคลื่อนแฝงอื่นๆ (เมตร) (ธีทัต เจริญกมลัญญาตา, 2555)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 5 การเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ GNSS

(เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

2.1.2.2 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)

ในการวัดเฟสของคลื่นส่งนั้นใช้สำหรับงานที่ต้องการค่าความละเอียดถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตร ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการประมวลผล ซึ่งการวัดเฟสของคลื่นส่งในเครื่องรับเป็นการวัดเปรียบเทียบหรือค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมา กับเฟสของคลื่นความถี่ f_0 ที่เครื่องรับสร้างขึ้นมา โดยคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมา นั้นแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของคลื่นจำนวนเต็มรอบ (Integer cycle part) กับส่วนที่ไม่เต็มรอบ (Fractional part) ในการรับสัญญาณนั้นเครื่องรับสัญญาณไม่สามารถจะนับจำนวนเต็มรอบของคลื่นส่งที่ส่งลงมาจำนวนเต็มรอบสามารถหาค่าได้จากการคำนวณในภายหลัง โดยจำนวนเต็มนี้มีชื่อเรียกว่า Ambiguity หรือ เลขปริศนา (เฉลิมขันธ์ สติระพจน์, 2549) โดยสมการค่าสังเกตของการวัดเฟสของคลื่นส่งคือ

$$\begin{aligned} \lambda\varphi_r^S(t_r, t_e) = & \rho_r^S(t_r, t_e) + c(\Delta\delta^S - \Delta\delta_r) + \lambda N_r^S + \Delta^{orbit} - \Delta^{Iono} \\ & + \Delta^{Trop} + \Delta^{Tide} + \Delta^{Mul} + \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่

φ_r^S คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่งจากดาวเทียม S ถึงเครื่องรับ r (เมตร)

ρ_r^S คือ ระยะทางจากดาวเทียม S ถึงเสาอากาศของเครื่องรับ r (เมตร)

t_r คือ เวลาขณะที่คลื่นถึงเครื่องรับ (วินาที)

t_e คือ เวลาขณะที่คลื่นถูกส่งออกมาจากดาวเทียม (วินาที)

c คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

$\Delta\delta^S$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

$\Delta\delta_r$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

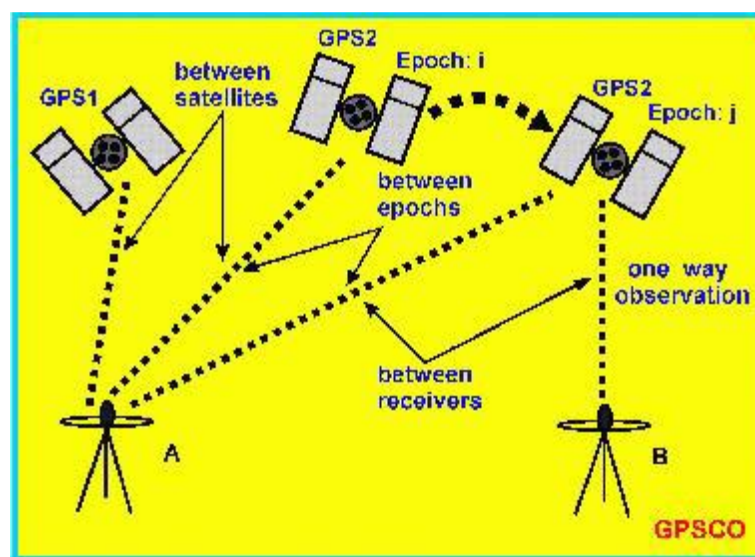
Δ^{orbit}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
Δ^{iono}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
Δ^{Trop}	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)
Δ^{Tide}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงจากแผ่นดินและแรงจากมหาสมุทร (Earth Tide and Ocean Loading) (เมตร)
Δ^{Mul}	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
ϵ	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในชุดเรเนจที่วัดได้ของรหัส และค่าคลาดเคลื่อนแฝงอื่นๆ (เมตร)
λ	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในชุดเรเนจที่วัดได้ของรหัส และค่าคลาดเคลื่อนแฝงอื่นๆ (เมตร)
N_r^S	คือ ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่ง (หน่วยนับ)

จากสมการของชุดเรเนจ (1) และเฟสของคลื่นส่ง (2) จะเห็นว่าสมการทั้งสองมีความแตกต่างกันอยู่สองตัวแปร คือ λ และ N_r^S ที่จะมียู่ในเฉพาะสมการเฟสของคลื่นส่งและเครื่องหมายของค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน และไม่ว่าจะทำการรังวัดดาวเทียมด้วยชุดเรเนจหรือเฟสของคลื่นส่งก็ยังคงพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่หลายชนิดดังนั้นจึงต้องมีการจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนเหล่านั้นลง ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันได้แก่เทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียม (Data Combination) และเทคนิคการหาค่าต่างของข้อมูลดาวเทียม (Data Differencing) (ธีทัต เจริญกาฬัญญาตา, 2555)

2.1.2.3 เทคนิคค่าต่าง (Differencing technique)

ในการใช้งานเทคนิคการหาค่าต่างสามารถทำได้ใน 3 ลักษณะคือ ระหว่างเครื่องรับ (Between receivers) ระหว่างดาวเทียม (Between satellites) และระหว่างเวลา โดยเทคนิคการหาค่าต่างจะมีการจำแนกเทคนิคค่าต่างตามจำนวนครั้งของการหาค่าต่าง และเทคนิคการหาค่าต่างที่เป็นที่นิยมใช้กันกว้างขวางนั้นมีอยู่สามแบบคือ การหาค่าต่างครั้งที่หนึ่ง (Single differencing) การหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing) และการหาค่าต่างครั้งที่สาม (Triple differencing) โดยแสดงในรูปที่ 6

โดยการใช้การหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing) เป็นเทคนิคค่าต่างที่นิยมใช้ในการขจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียมและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาเครื่องรับ และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียมและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศทั้งจากไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ เช่นเดียวกันกับการหาค่าต่างระหว่างเครื่องรับ ประสิทธิภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นขึ้นอยู่กับระยะเส้นฐาน โดยเป็นการนำข้อมูลมาหาค่าต่างสองครั้ง กล่าวคือเป็นการหาค่าต่างระหว่างจุดสองจุดและดาวเทียมสองดวง (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)



รูปที่ 6 แสดงเทคนิคค่าต่างในลักษณะต่างๆ (Rizos, 1997)

2.1.3 องค์ประกอบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานนั้น จะต้องมีการติดตั้ง เครื่องมือสำหรับระบบเครือข่ายของสถานีฐาน และจำเป็นต้องมีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สามารถสื่อสารกับระบบเครือข่ายสถานีฐานสำหรับผู้ใช้งาน ดังต่อไปนี้

2.1.3.1 สถานีฐานถาวร (CORS)

ส่วนของสถานีฐานถาวรต้องมีอย่างน้อย 3 สถานี โดยสถานีถาวรจำเป็นต้องติดตั้ง เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรับวัดคุณภาพสูงชนิดหลายความถี่ และเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมควรจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Choke Ring เพื่อลดการเกิดคลื่นสะท้อน โดยจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ในสถานที่มั่นคงถาวร และสภาพพื้นที่จะต้องเป็นที่โล่งแจ้ง ปราศจากสิ่งกีดขวาง โดยรอบเพื่อการรับสัญญาณดาวเทียมได้รอบทิศทางและในมุมต่ำ รวมถึงสถานีถาวรต้องเชื่อมต่อ กับระบบอินเทอร์เน็ต เพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางในทันทีและตลอดเวลา

2.1.3.2 ศูนย์ควบคุมส่วนกลาง (Control Centre)

ส่วนนี้จะประกอบไปด้วยซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลการรับวัดโดยอาศัยระบบ สถานีฐาน โดยใช้ซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะรับข้อมูลดิบมาจากทุกสถานีฐานถาวรแล้วทำการประมวลผลข้อมูล เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ เช่น แล้วส่งข้อมูลที่ได้รับการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนแล้วส่งไป ยังสถานีของผู้ใช้งานเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้งาน

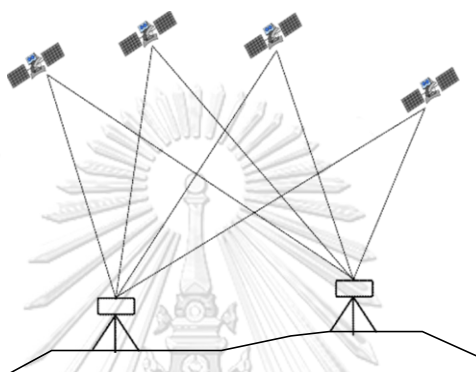
2.1.3.3 สถานีผู้ใช้งาน (Rover Station)

เป็นการเลือกใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรับวัดสำหรับสถานีผู้ใช้งานจะขึ้นอยู่กับความความถูกต้องของตำแหน่งตามความต้องการของผู้ใช้งานเอง โดยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ดังกล่าว จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์สื่อสารที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตได้ (สีทัตเจริญกมลัญญาตา, 2555)

2.1.4 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์หรือที่เรียกกันว่าวิธี Differential Positioning เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูงมากกว่าการหา ตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ โดยวิธีนี้จะเป็นการหาตำแหน่งแบบเปรียบเทียบระหว่างสองจุด โดยใช้ตำแหน่ง สัมบูรณ์ที่ทราบค่าแล้วอย่างน้อยหนึ่งจุด เพื่อคำนวณหาตำแหน่งสัมบูรณ์ของจุดอื่นๆ การหาตำแหน่ง แบบสัมพัทธ์มีหลักการที่สำคัญคือ จำเป็นต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งจะวางอยู่ที่จุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว เรียกว่า สถานีฐาน (Base Station) หรือสถานีอ้างอิง (Reference Station) ส่วนเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอีกเครื่องจะถูกนำไปวางตรงจุดที่ต้องการ ทราบค่าพิกัด เรียกว่า สถานีผู้ใช้ (User Station) หรือสถานีจร (Roving Station) การหาตำแหน่งจุดต่างๆ ด้วยวิธีนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานจะต้องรับข้อมูล จากดาวเทียมกลุ่มเดียวกัน และอยู่ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยต้องทำการรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง ด้วย

การทำงานในลักษณะดังกล่าว ความคลาดเคลื่อนมีระบบ (Systematic errors) หลายชนิด ดังเช่น ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจร ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกา ดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ เป็นต้น จะถูกหักล้างกันไปทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้ดีขึ้นขึ้น ในการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ด้วยการใช้ข้อมูลชุดโคจร ค่าความถูกต้องจะอยู่ระหว่าง 0.5 - 5 เมตร ในกรณีที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตร ก็จะต้องใช้วิธีการวัดเฟสของคลื่นส่ง (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)



รูปที่ 7 แสดงการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

2.1.4.1 วิธีการรังวัดแบบสถิต (Static)

วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องรับ GNSS อย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งจะถูกวางเอาไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดหรือสถานีฐาน ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณ GNSS ตามจุดที่ต้องการทราบค่าหรือสถานีจร วิธีการนี้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งสองเครื่องจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียม GNSS กลุ่มเดียวกัน และช่วงเวลาเดียวกัน อย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งอยู่กับที่เป็นระยะเวลาหนึ่งๆ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1 - 2 ชั่วโมง เพื่อให้มีข้อมูลของการวัดระยะที่เพียงพอที่จะใช้ในการประมวลผลหาจำนวนคลื่นเต็ม รอบที่ไม่สามารถวัดได้ โดยวิธีการนี้จะให้ค่าความถูกต้องตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร - 2.5 เซนติเมตร (สำหรับ เส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 20 เซนติเมตร) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการรังวัดด้วยวิธีการ Static เพื่อใช้ในการเป็นจุดอ้างอิงค่าพิกัด (Ground truth) และต้องมีการประมวลผลภายหลังเพื่อทำการคำนวณเฟสของคลื่นส่ง เพื่อที่จะทำการประมาณค่าตัวเลขปริศนา (Ambiguity Resolution) เพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และใช้การประมวลผลโดยใช้ค่าแก้วงโคจรดาวเทียม แบบ precise orbit เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมอีกด้วย



รูปที่ 8 แสดงวิธีการรังวัดแบบสถิต

(<http://kqgnss.blogspot.com/2018/05/gnss.html>)

2.1.4.2 วิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic - RTK)

วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อยสองเครื่อง โดยเครื่องหนึ่งถูกวางไว้บนตำแหน่งหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้วหรือที่เรียกว่าสถานีฐาน ส่วนเครื่องรับ สัญญาณดาวเทียมที่เหลือจะถูกนำไปวางรับสัญญาณดาวเทียม ณ ตำแหน่งที่ต้องการค่าพิกัด หรือเรียกว่าสถานีผู้ใช้งาน แต่ในวิธีการนี้สามารถเคลื่อนย้ายเครื่องรับดาวเทียมเครื่องที่สองได้ ในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารระหว่างเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งสองเครื่องอุปกรณ์สื่อสารนั้น อาจเป็นเครื่องรับและส่งคลื่นวิทยุ หรือโทรศัพท์มือถือ ตลอดจนอุปกรณ์ที่สามารถติดต่อกับระบบอินเทอร์เน็ต ได้ จะได้ค่าพิกัดของตำแหน่งได้ทันทีในสนาม เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐาน และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ผู้ใช้งานต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง ที่สำคัญเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้จะต้องเป็นเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่เท่านั้น สำหรับ เส้นฐานที่มีความยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร วิธีการนี้ให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1 – 5 เซนติเมตร วิธีการนี้ มักถูกเรียกว่า RTK มีข้อดีคือ ใช้เวลาการรังวัดค่อนข้างเร็ว สามารถประมวลผลข้อมูลในขณะที่กำลัง รับสัญญาณดาวเทียมได้พร้อมกับส่งผล ทำให้ได้ค่าพิกัดตำแหน่งในทันที แต่มีข้อจำกัดในเรื่อง ความถูกต้องทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดที่ได้ โดยจะลดลงเมื่อระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐานกับสถานีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น (อัศวินี วงษ์สุวรรณ, 2557)

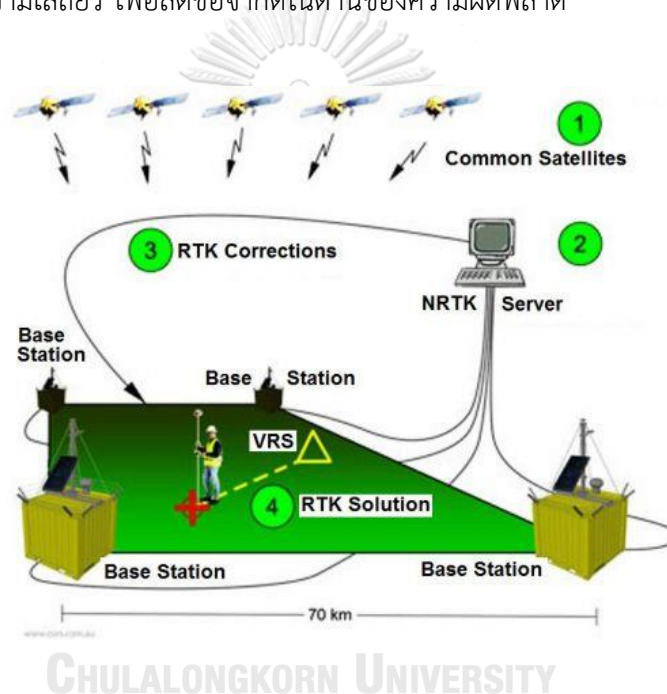
2.1.4.3 วิธีการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

หรือที่เรียกว่า RTK GNSS Network ข้อดีคือ ผลกระทบที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่น้อยกว่าเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่ (RTK) ซึ่งความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่จะถูกขจัด ในขั้นตอนของการประมวลผลเพื่อหาตำแหน่ง วิธีนี้ สามารถลดข้อจำกัดในเรื่องของความถูกต้อง ทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดเมื่อมีระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งาน ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การหาค่าเลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็มตามทฤษฎีนั้น มีประสิทธิภาพและทำให้ กระบวนการประมวลค่าเลขปริศนาทำได้ง่ายและรวดเร็วกว่า วิธีการนี้ต้องประกอบด้วย สถานีฐานถาวร, ศูนย์ควบคุมกลาง และสถานีผู้ใช้งานโดยหลักการการทำงานจะเริ่มจากสถานีฐานถาวรที่มีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงชนิดหลายความถี่ อย่างน้อยจำนวน 3 สถานี ที่ทำการติดตั้ง ในพื้นที่เป็นการถาวร ในบริเวณที่ติดตั้งสถานีต้องโล่งแจ้งต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง และสามารถใช้อินเตอร์เน็ตเชื่อมต่อกับระบบได้ตลอดเวลา เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมกลางได้ในทันที เมื่อศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้รับข้อมูลมาจากทุกสถานีฐานถาวรแล้วจะทำการประมวลผลของข้อมูลที่ได้รับ เพื่อคำนวณหาค่าแก้ความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ เพื่อส่งให้สถานี ผู้ใช้งานต่อไป เมื่อผู้ใช้งานต้องการทราบค่าพิกัดของตำแหน่ง สามารถทำได้โดยการนำเครื่องรับ สัญญาณดาวเทียมเพียงเครื่องเดียวไปวางที่ตำแหน่งที่ต้องการก็จะทราบทราบค่าพิกัด (เจนพีอีกร สุนทรรัตน์, 2560) สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้งานโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ที่ติดตั้งโดยหน่วยงานของกรมที่ดินและกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยมีระยะห่างอยู่ที่ 25.1 ถึง 198.6 กิโลเมตร และมีระยะห่างเฉลี่ยอยู่ในระดับ 82.7 กิโลเมตร ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีขนาดแตกต่างกัน

2.1.4.4 เทคนิค Virtual Reference Station

หรือ VRSเป็นเทคนิคหนึ่งของวิธีการ รังวัดด้วย RTK GNSS Network และจากการประมวลข้อมูลพื้นฐานผลกระทบของความคลาดเคลื่อนของวงโคจร ดาวเทียม, ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะเพิ่มขึ้นไปพร้อมกับความยาวของ Baseline หากอยากจะลดผลกระทบ ดังกล่าวลง สามารถทำได้โดยการสร้างความแตกต่างของ Observables เช่นวิธี Double Differences เป็นต้นจากหลักการที่ว่า การปฏิบัติงานที่ดี คือ การใช้เส้น Baselines ที่สั้นๆ เพื่อให้ Reference Station ใกล้กับ Rover ทำให้เกิดการพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่มีอยู่ทำให้เกิด การสร้างเครือข่ายสถานีอ้างอิงเพื่อช่วยลดระยะของ Baseline ลง จนเกิดเป็นแนวคิดการสร้างสถานีเสมือนจริง จากการรังวัดจริงของเครือข่ายสถานีที่อ้างอิงที่หลากหลายอย่างน้อยสามสถานีที่อยู่ ล้อมรอบ และส่งข้อมูลเหล่านั้นกลับไปยังสถานี Rover ผลของแนวคิดนี้ทำให้มีความแม่นยำทางราบ อยู่ที่ระดับ 5 cm. สำหรับ Baseline ที่ไม่เกิน 35 km ซึ่งการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ด้วยเทคนิค VRS แสดงอยู่ในรูปที่ 2

(Hofmann-Wellenhof et al., 2007; เจนพีธีกร สุนทรรัตน์, 2560) ซึ่งข้อดีของระบบ VRS คือ ใช้เวลาการรังวัดค่อนข้างเร็ว และได้ค่าพิกัดในทันที สถานีผู้ใช้งานไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือซอฟต์แวร์เพิ่มเติม เนื่องจากระบบ VRS จะใช้ซอฟต์แวร์ของสถานีผู้ใช้งานในกระบวนการประมวลผลเส้นฐานเพื่อหาค่าตำแหน่งที่ถูกต้องของสถานีผู้ใช้งาน (ธีทัต เจริญกาลัญญาตา, 2555) ในส่วนของข้อจำกัดของระบบ VRS นั้นคือประสิทธิภาพของการรังวัดจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสถานีฐานเพิ่มขึ้น โดยสาเหตุเกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ และระบบการทำงานของ VRS จำเป็นต้องใช้การสื่อสารแบบสองทาง (Two Way Communication) จำเป็นต้องใช้ส่วนควบคุมที่มี Server ที่มีประสิทธิภาพในการรองรับการทำงาน รวมถึงระบบเครือข่ายสัญญาณของในส่วนของการติดต่อสื่อสารที่มีความเสถียร เพื่อลดข้อจำกัดในด้านของความผิดพลาด



รูปที่ 9 ระบบการทำงานการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ด้วยเทคนิค VRS

(<https://www.gim-international.com/content/article/gnss-positioning>)

โดยสมการของระบบ VRS มีวัตถุประสงค์คือการแปลงการรังวัดที่สถานีอ้างอิงที่แท้จริงให้กับสถานีที่ตั้งของ VRS เช่น ตำแหน่งที่แตกต่างกันนั้นหมายถึงสมการเงื่อนไขของ Model ขึ้นอยู่กับสถานีที่ตั้ง Reference Receiver โดยทั่วไปใช้ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่ง ณ เวลาใดๆ สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\varphi_r^S(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) \quad (3)$$

โดยที่

$\varphi_r^S(t)$ คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่ง ณ เวลาใดๆ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)

$\varrho_r^S(t)$ คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ เวลาใดๆ (เมตร)

N คือ หรือ ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่ง (หน่วยนับ)

f^S คือ เท่ากับ $\frac{C}{\lambda}$ มีหน่วยเป็นเฮิรต และเมื่อ C คือความเร็วแสง มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

$\Delta \delta_r^S(t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ (เมตร)

หากกำหนดให้ตำแหน่งของ Reference Station A ของเครื่องรับ r เท่ากับ เวกเตอร์ X_A และตำแหน่งของสถานีเสมือน (VRS) เท่ากับ เวกเตอร์ X_V เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3) จะได้สมการดังนี้

$$\varphi_r^S(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_A, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) \quad (4)$$

$$\varphi_r^S(X_V, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_V, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) \quad (5)$$

โดยที่

$\varphi_r^S(X_A, t)$ คือ ข้อมูลการวัดเฟสของ Reference Station A ณ เวลาใดๆ (เมตร)

$\varphi_r^S(X_V, t)$ คือ ข้อมูลการวัดเฟสของสถานีเสมือน (VRS) ณ เวลาใดๆ

$\varrho_r^S(X_A, t)$ คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่งของ Reference Station
A (เมตร)

$\varrho_r^S(X_V, t)$ คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่งของสถานีเสมือน (VRS)
(เมตร)

ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (4) และสมการที่ (5) มาลบกันจะได้สมการดังนี้

$$\varphi_r^S(X_A, t) - \varphi_r^S(X_V, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_A, t) - \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_V, t) \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะเห็นว่าเทอมของค่าเลขปริศนา (N) และค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ ($\Delta \delta_r^S(t)$) จะหายไป แล้วทำการจัดสมการใหม่จะได้สมการดังนี้

$$\varphi_r^S(X_A, t) = \varphi_r^S(X_V, t) + \frac{1}{\lambda} [\varrho_r^S(X_A, t) - \varrho_r^S(X_V, t)] \quad (7)$$

จากสมการข้างต้น $\varphi_r^S(X_V, t)$ คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานี VRS ซึ่งข้อมูลนี้ไม่จำเป็นต้องทำการรังวัดจริง เนื่องจากสมการทางด้านขวามือสามารถหาค่าได้ แต่เนื่องจากข้อมูลดาวเทียมที่ได้จากสถานีฐานยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และค่าความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมดังที่แสดงในสมการที่ (8)

$$\Delta_r^S(X_A, t) = \Delta^{Orbit}(X_A, t) + \Delta^{Iono}(X_A, t) + \Delta^{Trop}(X_A, t) \quad (8)$$

โดยที่

$\Delta_r^S(X_A, t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ที่ Reference Station A (เมตร)

$\Delta^{Orbit}(X_A, t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียม

ที่ Reference Station A (เมตร)

$\Delta^{Iono}(X_A, t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ที่ Reference Station A (เมตร)

$\Delta^{Trop}(X_A, t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

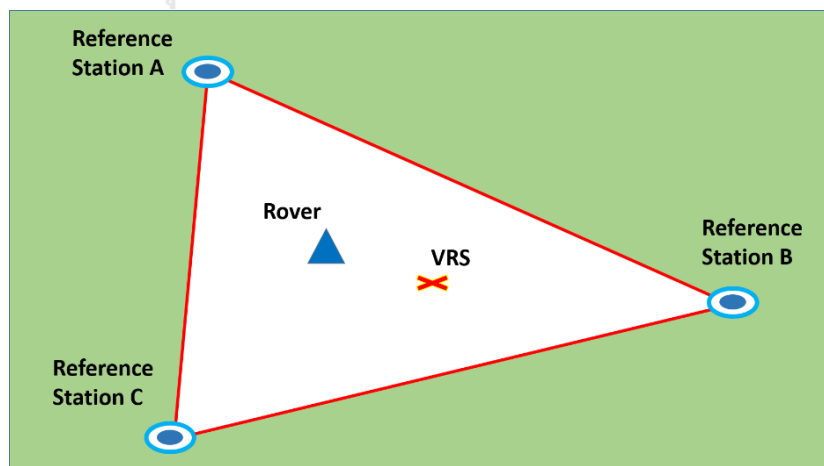
ที่ Reference Station A (เมตร)

ซึ่งในความเป็นจริงจำเป็นต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ด้วย
ดังนั้นจากสมการที่ (4) เมื่อเพิ่มสมการของค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\varphi_r^S(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^S(X_A, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_A, t) \quad (9)$$

และจากสมการข้างต้นของสถานีอ้างอิง A สมการที่ (10) จะถูกนำไปใช้ใน
สถานีอ้างอิงอื่นๆอย่างเช่นในรูปแสดงแนวคิดการทำงานของระบบ VRS รูปที่ 10 ที่มีสถานีอ้างอิง B
และสถานีอ้างอิง C ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ก็จะเป็น $\Delta_r^S(X_B, t)$ และ $\Delta_r^S(X_C, t)$
ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ นี้จะมีทุกสถานีอ้างอิง และทุก Epoch ที่ทำการรังวัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 10 แสดงแนวคิดการทำงานของระบบ VRS

$$\varphi_r^S(X_B, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_B, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_B, t) \quad (10)$$

$$\varphi_r^S(X_C, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_C, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_C, t) \quad (11)$$

ดังนั้น ในทำนองเดียวกัน สมการของสถานีเสมือน (VRS) สมการที่ (8) เมื่อเพิ่มในส่วน of ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} \varphi_r^S(X_V, t) = & \varphi_r^S(X_A, t) + \frac{1}{\lambda} [\varrho_r^S(X_V, t) - \varrho_r^S(X_A, t)] \\ & + \Delta_r^S(X_V, t) \end{aligned} \quad (12)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ตามสมการที่ (9) – (11) $\Delta_r^S(X_A, t)$, $\Delta_r^S(X_B, t)$ และ $\Delta_r^S(X_C, t)$ สามารถคำนวณหาได้ เนื่องจากทราบตำแหน่งของทุกสถานีอ้างอิง ในส่วนของ N สามารถคำนวณหาได้โดยวิธีการหาค่าเลขปริศนา และ $f^S \Delta \delta_r^S(t)$ หาได้จากเทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สองของคู่สถานี

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ของสถานีอ้างอิงแล้ว ก็จะสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ของสถานี VRS ได้จากการ Interpolate ในรูปแบบต่างๆ หรือการจำลอง Error Residuals ของสถานีอ้างอิง i จะได้สมการดังนี้

$$\Delta_r^S(X_i, t) = aX_i + bY_i + cZ_i \quad (13)$$

โดยที่

X_i, Y_i, Z_i คือ ค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีอ้างอิงทั้งสามทิศทาง ในระบบพิกัด Earth Center Earth Fix (ECEF Coordinates) หรือระบบพิกัดระนาบที่ประกอบด้วยค่าความสูง

a, b, c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากสถานีอ้างอิง A, B, C โดยการแก้สมการเชิงเส้น ถ้าสถานีอ้างอิงมีมากกว่า 3 สถานี สามารถคำนวณหาได้จากเทคนิค Least Square Adjustment (Hofmann-Wellenhof et al., 2007; ธีทัต เจริญกมลัญญา, 2555)

2.1.5 การหาค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE)

เป็นการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งเชิงพื้นที่ของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นที่หนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ซึ่งจะวิเคราะห์ค่าความถูกต้องในตำแหน่งทางราบและตำแหน่งทางตั้ง โดยคำนวณได้จากสมการที่ 1 (FGDC, 1998)

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum ((N_{Static} - N_{i(VRS)})^2 + (E_{Static} - E_{i(VRS)})^2)}{n}} \quad (14)$$

โดยที่

$RMSE_r$	คือ RMSE ของตำแหน่งทางราบ (เมตร)
N_{Static}	คือ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ ของการรังวัดแบบ Static
N_{VRS}	คือ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ ของการรังวัด VRS
E_{Static}	คือ ค่าพิกัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก ของการรังวัดแบบ Static
E_{VRS}	คือ ค่าพิกัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก ของการรังวัด VRS
i	คือ ข้อมูลแต่ละ Epoch ที่ 1 วินาที
n	คือ จำนวนหมุดทดสอบ

ในขณะที่ตำแหน่งในทางตั้งจะวิเคราะห์ ค่าความสูงเหนือทรวงรี (Ellipsoidal Height) บนพื้นหลักฐาน WGS 1984 (กรมที่ดิน, 2562)

2.1.6 การสำรวจรังวัดแปลงที่ดินของกรมที่ดิน ตามระเบียบกรมที่ดิน ว่าด้วยการรังวัด โดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558

เป็นระเบียบที่ได้ปรับเปลี่ยนเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ใช้ในการรังวัดและทำแผนที่ในปัจจุบัน ด้วยการหาค่าพิกัดฉากโดยระบบดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS) ในประเทศไทย และเป็นการยกระดับมาตรฐานการรังวัดเฉพาะรายให้มีความถูกต้องแม่นยำสูงในทางค่าพิกัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการแก่ประชาชน โดยในการศึกษาวิจัยนี้ได้มีการอ้างอิงหลักการปฏิบัติงานการรังวัดที่ดินของกรมที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ตามระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558 โดยมีส่วนที่เกี่ยวข้องตามรายละเอียดดังนี้

หมวดที่ 2 การรับสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network)

- ให้ทำการรังวัดโดยการรับสัญญาณดาวเทียมทั้งหมดดาวเทียม RTK Network เพื่อใช้ในการโยกย้ายหลักเขตที่ดิน หรือใช้เป็นหมุดออก และหมุดเข้าบรรจบเส้นโครงงานหมุดหลักฐานแผนที่ เพื่อเก็บรายละเอียดแปลงที่ดิน และไม่ให้นำทำการรังวัดโดยการรับสัญญาณดาวเทียมที่หลักเขตที่ดิน ยกเว้นกรณีตรวจสอบค่าพิกัดฉากของหลักเขตที่ดิน
- ก่อนทำการรังวัดให้ตรวจสอบเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมโดยรับสัญญาณทั้งหมดดาวเทียม Static ซึ่งทราบค่าพิกัดฉาก โดยค่าความแตกต่างต้องอยู่ในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง ± 4 เซนติเมตร

ภาคผนวก ก. วิธีปฏิบัติงานรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์

- ให้ใช้วิธีการรังวัดรับสัญญาณดาวเทียม ในพื้นที่ระบบโครงข่ายการรังวัด ด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบสถานีโครงข่าย
- ให้ใช้ค่า PDOP (Position Dilution of Precision) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการ บ่งชี้ความถูกต้องทางตำแหน่งของจุดที่ทำการรับสัญญาณดาวเทียมที่คำนวณได้ ณ เวลาใดๆ ขณะทำการรังวัดไม่เกิน 5
- ให้ใช้ค่า RMS (Root Mean Square) คือค่ารากที่สองของความแปรปรวน ของข้อมูล การรับสัญญาณดาวเทียม ไม่เกิน 3 เซนติเมตร

- ให้ใช้ผลการรังวัดเป็นแบบ Fixed ซึ่งเป็นการคำนวณลูกคลื่นที่ได้ผลลัพธ์ เป็นจำนวนเต็ม ขณะทำการรับสัญญาณดาวเทียม ณ เวลา ใดๆ
- ทำการรังวัดบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที และข้อมูลการรังวัดด้วยระบบ ดาวเทียม ไม่น้อยกว่า 180 ข้อมูล

ภาคผนวก ข. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งจากการรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งจากการรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (กรมที่ดิน, 2558)

ลำดับที่	รายการ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง
1.	การตรวจสอบเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมโดยรับสัญญาณที่หมุดดาวเทียม Static ซึ่งทราบค่าพิกัดฉาก	± 4 เซนติเมตร
2.	การตรวจสอบการรับสัญญาณดาวเทียม โดยให้ทำการรับสัญญาณดาวเทียม ซ้ำ 2 ครั้ง	± 4 เซนติเมตร
3.	การตรวจสอบค่าพิกัดเดิมและค่าพิกัดฉากใหม่ของหลักเขตที่ดิน	$\pm \left[4 \text{ เซนติเมตร} + \left(D * \frac{100}{5,000} \right) \right]$ <p>D = ผลรวมของระยะระหว่างหมุดหลักฐานแผนที่ กับระยะโยงยึดหน่วยเป็นเมตร</p>

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hu et al. (2003) ทำการศึกษาการพัฒนาและการประเมินผลของสถานีอ้างอิงเสมือน GPS สำหรับการวางตำแหน่ง RTK เพื่อจัดการข้อจำกัดของการรังวัดด้วยเทคนิค RTK แบบดั้งเดิมโดยการใช้สถานีฐานอ้างอิงจำนวนมาก แทนการใช้งานสถานีฐานอ้างอิงแบบเดี่ยวส่งผลให้สามารถเพิ่มพื้นที่ในการรังวัดมีขนาดครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น และเพิ่มความแม่นยำทางตำแหน่งที่สูงขึ้น โดยทำการรังวัดด้วยเทคนิค VRS โดยทำการศึกษาจากโครงข่ายสถานีอ้างอิงของประเทศสิงคโปร์ (SIMRSN) จากการทดสอบพบว่า การรังวัดด้วย Network RTK ด้วยวิธีการ VRS สามารถให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่าข้อกำหนดของการรังวัด RTK แบบ Single Base ประมาณ 3 เซนติเมตรในทางราบ ตำแหน่งความแม่นยำของทางตั้งอยู่ในระดับ 1 ถึง 5 เซนติเมตร โดยใช้เวลาในการรังวัดเฉลี่ยที่ 2 นาที

Dabove et al. (2016) ทำการศึกษาเรื่องความถูกต้องแม่นยำในการหาตำแหน่งที่สามารถทำได้ในโครงข่ายของสถานีอ้างอิง GNSS เป็นการศึกษาที่ให้ความสนใจในการรังวัด GNSS ด้วยเทคนิค Network RTK ในพื้นที่ศึกษาของประเทศอิตาลี โดยทำการวิเคราะห์เทคนิคการรังวัดด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน คือ Master Auxiliary Concept (MAC), Virtual Reference (VRS) และ Flachen Korrektur Parameters (FKP) โดยวิเคราะห์ด้วยการจำแนกด้วยระยะห่างระหว่างสถานี CORS แบ่งเป็น 3 ระยะคือ 1) Red Network ระยะห่างระหว่างสถานีคือ 50 กิโลเมตร 2) Green Network ระยะห่างระหว่างสถานีคือ 100 กิโลเมตร 3) Blue Network ระยะห่างระหว่างสถานีคือ 150 กิโลเมตร โดยวิธีการที่ทำการหาค่าพิกัดมี 2 วิธีคือ แบบ Realtime และ Post-Process และทำการรังวัดด้วย Receiver 2 ประเภท คือ Geodetic Receiver และ GIS Receiver ในการทดสอบได้ทำการรังวัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยผลจากการทดสอบในการหาค่าความถูกต้องของ Receiver ทั้ง 2 ประเภทที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ การใช้งานเครื่องรับ Geodetic ในแบบ Real-Time ด้วยวิธีการรับค่าแก้ด้วยเทคนิค VRS สามารถทำงานในเครือข่ายที่มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานถึง 100 กิโลเมตร ด้วยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบ 2 ถึง 8 เซนติเมตร และด้วยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้ง 5 ถึง 12 เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับเทคนิค MAC และในโครงข่ายขนาดใหญ่ การกำหนดตำแหน่งด้วย RTK GNSS Network นั้นมักจะไม่ดีประสิทธิภาพ เนื่องจากให้ความถูกต้องแม่นยำต่ำ ซึ่งวิธีการ FKP นั้นไม่เหมาะที่จะใช้งาน แม้กระทั่ง Network ที่มีขนาดกลาง (100 กิโลเมตร) และผลของการใช้งาน GIS Receiver นั้นให้ค่าความถูกต้องลดลงเมื่อขนาดของโครงข่ายใหญ่ขึ้น

สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา (2560) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายสถานี GNSS แบบต่างๆในประเทศไทย โดยการประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบ Network RTK โดยทำการทดสอบด้วยเทคนิคการรังวัดแบ่งออกเป็น 4 แนวคิดคือ Virtual Reference Station (VRS) , Flächen Korrektur Parameters (FKP), Master Auxiliary Concept (MAX) และ Individualized MAX (i-MAX) เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่าย มาใช้เพื่อแทนที่การรังวัดแบบ Single Base Station ซึ่งแนวคิดที่นำมาใช้ คือ Virtual Reference Station (VRS) โดยหน่วยงานที่ใช้งานคือ กรมที่ดิน โดยการทดสอบแนวคิดดังกล่าวมีการใช้ Software SpiderNet และทำการทดสอบด้วยสถานี GNSS CORS 2 สถานีคือสถานี DPT9 และ GISTDA โดยทำการตั้งรับสัญญาณ GNSS เป็นระยะเวลา 1 วันและทำการรับสัญญาณแบบมีการเคลื่อนที่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งแต่ละระบบเครือข่ายที่ทำการทดสอบมีความยาวของเส้นฐาน 2 ขนาด ได้แก่ 20 ถึง 50 กิโลเมตรประกอบด้วยสถานีอ้างอิง CUUT-PKKT-BPLE และ 40 ถึง 60 กิโลเมตรประกอบด้วยสถานีอ้างอิง PKKT-BPLE-KTBN จากการทดสอบที่สถานี DPT9 และ GISTDA พบว่าจำนวนจุดทดสอบที่มีค่าพิกัดอยู่ในโหมด Fixed Solution ทั้ง 2 เครือข่ายมีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ทั้งหมดและทำการเปรียบเทียบผลกับการรับสัญญาณด้วยวิธี Static เป็นค่าพิกัดอ้างอิง โดยการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ของค่า RMSE เฉลี่ยที่ตำแหน่งทางราบพบว่าระบบ VRS ให้ค่าความถูกต้องและความแม่นยำมากที่สุด สำหรับผลการทดสอบจากการรับสัญญาณแบบมีการเคลื่อนที่พบว่าระบบ MAX ให้ค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution โดยเฉลี่ยมากที่สุดจากทั้งสองเครือข่าย

เจนพิธิกร สุนทรรัตน์ (2560) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในทันทีสำหรับงานรังวัดที่ดิน (Network-Based Real-Time Kinematics) ด้วยแนวความคิดสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) โดยใช้สถานีอ้างอิง 11 สถานีในภาคกลางของประเทศไทย โดยทำการทดสอบวิธีการรังวัด 3 วิธีได้แก่ (1) Static (2) RTK และ (3) NRTK VRS โดยใช้การรังวัดแบบ Static เป็นการอ้างอิง ทำการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ 2 พื้นที่ดังนี้ พื้นที่หนึ่ง คือ บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยภายในพื้นที่ศึกษานี้ ได้แบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีพื้นที่โล่งแจ้ง ไม่มีสิ่งปกคลุม กรณีพื้นที่มีสิ่งปกคลุมหนาแน่นปานกลางและกรณีพื้นที่มีสิ่งปกคลุมหนาแน่น โดยทำการรังวัดเพื่อทดสอบ กรณีละ 30 จุดทดสอบ ส่วนพื้นที่ที่สองคือ แปลงที่ดินบริเวณอำเภอลาดหลุม

แก้ว จังหวัดปทุมธานี เป็นการรังวัดโดยตรงที่หัวมุมหลักเขตที่ดินจำนวน 34 มุม โดยสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงในการทดสอบการรังวัด จากการศึกษาพบว่า ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น หากสามารถทำการ Fix Ambiguity ได้ เทคนิค VRS และ RTK สามารถให้ค่าความถูกต้องในทางราบที่ใกล้เคียงกัน ในระดับความถูกต้อง 4 เซนติเมตร ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ สามารถทำงานได้ดีในพื้นที่โล่งแจ้งและบริเวณที่ต้นไม้ไม่หนาแน่นมาก แต่ถ้าเป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูงหรือมีตึกสูงจะกลายเป็นที่อับสัญญาณ GNSS และเกิดการสะท้อนของสัญญาณ GNSS อันเนื่องมาจาก Multipath ส่งผลให้ความสามารถในการ Fix Ambiguity เป็นไปได้ยากสำหรับในพื้นที่อำเภอลาดหลุมแก้วนั้น หากสามารถทำการ Fix Ambiguity ได้แล้ว วิธีการ VRS และ RTK สามารถให้ค่าความถูกต้องในทางราบที่ใกล้เคียงกัน ในระดับความถูกต้อง 3 เซนติเมตร แต่เนื่องจากสภาพพื้นที่จริงมีอุปสรรคเนื่องจากสิ่งปลูกสร้างและสภาพภูมิประเทศ ทำให้การ Fix Ambiguity ของทั้งสองวิธีการจึงเป็นไปได้ยาก

Janssen et al. (2011) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ RTK ในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของการรังวัดขอบเขตที่ดินในประเทศออสเตรเลีย เพื่อการกำหนดที่ตั้งของสิ่งต่างๆ หรือขอบเขตของแปลงที่ดิน ดำเนินการเพื่อวัตถุประสงค์ในการระบุความเป็นเจ้าของ หรือมูลค่าของผืนดินนั้นๆ โดยวิธีการดำเนินการศึกษาโดยการรังวัดด้วยวิธีการ RTK ณ มุมทราบค่าจากหน่วยงาน Survey Control Information Management System (SMIC) เพื่อทำการปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น โดยอาศัยเกณฑ์ควบคุมการสำรวจในทางราบของประเทศออสเตรเลีย ซึ่งแบ่งออกเป็น 8 ชั้น (Class) คือ

- 1) 3A = Special high precision surveys
- 2) 2A = High precision national geodetic surveys
- 3) A = National and state geodetic surveys
- 4) B = State survey control networks
- 5) C = Survey coordination projects
- 6) D = Approximate and lower order surveys
- 7) E = Approximate and lower order surveys
- 8) U = Unknown or unreliable

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้วยการรังวัดแบบ RTK ซึ่งในการทดสอบนี้ทำการทดสอบในพื้นที่ประมาณ 2030 ตารางกิโลเมตร โดยระยะเวลาที่ทำการทดสอบอยู่ระหว่างวันที่ 15 มกราคม ถึง 27 สิงหาคม ปี 2552 โดยทำการรับข้อมูลทุกๆ 1 วินาทีและมุมกันฟ้า 13° ในการรังวัดเป็นแบบ Single Base RTK โดยใช้เครื่องรับ 2 ความถี่ โดยผลจากการศึกษาพบว่าเทคนิคการรังวัดด้วย RTK GPS มีความเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานของหมุดควบคุมทางงานสำรวจสำหรับการรังวัดแปลงที่ดิน เนื่องจากเทคนิค RTK สามารถสำรวจแปลงที่ดินในระยะทางที่สั้นลง สามารถรังวัดค่าพิกัดในสนามในเวลาจริง โดยค่าที่ทำการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหมุดที่ทำการทดสอบให้ค่าความถูกต้อง

(RMS) ทางราบเท่ากับ 11 มิลลิเมตรและทางตั้ง 34 มิลลิเมตร และจาก 55 เปอร์เซ็นต์ของหมุดควบคุมงานสำรวจที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบสามารถปรับปรุงพัฒนาเป็นหมุดควบคุมงานสำรวจแปลงที่ดินที่มีประสิทธิภาพได้

Erenoglu (2017) ได้ทำการศึกษาวิธีการหาตำแหน่ง เพื่อประยุกต์ใช้ในการรังวัดที่ดินในสาธารณรัฐตุรกี โดยการนำเอาระบบ GNSS เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดียิ่งขึ้น เพื่อยกระดับการรังวัดด้วยเทคนิค RTK ให้มีความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้นเพียงพอสำหรับการรังวัดสำรวจที่ดิน สำหรับการศึกษานี้ในภาคสนาม Cuneyt Erenoglu (2017) ได้ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่อยู่อาศัยของประชาชนทั่วไป โดยใช้เทคนิควิธีการในการสำรวจที่แตกต่างกันโดยใช้จุดทดสอบ 4 จุดทดสอบคือ P1,P2,P3 และ P4 โดยแบ่งการทดสอบเป็นจำนวน 4 วิธีคือ 1) Static GNSS โดยทำการรังวัดจุดทดสอบทั้ง 4 จุด เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับการทดสอบนี้ โดยวิธีการ Static นั้นทำการรังวัดโดยการรับสัญญาณ GNSS ทุกๆ 30 วินาทีเป็นระยะเวลาานาน 4 ชั่วโมงในวันที่ 6 ตุลาคม 2013 และทำการ Post Processing ร่วมโดยการโยงยึดค่าพิกัดอ้างอิงจากสถานี ISTA ซึ่งเป็นสถานี IGS ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงเนื่องจากทำการรับสัญญาณ GNSS ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง จุดทดสอบทั้ง 4 จุดมีความยาวเส้นฐานประมาณ 108-295 เมตร และมีมุมกันฟ้า 5° 2) Classical RTK-GNSS (Single base) โดยออกแบบการทดสอบด้วยเทคนิคการ Fix Base Station และ Rover Athena โดยใช้จุดอ้างอิงด้วยค่าพิกัดของจุด P1 ,P2, P3 และ P4 และทำการรังวัดจุดบนพื้นที่ทั้งหมด 32 จุดที่เป็นมุมผืนที่ดิน ด้วย Rover โดยทำการรังวัดเป็นจำนวนจุดละ 10 ชุดข้อมูล 3) CORS RTK ด้วยวิธีการ VRS โดยใช้โครงข่าย CORS-TR ของสาธารณรัฐตุรกี โดยใช้ Rover ทำการรังวัด ณ เดียวกับวิธีการ Classical RTK (32 จุด) Rover โดยทำการรังวัดเป็นจำนวนจุดละ 10 ชุดข้อมูล แล้วเฉลี่ยเป็นค่าพิกัด 4) Conventional Terrestrial เป็นการสำรวจที่ดินโดยใช้ กล้อง Total Station ในการทำการทดสอบโดยใช้จุดอ้างอิงเช่นเดียวกับวิธีการ Classical RTK คือจุด P1 ,P2, P3 และ P4 และทำการรังวัด 32 จุด (จุดเดียวกับวิธี Classical RTK และ CORS RTK) จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าทั้ง 4 วิธีการนั้นสามารถให้ค่าความถูกต้องสำหรับการรังวัดที่ดินได้มีความสอดคล้องกันของค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง และพบว่า Classical RTK นั้นให้ค่าความถูกต้องดีกว่าวิธีการ CORS RTK เพียงเล็กน้อยเนื่องจากผลของระยะทางที่ใกล้กันของจุดอ้างอิง (จุด P1 ,P2, P3 และ P4) สำหรับการรังวัดด้วยกล้อง Total Station ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมนั้นเป็นวิธีการที่ใช้ระยะเวลานานในการปฏิบัติงานภาคสนาม แต่สามารถให้ค่าความถูกต้องดีกว่าวิธีการอื่นๆในพื้นที่ที่มีสิ่ง

ปลูกสร้างบดบังหรือพื้นที่ป่า และในส่วนของ Classical RTK และ CORS RTK จะให้ความถูกต้องได้ดีในพื้นที่โล่งแจ้งและสามารถลดระยะเวลาในการทำงานได้ดี

ธีทัต เจริญกัลัญญตา (2555) ได้ทำการศึกษาระบบ Network - Based Real Time Kinematic (NRTK) ในประเทศไทยโดยใช้แนวคิดสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ซึ่งได้มีการดำเนินงานมาตั้งแต่ปี 2551 โดยใช้ข้อมูลจากองค์กรต่างๆ ของประเทศไทย โดยใช้งานสถานีอ้างอิง (CORS) ทั้งหมด 11 สถานีในการศึกษาซึ่งเป็นสถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย โดยมีระยะห่างเฉลี่ยอยู่ที่ 60 กิโลเมตร โดยในการทำการทดสอบ Network RTK ด้วยเทคนิค VRS ใช้ระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2553 ถึงวันที่ 3 มีนาคม 2553 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 31 วันโดยทำการรังวัดต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง ทำการเก็บข้อมูลจีพีเอสทุกๆ 30 วินาที มีจำนวนข้อมูลทั้งสิ้น 89,280 ชุดข้อมูล โดยใช้ค่าอ้างอิงกับค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงที่สถานี CUSV ที่ตั้งอยู่ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นสถานี IGS ที่ทำการรังวัด 7 วัน (ทำการรังวัดตั้งแต่วันที่ 1 ถึง 7 กุมภาพันธ์ 2553) และผ่านการประมวลผลภายหลังแบบ Static ด้วยซอฟต์แวร์ Bernese 5.0 โดยจำแนกระยะห่างของสถานีฐานอ้างอิงแบ่งเป็น 4 วง (loop) ดังนี้ 1) 10 ถึง 20 กิโลเมตร 2) 30 ถึง 50 กิโลเมตร 3) 50 ถึง 60 กิโลเมตร 4) 60 ถึง 80 กิโลเมตร จากผลของการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของการทำงานของ NRTK เมื่อวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบดังนี้ 1) Ambiguity Fixing Rate 2) Rate of Positioning Jump และ 3) Root Mean Square Error (RMSE) จากการทดลองพบว่า NRTK จะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อระยะห่างเฉลี่ยของสถานีฐานเพิ่มขึ้น และพบว่า Ionospheric Bias นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ NRTK ของประเทศไทยอีกด้วย แม้ในระยะห่างของสถานีฐาน 10 ถึง 20 เมตรพบว่า Ambiguity Fixed solution ของ VRS ได้รับผลกระทบจาก Ionospheric Bias ดังนั้นในช่วงที่ High Ionospheric มีความแปรปรวนระยะห่างของสถานีอ้างอิงควรอยู่ต่ำกว่า 30 กิโลเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างยิ่งในแถบภูมิภาคละติจูดต่ำ เช่น ประเทศไทย

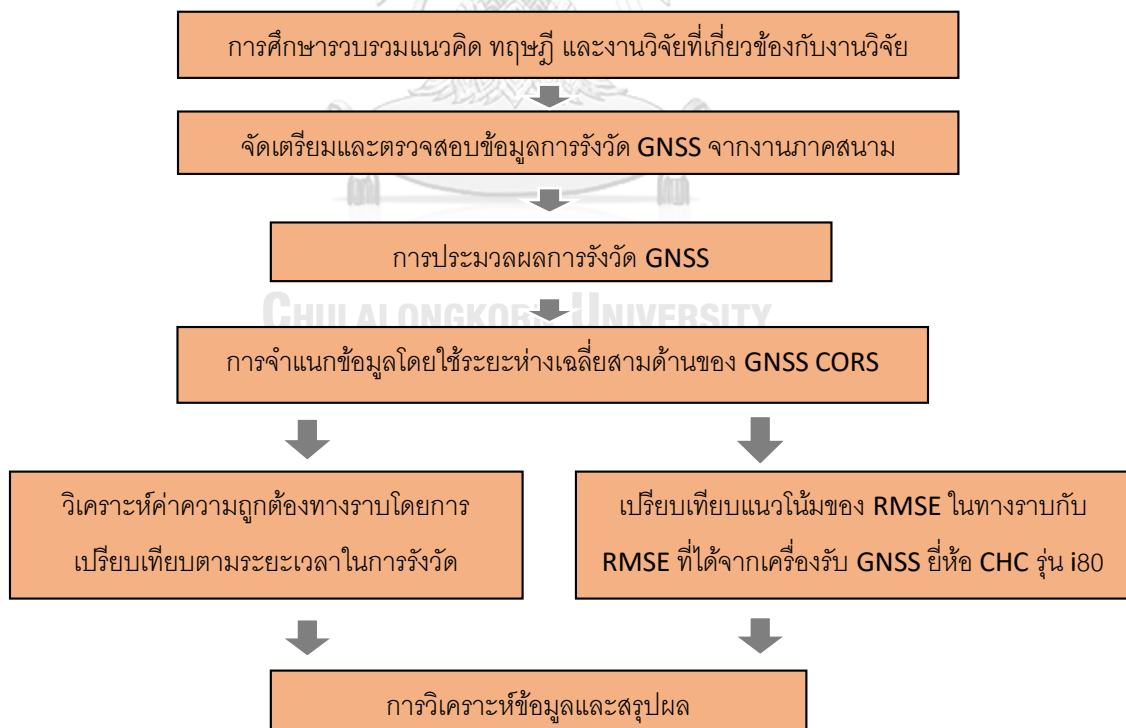
Koivula et al. (2018) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพโครงข่าย GNSS แบบกระจายสำหรับ RTK Network ในประเทศฟินแลนด์โดยใช้โครงข่ายของสถานี GNSS CORS ที่ชื่อว่า “FinnRef” โดยทำการแก้ไขการกำหนดค่าของสถานีโครงข่ายที่บริหารจัดการโดยกรมที่ดินของ

พินแลนด์ ที่ใช้ในการคำนวณ NRTK และใช้โครงข่ายเชิงพาณิชย์เพื่อทำการทดสอบ ทั้งในและนอกพื้นที่โครงข่ายโดยใช้เทคนิคการรับสัญญาณด้วย Network RTK ซึ่งประกอบด้วย เทคนิค PRS FKP และ MAC จากกรรมที่ดินของพินแลนด์ และเทคนิค VRS และ MAX จากหน่วยบริการเชิงพาณิชย์ซึ่งประกอบด้วยหน่วยบริหารจัดการของ Geotrim Oy และ LeicaGeosystems ในประเทศพินแลนด์ ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS 2 ประเภท Leica Viva GS14 และ Trimble R10 โดยเป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ GNSS ซึ่งในการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้ ผลของค่า RMS ในทางราบอยู่ในระดับ 16 มิลลิเมตร และทางตั้งอยู่ในระดับ 40 มิลลิเมตร ของโครงข่าย Trimnet ซึ่งเป็นการบริหารจัดการของ Geotrim Oy ในส่วนของโครงข่าย HxGN SmartNet ซึ่งเป็นของ LeicaGeosystems ผลของค่า RMS ในทางราบอยู่ในระดับ 23 มิลลิเมตร และทางตั้งอยู่ในระดับ 48 มิลลิเมตร และในส่วนของโครงข่ายของกรรมที่ดินของพินแลนด์นั้น ผลของค่า RMS ที่ดีที่สุดในทางราบอยู่ในระดับ 22 มิลลิเมตร และทางตั้งอยู่ในระดับ 56 มิลลิเมตร โดยจากผลสรุปบ่งชี้ว่าการแก้ไขปัญหาในการใช้งานระบบ Network RTK นั้นควรเพิ่มการกระจายตัวของโครงข่าย หรือเพิ่มจำนวนสถานี GNSS CORS ให้มากขึ้น และพบว่าการประมวลผลด้วยเทคนิคต่าง ๆ นั้นส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการรังวัด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษารังวัดดาวเทียม GNSS ที่ให้ค่าผิดพลาดในทางราบที่เหมาะสมโดยอาศัยการรังวัดด้วยวิธีการ Static และ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS เพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้รับจากเทคนิคสถานีอ้างอิงเสมือน สำหรับโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในเวลาจริง ของประเทศไทย โดยมีพื้นที่การศึกษาครอบคลุม 63 จังหวัดภายในประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการติดตั้งสถานีฐานรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องถาวรรวมทั้งสิ้น 114 สถานี โดยมีหน่วยงานของกรมที่ดินเป็นผู้รับผิดชอบ 99 สถานี และกรมโยธาธิการและผังเมือง 15 สถานี โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย การศึกษาทฤษฎี การจัดเตรียมข้อมูลและการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล การประมวลผลข้อมูลที่ได้ การจำแนกกลุ่มข้อมูล รวมถึงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่เหมาะสมในการรับสัญญาณดาวเทียม การวิเคราะห์ค่าความถูกต้องที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ที่ใช้ในการวิจัย และการวิเคราะห์และสรุปผล ซึ่งขั้นตอนการวิจัยจะแสดงในรูปที่ 11 โดยรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยจะประกอบด้วย



รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษารวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษเกี่ยวกับทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการรังวัดด้วยวิธีการ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS และวิธีการ Static โดยทำการศึกษาเทคนิค วิธีการรังวัด ประสิทธิภาพ และข้อจำกัดของการรังวัด GNSS ด้วยวิธีการข้างต้น รวมถึงศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบและตัวแปรที่มีผลต่อการรังวัด ทำการศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานสำหรับการรังวัดโดยอ้างอิงจากระเบียบการรังวัดที่ดินด้วย RTK GNSS Network และเพื่อให้มีความสอดคล้องกับงานวิจัย จะมีการปรับเปลี่ยนและประยุกต์เพื่อให้มีความเหมาะสมต่องานวิจัยและสภาพปัจจุบัน

3.2 จัดเตรียมและตรวจสอบข้อมูลการรังวัด GNSS จากงานภาคสนาม

ในการเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นข้อมูลจากโครงการ วิเคราะห์ และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ด้วยเทคนิค VRS ซึ่งเป็นความร่วมมือทางวิชาการ ระหว่างกรมที่ดินและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งข้อมูลภาคสนามที่ได้รับจากหน่วยงานรังวัดภาคสนามจากกรมที่ดินโดยข้อมูลภาคสนามที่ได้มีการเก็บข้อมูลระหว่างช่วงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ.2560 – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 โดยใช้จุดทดสอบทั้งหมด 2,122 จุดทดสอบ

3.2.1 การรังวัดด้วยวิธีการ Static

สำหรับการรังวัดด้วยวิธีการ Static ในการเก็บข้อมูลจะทำการรับสัญญาณ GNSS เป็นระยะเวลา 1.30 ชั่วโมง (90 นาที) และทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 30 วินาที

3.2.2 การรังวัดด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS

สำหรับการรังวัดด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ในการเก็บข้อมูลจะทำการรับสัญญาณ GNSS โดยทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 วินาทีและระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียม 60 วินาที ประกอบด้วย ชุดข้อมูลจำนวน 60 ชุด ทำการรังวัดซ้ำเป็นจำนวน 15 ครั้งโดยการรับสัญญาณครั้งที่ 8 กับครั้งที่ 9 มีระยะเวลาห่างกันไม่ต่ำกว่า 30 นาทีเป็นโดยใช้ระยะเวลารวมในการรังวัดทั้งหมด 15 นาที โดยวิธีการนี้จะทำการรังวัดพร้อมกับข้อ 3.2.1

3.2.3 ข้อมูลค่าความถูกต้อง (RMSE) ที่ได้จากเครื่องรับด้วยเทคนิค VRS

เป็นข้อมูลที่ได้จากการรังวัดด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ซึ่งได้มาจากการประมวลผลของซอฟต์แวร์ที่เครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 เก็บได้ โดยข้อมูลที่ได้จะได้มาจากข้อ 3.2.2

สำหรับค่าค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) นั้นใช้สำหรับเป็นตัวชี้วัดในทางสถิติที่ใช้ในการกำหนดมาตรฐานสำหรับเกณฑ์งานรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นที่หนึ่งโดยระบบ RTK GNSS Network ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึง ความถูกต้องของตำแหน่งเชิงพื้นที่จากการรับสัญญาณ GNSS โดยเกณฑ์ของ RMSE จะขึ้นอยู่กับมาตราส่วนของขนาดของแผนที่นั้นๆ สำหรับการประเมินความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบจะใช้การพิจารณาค่าต่างของค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ และค่าต่างของค่าพิกัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก ค่าพิกัดของจุดอ้างอิง (Ground Truth) และค่าพิกัดของจุดที่ต้องการทำการทดสอบ สำหรับการประเมินความถูกต้องในทางตั้งจะเป็นค่าต่างระหว่างความสูงเหนือทรงรี (Ellipsoidal Height) ระหว่างจุดอ้างอิง และจุดที่ทำการทดสอบ (FGDC, 1998)

3.3 การประมวลผลการรังวัด GNSS

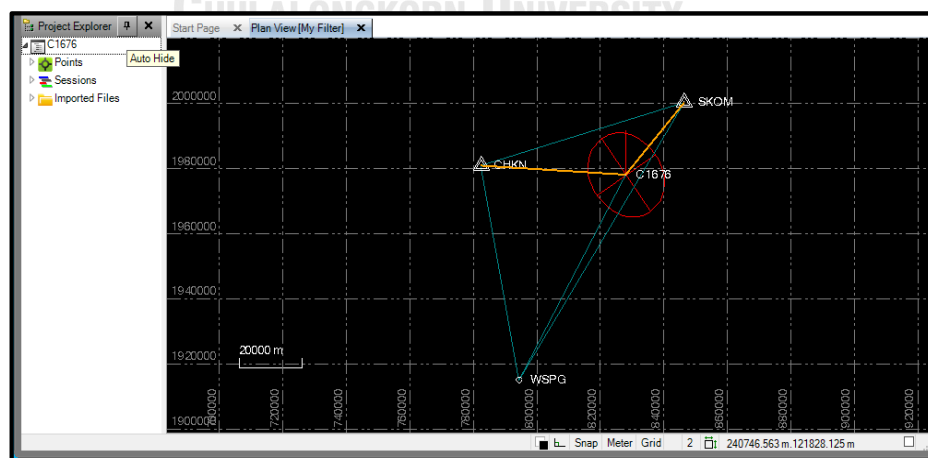
3.3.1 การประมวลผลภายหลังการรังวัดด้วยวิธีการ Static

โดยข้อมูลจากการรังวัดด้วย Static จะต้องทำการประมวลผลภายหลัง หรือที่เรียกว่า Post Process โดยซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลคือซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC 4.1) ดังแสดงในรูป 3.2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ และใช้ค่าแกว่งโคจรดาวเทียมแบบรายละเอียดสูง (Precise Orbit) จาก Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) เพื่อสำหรับใช้เป็นจุดอ้างอิงค่าพิกัด



รูปที่ 12 ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center 4.1 ที่ใช้ในการประมวลผลภายหลัง Static

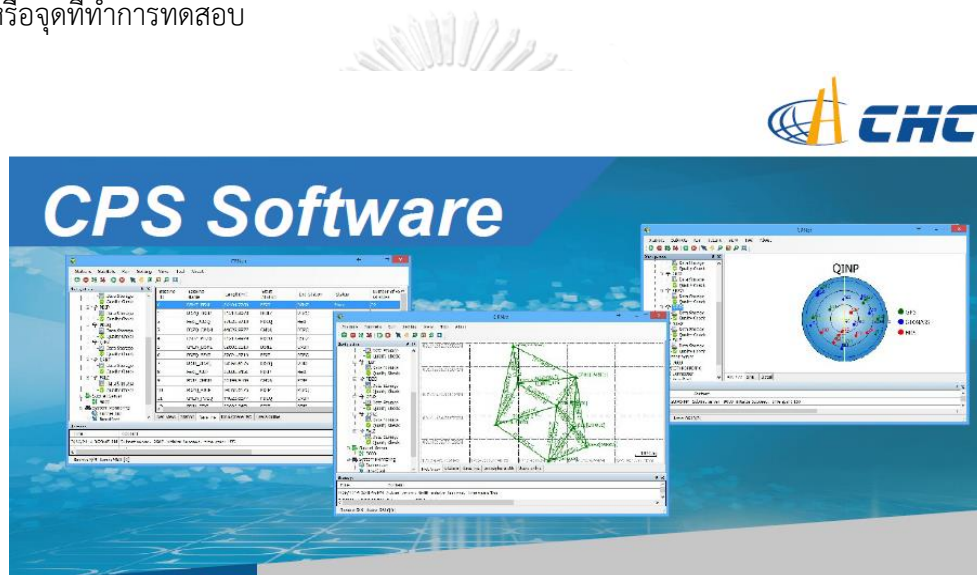
สำหรับในการประมวลผลภายหลังผลจุดที่ทำการทดสอบเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงนั้น เป็นการอ้างอิงค่าพิกัดจากสถานี GNSS CORS จำนวน 2 สถานีที่มีระยะใกล้กับจุดทดสอบมากที่สุด เพื่อให้ค่าความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้จากการรับสัญญาณฯ ด้วยวิธี Static มีค่าที่ดีกว่าเนื่องจากการรับสัญญาณด้วยวิธีดังกล่าวในด้านของระยะเส้นฐานที่ลดลงจะทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งสูงขึ้น (Okorocho & Olajugba, 2014) โดยในการวิจัยครั้งนี้ในการประมวลผลเส้นฐาน (Baseline Processing) จะมีการกำหนดเกณฑ์ค่า Horizontal Precision และ Vertical Precision ที่ระดับ 2 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยรายละเอียดการประมวลผลภายหลังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดงการประมวลผลภายหลัง Static โดยอ้างอิงค่าพิกัดจากสถานี GNSS CORS จำนวน 2 สถานีที่มีระยะใกล้กับจุดทดสอบมากที่สุด

3.3.2 การประมวลผล RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS

ในการรังวัดด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดจะอยู่ในรูปแบบ Real-Time โดยข้อมูลการรังวัดจะมาจากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ CHC Precision Service (CPS) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งการทำงานของซอฟต์แวร์นี้จะอาศัยการประมวลผลของส่วนกลาง หรือ Control Center จะทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลค่าแก้จากสถานีฐาน GNSS CORS ในโครงข่ายและทำการ Interpolate ค่าแก้เหล่านั้นและจะทำการส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารมาในรูปแบบ NMEA message และทำการส่ง ค่าแก้ผ่าน RTCM ไปยังเครื่องรับที่สถานีผู้ใช้หรือจุดที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 14 ซอฟต์แวร์ CHC Precision Service ที่ใช้ในการประมวลผลแบบ Real-Time สำหรับ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS

(<https://www.chcthailand.com/software>)

3.3.3 การประมวลผลและคำนวณค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

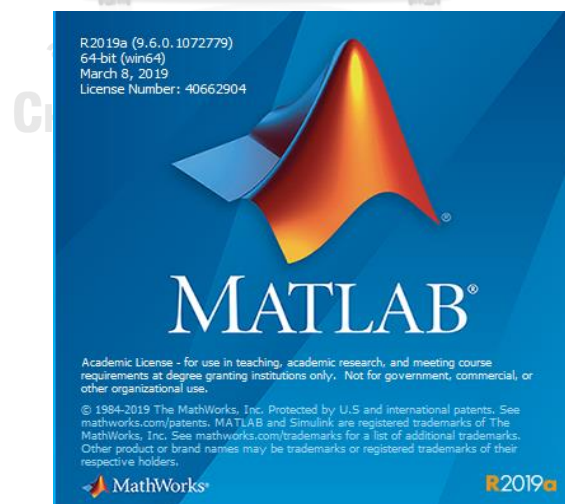
ในส่วนของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS โดยการรังวัดด้วยระบบ RTK GNSS Network ด้วยวิธี VRS ของกรมที่ดินนั้นได้มีการใช้งานเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ซึ่งเมื่อทำการรังวัดเสร็จเรียบร้อยแล้วในทุกๆชุดข้อมูล (Epoch) จะมีการเก็บค่า RMSE ที่ได้จาก การรังวัดในแต่ละ Epoch ไว้ในฐานข้อมูลแบบตาราง (Data Table) ในรูปแบบ .CSV (Comma-Separated Value) ซึ่งค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS นั้นเป็นการประมวลผลของซอฟต์แวร์ LandStar ที่ใช้สำหรับการรังวัดของบริษัทผู้ผลิต (กรมที่ดิน, 2561) ซึ่งเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ด้วย

วิธีการ VRS โดยใช้ระบบ RTK GNSS Network ของกรมที่ดินที่ใช้เป็นสถานีจร (Rover) ในการรับสัญญาณ ซึ่งเป็นเครื่องรับระบบ GNSS สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ทุกระบบ ได้แก่ GPS GLONASS Galileo BDS และ SBAS (CHCNAV, 2018) ซึ่งเป็นเครื่องรับ GNSS ที่ใช้งานโดยทั่วไปของกรมที่ดิน



รูปที่ 15 แสดงถึงอุปกรณ์ของเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

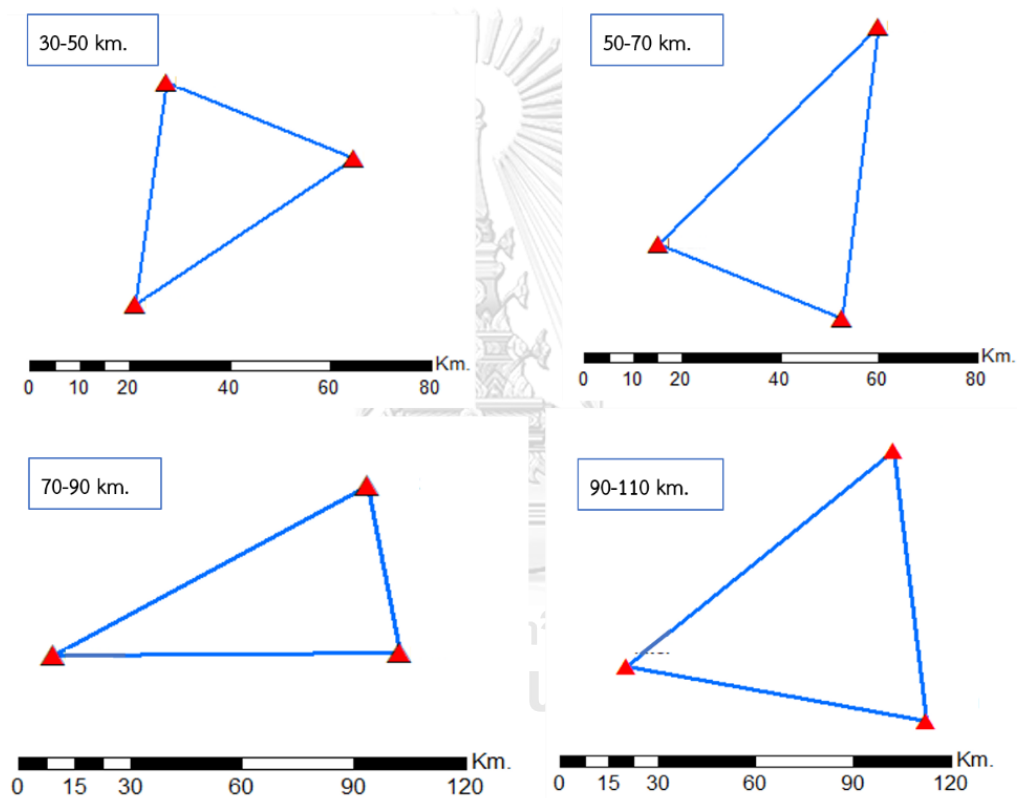
ภายหลังจากการประมวลผล จากข้อ 3.3.2 จะได้ไฟล์ข้อมูล Table Data ในรูปแบบ .CSV จากนั้นจะนำข้อมูลค่าความถูกต้องหรือค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 นำมาคำนวณเพื่อวิเคราะห์หาแนวโน้มของการรังวัด โดยใช้ซอฟต์แวร์ Matlab 2019 ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ซอฟต์แวร์ Matlab 2019 ที่ใช้ในการคำนวณค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

3.4 ทำการจำแนกข้อมูลโดยใช้ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS

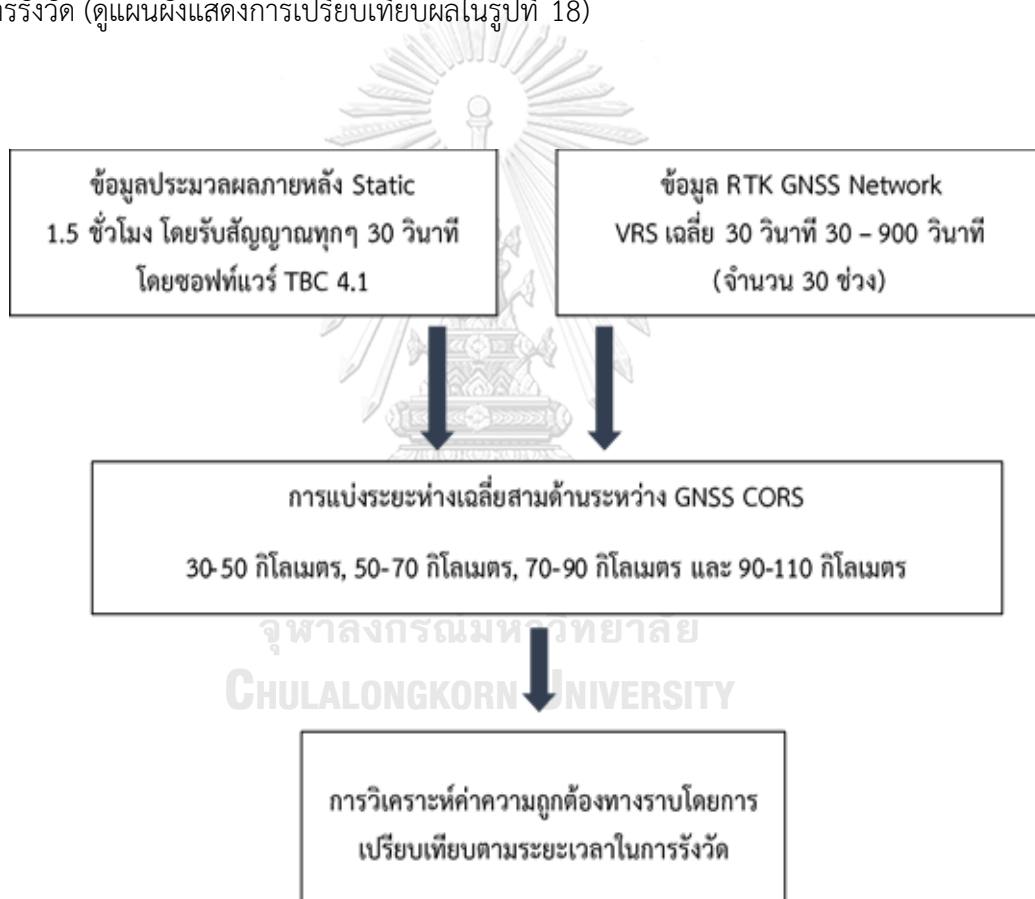
สำหรับการจำแนกข้อมูลจากข้อมูล 2,122 จุดทดสอบที่ทำการรังวัดด้วยวิธีการ Static และวิธีการ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS นั้นจะใช้การแบ่งชุดข้อมูลโดยอาศัยระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS หรือที่เรียกว่า ลูป จากทั้งหมด 114 สถานี โดยแบ่งเป็น 4 ระยะคือ ระยะ ดังนี้ ระยะห่างเฉลี่ยที่ (1) 30 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร (2) 50 กิโลเมตร ถึง 70 กิโลเมตร (3) 70 กิโลเมตร ถึง 90 กิโลเมตรและ (4) 90 กิโลเมตร ถึง 110 กิโลเมตร โดยรายละเอียดจะแสดงในรูปแบบที่ 17



รูปที่ 17 แสดงตัวอย่างของการจำแนกระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS (ลูป)

3.5 การวิเคราะห์ค่าความถูกต้องทางราบโดยการเปรียบเทียบตามระยะเวลาในการรังวัด

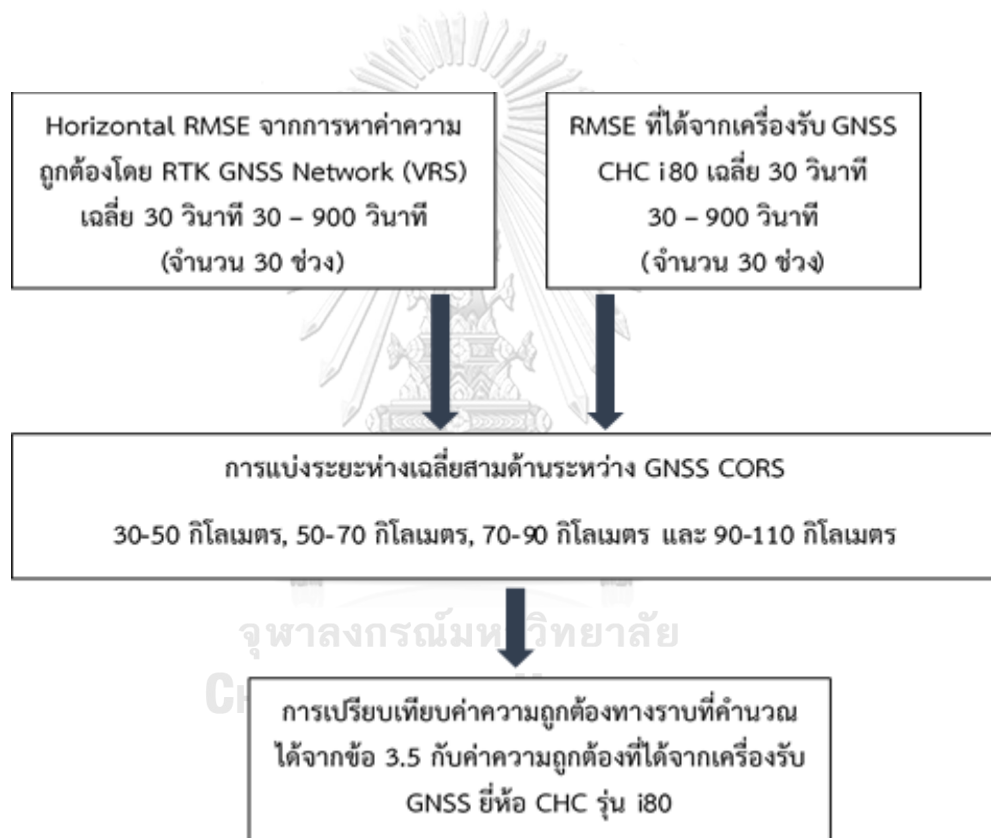
การเปรียบเทียบผลพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าพิกัดในทางราบจากค่า Root Mean Square Error และค่าความแปรปรวนของค่าพิกัดทางราบในระยะเวลา 30 วินาที 1 นาที 2 นาที และ 3 นาที โดยทำการแบ่งเกณฑ์ในการวิเคราะห์ด้วยระยะห่างเฉลี่ยระหว่างสถานีอ้างอิงเป็น 4 ระยะ (ตามที่ได้อธิบายในข้อ 3.1.3) เปรียบเทียบผลจากการรังวัดวิธี Static ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที กับผลจากการรังวัดวิธี RTK GNSS Network ด้วยแนวทาง VRS ที่ระยะเวลา 30 วินาที จำนวนชุดข้อมูล 30 ชุดข้อมูล และทำการเปรียบเทียบผลของทุกการรังวัดจนครบทุกระยะเวลาของการรังวัด (ดูแผนผังแสดงการเปรียบเทียบผลในรูปที่ 18)



รูปที่ 18 แสดงวิธีการและระยะเวลาในการเปรียบเทียบของการรังวัดแบบสถิต (Static) เป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมงและ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ที่ระยะเวลา 30 วินาที ถึง 900 วินาที (จำนวน 30 ช่วง)

3.6 การเปรียบเทียบแนวโน้มของ RMSE ในทางราบกับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

การเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองในทางราบกับมูลค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยรายละเอียดการวิเคราะห์เปรียบเทียบจะมาจากการหาค่าความถูกต้องทางราบในข้อ 3.5 (ดูแผนผังแสดงการเปรียบเทียบผลใน ตารางที่ 19) เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองว่ามีแนวโน้มอย่างไร



รูปที่ 19 แผนผังแสดงวิธีการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางราบที่คำนวณได้จากข้อ 3.5 กับค่าความถูกต้องที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 เปรียบเทียบโดยระยะเวลา 15 นาที (จำนวน 30 ช่วง)

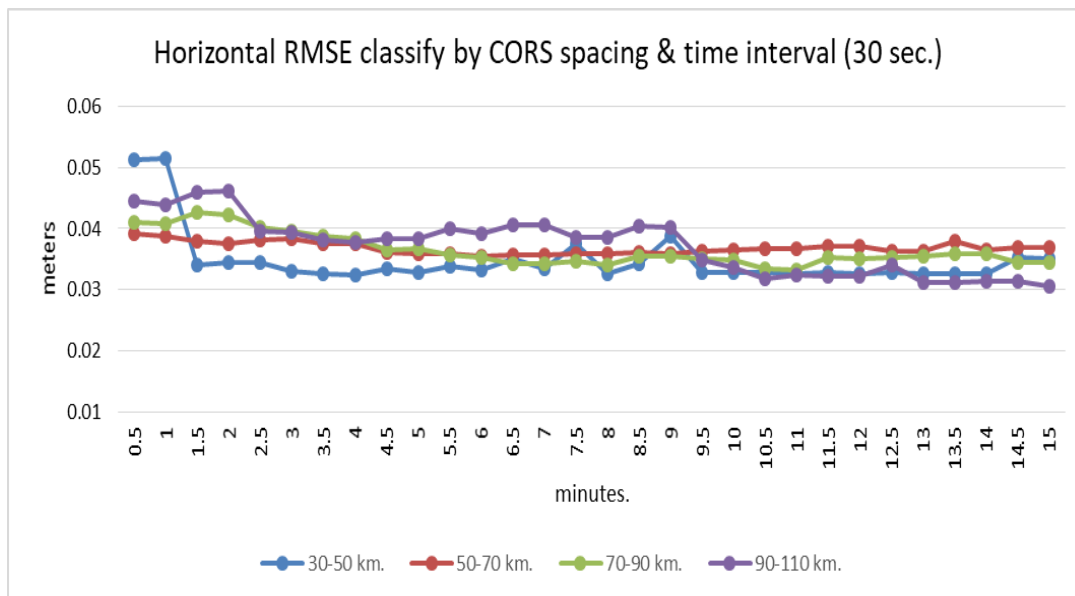
บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการศึกษาระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้จากสถานีอ้างอิงเสมือน สำหรับการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ โดยการนำค่าพิกัดทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยเทคนิค VRS ด้วย RTK GNSS Network มาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดทางราบที่ได้จากเทคนิค Static เพื่อหาค่า RMSE ในทางราบโดยเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที ตั้งแต่ระยะเวลา 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที โดยมีจำนวนชุดข้อมูล 30 ชุดข้อมูล และนำค่า RMSE ที่ได้รับมาเปรียบเทียบกับค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยแบ่งตามระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS (ลูป) และแนวโน้มของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 จะได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบโดยเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ทำการรังวัดตั้งแต่ระยะเวลา 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที โดยมีจำนวนชุดข้อมูล 30 ชุดข้อมูล

จากการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบโดยวิเคราะห์ด้วยค่า RMSE จากเกณฑ์งานแผนที่ชั้นที่ 1 โดยผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดในทางราบโดยใช้เกณฑ์การวิเคราะห์จากข้อ 3.5 ดังแสดงรายละเอียดตามภาพที่ 20



รูปที่ 20 แสดงกราฟการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบโดยเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ทำการรังวัดตั้งแต่ระยะเวลา 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที (30 ชุดข้อมูล) โดยแบ่งตามระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS

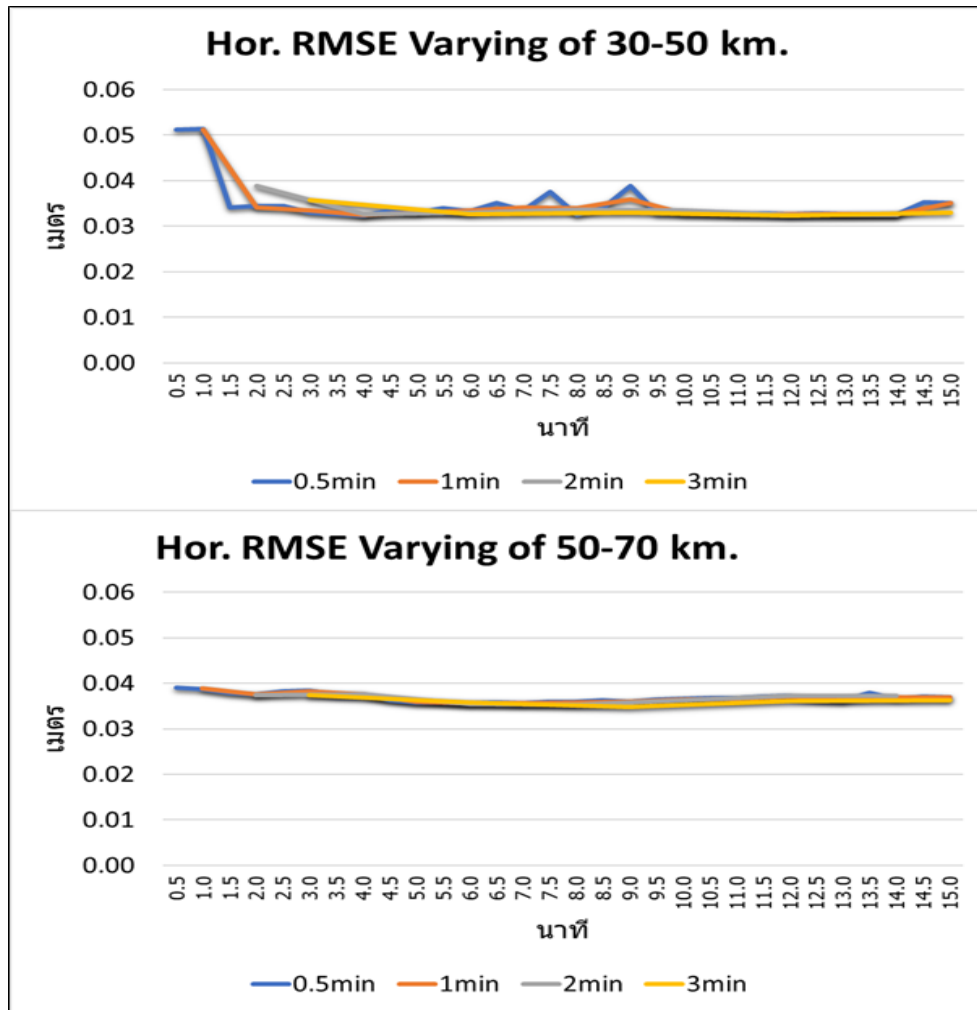
จากรูปที่ 20 แสดงผลการประเมินค่า RMSE ในทางราบของทุกขนาดลูปของระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS ของค่าเฉลี่ยของ RMSE ในทางราบทุกๆ 30 วินาที โดยเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่า RMSE ในทางราบของทุกขนาดลูปจะอยู่ในระดับในระดับที่ดีกว่า 4 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาที่ลูปขนาด 30 ถึง 50 กิโลเมตร มีค่า RMSE ในทางราบสูงสุดอยู่ในระดับ 5.1 เซนติเมตร และเมื่อระยะเวลาที่ 2 นาที จนกระทั่งระยะเวลาที่ 15 นาที ค่า RMSE ในทางราบจะอยู่ในระดับที่ดีกว่า 4 เซนติเมตร โดยค่าเฉลี่ยที่ระยะเวลา 15 นาทีของ RMSE ในทางราบของลูปนี้จะอยู่ในระดับ 3.2 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาที่ลูปขนาด 50 ถึง 70 กิโลเมตร มีค่า RMSE ในทางราบที่ระยะเวลา 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที ซึ่งทุกช่วงเวลาอยู่ในระดับ 4 เซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ยของ RMSE ในทางราบที่ระยะเวลา 15 นาที อยู่ในระดับ 3.5 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาที่ลูปขนาด 70 ถึง 90 กิโลเมตร ที่ระยะเวลา 30 วินาที ถึง 2 นาที มีค่า RMSE ในทางราบเกิน 4 เซนติเมตร และเมื่อระยะเวลา 3 นาที จนกระทั่ง 15 นาที ค่า RMSE ในทางราบของลูปนี้จะมีค่าอยู่ในระดับ 4 เซนติเมตร โดยที่ค่าเฉลี่ยของ RMSE ในทางราบที่ระยะเวลา 15 นาทีลูปนี้อยู่ในระดับ 3.5 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาที่ลูปขนาด 90 ถึง 110 กิโลเมตร ที่ระยะเวลา 2 นาทีแรก พบว่ามีค่า RMSE ในทางราบสูงสุดในระดับ

4.5 เซนติเมตร และระยะเวลาที่ 3 นาที จนกระทั่ง 15 นาทีมีค่า RMSE ในทางราบอยู่ในระดับ 4 เซนติเมตร โดยที่ค่าเฉลี่ยของ RMSE ในทางราบที่ระยะเวลา 15 นาทีที่ลู่ป็นี้อยู่ในระดับ 3.5 เซนติเมตร

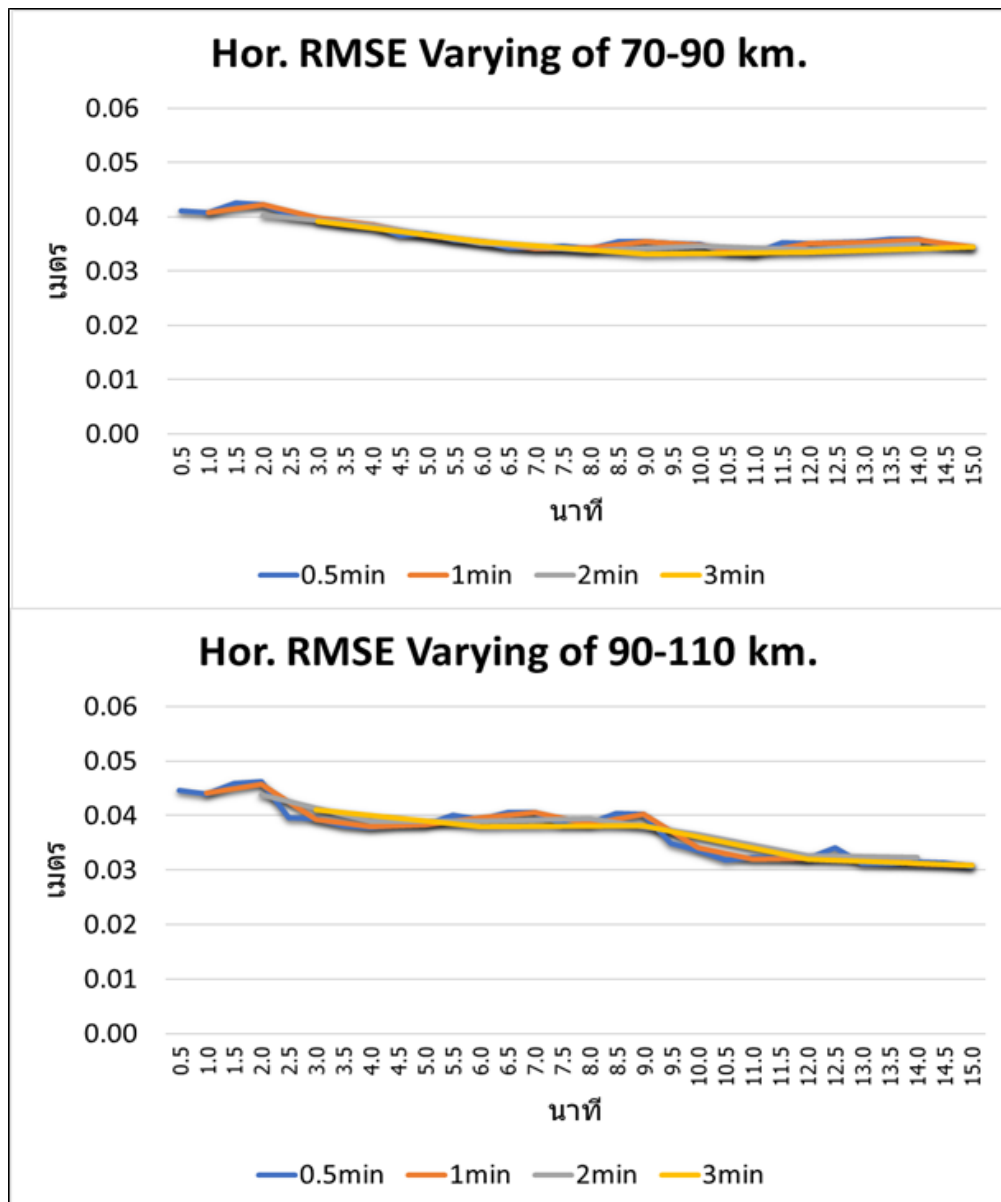
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า RMSE ในทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยวิธีการ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS จะแปรผกผันกับระยะเวลาที่ทำการรังวัด และแปรผันตามขนาดของลู่ของ ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS โดยเมื่อทำการรับสัญญาณในระยะเวลาสั้นจะทำให้ค่ามีความเหวี่ยงของค่าพิกัด และเมื่อรับสัญญาณเป็นระยะเวลานานขึ้นค่าจะค่อยๆลดลงและคงที่

4.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของระยะเวลาการรับสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS

เป็นการศึกษาค่าความแปรปรวนของค่าพิกัดทางราบในระยะเวลา 30 วินาที 1 นาที 2 นาที และ 3 นาทีโดยเป็นค่าเฉลี่ยของค่า RMSE ในทางราบ (ที่ระยะเวลา 30 วินาที จำนวน 30 ชุดข้อมูล, ระยะเวลา 1 นาที 15 ชุดข้อมูล, ระยะเวลา 2 นาที 7 ชุดข้อมูลและ ระยะเวลา 3 นาที จำนวน 5 ชุดข้อมูล) เพื่อหาความเหมาะสมของระยะเวลาในการรับสัญญาณด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS โดยแบ่งตามระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS โดยระยะ 30-50 กิโลเมตรและ 50-70 กิโลเมตร โดยผลการศึกษาที่มีรายละเอียดดังภาพที่ 4.2 โดยระยะ 70-90 กิโลเมตร และ 90-110 กิโลเมตรโดยผลการศึกษาที่มีรายละเอียดดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงกราฟแสดงกราฟค่าเฉลี่ย RMSE ของตำแหน่งทางราบของขนาดลูป 30-50 และ 50-70 กิโลเมตร สำหรับการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วย RTK GNSS Network ของเทคนิค VRS ของระยะเวลาการรับสัญญาณ 0.5, 1, 2 และ 3 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 22 แสดงกราฟแสดงกราฟค่าเฉลี่ย RMSE ของตำแหน่งทางราบของขนาดลู่ 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร สำหรับการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วย RTK GNSS Network ของเทคนิค VRS ของระยะเวลาการรับสัญญาณ 0.5, 1, 2 และ 3 นาที ตามลำดับ

จากรูปที่ 21 และ 22 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมความเหมาะสมของระยะเวลาการรับสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS โดย

เมื่อพิจารณาที่ขนาดลูป 30 ถึง 50 กิโลเมตร (พิจารณาที่รูป 21) พบว่าที่ระยะเวลา 30 วินาที และ 1 นาที ในช่วงแรก (1 นาทีแรก) มีค่า RMSE ในทางราบเกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อระยะเวลารวมในการรับสัญญาณโดยวิธีการ VRS ที่ 2 นาที และ 3 นาที จะมีค่า RMSE ในทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร และพบว่าระยะเวลารวมในการรับสัญญาณ GNSS ที่มีระยะเวลานานกว่าจะทำให้ค่าความแปรปรวนในค่าพิกัดทางราบลดลง

เมื่อพิจารณาที่ขนาดลูป 50 ถึง 70 กิโลเมตร (พิจารณาที่รูป 21) พบว่าที่ระยะเวลารวมในการรับสัญญาณสัญญาณโดยวิธีการ VRS ที่ระยะเวลา 30 วินาที, 1 นาที, 2 นาที, และ 3 นาที ในทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร และพบว่าระยะเวลารวมในการรับสัญญาณ GNSS ที่มีระยะเวลานานกว่าจะทำให้ค่าความแปรปรวนในค่าพิกัดทางราบลดลง

เมื่อพิจารณาที่ขนาดลูป 70 ถึง 90 กิโลเมตร (พิจารณาที่รูป 22) พบว่าที่ระยะเวลา 30 วินาที และ 1 นาที ในช่วง 2 นาทีแรก มีค่า RMSE ในทางราบเกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อระยะเวลารวมในการรับสัญญาณโดยวิธีการ VRS ที่ 2 นาที และ 3 นาที จะมีค่า RMSE ในทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร และพบว่าระยะเวลารวมในการรับสัญญาณ GNSS ที่มีระยะเวลานานกว่าจะทำให้ค่าความแปรปรวนในค่าพิกัดทางราบลดลง

เมื่อพิจารณาที่ขนาดลูป 90 ถึง 110 กิโลเมตร (พิจารณาที่รูป 22) พบว่าที่ระยะเวลา 30 วินาที, 1 นาที, 2 นาที และ 3 นาที ในช่วง 3 นาทีแรก มีค่า RMSE ในทางราบเกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อระยะเวลารวมในการรับสัญญาณโดยวิธีการ VRS ภายหลังจาก 3 นาทีแรก จะมีค่า RMSE ในทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร และพบว่าระยะเวลารวมในการรับสัญญาณ GNSS ที่มีระยะเวลานานกว่าจะทำให้ค่าความแปรปรวนในค่าพิกัดทางราบลดลง

จากการรับสัญญาณ GNSS ด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ที่ทุกขนาดลูป (30 ถึง 50, 50 ถึง 70, 70 ถึง 90 และ 90 ถึง 110 กิโลเมตร) พบว่าระยะเวลารวมในการรับสัญญาณ GNSS โดยใช้เทคนิค VRS ที่มีระยะเวลานานกว่าจะช่วยลดความแปรปรวนของค่าพิกัดในทางราบได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลารวมที่รับสัญญาณ ที่ 30 วินาที, 1 นาที, 2 นาที และ 3 นาที ตามลำดับ และในส่วนของค่า RMSE ในทางราบที่ระดับ 4 เซนติเมตร สำหรับการรังวัดที่ดินซึ่งต้องการค่าความคาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งในทางราบ (Horizontal RMSE) ที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร พบว่าระยะเวลารวมสำหรับการรับสัญญาณ GNSS ที่ระยะ 2 นาที และ 3 นาที ของลูปขนาด 30 ถึง 50, 50 ถึง 70 และ 70 ถึง 90 กิโลเมตร มีค่า RMSE ในทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร แต่ในส่วนของ

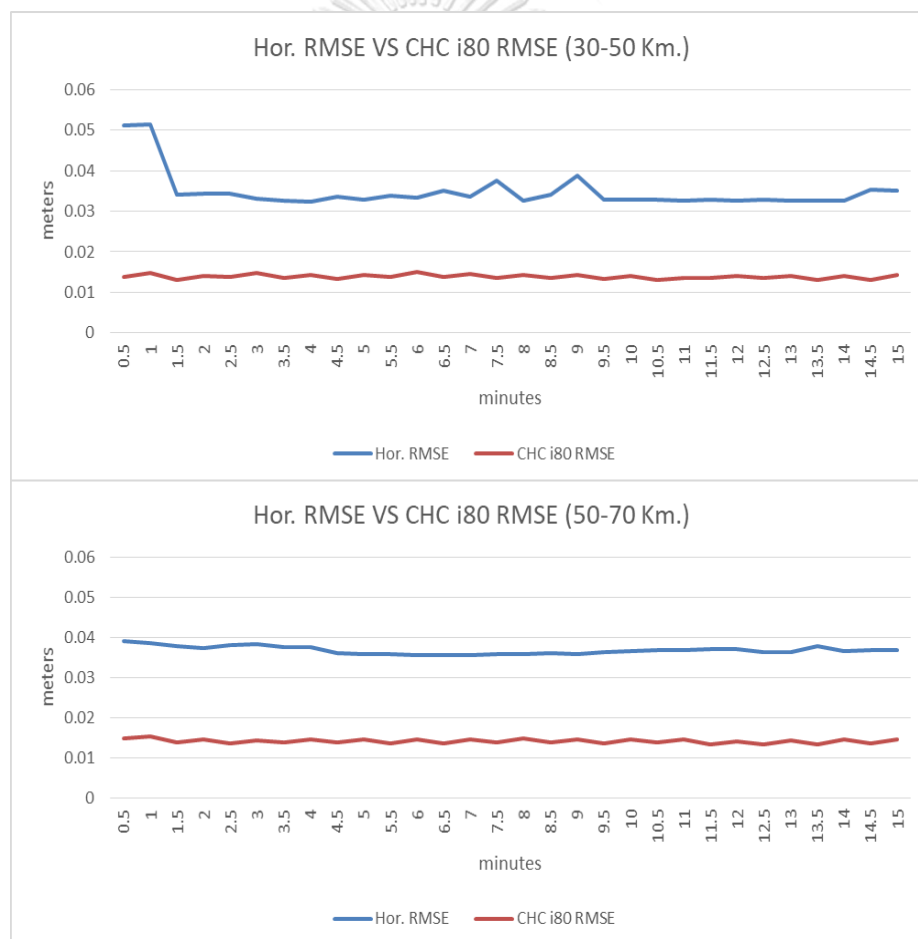
ขนาดลูป 90 ถึง 110 กิโลเมตรที่ในทุกๆระยะเวลาสำหรับการรับสัญญาณ GNSS มีค่า RMSE ในทางราบเกินกว่า 4 เซนติเมตร โดยเมื่อพิจารณาจากระยะเวลารวมในการรับสัญญาณ GNSS แล้วพบว่า ที่ระยะเวลา 2 นาที และ 3 นาที นั้นจะให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งในทางราบที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในด้านงบประมาณ ด้านระยะเวลาในการรังวัด ในด้านการจัดการทรัพยากรบุคคล สำหรับงานรังวัดที่ต้องการความถูกต้องของตำแหน่งทางราบที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร อาทิเช่น งานรังวัดด้วยวิธีการแผนที่ชั้นหนึ่งด้วย RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS สำหรับการรังวัดที่ดิน สามารถรับสัญญาณ GNSS ที่ระยะเวลารวม 2 นาที แทนที่ระยะเวลารวม 3 นาทีได้ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เนื่องจากที่ขนาดลูป 30 ถึง 50 กิโลเมตรนั้นมีความแปรปรวนอยู่ในช่วงระหว่าง 30 วินาที ถึง 1 นาที (พิจารณาจากรูปที่ 21) อาจเกิดจากผลกระทบอันเนื่องมาจากบริเวณที่ใช้เป็นจุดทดสอบนั้นมีที่ตั้งอยู่บริเวณคอสะพาน ในระหว่างมีการรับสัญญาณฯ มียานพาหนะเคลื่อนผ่านในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งเป็นจุดทดสอบที่ทำให้เกิดค่ากระโดดของค่าพิกัดเกิดขึ้น และทำให้ค่า RMSE ในทางราบมีค่าสูงขึ้นอย่างผิดปกติ (พิจารณาจากรูปที่ 23)



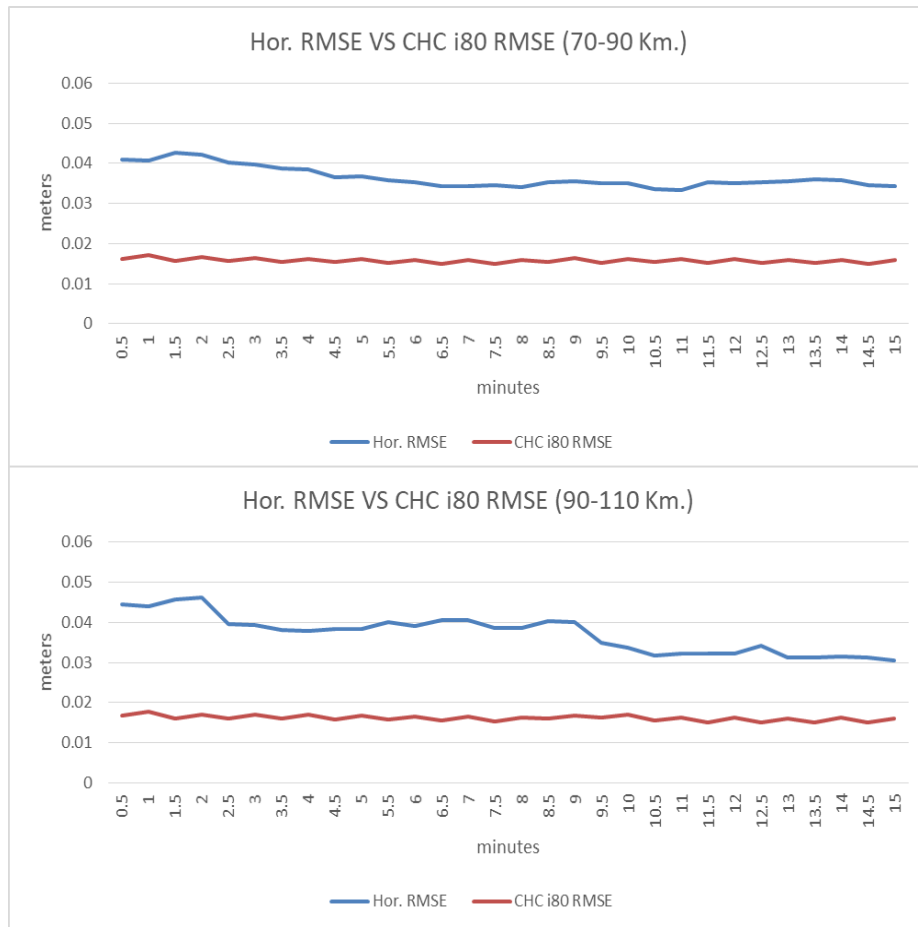
รูปที่ 23 แสดงการรับสัญญาณฯ ณ จุด C0164 เป็นจุดทดสอบในระยะลูป 30-50 กิโลเมตร

4.3 ผลการเปรียบเทียบค่า Horizontal RMSE กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

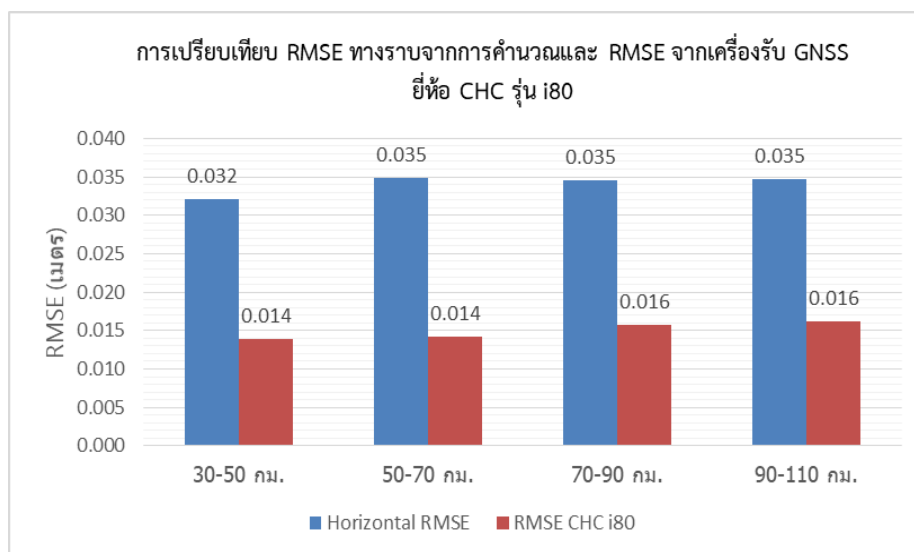
ผลการเปรียบเทียบระหว่างตัวชี้วัดทางสถิติทั้งสองโดยใช้การจำแนกตามระยะห่างเฉลี่ยของระยะห่างเฉลี่ยสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรสามด้านตามข้อ 3.6 โดยค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วินาที (แบ่งเป็น 30 ชุดข้อมูล) เพื่อหาแนวโน้มของตัวชี้วัดทั้งสอง โดยแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 23 และรูปที่ 24 และผลการเปรียบเทียบ RMSE ทางราบจากการคำนวณและ RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาทีโดยแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 25



รูปที่ 24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Horizontal RMSE กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยแบ่งเป็นระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล) ที่ระยะขนาดลูป 30-50 และ 50-70 กิโลเมตร



รูปที่ 25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Horizontal RMSE กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยแบ่งเป็นระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล) ที่ระยะขนาดรูป 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร



รูปที่ 26 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่าง RMSE ทางราบ และ RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาที ที่ทุกระยะขนาดลูบ

จากรูปที่ 24, 25 และ 26 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า Horizontal RMSE กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบระหว่างทั้ง 2 ตัวชี้วัด (พิจารณาจากรูปที่ 24 และ 25) โดยที่ทุกขนาด (30 ถึง 50, 50 ถึง 70, 70 ถึง 90 และ 90 ถึง 110 กิโลเมตร) ค่าเฉลี่ยของ RMSE ในทางราบอยู่ในระดับ 4 เซนติเมตร และในส่วนของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับ 2 เซนติเมตร

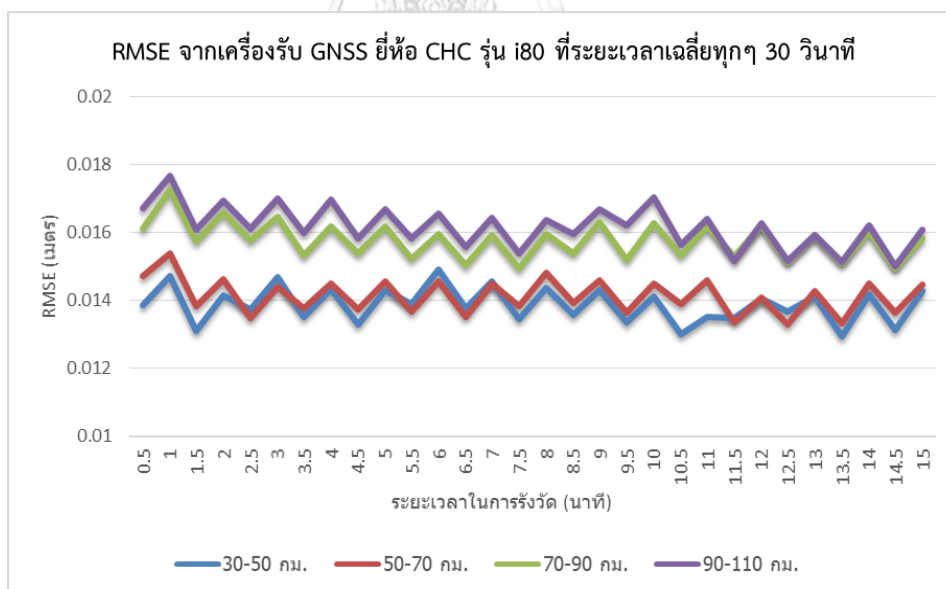
ในการรับสัญญาณ GNSS เฉลี่ยรวม 15 นาทีที่ขนาดของลูบ 30-50 และ 50-70 กิโลเมตรมีค่า RMSE ของเครื่องรับอยู่ที่ 0.014 เมตร และสำหรับขนาดของลูบ 70-90 และ 90-110 กิโลเมตรมีค่า RMSE ของเครื่องรับ คือ 0.016 เมตร โดยค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับที่ขนาดลูบ 30-50 และ 50-70 มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าต่างกับระยะลูบ 70-90 และ 90-110 กิโลเมตรอยู่ในระดับ 2 มิลลิเมตร สามารถสรุปได้ว่าค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของลูบ

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า RMSE ในทางราบ กับ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ในการรับสัญญาณ GNSS ด้วย RTK GNSS Network ที่ระยะเวลาการรับสัญญาณรวมเฉลี่ย 15 นาที (พิจารณาจากรูปที่ 26) เมื่อพิจารณาโดยใช้ตัวคูณมาตราส่วน (Scale factor) พบว่าที่

ลูบขนาด 30 ถึง 50 กิโลเมตรมีในส่วนของค่า RMSE ในทางราบมีค่า 2.31 เท่าของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับฯ ที่ลูบขนาด 50 ถึง 70 กิโลเมตรมีในส่วนของค่า RMSE ในทางราบมีค่า 2.47 เท่าของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับฯ ที่ลูบขนาด 70 ถึง 90 กิโลเมตรมีในส่วนของค่า RMSE ในทางราบมีค่า 2.19 เท่าของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับฯ ที่ลูบขนาด 30 ถึง 50 กิโลเมตรมีในส่วนของค่า RMSE ในทางราบมีค่า 2.14 เท่าของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับฯ และค่าตัวคูณมาตราส่วนเฉลี่ยที่ทุกขนาดลูบมีค่าเท่ากับ 2.27 เท่าของค่า RMSE ของเครื่องรับฯ

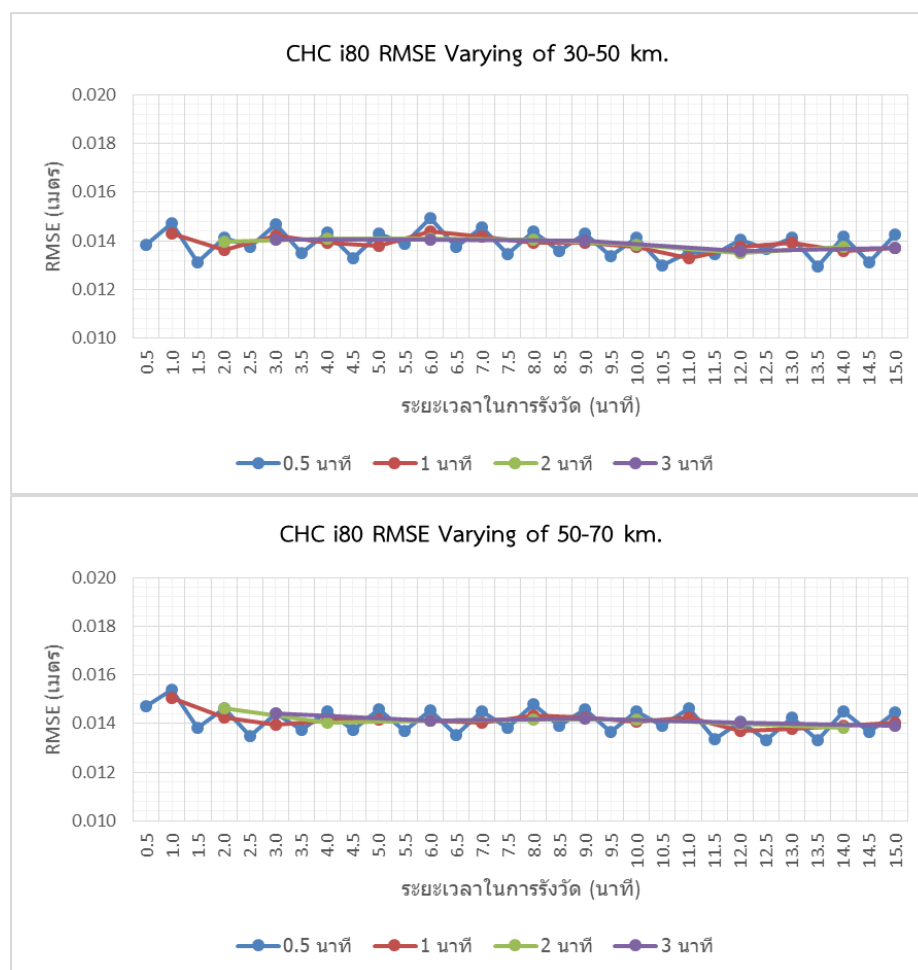
4.4 ผลการวิเคราะห์ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

จากการวิเคราะห์แนวโน้มของค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 โดยวิเคราะห์จากค่าเฉลี่ยของ RMSE จากระยะห่างเฉลี่ยสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรสามด้านที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ที่ระยะเวลาทุกๆ 30 วินาที แสดงรายละเอียดตามรูปที่ 27 และการประเมินความเหมาะสมของระยะเวลาทำการรังวัดที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที 1 นาที 2 นาที และ 3 นาที ตามลำดับ แสดงรายละเอียดตามรูปที่ 28 และรูปที่ 29

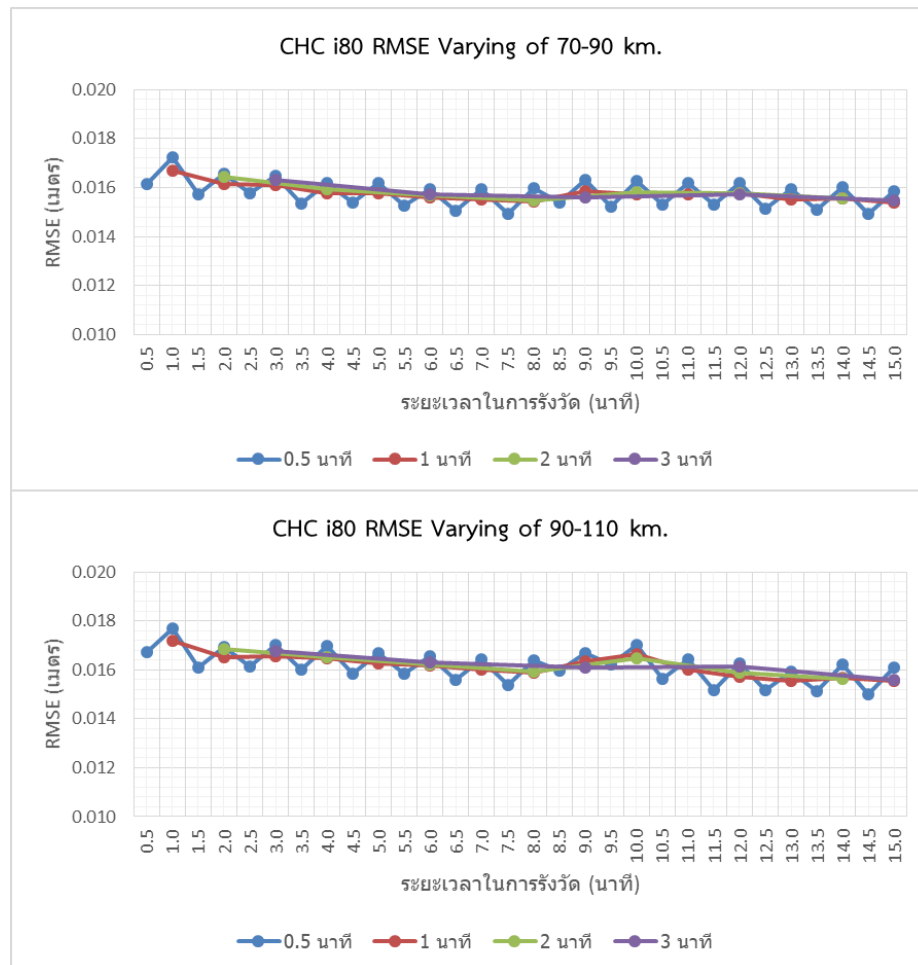


รูปที่ 27 กราฟแสดงแนวโน้มของค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที

จากการพิจารณาแนวโน้มของ RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที (พิจารณาจากรูปที่ 26) ในระยะเวลา 1 นาทีแรก ที่ทุกขนาดของรูป ให้ค่าที่สูงที่สุดจากการรังวัดทั้งหมด และค่า RMSE จะลดลงและค่อยๆคงที่ สามารถสรุปได้ว่าการรังวัดด้วยเครื่องรับ GNSS รุ่นนี้ ค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับจะลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และในส่วนของระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS ก็มีผลกับค่า RMSE ที่เครื่องรับกล่าวคือเมื่อระยะรูปที่มากขึ้นค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ในส่วนของค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับนั้นต่างกันไม่มากเพียงระดับ มิลลิเมตรเท่านั้น



รูปที่ 28 กราฟแสดงการประเมินความเหมาะสมของ RMSE ของเครื่องรับ GNSS ที่ระยะเวลาทำการรังวัดที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที 1 นาที 2 นาทีและ 3 นาทีตามลำดับ ที่ลูประยะ 30-50 กม. และ 50-70 กม.



รูปที่ 29 กราฟแสดงการประเมินความเหมาะสมของ RMSE ของเครื่องรับ GNSS ที่ระยะเวลาทำการรังวัดที่ระยะเวลาเฉลี่ยทุกๆ 30 วินาที 1 นาที 2 นาทีและ 3 นาทีตามลำดับ ที่ลูประยะ 70-90 กม. และ 90-110 กม.

จากการพิจารณาที่ทุกขนาดลูป (ดูรูปที่ 28 และ 29 ประกอบ) ระยะเวลารวมของการรับสัญญาณ GNSS รวมด้วยวิธี VRS ที่ 30 วินาที 1 นาที 2 นาที และ 3 นาที ที่ 30 วินาที ค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับจะมีความแปรปรวนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุด

บทที่ 5

บทสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การทำการศึกษาระยะเวลาในรังวัดที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการใช้งานตามเกณฑ์งานรังวัดในด้านต่างๆ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMSE ที่ได้จากการประเมินค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบกับค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร โดยการศึกษาจากข้อมูลจุดทดสอบจำนวน 2,122 จุด จากสถานีอ้างอิงสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (GNSS CORS) ของกรมที่ดินจำนวน 114 สถานี จุดอ้างอิงใช้การรังวัดแบบ Static และใช้เป็นค่าพิภคอ้างอิง (Ground Truth) สำหรับการศึกษเปรียบเทียบผลจากการรังวัดโดย RTK GNSS Network ด้วยวิธี VRS ที่รังวัดในระยะเวลา (Measurement interval) ตั้งแต่ 30 วินาที จนกระทั่ง 15 นาที (หรือ 900 วินาที) โดยเพิ่มระยะเวลาของการรังวัดครั้งละ 30 วินาที กล่าวคือ ประกอบด้วยจำนวนครั้งของการวัดทั้งหมด คือ 30 ครั้ง จำนวนชุดข้อมูลเทียบเท่ากับระยะเวลาของการวัดในแต่ละครั้ง กล่าวคือ ข้อมูล 1 ชุด (Measurement epoch) คือ ระยะเวลาการวัดที่ 1 วินาที เกณฑ์ในการวิเคราะห์ที่แบ่งด้วยระยะห่างเฉลี่ยสามด้านระหว่าง GNSS CORS โดยแบ่งออกเป็น 4 ระยะ ดังนี้ ระยะห่างเฉลี่ยที่ (1) 30 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร (2) 50 กิโลเมตร ถึง 70 กิโลเมตร (3) 70 กิโลเมตร ถึง 90 กิโลเมตร และ (4) 90 กิโลเมตร ถึง 110 กิโลเมตร โดยผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ 4 ประการดังต่อไปนี้

5.1.1 สำหรับในการรับสัญญาณ GNSS สำหรับวิธี RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 2 นาที และ 3 นาที สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องของค่าพิภคในทางราบในระดับ 4 เซนติเมตรได้ที่ระยะของขนาดรูป 30 ถึง 50, 50 ถึง 70 และ 70 ถึง 90 กิโลเมตร ส่วนที่ระยะรูปขนาด 90 ถึง 110 กิโลเมตรจะสามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบในระดับ 5 เซนติเมตร

5.1.2 สำหรับระยะเวลาในการรับสัญญาณ GNSS สำหรับวิธีการ RTK GNSS Network ด้วยเทคนิค VRS ที่ระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 2 นาที สามารถนำไปใช้ในงานรังวัดเกี่ยวกับแปลงที่ดินได้เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในทางราบที่ต่ำกว่า 4 เซนติเมตร แต่ต้องพิจารณาในเรื่องของระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานีรับสัญญาณจีเอ็นเอสแบบต่อเนื่องถาวรที่มีระยะไม่เกิน 90 กิโลเมตร ซึ่งอาจจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในทางราบที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร

5.1.3 ในการใช้ค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับในการพิจารณาคุณภาพของข้อมูลจากการรังวัด ภายหลังจากการรังวัดในทันที สามารถนำไปใช้พิจารณาค่าความถูกต้องของตำแหน่งในทางราบได้ จากผลการเปรียบเทียบค่า RMSE ในทางราบ และค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC i80 นั้นค่าตัวคูณมาตราส่วน (Scale Factor) อยู่ที่ 2.27 สำหรับการใส่ค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับคือ เมื่อต้องการหาค่าความถูกต้องของค่าพิกัดในทางราบ

5.1.4 ค่า RMSE ในทางราบ และค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 นั้น มีแนวโน้มที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน กล่าวคือจะแปรผันตรงกับระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานีรับ สัญญาณจีเอ็นเอสแบบต่อเนื่องถาวร โดยจะมีค่ามากขึ้นตามขนาดของรูป และแปรผันแบบผกผันกับระยะเวลาที่ทำการรับสัญญาณ GNSS โดยจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาที่ทำการรับสัญญาณ GNSS มากขึ้น

5.2 ข้อจำกัดและปัญหาที่พบ

5.2.1 จากในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้ข้อมูลการรับสัญญาณ GNSS ด้วยเทคนิคต่างๆ เป็นจำนวนมากเนื่องจากจุดทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์มีทั้งหมด 2,122 ทดสอบ ในกระบวนการประมวลผลภายหลัง และการวิเคราะห์ข้อมูลจำเป็นต้องใช้ระยะเวลามาก รวมถึงต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลและทำการจัดการข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน

5.2.2 ในการรับสัญญาณด้วย RTK GNSS Network โดยเทคนิค VRS ก่อนที่จะทำการรับสัญญาณเพื่อนำมาวิเคราะห์ระยะเวลานั้นจำเป็นต้องให้เครื่องรับสามารถ Fix Ambiguity ได้ก่อน ดังนั้นในบางพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวยหรือมีสิ่งบดบังสัญญาณ ส่งผลกระทบต่อการดำเนินงาน

5.2.3 เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้งานสถานี GNSS CORS ของกรมที่ดินเท่านั้นจึงมีปัญหาจากระยะห่างเฉลี่ยของสถานี GNSS CORS ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดในทางราบมีมาก ดังนั้นควรมีการบูรณาการข้อมูลร่วมกับหน่วยงานอื่นๆ และเพิ่มจำนวนของสถานี GNSS CORS เพื่อลดระยะห่างระหว่างแต่ละสถานี จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหาค่าตำแหน่งด้วยการรับสัญญาณ GNSS ด้วย RTK GNSS Network มีสูงขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในครั้งนี้มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.3.1 ในการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการใช้งาน RTK GNSS Network ในงานวิจัยนี้นั้นเป็นการศึกษาเทคนิคการรับสัญญาณด้วยเทคนิค VRS เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบการรับสัญญาณ GNSS ด้วย RTK GNSS Network มีความหลากหลายและมีความน่าเชื่อถือขึ้น ผู้เขียนมีความเห็นว่าควรจะทำการศึกษาทดสอบในเรื่องระยะเวลาเกี่ยวกับเทคนิคการรับสัญญาณอื่นๆ อาทิ เช่น FKP, MAX และ I-Max เพิ่มเติม

5.3.2 ในการพิจารณาคุณภาพของการรับสัญญาณนั้นในการพิจารณาจากค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับนั้นต้องมีความระมัดระวัง เนื่องจากค่า RMSE ที่ได้จากเครื่องรับที่ได้จากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ นั้นจะทำให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่าค่า RMSE ในทางราบที่ทำการทดสอบความถูกต้องทางตำแหน่ง

5.3.3 ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับ GNSS เพียงรุ่นและยี่ห้อเดียวเท่านั้น สำหรับการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในเวลาจริงด้วยวิธีสถานีอ้างอิงเสมือนซึ่งเป็นเครื่องรับ GNSS ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหน่วยงานของภาครัฐและภาคเอกชนของประเทศไทย สำหรับเครื่องรับ GNSS รุ่นอื่นๆ สามารถนำวิธีการที่ทำการศึกษาวินิจฉัยไปใช้เพื่อทดสอบเพื่อหาแนวโน้มและเกณฑ์สำหรับการรังวัดของเครื่องรับ GNSS รุ่นอื่นๆต่อไปในอนาคต

5.3.4 เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้จากการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องโดยแบ่งตามระยะเวลาและระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของสถานี GNSS CORS ในบางจุดทดสอบนั้นมีค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (มีค่าสูงกว่า 4 เซนติเมตร) ที่แฝงอยู่ ดังนั้นควรมีการประยุกต์ใช้กระบวนการทางสถิติมาเพื่อพิจารณาจุดทดสอบที่ทำให้เกิดค่ากระโดดที่เกิดขึ้น

5.3.5 เนื่องจากในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์เรื่องระยะเวลาเฉลี่ยรวมในการรับสัญญาณ GNSS โดยจะทำการรับสัญญาณด้วยเทคนิค VRS ดังนั้นควรมีการประยุกต์ใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อมาวิเคราะห์ในส่วนของระยะเวลาในการรับสัญญาณที่เหมาะสม

5.3.6 ในการเลือกจุดทดสอบสำหรับงานวิจัยนั้นควรตรวจสอบสภาพแวดล้อมให้มีความเหมาะสม ไร้สิ่งบดบังสัญญาณ รวมไปถึงบริเวณที่มีการสั่นสะเทือนหรือรองรับการเคลื่อนที่ของ

ยานพาหนะ เพราะในระหว่างรับสัญญาณฯ อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณฯเพื่อ
หาค่าพิกัดได้



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- CHC THAILAND. (2017a). CHC i80. Retrieved from <https://www.chcthailand.com/i-80-receiver>
- CHC THAILAND. (2017b). CHC Precision Service (CPS). Retrieved from <https://www.chcthailand.com/software>
- CHC THAILAND. (2017c). Landstar 7 on Android. Retrieved from <https://www.chcthailand.com/software>
- CHCNAV. (2018). CHC i80. Retrieved from <https://www.chcnav.com/product-detail/i80-gnss>.
- Dabove, P., De Agostino, M., & Manzano, A. (2012). Achievable positioning accuracies in a network of GNSS reference stations. *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications, 1*, 189-214.
- Erenoglu, R. C. (2017). A comprehensive evaluation of GNSS-and CORS-based positioning and terrestrial surveying for cadastral surveys. *Survey Review, 49*(352), 28-38.
- FGDC, F. G. D. C. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. *National Aeronautics and Space Administration: Virginia, NV, USA*, 25.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Waskle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*: Springer Science & Business Media.
- Hu, G. R., Khoo, H. S., Goh, P. C., & Law, C. L. (2003). Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning. *Journal of Geodesy, 77*(5-6), 292-302. doi:10.1007/s00190-003-0327-4
- Janssen, V., Grinter, T., & Roberts, C. (2011). Can RTK GPS be used to improve cadastral infrastructure? *Engineering Journal, 15*(1), 43-54.
- Kim Sun, G. O., & Gibbings, P. (2005). How well does the virtual reference station (VRS) system of GPS base stations perform in comparison to conventional RTK? *Journal of Spatial Science, 50*(1), 59-73. doi:10.1080/14498596.2005.9635038
- Koivula, H., Kuokkanen, J., Marila, S., Lahtinen, S., & Mattila, T. (2018). Assessment of sparse GNSS network for network RTK. *Journal of Geodetic Science, 8*(1), 136-144.
- Lechner, W., & Baumann, S. (2000). Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture, 25*(1-2), 67-85.

- Okorocho, C. V., & Olajugba, O. (2014). Comparative Analysis of Short, Medium and Long Baseline Processing in the Precision of GNSS Positioning. *Kuala Lumpur, Malaysia: FIG Congress.*
- Rizos, C. (1997). *Principles and practice of GPS surveying*: University of New South Wales.
- Rizos, C. (2007). Alternatives to current GPS-RTK services and some implications for CORS infrastructure and operations. *GPS solutions, 11*(3), 151-158.
- กรมที่ดิน. (2558). ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558.
- กรมที่ดิน. (2561). คู่มือการรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network): กองการพิมพ์ กรมที่ดิน.
- กรมที่ดิน. (2562). วิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชิงพื้นที่. Retrieved from
- เจนพีธีกร สุนทรรัตน์. (2560). การทดสอบประสิทธิภาพระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในพื้นที่สำหรับงานรังวัดที่ดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2549). เอกสารคำสอนวิชา 2108631 *Advanced GPS Satellite Surveying* งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีทัต เจริญกาศัญญา. (2555). ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย. (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- รัฐบาลไทย. (2560). รัฐบาลไทย-ข่าวทำเนียบรัฐบาล-ที่ประชุมคณะกรรมการภูมิสารสนเทศแห่งชาติ เห็นชอบแนวคิดโครงสร้างพื้นฐานระบบดาวเทียมนำทาง (GNSS) มอบหมาย สทอภ.เป็นหน่วยงานรับผิดชอบศูนย์ข้อมูลสถานี CORS แห่งชาติ. Retrieved from <https://www.thaigov.go.th>
- สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา. (2560). การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายสถานี GNSS แบบต่างๆในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- อัศวินิ วงษ์สุวรรณ. (2557). การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมในการคัดเลือกดาวเทียมระบบ GNSS ดวงที่มีความเหมาะสม สำหรับการหาตำแหน่งแบบจลน์ กรณีศึกษาโดยใช้ข้อมูล GPS GLONASS และ COMPASS. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.



ภาคผนวก ก. : รายละเอียดของคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย



เครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80



เป็นเครื่องรับที่ผลิตในประเทศจีน โดยบริษัท Shanghai Huace Navigation Technology Ltd. ที่มีความสามารถรับสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบหลายความถี่ (Multi Frequencies) สามารถใช้งานการรังวัดในรูปแบบ Static RTK Network RTK PPK High-Precision Static และ SBAS ได้ โดยการใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ LandStar 7 ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องควบคุม (Controller) รุ่น CHC HCE300 ที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบ Android 4.4 โดย CHC i-80 ถือเป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของ CHC ในปัจจุบัน ด้วยการออกแบบที่รวมงานรับสัญญาณ (Antenna) และเครื่องประมวลผล (Receiver) เข้าด้วยกันเป็นชิ้นเดียว มีหน้าจอ LED แสดงสถานะอยู่บนตัวเครื่อง ด้วยการควบคุมการทำงานผ่านระบบไร้สาย (wireless) ผ่านสัญญาณ Bluetooth, Wi-Fi และระบบ 3G รองรับสัญญาณ GNSS ได้ทุกระบบ (GPS / GLONASS / BeiDou / Galileo) ในทุกคลื่นความถี่ (L1 L2 L5) ที่ให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งสูงถึงระดับ 1-4 cm ในการทำงานระบบ RTK Network (VRS) อีกทั้งยังมีฟองกลมอิเล็กทรอนิกส์ (E-bubble) ในตัวตรวจจับการเอียงของเครื่องมือ มาพร้อมกับแบตเตอรี่ Li-ion สองก้อน ใช้งานได้ยาวนานกว่า 10 ชั่วโมง ด้วยการออกแบบที่ทนทานตามมาตรฐานการกันน้ำและฝุ่น IP68 และการตกกระแทกจากความสูง 3 เมตร ทำให้ CHC รุ่น i-80 สามารถใช้งานได้ยาวนานและลุยได้ในทุกสภาพอากาศ (CHC THAILAND, 2017a) โดยในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องรับ GNSS รุ่นนี้เป็นสถานีจริงเพื่อทำการวิเคราะห์จุดทดสอบ

คุณลักษณะเฉพาะทางเทคนิค

ลักษณะการรับสัญญาณ GNSS

- 220 Channels พร้อมสำหรับระบบติดตามสัญญาณดาวเทียม (Simultaneously tracked satellite signal)
 - GPS: L1C/A, L2C, L2E, L5
 - GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3
 - Galileo: E1, E5A, E5B
 - BeiDou: B1, B2
 - SBAS: L1C/A, L5 (QZSS, WAAS, EGNOS, GAGAN)

ความถูกต้องทางตำแหน่งการรับสัญญาณ GNSS

- SBAS ค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (RMSE): 0.5 เมตร
- การรับสัญญาณแบบ Static ความละเอียดถูกต้องสูง
 - ทางราบ: 2.5 มม. + 0.1 ppm RMS
 - ทางตั้ง: 3.5 มม. + 0.4 ppm RMS
 - ระยะเส้นฐาน: ≤ 300 กม.
- Post Processed Kinematic (PPK)
 - ทางราบ: 8 มม. + 1 ppm RMS
 - ทางตั้ง: 15 มม. + 1 ppm RMS
- RTK
 - ทางราบ : 8 มม. + 1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 15 มม + 1 ppm RMS
 - Initialization time < 5 วินาที
 - Initialization reliability > 99.9%

- **Network RTK**
- ทางราบ: 8 มม. + 0.5 ppm RMS
- ทางตั้ง: 15 มม. + 0.5 ppm RMS
- Initialization time < 10 วินาที
- Initialization reliability > 99.9%

อุปกรณ์

- **ขนาด (กxย): 14 ซม. x 12.4 ซม. (5.5 นิ้ว x 4.9 นิ้ว)**
- **น้ำหนัก: 1.02 กิโลกรัม / 1.22 กิโลกรัม พร้อมแบตเตอรี่**
- **สภาพการใช้งาน (Environment)**
 - ขณะทำงาน: -40 °C ถึง +75 °C
 - การเก็บรักษา: -55 °C ถึง +85 °C
- **ความชื้น: การควบแน่น 100%**
- **การป้องกันฝุ่นและน้ำ: IP68 ป้องกันได้ชั่วคราวที่ความลึก 1 ม.**
- **การป้องกันการตกกระแทก: 2 เมตร MILSTD810G**
- **จอ LCD: 128x64 dpi สามารถใช้งานกลางแจ้งได้**
- **การรับรองและการวัดสอบ (Certifications and Calibrations)**
- **FCC Part 15 (class B Device), FCC Part 22, 24, 90; CE Mark C-Tickk; Bluetooth EPL, IGS & NGS Antenna Calibration, MILSTD810G.**
- **การสื่อสารและการจัดเก็บข้อมูล**
- **Serial: 2 x 7pin LEMO port (external power, USB data download, USB update, RS232)**
- **Cellular: Internally integrated 3.75G modem**
 - HSPA+ 21 Mbps (download), 5.76 Mbps (upload)
 - WCDMA 850/900/1700/1900/2100
 - EDGE/GPRS/GSM 850/900/1800/1900

- **Bluetooth®:** ติดตั้งภายใน สามารถใช้งานได้กับระบบ Android, Windows Mobile and Windows และ Desktop operating systems.
- **Wi-Fi:** 802.11 b/g/n, access point mode
- **UHF Radios (2): Protected TNC Female**
 - Standard Internal Rx/Tx: 410 470 Mhz; Transmit power: 0.5 W to 2 W; Protocol CHC, Trimble, Pacific Crest; Range: 5 km optimal conditions
 - FCC Certified Internal Rx/Tx: 403473 Mhz; Transmit power: 0.1 W to 1 W; Protocols Trimble, Satel, Pacific Crest; Range: 5 km optimal conditions
 - FCC Certified Internal Rx/Tx: 865-867 MHz, India license free; Transmit power: 0.1W to 1W; Protocol Satel; Range: 5 km optimal conditions
- **Protocols**
 - CMR, CMR+, sCMRx input และ output
 - RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2 input และ output
 - NMEA 0183 output
 - HCN และ RINEX static formats
 - NTRIP Client, NTRIP Caster
- **Data Storage**
 - 32 GB high-speed memory
 - Position ingrates: สูงสุด 20Hz

ภาคไฟฟ้า

- **Power consumption:** <3.2 W
- **Li-ion battery capacity:** 2 × 3400 mAh, 7.4 V
- **เวลาในการทำงาน (Operating time) :**
 - RTK UHF ขั้นต่ำ: 6 ชั่วโมง

- RTK Rover: 12 ชั่วโมง
- Static: 12 ชั่วโมง
- External power: 12 to 36 V DC



เครื่องรับ GNSS ที่ใช้สำหรับเป็นสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่อง และสถานีจร

ในงานวิจัยครั้งนี้ ใช้สถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องรวมทั้งสิ้น 114 สถานี โดยประกอบด้วยสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องของกรมที่ดินจำนวน 99 สถานี ซึ่งเป็นสถานีฐานถาวร 92 สถานี และสถานีฐานถาวรแบบติดตั้งชั่วคราว 7 สถานี สถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมืองจำนวน 15 สถานี ซึ่งสถานีทั้งหมดกระจายอยู่ในพื้นที่ของประเทศไทย (ข้อมูลจากเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2560) (กรมที่ดิน, 2562) โดยรายละเอียด ตามตารางที่ 3 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย

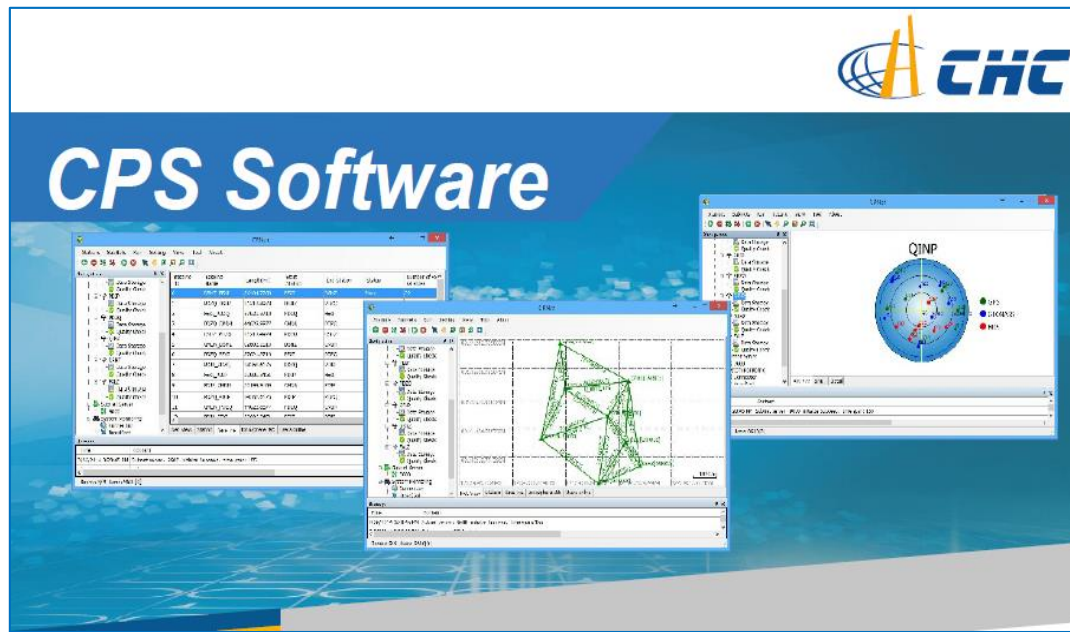
เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (ยี่ห้อ/รุ่น)	จำนวน	ประเภท	หน่วยงาน	กลุ่มดาวเทียมที่รับได้
CHC/N72	92	สถานีฐานถาวร (CORS)	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS/Galileo/Beidou
TRIMBLE/NETR9	2	สถานีฐานถาวร (CORS)	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS/Galileo/Beidou/QZSS
TRIMBLE/NETR5	5	สถานีฐานถาวร (CORS)	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS
LEICA/GX1230+GNSS	15	สถานีฐานถาวร (CORS)	กรมโยธาธิการและผังเมือง	GPS/GLONASS
CHC/I80	N/A	สถานีจร (Rover)	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS/Galileo/Beidou



ภาคผนวก ข. : รายละเอียดของคุณลักษณะเฉพาะของซอฟต์แวร์ ที่ใช้ในงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

CHC Precision Service



CHC Precision Service หรือ CPS เป็น software บนระบบปฏิบัติการ Windows Server สำหรับการประมวลผลโครงข่ายดาวเทียม RTK Network จากข้อมูลสถานีถาวร (CORS) และให้บริการค่าปรับแก้ในรูปแบบต่างๆให้กับผู้ใช้งานในการทำงานระบบ RTK Network หรือ VRS โดยแสดงผลออกมาให้ใช้งานง่าย มีแผนที่ออนไลน์สำหรับการตรวจสอบตำแหน่ง รวมทั้งการแสดงผลข้อมูลสถานะของแต่ละสถานีแบบ real-time (CHC THAILAND, 2017b)

คุณสมบัติทั่วไปของ GNSS CPS

- รองรับบริการคำนวณตำแหน่งในหลายกลุ่มดาวเทียม ได้แก่ GPS, GLONASS, BDS และ Galileo
- สามารถรองรับการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS สำหรับติดตั้งเป็นสถานีฐาน ได้หลากหลายผู้ผลิต
- การประมวลผลถูกกระจายการทำงานด้วย 3 ซอฟต์แวร์ ที่เป็น standalone เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบโครงข่ายสถานีถาวร (CORS) ขนาดใหญ่
- ครอบคลุมพื้นที่โครงข่ายขนาดใหญ่
- มีโปรโตคอลการเชื่อมต่อที่หลากหลาย เช่น TCP client/server, UDP client/server, NTRIP, Telnet

- มีโมดูลสนับสนุนการทำงานต่างๆ เช่น การตรวจสอบคุณภาพสถานี, การเก็บข้อมูล RINEX แบบ real-time, การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์, การแสดงแผนที่ หรือการวิจารณ์ของผู้ใช้ออนไลน์ เป็นต้น
- สนับสนุน SQL Server หรือ การเข้าถึงฐานข้อมูล
- Run บน Windows Server 2008/2012
- ไม่จำกัดบัญชีผู้ใช้ NTRIP
- การตั้งค่าซอฟต์แวร์ทำได้ง่าย และสามารถควบคุมระบบได้เต็มรูปแบบ

CHC Precision Service หรือ CPS เป็นซอฟต์แวร์ใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นโดย บริษัท CHC เพื่อให้บริการข้อมูลค่าแก้จากสถานีถาวร (CORS) ซึ่ง CPS รับรองสัญญาณทั้งระบบ GPS, GLONASS และ BeiDou (BDS) ยังสามารถนำไปใช้งานกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมได้หลากหลายจากผู้ผลิต หรือยี่ห้อที่แตกต่างกัน CPS ถูกออกแบบการให้บริการของสถานีถาวร (CORS) ในพื้นที่ขนาดใหญ่ และมีประสิทธิภาพการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนของระบบการรังวัดดาวเทียมที่สำคัญ เช่น ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม และค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี

CPS ได้เพิ่มประสิทธิภาพค่าแก้เชิงพื้นที่ให้แก่ผู้ใช้งาน Rover จากวิธีการ Single Based และ Network-Based ด้วยการให้บริการทั้งฟังก์ชัน RTK และ DGNSS แก่การทำงานสำรวจรังวัด หรือ การใช้แอปพลิเคชันอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความแม่นยำจากการใช้บริการของ สถานีถาวร (CORS)

การออกแบบการให้บริการ CPS ได้รวม 3 ซอฟต์แวร์หลัก คือ 1) CHC Stream เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลจากสถานีอ้างอิงทั้งหมด และถ่ายข้อมูลเหล่านี้ต่อไปยัง CPS 2) CPS จะนำไปทำการคำนวณ และให้บริการ 3) CPS Casher ให้การเข้าถึงพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง โครงสร้างการให้บริการจะช่วยให้ผู้ดูแลระบบสถานีถาวร (CORS) ควบคุมและติดตามระบบได้อย่างง่าย และในเวลาเดียวกันได้ลดการทำงานของระบบทั้งหมดของ Server คอมพิวเตอร์ และช่วยให้ระบบทั้งหมดมีความเสถียรและปลอดภัย

ฟังก์ชันทั้งหมดในแพ็คเกจเดียว จะมีโมดูลที่มีหน้าที่หลากหลายใน CPS การตรวจสอบคุณภาพของโมดูลที่ไว้ตรวจสอบคุณภาพข้อมูลของแต่ละสถานีอ้างอิง ได้แก่ การเก็บโมดูลเพื่อแปลงข้อมูลดิบแบบ real-time จากแต่ละสถานีอ้างอิงให้เป็นข้อมูลแบบ RINEX หรือ HCN การให้บริการ ทั้งโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK) หรือ RTD (Real-Time Differential GNSS) ได้ ให้บริการ ค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ท้องถิ่นโดย

จะถูกคำนวณชั่วโมงต่อชั่วโมง การแสดงผลบนแผนที่จะแสดงตำแหน่งของสถานีอ้างอิงแก่ผู้ใช้ Rover รวมทั้งตำแหน่งของ Rover จะแสดงใน CPS ในขณะที่ ผู้ใช้กำลังทำงานอีกด้วย

รายละเอียดทางเทคนิค

หน้าที่:

- ค่าแก้ของ RTK/RTD: Rover จะส่งไปตำแหน่งไปยัง CPS หลังจากนั้น CPS จะส่งค่าแก้ที่ได้จากการ Generate จาก Single Base หรือการสร้างสถานีเสมือน (VRS) ไปยัง Rover ทั้งนี้รองรับการทำงานเทคนิค MAC (Master auxiliary station) และรองรับ RTCM3Net
- การตรวจสอบคุณภาพ: CPS วิเคราะห์ข้อมูลจากสถานีอ้างอิง ณ ระยะเวลาปัจจุบัน เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูล ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นหลายวิถี รวมไปถึงข้อมูลที่มี Cycle slip ด้วย
- การเก็บข้อมูล: CPS ได้เก็บข้อมูลดาวเทียมระบบ GPS, GLONASS และ BeiDou จากข้อมูลดิบโดยเก็บเป็นข้อมูล RINEX หรือข้อมูล HCN โมดูลการเก็บข้อมูล สามารถเก็บข้อมูลใน simple rate ที่แตกต่างกันได้ในคราวเดียวกัน
- สามารถเก็บข้อมูล Virtual RINEX ในขณะทำงานได้ โดย จะเก็บไว้ใน Local Server Disk
- สามารถส่งข้อมูลดาวเทียมแบบ Static ไปยังแหล่งอื่นๆได้ โดยผ่านทาง FTP Server
- สถานะออนไลน์: เมื่อ Rover on-line ใช้บริการค่าแก้จาก CPS รายละเอียดของผู้ใช้งานจะถูกलिस्टไว้ เช่น Mount point, NTRIP (ตัวอย่างเช่น ชื่อซอฟต์แวร์ของการสำรวจ) เวลาที่เชื่อมต่อกับศูนย์ให้บริการ และระยะเวลาการ on-line รวมทั้งสถานะของการทำงาน (fix, float หรือ DGPS) และตำแหน่งละติจูด ลองติจูด ในปัจจุบันของ Rover ข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไปยังฐานข้อมูล เพื่อการพัฒนา Application ในภายหลัง
- การแสดงแผนที่ออนไลน์: ตำแหน่งของสถานีอ้างอิงรวมทั้งตำแหน่งของ Rover สามารถแสดงใน Google street map/ satellite map ได้
- การดาวโหลด ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม: สามารถดาวโหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ broadcast รวมไปถึงข้อมูลวงโคจรดาวเทียมรายละเอียดสูง จากหน่วยงาน IGS ได้
- การแจ้งเตือนผ่านทาง E-mail: เพื่อเตือนความผิดปกติของระบบ สำหรับการแก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็ว

ความสามารถ:

- สถานีอ้างอิง: แนะนำให้ใช้ 120 สถานี ในหนึ่ง PC server (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์) เนื่องจากการออกแบบการทำงานของระบบที่สามารถแบ่งการทำงานของ CPS เป็นหลายเครื่อง ซึ่งสามารถทำงานคู่ขนานกันได้ ดังนั้นจึงไม่จำกัดจำนวนของสถานีอ้างอิงในระบบ
- บัญชีผู้ใช้: บัญชีผู้ใช้สูงสุด 1000 บัญชี (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฮาร์ดแวร์เครื่องคอมพิวเตอร์) สำหรับ PC Server หนึ่งเครื่อง เมื่อ CPS หลายเครื่องทำงานพร้อมกัน ดังนั้นจึงไม่จำกัดบัญชีผู้ใช้
- ชนิดค่าแก้สำหรับ RTK: RTCM2.3, RTCM3.0, RTCM3.1, RTCM3.2, CMR, CMR+, SCMR
- ชนิดค่าแก้สำหรับ DGNS: RTCM2.x, message 1,2
- ระบบดาวเทียมที่รับได้: GPS - L1, L2 และ L5, GLONASS - L1 และ L2, BDS - B1 และ B2
- Compatibility: Trimble, NovAtel, Leica, Topcon, Ashtech, Hemisphere, หรืออุปกรณ์ยี่ห้ออื่นขึ้นอยู่กับบอร์ด OEM ของผู้ผลิต ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องรับสัญญาณของสถานีอ้างอิง และเครื่องรับสัญญาณ Rover ได้
- การสื่อสาร: TCP server, TCP Client, UDP server, TRIP และ Telnet

ฐานข้อมูล:

- การเข้าถึง: แนะนำ 32 bit สำหรับ CPS โดยสถานีควรมีน้อยกว่า 50 สถานี สำหรับ subnet เดียว
- SQL Server 2008 / 2012 / 2014 สำหรับการใช้ CPS ทั้ง 32 และ 64 bit

ระบบปฏิบัติการ:

- Microsoft Windows Server 2008 / 2012
- Microsoft Windows 7 / 8 / 8.1 / 10 สำหรับ 32 และ 64 bit

หน่วยประมวลผล:

- สำหรับ Dual cores ไม่ควรเกิน 20 สถานี
- สำหรับ Quad core ไม่ควรเกิน 40 สถานี

- และ สำหรับ 8 core สามารถทำงานมากกว่า 50 สถานีได้ โดยที่ความเร็วต้องไม่น้อยกว่า 2.0 GHz

หน่วยความจำ (RAM):

- แนะนำให้ใช้ขั้นต่ำ 4 GB สำหรับจำนวนสถานีที่น้อยกว่า 20 สถานี
- อย่างต่ำ 8 GB สำหรับจำนวนสถานีที่น้อยกว่า 40 สถานี
- และอย่างต่ำ 16 GB สำหรับสถานีจำนวนมาก

ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk):

- เนื้อที่ 200 MB สำหรับการติดตั้งซอฟต์แวร์ CPS และต้องมีเนื้อที่เหลืออย่างน้อย 100 MB ต่อวันต่อสถานี

ภาษาที่รองรับ

- ภาษาจีน
- ภาษาอังกฤษ
- ภาษารัสเซีย
- ภาษาฝรั่งเศส



LandStar 7



ซอฟต์แวร์ LandStar 7 เป็นแอปพลิเคชันบนมือถือสมาร์ทโฟน ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ CHC i-80 ผ่านระบบ Bluetooth® ที่ไม่จำเป็นต้องใช้สายเชื่อมต่อให้ยุ่งยากอีกต่อไป ส่วนการรับค่าปรับแก้ผ่านอินเทอร์เน็ตก็สามารถทำได้โดยง่ายผ่านระบบ 4G/3G/2G ทำให้การทำงานภาคสนามเป็นเรื่องง่าย และสะดวกสบายยิ่งขึ้น มีเพียงแค่เครื่องรับสัญญาณกับสมาร์ทโฟน หนึ่งเครื่องก็สามารถทำงานได้แล้ว โดยในขณะนี้แอปพลิเคชัน LandStar 7 ซึ่งเปิดให้ดาวน์โหลดแล้วในมือถือระบบ Android (CHC THAILAND, 2017c)

คุณสมบัติทั่วไปของ GNSS CPS

- แสดงผลบนแผนที่ทั้ง online map (Open Street Map) และ offline map (DXF and ESRI SHP)

- รองรับการนำเข้าและส่งออกข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบไฟล์ นำเข้า CSV, DAT, TXT, DXF, SHP, NCN

ส่งออก CSV, DAT, TXT, KML, DXF, SHP, RAW, HTML

- รองรับการใช้งานกับไฟล์ 3 parameters 7 parameters 4 parameters และไฟล์ Geoid / Grid (.ggf, .bin, .grd, .gsf, .gri, .asc) ในการแปลงข้อความ RTCM

- รองรับการส่งข้อมูลค่าตรวจแก้โดยสามารถส่งข้อมูลค่าแก้จากสถานีฐานไปยังสถานีจร (Rover) อื่นหากผู้รับมีฟังก์ชันเดียวกัน

- รองรับการเชื่อมต่อการทำงานด้วยสัญญาณวิทยุ หรือโครงข่ายการทำงานของสถานีฐานและสถานีจรทั่วไปโดยใช้การสับเปลี่ยนเพียงปุ่มเดียว
- รองรับการใช้งานร่วมกับ CHC ARM และ i80 GNSS, ตัวรับสัญญาณ GPS ใน Android ของ Handheld หรือ Controller และอุปกรณ์ต่อพ่วงหลายชนิด อาทิเช่น ชุดเครื่องมือ CHC XONE
- รองรับการเชื่อมต่อ Bluetooth Wi-Fi และการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย มีคุณสมบัติในการเชื่อมต่อที่รวดเร็วและประสิทธิภาพที่มั่นคง แม้จะอยู่ในระยะไกล

รายละเอียดทางเทคนิค

Protocols:

- CHC
- Transparent
- TT450
- APIS
- SATEL_3AS
- PCC4FSK
- CORS
- TCP Direct



ระบบปฏิบัติการ:

- รองรับระบบปฏิบัติการ Android 4.2 ขึ้นไป

ลิขสิทธิ์

- รหัสลงทะเบียน
- ไฟล์ลิขสิทธิ์

ภาษาที่รองรับ

- ภาษาจีนตัวย่อ
- ภาษาจีนดั้งเดิม
- ภาษาอังกฤษ
- ภาษารัสเซีย
- ภาษาฝรั่งเศส
- ภาษาเกาหลี
- ภาษาตุรกี
- ภาษาฟินแลนด์
- ภาษาเยอรมัน



ภาคผนวก ค. : ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบ
สำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่าย
ดาวเทียมแบบจลน์ในทันที ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที 1 นาที 2 นาที 3 นาที และ 15 นาที
ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE ในทางราบที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (30 วินาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (รูป)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
0.5	0.051	0.039	0.041	0.045
1	0.051	0.039	0.041	0.044
1.5	0.034	0.038	0.043	0.046
2	0.034	0.038	0.042	0.046
2.5	0.034	0.038	0.040	0.040
3	0.033	0.038	0.040	0.039
3.5	0.033	0.038	0.039	0.038
4	0.032	0.038	0.038	0.038
4.5	0.034	0.036	0.037	0.038
5	0.033	0.036	0.037	0.038
5.5	0.034	0.036	0.036	0.040
6	0.033	0.036	0.035	0.039
6.5	0.035	0.036	0.034	0.041
7	0.034	0.036	0.034	0.041
7.5	0.037	0.036	0.035	0.039
8	0.033	0.036	0.034	0.039
8.5	0.034	0.036	0.035	0.040
9	0.039	0.036	0.035	0.040
9.5	0.033	0.036	0.035	0.035
10	0.033	0.037	0.035	0.034
10.5	0.033	0.037	0.034	0.032
11	0.033	0.037	0.033	0.032
11.5	0.033	0.037	0.035	0.032
12	0.033	0.037	0.035	0.032
12.5	0.033	0.036	0.035	0.034
13	0.033	0.036	0.035	0.031
13.5	0.033	0.038	0.036	0.031
14	0.033	0.037	0.036	0.031
14.5	0.035	0.037	0.035	0.031
15	0.035	0.037	0.034	0.031

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 1 นาที (15 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE ในทางราบที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (1 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (รูป)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
1	0.051	0.039	0.041	0.044
2	0.034	0.038	0.042	0.046
3	0.034	0.038	0.040	0.039
4	0.032	0.038	0.038	0.038
5	0.033	0.036	0.037	0.038
6	0.034	0.036	0.035	0.040
7	0.034	0.036	0.034	0.041
8	0.034	0.036	0.034	0.039
9	0.036	0.036	0.035	0.040
10	0.033	0.036	0.035	0.034
11	0.033	0.037	0.033	0.032
12	0.033	0.037	0.035	0.032
13	0.033	0.036	0.035	0.032
14	0.033	0.037	0.036	0.031
15	0.035	0.037	0.034	0.031

ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 2 นาที (7 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE ในทางราบที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (2 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (รูป)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
2	0.039	0.037	0.040	0.044
4	0.033	0.038	0.038	0.039
6	0.033	0.035	0.035	0.039
8	0.034	0.035	0.034	0.039
10	0.033	0.036	0.035	0.037
12	0.032	0.037	0.034	0.033
14	0.032	0.037	0.035	0.032

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 3 นาที (5 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE ในทางราบที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (3 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (รูป)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
3	0.039	0.037	0.040	0.044
6	0.033	0.038	0.038	0.039
9	0.033	0.035	0.035	0.039
12	0.034	0.035	0.034	0.039
15	0.033	0.036	0.035	0.037

ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในทางราบสำหรับการประเมินผลความถูกต้องของการรังวัดด้วยวิธีแผนทีชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 15 นาที (1 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE ในทางราบที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (15 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (ลูบ)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
15	0.032	0.035	0.035	0.035





ภาคผนวก ง. : ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจาก
เครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที 1 นาที 2 นาที 3 นาที และ
15 นาที ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 30 วินาที (30 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (30 วินาที)				
ระยะเวลา (นาท)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (ลูบ)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
0.5	0.014	0.015	0.016	0.017
1	0.015	0.015	0.017	0.018
1.5	0.013	0.014	0.016	0.016
2	0.014	0.015	0.017	0.017
2.5	0.014	0.013	0.016	0.016
3	0.015	0.014	0.016	0.017
3.5	0.014	0.014	0.015	0.016
4	0.014	0.015	0.016	0.017
4.5	0.013	0.014	0.015	0.016
5	0.014	0.015	0.016	0.017
5.5	0.014	0.014	0.015	0.016
6	0.015	0.015	0.016	0.017
6.5	0.014	0.014	0.015	0.016
7	0.015	0.015	0.016	0.016
7.5	0.013	0.014	0.015	0.015
8	0.014	0.015	0.016	0.016
8.5	0.014	0.014	0.015	0.016
9	0.014	0.015	0.016	0.017
9.5	0.013	0.014	0.015	0.016
10	0.014	0.015	0.016	0.017
10.5	0.013	0.014	0.015	0.016
11	0.014	0.015	0.016	0.016
11.5	0.013	0.013	0.015	0.015
12	0.014	0.014	0.016	0.016
12.5	0.014	0.013	0.015	0.015
13	0.014	0.014	0.016	0.016
13.5	0.013	0.013	0.015	0.015
14	0.014	0.015	0.016	0.016
14.5	0.013	0.014	0.015	0.015
15	0.014	0.014	0.016	0.016

ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 1 นาที (15 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (1 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (ลูบ)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
1	0.014	0.015	0.017	0.017
2	0.014	0.014	0.016	0.017
3	0.014	0.014	0.016	0.017
4	0.014	0.014	0.016	0.016
5	0.014	0.014	0.016	0.016
6	0.014	0.014	0.016	0.016
7	0.014	0.014	0.015	0.016
8	0.014	0.014	0.015	0.016
9	0.014	0.014	0.016	0.016
10	0.014	0.014	0.016	0.017
11	0.013	0.014	0.016	0.016
12	0.014	0.014	0.016	0.016
13	0.014	0.014	0.016	0.016
14	0.014	0.014	0.016	0.016
15	0.014	0.014	0.015	0.016

ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 2 นาที (7 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (2 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (รูป)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
2	0.014	0.015	0.016	0.017
4	0.014	0.014	0.016	0.017
6	0.014	0.014	0.016	0.016
8	0.014	0.014	0.015	0.016
10	0.014	0.014	0.016	0.016
12	0.014	0.014	0.016	0.016
14	0.014	0.014	0.016	0.016

ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 3 นาที (5 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (3 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (รูป)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
3	0.014	0.014	0.016	0.017
6	0.014	0.014	0.016	0.016
9	0.014	0.014	0.016	0.016
12	0.014	0.014	0.016	0.016
15	0.014	0.014	0.015	0.016

ตารางที่ 13 ตารางแสดงค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ได้รับจากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม 15 นาที (1 ชุดข้อมูล)

ค่า RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ยรวม (15 นาที)				
ระยะเวลา (นาที)	ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (รูป)			
	30-50	50-70	70-90	90-110
15	0.014	0.014	0.016	0.016





ภาคผนวก ฉ. : ตารางแสดงการเปรียบเทียบแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างRMSEทางราบ และ
RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 14 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่าง RMSE ทางราบ และ RMSE จากเครื่องรับ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาที

ระยะห่างเฉลี่ยสามด้านของ GNSS CORS (กิโลเมตร)	RMSE ในทางราบ	RMSE CHC i80	ค่าตัวคูณมาตรฐานในการใช้ RMSE CHC i80
30-50	0.032	0.014	2.31
50-70	0.035	0.014	2.47
70-90	0.035	0.016	2.19
90-110	0.035	0.016	2.14
ค่าเฉลี่ย	0.034	0.015	2.27



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นำพล ศักดิ์สินิท
วัน เดือน ปี เกิด	23 กุมภาพันธ์ 2536
สถานที่เกิด	
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ที่อยู่ปัจจุบัน	183/35206 ชั้น2 อาคารสวัสดิการกองบัญชาการทหารสูงสุด(ทุ่งสีกัน2) ถนนนางประชาพัฒนา แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กทม. 10210
ผลงานตีพิมพ์	นำพล ศักดิ์สินิท ธีทัต เจริญกมลัญญาตา และ เฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2562) "การประเมินค่าความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบด้วยค่าคลาดเคลื่อนรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยที่เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส อาศัยแนวคิดที่ว่าด้วย สถานีอ้างอิงเสมือนของโครงข่ายจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์เวลาจริงในประเทศไทย" การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ. 2562 : GEOINFOTECH 2019 วันที่ 27-29 สิงหาคม 25 62