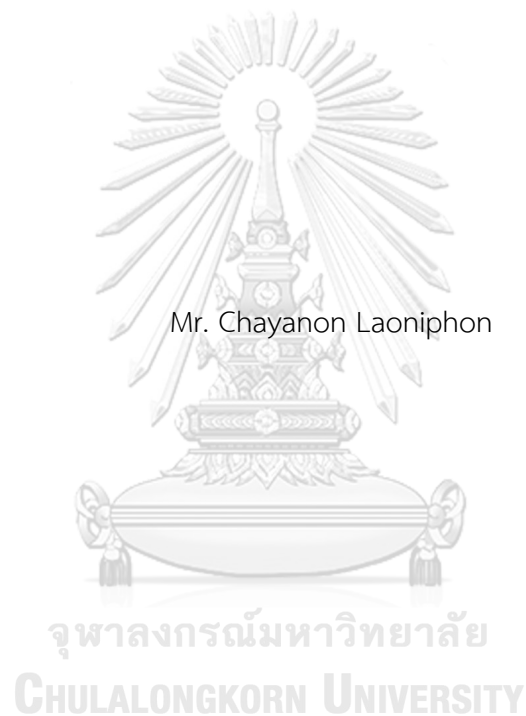


การประเมินประสิทธิภาพของระบบการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่าย
4 วิธีในเวลาเดียวกัน สำหรับการใช้งานที่มีความแม่นยำสูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Simultaneously performance assessment of four different network-based GNSS real-time kinematic methods for high precision applications



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Survey Engineering

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพของระบบการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่าย 4 วิธีในเวลาเดียวกัน สำหรับการใช้งานที่มีความแม่นยำสูง
โดย	นายชยานนท์ เหล่านิพนธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

ชฎานนท์ เหล่านิพนธ์ : การประเมินประสิทธิภาพของระบบการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่าย 4 วิธีในเวลาเดียวกัน สำหรับการใช้งานที่มีความแม่นยำสูง. (Simultaneously performance assessment of four different network-based GNSS real-time kinematic methods for high precision applications) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

ปัจจุบันการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลนในทันที (Real-Time Kinematic: RTK) เป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของเวลาการรังวัดที่รวดเร็ว ประมวลผลค่าพิกัดได้ในทันที ต่อมามีการพัฒนาเป็นการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่าย (Network-based Real-Time Kinematic: NRTK) โดยมีวิธีการรังวัดที่นิยมอยู่ 4 ระบบ ได้แก่ การรังวัดแบบ Virtual Reference Station (VRS) การรังวัดแบบ Flächen-Korrektur Parameters (FKP) การรังวัดแบบ Master-Auxiliary Concept (MAC) และการรังวัดแบบ Individualized MAC (I-MAC) โดยใช้โครงข่ายสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS อ้างอิงแบบต่อเนื่อง (GNSS Continuously Operating Reference Station Network: GNSS CORS Network) ของกรมแผนที่ทหาร งานวิจัยนี้ได้จัดทำเครื่องมือ GNSS Splitter มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการรังวัดทั้ง 4 ระบบในเวลาเดียวกันใน 2 กรณี คือในพื้นที่โล่ง และพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง จากการศึกษาวิจัยพบว่ากรณีพื้นที่โล่ง จำนวน GNSS Fixed Solution ระบบ VRS, I-MAC ไม่ต่ำกว่า 95% ของจำนวนทั้งหมด ระบบ MAC, FKP จำนวน GNSS Fixed Solution ไม่ต่ำกว่า 75% ส่วนกรณีพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ระบบ VRS, I-MAC และ MAC มีจำนวน GNSS Fixed Solution ไม่ต่ำกว่า 50% ระบบ FKP มีจำนวน GNSS Fixed Solution ต่ำกว่า 50% ในส่วนค่าความถูกต้องค่าพิกัดทางราบเมื่อเทียบกับการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต ในกรณีพื้นที่โล่งทั้ง 4 ระบบ ให้ค่า RMSE ที่ต่ำกว่า 5 ซม. ในกรณีพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางทั้ง ระบบ VRS และ I-MAC ให้ค่า RMSE ต่ำกว่า 8 ซม. และ ระบบ FKP และ MAC ให้ค่า RMSE ต่ำกว่า 30 ซม.

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170501321 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: Virtual Reference Station (VRS), Flächen-Korrektur Parameters (FKP), Master-Auxiliary Concept (MAC), Individualised-MAC (I-MAC)

Chayanon Laoniphon : Simultaneously performance assessment of four different network-based GNSS real-time kinematic methods for high precision applications. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D.

Global Navigation Satellite System (GNSS) realtime kinematic (RTK) positioning is applied to determine users' positions at the accuracy of a centimetre level providing that carrier-phase ambiguities can be resolved to their integer values. Differential atmospheric errors can only be neglected for distances at a certain extent. The network-based RTK (NRTK) resolves differential atmospheric errors and orbit errors from GNSS observations of a network of reference stations before sending the computed corrections to requested users. These coefficients of correction models are explicitly determined based upon network observations on common ambiguity level and coefficient of correction models; namely, Virtual Reference Station (VRS) observations, Flächen-Korrektur Parameters (FKP) standing for area correction parameters, Master-Auxiliary Concept (MAC) and Individualised-MAC (I-MAC). This study aims to evaluate performances of four main correction models from a reference station network in Thailand principally structured by the Royal Thai Survey Department. In this experiment, an identical antenna is used whiles four receivers are observed in order to determine and evaluate performances concurrently. Obstacles are constantly a challenge in GNSS observations; hence, it is included in this positioning estimations. It is found that, in the observed area without obstacles, percentage of fixed solutions is higher than 95% when VRS and I-MAC correction models are applied and greater than 75% with MAC and FKP. With obstacles, success rate percentage of fixed ambiguities using FKP is better than 50% while other models are less than 50%. The horizontal positioning accuracy is better than 5 centimetres in unobstructed conditions. With obstacles, the horizontal positioning accuracy is better than 8 centimetres when VRS and I-MAC correction models and better than 30 centimetres with MAC and FKP.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. ทยาทิพย์ ทองตัน กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ได้คำแนะนำและ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จโดยสมบูรณ์ รวมถึงคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนปลูกฝังจิต วิญญาณของความเป็นนักสำรวจแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ พันเอก จิตรกร ไบรักษา ผู้อำนวยการกองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ กรมแผนที่ ทหาร และบริษัท จีไอเอส จำกัด ที่อนุเคราะห์อุปการณ์แยกสัญญาณ GNSS รวมทั้งข้าราชการประจำกอง ยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหารทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม, เครื่องมือต่างๆ และ ข้อมูลสถานี CORS

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้ให้ความช่วยเหลือระหว่าง ที่ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะ ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชฎานนท์ เหล่านิพนธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.1.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษาวิจัย	3
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ที่ศึกษาวิจัย	4
1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	5
1.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย มีดังนี้	7
1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	8
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 รูปแบบนำทางด้วยดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS).....	9
2.2 หลักการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS	12
2.2.1 วิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)	12
2.2.2 ค่าเรขาคณิตของดาวเทียม (Satellite Geometry).....	12

2.3	วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมจากสมการค่าสังเกต (Observation Equation).....	13
2.3.1	ซูโดเรนจ์ (Pseudorange).....	13
2.3.2	เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)	14
2.4	เทคนิคค่าต่าง (Differencing technique)	15
2.4.1	การหาค่าต่างครั้งหนึ่ง (Single differencing)	15
2.4.2	การหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing)	17
2.4.3	การหาค่าต่างครั้งที่สาม (Triple differencing).....	19
2.5	วิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยรูปแบบโครงข่ายสถานีฐาน (Network-Based RTK: NRTK)	20
2.5.1	Virtual Reference Station (VRS).....	21
2.5.2	Flächen Korrektur Parameter (FKP).....	23
2.5.3	Master Auxiliary Corrections (MAC).....	25
2.5.4	Individualized Master Auxiliary Corrections (I-MAC).....	26
2.6	RTCM standard และ RINEX format	27
2.7	การวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE)	28
2.8	เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	28
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
3.2	พิจารณาสถานที่และเตรียมเครื่องมือที่ใช้สำหรับรังวัด	31
3.3	รังวัดสัญญาณดาวเทียม	33
3.4	เปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูล	33
บทที่ 4	ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....	35
4.1	ขีดความสามารถ GNSS Fixed Solution ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ในพื้นที่โล่ง และมีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์.....	35

4.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ ในพื้นที่โล่ง และพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เมตรเซ็นต์ โดยใช้ค่าพิกัดการรังวัดแบบStaticเป็นค่าอ้างอิง..... 37

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 44

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 45

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ..... 45

5.3 ปัญหาและอุปสรรค..... 45

5.4 ข้อเสนอแนะ 46

บรรณานุกรม..... 47

ประวัติผู้เขียน..... 49



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงตำแหน่งค่าพิกัดของ GNSS CORS.....	7
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อมูลระหว่าง RTCM 3.0 และ RINEX 2.2.....	27
ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนและเปอร์เซ็นต์ของ GNSS Fixed Solution ในพื้นที่โล่ง	36
ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนและเปอร์เซ็นต์ของ GNSS Fixed Solution ในพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์.....	36
ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่าพิกัด NRTK 4 วิธี กับการรังวัดแบบ Static ของพื้นที่โล่ง..	37
ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่าพิกัด NRTK 4 วิธี กับการรังวัดแบบ Static ของพื้นที่มีสิ่งกีด ขวาง 50 เปอร์เซ็นต์	41

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตำแหน่งสถานีรังวัดดาวเทียมแบบถาวร 80 สถานีของกรมแผนที่ทหาร	1
รูปที่ 1.2 พื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง.....	4
รูปที่ 1.3 พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์	4
รูปที่ 1.4 ตัวอย่างข้อมูลของการรังวัดแบบ NRTK ด้วยรูปแบบ VRS	5
รูปที่ 1.5 ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบ Static	6
รูปที่ 1.6 ตำแหน่งของ GNSS CORS จำนวน 5 สถานี.....	7
รูปที่ 1.7 เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Leica รุ่น AS10.....	7
รูปที่ 1.8 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ยี่ห้อ Leica รุ่น GS10	8
รูปที่ 1.9 เครื่องแยกสัญญาณจาก GNSS (GNSS signal splitter)	8
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักในรูปแบบดาวเทียมจีพีเอส.....	10
รูปที่ 2.2 พื้นที่แสดงเทคนิคค่าต่างลักษณะต่าง ๆ.....	15
รูปที่ 2.3 การหาค่าต่างครั้งที่สอง (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549).....	18
รูปที่ 2.4 การหาค่าต่างครั้งที่สาม (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549).....	19
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของรูปแบบ VRS (Leica Geosystems, 2008).....	23
รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของรูปแบบ FKP (Leica Geosystems, 2008).....	24
รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของรูปแบบ MAC (ดัดแปลงจาก Leica Geosystems, 2008).....	26
รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของรูปแบบ I-MAC (ดัดแปลงจาก Leica Geosystems, 2008)	27
รูปที่ 3.1 การต่อเครื่องมือที่ใช้รังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่าย	31
รูปที่ 3.2 สายสัญญาณผ่านสปริตเตอร์ เพื่อแยกสัญญาณดาวเทียมไปยังเครื่อง Receiver จำนวน 4 เครื่อง.....	32
รูปที่ 3.3 การต่อเครื่องมือที่ใช้รังวัดดาวเทียมแบบ Static.....	32

รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจากการรังวัดแยกเป็น 2 กรณี..... 34

รูปที่ 4.1 แสดงค่าพิกัด Easting Northing และ Elevation ของการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ
ในพื้นที่โล่ง..... 39

รูปที่ 4.2 แสดงค่าพิกัด Easting Northing และ Elevation ของการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ
ในพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์..... 42



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในการรังวัดสัญญาณดาวเทียมได้มีความแพร่หลายอย่างมาก และมีหลากหลายวิธีการให้เลือกใช้ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์งานที่ใช้เทียบกับระดับค่าความถูกต้อง ซึ่งทางกรมแผนที่ทหารกองบัญชาการกองทัพไทยได้มีการจัดทำรูปแบบโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง (GNSS CORS network) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถปฏิบัติงานสำรวจและการทำแผนที่ให้สามารถตอบสนองต่อการประเมินและป้องกันด้านอุทกภัยและภัยพิบัติธรรมชาติอื่น ๆ รวมทั้งทำให้การสำรวจหาค่าพิกัดทั้งทางราบและค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองยี่ออยด์ที่อิงความละเอียดสูง (TGM2017) ในเวลาอันรวดเร็วแบบทันที (Realtime) สามารถให้ค่าพิกัดที่มีความละเอียดถูกต้องในระดับ 3 - 5 เซนติเมตร จะเป็นการยกระดับการสำรวจในประเทศไทย ให้เป็นมาตรฐานสากลและรองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน ภายใต้โมเดล Thailand 4.0 (กรมแผนที่ทหาร, 2562) ซึ่งมีการติดตั้งรูปแบบแล้วเสร็จจำนวน 80 สถานีทั่วประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ทำให้ผู้ใช้มีความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น เพราะสามารถใช้เป็นสถานีฐานอ้างอิงค่าพิกัดได้แบบทันทีทันใด



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งสถานีรังวัดดาวเทียมแบบถาวร 80 สถานีของกรมแผนที่ทหาร

จากการรวมรูปแบบดาวเทียมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากประเทศต่าง ๆ ที่เรียกว่า รูปแบบดาวเทียมนำทางสากล (Global Navigation Satellite System: GNSS) โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อประมวลผลเชิงตำแหน่ง ณ จุดที่อุปกรณ์รับสัญญาณตั้งอยู่ เทคโนโลยีนี้กำลังได้รับความนิยมอย่างมากในงานด้านสำรวจและการวิจัย ซึ่งปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนารูปแบบนำทางด้วยดาวเทียมขึ้นมาหลายรูปแบบ เช่น GPS ของสหรัฐอเมริกา, GLONASS ของรัสเซีย, Galileo ของยุโรป, BeiDou ของจีน, QZSS ของญี่ปุ่น หรือ SBAS เป็นต้น เพื่อสนับสนุนการพัฒนาประเทศให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศ ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี GNSS นี้ โดยการสร้างโครงข่ายสถานีอ้างอิงค่าพิกัด ค่าระดับ และเวลามาตรฐาน ซึ่งประเทศไทยก็มีสถานีการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร หรือ GNSS CORS NETWORK (GNSS Continuously Operating Reference Station Network) ซึ่งสถานีอ้างอิงแบบรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวรนี้ จะส่งสัญญาณค่าปรับแก้ในรูปแบบโครงข่าย ทำให้ได้ค่าประมวลผลเชิงตำแหน่งที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงในเวลารวดเร็ว

ในปัจจุบันการรังวัดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยรูปแบบโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง (NRTK) เป็นการพัฒนาริธีการมาจากการรังวัดแบบ RTK เดิมซึ่งเป็นการใช้สถานีฐานเพียงเครื่องเดียว ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐาน (baseline) ที่ส่งผลต่อค่าความถูกต้อง (accuracy) ของค่าพิกัด ซึ่งรูปแบบ NRTK เป็นการใช้โครงข่ายของสถานีฐานโดยรอบของสถานีผู้ใช้ แล้วทำการปรับแก้ค่าพิกัดให้มีความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้น โดยที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้นมีอยู่ 4 ระบบ ได้แก่ Virtual Reference Station (VRS), Flächen Korrektur Parameter (FKP), Master Auxiliary Concept (MAC) และ Individualized Master Auxiliary Concept (I-MAC) ซึ่งโดยปกติแล้วระบบที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย จะใช้ระบบของ VRS ทั้งหน่วยงานภาครัฐ และเอกชน แต่เมื่อออกปฏิบัติงานสนามแล้ว อาจเกิดปัญหาการไม่ fixed ambiguity จึงจะต้องเปลี่ยนจากการรังวัด NRTK เป็นระบบ fast static มาทดแทน เพื่อหาค่าพิกัดที่มีความแม่นยำเพียงพอต่อเกณฑ์งานรังวัด ส่งผลให้ใช้เวลาในการรังวัดค่าพิกัดที่เพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น หากผู้ใช้ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS 2 ความถี่ จะต้องใช้เวลาในการรังวัดอย่างน้อย 10 นาที (Hofmann-Wellenhof et al., 2008) ทั้งที่เครื่องมือและระบบสถานี CORS สามารถรองรับการใช้งาน NRTK ได้ทั้ง 4 ระบบ แต่ทางผู้ใช้งานอาจยังไม่ทราบหรือไม่มั่นใจในระบบอื่น ๆ ว่าสามารถทดแทนระบบ VRS ได้หรือไม่ ในประเทศไทยเคยมีการประเมินการทดลองการรังวัด

โดยใช้รูปแบบโครงข่ายทั้ง 4 รูปแบบแล้ว (สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา, 2560) แต่การรังวัดยังไม่ได้เป็นการรังวัดค่าพิกัด ณ จุดเดียวกัน เวลาเดียวกัน และพร้อมกันทั้ง 4 รูปแบบได้

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้้นำเครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องแยกสัญญาณจาก GNSS (GNSS signal splitter) โดยหลักการทำงานจะใช้จานรับสัญญาณดาวเทียมเพียง 1 เครื่อง แล้วใช้ rover receiver จำนวน 4 เครื่อง ทำให้สามารถรังวัดได้ในตำแหน่งเดียวกัน ช่วงเวลาเดียวกัน ในการรังวัดสัญญาณค่าแก้ทั้ง 4 รูปแบบ จึงถือได้ว่าเป็นการทดสอบอย่างยุติธรรม (fair test) ทำให้สามารถเปรียบเทียบและประเมินขีดความสามารถของการรังวัดทั้ง 4 รูปแบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่เท่าเทียมกัน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดและประเมินขีดความสามารถของการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยรูปแบบโครงข่ายจากรูปแบบ VRS, FKP, MAC และ I-MAC ณ ช่วงเวลาเดียวกัน โดยเป็นการทดลองรับสัญญาณในจุดเป็นพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางบางส่วนและโล่งแจ้งไม่มีสิ่งกีดขวาง

1.2 วัดดูประสงค์

สำหรับวัตถุประสงค์จะกล่าวถึงการประเมินขีดความสามารถ และเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดของการรังวัดแบบ NRTK โดยมีรูปแบบดังนี้

1.2.1 เพื่อประเมินขีดความสามารถ GNSS Fixed Solution ของการรังวัดแบบ NRTK จากรูปแบบ VRS, FKP, MAC, I-MAC ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ในพื้นที่โล่ง และมีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ โดยใช้ค่าพิกัดการรังวัดแบบ Static เป็นค่าอ้างอิง ในพื้นที่โล่ง และมีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

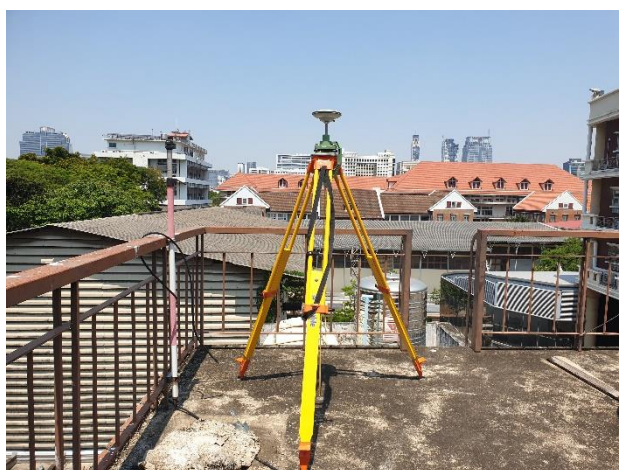
สำหรับขอบเขตงานวิจัยจะกล่าวถึง ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษาวิจัย ขอบเขตพื้นที่ที่ศึกษาวิจัย ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย และโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.1.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษาวิจัย

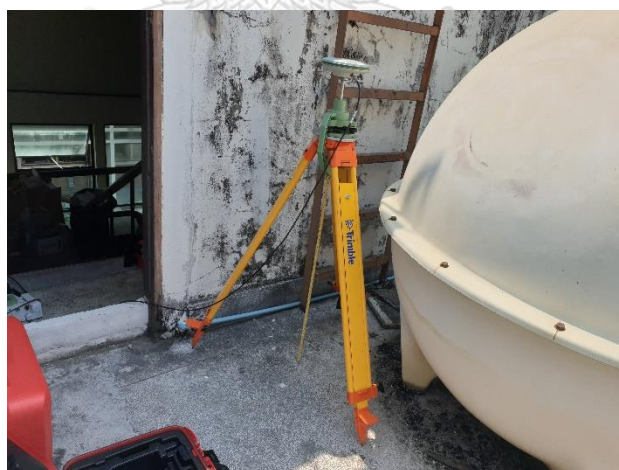
ศึกษาข้อมูลที่ได้จากการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ VRS, FKP, MAC และ I-MAC จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ยี่ห้อ Leica รุ่น GS10 เพื่อใช้เป็น rover receiver โดยจะพิจารณาการ Fixed solution เฉพาะแบบ GNSS Fixed Solution เท่านั้น

1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ที่ศึกษาวิจัย

การศึกษานี้ทำการรังวัดแบบ NRTK บริเวณดาดฟ้าตึกวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นระยะเวลา 3 วัน ตั้งแต่วันที่ 12 มีนาคม 2563 ถึงวันที่ 14 มีนาคม 2563 โดยรังวัด 2 จุด ได้แก่ พื้นที่โล่ง ตามรูปที่ 1.2 และพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 พื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 1.3 พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์

1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.3.2.1 ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลที่ได้จากการรังวัดแบบ NRTK ทำการ export ออกมาในรูปแบบ .txt ทั้ง 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 1.4 เป็นตัวอย่างข้อมูลของการรังวัดแบบ NRTK ด้วยรูปแบบ VRS ซึ่งจะมีจำนวน epoch ทั้งหมด 86,400 epochs ในที่นี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างจำนวน 20 epochs โดยมีข้อมูลที่แสดง ดังนี้

PT	CLASS	EAST	NORTH	ORTO HI	ELL HI	DATE	TIME
GSA000001	GNSS fixed	665679.164	1518994.329	16.256	-14.185	13-03-2020	6, 7, 16
GSA000002	GNSS fixed	665679.161	1518994.329	16.246	-14.195	13-03-2020	6, 7, 17
GSA000003	GNSS fixed	665679.163	1518994.331	16.243	-14.199	13-03-2020	6, 7, 18
GSA000004	GNSS fixed	665679.167	1518994.330	16.239	-14.202	13-03-2020	6, 7, 19
GSA000005	GNSS fixed	665679.160	1518994.332	16.243	-14.198	13-03-2020	6, 7, 20
GSA000006	GNSS fixed	665679.162	1518994.331	16.256	-14.185	13-03-2020	6, 7, 21
GSA000007	GNSS fixed	665679.167	1518994.332	16.247	-14.195	13-03-2020	6, 7, 22
GSA000008	GNSS fixed	665679.167	1518994.335	16.252	-14.189	13-03-2020	6, 7, 23
GSA000009	GNSS fixed	665679.165	1518994.336	16.271	-14.170	13-03-2020	6, 7, 24
GSA000010	GNSS fixed	665679.168	1518994.336	16.252	-14.189	13-03-2020	6, 7, 25
GSA000011	GNSS fixed	665679.165	1518994.336	16.254	-14.187	13-03-2020	6, 7, 26
GSA000012	GNSS fixed	665679.165	1518994.330	16.254	-14.187	13-03-2020	6, 7, 27
GSA000013	GNSS fixed	665679.165	1518994.333	16.249	-14.193	13-03-2020	6, 7, 28
GSA000014	GNSS fixed	665679.166	1518994.332	16.261	-14.180	13-03-2020	6, 7, 29
GSA000015	GNSS fixed	665679.165	1518994.334	16.268	-14.173	13-03-2020	6, 7, 30
GSA000016	GNSS fixed	665679.163	1518994.331	16.251	-14.191	13-03-2020	6, 7, 31
GSA000017	GNSS fixed	665679.164	1518994.335	16.263	-14.179	13-03-2020	6, 7, 32
GSA000018	GNSS fixed	665679.164	1518994.334	16.257	-14.184	13-03-2020	6, 7, 33
GSA000019	GNSS fixed	665679.164	1518994.334	16.256	-14.185	13-03-2020	6, 7, 34
GSA000020	GNSS fixed	665679.166	1518994.333	16.259	-14.183	13-03-2020	6, 7, 35

รูปที่ 1.4 ตัวอย่างข้อมูลของการรังวัดแบบ NRTK ด้วยรูปแบบ VRS

โดยกำหนดให้	PT	คือ ชื่อค่าพิกัด
	CLASS	คือ ผลสำเร็จในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมี 4 แบบ คือ GNSS Fixed, GPS Fixed, GNSS code only, GPS code only
	EAST	คือ ค่าพิกัด Easting
	NORTH	คือ ค่าพิกัด Northing
	ORTO HI	คือ ค่าความสูง Orthometric
	ELL HI	คือ ค่าความสูง Ellipsoidal
	DATE	คือ วัน-เดือน-ปี ที่ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียม
	TIME	คือ เวลาทำการรังวัด แสดงเป็นชั่วโมง นาที และวินาที

1.3.2.2 ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบ Static ทำการ export ออกมาในรูปแบบ RINEX file จากนั้นใช้โปรแกรม Spider.net ในการคำนวณค่าพิกัดอ้างอิง แสดงออกมาเป็นรายงาน (report) ดังรูปที่ 1.5

2.1. GS0002 - 2020-03-14 13:20:32

Point Occupation Results

Marker Name: GS0002
 Receiver Type / SN: LEICA GS10 / 3230511
 Antenna Type / SN: LEIAS10 NONE /
 Occupation Start: 2020-03-14 13:20:32
 Occupation End: 2020-03-14 13:20:51

Averaged Point Summary: GS0002

Weighted Average: Yes

WGS84 Latitude: 13° 44' 07.6034" N SD Latitude: 0.0096 m
 WGS84 Longitude: 100° 31' 56.2699" E SD Longitude: 0.0004 m
 WGS84 Ellip. Height: -12.8339 m SD Height: 0.0054 m

WGS84 Cartesian X: -1132728.8369 m SD X: 0.0011 m
 WGS84 Cartesian Y: 6092489.6141 m SD Y: 0.0056 m
 WGS84 Cartesian Z: 1504562.1569 m SD Z: 0.0094 m

Easting: - SD Easting: -
 Northing: - SD Northing: -
 Ellip. Height: - SD Height: -
 Ortho. Height: -

Baseline Summary GS0002

Point-ID	Reference	Baseline Length [m]	3D CQ [m]	ΔX	ΔY	ΔZ	X	Y	Z
GS0002							-1132728.8369 m	6092489.6141 m	1504562.1569 m
	MRBR	77304.2716 m	0.0059 m	-0.0019 m	0.0137 m	-0.0153 m	-1132728.8351 m	6092489.6004 m	1504562.1721 m
	PCCO	121019.9838 m	0.0441 m	0.0032 m	0.1851 m	0.0735 m	-1132728.8401 m	6092489.4290 m	1504562.0833 m
	SBKK	9416.1966 m	0.0033 m	0.0006 m	-0.0041 m	0.0043 m	-1132728.8375 m	6092489.6182 m	1504562.1526 m
	TNPT	74967.9681 m	0.1560 m	-0.0417 m	0.4300 m	0.4134 m	-1132728.7953 m	6092490.0441 m	1504562.5703 m
	TSRI	121661.4314 m	0.0301 m	-0.0078 m	0.1445 m	0.0018 m	-1132728.8292 m	6092489.4696 m	1504562.1587 m

รูปที่ 1.5 ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบ Static

1.3.2.3 ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลที่ได้จาก GNSS CORS Network จำนวน 5 สถานี ได้แก่ สถานีกรมแผนที่ทหาร (SBKK), สถานีเมืองราชบุรี (MRBR), สถานีท่าตะเกียบ (PCCO), สถานีกำแพงแสน (TNPT) และสถานีมวกเหล็ก (TSRI) ตำแหน่งของ GNSS CORS Network ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ แสดงตามรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ตำแหน่งของ GNSS CORS จำนวน 5 สถานี

ตารางที่ 1.1 แสดงตำแหน่งค่าพิกัดของ GNSS CORS

Station	Latitude	Longitude	Height(m)
SBKK	13° 47' 35" N	100° 35' 47" E	1.3
MRBR	13° 33' 38" N	99° 50' 26" E	-21.8
PCCO	13° 26' 42" N	101° 36' 38" E	49.6
TNPT	14° 05' 17" N	99° 56' 24" E	-19.4
TSRI	14° 39' 07" N	101° 09' 18" E	475.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย มีดังนี้

1.3.3.1 เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Leica รุ่น AS10



รูปที่ 1.7 เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Leica รุ่น AS10

1.3.3.2 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ยี่ห้อ Leica รุ่น GS10



รูปที่ 1.8 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ยี่ห้อ Leica รุ่น GS10

1.3.3.3 เครื่องแยกสัญญาณจาก GNSS (GNSS signal splitter)



รูปที่ 1.9 เครื่องแยกสัญญาณจาก GNSS (GNSS signal splitter)

1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ใช้โปรแกรม SPIDER ในการประมวลผลค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม

GNSS แบบ Static

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถทราบถึงประสิทธิภาพของการรังวัดแบบจลน์ทั้ง 4 วิธีภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน
- 1.4.2 สามารถเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจในการเลือกวิธีการรังวัดจากภูมิประเทศจริง
- 1.4.3 ทราบถึงสาเหตุจากปัญหาการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในแต่ละพื้นที่ปฏิบัติงานได้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบนำทางด้วยดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS)

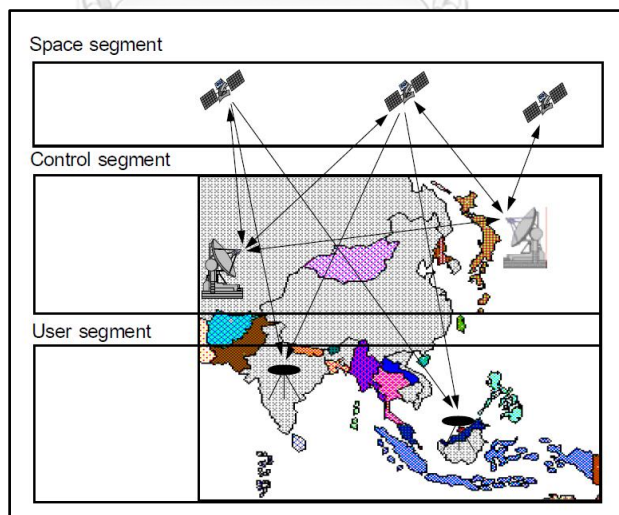
รูปแบบนำทางด้วยดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS) เป็นรูปแบบดาวเทียมนำหนที่ให้อัข้อมูลพิกัดบนพื้นผิวโลกที่มีความต่อเนื่องในการกระจายสัญญาณแบบหลายความถี่ (L-Band) ซึ่งปัจจุบันได้มีรูปแบบดาวเทียมเกิดขึ้นหลายรูปแบบ เช่น GLONASS ที่มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบดาวเทียม GPS โดยการทำงานของรูปแบบดาวเทียมนำหนจะส่งสัญญาณจากดาวเทียมส่งมายังอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณเพื่อนำค่ามาหาพิกัดต่าง ๆ เป็นต้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

ซึ่งในปัจจุบัน GNSS ได้มีดาวเทียมที่เกิดขึ้นมาใหม่อีกหลายประเทศ มีการพัฒนาขีดความสามารถในเรื่องของความแม่นยำทางตำแหน่งสามมิติ อายุการใช้งานบนอวกาศที่เพิ่มมากขึ้น การให้บริการในรูปแบบใหม่ๆ เพื่อสนองความต้องการของผู้ใช้ โดยในแต่ละประเทศหรือแต่ละภูมิภาคต่างก็มีความต้องการที่จะมีดาวเทียมเป็นของตัวเอง เพื่อที่จะสามารถได้ใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ อาทิเช่น Global Positioning System (GPS) ของประเทศ USA ได้มีการส่งดาวเทียมรุ่น GPS III จำนวน 2 ดวง เมื่อ 23 ธันวาคม 2561 และ 22 สิงหาคม 2562 ตามลำดับ โดยมีคุณสมบัติให้ความแม่นยำและกำลังส่งสัญญาณที่เพิ่มขึ้น พัฒนาสัญญาณ L1C ตัวใหม่ของพลเรือน และมีอายุการใช้งานของดาวเทียมเพิ่มขึ้นอีก 15 ปี, GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) ซึ่งเป็นของประเทศรัสเซีย ได้เปิดตัว GLONASS-M เมื่อวันที่ 16 มีนาคม 2563 ได้มีการปรับปรุงความเสถียรของนาฬิกาเครื่องรับดาวเทียม และพัฒนาโครงข่ายทางด้านข้อมูลภูมิศาสตร์เป็นทั่วโลก ซึ่งจากเดิมมีแค่รัสเซียเท่านั้น, Galileo Navigation Satellite System (Galileo) ของทางสหภาพยุโรป ได้ทำการเปลี่ยนดาวเทียมเป็นรุ่นที่สอง (G2G) ซึ่งการให้บริการจะเป็นบริการเชิงพาณิชย์ แบบไม่เสียค่าใช้จ่าย ซึ่งให้บริการแบบ High-Accuracy Service (HAS) และ Pre-cise Point Positioning (PPP) โดยความแม่นยำจากดาวเทียมจะอยู่ที่ 20-40 ซม., BeiDou Navigation Satellite System (BDS) เป็นดาวเทียมของสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีการพัฒนาที่รวดเร็วมาก มีการเปิดตัวดาวเทียมถึง 18 ครั้งภายใน 2 ปี ซึ่งแต่ละดาวเทียมจะสามารถลิงค์ระหว่างดาวเทียมได้และให้บริการ PPP, และ Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) เป็นดาวเทียมของประเทศอินเดีย ซึ่งเป็นรูปแบบระบุตำแหน่งบนดาวเทียมที่เป็นอิสระ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำหนและกำหนดเวลาที่เชื่อถือได้ และยังสามารถขยายพื้นที่ไปรอบ ๆ ประเทศอินเดียได้อีก 1,500 กม. ซึ่งไม่นานมานี้ได้มีการตั้งชื่อใหม่ว่า Navigation with Indian Constellation (NavIC) (Hein, 2020)

Japanese Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) ของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นการใช้ดาวเทียมในระดับภูมิภาค และยังมีภารกิจส่งสัญญาณดาวเทียมเสริม Systems (SBAS) ของญี่ปุ่นที่เรียกว่า Multifunctional Transport Satellites (MTSAT) ซึ่งให้บริการเป็นหลักในปัจจุบัน ทั้งด้านการคมนาคม การบิน ฯลฯ

Regional South Korean Positioning System (KPS) ของประเทศเกาหลีใต้ ได้วางการวางแผนรูปแบบนำทางด้วยดาวเทียมของตนเอง เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2561 ซึ่งจะคล้ายกับ NavIC และ QZSS โดยจะครอบคลุมพื้นที่ประเทศเกาหลีใต้และประมาณ 1,000 กม. ของพื้นที่โดยรอบ

ปัจจุบันได้มีการนำเอารูปแบบ GNSS เข้ามาใช้ในงานด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะใช้ในด้าน การนำทาง การระบุตำแหน่ง หรืองานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งสูงเช่น งานสำรวจ งานทำแผนที่ หรืองานออกแบบทางด้านวิศวกรรม เป็นต้น แต่รูปแบบ GNSS ไม่ได้มีแค่การนำทางหรือระบุตำแหน่งเพียงอย่างเดียว เรายังสามารถนำรูปแบบนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ที่ผ่านมามีผู้ศึกษาวิจัยประยุกต์ใช้รูปแบบ GNSS กับงานประเภทต่าง ๆ เช่น การจัดการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (Disaster Mitigation and Management) การบริการบอกตำแหน่ง (Location based Services) การเกษตรความแม่นยำสูง (Precise Agriculture) แนะนำหรือควบคุมเครื่องจักรและการสำรวจ (Construction machine guidance/control and survey) รูปแบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligence Transportation Systems) ฯลฯ โดยหลักการทำงานจะมีส่วนประกอบ 3 ส่วนหลักในรูปแบบดาวเทียมจีพีเอส แสดงตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักในรูปแบบดาวเทียมจีพีเอส

- 1) ส่วนอวกาศ (Space segment) ส่วนอวกาศประกอบด้วยดาวเทียมและสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียม โดยระบบดาวเทียม GNSS ซึ่งโคจรรอบโลกที่ความสูงประมาณ 20,000 กิโลเมตร โดยดาวเทียม GNSS ในแต่ละระบบ จะมีกลุ่มดาวเทียมที่มีการจัดรูปแบบวงโคจร ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ แต่โดยส่วนมากจะจัดให้สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวงทั่วโลกตลอด 24 ชั่วโมง และสำหรับสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียม โดยทั่วไปจะเป็น คลื่นวิทยุ โดยคลื่นดังกล่าวนี้ถูกผสมผสานรหัสและข้อมูลดาวเทียมไปกับคลื่นหรือเรียกสั้นๆ ว่าการกล้ำสัญญาณ (Modulation) ด้วยรหัสและข้อมูลดาวเทียม ซึ่งได้แก่ ข้อมูลวงโคจรที่ถูกต้อง ของดาวเทียม (Ephemeris Data) ส่งรหัส (Code) และข้อมูล Carrier Phase และข้อมูลตำแหน่งโดยประมาณของดาวเทียมทั้งหมด (Almanac Information) เป็นต้น
- 2) ส่วนควบคุม (Control Segment) ส่วนควบคุมประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดินที่จำเป็นต่อการติดตามดาวเทียม การคำนวณวงโคจรดาวเทียม การดูแลรักษาระบบ และควบคุมส่วน อวกาศ ซึ่งประกอบด้วยสถานีควบคุมหลัก (Master control station) ที่ทำการประมวลผลข้อมูล ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลวงโคจรดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้เวลา นาฬิกา ดาวเทียม หรือข้อมูลอื่น ๆ สถานีอัปโหลด (Upload station) จะเป็นสถานีที่คอยส่งข้อมูลที่คำนวณได้จากสถานีควบคุมหลัก ไปยังดาวเทียมและสถานีติดตาม (Monitor Stations) ซึ่งทำหน้าที่คอยติดตามดาวเทียม
- 3) ส่วนผู้ใช้ (User Segment) ส่วนผู้ใช้ประกอบด้วยทุก ๆ ส่วน ไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้ งานในด้านต่าง ๆ ตัวเครื่องรับสัญญาณ หรือวิธีการประมวลผลที่อยู่ในรูปของซอฟต์แวร์ สำหรับ ประเภทผู้ใช้จะถูกแบ่งออกเป็นผู้ใช้ทางการทหาร และพลเรือน โดยผู้ใช้พลเรือน จะไม่ได้รับ อนุญาตให้สามารถเข้าถึงสัญญาณหรือบริการของ GNSS ทั้งหมดได้ ปัจจุบันเครื่องรับสัญญาณ ดาวเทียมมีความหลากหลายอย่างมาก โดยแบ่งตามชนิดของการรับสัญญาณ ได้แก่ การรับสัญญาณด้วย ซูโดเรนจ์ การรับสัญญาณความถี่แบบหนึ่งความถี่ สองความถี่ หรือมากกว่านั้น โดยทั่วไปแล้วจะ ให้ข้อมูลสถานะกลุ่มดาวเทียม กำหนดเวลาและข้อมูลการโคจร

2.2 หลักการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS

สำหรับหลักการการตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS จะประกอบไปด้วย วิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning) และค่าเรขาคณิตของดาวเทียม (Satellite Geometry) โดยอธิบายรายละเอียดได้ ดังนี้

2.2.1 วิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์เป็นวิธีที่ใช้สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูงและ จะต้องทราบตำแหน่งสัมบูรณ์อย่างน้อยหนึ่งจุด เพื่อใช้หาตำแหน่งสัมบูรณ์ของจุดอื่น ๆ ฉะนั้นจะต้องมีเครื่องรับอย่างน้อย 2 เครื่องในการทำงาน หลักการทำงานของการทำงาน ตำแหน่งแบบสัมพัทธ์คือการนำเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่หนึ่งไปวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า สถานีฐาน (Base station) หรือสถานีอ้างอิง (Reference station) ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ซึ่งเรียกว่า สถานีผู้ใช้ (User station) การหาค่าพิกัดของ ตำแหน่งจุดต่าง ๆ ด้วยวิธีนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีจรจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน ทั้งนี้จะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง ด้วยการทำงานในลักษณะดังกล่าว ความคลาดเคลื่อนมีระบบ (Systematic errors) หลายชนิด ดังเช่น ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจร ความคลาดเคลื่อนจากชั้น บรรยากาศ ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ เป็นต้น โดยจะถูกหักล้างกันไปทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้นั้นดีขึ้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

2.2.2 ค่าเรขาคณิตของดาวเทียม (Satellite Geometry)

ค่าความถูกต้องของตำแหน่งที่ได้จะขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของดาวเทียม ซึ่งสามารถบ่งชี้ ได้ด้วยค่า DOP (Dilution of Precision) แสดงไว้ดังสมการที่ (2.1)

$$\sigma = \sigma_0 * DOP \quad (2.1)$$

โดยที่ σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งที่ต้องการทราบ

σ_0 คือ แสดงถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่วัดได้

ทั้งนี้ค่า DOP ยังแบ่งออกได้เป็นหลายๆชนิด เช่น HDOP (Horizontal Dilution of Precision), PDOP (Positional Dilution of Precision), TDOP (Time Dilution of Precision), GDOP (Geometric Dilution of Precision) เป็นต้น ซึ่งค่า GDOP จะเป็นตัว บ่งชี้ถึงความถูกต้อง

โดยรวม หากสมมติว่าความถูกต้องของระยะที่วัดได้เท่ากัน จะเห็นได้ว่า ถ้าค่า DOP ยิ่งต่ำก็จะทำให้ได้ความถูกต้องของตำแหน่งที่ต้องการสูงขึ้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

2.3 วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมจากสมการค่าสังเกต (Observation Equation)

ค่าที่รังวัดได้จากการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส และนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาตำแหน่งที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ ซูโดเรนจ์ (Pseudorange) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 ซูโดเรนจ์ (Pseudorange)

คือ ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม โดยหาได้จากการถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งออกจากดาวเทียมเปรียบเทียบกับรหัสที่เครื่องรับสัญญาณสร้างขึ้น โดยจะทำการเลื่อนไปมาจนกระทั่งได้รหัสที่ตรงกัน ทำให้ทราบระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ เมื่อนำระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณมาคูณกับความเร็วแสง จะได้ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณ เรียกว่า ซูโดเรนจ์ ค่ารังวัดที่ได้จากซูโดเรนจ์นี้ จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากระยะทางจริงระหว่างดาวเทียม และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม อันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนหลายชนิด เช่น ความคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม และความคลาดเคลื่อนเมื่อคลื่น เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ เป็นต้น ดังสมการ

$$R = \rho + \Delta r + d_{ion} + d_{trop} + c(\Delta\delta_r - \Delta\delta^s) + dm_R + \varepsilon_R \quad (2.2)$$

โดยที่	R	คือ ข้อมูลซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดระหว่างดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร)
	ρ	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ (เมตร)
	Δr	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
	d_{ion}	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)
	d_{trop}	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (เมตร)
	c	คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (วินาที/เมตร)
	$\Delta\delta_r$	คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
	$\Delta\delta^s$	คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
	dm_R	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (เมตร)
	ε_R	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในซูโดเรนจ์ที่วัดได้ของคลื่นส่ง (เมตร)

2.3.2 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)

คือ การวัดเฟสของคลื่นส่งใช้สำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูงในระดับเซนติเมตร ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการประมวลผลข้อมูลซึ่งการวัดเฟสของคลื่นส่งในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม เป็นการวัดเปรียบเทียบหรือค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งสัญญาณลงมากับเฟสของคลื่นความถี่ที่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมสร้างขึ้นมา โดยดาวเทียมจะแยกคลื่นส่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของสัญญาณคลื่นจำนวนเต็มรอบ (Integer Cycle Part) เรียกว่า จำนวนลูกคลื่นปริศนา (Integer Cycle Ambiguity) หรือเลขปริศนา (Ambiguity) กับส่วนที่สัญญาณไม่เต็มรอบ (Fractional Part) โดยสมการค่าสังเกตของการวัดเฟสของคลื่นส่ง (Leick et al., 2015; Rizos, 1997; Teunissen & Odijk, 1997) ดังสมการ

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

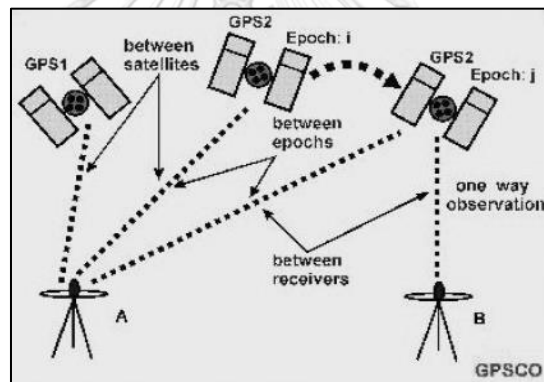
โดยที่

φ	คือ เฟสของคลื่นส่ง (เมตร)
ρ	(เมตร) คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ
Δr	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
d_{ion}	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)
d_{trop}	(เมตร) คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์
c	(วินาที/เมตร) คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง
$\Delta\delta_r$	คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
$\Delta\delta^s$	(วินาที) คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม
dm_φ	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (เมตร)
ε_φ	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (เมตร)
λ	คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)
N	คือ Ambiguity หรือ เลขปริศนาของคลื่นส่ง

สำหรับงานวิจัยจะมีรูปแบบการ fixed solution ทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ GNSS fixed, GPS fixed, GNSS code only, GPS code only ซึ่งงานวิจัยจะเลือกใช้เฉพาะ GNSS fixed solution ในการวิเคราะห์เท่านั้น เพราะมีการ fixed ambiguity ที่สมบูรณ์ และประสิทธิภาพของเครื่องมือรังวัดสัญญาณดาวเทียมสามารถรองรับระบบ GNSS ได้

2.4 เทคนิคค่าต่าง (Differencing technique)

การหาค่าต่างสามารถทำได้ 3 ลักษณะคือ ระหว่างเครื่องรับ (Between receivers) ระหว่างดาวเทียม (Between satellites) และระหว่างเวลา (Between epochs) ดังรูปที่ 2.2 แต่โดยทั่วไปมักมีการจำแนกเทคนิคการหาค่าต่างตามจำนวนครั้งของการหาค่าต่าง และเทคนิคการหาค่าต่างที่เป็นที่นิยมใช้กันกว้างขวางนั้นมีอยู่ 3 วิธีคือ 1) การหาค่าต่างครั้งที่หนึ่ง (Single differencing) 2) การหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing) และ 3) การหาค่าต่างครั้งที่สาม (Triple differencing) โดยมีรายละเอียดดังนี้ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)



รูปที่ 2.2 พื้นที่แสดงเทคนิคค่าต่างลักษณะต่าง ๆ

2.4.1 การหาค่าต่างครั้งที่หนึ่ง (Single differencing)

เป็นการนำข้อมูลมาหาค่าต่างเพียงหนึ่งครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสามลักษณะดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1.1 ค่าต่างระหว่างเครื่องรับ (Between-Receiver differences)

การหาค่าต่างระหว่างเครื่องรับเป็นการนำเอาค่าที่วัดได้จากดาวเทียมดวงเดียวกันที่จุดสองจุดมาหาค่าต่าง เช่น มีการตั้งเครื่องรับที่จุด A และจุด B ซึ่งทั้งสองจุดสามารถรับข้อมูลจากดาวเทียมหมายเลข 1 จะได้สมการค่าสังเกต 2 สมการ คือสมการ (2.4) และ (2.5)

$$\varphi_A^1 = \rho_A^1 + \Delta_r^1 + d_{atmosA} + c(\Delta\delta_A - \Delta\delta^1) + \lambda N_A^1 \quad (2.4)$$

$$\varphi_B^1 = \rho_B^1 + \Delta_r^1 + d_{atmosB} + c(\Delta\delta_B - \Delta\delta^1) + \lambda N_B^1 \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.3) และ (2.4) จะเห็นว่ามีผลรวมความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (d_{trop}) และไอโอโนสเฟียร์ (d_{ion}) เป็นความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศหนึ่งเทอม (d_{atmos}) และสมมติว่าไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (dm_{ϕ}) และสัญญาณรบกวนในข้อมูล (ε_{ϕ}) (เมื่อทำการหาค่าต่างระหว่างเครื่องรับ โดยนำสมการ (2.4) ลบด้วยสมการ (2.5) จะได้

$$\varphi_A^1 - \varphi_B^1 = \rho_A^1 - \rho_B^1 + c(\Delta\delta_A - \Delta\delta_B) + \lambda(N_A^1 - N_B^1) \quad (2.6)$$

การหาค่าต่างแบบนี้จึงสามารถจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียม และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ ทั้งจากไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ โดยประสิทธิภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างเครื่องรับทั้งสองหรือที่เรียกกันว่า ระยะเส้นฐาน (Baseline length) เรียกการหาค่าต่างแบบนี้ว่า “การหาค่าต่างครั้งที่หนึ่ง” (Single difference)

2.4.1.2 ค่าต่างระหว่างดาวเทียม (Between-Satellite differences)

การหาค่าต่างระหว่างดาวเทียมเป็นการนำเอาค่าที่วัดได้จากจุดเดียวกันไปยังดาวเทียมต่างดวงกันมาหาค่าต่าง เช่น มีการตั้งเครื่องรับที่จุด A ซึ่งสามารถรับข้อมูลจากดาวเทียมหมายเลข 1 และ 2 ได้พร้อมกัน สามารถเขียนสมการค่าสังเกตของข้อมูลเฟสคลื่นส่งที่จุด A ไปยังดาวเทียมหมายเลข 1 และ 2 ได้ดังนี้

$$\varphi_A^1 = \rho_A^1 + \Delta r^1 + d_{atmosA}^1 + c(\Delta\delta_A - \Delta\delta^1) + \lambda N_A^1 \quad (2.7)$$

$$\varphi_A^2 = \rho_A^2 + \Delta r^2 + d_{atmosA}^2 + c(\Delta\delta_A - \Delta\delta^2) + \lambda N_A^2 \quad (2.8)$$

เมื่อทำการหาค่าต่างระหว่างดาวเทียม โดยนำสมการ (2.7) ลบด้วยสมการ (2.8) จะได้

$$\varphi_A^1 - \varphi_A^2 = \rho_A^1 - \rho_A^2 + \Delta r^1 - \Delta r^2 + \Delta d_{atmosA} + c(\Delta\delta^2 - \Delta\delta^1) + \lambda(N_A^1 - N_A^2) \quad (2.9)$$

การหาค่าต่างแบบนี้จึงสามารถจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาเครื่องรับ

2.4.1.3 ค่าต่างระหว่างเวลา (Between-Epoch differences)

การหาค่าต่างระหว่างเวลาเป็นการนำเอาค่าที่วัดได้ที่จุดเดียวกัน ไปยังดาวเทียมดวงเดียวกันแต่ต่างเวลากันมาหาค่าต่าง เช่น มีการตั้งเครื่องรับที่จุด A ซึ่งสามารถรับข้อมูลจากดาวเทียมหมายเลข 1 โดยรับข้อมูล 2 ระยะเวลา เราสามารถเขียนสมการค่าสังเกตของข้อมูลเฟสคลื่นส่งที่จุด A ไปยังดาวเทียมหมายเลข 1 ณ เวลา t_0 และ t_1 ได้ดังนี้

$$\varphi_A^1(t_0) = \rho_A^1(t_0) + \Delta r^1(t_0) + d_{atmosA}^1(t_0) + c(\Delta\delta_A(t_0) - \Delta\delta^1(t_0)) + \lambda N_A^1(t_0) \quad (2.10)$$

$$\varphi_A^1(t_1) = \rho_A^1(t_1) + \Delta r^1(t_1) + d_{atmosA}^1(t_1) + c(\Delta\delta_A(t_1) - \Delta\delta^1(t_1)) + \lambda N_A^1(t_1) \quad (2.11)$$

ในกรณีที่ไม่มีเกิดการเกิดคลื่นหลุด (Cycle slip) ระหว่างเวลา t_0 และ t_1 ค่า $\lambda N_A^1(t_0)$ จะเท่ากับ $\lambda N_A^1(t_1)$ ดังนั้นเมื่อทำการหาค่าต่างระหว่างเวลา โดยนำสมการ (2.10) ลบด้วยสมการ (2.11) จะได้

$$\varphi_A^1(t_0) - \varphi_A^1(t_1) = \rho_A^1(t_0) - \rho_A^1(t_1) + \Delta r^1(t_0) - \Delta r^1(t_1) + c(\Delta\delta_A(t_0) - \Delta\delta^1(t_0)) - c(\Delta\delta_A(t_1) - \Delta\delta^1(t_1)) \quad (2.12)$$

การหาค่าต่างแบบนี้จึงสามารถจัดเลขปริศนา และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศทั้งจากไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ออกไปได้มาก โดยที่ประสิทธิภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นขึ้นอยู่กับความห่างของช่วงเวลาทั้งสอง อย่างไรก็ตามการเก็บข้อมูลจีพีเอส มักจะมีการกำหนดอัตราถี่ของการบันทึกข้อมูลไว้ไม่เกิน 30 วินาที ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่างระหว่างเวลาสามารถใช้จัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศทั้งจากไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ออกไปได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศนั้นค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับอัตราถี่ของการบันทึกข้อมูล

2.4.2 การหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing)

เป็นการนำข้อมูลมาหาค่าต่างสองครั้ง กล่าวคือเป็นการหาค่าต่างระหว่างจุดสองจุดและดาวเทียมสองดวง เช่น ระหว่างจุด A, B และดาวเทียม 1, 2 ซึ่งหากเปลี่ยนหมายเลขดาวเทียมในสมการ (2.6) จากหมายเลข 1 เป็น 2 จะได้

$$\varphi_A^2 - \varphi_B^2 = \rho_A^2 - \rho_B^2 + c(\Delta\delta_A - \Delta\delta_B) + \lambda(N_A^2 - N_B^2) \quad (2.13)$$

เมื่อทำการหาค่าต่างครั้งที่สอง โดยนำสมการ (2.6) ลบด้วยสมการ (2.13) จะได้

$$(\varphi_A^1 - \varphi_B^1) - (\varphi_A^2 - \varphi_B^2) = (\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^2 - \rho_B^2) + \lambda(N_A^1 - N_B^1) - \lambda(N_A^2 - N_B^2) \quad (2.14)$$

สามารถเขียนย่อ ๆ ได้ดังนี้

$$\varphi_{AB}^{12} = \rho_{AB}^{12} + \lambda N_{AB}^{12} \quad (2.15)$$

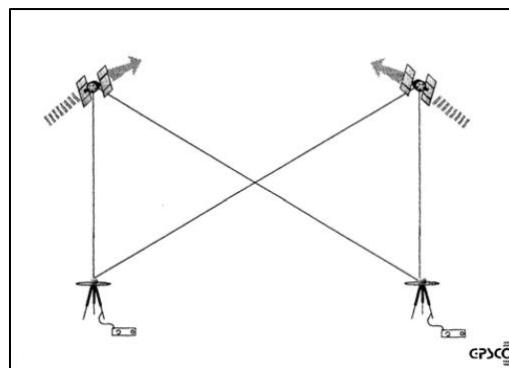
โดยที่

$$\varphi_{AB}^{12} = (\varphi_A^1 - \varphi_B^1) - (\varphi_A^2 - \varphi_B^2)$$

$$\rho_{AB}^{12} = (\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^2 - \rho_B^2)$$

$$\lambda N_{AB}^{12} = \lambda(N_A^1 - N_B^1) - \lambda(N_A^2 - N_B^2)$$

การหาค่าต่างแบบนี้จะสามารถขจัดค่าความคลาดเคลื่อน ที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียมและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาเครื่องรับ และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียมและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศทั้งจากไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ เช่นเดียวกับกับการหาค่าต่างระหว่างเครื่องรับ ประสิทธิภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นขึ้นอยู่กับระยะเส้นฐาน ดังรูปที่ 2.3 แสดงการหาค่าต่างครั้งที่สอง



รูปที่ 2.3 การหาค่าต่างครั้งที่สอง (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

2.4.3 การหาค่าต่างครั้งที่สาม (Triple differencing)

เป็นการนำข้อมูลมาหาค่าต่างสามครั้ง กล่าวคือเป็นการนำเอาค่าต่างครั้งที่สองระหว่างเวลาสองเวลามาหาค่าต่างกัน ซึ่งหากใส่เวลา t_0 และ t_1 ในสมการ (2.13) จะได้

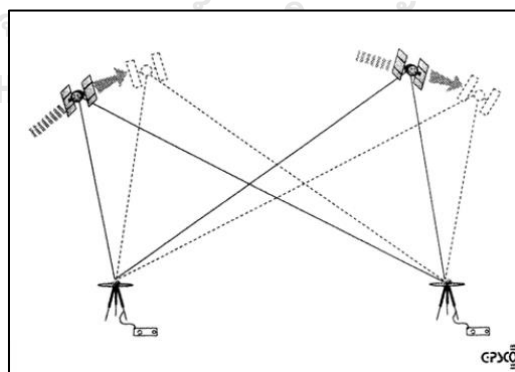
$$\varphi_{AB}^{12}(t_0) = \rho_{AB}^{12}(t_0) + \lambda N_{AB}^{12}(t_0) \quad (2.16)$$

$$\varphi_{AB}^{12}(t_1) = \rho_{AB}^{12}(t_1) + \lambda N_{AB}^{12}(t_1) \quad (2.17)$$

หากไม่มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดคลื่นหลุด เมื่อนำสมการ (2.16) ลบกับสมการ (2.17) จะได้

$$\varphi_{AB}^{12}(t_0) - \varphi_{AB}^{12}(t_1) = \rho_{AB}^{12}(t_0) - \rho_{AB}^{12}(t_1) \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.18) จะเห็นได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนหลายชนิดได้ถูกขจัดออกไปจากข้อมูล อย่างไรก็ตามผลเสียของการหาค่าต่างครั้งที่สามก็คือ ระดับสัญญาณรบกวนในข้อมูลนั้นเพิ่มขึ้นและยังทำให้เรขาคณิตของการหาดำแหน่งยังแย่ลงด้วย (Rizos, 1997) ด้วยเหตุนี้จึงไม่นิยมใช้ค่าต่างครั้งที่สามมาเป็นสมการค่าสังเกตในการหาดำแหน่งที่ถูกต้องสูงด้วยจีพีเอส อย่างไรก็ตามค่าต่างครั้งที่สามมักถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจหาค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคลื่นหลุด เนื่องจากถ้านำข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคลื่นหลุดมาหาค่าต่างครั้งที่สามจะพบว่าค่า N_{AB}^{12} ที่เวลา t_0 และ t_1 จะมีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.4 แสดงการหาค่าต่างครั้งที่สาม



รูปที่ 2.4 การหาค่าต่างครั้งที่สาม (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

2.5 วิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยรูปแบบโครงข่ายสถานีฐาน (Network-Based RTK: NRTK)

วิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยรูปแบบโครงข่ายสถานีฐาน (Network-Based RTK) หรือเรียกว่า NRTK ซึ่งมีข้อดีคือ มีผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่น้อยกว่าเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีแบบเดิมหรือ RTK ซึ่งความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่จะถูกขจัดในขั้นตอนการประมวลผลเพื่อหาตำแหน่ง โดยวิธีการรังวัดแบบ NRTK นี้ถูกพัฒนาออกมาเพื่อปรับปรุงและแก้ไขข้อจำกัดของเทคนิคการรังวัดแบบ RTK ส่งผลให้วิธีการรังวัดแบบ NRTK นั้นสามารถลดข้อจำกัดในเรื่องของความถูกต้องทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดเมื่อมีระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การหาเลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็มตามทฤษฎีนั้นมีประสิทธิภาพและทำให้ขบวนการประมาณค่าเลขปริศนาทำได้ง่ายและรวดเร็วกว่าโดยมีความน่าเชื่อถือมากกว่าวิธีการรังวัดแบบ RTK ซึ่งเป็นผลจากการที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง ช่วยให้การหาตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งานสามารถทำได้รวดเร็ว และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นด้วยวิธีการรังวัดแบบ NRTK นั้นมีองค์ประกอบของเทคนิคที่ประกอบด้วย สถานีฐานถาวร , ศูนย์ควบคุมกลาง และสถานีผู้ใช้งาน ซึ่งแตกต่างจากเทคนิคการรังวัดแบบ RTK แต่การทำงานในสนามของวิธีการรังวัดแบบ NRTK มีความคล้ายคลึงกับวิธีการรังวัดแบบ RTK โดยหลักการทำงานของวิธีการรังวัดแบบ NRTK จะเริ่มจากสถานีฐานถาวรที่มีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงชนิดหลายความถี่ อย่างน้อย 3 สถานี ที่ติดตั้งในที่ตั้งที่ถาวรซึ่งสภาพพื้นที่โดยรอบไม่มีสิ่งกีดขวางและมีอินเทอร์เน็ตเชื่อมต่อ กับรูปแบบตลอดเวลาเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้ทันที เมื่อศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้รับข้อมูลมาจากทุกสถานีฐานถาวรหลังจากนั้นจะทำการประมวลผลเพื่อคำนวณหาค่าแก้คลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ เพื่อส่งให้สถานีผู้ใช้งานต่อไป เมื่อผู้ใช้งานต้องการทราบค่าพิกัดสามารถทำได้โดยใช้เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวไปวางตามตำแหน่งจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดที่อยู่ในพื้นที่รูปแบบโครงข่ายของสถานีฐานให้บริการ (อิทัต เจริญกาลัญญูตา, 2555)

หลักการทำงานของวิธีการรังวัดแบบ NRTK มีหลายแนวคิดแต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ ได้แก่ รูปแบบ Virtual Reference Station (VRS), รูปแบบ Flächen Korrektur Parameter (FKP), รูปแบบ Master Auxiliary Corrections (MAC) และรูปแบบ Individualized Master Auxiliary Corrections (I-MAC) โดยมีหลักการดังนี้

2.5.1 Virtual Reference Station (VRS)

รูปแบบ VRS ใช้หลักการสร้างสถานีเสมือนใกล้เคียงกับสถานีผู้ใช้งาน โดยสถานีผู้ใช้งานจะส่งค่าพิกัดโดยประมาณไปยังศูนย์ควบคุม เพื่อทำการปรับแก้ค่าพิกัด โดยรับค่าแก้จากสถานีฐานที่อยู่บริเวณรอบๆสถานีผู้ใช้งานอย่างน้อย 3 สถานี แล้วจึงส่งค่าพิกัดที่ปรับแก้แล้วให้กับสถานีผู้ใช้ ดังรูปที่ 2.5 เป็นการสื่อสารแบบ two-way communications ซึ่งจุดเด่นของรูปแบบ VRS คือได้ค่าพิกัดที่รวดเร็ว มีจำนวน epoch ที่ fixed solution ในจำนวนที่มากกว่ารูปแบบอื่นๆ ซึ่งข้อมูลในการรังวัดจะเป็นแบบเฟสคลื่นส่ง (Carrier Phase) โดย Hofmann-Wellenhof et al. (2008) ได้กล่าวถึงรูปแบบสมการดังนี้

$$\varphi_r^s(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(t) + f^s \Delta\delta_r^s(t) + N \quad (2.19)$$

โดยที่

- $\varphi_r^s(t)$ คือ ข้อมูลของการวัดเฟสของคลื่นส่งจากดาวเทียม (s) ถึงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (r) ณ เวลาใด ๆ (t) (เมตร)
- λ คือ ความยาวคลื่นส่ง (เมตร)
- $\rho_r^s(t)$ คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ณ เวลาใดๆ (เมตร)
- f^s คือ ความถี่ของคลื่นส่ง (เฮิรตซ์) ได้จาก $\frac{c}{\lambda}$ โดย c คือความเร็วแสง (วินาที/เมตร)
- $\Delta\delta_r^s(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ
- N คือ ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่ง

ในกรณีที่ต้องการขจัดค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม นาฬิกาเครื่องรับ และค่าเลขปริศนาของคลื่นส่ง สามารถทำได้โดยกรณีของรูปแบบ VRS จะทำการกำหนดสถานีอ้างอิงเสมือนเป็นเวกเตอร์ X_V สถานีเครื่องรับ A เป็นเวกเตอร์ X_A แทนในสมการที่ (2.19) จะได้

$$\varphi_r^s(X_V, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_V, t) + f^s \Delta\delta_r^s(t) + N \quad (2.20)$$

$$\varphi_r^s(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_A, t) + f^s \Delta\delta_r^s(t) + N \quad (2.21)$$

นำสมการ (2.20) ลบ สมการ (2.21) จะได้

$$\varphi_r^s(X_V, t) = \varphi_r^s(X_A, t) + \frac{1}{\lambda}(\rho_r^s(X_V, t) - \rho_r^s(X_A, t)) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานีอ้างอิงเสมือนจะสามารถหาค่าได้ กล่าวคือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานีเครื่องรับหาได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียมของ สถานีเครื่องรับ ส่วนระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม หาค่าได้จากการทราบ ตำแหน่งของดาวเทียมและตำแหน่งของสถานีเครื่องรับ แต่ในการใช้งานจริงจำเป็นต้องใช้สถานีฐาน อย่างน้อย 3 สถานี รวมถึงค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจร ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศทั้งไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ของแต่ละสถานี ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\Delta_r^s(X_A, t) = \Delta^{Orbit}(X_A, t) + \Delta^{Ionos}(X_A, t) + \Delta^{Tropos}(X_A, t) \quad (2.23)$$

โดยที่

$\Delta_r^s(X_A, t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ ที่สถานีเครื่องรับ A (เมตร)

$\Delta^{Orbit}(X_A, t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรที่สถานีเครื่องรับ A (เมตร)

$\Delta^{Ionos}(X_A, t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศทั้งไอโอโนสเฟียร์ ที่สถานีเครื่องรับ A (เมตร)

$\Delta^{Tropos}(X_A, t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศทั้งโทรโพสเฟียร์ ที่สถานีเครื่องรับ A (เมตร)

จึงต้องนำไปคำนวณปรับแก้เพื่อหารข้อมูลการวัดเฟสของสถานีอ้างอิงเสมือนใหม่ โดยทำไปใส่ในสมการ (21) จะได้

$$\varphi_r^s(X_V, t) = \varphi_r^s(X_A, t) + \frac{1}{\lambda}(\rho_r^s(X_V, t) - \rho_r^s(X_A, t)) + \Delta_r^s(X_A, t) \quad (2.24)$$

ถ้าเป็นกรณี 3 สถานีก็จะต้องกำหนดเวกเตอร์ X_B, X_C แล้วแทนลงในสมการ (2.23) จะได้

$$\varphi_r^s(X_V, t) = \varphi_r^s(X_B, t) + \frac{1}{\lambda}(\rho_r^s(X_V, t) - \rho_r^s(X_B, t)) + \Delta_r^s(X_B, t) \quad (2.25)$$

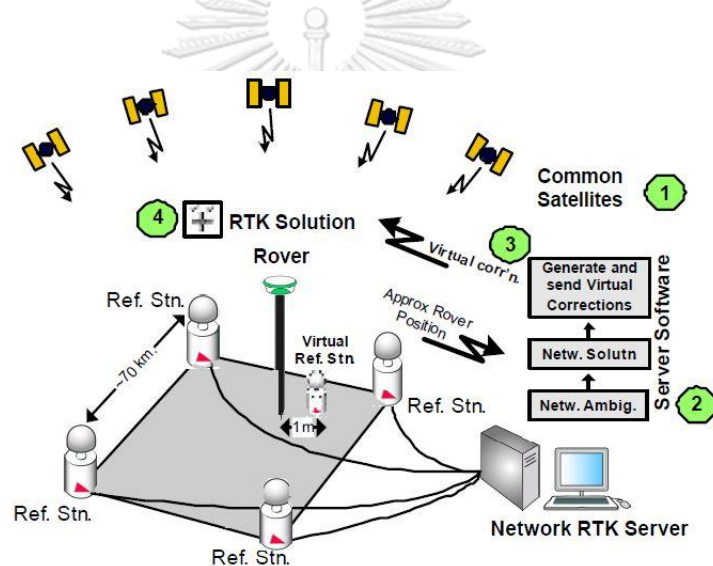
$$\varphi_r^s(X_V, t) = \varphi_r^s(X_C, t) + \frac{1}{\lambda}(\rho_r^s(X_V, t) - \rho_r^s(X_C, t)) + \Delta_r^s(X_C, t) \quad (2.26)$$

ดังนั้น การหาค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ ของแต่ละสถานีเครื่องรับ จะสามารถหาได้จากการประมาณค่าในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจะแสดงในสมการ (2.27) รวมถึงกรณีที่มีสถานีฐานมากกว่า 3 สถานี จะใช้เทคนิค Least-Square Adjustment เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวได้

$$\Delta_r^s(X_i, t) = aX_i + bY_i + cZ_i \quad (2.27)$$

โดยที่

$\Delta_r^s(X_i, t)$ คือค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ ที่สถานีเครื่องรับ i (เมตร)
 X_i, Y_i, Z_i คือ ค่าพิกัดทั้ง 3 ทิศทางที่สถานีเครื่องรับ i (เมตร)
 a, b, c คือค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรค่าพิกัด



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของรูปแบบ VRS (Leica Geosystems, 2008)

2.5.2 Flächen Korrektur Parameter (FKP)

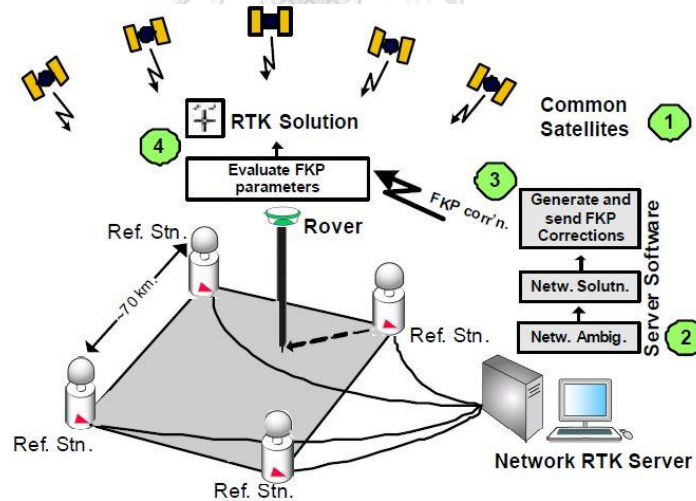
รูปแบบ FKP เป็นอีกรูปแบบที่ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบเชิงพื้นที่ และใช้ค่าพารามิเตอร์ร่วมกับข้อมูลจากสถานีอ้างอิงที่ใดที่หนึ่ง (Wübbena & Bagge, 2006) ดังรูปที่ 2.6 โดยเป็นการส่งข้อมูลแบบ One-way Communication ซึ่งไม่ต้องการการประมาณค่าพิกัดจากสถานีเครื่องรับไปยังศูนย์ควบคุม ทำให้การส่งข้อมูลมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากข้อมูลที่ทำการส่งมีจำนวนที่ไม่มากนัก ซึ่งรูปแบบ FKP นิยมนำมาใช้ปรับแก้ค่าพิกัดในระดับภูมิภาค โดยการปรับแก้พารามิเตอร์เป็นลักษณะของทิศเหนือ-ใต้ และทิศตะวันออก-ตก จากสถานีในโครงข่าย ส่งไปยังสถานีผู้รับ เพื่อทำการปรับแก้ต่อไป ดังรูปที่ โดยกำหนดให้ i เป็นสถานีเครื่องรับ และ $R1, R2, R3, \dots, Rn$ เป็นสถานีอ้างอิงที่อยู่ในโครงข่าย ซึ่งสามารถแสดงเป็นรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \delta_{i,R1}(t) &= a(t)(\Delta\phi_{i,R1}) + b(t)(\Delta\lambda_{i,R1}) + c(t) \\
 \delta_{i,R2}(t) &= a(t)(\Delta\phi_{i,R2}) + b(t)(\Delta\lambda_{i,R2}) + c(t) \\
 \delta_{i,R3}(t) &= a(t)(\Delta\phi_{i,R3}) + b(t)(\Delta\lambda_{i,R3}) + c(t) \\
 &\vdots \\
 \delta_{i,Rn}(t) &= a(t)(\Delta\phi_{i,Rn}) + b(t)(\Delta\lambda_{i,Rn}) + c(t)
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

โดยที่

$\delta_{i,R}(t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างสถานีเครื่องรับ (i) และสถานีอ้างอิง (R) ณ เวลาใดๆ (t)
 $a(t), b(t), c(t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์บนระนาบ ณ เวลาใดๆ
 $\Delta\phi_{i,R}, \Delta\lambda_{i,R}$ คือ ค่าต่างของค่าพิกัดภูมิศาสตร์ (ละติจูด, ลองจิจูด) ของสถานีเครื่องรับ (i) และสถานีอ้างอิง (R) (radian)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สามารถประมาณได้จากการให้น้ำหนัก (Weight) แล้วทำการปรับแก้แบบ Least-Square Adjustment



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของรูปแบบ FKP (Leica Geosystems, 2008)

2.5.3 Master Auxiliary Corrections (MAC)

รูปแบบ MAC ค่าปรับแก้จะได้จากสถานีอ้างอิงหลัก (Master station) และสถานีอ้างอิงรอง (Auxiliary station) โดยสถานีอ้างอิงหลักจะเป็นสถานีที่มีระยะ Baseline ใกล้กับสถานีผู้ใช้มากที่สุด แล้วนำค่าต่างของค่าแก้ระหว่างสถานีอ้างอิงหลักและสถานีอ้างอิงรองมาปรับแก้ทางตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งาน (Leica Geosystems, 2008) โดยเป็นการส่งข้อมูลแบบ one-way communication เหมือนกับรูปแบบ FKP ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งข้อดีของรูปแบบ MAC คือเมื่อสถานีผู้ใช้เคลื่อนที่สามารถปรับค่าแก้ได้ตลอดเวลา จึงทำให้มีค่าพิกัดที่คงที่และมีความน่าเชื่อถือที่สูง แต่ข้อจำกัดจะมีในเรื่องของจำนวนการ Fixed Solution โดยขั้นตอนของสมการ กำหนดให้ m เป็น Master station และ a เป็น Auxiliary station และ s เป็นดาวเทียมใด ๆ มีสมการดังนี้

$$\phi_{ma}^s = \phi_m^s + (\Delta R_{ma}^s - \delta \Delta r_{maTropos}^s + \delta \Delta r_{maOrbit,Ionos}^s + \Delta T_{ma}^s) / \lambda \quad (2.29)$$

จากความสัมพันธ์ของ

$$P_{ma}^s = \phi_{ma}^s \lambda$$

จึงเขียนสมการใหม่ได้

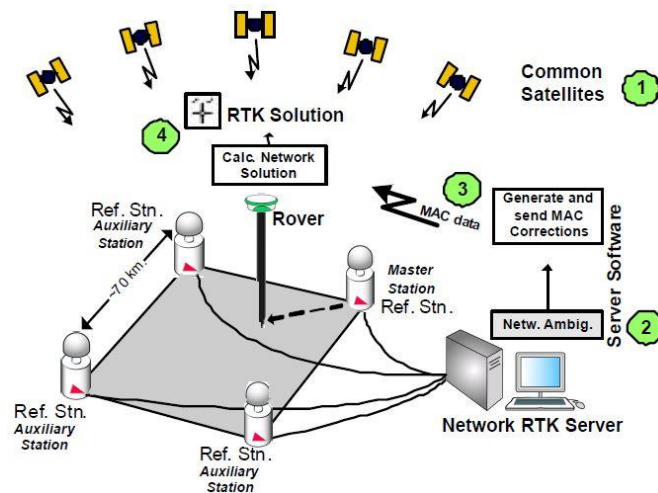
$$P_{ma}^s = P_m^s + (\Delta R_{ma}^s - \delta \Delta r_{maTropos}^s + \delta \Delta r_{maOrbit,Ionos}^s + \Delta T_{ma}^s) \quad (2.30)$$

โดยที่

P_{ma}^s	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่าง
P_m^s	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมกับ Master station
ϕ_{ma}^s	คือ ค่าสังเกตข้อมูลเฟส
ϕ_m^s	คือ ค่าสังเกตข้อมูลเฟสระหว่างดาวเทียมถึง Master station
ΔR_{ma}^s	คือ ค่าต่างของระยะทางระหว่างดาวเทียมถึงสถานีอ้างอิงและสถานีผู้ใช้
$\delta \Delta r_{maTropos}^s$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ Troposphere
$\delta \Delta r_{maOrbit,Ionos}^s$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรและชั้นบรรยากาศ Ionosphere
ΔT_{ma}^s	คือ ค่าต่างในแบบจำลองชั้นบรรยากาศ Troposphere
λ	คือ ความยาวคลื่น

ซึ่งในการหาค่าเลขปริศนา (N) ของรูปแบบ MAC จะสามารถหาได้โดยใช้ค่าต่างครั้งที่สอง ระหว่างดาวเทียมอ้างอิง (q) กับดาวเทียมใดๆ (s) ดังสมการ ดังนี้

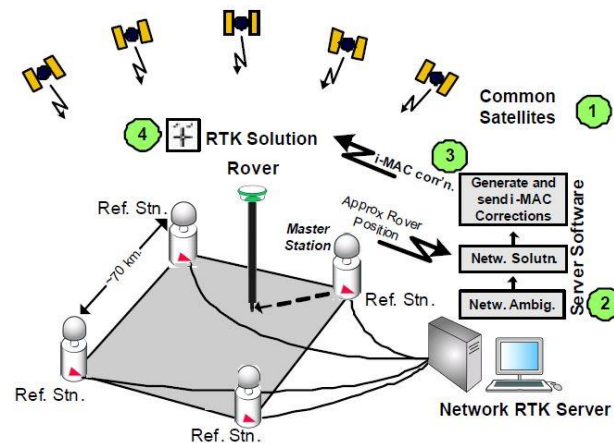
$$N_{am}^s = N_{am}^q + N_{am}^{q,s} \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานรูปแบบ MAC (ดัดแปลงจาก Leica Geosystems, 2008)

2.5.4 Individualized Master Auxiliary Corrections (I-MAC)

รูปแบบ I-MAC ใช้วิธีคล้ายกับ VRS แตกต่างกันที่ I-MAC ใช้ Master station ในการส่งค่าแก้ให้กับสถานีผู้ใช้งาน ซึ่งข้อดีของการใช้ Master station คือสามารถตรวจสอบค่าแก้ย้อนหลังจาก Master station ได้ ซึ่งถ้าเป็น VRS จะเป็นสถานีเสมือนจึงแสดงถึงข้อจำกัดในการตรวจสอบข้อมูลย้อนหลัง กระบวนการ process ดังรูปที่ 2.8 รูปแบบ I-MAC ถูกพัฒนาให้สามารถรองรับเครื่องรับสัญญาณรุ่นเก่าได้ ในการปรับแก้ค่าพิกัดเป็นแบบ Two-way communications มีหลักการคือสถานีอ้างอิงจะทำการส่งข้อมูลการรังวัดไปยังศูนย์ควบคุม แล้วทำการคำนวณค่าแก้เพื่อลดค่า Ambiguity resolution จากนั้นศูนย์ควบคุมจะทำการเลือก Master station โดยพิจารณาจากสถานีที่ใกล้กับสถานีผู้ใช้มากที่สุด (El-Mowafy, 2012) ทำให้สามารถปรับแก้โครงข่ายระหว่าง Master station กับสถานีผู้ใช้ได้ จึงได้ค่าพิกัดที่มีความแม่นยำถูกต้องสูง



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของรูปแบบ I-MAC (ดัดแปลงจาก Leica Geosystems, 2008)

2.6 RTCM standard และ RINEX format

ข้อมูล RTCM standard และ RINEX format เป็นข้อมูลดิบที่นิยมใช้ในการส่งข้อมูลของ GNSS โดยปัจจุบันเวอร์ชันที่ใช้จะเป็น RTCM 3.0 และ RINEX 2.2 (ปัจจุบันมีถึง RINEX 3.0) ซึ่งข้อมูลในการรังวัดแบบ NRTK จะใช้แบบ RTCM และในส่วนของกรังวัดแบบ Static ใช้ข้อมูลแบบ RINEX เนื่องจากค่าความละเอียด และคุณสมบัติต่างๆของแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อมูลระหว่าง RTCM 3.0 และ RINEX 2.2

Format comparison	RTCM 3.0	Rinex 2.2
Pseudorange	C/A + P2(Y) or P1(Y) + P2(Y)	C/A + P1 + P2
PR Resolution	0.02 m	0.001 m
Carrier Phase	LA+L2 or L1+L2	L1+L2+LA
Carrier Phase Resoultion	0.5 mm	0.001 cycles = 0.2 mm
Wavelength factor	-	+
Doppler	-	+
CNO	L1+L2	S1,S2,SA
CNO Resolution	0.25 db-Hz	0.001 Rx Dep.
Loss of lock	Lock time	Slip Flag
Time tag resolution	1 ms	100 ms
Navtime	Clock Steering (100 ns)	1 ns

2.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE)

รากที่สองของค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error:RMSE) คือค่าที่ใช้เป็นตัวแทนของความถูกต้องในการรังวัด เป็นวิธีการวัดค่าคลาดเคลื่อนแบบมาตรฐานที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย และมีหน่วยเดียวกันกับค่ารังวัด ยิ่งค่า RMSE มีค่าน้อย หมายถึงการรังวัดข้อมูลมีความถูกต้องมาก สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ค่าพิกัดจากการรังวัดแบบ NRTK เป็นค่ารังวัด และค่าพิกัดจากการรังวัดแบบ STATIC ใช้เป็นค่าอ้างอิงดังสมการ (ดัดแปลงจาก FGDC, 1998)

$$\sqrt{\frac{\sum (X - x)^2}{n}}$$

โดยที่

- X คือ ค่าพิกัดจากการรังวัดแบบ NRTK ระยะเวลาใดๆ
- x ค่าพิกัดจากการรังวัดจากการรังวัดแบบ STATIC
- n คือ จำนวนค่าพิกัดจากการรังวัดแบบ NRTK ระยะเวลาใดๆ

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา

ธีทัต เจริญกมลัญญา (2552) ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการประเมินค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส แบบจลนในทันทีโดยอาศัยรูปแบบโครงข่ายสถานีฐานจีพีเอส โดยในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการได้ค่าพิกัดในรูปแบบโครงข่ายแบบจลนในทันทีแบบ VRS ของ 2 จุด คือ จุดที่เปิดโล่ง และจุดที่มีสิ่งปกคลุม ผลการวิจัยสรุปได้ว่า จุดที่เปิดโล่งมีโอกาสของการได้ค่าพิกัดตำแหน่งมากกว่าบริเวณพื้นที่ที่มีสิ่งปกคลุม และส่วนใหญ่การได้พิกัดตำแหน่งจะทำงานในโหมด VRS ส่วนค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของทั้ง 2 จุด สรุปได้ว่าค่าพิกัดในทางราบอยู่ในระดับ 1-3 เซนติเมตร และค่าพิกัดในทางตั้งอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร แต่ค่าพิกัดทั้งทางราบและทางตั้งของทั้ง 2 สถานี ยังมีบางช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนสูง ได้แก่ เวลาประมาณ 22:21 น. ของการทดสอบสำหรับสถานีเปิดโล่ง และประมาณ 22:51 น. สำหรับสถานีปกคลุมระดับปานกลาง

Dabove et al. (2012) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดสำหรับระยะใกล้ที่ 50 กิโลเมตร ระยะกลางที่ 100 กิโลเมตร และระยะไกลที่ 150 กิโลเมตร โดยใช้รูปแบบ NRTK ที่แตกต่างกัน โดยใช้ค่าความถูกต้องที่ 95% เป็นระยะเวลา 24 ชม. ซึ่งผลการวิจัยพบว่ารูปแบบ VRS สามารถทำระยะได้ไกลเกิน 100 กม. และค่าความถูกต้องทางราบอยู่ที่ 2-8 ซม. ทาง

ตั้งอยู่ที่ 5-12 ซม. อีกรูปแบบที่สามารถทำได้ดีเช่นเดียวกันคือรูปแบบของ MAC แต่สามารถทำได้ดีที่ระยะใกล้และระยะกลางเท่านั้น โดยมีค่าความถูกต้องทางราบอยู่ที่ 5 ซม. ทางตั้งอยู่ที่ 10 ซม. สำหรับรูปแบบ FKP มีหลักการประมวลผลแบบเชิงพื้นที่ ซึ่งถ้ามีระยะฐานไกล ประสิทธิภาพก็จะลดลงอย่างมาก ซึ่งในงานวิจัยในระยะกลางก็ยังไม่สามารถได้ค่าพิกัดที่ดีได้

Ogutcu and Kalayci (2017) ได้ตรวจสอบความแม่นยำของการใช้ NRTK 3 ระบบ ได้แก่ VRS, FKP, และ MAC โดยใช้โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง Tusaga-Aktif ของประเทศตุรกี ซึ่งใช้เส้นฐานระหว่างสถานี CORS สองสถานีที่มีระยะประมาณ 100 กิโลเมตรเป็นแนวอ้างอิงในการวางจุดทดสอบจำนวน 8 จุด โดยมีระยะที่ 5, 20, 40, และ 50 กิโลเมตรจากสถานี CORS ถึงจุดทดสอบ โดยแต่ละจุดทำการรังวัดค่าพิกัดทางราบและทางตั้งทุก ๆ 2 วินาที เป็นจำนวน 3000 Epoch ผลการทดสอบพบว่า ค่าความแม่นยำของค่าพิกัดทั้งทางราบและทางตั้งขึ้นอยู่กับระยะเส้นฐานระหว่างจุดทดสอบถึงสถานี CORS ที่ทำการส่งค่าแก้ให้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ซึ่งระยะเส้นฐานยิ่งไกลค่าความแม่นยำก็จะลดน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามในระยะเส้นไม่เกิน 50 กิโลเมตร ค่าความแม่นยำของค่าพิกัดทางราบและทางตั้งอยู่ที่ไม่เกิน 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ

เจนพิธิกร สุนทรรัตน์ (2560) ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการทดสอบประสิทธิภาพรูปแบบโครงข่ายดาวเทียม GNSS แบบจลนในทันทีสำหรับงานรังวัดที่ดิน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความถูกต้องของค่าพิกัดใน 3 มิติ ของเทคนิคการสำรวจด้วยรูปแบบดาวเทียม GNSS 2 วิธี ได้แก่ การรังวัดแบบ Single Base RTK Positioning และการรังวัดแบบเทคนิค VRS ใน 2 พื้นที่ จากการศึกษาในพื้นที่แรกพบว่า หากค่าพิกัดอยู่ในโหมด Fixed Solution จะให้ค่าความถูกต้องในทางราบใกล้เคียงกัน ในระดับ 4 เซนติเมตร ส่วนทั้ง 2 วิธีจะทำงานได้ในพื้นที่โล่งแจ้งและบริเวณที่ต้นไม้ไม่หนาแน่นมาก ส่วนบริเวณที่มีตึกสูง จะกลายเป็นพื้นที่อับสัญญาณ ส่วนพื้นที่ที่สอง หากค่าพิกัดอยู่ในโหมด Fixed Solution การรังวัดแบบเทคนิค VRS จะให้ค่าความถูกต้องในทางราบในระดับ 3 เซนติเมตร

สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา (2560) ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลนโดยอาศัยโครงข่ายสถานี GNSS แบบต่าง ๆ ในประเทศไทย โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการรังวัดแบบจลนโดยอาศัยโครงข่ายจากรูปแบบ MAC, i-MAC, VRS และ FKP แบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีรังวัดสัญญาณแบบอยู่กับที่ ทำการเก็บข้อมูลทุก 1 วินาที และกรณีรังวัดสัญญาณแบบเคลื่อนที่ ทำการเก็บข้อมูลทุก 1 วินาที จากการศึกษากรณีรังวัดสัญญาณแบบอยู่กับที่ พบว่าเปอร์เซ็นต์ในโหมด Fixed Solution มีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ทั้งหมด และการรังวัดแบบ VRS ให้ความแม่นยำของค่าพิกัดทางราบมากที่สุด โดยมีค่า Root Mean Square Error, RMSE อยู่ที่ 0.029 เมตร ส่วนกรณีรังวัดสัญญาณแบบเคลื่อนที่ที่มี ใช้ความเร็วเฉลี่ย 1.53

เมตร/วินาที พบว่าการรังวัดแบบ MAC ให้ค่าพิกัดในโหมด Fixed Solution 96.0 เปอร์เซ็นต์ และ 96.6 เปอร์เซ็นต์ (ใช้ 2 โครงข่าย) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุด ส่วนการรังวัดแบบ i-MAC ให้ค่าพิกัดในโหมด Fixed Solution 68.4 เปอร์เซ็นต์ และ 90.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการรังวัดแบบ VRS และ FKP ให้ค่าพิกัดในโหมด Fixed Solution มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ทั้ง 2 โครงข่ายที่ทำการทดสอบ

Pehlivan et al. (2019) ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดภายใต้เงื่อนไขการเปิดมุมมององศาดาวเทียมที่ 10° , 20° , 30° และ 40° ในพื้นที่โล่ง โดยใช้รูปแบบการรังวัด NRTK 3 รูปแบบคือ VRS, FKP และ MAC ซึ่งผลการทดลองนั้น เนื่องจากเป็นพื้นที่โล่ง ค่าความถูกต้องของค่าพิกัดทั้ง 3 รูปแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าการเปิดมุมมององศาดาวเทียมที่จำกัดที่ 40° ก็มีค่าความถูกต้องที่ต่ำกว่า 7 เซนติเมตร ทั้ง 3 รูปแบบ แต่เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของค่าพิกัดในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่ารูปแบบ VRS มีผลลัพธ์ที่ดีกว่า

นิทัศน์ นีวาศานนท์ (2562) ได้ทำการศึกษาค่าความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบในแนวกันชน (Buffer line) ที่แตกต่างกัน โดยการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ด้วยวิธี VRS เปรียบเทียบกับวิธีสถิต (Static survey) แบบสัมพัทธ์ ที่อยู่ใกล้กับ CORS ในตำแหน่งเดียวกัน โดยมีหมุดทดสอบจำนวน 2,122 หมุด ซึ่งอยู่ภายในลูบของ CORS โดยการแบ่งระยะแนวกันชนจาก CORS ออกเป็น 4 ระยะได้แก่ 15, 30, 45 และมากกว่า 45 กิโลเมตร ซึ่งระบบ NRTK ประกอบด้วย CORS จำนวน 114 สถานี ครอบคลุมทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยมีระยะห่าง ระหว่างสถานี ตั้งแต่ 25 กิโลเมตร จนถึง 200 กิโลเมตร โดยประมาณ (ค่าเฉลี่ยของระยะห่าง ระหว่างสถานี คือ 80 กิโลเมตร) ส่งผลให้ระยะห่างระหว่าง CORS ที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยม (ลูบ) มีขนาดที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ผลจากการศึกษาพบว่า รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) ของหมุดทดสอบที่อยู่ในแนวกันชนของแต่ละระยะมีค่า RMSE ทางราบ 0.026 , 0.036 , 0.037 และ 0.039 เมตร ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าค่า RMSE ทางราบแปรผันตามระยะห่างจาก CORS ที่ใกล้ที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย จะแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พิจารณาสถานที่และเตรียมเครื่องมือที่ใช้สำหรับรังวัด รังวัดสัญญาณดาวเทียม เปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการวิจัย

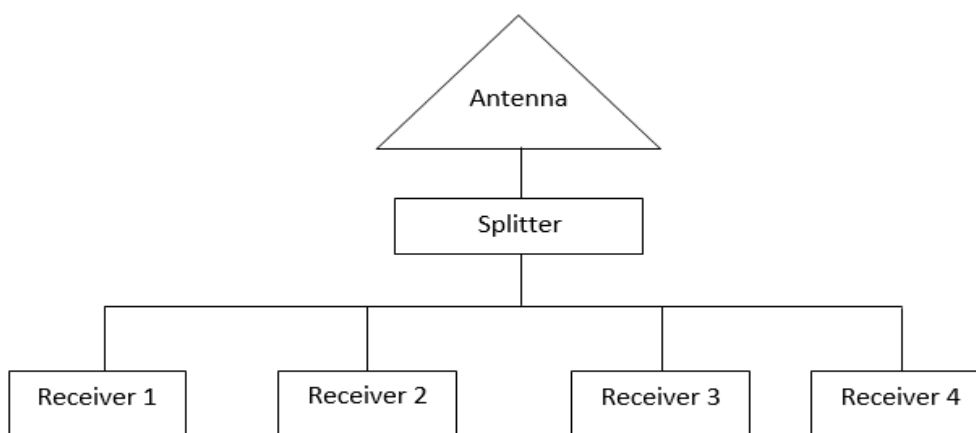
3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการทำงานของวิธีการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบ NRTK ซึ่งได้แก่ รูปแบบ VRS, FKP, MAC และ I-MAC รวมถึงศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ตามข้อ 2.8

3.2 พิจารณาสถานที่และเตรียมเครื่องมือที่ใช้สำหรับรังวัด

งานวิจัยนี้ต้องรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงพิจารณาใช้สถานที่บนดาดฟ้าตึกวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องมือที่ใช้สำหรับรังวัดในงานวิจัยนี้ จะเตรียมเครื่องมือเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่าย จะต่อเสารับสัญญาณ GNSS (Antenna) ยี่ห้อ Leica รุ่น AS10 ตามข้อ 1.3.4.1 เข้ากับ เครื่อง Splitter ตามข้อ 1.3.4.3 เพื่อแยกสัญญาณดาวเทียม GNSS จากนั้นต่อเข้ากับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS (Receiver) ยี่ห้อ Leica รุ่น GS10 จำนวน 4 เครื่อง พร้อมตั้งค่าไว้ให้รับสัญญาณ 4 แบบ คือ VRS, I-MAC, MAC และ FKP เพื่อให้สามารถรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายทั้ง 4 รูปแบบได้ในเวลาเดียวกัน ตามรูปที่ 3.1 และ 3.2

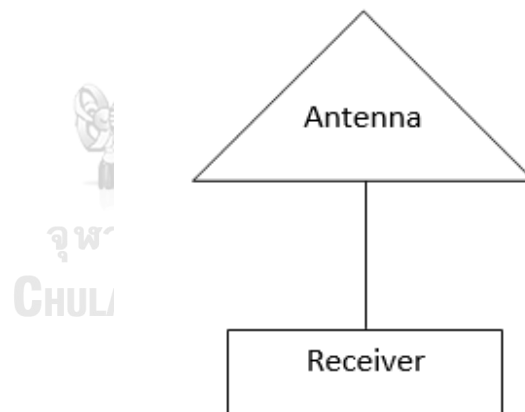


รูปที่ 3.1 การต่อเครื่องมือที่ใช้รังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่าย



รูปที่ 3.2 สายสัญญาณผ่านสปริตเตอร์ เพื่อแยกสัญญาณดาวเทียมไปยังเครื่อง Receiver จำนวน 4 เครื่อง

อีกกรณีจะต่อเสารับสัญญาณ GNSS เข้ากับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยไม่ใช้เครื่อง Splitter เพื่อทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบ Static ที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การต่อเครื่องมือที่ใช้รังวัดดาวเทียมแบบ Static

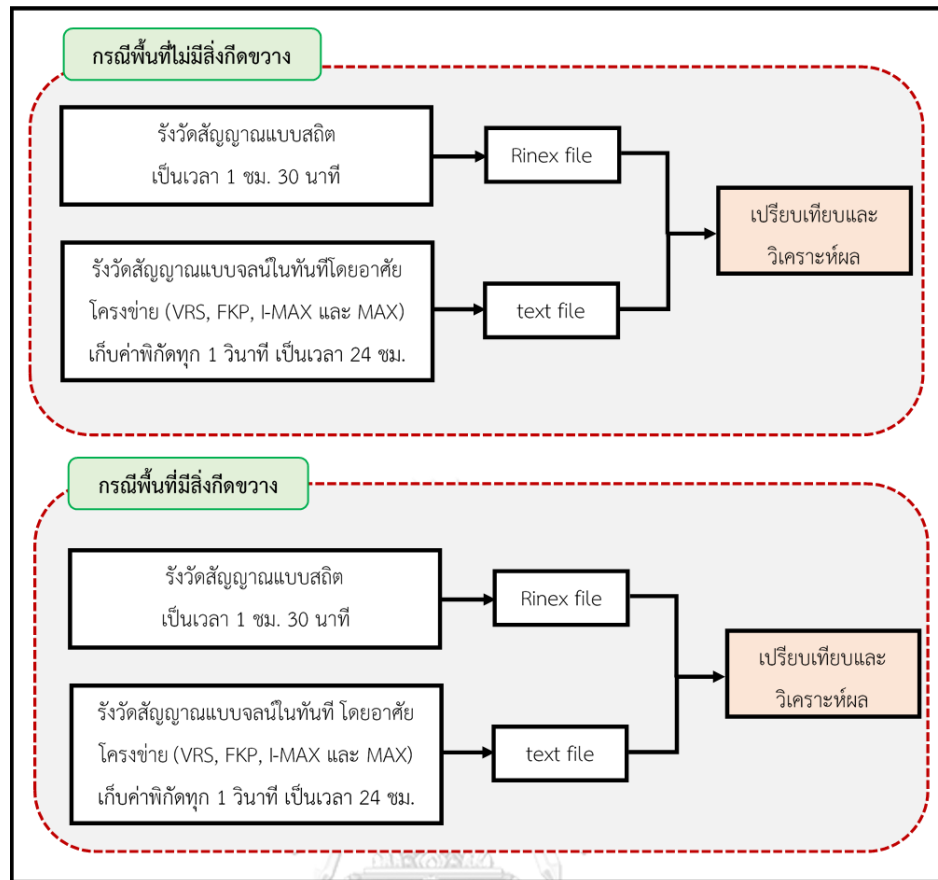
3.3 รังวัดสัญญาณดาวเทียม

การรังวัดสัญญาณดาวเทียม จะแบ่งการรังวัดเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีพื้นที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียม 2 ครั้ง ได้แก่ การรังวัดดาวเทียมแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่าย ทั้ง 4 รูปแบบ พร้อมกัน เวลา 09:00 น. ของวันที่ 11 มีนาคม 2563 ถึง เวลา 09:00 น. ของวันที่ 12 มีนาคม 2563 เก็บค่าพิกัดทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ข้อมูลค่าพิกัดจำนวน 86,400 epochs จากนั้นรังวัดดาวเทียมแบบ Static เวลา 10:00-11:30 ของวันที่ 12 มีนาคม 2563 เป็น เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที เช่นกันกับกรณีพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียม 2 ครั้ง ได้แก่ การรังวัดดาวเทียมแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายทั้ง 4 รูปแบบ พร้อมกัน เวลา 09:00 น. ของวันที่ 13 มีนาคม 2563 ถึง เวลา 09:00 น. ของวันที่ 14 มีนาคม 2563 เก็บค่าพิกัดทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ข้อมูลค่าพิกัดจำนวน 86,400 epochs จากนั้นรังวัดดาวเทียมแบบ Static เวลา 10:00-11:30 ของวันที่ 14 มีนาคม 2563 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดจะนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไป

3.4 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดสัญญาณแบบ NRTK จะอยู่ในรูปแบบของ text file ซึ่งแสดงค่าพิกัด ทั้ง 3 มิติ จำนวนทั้งหมด 86,400 ค่า ตามจำนวน epoch ที่ใช้ในการรังวัด พร้อมบอกผลสำเร็จของค่าพิกัดที่ได้ในแต่ละ epoch ส่วนข้อมูลที่ได้จากการรังวัดสัญญาณแบบ Static จะอยู่ในรูปแบบของ RINEX file ซึ่งต้องใช้โปรแกรม Spider.net เพื่อประมวลผลหาค่าพิกัดที่ใช้ในอ้างอิง

การเปรียบเทียบค่าพิกัด NRTK ในรูปแบบของ GNSS fixed solution กับ Static และวิเคราะห์ผลจะประเมินขีดความสามารถของการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ โดยใช้ผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัดเป็นตัวประเมิน และเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้ในแต่ละวิธี โดยใช้ค่าพิกัดจากการรังวัดแบบ Static เป็นค่าอ้างอิง โดยจะวิเคราะห์แยกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีพื้นที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจากการรังวัดแยกเป็น 2 กรณี

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากผลการทดสอบที่แสดงมาทั้งหมดนั้นจะแสดงให้เห็นถึงค่าความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัด NRTK เทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงที่ได้จากการรังวัดแบบ static และขีดความสามารถของการ Fixed solution ของสถานการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้จากการรังวัดตามภูมิประเทศจริงที่เกิดขึ้น อาทิ การรังวัดตามพื้นถนนที่เป็นที่โล่ง ตามอาคารที่มีการบดบังสัญญาณ บริเวณต้นไม้ใหญ่ที่ปกคลุมบริเวณที่ต้องการรังวัด สามารถเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจให้นักสำรวจ หรือผู้ที่ต้องการรังวัด NRTK ได้พิจารณาและเข้าใจหลักการทำงานของการทำงานของการรังวัดแต่ละวิธี แต่สิ่งที่พึงระวังคือให้สังเกตค่ากระโดดที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยจะต้องสังเกตค่า PDOP หรือจำนวนดาวเทียม ณ เวลานั้น ๆ ว่ามีการเปลี่ยนแปลง หรือมีค่าสูงขึ้นผิดปกติหรือไม่ ยกตัวอย่างเช่น ในการรังวัดโดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง ค่า PDOP ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ระดับ 1-2 ชม. และ จำนวนดาวเทียมเกิน 10 ดวงขึ้นไป แต่ในห้วงเวลาที่ยิ่งขึ้น ของการรังวัด จะมีค่า PDOP อยู่ที่ 4-5 ชม. และ จำนวนดาวเทียมที่เปลี่ยนแปลงแบบกระต๊อนหัน จึงอาจเป็นข้อสังเกตได้ว่าห้วงเวลานั้นอาจเกิดการกระโดดของค่าพิกัดได้

ซึ่งการจำลองสถานการณ์การเลือกตำแหน่งตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเป็น 2 กรณีคือ พื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง และพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์ (ตั้งบริเวณติดกำแพง 1 ด้าน) จากนั้นนำข้อมูล Static ที่ได้รับคำนวณด้วยโปรแกรม SPIDER.net แล้วนำค่าพิกัด RTK มาทำการกราฟเพื่อสังเกตความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง โดยใช้สถานี CORS Station ของกรมแผนที่ทหาร จากนั้นนำมาเทียบค่า SD จากการรังวัด และ RMSE เทียบค่ากับค่า reference ทำการสรุปผลการศึกษาวิจัย โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่งดังต่อไปนี้

4.1 ขีดความสามารถ GNSS Fixed Solution ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ในพื้นที่โล่ง และมีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์

4.1.1 ขีดความสามารถ GNSS Fixed Solution ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ในพื้นที่โล่ง

ในการรังวัด GNSS แบบ NRTK จากรูปแบบ VRS, FKP, MAC, I-MAC ในพื้นที่โล่งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ของวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ.2563 เก็บค่าพิกัดทุกๆ 1 วินาที ทำให้ได้ค่าพิกัดทั้งหมด 86,400 epoch ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีจำนวน GNSS Fixed Solution ที่ไม่เท่ากัน และจำนวนเปอร์เซ็นต์จะเทียบกับจำนวนค่าพิกัดทั้งหมดที่ได้ใน 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนและเปอร์เซ็นต์ของ GNSS Fixed Solution ในพื้นที่โล่ง

วิธีการรับวัด NRTK	จำนวน GNSS Fixed Solution (epoch)	เปอร์เซ็นต์ จำนวน GNSS Fixed Solution
VRS	84670	98
FKP	66027	77
MAC	66290	77
I-MAC	82967	96

จากตารางที่ 4.1 รูปแบบ VRS มีจำนวน GNSS Fixed Solution ในพื้นที่โล่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 84670 epoch คิดเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ รองมาคือรูปแบบ I-MAC มีจำนวน GNSS Fixed Solution เท่ากับ 82967 epoch คิดเป็น 96 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของรูปแบบ FKP มีจำนวน GNSS Fixed Solution เท่ากับ 66027 epoch คิดเป็น 77 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบ MAC มีจำนวน GNSS Fixed Solution เท่ากับ 66290 epoch คิดเป็น 77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเห็นว่าจำนวนเปอร์เซ็นต์มีค่าพอกๆกัน

4.1.2 ซีดความสามารถ GNSS Fixed Solution ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ในพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์

ในการรับวัด GNSS แบบ NRTK จากรูปแบบ VRS, FKP, MAC, I-MAC ในพื้นที่มีสิ่งกีดขวางเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงเช่นเดียวกับกรณีพื้นที่โล่ง ซึ่งทำการรับวัดในวันที่ 11 มีนาคม พ.ศ.2563 เก็บค่าพิกัดทุก ๆ 1 วินาที ทำให้ได้ค่าพิกัดทั้งหมด 86,400 epoch ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีจำนวน GNSS Fixed Solution ที่ไม่เท่ากัน และจำนวนเปอร์เซ็นต์จะเทียบกับจำนวนค่าพิกัดทั้งหมดที่ได้ใน 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนและเปอร์เซ็นต์ของ GNSS Fixed Solution ในพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์

วิธีการรับวัด NRTK	จำนวน GNSS Fixed Solution (epoch)	เปอร์เซ็นต์ จำนวน GNSS Fixed Solution
VRS	59258	69
FKP	30295	35
MAC	52411	61
I-MAC	46387	54

จากตารางที่ 4.2 รูปแบบ VRS มีจำนวน GNSS Fixed Solution ในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางมากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 59258 epoch คิดเป็น 69 เปอร์เซ็นต์ รองมาคือรูปแบบ MAC มีจำนวน GNSS Fixed Solution เท่ากับ 52411 epoch คิดเป็น 61 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบ I-MAC มีจำนวน GNSS Fixed Solution เท่ากับ 46387 epoch คิดเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของรูปแบบ FKP มีจำนวน GNSS Fixed Solution เท่ากับ 30295 epoch คิดเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ที่น้อยที่สุด

4.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ ในพื้นที่โล่ง และพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ค่าพิกัดการรังวัดแบบ Static เป็นค่าอ้างอิง

ซึ่งข้อมูลในตารางจะประกอบไปด้วย ค่าต่างพิกัดสูงสุดกับค่าพิกัดอ้างอิง (dEMax), ค่าต่างพิกัดต่ำสุดกับค่าพิกัดอ้างอิง (dEMin), ค่าต่างพิกัดเฉลี่ยกับค่าพิกัดอ้างอิง (dEMean), ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และ Root Mean Square Error (RMSE) โดยสูตรการหาของ SD และ RMSE นั้นจะมีขั้นตอนการเปรียบเทียบที่แตกต่างกันกล่าวคือ SD จะใช้ค่าพิกัดที่ได้จาก NRTK ทั้งหมดของ GNSS Fixed Solution มาทำการคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วน RMSE จะใช้ค่าพิกัดที่ได้จาก NRTK มาเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงแล้วทำการคำนวณหา Root Mean Square Error

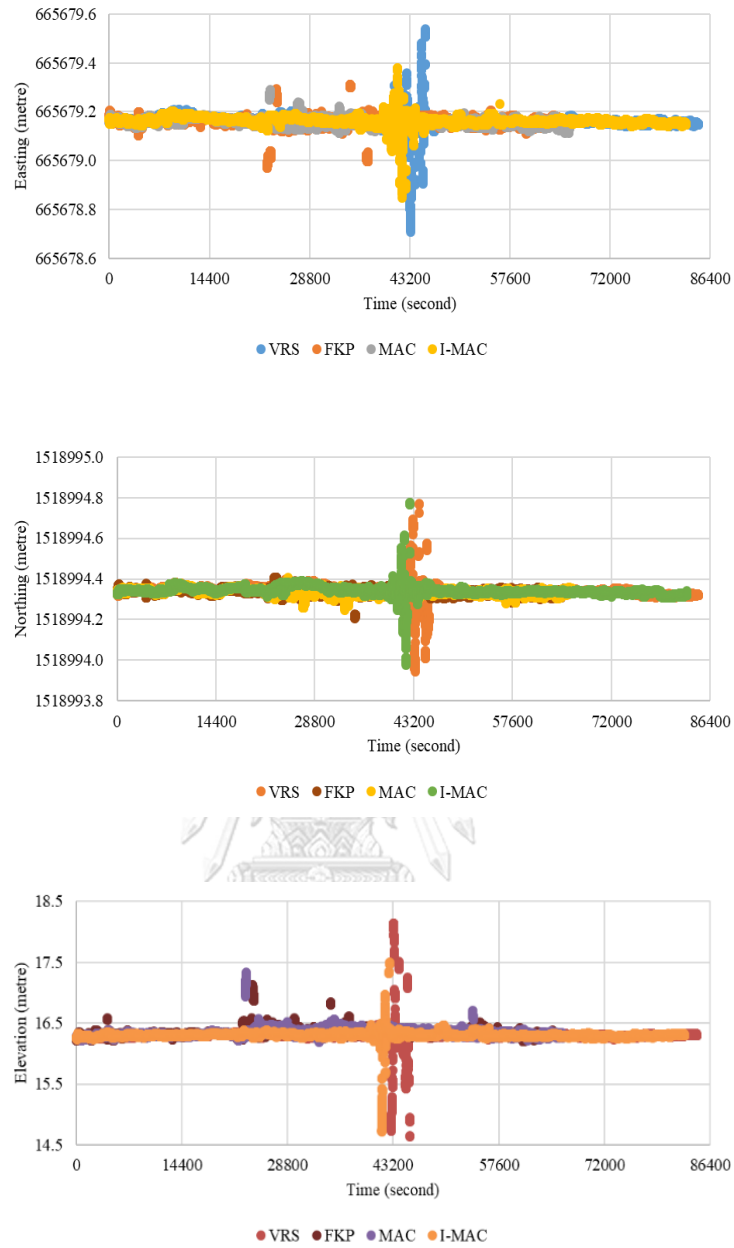
4.2.1 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบในพื้นที่โล่ง โดยใช้ค่าพิกัดการรังวัดแบบ Static เป็นค่าอ้างอิง ซึ่งใช้เวลาในการรังวัด 60 นาที เมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ.2563 เป็นค่าพิกัดอ้างอิง แสดงข้อมูลตามตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่าพิกัด NRTK 4 วิธี กับการรังวัดแบบ Static ของพื้นที่โล่ง

Statistics		NRTK positioning results (metre)				Control points (metre)
		Correction models				
		VRS	FKP	MAC	I-MAC	
Easting	dEMax	0.39	0.16	0.14	0.23	665679.15
	dEMin	-0.44	-0.18	-0.04	-0.3	
	dEMean	0.01	0.01	0.01	0.01	
	SD	0.03	0.02	0.01	0.02	
	RMSE	0.03	0.02	0.02	0.02	

Statistics		NRTK positioning results (metre)				Control points (metre)
		Correction models				
		<i>VRS</i>	<i>FKP</i>	<i>MAC</i>	<i>I-MAC</i>	
Northing	dNMax	0.46	0.1	0.1	0.46	1518994.31
	dNMin	-0.36	-0.1	-0.06	-0.33	
	dNMean	0.03	0.03	0.03	0.03	
	SD	0.03	0.01	0.01	0.02	
	RMSE	0.04	0.03	0.03	0.04	

จากข้อมูลแสดงตารางที่ 4.3 จะแสดงข้อมูลค่าพิกัดเฉพาะ GNSS Fixed Solution โดยจะแสดงเป็นค่า Max, Min, Mean, SD และ RMSE เปรียบเทียบกับ Control points ซึ่งได้จากการรังวัดแบบ Static ค่าพิกัดของ Easting จะมีค่า Max ของวิธี VRS, FKP, MAC และ I-MAC เท่ากับ 665679.54, 665679.31, 665679.29 และ 665679.38 ตามลำดับ ค่า Min เท่ากับ 665678.71, 665678.97, 665679.11 และ 665678.85 ตามลำดับ ค่า Mean เท่ากับ 665679.16, 665679.16, 665679.16 และ 665679.16 ตามลำดับ ค่า SD เท่ากับ 0.03, 0.02, 0.01 และ 0.02 ค่า RMSE เท่ากับ 0.03, 0.02, 0.02 และ 0.02 ค่าพิกัดของ Northing จะมีค่า Max ของวิธี VRS, FKP, MAC และ I-MAC เท่ากับ 1518994.77, 1518994.41, 1518994.41 และ 1518994.77 ตามลำดับ ค่า Min เท่ากับ 1518993.95, 1518994.21, 1518994.25 และ 1518993.98 ตามลำดับ ค่า Mean เท่ากับ 1518994.34, 1518994.34, 665679.16 และ 1518994.34 ตามลำดับ ค่า SD เท่ากับ 0.03, 0.01, 0.01 และ 0.02 ค่า RMSE เท่ากับ 0.04, 0.03, 0.03 และ 0.04 ซึ่งผลการทดลองสามารถนำมาเขียนเป็นภาพได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงค่าพิกัด Easting Northing และ Elevation ของการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ ในพื้นที่โล่ง

จากรูปที่ สังเกตเห็นได้ว่าจะมีการกระโดดของค่าพิกัด ณ ช่วงเวลาหนึ่งพร้อมกันทั้ง 3 แกน ทั้งที่ในรูปแบบแสดงผลว่าการ Fixed Solution เป็นแบบ GNSS Fixed Solution ซึ่งเป็นค่าพิกัดที่ ต่างไปจากค่าพิกัดอ้างอิงไปมากพอสมควร ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนจำนวนดาวเทียมแบบกะทันหัน ทำให้การประมวลผลค่าพิกัดผิดเพี้ยนไป

4.2.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ ในพื้นที่มี สิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้การรังวัดแบบ Static ใช้เวลาในการรังวัด 60 นาที เมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ.2563 เป็นค่าพิกัดอ้างอิง แสดงข้อมูลตามตารางที่ 4.4 ดังนี้

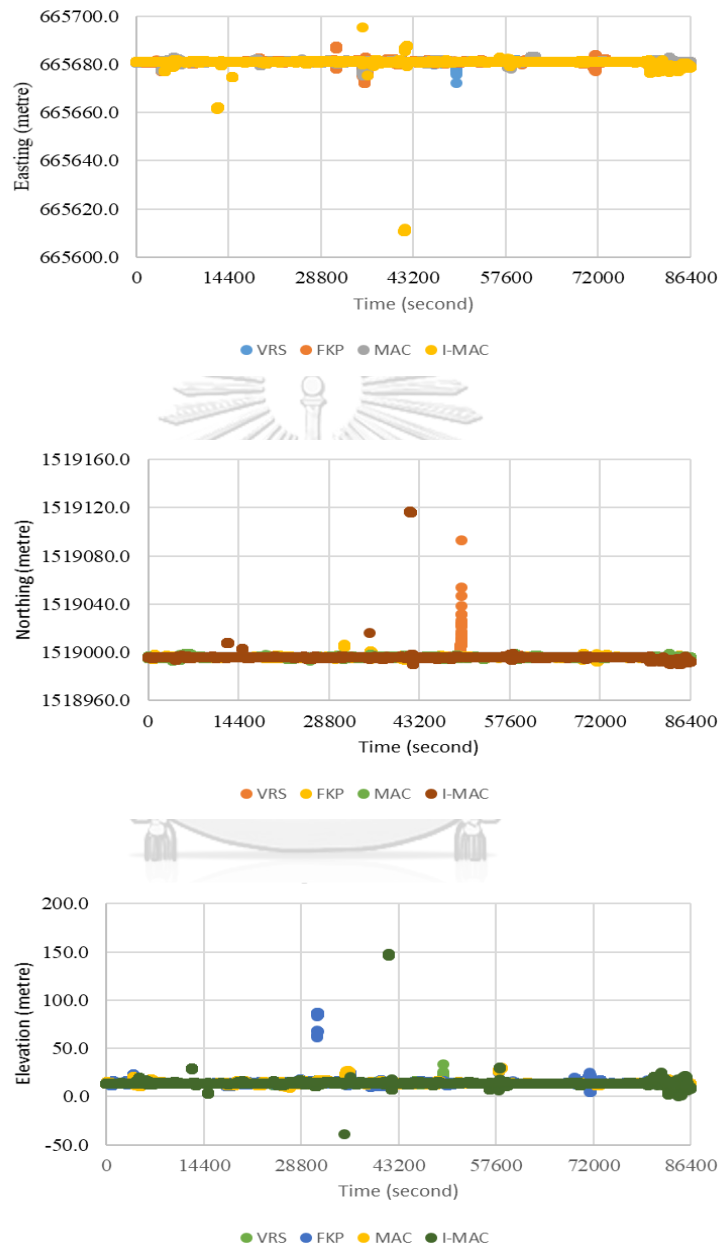


ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่าพิกัด NRTK 4 วิธี กับการรังวัดแบบ Static ของพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เมตร

Statistics		NRTK positioning results (metre)				Control points (metre)
		Correction models				
		VRS	FKP	MAC	I-MAC	
Easting	dEMax	0.17	1.5	1.88	0.46	665680.97
	dEMin	-1	-1.06	-0.54	-0.35	
	dEMean	-0.02	0.03	0.01	-0.01	
	SD	0.05	0.26	0.14	0.03	
	RMSE	0.05	0.26	0.14	0.03	
Northing	dNMax	0.93	1.22	3.14	0.47	1518995.64
	dNMin	-0.34	-1.54	-1.65	-0.22	
	dNMean	-0.04	-0.02	-0.03	-0.03	
	SD	0.06	0.30	0.29	0.06	
	RMSE	0.08	0.30	0.29	0.07	

จากข้อมูลแสดงตารางข้างต้น จะแสดงข้อมูลค่าพิกัดเฉพาะ GNSS Fixed Solution โดยจะแสดงเป็นค่า MAX, Min, Mean, SD และ RMSE เปรียบเทียบกับ Control points ซึ่งได้จากการรังวัดแบบ Static ค่าพิกัดของ Easting จะมีค่า Max ของวิธี VRS, FKP, MAC และ I-MAC เท่ากับ 665681.14, 665682.47, 665682.85 และ 665681.43 ตามลำดับ ค่า Min เท่ากับ 665679.97, 665679.91, 665680.43 และ 665680.62 ตามลำดับ ค่า Mean เท่ากับ 665680.95, 665681.00, 665680.98 และ 665680.96 ตามลำดับ ค่า SD เท่ากับ 0.05, 0.26, 0.14 และ 0.03 ค่า RMSE เท่ากับ 0.05, 0.26, 0.14 และ 0.03 ค่าพิกัดของ Northing จะมีค่า Max ของวิธี VRS, FKP, MAC และ I-MAC เท่ากับ 1518996.57, 1518996.86, 1518998.78 และ 1518996.11 ตามลำดับ ค่า Min เท่ากับ 1518995.30, 1518994.10, 1518993.99 และ 1518995.42 ตามลำดับ ค่า Mean

เท่ากับ 1518995.60, 1518995.62, 1518995.61 และ 1518995.61 ตามลำดับ ค่า SD เท่ากับ 0.06, 0.30, 0.29 และ 0.06 ค่า RMSE เท่ากับ 0.08, 0.30, 0.29 และ 0.07 ซึ่งผลการทดลองสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.2 ได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงค่าพิกัด Easting Northing และ Elevation ของการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ ในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.2 สังเกตเห็นได้ว่าค่าพิกัดมีการกระโดดน้อยกว่าแบบพื้นที่โล่ง แต่ข้อเท็จจริงเมื่อเทียบกับจำนวนของ GNSS Fixed Solution ยกตัวอย่างเช่นกรณีการรังวัดด้วยรูปแบบ VRS พื้นที่โล่งจะจำนวน GNSS Fixed Solution อยู่ที่ 84,670 epochs แต่พื้นที่มีสิ่งกีดขวาง 50 เพอร์เซ็นต์ อยู่ที่ 59,258 epochs ซึ่งแตกต่างการถึง 25,412 epochs หรือประมาณ 7 ชั่วโมง จึงทำให้การพล็อตกราฟมีความละเอียดของจำนวนจุดค่าพิกัดที่น้อยกว่า



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการจำลองสถานการณ์ของภูมิประเทศจริง เมื่อออกปฏิบัติงานสนาม ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบคือ ไม่สามารถทราบได้ว่า วิธีการรังวัด NRTK แบบใดเหมาะสมกับภูมิประเทศ ขณะนั้น รวมถึงการที่รังวัด NRTK แล้วไม่สามารถ Fixed Solutions ได้ ซึ่งการจำลองสถานการณ์จึง ออกแบบเป็น 2 กรณีคือกรณีพื้นที่โล่ง และกรณีที่มีสิ่งกีดขวางระดับ 50% จากนั้นทำการรังวัด NRTK พร้อมกันทั้ง 4 วิธี โดยใช้จานรับสัญญาณดาวเทียม 1 เครื่อง ลากสายผ่านเครื่องแยกสัญญาณ มาสู่ เครื่อง Receiver จำนวน 4 เครื่อง โดยใช้เวลาการรังวัดถึง 24 ชม. เก็บค่าทุก ๆ 1 วินาที จะได้ค่า พิกัดทั้งหมด 86,400 epochs แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงโดยใช้วิธีการรังวัดแบบ Static ด้วยการคำนวณหาค่า Root Mean Square Error, RMSE ซึ่งพบว่า การรังวัด NRTK ที่มี ประสิทธิภาพและเหมาะสมที่สุดจะมี 2 วิธีด้วยกันก็คือ วิธีการรังวัดแบบ VRS และ I-MAC เนื่องจา การ Fixed Solution ของทั้งสองวิธีนี้ มีประสิทธิภาพสูงมากถึง 98% และ 96% ของจำนวนค่าพิกัด การรังวัดทั้งหมด ในส่วนของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดนั้น ทั้ง 4 วิธีสามารถทำได้ตามเกณฑ์ที่ ไม่เกิน 4 ซม. สำหรับพื้นที่โล่ง ในส่วนของพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ในความเป็นจริงแล้ว เราไม่สามารถ กำหนดได้ว่าจะมีสิ่งปกคลุมหรือสิ่งรบกวนสัญญาณมากน้อยเพียงใด แต่งานวิจัยนี้จึงจำลอง สถานการณ์ให้มีสิ่งกีดขวางระดับ 50% เพื่อเป็นแนวทางในการเปรียบถึงค่าความถูกต้องของค่าพิกัด ซึ่งพบว่าวิธี VRS มีการ Fixed Solution ที่มากที่สุดในระดับ 69% ของการรังวัดค่าพิกัดทั้งหมด สำหรับค่าความถูกต้องจะอยู่ที่ไม่เกิน 8 ซม. ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงพอสมควร ดังนั้นผู้ที่ทำการรังวัดควร จะหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีสิ่งปกคลุม เพราะถึงจะมีการ Fixed Solution แต่ก็ยังมีค่าความคลาด เคลื่อนที่สูงอยู่

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัย โดยแบ่งออกเป็นกรณี 3 กรณี ดังนี้ 1) สรุป ผลการวิจัย 2) ประโยชน์ที่ได้รับ และ 3) ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินขีดความสามารถ GNSS Fixed Solution ของการรังวัดแบบ NRTK จากรูปแบบ VRS, FKP, MAC, I-MAC ณ ช่วงเวลาเดียวกัน และเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ โดยใช้ค่าพิกัดการรังวัดแบบ Static เป็นค่าอ้างอิงในพื้นที่โล่ง และมีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ดังนี้

5.1.1 ขีดความสามารถในการ GNSS Fixed Solution ของการรังวัดแบบ NRTK กรณีพื้นที่โล่ง สรุปได้ว่าวิธี VRS และ I-MAC มีประสิทธิภาพสูงถึง 98% และ 96% ตามลำดับ ส่วนวิธี FKP และ MAC มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันอยู่ที่ 77% ในกรณีมีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์ วิธี VRS มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 69% ส่วน FKP, MAC และ I-MAC มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 35%, 61% และ 54% ตามลำดับ

5.1.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าพิกัดการรังวัดแบบ NRTK ทั้ง 4 รูปแบบ โดยใช้ค่าพิกัดการรังวัดแบบ Static เป็นค่าอ้างอิง สรุปได้ว่ากรณีพื้นที่โล่ง ทั้ง 4 วิธีมีค่า RMSE ของ Easting ที่ไม่เกิน 3 เซนติเมตรและ Northing ที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร ในกรณีมีสิ่งกีดขวาง 50 เปอร์เซ็นต์ ค่า RMSE ของ Easting วิธี I-MAC และ VRS มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 3 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนของ Northing วิธี I-MAC และ VRS มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 7 และ 8 เซนติเมตร ตามลำดับ

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 5.2.1 สามารถทราบถึงประสิทธิภาพของการรังวัดแบบจลน์ทั้ง 4 วิธีภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน
- 5.2.2 สามารถเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจในการเลือกวิธีการรังวัดจากภูมิประเทศจริง
- 5.2.3 ทราบถึงสาเหตุจากปัญหาการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในแต่ละพื้นที่ปฏิบัติงานได้

5.3 ปัญหาและอุปสรรค

จากการศึกษาวิจัยพบว่าในการรังวัด NRTK จะใช้สถานี CORS ของกรมแผนที่ทหาร ซึ่งผลกระทบคือระยะฐานของ สถานี CORS แต่ละสถานีมีระยะที่ไกลกันมากพอสมควร ทำให้ค่าพิกัดของการรังวัดอาจเกิดค่ากระโดดได้ จากภาพ 1.6 เห็นได้ว่าระยะที่ใกล้ที่สุดอยู่ที่สถานี SBKK มีระยะอยู่ที่ 10 ก.ม. แต่ระยะที่ไกลที่สุดอยู่ที่สถานี PCCO มีระยะอยู่ที่ 124 ก.ม.

5.4 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สังเกตเห็นได้จากกราฟว่ามีช่วงเวลาที่รั้งวัดแล้วเกิดการแกว่งของค่าพิกัดในช่วงเวลาเดียวกันทั้ง 4 วิธี โดยที่ค่าพิกัดยังเป็นการ Fixed ambiguity แบบ GNSS Fixed Solution ดังนั้นผู้วิจัยเห็นว่าควรจะมีการเพิ่มเวลาในการรั้งวัด และจุดทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบการแกว่งของค่าพิกัด หรือการใช้สถานี CORS ของหน่วยงานต่าง ๆ ร่วมด้วย เพื่อลดระยะห่างของสถานีฐาน ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพค่าความถูกต้องของค่าพิกัดได้หรือไม่

การศึกษานี้เป็นการทดสอบการรั้งวัด NRTK ทั้ง 4 ระบบโดยใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นับเป็นผลการทดสอบในระยะสั้น หากต้องการทราบถึงผลในระยะยาวจากการใช้ 4 ระบบ ควรมีการออกแบบการทดสอบโดยการเพิ่มระยะเวลาการทดสอบให้มากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ผลที่ได้จากการศึกษานี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลค่าพิกัดที่ได้ทำการทดสอบเท่านั้น เพราะผู้วิจัยได้ออกแบบการทดสอบเพียงสองรูปแบบ คือ พื้นที่โล่ง และพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง หากมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องในการทดสอบกรณีมีสิ่งกีดขวางควรมีการจำแนกประเภท เช่น ต้นไม้สูงปกคลุมเครื่องรับสัญญาณ สิ่งปลูกสร้าง เสาสัญญาณที่มีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง เป็นต้น

การศึกษานี้มีการทดสอบรั้งวัด NRTK ในรูปแบบที่ตั้งอยู่กับที่เท่านั้น หากมีการออกแบบการทดสอบในรูปแบบที่มีการเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่มีความหลากหลายมากขึ้น โดยมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในแต่ละกรณีอย่าง fair test ก็จะทำให้ทราบถึงความแตกต่างจากการใช้ทั้ง 4 ระบบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

จากผลการทดสอบพบว่าการกระโดดของค่าพิกัดจากการรั้งวัด NRTK ในทุกระบบ ซึ่งอาจเป็นผลจากการใช้สถานี CORS ของกรมแผนที่ทหาร ซึ่งยังมีระยะเส้นฐานที่ค่อนข้างไกล หากนำสถานี CORS จากหน่วยงานอื่น ๆ เข้ามาใช้ร่วมกันเพื่อลดระยะเส้นฐานลงจะทำให้โอกาสที่จะเกิดการกระโดดของค่าพิกัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้พบการกระโดดของค่าพิกัดในช่วงเวลาประมาณ 00.00 – 00.30 น. ตามเวลาประเทศไทย ซึ่งมีระยะเวลาที่เกิดการกระโดดของค่าพิกัดใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบของ ธีทัต เจริญกาลัญญาตา (2555) จึงควรมีการทดสอบเพิ่มเติมว่าการกระโดดของค่าพิกัดมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาในแต่ละวันหรือไม่

บรรณานุกรม

- Dabove, P., De Agostino, M., & Manzano, A. (2012). Achievable Positioning Accuracies in a Network of GNSS Reference Stations. In.
- El-Mowafy, A. (2012). Precise Real-Time Positioning Using Network RTK. In.
- FGDC. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards. In *Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. Virginia: Federal Geographic Data Committee Secretariat.
- Hein, G. W. (2020). Status, perspectives and trends of satellite navigation. *Satellite navigation*, 1(1), 22-22. doi:10.1186/s43020-020-00023-x
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wastle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More*: Springer.
- Leica Geosystems. (2008). RTK Networks – Different Methods, System 1200 Newsletter – No. 53. Retrieved from https://incors.in.gov/System1200_53_RTK_Networks_-_The_Different_Methods.pdf
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying* (4th ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Ogutcu, S., & Kalayci, I. (2017). *Investigating Precision of Network Based RTK Techniques: Baseline Length Is Concerned*.
- Pehlivan, H., Bezcioglu, M., & Yilmaz, M. (2019). PERFORMANCE OF NETWORK RTK CORRECTION TECHNIQUES (FKP, MAC and VRS) UNDER LIMITED SKY VIEW CONDITION. *International Journal of Engineering and Geosciences*. doi:10.26833/ijeg.492496
- Rizos, C. (1997). *Principles and Practice of GPS Surveying Monograph 17*. Australia: School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales.
- Teunissen, P. J. G., & Odijk, D. (1997). *Ambiguity Dilution of Precision: Definition, Properties and Application*. Paper presented at the Proceedings of ION-GPS-97, Salt Lake City.
- Wübbena, G., & Bagge, A. (2006). RTCM Message Type 59 – FKP for transmission FKP, version 1.1.

- กรมแผนที่ทหาร. (2562). โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง. Retrieved from <https://gnss-portal.rtsd.mi.th/portal/apps/sites/#/gnss>
- เจนพีธีกร สุนทรรัตน์. (2560). การทดสอบประสิทธิภาพระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในทันทีสำหรับงานรังวัดที่ดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2549). เอกสารคำสอนวิชา 2108631 *Advanced GPS Satellite Surveying* งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีทัต เจริญกาลัญญาตา. (2552). การประเมินค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส แบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบแรกในประเทศไทย : ผลการทดสอบเบื้องต้น. วิศวกรรมสาร มก., 22(70), 45-56. Retrieved from https://kukr.lib.ku.ac.th:443/journal/ENGJ/search_detail/exportBibTex/202202
- ธีทัต เจริญกาลัญญาตา. (2555). ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- นิศพงษ์ นิवासานนท์. (2562). การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดดาวเทียมจากโครงข่ายแบบจลน์ในทันทีในประเทศไทย กรณีศึกษาการกระจายตัวของจุดทดสอบ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- สมเกียรติ ทิพย์สุมนธา. (2560). การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายสถานี GNSS แบบต่าง ๆ ในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ร.อ.ชฎานนท์ เหล่านิพนธ์
วัน เดือน ปี เกิด	13 มกราคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ โรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้า
ที่อยู่ปัจจุบัน	22/92 หมู่บ้านฮาบีเทียนทะเล 28 ซว.แสมดำ ข.บางขุนเทียน กทม. 10150
ผลงานตีพิมพ์	บทความตีพิมพ์ 1: ชฎานนท์ เหล่านิพนธ์1 ทยาทิพย์ ทองตัน2 เฉลิมชนม์ สธิระพจน์1 (2563) "การประเมินประสิทธิภาพเทคนิคของระบบ NRTK (VRS, I-MAC, MAC และ FKP) สำหรับการใช้งานที่มีความแม่นยำสูง" การ ประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 5 คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 15-16 มกราคม 2564. C. Laoniphon, T. Thongtan and C. Satirapod, "Performance Assessments of Correction Models in GNSS Network-based RTK Positioning," 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2021, pp. 2-5, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454747.