

การประเมินค่าความถูกต้องของระบบ GPS/GLONASS/COMPASS ในการหาตำแหน่งแบบจุด
เดี่ยว และสถิติ กรณีศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร

นายสุขสันต์ ชัยยะวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

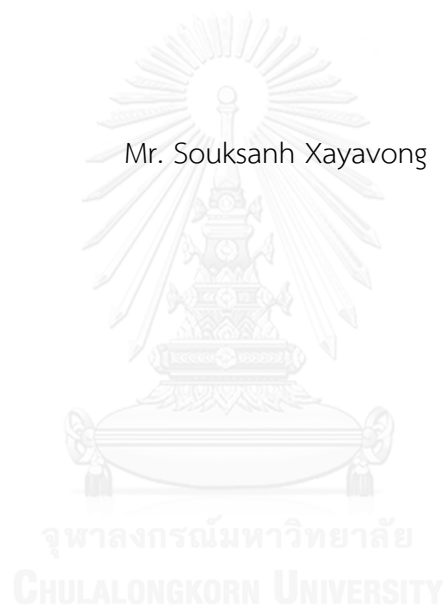
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ACCURACY ASSESSMENT OF GPS/GLONASS/COMPASS IN SINGLE POINT POSITIONING
AND STATIC MODES: CASE STUDY IN BANGKOK AREA

Mr. Souksanh Xayavong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Survey Engineering
Department of Survey Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินค่าความถูกต้องของระบบ
GPS/GLONASS/COMPASS ในการหาตำแหน่งแบบจุด
เดี่ยว และสถิติ กรณีศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร

โดย

นายสุชสันต์ ชัยยะวงศ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วิชัย เยี่ยงวีรชน)

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ ทินนโชติ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญา)

สุขสันต์ ชัยยะวงศ์ : การประเมินค่าความถูกต้องของระบบ GPS/GLONASS/COMPASS ในการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว และสถิต กรณีศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร (ACCURACY ASSESSMENT OF GPS/GLONASS/COMPASS IN SINGLE POINT POSITIONING AND STATIC MODES: CASE STUDY IN BANGKOK AREA) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 127 หน้า.

ระบบนำทางและระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม (GNSS) สามารถให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่มีความน่าเชื่อถือกว่าการใช้ระบบดาวเทียมระบบใดระบบหนึ่ง (เช่น ระบบดาวเทียม GPS เพียงระบบเดียว) ข้อดีของระบบดาวเทียม GNSS คือเพิ่มการรับสัญญาณดาวเทียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่อับสัญญาณ ซึ่งส่งผลให้มีการปรับปรุงค่าการวัดเรขาคณิตของกลุ่มดาวเทียม (DOP) และเพิ่มความถูกต้องทางตำแหน่งมากขึ้น ข้อดีเหล่านี้จะเห็นได้ชัดเจนในพื้นที่ที่อับสัญญาณเช่น ตัวเมือง หุบเขา และพื้นที่ป่าไม้ บทวิจัยนี้มีจุดประสงค์ประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 ทั้งในรูปแบบการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวและสถิต ด้วยการ ใช้ GPS เพียงระบบเดียว GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/ COMPASS-BeiDou2 ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซอฟต์แวร์ RTKib 2.4.3 ได้ถูกใช้ในการประมวลผลข้อมูล GNSS ค่ามุมสูงของดาวเทียมที่แตกต่างกันได้ถูกใช้ในขั้นตอนการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวเพื่อที่จะแสดงให้เห็นเงื่อนไขการรังวัดของระบบดาวเทียม GNSS ในพื้นที่ที่แตกต่างกัน สำหรับการประมวลผลแบบสถิตข้อมูลได้ถูกรังวัดด้วยระยะเส้นฐาน 3 เส้นที่แตกต่างกัน (เช่น 3.8, 6.7 และ 23.2 กิโลเมตร) ผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันว่าการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวโดยการใช้ระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 ให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่มีความถูกต้องมากที่สุดในทุกเงื่อนไข ในขณะที่ผลที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิตเห็นว่าค่าเฉลี่ยทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 ได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น 26.98% ทางราบและ 30.08% ทางตั้ง

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5670488021 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: GPS/ GLONASS/ COMPASS-BEIDOU2/ SINGLE POINT POSITIONING/ STATIC

SOUKSANH XAYAVONG: ACCURACY ASSESSMENT OF GPS/GLONASS/COMPASS
IN SINGLE POINT POSITIONING AND STATIC MODES: CASE STUDY IN BANGKOK
AREA. ADVISOR: PROF. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D., 127 pp.

Global Navigation Satellite System (GNSS) can provide more reliable positioning results than the use of a single navigation satellite system (i.e. GPS alone). The advantage of GNSS is an increment of the receiving satellite signals especially in obstructed areas. It results in an improvement of Dilution of Precision (DOP) value, and more accurate positioning results. Such advantages are evident in obstructed areas such as downtown areas, valleys, and forest. This research aims to assess an accuracy of positioning results obtained from GPS, GLONASS and COMPASS/BeiDou-2 satellite systems in both single point positioning and static surveying modes using GPS only, GPS/GLONASS and GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 in Bangkok area. The RTKlib 2.4.3 was used to process the GNSS data. The various elevation masks were applied in the processing step in the single point positioning mode to demonstrate the performance of GNSS in different observing conditions. For the static surveying mode, the GNSS data were observed with three different baseline lengths (i.e. 3.8, 6.7, and 23.2 kilometers). The result confirmed that the use of GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 in single point positioning mode provides the most accuracy positioning results in any conditions. While the results of the static processing showed that positioning results obtained from GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 is improved by 26.98% in horizontal component and by 30.08% in vertical component.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อใดหัวข้อหนึ่งจะเสร็จลงได้อย่างสมบูรณ์ ก็ต้องประกอบมีหลาย ๆ ภาคส่วนที่ให้การสนับสนุน, ให้คำแนะนำ และให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ได้บรรลุตามเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ จึงขอแสดงความรู้บุญคุณมายังผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องดังนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในการให้คำปรึกษา, ให้คำแนะนำ, ความรู้ความเข้าใจ และตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี พร้อมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับข้าพเจ้า และขอขอบพระคุณมายังคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ วิชัย เยี่ยงวีรชน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชนินทร ทินนโชติ และ ดร.ธิตต์ เจริญกาลัญญาตา ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการปรับปรุงแก้ไข สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้จนเสร็จสมบูรณ์ และ ดียิ่งขึ้น. ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนวิชาความรู้และความเข้าใจต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ระหว่างการทำวิจัยครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บริษัท ทริมเบล (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนเครื่องมือ GNSS ในการใช้เก็บข้อมูล และ เอื้อเพื่อข้อมูลดาวเทียม. ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ภาควิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด, และสำนักงานโยธาธิการและผังเมือง ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่ เพื่อรังวัดข้อมูลดาวเทียม GNSS

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ เพื่อน ๆ นิสิตภาควิศวกรรมสำรวจทุกท่านที่ให้ข้อมูล คำปรึกษาและแลกเปลี่ยนความรู้ความเข้าใจในการทำวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าในการศึกษาระดับ บัณฑิตวิทยาลัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ทั้งด้านกำลังใจ ในระหว่างการศึกษา และ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อเป็นกตเวทิตาคุณแต่บิดามารดา ญาติพี่น้อง และคณาจารย์ทุกท่าน พร้อมกันนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมสืบต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฎ
สารบัญตาราง.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา	3
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	3
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 แนวคิดพื้นฐานของงานวิจัย.....	8
2.2 ระบบนำหนด้วยดาวเทียม (GNSS: Global Navigation Satellite Systems).....	9
2.2.1 ระบบดาวเทียม GPS (GPS: <u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem, USA).....	11
2.2.1.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment).....	15
2.2.1.2 ส่วนควบคุม (Control Segment)	20
2.2.1.3 ส่วนผู้ใช้งาน (User Segment)	21

2.2.2 ระบบดาวเทียม GLONASS (GLONASS: <u>G</u> L <u>O</u> bal <u>N</u> avigation <u>S</u> atellite System, Russia).....	23
2.2.2.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment).....	24
2.2.2.2 ส่วนควบคุม (Control Segment).....	26
2.2.2.3 ส่วนของผู้ใช้งาน (User Segment).....	27
2.2.3 ระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou (COMPASS/BeiDou, China).....	28
2.2.3.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment).....	30
2.2.3.2 ส่วนควบคุม (Control Segment).....	32
2.2.3.3 ส่วนของผู้ใช้งาน (User Segment).....	32
2.2.4 สรุปคุณลักษณะเฉพาะของดาวเทียมทั้ง 3 ระบบ	33
2.3 สมการค่าสังเกต (Observation Equation).....	34
2.3.1 ชูโดเรนจ์ (Pseudo range)	34
2.3.2 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase).....	35
2.4 เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมบูรณ์ (Absolute Positioning)	38
2.5 เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning).....	38
2.5.1 การรังวัดแบบสถิต (Static Survey).....	39
2.5.2 การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid Static Survey).....	40
2.5.3 การรังวัดแบบจลนในทันที (Real Time Kinematic Survey: RTK).....	40
2.5.4 การรังวัดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐาน (Network-Based RTK: NRTK).....	42
2.6 ความคลาดเคลื่อนในงานรังวัดดาวเทียม	43
2.6.1 ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbit Bias).....	43
2.6.2 ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาของเครื่องรับ (Clock Bias).....	44
2.6.3 ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ (Atmosphere Bias)	44

2.6.4 ความคลาดเคลื่อนจากคลื่นสะท้อน (Multipath)	44
2.6.5 ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องรับ.....	45
2.6.6 เรขาคณิตดาวเทียม (Satellite Geometry).....	46
2.7 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	47
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	50
3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการประมวลผล	51
3.2 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล	56
3.2.1 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP)	56
3.2.2 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบสถิต (Static).....	57
3.3 ขั้นตอนการเปรียบเทียบ.....	59
3.4 อุปกรณ์ (Equipment) และซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในงานวิจัย	60
3.4.1 อุปกรณ์ (Equipment).....	60
3.4.2 ซอฟต์แวร์ (Software).....	61
3.4.2.1 Convert to RINEX	61
3.4.2.2 RTKlib 2.4.3	61
3.4.2.3 Geocal.....	64
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	69
4.1 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning).....	69
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย T-Test สำหรับการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว	77
4.1.1.1 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS	77
4.1.1.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS.....	82

4.2 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประมวลผลแบบสถิต (Static).....	86
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย T-Test สำหรับการหาตำแหน่งแบบสถิต.....	95
4.2.1.1 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS	95
4.2.1.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS	98
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	102
5.1 สรุปผลการศึกษา	102
5.1.1 การประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดียว (Single Point Positioning: SPP)	102
5.1.2 การประมวลผลข้อมูลแบบสถิต (Static).....	102
5.1.3 สรุปผลการศึกษากับงานวิจัยที่ผ่านมา	103
5.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ	103
5.2.1 ข้อจำกัด	103
5.2.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง	105
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก ผลการประมวลผลตำแหน่งแบบจุดเดียว	108
ภาคผนวก ข ผลการประมวลผลตำแหน่งแบบสถิต	120
ภาคผนวก ค การตั้งค่าการประมวลผลข้อมูล.....	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	127

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงตำแหน่งโครงข่ายสถานีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	4
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนพื้นฐานในการทำงานของระบบดาวเทียมGNSS (GNSS)	10
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบดาวเทียม GNSS (GNSS Segments).....	11
รูปที่ 2.3 ดาวเทียม GPS รุ่นแรกจนถึงรุ่นปัจจุบัน	14
รูปที่ 2.4 กลุ่มดาวเทียม GPS ที่โคจรรอบโลก	15
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างระนาบวงโคจรดาวเทียม GPS.....	16
รูปที่ 2.6 คลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS และรหัส	18
รูปที่ 2.7 วิวัฒนาการของคลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS.....	19
รูปที่ 2.8 ส่วนควบคุมของระบบดาวเทียม GPS.....	21
รูปที่ 2.9 การประยุกต์ใช้ GPS เข้าในงานด้านต่าง ๆ.....	22
รูปที่ 2.10 วิวัฒนาการของดาวเทียม GLONASS.....	24
รูปที่ 2.11 ส่วนอวกาศของดาวเทียม GLONASS.....	24
รูปที่ 2.12 วิวัฒนาการของคลื่นสัญญาณดาวเทียม GLONASS.....	26
รูปที่ 2.13 ส่วนควบคุมภาคพื้นดินของระบบดาวเทียม GLONASS.....	27
รูปที่ 2.14 กลุ่มดาวเทียม COMPASS/BeiDou-2 ที่ให้บริการครอบคลุมภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก.....	29
รูปที่ 2.15 พื้นที่ให้บริการของระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou-2 ครอบคลุมภูมิภาคเอเชีย แปซิฟิก.....	29
รูปที่ 2.16 รูปดาวเทียม COMPASS.....	29
รูปที่ 2.17 คลื่นความถี่ของระบบดาวเทียม COMPASS เทียบกับระบบดาวเทียมอื่น	32
รูปที่ 2.18 วงโคจรของระบบดาวเทียม GNSS.....	33
รูปที่ 2.19 แสดงการเปรียบเทียบรหัสเพื่อหาระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายัง เครื่องรับสัญญาณ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006)	35
รูปที่ 2.20 การรังวัดระยะเฟสของคลื่นส่ง	36

รูปที่ 2.21 การหาตำแหน่งแบบสัมบูรณ์	38
รูปที่ 2.22 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์	39
รูปที่ 2.23 การรังวัดแบบสถิติ	40
รูปที่ 2.24 เทคนิคการรังวัดแบบจลนในทันที	41
รูปที่ 2.25 การรังวัดแบบจลนในทันทีในภาคสนาม (ซ้าย: สถานีฐาน, ขวา: สถานีผู้ใช้งาน)	41
รูปที่ 2.26 แสดงขั้นตอนการทำงานของการทำงานของรังวัดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานี ฐาน	43
รูปที่ 2.27 ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ.....	44
รูปที่ 2.28 ความคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี	45
รูปที่ 2.29 ตัวอย่างค่า GDOP ที่ดี(ด้านซ้าย) และ GDOP ที่ดี(ด้านขวา) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006)	47
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยรวม	50
รูปที่ 3.2 สถานีรังวัดข้อมูลสำหรับการประมวลผลแบบจุดเดียว	51
รูปที่ 3.3 สถานี CUSV ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งแบบจุดเดียว	52
รูปที่ 3.4 การดาวน์โหลดข้อมูลของสถานี CUSV จากโปรแกรม RTKGET v.2.4.2.....	52
รูปที่ 3.5 สถานีฐานสำหรับการหาตำแหน่งแบบสถิติ และเครื่องรับสัญญาณ Leica Viva GNSS GS10 Receiver	53
รูปที่ 3.6 สถานีผู้ใช้งาน SV01.....	54
รูปที่ 3.7 สถานีผู้ใช้งาน DPT9	54
รูปที่ 3.8 สถานีผู้ใช้งาน LAND.....	55
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการแปลงข้อมูลจากข้อมูลดิบมาเป็นข้อมูล RINEX v3.2 ด้วยซอฟต์แวร์ Convert to RINEX.....	55
รูปที่ 3.10 ที่ตั้งโครงข่ายสถานีเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	56
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดียว.....	57

รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบสถิติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	58
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบสถิติเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง.....	58
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างขั้นตอนการเปลี่ยนพื่นหลักฐานของตำแหน่ง	59
รูปที่ 3.15 เครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย	60
รูปที่ 3.16 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของฟังก์ชันที่มีใน RTKlib 2.4.3.....	62
รูปที่ 3.17 หน้าต่างของฟังก์ชัน RTKPOST สำหรับการประมวลผลภายหลัง (Post Processing)...	62
รูปที่ 3.18 หน้าต่างการกำหนดค่าต่าง ๆ Setting 1.....	62
รูปที่ 3.19 หน้าต่างการกำหนดค่าต่าง ๆ Setting 2.....	63
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยฟังก์ชัน RTKPOST	63
รูปที่ 3.21 ผลของการประมวลผลจากซอฟต์แวร์ LGO	63
รูปที่ 3.22 ผลของการประมวลผลจากซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3.....	64
รูปที่ 3.23 แบบจำลองของโลกแบบ Spheroid.....	64
รูปที่ 3.24 แสดงระบบพิกัดแบบ Geodetic Coordinates.....	66
รูปที่ 3.25 แสดงระบบพิกัดแบบ ECEF (Earth-Center Earth-Fixed)	67
รูปที่ 3.26 แผนวาดการแปลงพิกัดจากระบบพิกัด Geodetics coordinate พื้นหลักฐาน WGS 84 ไปเป็นระบบพิกัด UTM coordinate พื้นหลักฐาน Indian 1975.....	67
รูปที่ 3.27 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของพื้นหลักฐาน Indian 1975	68
รูปที่ 3.28 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบพิกัดฉาก UTM Indian Zone 47N.....	68
รูปที่ 3.29 การแปลงค่าพิกัดจาก Geodetics (WGS 84) เป็น UTM Zone 47N (Indian 1975)...	68
รูปที่ 4.1 แสดงจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้ ณ สถานี CUSV เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	69
รูปที่ 4.2 แสดงค่า GDOP ที่รับวัดได้ ณ สถานี CUSV เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	70
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°	71

รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°	71
รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°	71
รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°	72
รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างค่า GDOP ที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°	72
รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างค่า GDOP ที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°	72
รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างค่า GDOP ที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°	73
รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างค่า GDOP ที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°	73
รูปที่ 4.11 สรุปจำนวนดาวเทียมเฉลี่ยทั้ง 28 วันของสถานี BGOK	73
รูปที่ 4.12 สรุปค่า GDOP เฉลี่ยทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK.....	74
รูปที่ 4.13 สรุปเปอร์เซ็นต์การคำนวณหาตำแหน่งเฉลี่ยทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK	74
รูปที่ 4.14 สรุปค่า RMS เฉลี่ยทางราบทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK.....	75
รูปที่ 4.15 สรุปค่า RMS เฉลี่ยทางตั้งทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK.....	75
รูปที่ 4.16 แสดงจำนวนดาวเทียมของสถานี SV01	86
รูปที่ 4.17 แสดงจำนวนดาวเทียมของสถานี DPT9.....	86
รูปที่ 4.18 แสดงจำนวนดาวเทียมของสถานี LAND	86
รูปที่ 4.19 แสดงค่า GDOP ของสถานี SV01	87
รูปที่ 4.20 แสดงค่า GDOP ของสถานี DPT9.....	87
รูปที่ 4.21 แสดงค่า GDOP ของสถานี LAND	87
รูปที่ 4.22 สรุปจำนวนดาวเทียมเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	88
รูปที่ 4.23 สรุปค่า GDOP เฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	88

รูปที่ 4.24 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี SV01 ทางราบทุก ๆ 1 ชั่วโมง	89
รูปที่ 4.25 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี SV01 ทางดิ่งทุก ๆ 1 ชั่วโมง	89
รูปที่ 4.26 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี DPT9 ทางราบทุก ๆ 1 ชั่วโมง.....	90
รูปที่ 4.27 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี DPT9 ทางดิ่งทุก ๆ 1 ชั่วโมง.....	90
รูปที่ 4.28 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี LAND ทางราบทุก ๆ 1 ชั่วโมง	90
รูปที่ 4.29 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี LAND ทางดิ่งทุก ๆ 1 ชั่วโมง.....	91
รูปที่ 4.30 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานี SV01 ทุก ๆ 1 ชั่วโมง.....	91
รูปที่ 4.31 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานี DPT9 ทุก ๆ 1 ชั่วโมง.....	92
รูปที่ 4.32 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานี LAND ทุก ๆ 1 ชั่วโมง	92
รูปที่ 4.33 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานที่ประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS.....	93
รูปที่ 4.34 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานที่ประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS	93
รูปที่ 4.35 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานที่ประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS	94

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	รายละเอียดของสถานีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	4
ตารางที่ 2.1	สรุปจำนวนดาวเทียม GPS ที่ถูกส่งขึ้นอวกาศ	14
ตารางที่ 2.2	สรุปองค์ประกอบของวงโคจรดาวเทียม GPS ณ วันที่ 1 เมษายน ค.ศ. 2015	16
ตารางที่ 2.3	คลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS ในปัจจุบัน	19
ตารางที่ 2.4	คุณลักษณะของดาวเทียม GLONASS แต่ละรุ่น	23
ตารางที่ 2.5	วงโคจรดาวเทียม GLONASS ในปัจจุบัน	25
ตารางที่ 2.6	คลื่นสัญญาณดาวเทียม GLONASS ในปัจจุบัน	26
ตารางที่ 2.7	วงโคจรดาวเทียม COMPASS ในปัจจุบัน	30
ตารางที่ 2.8	เปรียบเทียบระบบดาวเทียม GPS GLONASS และ COMPASS/BeiDou Santerre, Pan et al. (2014)	33
ตารางที่ 2.9	ความหมายของค่า DOP	47
ตารางที่ 3.1	เงื่อนไขของการทดลอง (Ferrao, Sanguino et al. 2013)	57
ตารางที่ 3.2	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ Ellipsoid	65
ตารางที่ 3.3	ประเภท Geodetic Datum	65
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าพิกัดของสถานี BGOK ที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิติจากสถานี CUSV	70
ตารางที่ 4.2	สรุปค่าเฉลี่ยจำนวนดาวเทียม และ ค่า GDOP ของแต่ละระบบในเงื่อนไขมุมสูง ดาวเทียมที่แตกต่างกัน	76
ตารางที่ 4.3	สรุปค่าเฉลี่ย RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของแต่ละระบบในเงื่อนไขของ มุมสูงรับดาวเทียมที่แตกต่างกัน	76
ตารางที่ 4.4	สรุปค่าเฉลี่ย RMS ทางราบ (Horizontal) และทางตั้ง (Vertical)	77
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°	77

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°	78
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°	79
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°	80
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°	82
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°	83
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°	84
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°	85
ตารางที่ 4.13 ค่าพิคัดของแต่ละสถานีที่ทำการประมวลผลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	89
ตารางที่ 4.14 สรุปค่า RMS เฉลี่ยของแต่ละสถานีโดยการประมวลผลทุก ๆ 1 ชั่วโมง	94
ตารางที่ 4.15 สรุปค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงค่าตำแหน่งของระบบดาวเทียม GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS เทียบกับระบบดาวเทียม GPS โดยการประมวลผลทุก ๆ 1 ชั่วโมง	95
ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี SV01 ..	95
ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี DPT9 ..	96
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี LAND ..	97
ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี SV01 ..	98
ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี DPT9 ..	99
ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี LAND100	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การนำหน และการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมได้มีการพัฒนาอย่างน้อย 30 ปี โดยจุดมุ่งหมายแรก ของการพัฒนาเพื่อใช้ในงานด้านการทหารเป็นหลัก แต่ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ใน งานเชิงพาณิชย์ และมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เรามากขึ้นเช่น การนำหนที่ใช้กับ เครื่องบิน รถยนต์ และเรือ ตลอดจนถึงในการระบุตำแหน่งของวัตถุต่างๆอยู่บนพื้นผิวโลก GPS (Global Positioning System) เป็นระบบดาวเทียมที่ถูกพัฒนาโดยกระทรวงกลาโหมประเทศ สหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นระบบดาวเทียมแรกที่เปิดให้บริการ และมีความสมบูรณ์ที่สุด สามารถระบุ ตำแหน่งพิกัดที่ถูกต้อง, ความเร็ว และเวลาที่แม่นยำ มีความน่าเชื่อถือ ความพร้อมในการใช้งาน และ มีเสถียรภาพสูง สามารถให้บริการได้ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ทุกๆ สภาพอากาศ และทุกพื้นที่ทั่วโลก ซึ่งนานาประเทศทั่วโลกก็ได้เล็งเห็นความสำคัญถึงผลประโยชน์ที่จะได้รับ จึงได้มีการสร้างระบบ ดาวเทียมเป็นของตัวเองขึ้นมาเช่น GLONASS ของประเทศรัสเซีย , GALILEO ของกลุ่มสหภาพยุโรป, COMPASS/BeiDou ของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน, QZSS ของประเทศญี่ปุ่น, DORIS ของ ประเทศฝรั่งเศส และ IRNSS ที่พัฒนาโดยประเทศอินเดีย โดยระบบดาวเทียมทั้งหมดมีหน้าที่ เหมือนกันคือ ให้บริการในการนำหน, ความเร็ว, เวลา และการระบุตำแหน่งเป็นหลัก ซึ่งแต่ละระบบก็ จะมีความละเอียดถูกต้องที่แตกต่างกันไป เพราะฉะนั้นจึงได้มีการจำแนกระบบดาวเทียมออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ด้วยกันเช่น ระบบดาวเทียมที่สามารถให้บริการได้ทุกพื้นที่ทั่วโลกจะเรียกกันว่า GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ประกอบมีระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, GALILEO และ Compass/BeiDou ส่วนระบบดาวเทียมที่ยังเหลือจะเป็นระบบดาวเทียมที่สามารถให้บริการได้ เฉพาะในเขตภูมิภาคเท่านั้น

การนำหน และการระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GPS สามารถทำได้ด้วยเทคนิคหลาย แบบ โดยเทคนิคที่ใช้ในการนำหนก็คือการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวโดยใช้ข้อมูล Pseudo-range ที่จะ ให้ค่าพิกัด ณ เวลาของการใช้งานจริงซึ่งค่าความถูกต้องของการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวอยู่ที่ ประมาณ 3.351 เมตร (ตำแหน่งทางราบ) และ 4.684 เมตร (ตำแหน่งทางตั้ง) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ Hughes (2014) สำหรับการระบุตำแหน่งในด้านการสำรวจรังวัดจะใช้เทคนิคการหา ตำแหน่งแบบสัมพัทธ์โดยอาศัยข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ค่าพิกัดที่ได้จะต้องทำการประมวลผลข้อมูลจาก เครื่องรับก่อนโดยจะมีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งประมาณมิลลิเมตรถึงเซนติเมตร ซึ่งการที่จะทำให้ ได้ค่าความถูกต้องในระดับดังกล่าวขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกันเช่น จำนวนดาวเทียม เรขาคณิตของ

ดาวเทียม ระยะเวลา ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ความยาวของเสัฐาน และสภาพแวดล้อมในขณะทำการรับสัญญาณ เป็นต้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006) โดยวิธีการในการปรับปรุง และเพิ่มโอกาสในการระบุตำแหน่งให้มีค่าความถูกต้องในระดับนั้นวิธีที่ง่ายที่สุดก็คือการเพิ่มระบบดาวเทียมอื่นเข้าในการประมวลผลร่วมกับระบบดาวเทียม GPS ซึ่งจะทำให้มีจำนวนดาวเทียมเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

จากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการผสมระบบดาวเทียม GPS เข้ากับระบบดาวเทียมอื่นๆ ในการประมวลผลเพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและความถูกต้องทางตำแหน่งมากขึ้นเช่น การวิเคราะห์คุณภาพของการผสมข้อมูล GPS กับ COMPASS และผลกระทบต่อค่าความถูกต้องในการระบุตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวภายใต้สภาพเงื่อนไขของการรังวัดที่แตกต่างกัน Cai, Gao et al. (2014), การประเมินผลประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งจุดเดี่ยวด้วย GPS/GLONASS ในสภาพแวดล้อมของเมือง Angrisano, Gaglione et al. (2013), ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou-2/Compass โดยภาพรวมจากทวีปเอเชีย Chen., Huang. et al. (2009), การใช้ระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และBeiDou ในการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว Santerre, Pan et al. (2014) จากตัวอย่างของการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงการทดสอบการผสมระบบดาวเทียม GPS/GLONASS, GPS/COMPASS, และGPS/GLONASS/COMPASS ในสภาพพื้นที่เมือง และสภาพแวดล้อมที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันเพื่อแสดงให้เห็นค่าความถูกต้องทางตำแหน่งซึ่งค่าความถูกต้องของแต่ละพื้นที่ก็จะแตกต่างกันไป

เนื่องจากในปัจจุบันระบบดาวเทียม GNSS มีเพียง 2 ระบบเท่านั้นที่สามารถให้บริการได้ทุกพื้นที่ทั่วโลกก็คือ GPS และ GLONASS ส่วนอีก 2 ระบบยังอยู่ในช่วงของการพัฒนา โดยเฉพาะระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou ที่อยู่ในระยะที่ 2 ของการพัฒนาภายหลังปี ค.ศ. 2012 จะมีจำนวนดาวเทียม 14 ดวง ซึ่งสามารถให้บริการครอบคลุมภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ทำให้ประเทศในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกได้เปรียบกว่านานาประเทศทั่วโลกในการที่สามารถรับสัญญาณจำนวนดาวเทียมเพิ่มขึ้น และในปี ค.ศ. 2020 คาดว่าจะมีจำนวนดาวเทียมนำหน และระบุตำแหน่งที่สามารถให้บริการได้ทั่วโลกประมาณ 120 ดวง Sergio Camacho-Lara (2013) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของระบบดาวเทียมใหม่ ๆ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบดาวเทียมที่มีอยู่ให้ดีขึ้น โดยข้อได้เปรียบหลักของการนำใช้ระบบดาวเทียม GNSS ก็คือ การเพิ่มจำนวนดาวเทียม, ช่วยลดค่า DOP ของกลุ่มดาวเทียมและที่สำคัญคือช่วยให้ที่อัปสัญญาณ ได้แก่ เขตตัวเมืองที่มีอาคารสูง, เขตป่าไม้, เขตหุบเขา และอื่น ๆ สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะขอนำเสนอการประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดที่รังวัดโดยระบบ GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 ในรูปแบบการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว และ

สถิติ โดยจะทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS, GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 แล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าพิกัดทางตำแหน่งที่ได้ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นค่าความถูกต้องของแต่ละระบบว่ามีความละเอียดถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยมีพื้นที่ศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร (พื้นที่เปิดโล่ง) เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของระบบดาวเทียม COMPASS ด้วยเพราะเป็นระบบดาวเทียมที่เริ่มเปิดให้บริการครอบคลุมทุกพื้นที่ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และก็เป็นระบบดาวเทียมใหม่สำหรับประเทศไทยที่ต้องมีการทดสอบค่าความถูกต้องเพื่อเป็นแนวทางสำหรับนักสำรวจจริงวัด และทำแผนที่ในการตัดสินใจเลือกใช้

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของการประมวลผลแต่ละกรณีเช่น GPS, GPS/ GLONASS , GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 ในรูปแบบการหาตำแหน่งคือ

- การหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูล Pseudorange ซึ่งจะกำหนดเงื่อนไขในการประมวลผลด้วยค่ามุมสูงดาวเทียมที่แตกต่างกันแล้วทำการเปรียบเทียบค่าตำแหน่ง (E,N,H) กับค่าที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิติจากสถานีที่มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งสูงเพื่อหาค่า RMS
- การหาตำแหน่งแบบสถิติ โดยจะทำการประมวลผลทั้งหมด 3 เส้นฐานที่มีระยะเส้นฐานที่แตกต่างกัน ด้วยข้อมูล 24 ชั่วโมง และ ทุก ๆ 1 ชั่วโมงแล้วทำการเปรียบเทียบค่าตำแหน่ง (E,N,H) ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล 24 ชั่วโมงกับ ข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

- ศึกษาคุณสมบัติของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2
- ศึกษาทฤษฎีการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว และสถิติ
- ศึกษาการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว และสถิติ โดยการประมวลผลในภายหลัง (Post-Processing) ด้วยซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3

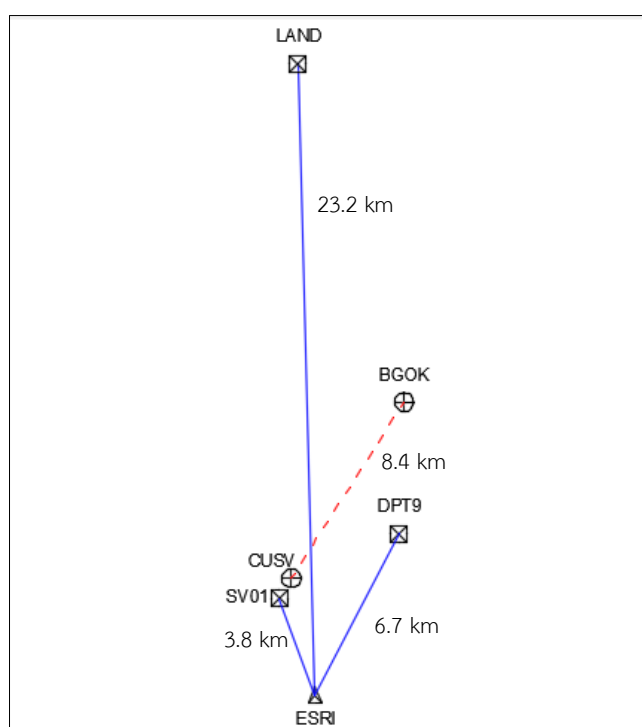
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ขอบเขตพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย อยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล(พื้นที่เปิดโล่ง)

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย


ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้จาก 6 สถานีที่ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ได้โดยจะใช้เครื่อง Trimble R10 หรือ Leica Viva GNSS GS10 receiver ซึ่ง 1 ใน 6 สถานีจะมีสถานี BGOK เป็นสถานีเก็บข้อมูลในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวโดยจะเก็บข้อมูลเป็นเวลาเกือบหนึ่งเดือนเต็มเก็บข้อมูลทุกๆ 15 วินาทีเก็บแบบสถิติโดยเริ่มเก็บตั้งแต่วันที่ 1-28 มิถุนายน 2014 และ

สถานี CUSV (IGS Station) ที่ใช้ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องของการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวซึ่งเป็นสถานีที่มีค่าความถูกต้องในระดับมิลลิเมตรโดยมีเส้นฐานไปยังสถานี BGOK เป็นระยะ 8.4 กิโลเมตร ส่วนอีก 4 สถานีจะมีสถานี ESRI เป็นสถานีฐาน (Base Station) และสถานี SV01, DPT9 และ LAND เป็นสถานีผู้ใช้งาน (Roving station) โดยจะทำการรังวัดด้วยระยะห่างจากสถานีฐานไปยังสถานีผู้ใช้งานเป็นระยะ 3.8, 6.7 และ 23.2 กิโลเมตรตามลำดับ โดยจะทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของวันที่ 6, 7 และ 10 มกราคม 2015 ตามลำดับเก็บทุกๆ 1 วินาทีเก็บแบบสถิติ โดยทุกๆ จุดที่ทำการเก็บข้อมูลจะตั้งเครื่องรับให้อยู่ในที่เปิดโล่ง (ดาดฟ้าตึก)



รูปที่ 1.1 แสดงตำแหน่งโครงข่ายสถานีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของสถานีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

สถานี	สถานที่ตั้ง	แหล่งที่มา	รูปแสดงที่ตั้งสถานี
BGOK	ดาดฟ้า ชั้น 23 อาคาร โอลิมเปียไทยทาวเวอร์ ถ. รัชดาภิเษก แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร	บริษัท ทริมเบิล (ประเทศไทย) จำกัด	

สถานี	สถานที่ตั้ง	แหล่งที่มา	รูปแสดงที่ตั้งสถานี
CUSV	ดาดฟ้า อาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร	IGS Station	
ESRI	ดาดฟ้า อาคารซีดีจีเฮ้าส์ ถ.นาง ลิ้นจี่ แขวงช่องนนทรี เขตยาน นาวา กรุงเทพมหานคร	บริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด	
SV01	ดาดฟ้า ชั้น 4 อาคารศัลยกรรม นิเทศ ภาควิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	นาย สุขสันต์ ชัยยะวงค์ นางสาว อัคริณี วงษ์สุวรรณ	
LAND	ดาดฟ้า ชั้น 9 สำนักงานที่ดิน จังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด, หมู่บ้านเมืองทองธานี ถ.แจ้ง วัฒนะ ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี	นาย สุขสันต์ ชัยยะวงค์ นางสาว อัคริณี วงษ์สุวรรณ	
DPT9	ดาดฟ้า ชั้น 15 อาคารกรม โยธาธิการและผังเมือง ถ. พระราม 9 แขวงห้วยขวาง เขต ห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร	นาย สุขสันต์ ชัยยะวงค์ นางสาว อัคริณี วงษ์สุวรรณ	

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

- ศึกษาทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- เก็บข้อมูลดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS พร้อมตรวจสอบ และจัดเตรียมโดยการแปลงข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่องรับมาเป็น RINEX v3.02

- ประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม RTKlib 2.4.3 ในรูปแบบ Static เพื่อหาค่าพิกัดของสถานี BOGK โดยทำการประมวลผลข้อมูลจากสถานี CUSV ซึ่งเป็นสถานีของ IGS (International GNSS Service) ที่มีค่าความถูกต้องระดับมิลลิเมตร ไปยังสถานีฐานด้วยข้อมูล GPS/GLONASS เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเวลาของการรับข้อมูลทุกๆ 15 วินาทีแล้วทำการบันทึกผลตำแหน่งที่ได้

- ประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม RTKlib 2.4.3 ในรูปแบบ Single โดยใช้ข้อมูลจากสถานี BOGK ที่รับข้อมูลเป็นเวลาเกือบ 1 เดือนด้วยเวลาของการรับข้อมูลทุกๆ 15 วินาที ทำการประมวลผลทุกๆ 24 ชั่วโมงจนครบ 1 เดือนข้อมูลที่ได้รับได้ โดยจะแบ่งการประมวลผลออกเป็น 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ GPS อย่างเดียว GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS และแต่ละระบบก็จะทำการประมวลผลโดยกำหนดค่ามุมสูงของการรับสัญญาณดาวเทียม (Elevation mask) ที่แตกต่างกัน คือ 10° , 20° , 30° , และ 40° เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริง แล้วทำการบันทึกผลตำแหน่งที่ได้

- ประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม RTKlib 2.4.3 ในรูปแบบ Static โดยทำการประมวลผลจากสถานีฐาน (Base Station) ESRI ไปยังสถานีจร (Roving Station) SV01, DPT9 และ LAND ที่มีระยะของเส้นฐาน 3.8, 6.7 และ 23.2 กิโลเมตร ตามลำดับ โดยแบ่งการประมวลผลออกเป็น 2 กลุ่มคือ ประมวลผลข้อมูลเป็นแบบ 24 ชั่วโมง และทำการประมวลผลข้อมูลทุกๆ ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง โดยข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละกลุ่มจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ GPS อย่างเดียว GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยเวลาของการรับข้อมูลทุกๆ 1 วินาที แล้วทำการบันทึกผลตำแหน่งที่ได้

- ทำการเปรียบเทียบค่าพิกัดของสถานีฐาน BGOK ที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรมที่มีสถานี CUSV เป็นสถานีฐาน กับผลของการประมวลผลในโปรแกรม RTKlib 2.4.3 แบบจุดเดียวในทฤษฎีของการประมวลผลของทั้ง 3 ระบบคือ GPS อย่างเดียว GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS โดยค่าที่ใช้เปรียบเทียบจะมีค่า E,N,H อยู่ในระบบพิกัดฉาก UTM

- ทำการเปรียบเทียบค่า RMS ของค่าพิกัด E,N,H ที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม RTKlib 2.4.3 ของสถานีจร 3 สถานีที่มีระยะของเส้นฐาน 3.8, 6.7 และ 23.2 กิโลเมตรตามลำดับซึ่งแต่ละสถานีฐานจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก GPS อย่างเดียว GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS

- สรุปผลของค่าความถูกต้องสำหรับการประมวลผลแบบจุดเดียว ว่าการประมวลผลที่ได้จาก GPS อย่างเดียว GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS ในแต่ละกรณีของการกำหนดค่ามุมสูงการรับสัญญาณดาวเทียมมีค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง E,N,H ที่แตกต่างกันก็เปอร์เซ็นต์ และ

สรุปผลความแตกต่างของค่า RMS ทางตำแหน่ง E,N,H ที่ได้จากการประมวลผลแบบ Static ว่าระยะของเส้นฐานที่มีการเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อค่าความถูกต้องมากน้อยเพียงใด พร้อมทำการวิเคราะห์ทางสถิติ t-Test

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับจากการผสมระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/ COMPASS ในการหาตำแหน่งแบบจุดเดียว (Single Point Positioning: SPP) ในกรณีการเปลี่ยนมุมสูงของการรับสัญญาณดาวเทียมให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริงและค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของการหาตำแหน่งแบบสถิต (Static) ในระยะของเส้นฐานที่แตกต่างกัน



บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดพื้นฐานของงานวิจัย

การนำหน และระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมได้มีบทบาทต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์นับวันนับมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่น การนำทาง, การกีฬา, การควบคุมหรือติดตามยานพาหนะ, การกำหนดพิกัดของสถานที่ต่าง ๆ และอื่น ๆ สำหรับงานสำรวจรังวัดด้วยระบบดาวเทียมค่าความถูกต้องทางตำแหน่งถือว่าเป็นปัจจัยหลักของการทำงาน ซึ่งงานสำรวจแต่ละชนิดก็ต้องการค่าความถูกต้องที่แตกต่างกันไปเช่น งานสำรวจในการทำแผนที่ ที่ต้องการค่าความถูกต้องไม่มากในระดับเซนติเมตรจนถึงเมตร และงานสำรวจรังวัดหมุดโครงข่ายควบคุมหลักของประเทศที่ต้องการค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงในระดับมิลลิเมตร ซึ่งในงานของการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมก็ได้มีหลาย ๆ เทคนิคในการรังวัดที่ให้ค่าความถูกต้องที่แตกต่างกันไป โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ประเภทที่ใช้ข้อมูล Pseudo range เช่น วิธีการรังวัดในทันที (Standard Positioning Service) และประเภทที่ใช้ข้อมูล Carrier Phase เช่น วิธีการรังวัดแบบสถิต (Static), การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Fast Static), การรังวัดแบบจลน์ (Kinematic) , การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic) และการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐาน (Network-Based RTK: NRTK) ซึ่งวิธีการรังวัดแบบสถิต (Static) จะให้ค่าความถูกต้องที่ดีที่สุดเป็นการรังวัดแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning) โดยที่ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจะถูกกำหนดด้วยหลาย ๆ ปัจจัยเช่น ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากดาวเทียม (Satellite Errors), ชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Errors), นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (Receiver Clock Errors), คลื่นหลายวิถี (Multipath Errors), การวางตัวของกลุ่มดาวเทียม (Dilution of Precision), จำนวนดาวเทียมที่รับได้ในช่วงเวลาของการรังวัด และอื่น ๆ เพราะฉะนั้นเพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดี และมีความน่าเชื่อถือ การเพิ่มจำนวนดาวเทียมในการรังวัด และการประมวลผลก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถให้ค่าผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ดีกว่าการเลือกใช้ระบบดาวเทียม GPS เพียงอย่างเดียว เนื่องด้วยการพัฒนาของระบบดาวเทียมในปัจจุบันทำให้มีหลายระบบดาวเทียมสามารถให้บริการได้ทุกพื้นที่ทั่วโลกที่เรียกรวมกันว่าระบบดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ประกอบมีระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, GALILEO และ COMPASS/BeiDou ซึ่งระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou เป็นระบบดาวเทียมใหม่ที่ยังอยู่ในช่วงของการพัฒนาสามารถให้บริการครอบคลุมพื้นที่ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกในปี ค.ศ. 2012 และจะสามารถให้บริการได้เต็มระบบในปี ค.ศ. 2020 เนื่องด้วยในปัจจุบันการพัฒนาของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมก็พัฒนาไปพร้อม ๆ กับระบบดาวเทียมเช่นกัน

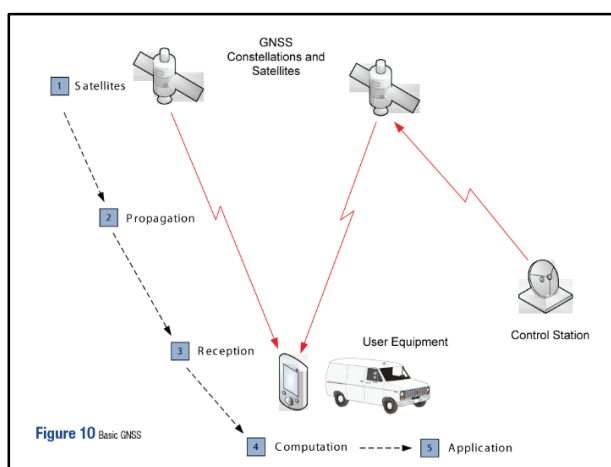
ดังนั้นการที่สามารถประมวลผลข้อมูลระบบดาวเทียม GPS ร่วมกับระบบดาวเทียมอื่น ๆ ที่สามารถรับสัญญาณได้ก็จะส่งผลให้มีจำนวนข้อมูลเพิ่มมากขึ้น, มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นตามไปด้วย และที่สำคัญที่สุดก็คือช่วยให้พื้นที่ที่อับสัญญาณสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้มากขึ้น ซึ่งเพียงพอต่อการหาตำแหน่งที่มีความถูกต้องกว่าการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม ระบบใดระบบหนึ่งเช่น ระบบดาวเทียม GPS โดยเฉพาะประเทศไทยที่อยู่ในพื้นที่ ที่สามารถรับสัญญาณระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou ได้จึงสามารถที่จะทำการประมวลผลระบบดาวเทียม GPS ร่วมกับระบบดาวเทียม GLONASS และ COMPASS/BeiDou เพื่อเป็นการทดสอบค่าความถูกต้องของตำแหน่ง และเป็นการประเมินประสิทธิภาพของระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou ส่วนระบบดาวเทียม GALILEO ยังไม่สามารถให้บริการได้เพราะจำนวนดาวเทียมที่รับได้ไม่เพียงพอและต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมงในประเทศไทยได้จึงไม่อยู่ในกรณีของการศึกษา

2.2 ระบบนำหนด้วยดาวเทียม (GNSS: Global Navigation Satellite Systems)

ระบบนำหนด้วยดาวเทียม GNSS (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) เป็นชื่อที่ใช้เรียกแทนกลุ่มระบบดาวเทียมที่สามารถให้บริการได้ทุกพื้นที่ทั่วโลก เพื่อให้เป็นสากลและเข้าใจง่าย โดยประกอบมีระบบดาวเทียม GPS (GPS: Global Positioning System, United states of America), ระบบดาวเทียม GLONASS (GLONASS: GLObal NAvigation Satellite System, Russia), ระบบดาวเทียม GALILEO (GALILEO, European Union) และระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou (COMPASS/BeiDou, China) ซึ่งในนั้นระบบดาวเทียมบางระบบก็ยังไม่สามารถให้บริการได้สมบูรณ์อย่างเต็มระบบเพราะกำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนาระบบทำให้บางพื้นที่ก็ยังไม่สามารถรับสัญญาณได้ แต่คาดว่าในปี ค.ศ. 2020 จะสามารถให้บริการได้สมบูรณ์และจะมีจำนวนดาวเทียมนำหน และระบุตำแหน่งที่สามารถให้บริการได้ทุกพื้นที่ทั่วโลกประมาณ 120 ดวง Sergio Camacho-Lara (2013) การนำหนและระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมได้เข้ามาเปลี่ยนแปลงการดำรงชีวิตของมนุษย์เราให้สะดวกสบายและมีความปลอดภัยมากขึ้น เนื่องด้วยข้อดีของระบบดาวเทียมคือ สามารถให้บริการได้ตลอด 24 ชั่วโมง, ทุกสภาพพื้นที่และทุกสภาพภูมิอากาศ ทำให้เป็นที่นิยมและถูกประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆมากมายเช่น งานด้านการเกษตรกรรม, การขนส่งทางน้ำและทะเล, การควบคุมการจราจรของเครื่องบิน, การแจ้งเตือนภัยพิบัติจากธรรมชาติ, การติดตามยานพาหนะ, การวางแผนใช้ประโยชน์ที่ดิน, การวางแผนสำหรับการจัดส่งสินค้า, การวางแผนการเดินทาง, การระบุตำแหน่งในด้านการสำรวจและทำแผนที่, การใช้อ้างอิงในการวัดเวลาที่เที่ยงตรงที่สุดในโลก เป็นต้น เนื่องด้วยแนวโน้มในความต้องการด้านความถูกต้องทางตำแหน่งของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการและทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การนำใช้ระบบดาวเทียม GNSS ถือว่าเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเพิ่มจำนวนดาวเทียมเพื่อให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งดีขึ้นและช่วยให้มีความต่อเนื่องในการใช้งาน เพราะดาวเทียมแต่ละระบบเป็นอิสระจาก

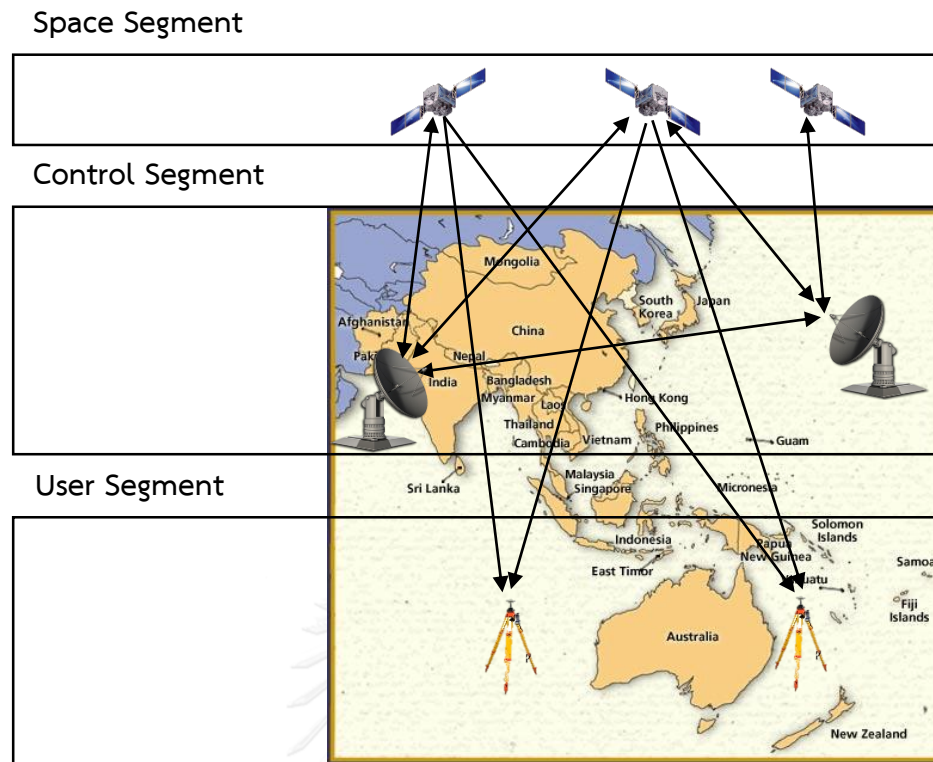
กัน ทำให้มีโอกาสน้อยมากที่ทุกระบบจะใช้งานไม่ได้พร้อมกัน สามารถลดผลกระทบจากข้อจำกัดเรื่องสภาพแวดล้อมในขณะที่ทำการรังวัด ในการทำงานของพื้นที่จริง บ่อยครั้งที่ต้องพบกับสภาพแวดล้อมที่เป็นอุปสรรคโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เช่น เขตเมืองที่มีอาคารและสิ่งก่อสร้างสูง, หุบเขา หรือบริเวณใต้ต้นไม้ที่หนาแน่น เป็นต้น ซึ่งการเลือกใช้ระบบดาวเทียม GNSS ก็เป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่ได้ผลอีกวิธีหนึ่ง ส่งผลทำให้ระบบดาวเทียม GNSS มีข้อได้เปรียบหลาย ๆ อย่างมากกว่าการเลือกใช้ข้อมูลจากระบบดาวเทียมระบบใดระบบหนึ่งเช่น ระบบ GPS

การทำงานของระบบดาวเทียมทุกระบบมีจุดประสงค์หลัก ๆ เหมือนกันคือการระบุตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์บนพื้นผิวโลก โดยอาศัยการคำนวณจากสัญญาณที่ส่งมาจากกลุ่มดาวเทียมที่โคจรรอบโลกซึ่งทราบตำแหน่ง ทำให้สามารถบอกตำแหน่ง ณ จุดที่สามารถรับสัญญาณได้ทั่วโลก ส่วนประกอบหลัก ๆ ของระบบดาวเทียมมีส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนอวกาศ (Space Segment) ส่วนควบคุม (Control Segment) และส่วนของผู้ใช้งาน (User Segment) แต่ละส่วนก็จะมีความสัมพันธ์กัน โดยเริ่มจากส่วนควบคุมที่มีสถานีติดตามดาวเทียมในภาคพื้นดินที่กระจายตัวกันอยู่ทั่วโลก ทุก ๆ สถานีจะมีค่าพิกัดที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งสูงในระดับมิลลิเมตรที่ทำหน้าที่คอยติดตามการเคลื่อนตัวของกลุ่มดาวเทียมโดยการส่งสัญญาณไปยังดาวเทียมแต่ละดวงแล้วทำการคำนวณวงโคจรและตำแหน่งของดาวเทียมทุก ๆ ดวงล่วงหน้าพร้อมให้บริการในขณะของเวลาต่างๆ จากนั้นส่วนควบคุมภาคพื้นดินก็จะส่งค่าพิกัดทางตำแหน่งไปยังดาวเทียมทุกดวงที่อยู่ในระบบ ต่อจากนั้นดาวเทียมทุกดวงก็จะส่งข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าพิกัดของผู้ใช้งานเป็นระยะ ๆ ตลอดเวลาทำให้ผู้ใช้งานสามารถคำนวณหาตำแหน่งได้ด้วยเครื่องรับสัญญาณได้ตลอดเวลา โดยจะอาศัยคลื่นวิทยุเป็นตัวนำส่งข้อมูล โดยส่วนประกอบต่าง ๆ และขั้นตอนพื้นฐานในระบบดาวเทียม GNSS ได้แสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนพื้นฐานในการทำงานของระบบดาวเทียมGNSS (GNSS)

ที่มา:(<http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-2-basic-gnss-concepts/>)



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบดาวเทียม GNSS (GNSS Segments)

2.2.1 ระบบดาวเทียม GPS (GPS: Global Positioning System, USA)

เมื่อเราพูดถึงการนำหนและการระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมแล้วเราจะนึกถึงระบบดาวเทียม GPS เป็นคำที่คุ้นหูมากที่สุด ระบบดาวเทียม GPS ได้ถูกพัฒนาโดยกระทรวงกลาโหมของประเทศสหรัฐอเมริกา แนวคิดในการพัฒนาระบบดาวเทียม GPS เริ่มต้นตั้งแต่ ค.ศ. 1957 เมื่อผู้ชำนาญวิชาฟิสิกส์ของสหรัฐอเมริกา 2 ท่าน นำโดย William Guider และ George Weiffenbach ได้ติดตามการส่งดาวเทียมสปุตนิก (Sputnik) ของโซเวียต (ประเทศรัสเซียในปัจจุบัน) และพบปรากฏการณ์ ดอปเปลอร์ (Doppler Effect: เป็นปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์อย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่นในมุมมองของผู้สังเกต) ของคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากดาวเทียม พวกเขาพบว่าหากทราบตำแหน่งที่แน่นอนบนพื้นผิวโลก ก็สามารถระบุตำแหน่งของดาวเทียมได้จากการตรวจวัด ดอปเปลอร์ และหากทราบตำแหน่งที่แน่นอนของดาวเทียม ก็จะสามารถระบุตำแหน่งบนพื้นโลกได้ ในทางกลับกัน โดยในระยะแรกของการพัฒนากองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาได้ทดลองระบบนำทางด้วยดาวเทียม ที่มีชื่อ ระบบแทรนซิท (TRANSIT) เป็นระบบนำวิถีด้วยดาวเทียมของกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา พัฒนาโดยศูนย์ปฏิบัติการฟิสิกส์ประยุกต์ (Applied Physics Laboratory: APL) แห่งมหาวิทยาลัยจอห์นฮอปกินส์ ระบบประกอบด้วยดาวเทียมจำนวน 5 ดวงด้วยกัน ซึ่งอยู่สูงจากผิวโลกประมาณ 1,075 กิโลเมตร ระยะเวลาของการหมุนรอบโลก 107 นาที

ปฏิบัติการได้ทุกสภาพอากาศ แต่ไม่ตลอด 24 ชั่วโมง สามารถรังวัดกำหนดตำแหน่งได้แบบอิสระ โดยไม่ต้องโยงยึดกับหมุดที่ทราบค่าแล้ว หรือที่เรียกว่า การกำหนดตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ (Absolute Positioning) จึงทำให้ลดขั้นตอนในการปฏิบัติงานลง สามารถดำเนินงานได้อย่างรวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำงาน ถึงแม้เครื่องมือจะมีราคาค่อนข้างสูง แต่ก็คุ้มค่ากับการลงทุนเมื่อพิจารณาจากผลงานที่ได้รับ อย่างไรก็ตาม ระบบแทรกนชิต ก็ได้สิ้นสุดการปฏิบัติงานลงเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1995 เนื่องด้วยระบบดาวเทียม แทรกนชิต มีจุดอ่อนคือการครอบคลุมพื้นที่มีช่องว่างกันมาก ผู้ใช้ต้องคำนวณโดยการประมาณค่า (Interpolate) ตำแหน่งของตนเองในระหว่างที่ดาวเทียมโคจรผ่านไป, ช่วงเวลาของการทำงานก็จำกัดโดยไม่สามารถรังวัดได้ตลอด 24 ชั่วโมง และที่สำคัญยังจำกัดเรื่องการใช้งานโดยอนุญาตให้ใช้งานได้เฉพาะรัฐบาล และเอกชนบางราย ไม่อนุญาตให้พลเรือนได้ใช้หรือบุคคลทั่วไปได้ใช้งาน แต่ความสำเร็จของระบบดาวเทียม แทรกนชิต ก็ได้เป็นการกระตุ้นให้ทั้งกองทัพเรือและกองทัพอากาศของสหรัฐอเมริกาได้ผลิตระบบการหาตำแหน่ง Navstar (Navigation Satellite Timing and Ranging) ที่สามารถให้บริการได้ทั่วโลก หรือที่เรียกว่า GPS ซึ่งใช้ในการระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ระบบดาวเทียม GPS โดยเริ่มแรกถูกออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์ทางการทหารเป็นหลัก แต่ก็ยอมให้พลเรือนใช้ได้บางส่วน ซึ่งมีคุณลักษณะที่ดีกว่าระบบดาวเทียม แทรกนชิต คือ จะให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่ต่อเนื่องและให้ความถูกต้องแม่นยำกว่า โดยที่ระบบดาวเทียม GPS ได้ถูกสร้างขึ้นมารวมทั้งหมดถึง 5 รุ่นด้วยกันคือ รุ่นที่ 1 เรียกว่า Block I, รุ่นที่ 2 เรียกว่า Block II/IIA, รุ่นที่ 3 เรียกว่า Block IIR/IIR-M, รุ่นที่ 4 เรียกว่า Block IIF และรุ่นที่ 5 เรียกว่า Block IIIA (GPS III)

รุ่นที่ 1 Block I เป็นรุ่นแรกที่ใช้ทดสอบระบบดาวเทียม GPS โดยบริษัท Rockwell International ได้ทำสัญญาในปี ค.ศ. 1974 เพื่อสร้างดาวเทียมกลุ่มแรกจำนวน 8 ดวงของรุ่นที่ 1 Block I ต่อมาในปี ค.ศ. 1978 สัญญาได้ถูกขยายออกเพื่อเพิ่มการสร้างดาวเทียมอีก 3 ดวง โดยรวมแล้วดาวเทียมในรุ่นที่หนึ่งมีจำนวนทั้งหมด 11 ดวงด้วยกันแต่สามารถปล่อยขึ้นสู่อวกาศสำเร็จได้เพียง 10 ดวงเท่านั้นเนื่องจากดาวเทียมดวงที่ 7 ประสบความล้มเหลวในการปล่อยขึ้นสู่อวกาศในวันที่ 18 ธันวาคม ค.ศ. 1981 กลุ่มดาวเทียมรุ่นที่ 1 ได้ประกอบไปด้วยกลุ่มดาวเทียมที่เป็นแนวความคิดและสะท้อนให้เห็นถึงขั้นตอนต่างๆของการพัฒนาระบบดาวเทียม ดาวเทียมดวงสุดท้ายของรุ่นที่ 1 ได้ถูกปล่อยขึ้นสู่อวกาศในวันที่ 9 ตุลาคม ค.ศ. 1985 โดยดาวเทียมแต่ละดวงถูกออกแบบมาให้มีอายุการใช้งาน 5 ปี

รุ่นที่ 2 Block II/IIA ในรุ่นที่ 2 จะแยกการพัฒนาออกเป็น 2 ช่วงคือช่วง Block II เป็นการทำงานที่เต็มรูปแบบครั้งแรกของดาวเทียม GPS ในการดำเนินงาน, ออกแบบมาเพื่อให้สามารถดำเนินงานได้ 14 วันโดยไม่ต้องติดต่อกับส่วนควบคุมใด ๆ ผู้รับเหมาที่สำคัญในการสร้างดาวเทียมคือบริษัท Rockwell International ในปี ค.ศ. 1983 บริษัท Rockwell International ได้รับการเซ็น

สัญญาเพิ่มในการสร้างดาวเทียมจำนวน 28 ดวงในรุ่นที่ 2 Block II/IIA ดาวเทียมที่ถูกปล่อยขึ้นสู่อวกาศในรุ่นที่ 2 Block II มีจำนวน 9 ดวง ซึ่งดวงแรกถูกส่งขึ้นไปในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 1989 และดาวเทียมดวงที่ 9 ได้ถูกส่งขึ้นไปในวันที่ 1 ตุลาคม ค.ศ. 1990 โดยที่ดาวเทียมทุกดวงในรุ่นนี้ถูกออกแบบมาให้มีอายุการดำเนินงานเพียง 7.5 ปีเท่านั้น ส่วนรุ่น Block IIA (2nd generation, “Advanced”) เป็นรุ่นที่ได้ปรับปรุงให้ดีขึ้นกว่ารุ่น Block II, ออกแบบให้สามารถดำเนินงานได้ 180 วันโดยไม่ต้องติดต่อกับส่วนควบคุม ซึ่งจำนวนดาวเทียมที่ถูกสร้างในรุ่นนี้มีทั้งหมด 19 ดวง, ดาวเทียมดวงแรกได้ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในวันที่ 26 พฤศจิกายน ค.ศ. 1990 และ ดาวเทียมดวงสุดท้ายถูกปล่อยในวันที่ 6 พฤศจิกายน ค.ศ. 1997 แต่ในวันที่ 17 มกราคม ค.ศ. 2009 ดาวเทียมจำนวน 6 ดวงก็ได้หยุดให้บริการ

รุ่นที่ 3 Block IIR/IIR-M โดยจะแยกการพัฒนาออกเป็น 2 ช่วงด้วยกันคือรุ่น Block IIR (“Replenishment”) ได้ถูกพัฒนาโดยบริษัท Lockheed Martin ดาวเทียมดวงแรกไม่สามารถส่งขึ้นสู่อวกาศได้สำเร็จในวันที่ 17 มกราคม ค.ศ. 1997 เนื่องจากปล่อยดาวเทียมขึ้นไปได้ 12 วินาทีจรวดที่ส่งดาวเทียมขึ้นไปก็ระเบิด แต่ในระยะเวลาต่อมาในวันที่ 23 กรกฎาคม ค.ศ. 1997 ก็สามารถส่งดาวเทียมดวงแรกขึ้นสู่อวกาศได้สำเร็จ ซึ่งจำนวนดาวเทียมที่ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศทั้งหมดในรุ่นนี้รวมมี 12 ดวงด้วยกัน ส่วนรุ่น Block IIR-M (“Modernized”) ประกอบมีดาวเทียมจำนวน 8 ดวง ซึ่งออกแบบโดยบริษัท Lockheed Martin ดาวเทียมดวงแรกได้ถูกปล่อยในวันที่ 26 กันยายน ค.ศ. 2005 และดาวเทียมดวงสุดท้ายถูกปล่อยในวันที่ 17 สิงหาคม ค.ศ. 2009 มีอายุการใช้งาน 7.5 ปี

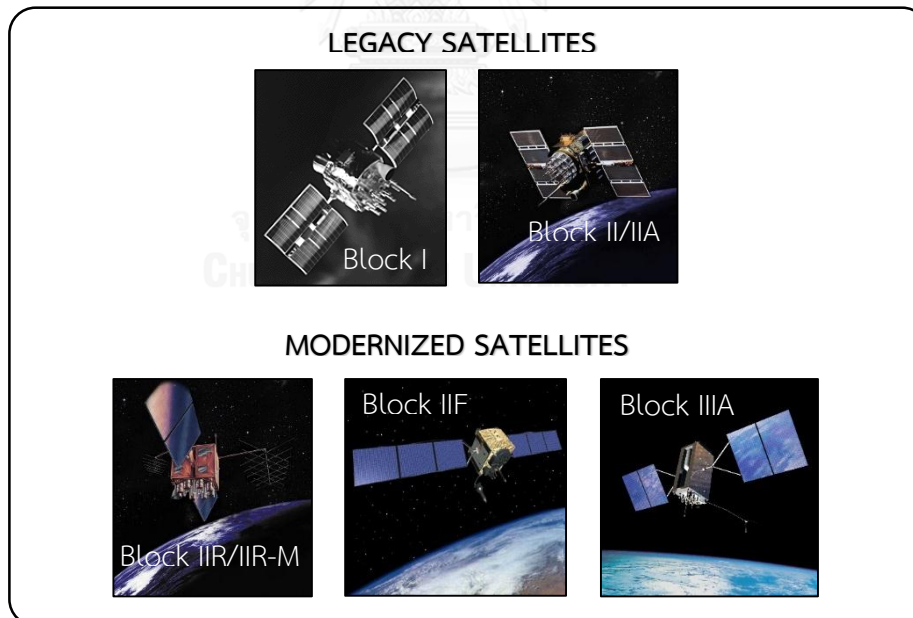
รุ่นที่ 4 Block IIF (“Follow on”) ถูกพัฒนาโดยบริษัท Boeing โดยได้เซ็นสัญญาในการสร้างดาวเทียมจำนวน 12 ดวงด้วยกัน ซึ่งดาวเทียมดวงแรกได้ถูกส่งขึ้นในเดือน พฤษภาคม ค.ศ. 2010 และดาวเทียมดวงที่ 2 ได้ถูกส่งขึ้นในวันที่ 16 กรกฎาคม ค.ศ. 2011 อายุการใช้งานของดาวเทียมได้ถูกออกแบบมาให้มีอายุในการใช้งานนานถึง 12 ปี

รุ่นที่ 5 Block IIIA (GPS III) เป็นกลุ่มดาวเทียมรุ่นต่อไป ซึ่งจะมาแทนกลุ่มดาวเทียมที่กำลังจะหมดอายุการใช้งานในอนาคตเพื่อให้ระบบดาวเทียม GPS สามารถใช้งานได้ต่อไป บริษัท Lockheed Martin เป็นผู้รับเหมาในการออกแบบ, พัฒนา และสร้างดาวเทียมตัวทดสอบ (GNST: GPS III Non-Flight Satellite Tested) และดาวเทียมกลุ่มแรกจำนวน 8 ดวง กองทัพอากาศสหรัฐอเมริกามีแผนที่จะสร้างดาวเทียม 32 ดวงในรุ่น Block IIIA (GPS III) ดาวเทียมดวงแรกมีแผนในการส่งขึ้นสู่อวกาศในปี ค.ศ. 2014 แต่ก็เกิดความล่าช้า ดังนั้นจึงมีแผนที่จะส่งดาวเทียมดวงแรกขึ้นสู่อวกาศอีกครั้งในต้นปี ค.ศ. 2017

ในปัจจุบันกลุ่มดาวเทียม GPS ที่ถูกใช้งานเป็นกลุ่มดาวเทียมที่ประกอบไปด้วยกลุ่มดาวเทียมเก่าและใหม่คือ กลุ่ม (LEGACY SATELLITES) และกลุ่ม(MODERNIZED SATELLITES) ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 สรุปจำนวนดาวเทียม GPS ที่ถูกส่งขึ้นอวกาศ

รุ่น	ช่วงระยะเวลาของการปล่อยดาวเทียม	จำนวนดาวเทียมที่สร้าง				สภาพการใช้งานดีและอยู่ในวงโคจรในปัจจุบัน
		สำเร็จ	ล้มเหลว	ในการเตรียมการ	วางแผน	
I	1978-1985	10	1	0	0	0
II	1989-1990	9	0	0	0	0
IIA	1990-1997	19	0	0	0	6
IIR	1997-2004	12	1	0	0	12
IIR-M	2005-2009	8	0	0	0	7
IIF	เริ่ม 2010	8	0	4	0	8
IIIA	เริ่ม 2016	0	0	0	12	0
รวมทั้งหมด		65	2	4	0	32



รูปที่ 2.3 ดาวเทียม GPS รุ่นแรกจนถึงรุ่นปัจจุบัน

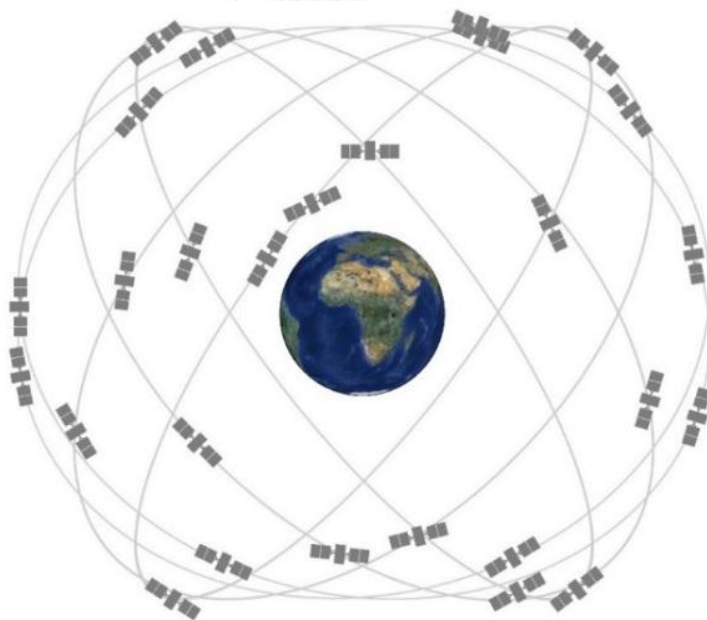
ที่มา: (<http://www.gps.gov/systems/gps/space/#III>)

2.2.1.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment)

องค์ประกอบในส่วนอวกาศของระบบดาวเทียม GPS มีอยู่ 3 ส่วนหลัก ๆ คือ วงโคจรดาวเทียม , นาฬิกาดาวเทียม และสัญญาณดาวเทียม

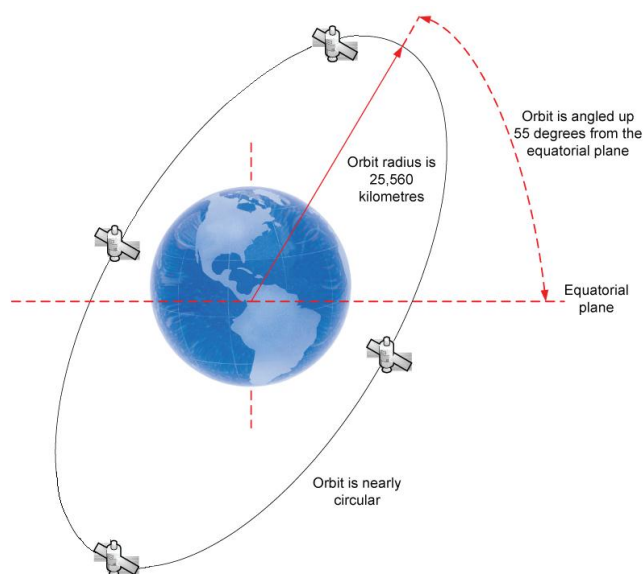
วงโคจรดาวเทียม (Orbital Satellites)

ระบบดาวเทียม GPS โคจรอยู่เหนือจากพื้นโลกในระดับกลาง (MEO: Medium Earth Orbit) ที่ระดับความสูงประมาณ 20,200 กิโลเมตร ดาวเทียมทุกดวงจะโคจรรอบโลก 2 ครั้งต่อวันดาราคติ ซึ่งคาบการโคจรหนึ่งครั้งใช้เวลาประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาที กลุ่มดาวเทียมจะถูกจัดเรียงเป็น 6 ระนาบวงโคจรในระยะห่างที่เท่า ๆ กันรอบโลก และทำมุมกับระนาบศูนย์สูตรประมาณ 55 องศา โดยแต่ละระนาบจะมีดาวเทียม 4 ดวง แต่ละดวงก็จะทำมุมระหว่างกันประมาณ 60 องศา จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 ประกอบ ซึ่งดาวเทียมทั้ง 24 ดวงจากระนาบโคจรทั้ง 6 สามารถให้ความเชื่อมั่นได้ว่า ผู้ใช้งานจะได้รับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวงตลอดเวลา แต่ถึงอย่างไรก็ตามกองทัพอากาศของสหรัฐอเมริกาก็ได้ส่งดาวเทียมขึ้นไปสู่อวกาศอยู่เรื่อยๆ ซึ่งในปัจจุบันระบบดาวเทียม GPS มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 32 ดวง (ดวงที่พร้อมใช้งาน 31 ดวง ดวงที่ซ่อมบำรุงอีก 1 ดวง ข้อมูล ณ วันที่ 1 เมษายน ค.ศ. 2015) ดูตารางที่ 2.2 ประกอบ



รูปที่ 2.4 กลุ่มดาวเทียม GPS ที่โคจรรอบโลก

ที่มา: (<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างระนาบวงโคจรดาวเทียม GPS

ที่มา: (<https://sites.google.com/site/dson978/digital-communication/gps-study-guide>)

ตารางที่ 2.2 สรุปองค์ประกอบของวงโคจรดาวเทียม GPS ณ วันที่ 1 เมษายน ค.ศ. 2015

ที่มา: (<https://glonass-iac.ru/en/GPS/>)

รายละเอียด	GPS
จำนวนดาวเทียม (ดวง)	31+1 ซ่อมบำรุง
จำนวนระนาบของวงโคจรดาวเทียม	6
ระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร (องศา)	55
มุมระหว่างระนาบ (องศา)	60
วงโคจรเหนือพื้นผิวโลก (กิโลเมตร)	20,200
เวลาที่ใช้ในการโคจร	11 ชั่วโมง 58 นาที

นาฬิกาดาวเทียม (Clock Satellite)

ในดาวเทียม GPS แต่ละดวงจะมีนาฬิกาอะตอมชนิดซึ่งอาจจะเป็นนาฬิกาแบบซีเซียม (Cesium Atomic Clock) หรือนาฬิการูบิเดียม (Rubidium Atomic Clock) จำนวน 3-4 เครื่อง ซึ่งได้รับการออกแบบ และผลิต โดยบริษัท Datum Incorporation USA มีความแม่นยำสูงและมีความละเอียดถึงนาโนวินาที (Nanoseconds) นาฬิกาดาวเทียมเป็นหัวใจสำคัญ ที่เป็นตัวกำหนด ความแม่นยำถูกต้อง

ในการคำนวณตำแหน่งพิกัด ของเครื่องรับสัญญาณ GPS และอ้างอิงกับเวลา GPS (GPS Time: GPST) อยู่ที่เมือง Colorado เริ่มนับเวลา 0h UTC (เที่ยงคืน) ของวันที่ 5 มกราคม ค.ศ. 1980

คลื่นสัญญาณดาวเทียม (Signal Satellites)

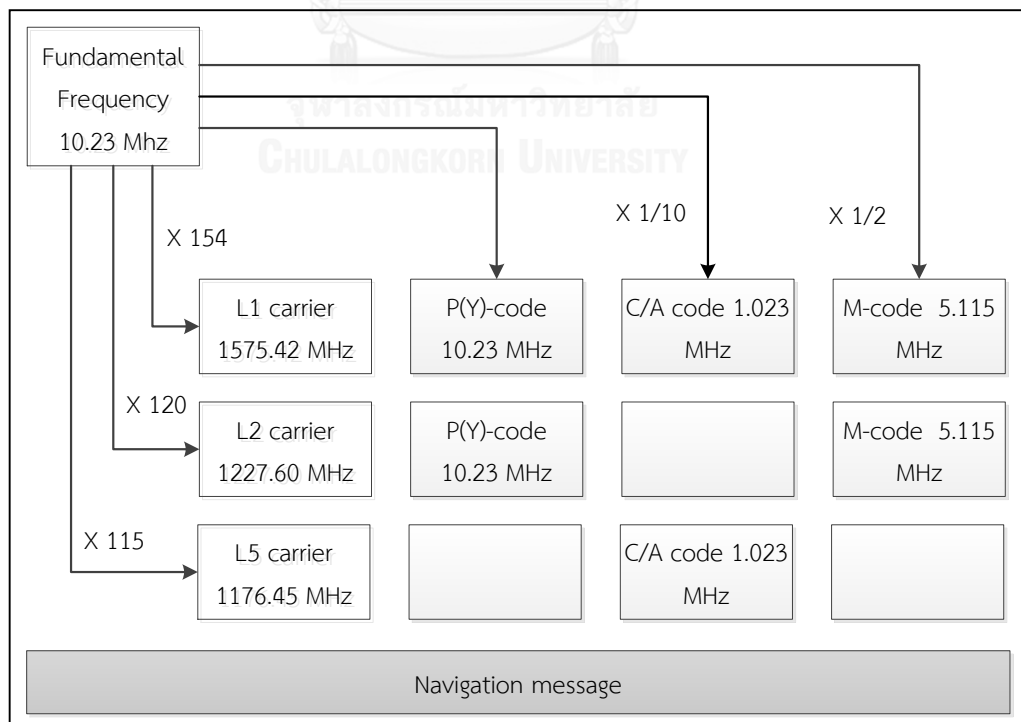
เริ่มแรกคลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS เป็นคลื่นวิทยุที่มี 2 ความถี่ที่แตกต่างกันคือ คลื่น L1 ที่มีความถี่ 1572.42 เมกะเฮิรตซ์ มีความยาวคลื่นประมาณ 19.03 เซนติเมตร และ คลื่น L2 ที่มีความถี่ 1227.60 เมกะเฮิรตซ์ มีความยาวคลื่นประมาณ 24.42 เซนติเมตร โดยคลื่นทั้ง 2 มีความถี่เป็น 154 เท่า และ 120 เท่าของความถี่พื้นฐาน (ความถี่พื้นฐาน 10.23 เมกะเฮิรตซ์) ตามลำดับ โดยทั่วไป คลื่นสัญญาณทั้ง 2 จะถูกกล้ำสัญญาณ (Modulation) ด้วยรหัสและข้อมูลการนำหนดาวเทียม (Navigation Message) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกลุ่มดาวเทียม, ค่าตัวประสาร, ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม และค่าแก้ต่างๆ ซึ่งรหัสที่ใช้ในการกล้ำสัญญาณประกอบด้วยรหัส C/A (Clear Access or Coarse Acquisition Code) มีความยาวของคลื่น 300 เมตร โดยมีความถี่ 1.023 เมกะเฮิรตซ์ และรหัส P (Precise Code) มีความยาวของคลื่น 30 เมตร พร้อมด้วยความถี่ 10.23 เมกะเฮิรตซ์เท่ากับความถี่พื้นฐาน โดยรหัส C/A จะเปิดให้พลเรือนได้ใช้อย่างเสรี ในขณะที่รหัส P สงวนไว้ใช้เฉพาะวงการทหาร และหน่วยงานของรัฐบาลสหรัฐอเมริกาเท่านั้น โดยสรุปแล้วคลื่น L1 จะถูกกล้ำสัญญาณด้วยรหัสทั้ง 2 ชนิด พร้อมด้วยข้อมูลการนำหนดาวเทียม ส่วนคลื่น L2 จะถูกกล้ำสัญญาณด้วยรหัส P เพียงรหัสเดียวเท่านั้น แต่ก็จะมีข้อมูลการนำหนดาวเทียมเช่นกัน

ปัจจุบันคลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS ก็ได้มีการพัฒนา และสร้างสัญญาณดาวเทียมขึ้นมาใหม่ ประกอบไปด้วย คลื่น L2C, L3 และคลื่น L1C โดยที่คลื่น L2C เป็นคลื่นสัญญาณ GPS สำหรับพลเรือนรุ่นที่ 2, ออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อตอบสนองความต้องการในเชิงพาณิชย์ โดยที่คลื่น L2C เป็นผลมาจากดาวเทียม รุ่น Block IIR-M ที่ได้ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในช่วงปี ค.ศ. 2005-2009 โดยได้มีการออกแบบ และปรับปรุงคลื่น L2 เดิม ที่มีความถี่ 1227.60 เมกะเฮิรตซ์ ให้มีการกล้ำสัญญาณด้วยรหัส C/A และรหัส M (Military Code) ซึ่งในคลื่น L1 ก็จะถูกการกล้ำสัญญาณด้วยรหัส M เหมือนกัน ซึ่งรหัส M เป็นรหัสใหม่ที่ใช้สำหรับทางการทหาร เมื่อผู้ใช้งานใช้เครื่องรับสัญญาณแบบ 2 ความถี่ ที่สามารถรับคลื่นสัญญาณได้ทั้ง L1 และ L2 ที่ถูกกล้ำสัญญาณด้วยรหัส C/A จะช่วยแก้ไขปัญหาของค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่เกิดจากชั้นบรรยากาศได้ และทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งดีขึ้นซึ่งเทียบเท่ากับค่าความต้องที่ทางการทหารสหรัฐอเมริกาที่ใชรหัส P (หรือดีกว่า) คลื่น L2C ช่วยเพิ่มการรับสัญญาณของเครื่องรับที่อยู่ใต้ต้นไม้และแม้กระทั่งในที่ร่ม ซึ่งคลื่น L2C จะมีในดาวเทียมทุกดวงนับจากดาวเทียมรุ่น Block IIR-M มาถึงปัจจุบัน

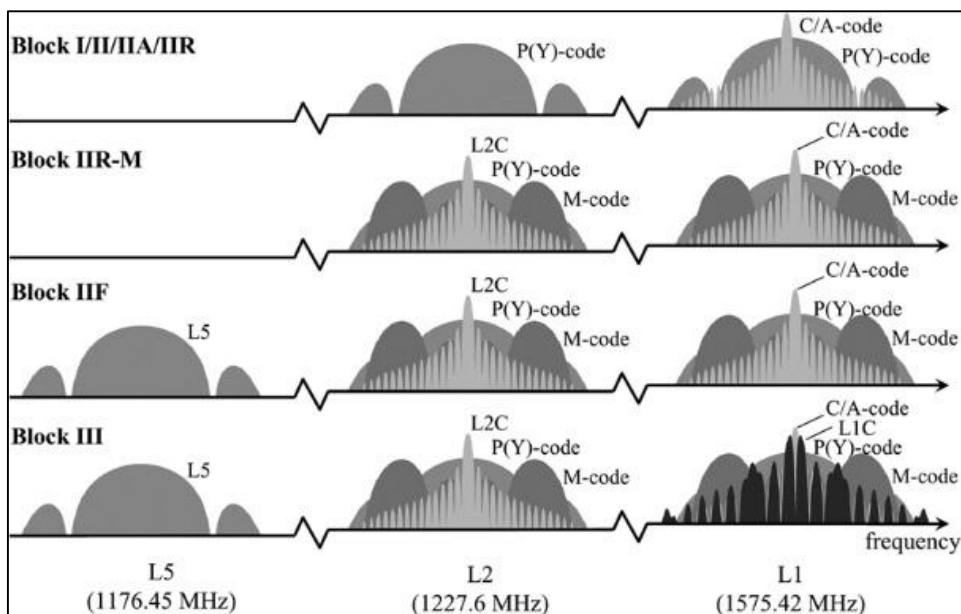
คลื่น L3 หรือ L5 เป็นคลื่นสัญญาณ GPS สำหรับพลเรือนรุ่นที่ 3, ออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการสำหรับการขนส่งเพื่อความปลอดภัยของชีวิตและการทำงานอื่นๆที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีความถี่ 1176.45 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งเท่ากับ 115 เท่าของความถี่พื้นฐาน และมีความยาวคลื่น 25.48 เซนติเมตร เครื่องบินในอนาคตจะใช้คลื่น L5 ร่วมกับ L1 C/A เพื่อปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง โดยสัญญาณ L5 จะมีในกลุ่มดาวเทียม Block IIF และดาวเทียมรุ่นใหม่ที่จะถูกสร้างจาก Block IIF

คลื่น LC1 เป็นหนึ่งใน 4 สัญญาณ GPS สำหรับพลเรือนที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันระหว่างระบบดาวเทียม GPS และระบบดาวเทียมนำหนอื่นๆได้ในอนาคต ซึ่งมีความถี่เท่ากับคลื่น L1 ผลประโยชน์ที่จะได้ก็คือสามารถปรับปรุงการรับสัญญาณ GPS ของมือถือในเมืองใหญ่และสภาพแวดล้อมที่เป็นอุปสรรคอื่นๆ โดยสหรัฐอเมริกาจะเปิดให้ใช้สัญญาณ L1C ครั้งแรกพร้อมดาวเทียม GPS รุ่น IIIA

พายหลังกลุ่มดาวเทียม GPS ได้ทำการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณทั้ง L1, L2 และคลื่นสัญญาณใหม่ที่ความถี่เดียว แต่มีรหัส C/A-Code และ P-Code ที่แตกต่างกันออกไปในดาวเทียมแต่ละดวง เครื่องรับสัญญาณจะทำการคัดแยกคลื่นสัญญาณทั้งหมดที่เข้ามาด้วยการตรวจหารหัสที่ได้รับกับรหัสในเครื่องรับเพื่อทำการแยกข้อมูลของดาวเทียมแต่ละดวง โดยขั้นตอนของการคัดแยกเรียกว่า CDMA (Code Division Multiple Access)



รูปที่ 2.6 คลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS และรหัส



รูปที่ 2.7 วิวัฒนาการของคลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS

ที่มา: (<http://ieeexplore.ieee.org/ieeepilot/articles/96jproc12/jproc-CHegarty-2006090/article.html>)

ตารางที่ 2.3 คลื่นสัญญาณดาวเทียม GPS ในปัจจุบัน

รายละเอียด	GPS
ความถี่ของคลื่นสัญญาณ	L1 = 1575.42 MHz L2 = 1227.60 MHz L5 = 1176.45 MHz
รหัส	แต่ละดวงจะส่งรหัสออกมาแตกต่างกัน L1 : P(Y)-Code, C/A-Code, M-Code L2 : P(Y)-Code, C/A Code, M-Code L5 : C/A Code
ความถี่ของรหัส	P(Y)-Code : 10.23 MHz C/A-Code : 1.023 MHz M-Code : 5.115 MHz
ความยาวคลื่น	L1 = 19.03 cm L2 = 24.42 cm L5 = 25.48 cm C/A = 300 m

รายละเอียด	GPS
	P(Y) = 30 m M-Code = 60 m

2.2.1.2 ส่วนควบคุม (Control Segment)

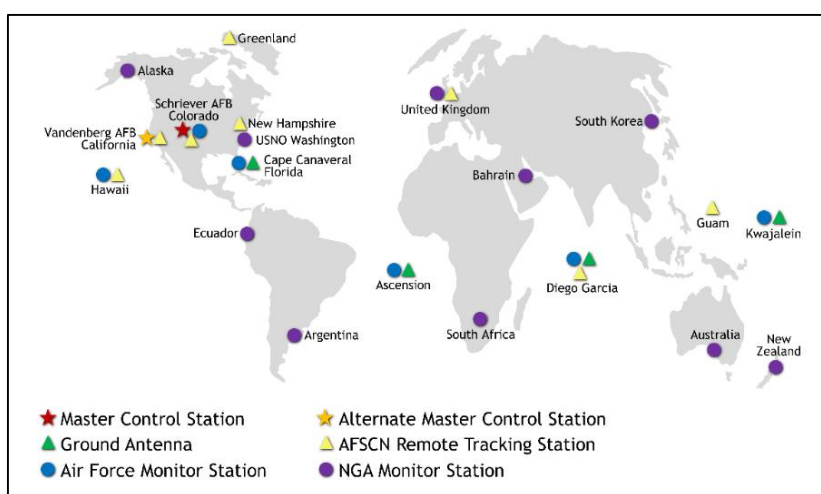
ส่วนควบคุมของระบบดาวเทียม GPS ประกอบด้วยระบบเครือข่ายภาคพื้นดินทั่วโลกที่อำนวยความสะดวกในการติดตามกลุ่มดาวเทียม GPS, ตรวจสอบการส่งสัญญาณ, ทำการวิเคราะห์ข้อมูล, และส่งคำสั่งและข้อมูลที่คำนวณได้ไปยังกลุ่มดาวเทียม ส่วนควบคุมของดาวเทียม GPS ในปัจจุบันประกอบด้วย หนึ่งสถานีควบคุมหลัก (Master Control Station), สถานีควบคุมหลักสำรองอีกหนึ่งสถานี (Alternate Master Control Station), 12 สถานีควบคุมการส่งสัญญาณ (Command and Control Antennas), และ 16 สถานีติดตาม (Monitoring station) โดยที่ตั้งของสถานีเหล่านี้ได้แสดงดังรูปที่ 2.8

สถานีควบคุมหลัก (Master Control Station) อยู่ที่เมือง Colorado ซึ่งเป็นที่ปฏิบัติงานของหน่วยงาน 2SOPS (2nd Space Operations Squadron) ในการดำเนินงานควบคุมส่วนหลัก, ในการให้คำสั่งและควบคุมกลุ่มดาวเทียม GPS สถานีควบคุมหลักทำหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูลและส่งข้อมูลนำหน (Navigation messages) เพื่อให้แน่ใจว่าดาวเทียมมีสภาพพร้อมในการใช้งานและมีค่าตำแหน่งของดาวเทียมที่ถูกต้อง โดยจะได้รับข้อมูลนำหนจากสถานีติดตาม (Monitoring Station) แล้วทำการคำนวณวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาตำแหน่งที่ถูกต้องแม่นยำของกลุ่มดาวเทียม GPS แต่ละดวงในอวกาศ หลังจากนั้นก็จะส่งข้อมูลที่คำนวณได้ไปยังดาวเทียมแต่ละดวง สถานีควบคุมหลักจะทำการตรวจสอบข้อมูลนำหนและความสมบูรณ์ของระบบ, เพื่อตรวจสอบและประเมินสถานะความพร้อมของกลุ่มดาวเทียม GPS หน่วยงาน 2SOPS จะใช้สถานีหลักในการบำรุงรักษาและแก้ไขความผิดปกติของดาวเทียม ในกรณีที่มีความล้มเหลวในการดำเนินงานของดาวเทียม สถานีควบคุมหลักจะสามารถเปลี่ยนตำแหน่งของดาวเทียมดวงนั้นออกจากวงโคจรเพื่อที่จะทำการบำรุงรักษาให้มีความพร้อมในการใช้งานเหมือนเดิม

สถานีติดตาม (Monitor Station) มีหน้าที่ติดตามกลุ่มดาวเทียม GPS เมื่อดาวเทียมโคจรผ่านสถานีและส่งข้อมูลของดาวเทียมไปยังสถานีควบคุมหลัก สถานีติดตามจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลชั้นบรรยากาศ, การรังวัด ระยะ, คลื่น และสัญญาณการนำหนของดาวเทียม มีสถานีตรวจสอบทั้งหมด 16 สถานีที่ตั้งอยู่ทั่วโลก, ประกอบด้วย 6 สถานีจากกองทัพอากาศและอีก 10 สถานีจากหน่วยงานสำนักข่าวกรอง-เชิงพื้นที่แห่งชาติ (NGA: National Geospatial-Intelligence Agency) ของสหรัฐอเมริกา

สถานีส่งสัญญาณภาคพื้นดิน (Ground Antennas) มีหน้าที่ในการสื่อสารกับกลุ่มดาวเทียม GPS โดยมีวัตถุประสงค์ในการส่งคำสั่งและการควบคุมจากสถานีควบคุมหลักไปยังกลุ่มดาวเทียม ประกอบด้วย 12 สถานี ซึ่งมี 4 สถานีที่ตั้งอยู่ที่เดียวกันกับสถานีติดตามได้แก่ Kwajalein Atoll, Ascension Island, Diego Garcia และ Cape Canaveral

โดยรวมแล้วหน้าที่หลักของส่วนควบคุมคือคำนวณค่าพิกัดดาวเทียมและค่าแก้ทางดาวเทียม โดยค่าพิกัดดาวเทียมจะเป็นค่าพิกัดฉากแบบคาร์ทีเซียนอยู่บนพื้นหลักฐานอ้างอิง World Geodetic System (WGS84) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006)



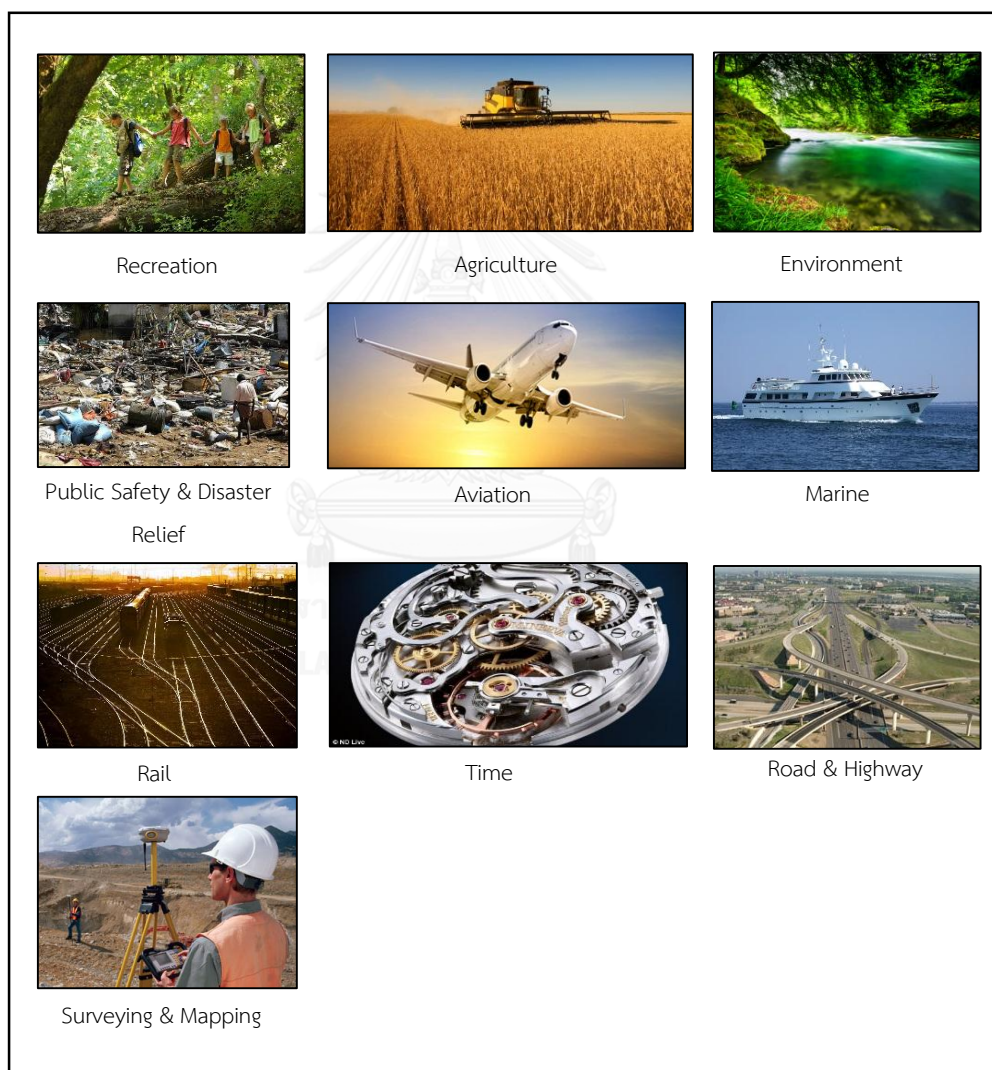
รูปที่ 2.8 ส่วนควบคุมของระบบดาวเทียม GPS

ที่มา: (<http://www.gps.gov/systems/gps/control/>)

2.2.1.3 ส่วนผู้ใช้งาน (User Segment)

ส่วนของผู้ใช้งานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่คือ ส่วนที่ทหารใช้ และส่วนที่พลเรือนใช้ โดยเริ่มแรกการพัฒนาของระบบดาวเทียม GPS ขึ้นมานั้นมีจุดประสงค์ใช้งานด้านทหารเป็นหลัก แต่พอมาได้ระยะหนึ่งก็มีการอนุญาตให้พลเรือนได้ใช้ แต่เนื่องจากค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการบริการทางตำแหน่งแบบมาตรฐานที่พลเรือนใช้นั้นดีกว่าที่คาดไว้มาก (อยู่ในระดับประมาณ 15-40 เมตร) ทำให้รัฐบาลประเทศสหรัฐอเมริกาจึงได้ประกาศให้มีการใช้นโยบายเลือกปฏิบัติ (SA: Policy of Selective Availability) ขึ้นเมื่อวันที่ 25 มีนาคม ค.ศ. 1990 ซึ่งมีจุดประสงค์ที่จะเพิ่มช่องว่างระหว่างค่าความถูกต้องที่พลเรือนใช้ และทางทหารใช้ ผลจากการประกาศใช้นโยบายเลือกปฏิบัติทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่พลเรือนใช้อยู่ที่ประมาณ 100 เมตร (ตำแหน่งทางราบ) และ 156 เมตร (ตำแหน่งทางตั้ง) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ภายใต้อาณัติของสหรัฐอเมริกาได้ยกเลิกการใช้นโยบายเลือกปฏิบัติเมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม ค.ศ. 2000 ค่าความถูกต้อง

ต้องทางตำแหน่ง ณ ปัจจุบันที่พลเรือนใช้โดยการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวอยู่ที่ประมาณ 3.351 เมตร (ตำแหน่งทางราบ) และ 4.684 เมตร (ตำแหน่งทางตั้ง) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ (Hughes .2014) ทำให้การใช้งานการนำหน และระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GPS สำหรับพลเรือนได้มีการพัฒนาและนำไปใช้ในงานด้านต่างๆอย่างมากมายโดยกลายมาเป็นส่วนหนึ่งของการดำรงชีวิตของมนุษย์เช่น การทำการเกษตร, การเดินเรือ, การท่องเที่ยว, ความปลอดภัยและการป้องกันภัยพิบัติ, การบิน, ถนนและทางหลวง, ทางรถไฟ, เวลา, การสำรวจและทำแผนที่ เป็นต้น จากรูปที่ 2.9 ประกอบ



รูปที่ 2.9 การประยุกต์ใช้ GPS เข้าในงานด้านต่าง ๆ

2.2.2 ระบบดาวเทียม GLONASS (GLONASS: GLObal Navigation Satellite System, Russia)

ระบบดาวเทียม GLONASS จะถูกแบ่งออกเป็นหลาย Block ซึ่งแต่ละ Block จะประกอบด้วยกลุ่มดาวเทียมที่ถูกส่งเข้าวงโคจรในช่วงเวลาที่กำหนด ด้านล่างคือคำอธิบายของแต่ละ Block

กลุ่มดาวเทียมรุ่นต้นแบบ (Prototypes) ดาวเทียมต้นแบบดวงแรกของระบบดาวเทียม GLONASS ได้ถูกส่งเข้าวงโคจรในเดือน ตุลาคม ค.ศ. 1982, มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 18 ดวงที่ถูกส่งขึ้นไปในระหว่างปี ค.ศ. 1982-1985 ดาวเทียมกลุ่มแรกของ GLONASS จะเรียกว่า Block I และแม้ว่าจะถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานเพียง 1 ปี แต่ว่าดาวเทียมหลายดวงก็มีอายุการใช้งานจริงไปถึง 14 เดือน

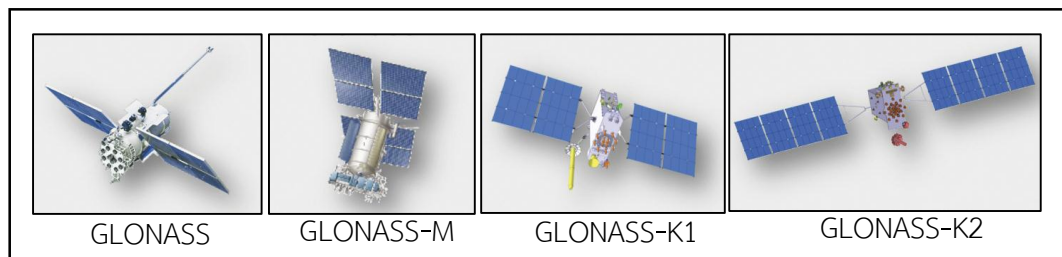
กลุ่มดาวเทียมรุ่นแรก (First Generation), GLONASS เป็นดาวเทียมกลุ่มแรกที่ถูกใช้งานจริงได้ถูกส่งขึ้นไปสู่อวกาศในระหว่างปี ค.ศ. 1985-1990 กลุ่มดาวเทียมได้ถูกแบ่งออกเป็น Block ที่แตกต่างกัน (Block IIa, IIb, และ IIv) โดยได้ออกแบบอายุการใช้งานของแต่ละ Block แตกต่างกันไป ช่วงเวลาของการใช้งานของดาวเทียม Block IIa 1ปี, Block IIb 2ปี และ Block IIv 3ปี, แต่ก็มีดาวเทียมหลายดวงที่มีอายุการใช้งานที่เกินกว่าการออกแบบ (ถึง 4.5 ปี) กลุ่มดาวเทียมรุ่นแรกได้มีการปรับปรุงเวลาและมาตรฐานสัญญาณดีกว่ากลุ่มดาวเทียมที่เป็นต้นแบบ

กลุ่มดาวเทียมรุ่นที่ 2 (Second Generation), GLONASS-M เป็นระบบดาวเทียม GLONASS รุ่นที่สอง โดยเริ่มพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 และดาวเทียมดวงแรกก็ได้ถูกส่งขึ้นไปในปี ค.ศ. 2003 ดาวเทียม GLONASS-M เป็นกลุ่มดาวเทียมที่มีอายุการใช้งานนานถึง 7 ปี

กลุ่มดาวเทียมรุ่นที่ 3 (Third Generation), GLONASS-K มีอายุการใช้งาน 10 ปี

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของดาวเทียม GLONASS แต่ละรุ่น

	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K
Status	Out of Service	In Service	In Service
First launch	1982	2003	2011
Lifetime (years)	3	7	10



รูปที่ 2.10 วิวัฒนาการของดาวเทียม GLONASS

2.2.2.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment)

องค์ประกอบในส่วนอวกาศของระบบดาวเทียม GLONASS มีอยู่ 3 ส่วนหลักๆคือ วงโคจรดาวเทียม, นาฬิกาดาวเทียม และสัญญาณดาวเทียม

วงโคจรดาวเทียม (Orbital Satellites)

ระบบดาวเทียม GLONASS มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 28 ดวงในวงโคจร (ดวงที่พร้อมใช้งาน 24 ดวง, ดวงที่กำลังอยู่ในช่วงของการทดสอบ 2 ดวง และดวงที่อยู่ในช่วงของการทดลองโคจรอีก 2 ดวง (ข้อมูล ณ วันที่ 1 เมษายน ค.ศ. 2015) โดยกระจายตัวกันอยู่ใน 3 ระนาบวงโคจร โดยที่ทุกระนาบจะทำมุมกับระนาบศูนย์สูตรประมาณ 64.8 องศาและแต่ละระนาบจะทำมุมระหว่างกันประมาณ 120 องศา มีดาวเทียมจำนวน 8 ดวงต่อระนาบโคจร กลุ่มดาวเทียม GLONASS มีวงโคจรเป็นวงกลมที่มีระดับความสูงจากพื้นผิวโลกประมาณ 19,100 กิโลเมตรและมีคาบของการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 15 นาที ซึ่งหมายความว่าผู้ใช้งานที่อยู่ที่เดิมจะมองเห็นดาวเทียมดวงเดิมในท้องฟ้าทุกๆ 8 วัน



รูปที่ 2.11 ส่วนอวกาศของดาวเทียม GLONASS

ที่มา: (<http://www.navipedia.net/images/8/89/GlonassConstellation.JPG>)

ตารางที่ 2.5 วงโคจรดาวเทียม GLONASS ในปัจจุบัน

ที่มา: (<https://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>)

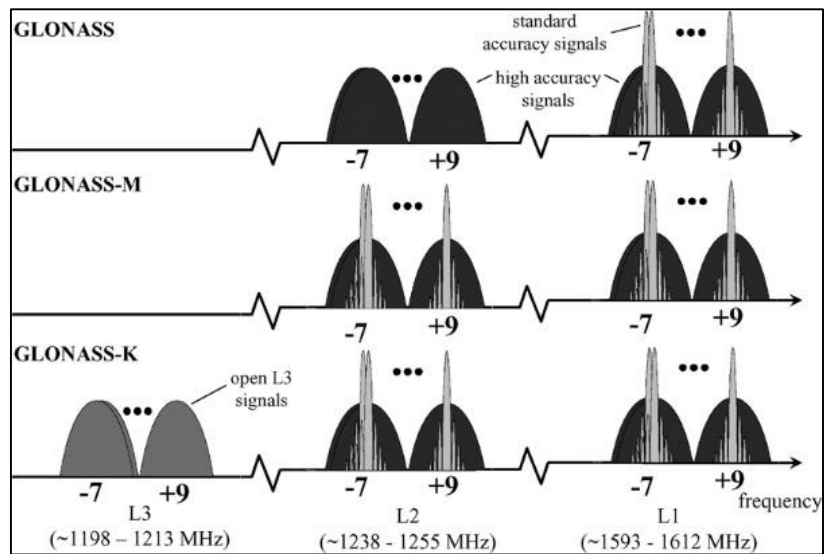
รายละเอียด	โกรนาส (GLONASS)
จำนวนดาวเทียม (ดวง)	28
จำนวนระนาบของวงโคจรดาวเทียม	3
ระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร (องศา)	64.8
มุมระหว่างระนาบ (องศา)	120
วงโคจรเหนือพื้นผิวโลก (กิโลเมตร)	19,100
เวลาที่ใช้ในการโคจร	11 ชั่วโมง 15 นาที

นาฬิกาดาวเทียม (Clock Satellites)

ในดาวเทียมแต่ละดวงที่อยู่ในระบบดาวเทียม GLONASS จะมีนาฬิกาที่เรียกว่านาฬิกาอะตอมมิต ถูกสร้างโดย The GLONASS Central Synchronizer ที่มีความแม่นยำสูงมีความละเอียดถึงนาโนวินาที (Nanoseconds) และใช้เวลา GLONASS UTC (SU) ในการอ้างอิงเวลาของระบบดาวเทียม GLONASS

คลื่นสัญญาณดาวเทียม (Signal Satellites)

โดยพื้นฐานคลื่นสัญญาณระบบดาวเทียม GLONASS มีโครงสร้างคลื่นสัญญาณวิทยุที่ใกล้เคียงกับระบบดาวเทียม GPS โดยมีการกระจายสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุที่มี 2 ความถี่ คือ L1 และ L2 โดยคลื่นทั้ง 2 ที่ปล่อยออกมาจากดาวเทียมแต่ละดวงจะมีความถี่ที่แตกต่างกัน แต่ก็จะถูกปล่อยสัญญาณด้วยรหัส C/A-Code และ P-Code และข้อมูลนำหนดาวเทียมของแต่ละดวง โดยที่ความถี่ L1 จะถูกปล่อยสัญญาณด้วยรหัส C/A-Code และ P-Code ในขณะที่ความถี่ L2 จะถูกปล่อยสัญญาณด้วยรหัส P-Code โดยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจะทำการคัดแยกคลื่นสัญญาณวิทยุที่เข้ามาด้วยวิธีที่เรียกว่า FDMA (Frequency Division Multiple Access) แต่พอมาถึงปัจจุบันดาวเทียมรุ่นใหม่ที่ถูกส่งขึ้นไปได้มีการพัฒนาตลอดทำให้คลื่น L2 สามารถปล่อยสัญญาณได้ทั้งรหัส C/A-Code และ P-Code ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาดาวเทียม GLONASS-M ที่ถูกปล่อยขึ้นสู่อวกาศ ในวันที่ ค.ศ. 2003 แต่ในอนาคตจะมีการออกแบบและพัฒนาไปเรื่อยๆ โดยล่าสุดได้มีการพัฒนาดาวเทียม GLONASS-K ที่จะมีการเพิ่มคลื่นสัญญาณใหม่เรียกว่า L3 ที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบ FDMA และ CDMA (Code Division Multiple Access) เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับระบบดาวเทียมระบบอื่น



รูปที่ 2.12 วิวัฒนาการของคลื่นสัญญาณดาวเทียม GLONASS

ที่มา: (http://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/96jproc12/jproc-CHegarty-2006090/article.html)

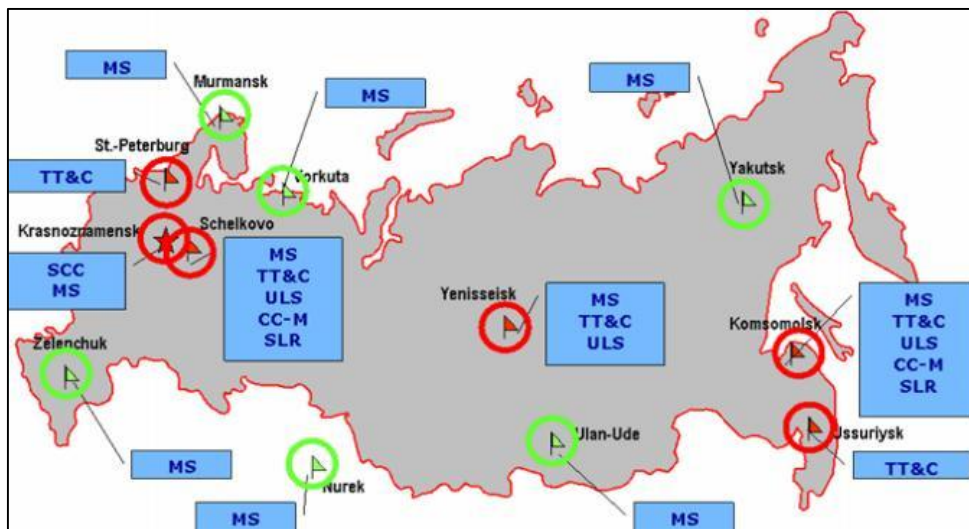
ตารางที่ 2.6 คลื่นสัญญาณดาวเทียม GLONASS ในปัจจุบัน

รายละเอียด	GLONASS (GLONASS)
ความถี่ของคลื่นสัญญาณ	$L1 = (1,602 + n \times 9/16) \text{ MHz}$ $L2 = (1,246 + n \times 7/16) \text{ MHz}$ $L5 = (1,204.704 + n \times 0.4230) \text{ MHz}$ $n = \text{จำนวนช่องสัญญาณ } (n=1,2,3,\dots,24)$
รหัส	เหมือนกันทุกดวง $L1$: P-Code, C/A-Code $L2$: P-Code, C/A Code $L3$: P-Code, C/A-Code
ความถี่ของรหัส	$P(Y)\text{-Code} : 5.11 \text{ MHz}$ $C/A\text{-Code} : 0.511 \text{ MHz}$
ความยาวคลื่น	$C/A = 600 \text{ m}$ $P = 60 \text{ m}$

2.2.2.2 ส่วนควบคุม (Control Segment)

ส่วนควบคุมของระบบดาวเทียม GLONASS จะประกอบไปด้วยกลุ่มสถานีภาคพื้นดินที่มีหน้าที่ในการคำนวณวงโคจรดาวเทียมและค่าแก้ทางผิดพลาดดาวเทียม โดยจะใช้ค่าพิกัดฉากแบบคาร์ที

เขียนบนพื้นหลักฐานอ้างอิง Parametri Zemli 1990 (PZ90) แต่มาถึงปัจจุบันก็ได้มีการเปลี่ยนมาใช้ PZ90.02 แทน สถานีภาคพื้นดินรวมมี 1 สถานีควบคุมกลางอยู่ที่เมือง Krasnoznamensk, 5 สถานีเครือข่ายที่คอยรับสัญญาณ, ติดตามและส่งคำสั่งไปยังดาวเทียม, สถานีนาฬิกากลางอยู่ที่เมือง Schelkovo (ใกล้กับเมือง Moscow), 3 สถานีรับส่งข้อมูล, 4 สถานีเครือข่ายที่คอยตรวจสอบและรับวัดข้อมูลดาวเทียม และ 6 สถานีใหม่ที่ใช้ตรวจสอบและรับวัดข้อมูลดาวเทียมที่จะเพิ่มขึ้นมาในอนาคตอันใกล้ รูป 2.13 ประกอบ



รูปที่ 2.13 ส่วนควบคุมภาคพื้นดินของระบบดาวเทียม GLONASS

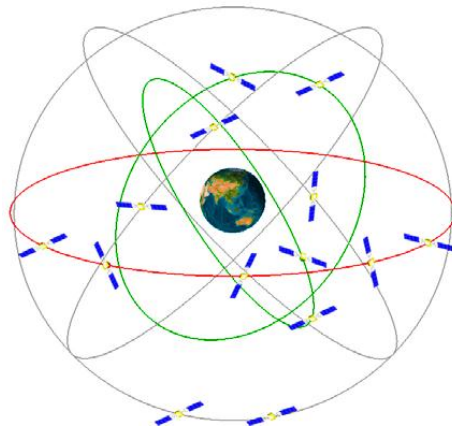
ที่มา: (http://www.navipedia.net/images/0/04/GLONASS_GroundSegment.JPG)

2.2.2.3 ส่วนของผู้ใช้งาน (User Segment)

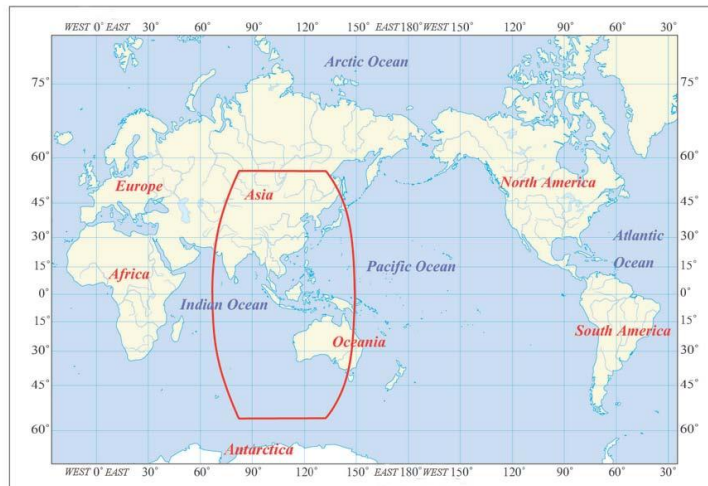
ระบบดาวเทียม GLONASS ก็เป็นระบบดาวเทียมอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกผู้ใช้งานเลือกใช้มากที่สุด โดยรองมาจากระบบดาวเทียม GPS ซึ่งจะแบ่งการให้บริการออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มที่ทหารใช้ และกลุ่มที่ใช้ในภาคพลเรือน เนื่องด้วยการให้บริการของระบบที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก จึงทำให้การใช้งานระบบดาวเทียม GLONASS ได้ถูกนำไปใช้ในหลายๆประเทศทั่วโลก ซึ่งจะใช้เคียงคู่กันไปกับระบบดาวเทียม GPS ในปัจจุบันเราจะสังเกตได้ว่า ในโทรศัพท์มือถือรุ่นใหม่ (Smart Phone), ระบบติดตามยานพาหนะ, เครื่องนำหนที่ใช้ในการเดินทาง, เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจรังวัดและทำแผนที่ด้วยระบบดาวเทียม ก็ได้มีการเพิ่มระบบดาวเทียม GLONASS เข้ามาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบดาวเทียม GPS ทำให้ค่าทางตำแหน่งที่ได้มีความถูกต้องที่ดีขึ้น โดยสรุปแล้วกลุ่มของผู้ใช้งานระบบดาวเทียม ส่วนมากจะเป็นกลุ่มของพลเรือน โดยมีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวประมาณ 4-7 เมตร (ตำแหน่งทางราบ) และ 10-15 เมตร (ตำแหน่งทางตั้ง)

2.2.3 ระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou (COMPASS/BeiDou, China)

แนวความคิดเริ่มต้นของการสร้างระบบดาวเทียม COMPASS มาจาก Chen Fangyun และเพื่อนร่วมงานในยุคของปี ค.ศ. 1980 ตามแนวทางนโยบายของการบริหารและการพัฒนาของประเทศ ระบบดาวเทียม COMPASS ได้ถูกแบ่งช่วงของการพัฒนาออกเป็น 3 ช่วงคือ ระหว่างปี ค.ศ. 2000-2003 เป็นช่วงของการทดลองระบบซึ่งประกอบมีดาวเทียมทั้งหมด 4 ดวง, ปี ค.ศ. 2012 ระบบดาวเทียม COMPASS สามารถให้บริการได้ครอบคลุมประเทศจีนและพื้นที่ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และอนาคต ปี ค.ศ. 2020 จะสามารถให้บริการได้สมบูรณ์และเต็มระบบครอบคลุมทุกพื้นที่ทั่วโลก ดาวเทียมดวงแรกมีชื่อว่า BeiDou-1A ได้ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในวันที่ 30 ตุลาคม ค.ศ. 2000 แล้วก็ตามด้วยดาวเทียม BeiDou-1B ในวันที่ 20 ธันวาคม ค.ศ. 2000 ดาวเทียมดวงที่ 3 BeiDou-1C (ดาวเทียมสำรอง) ได้ถูกส่งเข้าวงโคจรในวันที่ 25 พฤษภาคม ค.ศ. 2003 ซึ่งความสำเร็จในการส่งดาวเทียม BeiDou-1C ได้บ่งบอกถึงความสำเร็จในการพัฒนาระบบดาวเทียม COMPASS ในช่วงแรก ในวันที่ 2 พฤศจิกายน ค.ศ. 2006, ประเทศจีนได้ประกาศว่าหลังจากปี ค.ศ. 2008 ระบบดาวเทียม COMPASS จะสามารถให้บริการด้านตำแหน่งที่มีความถูกต้องระดับ 10 เมตร, เวลาที่เที่ยงตรงถึง 0.2 ไมโครวินาทีและความเร็ว 0.2 เมตร/วินาที ในเดือน กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2007 ดาวเทียมดวงที่ 4 (BeiDou-1D) ได้ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศโดยทำหน้าที่เป็นดาวเทียมสำรอง ในเดือน เมษายน ค.ศ. 2007 ดาวเทียมดวงแรก Compass-M1 ของช่วงการพัฒนาระยะ 2 ได้ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศได้สำเร็จ ดาวเทียมดวงที่ 2 Compass-G2 ได้ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในวันที่ 15 เมษายน ค.ศ. 2009 วันที่ 15 มกราคม ค.ศ. 2010 เว็บไซต์อย่างเป็นทางการของระบบดาวเทียม COMPASS ได้เปิดให้บริการออนไลน์ ดาวเทียมดวงแรก (Compass-G1) ของช่วงที่ 3 ได้ถูกส่งเข้าสู่วงโคจรในวันที่ 7 มกราคม ค.ศ. 2010 และในวันที่ 2 มิถุนายน ค.ศ. 2010 ดาวเทียมดวงที่ 4 ก็ได้ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศได้สำเร็จ ต่อมาดาวเทียมดวงที่ 5 ก็ได้ถูกส่งขึ้นไปในวันที่ 1 สิงหาคม ค.ศ. 2010 หลังจากผ่านไป 3 เดือน, ในวันที่ 1 พฤศจิกายน ค.ศ. 2010 ดาวเทียมดวงที่ 6 ก็ได้ถูกส่งขึ้นไปสู่อวกาศ ส่วนดาวเทียมดวงอื่น ๆ, BeiDou-2/Compass IGSO-5 (ดาวเทียม IGSO จำนวน 5 ดวง) ได้เริ่มมีการปล่อยขึ้นสู่อวกาศในวันที่ 1 ธันวาคม ค.ศ. 2011

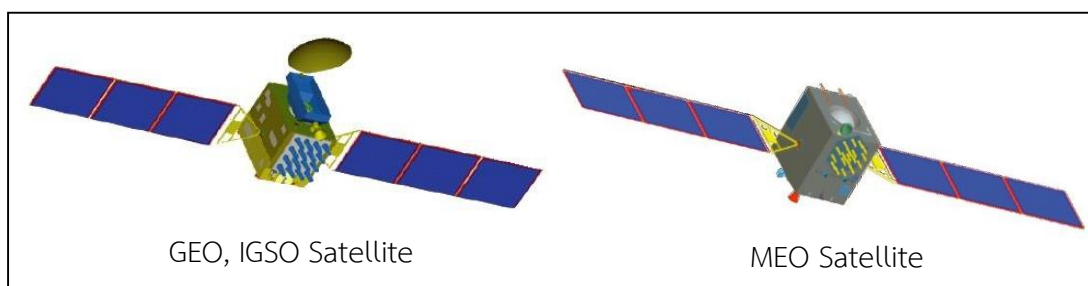


รูปที่ 2.14 กลุ่มดาวเทียม COMPASS/BeiDou-2 ที่ให้บริการครอบคลุมภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก
ที่มา: (<http://www.spaceflightnow.com/news/n1006/02longmarch/>)



รูปที่ 2.15 พื้นที่ให้บริการของระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou-2 ครอบคลุมภูมิภาคเอเชีย
แปซิฟิก

ที่มา: (<http://gpsworld.com/who-carries-the-gold-standard-now/>)



รูปที่ 2.16 รูปดาวเทียม COMPASS

ที่มา: (<http://www.astronautix.com/craft/beidou.htm>)

2.2.3.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment)

องค์ประกอบในส่วนอวกาศของระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou มีอยู่ 3 ส่วนหลักๆคือ วงโคจรดาวเทียม, นาฬิกาดาวเทียม และสัญญาณดาวเทียม

วงโคจรดาวเทียม (Orbital Satellites)

เมื่อระบบดาวเทียม COMPASS สามารถทำงานได้เต็มระบบจะประกอบมีดาวเทียมทั้งหมด 35 ดวง ซึ่งจะมีดาวเทียม GEO (Geostationary orbit) 5 ดวง ที่จะโคจรอยู่ที่ระดับความสูง 35,786 กิโลเมตร โดยจะใช้เวลาในการโคจร 24 ชั่วโมง ก็หมายความว่าเราจะสามารถเห็นดาวเทียม GEO ทั้ง 5 ดวง ณ จุดที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GEO ได้ตลอดเวลา ซึ่งที่ที่จะรับสัญญาณดาวเทียม GEO ได้ตลอดเวลาก็คือภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก โดยดาวเทียมกลุ่มนี้ได้ถูกเรียกอีกอย่างว่าเป็นดาวเทียมค้างฟ้า จะทำให้กลุ่มประเทศที่อยู่ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกได้เปรียบกว่าประเทศอื่น ๆ ในโลก ระนาบของวงโคจรจะอยู่ในระนาบเดียวกับเส้นศูนย์สูตร ซึ่งดาวเทียมแต่ละดวงก็จะทำมุมต่างกันไปคือ 58.75°E , 80°E , 110.5°E , 140°E และ 160°E ตามลำดับ ดาวเทียม IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit) 3 ดวง ซึ่งมีระนาบในการโคจร 3 ระนาบ ก็หมายความว่าแต่ละระนาบจะมีดาวเทียม 1 ดวง โดยดาวเทียมทั้ง 3 ดวงจะโคจรในระดับความสูง 35,786 กิโลเมตรเท่ากับดาวเทียม GEO ระนาบวงโคจรจะทำมุมเอียงกับระนาบเส้นศูนย์สูตรเป็นมุม 55° และแต่ละระนาบจะทำมุมต่อกันเป็นมุม 120° คือ 98°E , 218°E และ 338°E ตามลำดับ. ดาวเทียม MEO (Medium Earth Orbit) 24 ดวง พร้อมดาวเทียมสำรองอีก 3 ดวง จะโคจรอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 21,528 กิโลเมตร และทำมุมเอียงกับระนาบเส้นศูนย์สูตรเป็นมุม 55° มีระนาบในการโคจร 3 ระนาบโดยแต่ละระนาบจะมีดาวเทียม 8 ดวง ใช้เวลาในการโคจรรอบโลกประมาณ 12 ชั่วโมง 53 นาที

ตารางที่ 2.7 วงโคจรดาวเทียม COMPASS ในปัจจุบัน

รายละเอียด	COMPASS (COMPASS)
จำนวนดาวเทียม (ดวง)	35
จำนวนระนาบของวงโคจรดาวเทียม	3 (MEO)
	3 (GEO)
	1 (IGSO)
ระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร (องศา)	55 (IGSO,MEO)
	0 (GEO)
วงโคจรเหนือพื้นผิวโลก (กิโลเมตร)	27,528 (MEO)
	35,786 (GEO,IGSO)

รายละเอียด	COMPASS (COMPASS)
เวลาที่ใช้ในการโคจร	12 ชั่วโมง 53 นาที (MEO)
	24 ชั่วโมง (GEO)

นาฬิกาดาวเทียม (Clock Satellites)

การกำหนดเวลาบนระบบดาวเทียม COMPASS (BDST) จะใช้นาฬิกาอะตอมมิก ที่มีความละเอียดเที่ยงตรงที่สุดในโลก โดยมีความถูกต้องในระดับ นาโนวินาที (Nanoseconds) โดยเวลาเริ่มแรกของระบบเวลา 0h UTC เริ่มในวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2006

คลื่นสัญญาณดาวเทียม (Signal Satellites)

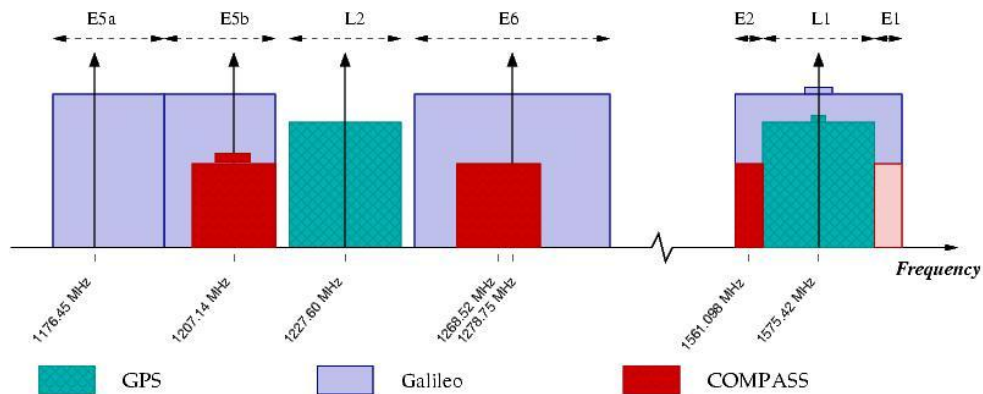
ย่านสัญญาณคลื่นความถี่ของระบบดาวเทียมนำหน COMPASS/BeiDou, ที่ได้ระบุไว้ในปี ค.ศ. 2010 โดยฝ่ายบริหารระบบดาวเทียม GNSS แห่งชาติจีน และ การประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ, ประกอบด้วย:

B1 : 1,559.052 – 1,591.788 MHz, B1 : 19.20 cm

B2 : 1,166.22 – 1,217.37 MHz, B2 : 24.83 cm

B3 : 1,250.618 – 1,286.423 MHz, B3 : 23.63 cm

ย่านความถี่ของระบบดาวเทียม COMPASS ที่ได้ระบุเป็น B1, B2, และ B3 ในข้างบนจะถูกจัดเข้าใน 4 ย่านความถี่คือ E1, E2, E5B, และ E6 และจะทับซ้อนกับสัญญาณของดาวเทียม GALILEO (Galileo) (ดูรูปที่ 2.17 ประกอบ) ในความเป็นจริงการทับซ้อนกันของสัญญาณอาจจะทำให้มีผลต่อการออกแบบเครื่องรับสัญญาณ, แต่ในทางกลับกันจะมีปัญหาในการรบกวนของสัญญาณจากระบบดาวเทียมระบบอื่น, โดยเฉพาะอย่างยิ่งย่านความถี่ E1 และ E2, ซึ่งย่านความถี่ทั้ง 2 จะอยู่ในการให้บริการสำหรับพลเรือนของระบบดาวเทียม GALILEO แต่อย่างไรก็ตาม, ภายใต้นโยบายของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) ประเทศแรกที่เริ่มต้นส่งสัญญาณในคลื่นความถี่ที่ระบุไว้ข้างต้นจะได้รับสิทธิในการนำใช้ก่อนในคลื่นความถี่นั้น และผู้ใช้งานต่อมาที่ใช้ความถี่เดียวกันก็จะต้องได้รับอนุญาตก่อนที่จะใช้ความถี่นั้นและต้องให้แน่ใจว่าการให้บริการของระบบไม่รบกวนต่อคลื่นสัญญาณของประเทศแรกที่ใช้ ตอนนี้ปรากฏว่าดาวเทียม COMPASS ของประเทศจีนจะเป็นประเทศแรกที่เริ่มต้นใช้คลื่นความถี่ย่าน E1, E2, E5B และ E6 ก่อนระบบดาวเทียม GALILEO ของยุโรปและทำให้มีสิทธิหลักในช่วงความถี่เหล่านี้



รูปที่ 2.17 คลื่นความถี่ของระบบดาวเทียม COMPASS เทียบกับระบบดาวเทียมอื่น
ที่มา:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Gps_compass_galileo_frequency_allocation_Asimsky_05_2008.jpg

2.2.3.2 ส่วนควบคุม (Control Segment)

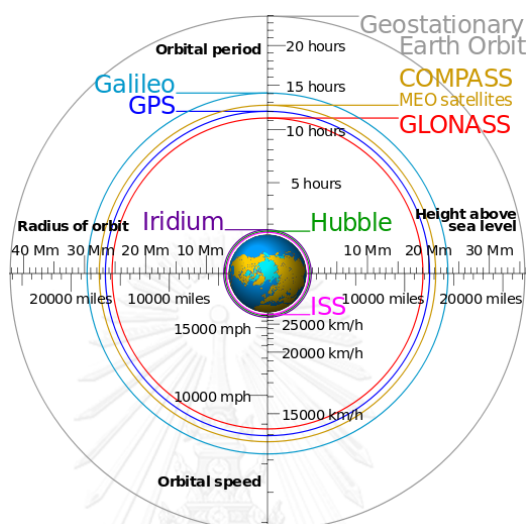
ส่วนควบคุมภาคพื้นดินของระบบดาวเทียม COMPASS ประกอบด้วย สถานีควบคุมหลักหนึ่งสถานี (Master Control Station) โดยทำหน้าที่ในการควบคุมและประมวลผลข้อมูลที่รับได้จากสถานีตรวจสอบเพื่อสร้างข้อมูลนำหนของดาวเทียมแต่ละดวง, สถานีอัปโหลดข้อมูล (Upload Station) มีหน้าที่ในการอัปโหลดการแก้ไขวงโคจรของดาวเทียมและข้อมูลนำหนของดาวเทียมไปยังกลุ่มดาวเทียม COMPASS, สถานีตรวจสอบ (Monitor Station) ซึ่งทำหน้าที่เก็บข้อมูลการโคจรของกลุ่มดาวเทียม COMPASS ที่ผ่านสถานีตรวจสอบทุกครั้ง ปัจจุบันระบบดาวเทียม COMPASS มีสถานีควบคุมหลัก 1 สถานี, 2 สถานีอัปโหลดข้อมูลและ 30 สถานีตรวจสอบ ที่อยู่ในประเทศจีน และประเทศใกล้เคียง และก็จะมีแผนที่จะสร้างสถานีภาคพื้นดินที่คอยติดตามระบบดาวเทียม COMPASS ทั่วโลกเพื่อเป็นการเพิ่มความถูกต้องให้ตำแหน่งของดาวเทียม ซึ่งค่าพิกัดที่สถานีภาคพื้นดินอ้างอิงและใช้กับระบบดาวเทียม COMPASS คือ CGCS (China Geodetic Coordinate System) 2000

2.2.3.3 ส่วนของผู้ใช้งาน (User Segment)

ณ ปัจจุบันระบบดาวเทียม COMPASS/BeiDou-2 สามารถให้บริการได้เฉพาะภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกเท่านั้น และระบบก็ยังคงอยู่ในช่วงของการพัฒนาทำให้การใช้งานไม่ค่อยเป็นที่รู้จักกันมากสำหรับผู้ใช้งานโดยทั่วไป ส่วนมากจะเป็นที่สนใจสำหรับนักวิจัยที่ต้องการศึกษาระบบดาวเทียม COMPASS เพื่อเป็นการประเมินประสิทธิภาพทางการให้บริการทางตำแหน่ง และประยุกต์ใช้กับระบบดาวเทียมอื่น ๆ เป็นการเพิ่มค่าความถูกต้องให้แก่การหาตำแหน่ง ในอนาคตอันใกล้เราอาจจะเห็นการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม COMPASS ในโทรศัพท์มือถือรุ่นใหม่ (Smart Phone), ระบบติดตามยานพาหนะ, เครื่องนำหนที่ใช้ในการเดินทาง และอื่นๆ แต่ในปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้ใน

การสำรวจรังวัดและทำแผนที่ด้วยระบบดาวเทียมก็ได้พัฒนาและสามารถรังวัดสัญญาณได้แล้ว ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวประมาณ 25 เมตร (ตำแหน่งทางราบ) และ 30 เมตร (ตำแหน่งทางตั้ง)

2.2.4 สรุปคุณลักษณะเฉพาะของดาวเทียมทั้ง 3 ระบบ



รูปที่ 2.18 วงโคจรของระบบดาวเทียม GNSS

ที่มา: (<http://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS>)

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบระบบดาวเทียม GPS GLONASS และ COMPASS/BeiDou Santerre, Pan et al. (2014)

	GPS	GLONASS	COMPASS/BeiDou
จำนวนดาวเทียม ปัจจุบัน	31	24	14(5GEO, 5IGSO, 4MEO)
จำนวนดาวเทียมที่ ออกแบบไว้	24	24	35 (5 GEO, 3 IGSO, 27 MEO)
จำนวนระนาบโคจร	6	3	3 (MEO)
มุมเอียงของระนาบโคจร	55°	65°	55° (MEO & IGSO)
ความสูงวงโคจร (กิโลเมตร)	20,180	19,100	27,528 (MEO)
เวลาโคจร	11h 58m	11h 15m	12h 53m (MEO)

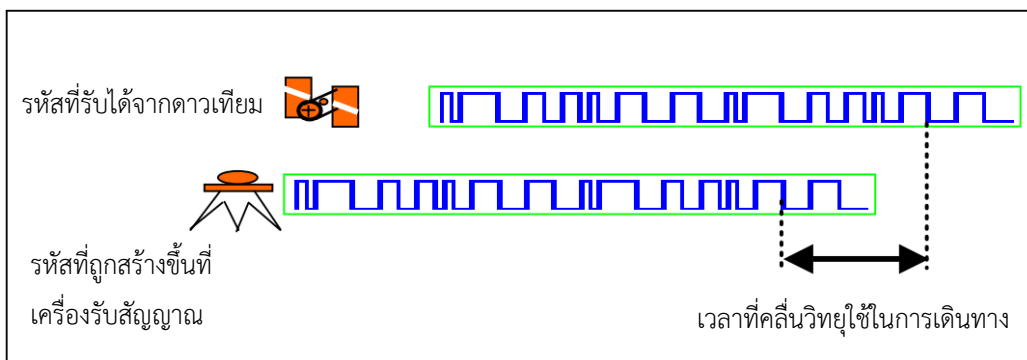
	GPS	GLONASS	COMPASS/BeiDou
เวลาอ้างอิง	GPST UTC(USNO)	UTC(SU)	BDT UTC(NTSC)
ระบบพิกัด	WGS 84	PZ 90	CGCS 2000
Ephemerides	Kepler Elements and temporal variations	Geocentric Cartesian Coordinate and temporal variations	Kepler Elements and temporal variations
Ephemeris update	Every 2h	Every 2h	Every 30min
Message length	12.5 min	2.5 min	12 min (and 6 min)

2.3 สมการค่าสังเกต (Observation Equation)

ข้อมูลดาวเทียมที่ถูกส่งมาพร้อมสัญญาณดาวเทียมจะมี 2 ชนิด คือ ซูโดเรนจ์ (Pseudorange) และ ข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase) โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 ซูโดเรนจ์ (Pseudo range)

ซูโดเรนจ์ คือ ระยะทางที่คลื่นสัญญาณเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ โดยระยะทางได้มาจากการถอดรหัสจากสัญญาณที่ถูกส่งมาจากดาวเทียมเปรียบเทียบกับรหัสที่มีในเครื่องรับสัญญาณสร้างขึ้น โดยจะทำการเลื่อนรหัสทั้ง 2 ไปมาจนกระทั่งรหัสทั้ง 2 ตรงกัน ดังรูปที่ 2.19 ประกอบ ซึ่งเราจะได้ค่าต่างเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ ที่เป็นค่าเลื่อนระหว่างรหัสทั้ง 2 โดยรหัสที่ใช้จะเป็นรหัส C/A และ P การวัดระยะแบบซูโดเรนจ์จะถูกใช้เข้าในการหาตำแหน่งบนมือถือที่มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งไม่มากและเป็นที่ใช้งานมากที่สุด เพราะสามารถระบุตำแหน่งได้ทันที โดยจะเป็นกลุ่มของผู้ใช้งานทั่วไป



รูปที่ 2.19 แสดงการเปรียบเทียบรหัสเพื่อหาระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006)

หลังจากที่เราได้เวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับแล้ว เมื่อเรานำเวลาที่ได้มาคูณด้วยความเร็วของคลื่นวิทยุ หรือความเร็วแสงประมาณ 299,792,458 เมตร/วินาที เราก็จะได้ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณ ที่เรียกว่า “ซูโดเรนจ์” โดยระยะทางที่ได้จะไม่ใช้ระยะทางจริงจะเป็นระยะที่มีค่าคลาดเคลื่อนหลายชนิด ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนของวงโคจรดาวเทียม, ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม และค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศที่คลื่นเดินทางผ่าน เป็นต้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006) สมการที่ 2.1 คือสมการคำนวณระยะซูโดเรนจ์ (Xu 2007)

$$R_r^s(t_r, t_e) = \rho_r^s(t_r, t_e) - c(\delta t_r - \delta t_s) + \delta_{orbit} + \delta_{iono} + \delta_{trop} + \delta_{tide} + \delta_{mul} + \varepsilon \quad (2.1)$$

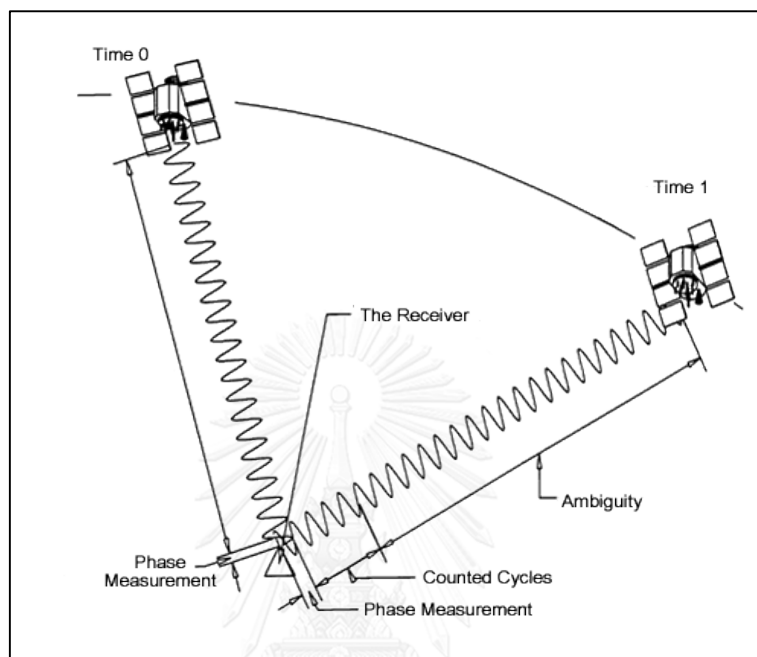
โดยที่

R_r^s	คือ ซูโดเรนจ์ได้จากการวัดรหัสจากดาวเทียม (s) ถึงเครื่องรับสัญญาณ (r) (เมตร)
ρ_r^s	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียม (s) ถึงเครื่องรับสัญญาณ (r) (เมตร)
t_e	คือ เวลาขณะที่คลื่นถูกส่งออกมาจากดาวเทียม (วินาที)
t_r	คือ เวลาขณะที่คลื่นถึงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (วินาที)
c	คือ ความเร็วคลื่น หรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)
δt_r	คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (วินาที)
δt_s	คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
δ_{orbit}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
δ_{iono}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)
δ_{trop}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)
δ_{tide}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงแผ่นดิน และแรงจากมหาสมุทร (เมตร)
δ_{mul}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
ε	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในซูโดเรนจ์ที่วัดได้ของรหัส (เมตร)

2.3.2 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase)

สำหรับการหาตำแหน่งที่ต้องการค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงในระดับเซนติเมตร จะต้องใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการประมวลผล โดยการวัดเฟสของคลื่นส่งจะเป็นการรังวัดแล้ว

เปรียบเทียบ หรือเป็นการหาค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งมาเปรียบเทียบกับเฟสของคลื่นส่งที่เครื่องรับสัญญาณสร้างขึ้น ซึ่งคลื่นที่ดาวเทียมส่งมาจะสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของคลื่นที่เป็นจำนวนเต็มรอบ (Integer cycle part) กับส่วนของคลื่นที่ไม่เต็มรอบ (Fractional part) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006) ดูรูปที่ 2.20 ประกอบ



รูปที่ 2.20 การรังวัดระยะเฟสของคลื่นส่ง

ที่มา: (<http://diydrone.com/profiles/blogs/proof-of-concept-test-extremely-accurate-3d-velocity-measurement>)

ในปัจจุบันเครื่องรับสัญญาณได้พัฒนาและมีความสามารถในการวัดค่าส่วนของคลื่นที่ไม่เต็มรอบ หรือค่าเศษเหลือของลูกคลื่นได้ละเอียดในระดับ 1 ใน 100 ส่วนของความยาวคลื่นส่ง ทำให้ได้ค่าความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร

จำนวนลูกคลื่นที่เป็นจำนวนเต็มรอบที่ถูส่งมาเรียกว่า จำนวนลูกคลื่นปริศนา (Integer Cycle Ambiguity) หรือเลขปริศนา (Ambiguity) สามารถหาค่าได้จากการคำนวณในขั้นตอนของการประมวลผลข้อมูล โดยจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า ขบวนการหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity Resolution: AR) โดยทั่วไปขบวนการประมาณค่าเลขปริศนา จะแบ่งการประมาณค่าออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนจริง (Ambiguity-float solution) และการประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนเต็มตามทฤษฎี (Ambiguity-fixed solution) ซึ่งการประมาณค่าเลขปริศนา

ตามทฤษฎีจะเป็นที่ยอมรับกันว่าให้ความถูกต้องกว่าแบบจำนวนจริง และในซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ทั่วไปก็นิยมใช้เหมือนกัน (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006)

หลักการหาระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับด้วยเฟสของคลื่นส่ง โดยการนำค่าเลขปริศนา (Ambiguity) ที่ได้คูณด้วยความยาวคลื่น บวกกับค่าที่ได้จากการรังวัดส่วนย่อยของลูกคลื่น (Phase Measurement) และจำนวนลูกคลื่นที่เครื่องรับสัญญาณรับได้ (Counted Cycles) ที่คูณความยาวคลื่นเข้าไปแล้วจะได้ระยะทางรวมระหว่างเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียม โดยส่วนที่สำคัญมากในการหาระยะทางก็คือ ขบวนการ AR (Ambiguity Resolution) ซึ่งต้องประมวลผลหาค่าจำนวนคลื่นที่เต็มรอบเป็นเท่าใด จึงจะทำให้ได้ค่าความละเอียดถูกต้องที่สูง และเมื่อนำระยะที่ได้มาคำนวณตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณก็จะได้ตำแหน่งที่มีความถูกต้องสูง สมการสำหรับการวัดเฟสของคลื่นส่ง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 (Xu 2007)

$$\lambda\phi_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r, t_e) - c(\delta t_r - \delta t_s) + \lambda N_r^s + \delta_{orbit} + \delta_{iono} + \delta_{trop} + \delta_{tide} + \delta_{mul} + \varepsilon \quad (2.2)$$

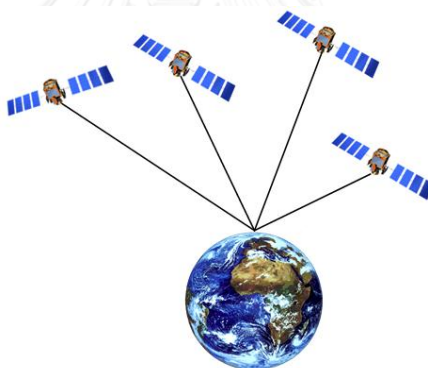
โดยที่

ϕ_r^s (r) (เมตร)	คือ ชูโตเรนจ์ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่งจากดาวเทียม (s) ถึงเครื่องรับสัญญาณ (r) (เมตร)
ρ_r^s	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียม (s) ถึงเครื่องรับสัญญาณ (r) (เมตร)
t_e	คือ เวลาขณะที่คลื่นถูกส่งออกมาจากดาวเทียม (วินาที)
t_r	คือ เวลาขณะที่คลื่นถึงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (วินาที)
c	คือ ความเร็วคลื่น หรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)
δt_r	คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (วินาที)
δt_s	คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
δ_{orbit}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
δ_{iono}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)
δ_{trop}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)
δ_{tide}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงแผ่นดิน และแรงจากมหาสมุทร (เมตร)
δ_{mul}	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
ε	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในชูโตเรนจ์ที่วัดได้ของรหัส (เมตร)
λ	คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)

N_r^s คือ ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่ง หรือ Ambiguity (หน่วยนับ)

2.4 เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมบูรณ์ (Absolute Positioning)

การหาดำแหน่งแบบสัมบูรณ์ หรือ เรียกอีกอย่างว่าการหาดำแหน่งแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP) ที่จะให้ค่าทางตำแหน่ง ณ เวลาของการรังวัดทันที โดยวิธีการในการหาดำแหน่งจะใช้เครื่องรับสัญญาณแบบนำหน หรือแบบรังวัดก็ได้ในการรังวัดเพียงเครื่องเดียว ซึ่งข้อมูลที่ทำให้การรังวัดได้ต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง เพื่อที่จะสามารถทำการคำนวณหาค่าพิกัดทั้ง X, Y และ Z ได้เนื่องจากตัวที่ไม่ทราบค่าอยู่ 4 ตัวด้วยกันคือ ค่าพิกัดของจุด (X,Y,Z) และค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกา โดยการหาระยะจากดาวเทียมถึงเครื่องรับแล้วทำการตัดกันของรูปทรงกลมทั้ง 4 ที่มีศูนย์กลางที่ดาวเทียม ก็จะได้ตำแหน่งของเครื่องรับ การหาดำแหน่งแบบสัมบูรณ์ได้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การให้บริการตำแหน่งแบบมาตรฐาน (Standard Positioning Service: SPS) ซึ่งจะใช้สำหรับในเชิงพาณิชย์ หรือพลเรือนใช้โดยจะมีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ไม่ค่อยสูงเท่าไร และ การให้บริการตำแหน่งแบบความแม่นยำสูง (Precise Positioning Service: PPS) ซึ่งจะถูควบคุมการใช้งานโดยกระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกา

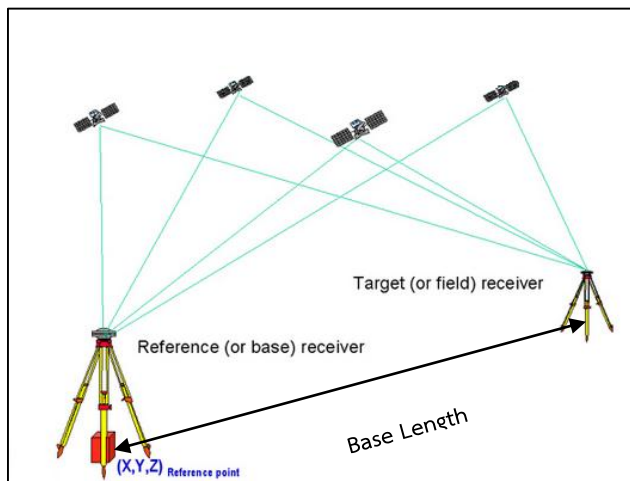


รูปที่ 2.21 การหาดำแหน่งแบบสัมบูรณ์

2.5 เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

การหาดำแหน่งแบบสัมพัทธ์จะถูกนำไปใช้ในงานด้านการสำรวจรังวัดและทำแผนที่เป็น ส่วนมากที่ต้องการค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูง หลักการหาดำแหน่งแบบสัมพัทธ์จะใช้ตำแหน่งสัมบูรณ์หรือตำแหน่งที่ทราบค่าทางพิกัดที่แน่นอนแล้วอย่างน้อยจุดหนึ่ง คำนวณหาตำแหน่งสัมบูรณ์ของจุดอื่นๆ การหาดำแหน่งด้วยวิธีนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดหนึ่งกับอีกจุดหนึ่ง หรือเป็นเส้นฐานที่มีทิศทางระหว่างจุดที่นำเครื่องรับสัญญาณไปตั้งรับไว้ทั้ง 2 จุด หลักการทำงานของ การหาดำแหน่งแบบสัมพัทธ์มีคือ ต้องมีเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดอย่างน้อย 2 เครื่องขึ้นไป โดยนำเครื่องรับสัญญาณเครื่องแรกไปตั้งไว้ ณ ตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัดแล้ว เรียกว่า สถานีฐาน (Base Station) หรือสถานีอ้างอิง (Reference Station) ส่วนเครื่องรับสัญญาณที่เหลือจะถูกนำไปตั้งไว้ ณ

ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด เรียกว่า สถานีผู้ใช้งาน (User Station) หรือสถานีจร (Roving Station) โดยเครื่องรับสัญญาณแบบรับวัดทุกเครื่องจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน จากรูปที่ 2.22 ประกอบ วิธีการนี้ส่วนมากจะใช้กับข้อมูลเฟสเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.22 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

วิธีการรับวัดของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งได้ถูกนำมาใช้ในงานภาคสนามอย่างมากโดยสามารถแบ่งออกเป็นหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมี ความถูกต้องและความเหมาะสมที่แตกต่างกันไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยรายละเอียดของแต่ละวิธีมีดังนี้

2.5.1 การรับวัดแบบสถิต (Static Survey)

การรับวัดแบบสถิตเป็นวิธีพื้นฐานของการวัดระยะโดยใช้คลื่นส่ง เป็นการทำงานโดยใช้เครื่องรับตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป โดยเครื่อง 1 จะนำไปวางอยู่ ณ จุดที่ทราบค่าตำแหน่งแล้ว ส่วนเครื่องที่เหลือจะวางไว้ ณ จุดที่ต้องการหาตำแหน่งเพิ่มเติม โดยปกติเครื่องรับจะถูกวางไว้ไม่น้อยกว่าหนึ่งชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้มีข้อมูลของการวัดระยะที่เพียงพอจะประมวลผลหาจำนวนคลื่นเต็มรอบที่ไม่สามารถวัดได้ โดยหลักการแล้ววิธีการนี้ใช้หาตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างกันเป็นระยะทางยาวได้ แต่การใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์หรือซอฟต์แวร์ของโรงงานผลิตเครื่องรับนั้น ระยะทางสูงสุดที่ให้ความถูกต้องได้ตามข้อกำหนดของเครื่องรับจะอยู่ประมาณ 20-30 กิโลเมตร เท่านั้น ค่าพิกัดทางตำแหน่งที่ได้จากวิธีนี้ให้ค่าความถูกต้องตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 เซนติเมตร (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006) โดยส่วนมากวิธีการนี้จะถูกใช้เข้าในการทำโครงข่ายหมุดชั้น 1 ของประเทศ



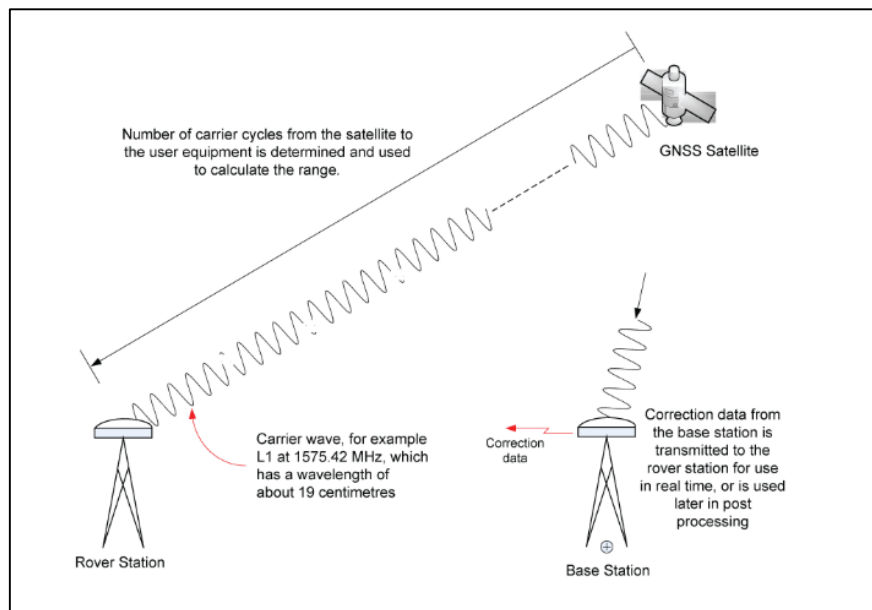
รูปที่ 2.23 การรังวัดแบบสถิต

2.5.2 การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid Static Survey)

การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว มีวิธีการทำงานเหมือนกันกับการรังวัดแบบสถิตธรรมดา แต่ต้องการข้อมูลน้อยกว่า เพื่อนำมาประมวลผลหาจำนวนคลื่นเต็มรอบ ในการหาตำแหน่งของจุดที่อยู่ห่างจากจุดอ้างอิงไม่เกิน 5 กิโลเมตร จะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลประมาณ 10-20 นาที อัลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลผลวิธีสถิตอย่างรวดเร็วจะแตกต่างจากวิธีรังวัดแบบสถิตธรรมดาตามปกติจะใช้ได้สำหรับจุดที่อยู่ห่างจากจุดอ้างอิงไม่เกิน 15 กิโลเมตร โดยวิธีนี้จะให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งอยู่ระหว่าง 1-3 เซนติเมตร (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006)

2.5.3 การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic Survey: RTK)

การรังวัดแบบจลน์ในทันที เป็นวิธีการทำงานรังวัดแบบจลน์นั่นเอง แต่แสดงผลลัพธ์คือ ค่าพิกัดตำแหน่งได้ทันทีในสนาม โดยเหตุที่การทำงานยังเป็นการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ หมายความว่า ข้อมูลจากทั้งสองจุดต้องนำมาประมวลผลร่วมกัน ดังนั้น จึงต้องใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน เนื่องจากจุดอ้างอิงเป็นจุดรู้ตำแหน่งอยู่แล้ว ในการทำงานแบบ RTK นี้จึงเป็นการส่งข้อมูลที่รับสัญญาณดาวเทียมได้ไปยังจุดที่ต้องการหาตำแหน่งเครื่องรับ ณ จุดที่ต้องการหาตำแหน่งจะรับข้อมูลแล้วนำไปประมวลผล และแสดงค่าพิกัดได้อย่างรวดเร็วในทันที ระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้ทำงานได้ไม่เกิน 15 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่นวิทยุที่ใช้ ในการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน



รูปที่ 2.24 เทคนิคการรังวัดแบบจลนในทันที

ที่มา: (<http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-4-advanced-gnss-concepts/real-time-kinematic-rtk/>)



รูปที่ 2.25 การรังวัดแบบจลนในทันทีในภาคสนาม (ซ้าย: สถานีฐาน, ขวา: สถานีผู้ใช้งาน)

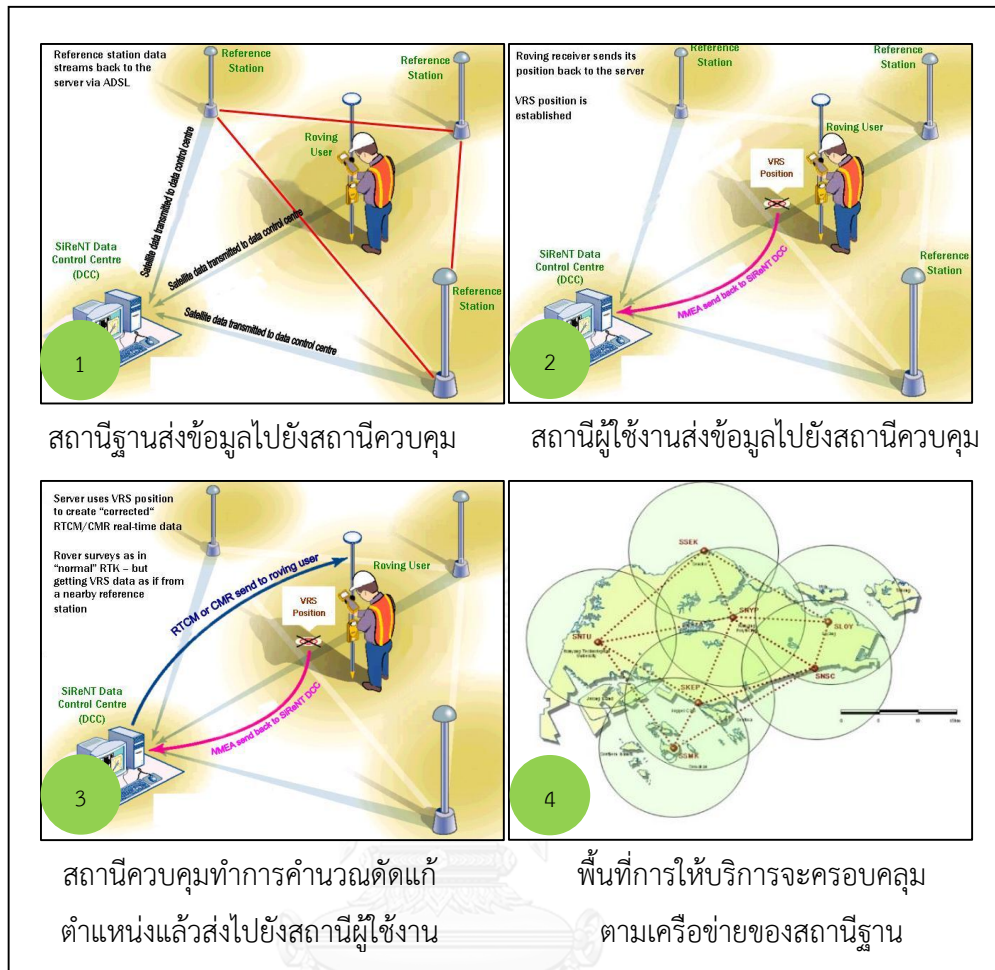
ที่มา: (<http://www.azwater.gov/AzDWR/Hydrology/Geophysics/GPS.htm>)

เทคนิคการรังวัดแบบจลนในทันที มีข้อดีคือ ใช้เวลาในการรังวัดค่อนข้างเร็วสามารถประมวลผลข้อมูลในขณะที่กำลังรับสัญญาณได้พร้อมกันทำให้ได้ค่าพิกัดตำแหน่งในทันที แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ความถูกต้องทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดที่ได้จะลดลงเมื่อระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐานกับสถานีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น (ธีรทัต เจริญภาสัณญูตา และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2009)

2.5.4 การรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐาน (Network-Based RTK: NRTK)

เป็นวิธีการรังวัดที่ได้มีการออกแบบมาเพื่อปรับปรุงและแก้ไขข้อจำกัดของเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที โดยเฉพาะค่าความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดที่จะมีผลมาจากระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งลดลง โดยหลักการทำงานด้วยวิธีนี้ในภาคสนามจะเหมือนกันกับการรังวัดแบบจลน์ในทันที แต่ต่างกันที่องค์ประกอบของเทคนิคการรังวัดคือ จะมีสถานีฐานถาวร, ศูนย์ควบคุมกลางและสถานีผู้ใช้งาน การทำงานเริ่มต้นจากการสร้างสถานีฐานถาวรก่อนโดยจะตั้งในที่ที่เปิดโล่ง อยู่ในพื้นที่ที่มั่นคง และมีเครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงชนิดหลายความถี่อย่างน้อย 3 สถานี โดยทุกๆ สถานีฐานต้องมีการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตได้ตลอดเวลาเพื่อที่จะได้ส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมกลาง เมื่อศูนย์ควบคุมกลางได้รับข้อมูลก็จะทำการประมวลผลเพื่อคำนวณหาค่าแก้ความคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ แล้วก็ส่งต่อไปยังสถานีผู้ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถใช้เครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดเพียงเครื่องเดียวในการทำงานโดยจะใช้โทรศัพท์มือถือ หรือคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ ทำการรับข้อมูลค่าแก้ความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆจากสถานีฐานแล้วก็ส่งข้อมูลไปยังเครื่องรับสัญญาณทำการประมวลผลหาตำแหน่ง ณ เวลานั้น รูปที่ 2.26 ประกอบ

การปรับปรุงครั้งนี้ทำให้สามารถทำงานได้เร็ว มีประสิทธิภาพในการทำงานและค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีกว่าการทำงานแบบจลน์ในทันที แต่วิธีนี้ก็จะมีข้อจำกัดคือ ต้องเป็นเขตพื้นที่ที่มีการให้บริการระบบอินเทอร์เน็ตที่เสถียรภาพและต้องอยู่ในขอบเขตของโครงข่ายสถานีฐานถึงจะได้ผลดี



รูปที่ 2.26 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบจรวดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐาน ที่มา: (<http://www.sirent.inlis.gov.sg/body/technology.php>)

2.6 ความคลาดเคลื่อนในงานรังวัดดาวเทียม

ในงานรังวัดดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น อาจพิจารณาแยกได้เป็น 4 กลุ่มคือ กลุ่มเกี่ยวข้องกับดาวเทียม ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของสัญญาณ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของการหักเหในชั้นบรรยากาศ และการเกิดคลื่นสะท้อน ความคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องรับสัญญาณ เช่น นาฬิกาเครื่องรับ และความคลาดเคลื่อนสุดท้ายคือเรขาคณิตดาวเทียม (Satellite Geometry)

2.6.1 ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbit Bias)

ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมมีสาเหตุมาจากวงโคจรดาวเทียมที่ได้มาจาก ข้อมูลดาวเทียมในสัญญาณที่รับได้นั้นเป็นวงโคจรที่ได้จากการคำนวณล่วงหน้า โดยอาศัยรูปแบบการจำลองของแรงที่กระทำต่อดาวเทียมในขณะที่ทำการวัด ดังนั้นตำแหน่งดาวเทียมจาก อิพีเมอริส

(Ephemeris) ดาวเทียม ที่ส่งลงมาพร้อมกับคลื่นสัญญาณดาวเทียมจึงมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีผลต่อการหาตำแหน่ง แต่การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์จะทำให้ความคลาดเคลื่อนของวงโคจรลดลงได้

2.6.2 ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาของเครื่องรับ (Clock Bias)

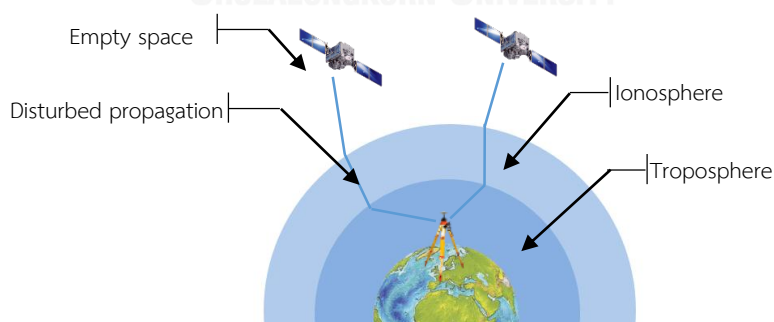
เวลาดาวเทียม หมายถึง เวลาที่อ่านได้จากนาฬิกาของดาวเทียม บนดาวเทียมแต่ละดวงมีนาฬิกาที่มีมาตรฐานความถูกต้องในระดับนาโนวินาที โดยสถานีควบคุมหลักภาคพื้นดินจะทำการปรับแก้ค่านาฬิกาดาวเทียมให้ถูกต้องและเที่ยงตรงเสมอ สมมุตินาฬิกาดาวเทียมคลาดเคลื่อนไป 1 วินาทีจะทำให้ตำแหน่งที่ได้คลาดเคลื่อนไปประมาณ 300,000 กิโลเมตร ดังนั้นค่าความถูกต้องของนาฬิกาดาวเทียมจึงมีความสำคัญ สำหรับเครื่องรับสัญญาณ จะใช้นาฬิกาโดยทั่วไปที่มีความละเอียดถูกต้องในระดับ วินาที แต่เวลาที่ถูกต้องของเครื่องรับสามารถหาได้จากสัญญาณดาวเทียมที่มีเวลาจากนาฬิกาดาวเทียมอยู่ เมื่อเครื่องรับถอดรหัสได้ก็จะรู้เวลาได้

2.6.3 ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ (Atmosphere Bias)

ชั้นบรรยากาศที่มีผลต่อการหักเหคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเบี่ยงเบนไปคือ ชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) และชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)

ชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่ติดอยู่กับพื้นโลก ขอบเขตของโทรโพสเฟียร์ในบริเวณศูนย์สูตรสูงถึง 16-17 กิโลเมตร เป็นชั้นที่มีปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฝน เมฆ พายุ อุณหภูมิของบรรยากาศในชั้นนี้จะลดลงราว 6.5 องศาเซลเซียส ทุกๆความสูง 1 กิโลเมตร

ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตแยกปรมาณูออกเป็นไอออน ซึ่งครอบคลุมบริเวณ ตั้งแต่ระดับความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร จนถึง 1000 กิโลเมตร

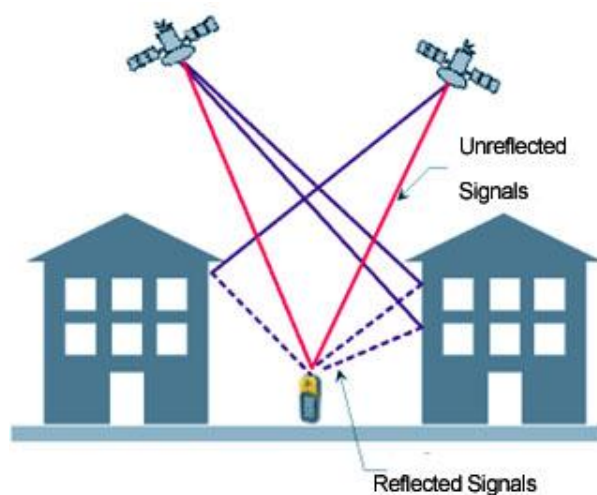


รูปที่ 2.27 ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ

2.6.4 ความคลาดเคลื่อนจากคลื่นสะท้อน (Multipath)

ความคลาดเคลื่อนจากคลื่นสะท้อน หมายถึงการแพร่กระจายของคลื่นสัญญาณดาวเทียมที่มีการสะท้อนตั้งแต่หนึ่งครั้งขึ้นไปก่อนที่เครื่องรับสัญญาณจะรับสัญญาณได้ทำให้การคำนวณระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงส่งผลทำให้ค่าตำแหน่งของ

เครื่องรับไม่ถูกต้อง ความคลาดเคลื่อนจากคลื่นสะท้อนจะพบมากในตัวเมือง พื้นผิวที่สะท้อนอาจจะมีอยู่ในแนวตั้ง ราบ หรือเอียงก็ได้ เช่น ถนนตึก ถนน ผิวหน้า หรือยานพาหนะ คลื่นสะท้อนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคลื่นหลุด (Cycle Slip) การรับวัดเป็นเวลานานจะทำให้ผลของคลื่นสะท้อนลดลง อย่างไรก็ตาม เทคนิคของการรับวัดบางวิธีไม่สามารถวางเสาอากาศทิ้งไว้เป็นเวลานานๆได้ เราจึงต้องหลีกเลี่ยงการรับสัญญาณที่มีคลื่นสะท้อนโดย เลือกจุดวางเครื่องรับที่ไม่มีพื้นผิวสะท้อนอยู่ใกล้เคียง เลือกเสาอากาศที่ออกแบบเฉพาะ เช่น เสาอากาศที่มีแผ่น ground ใช้วัสดุที่ดูดซับคลื่นวางรอบเสาอากาศ และการเลือกวิธีการในการประมวลผลข้อมูลก็สามารถช่วยลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิธีได้



รูปที่ 2.28 ความคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิธี

ที่มา: (<http://geoawesomeness.com/gnss-reflectometry-making-use-multipath-altimeter-measurements/>)

2.6.5 ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องรับ

ความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับมีสาเหตุมาจากหลายส่วนด้วยกันได้แก่ noise ในการวัดของเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างช่องสัญญาณ จุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ noise ในการวัดขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ หรืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับ noise (S/N ratio) วิธีการที่ใช้ในการประมาณขนาดของ noise คือ 1 เปรอร์เซ็นต์ ของค่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่กำลังทำการรับวัด ในปัจจุบันเครื่องรับสัญญาณรุ่นใหม่ได้ถูกพัฒนาให้สามารถทำให้ noise ในการวัดเฟสคลื่นส่งลดลงมาเหลือน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร

2.6.6 เรขาคณิตดาวเทียม (Satellite Geometry)

เรขาคณิตดาวเทียมก็คือการเรียงตัวของกลุ่มดาวเทียมที่ทำการรังวัดในขณะนั้น โดยจะมีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้ ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ด้วยค่า DOP (Dilution of Precision) โดย Leick (2004) ได้แสดงไว้ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_0 * DOP \quad (2.3)$$

โดยที่ σ แสดงถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งที่ต้องการทราบ
 σ_0 แสดงถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่วัดได้

โดยทั่วไปแล้วค่า DOP จะแบ่งออกเป็นหลาย ๆ ชนิด เช่น HDOP (Horizontal Dilution of Precision), PDOP (Positional Dilution of Precision), TDOP (Time Dilution of Precision), GDOP (Geometric Dilution of Precision) เป็นต้น ซึ่งค่า GDOP เป็นตัวบ่งชี้ถึงความถูกต้องโดยรวม (รูปที่ 2.29 แสดงค่า GDOP ที่ดีและไม่ดี) จากสมการ (2.3) หากสมมุติว่าความถูกต้องของระยะที่วัดได้เท่ากัน จะเห็นได้ว่าถ้าค่า DOP ยิ่งต่ำก็จะทำให้ได้ความถูกต้องของตำแหน่งที่ต้องการสูงขึ้น

HDOP บ่งชี้ความถูกต้องของตำแหน่งทางราบ

VDOP บ่งชี้ความถูกต้องของตำแหน่งทางตั้ง (ความสูง)

PDOP บ่งชี้ความถูกต้องของตำแหน่งในสามมิติ

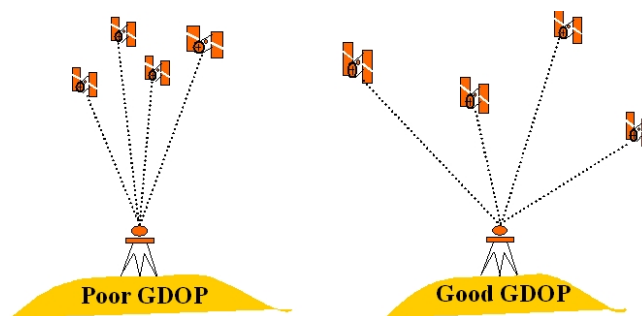
TDOP บ่งชี้ความถูกต้องของเวลาที่ได้จากการรับสัญญาณดาวเทียม

GDOP บ่งชี้ความถูกต้องทางตำแหน่งโดยรวม

DOP แบบต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันคือ

$$(PDOP)^2 = (HDOP)^2 + (VDOP)^2 \quad (2.4)$$

$$(GDOP)^2 = (PDOP)^2 + (TDOP)^2 \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างค่า GDOP ที่ดี(ด้านซ้าย) และ GDOP ที่ดี(ด้านขวา) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ค.ศ. 2006)

ตารางที่ 2.9 ความหมายของค่า DOP

ที่มา: ([http://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_\(GPS\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_(GPS)))

ค่า DOP	อันดับ	คำอธิบาย
<1	Ideal	มีความน่าเชื่อถือและความแม่นยำทางตำแหน่งสูงสุด
1-2	Excellent	มีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจสำหรับการใช้งานทั่วไป
2-5	Good	ให้ความเชื่อถือได้ในการนำหน
5-10	Moderate	ข้อมูลสามารถนำมาคำนวณได้แต่ความถูกต้องจะลดลงมาก
10-20	Fair	ข้อมูลไม่ดีต้องระวังวัดใหม่ หรือ ใช้ได้ในกรณีที่ต้องการทราบตำแหน่งคร่าว ๆ
>20	Poor	ข้อมูลไม่ดีต้องระวังวัดใหม่อย่างเดียว

2.7 งานวิจัยที่ผ่านมา

Huang et al. (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou-2/Compass โดยรวมในทวีปเอเชีย ผลการศึกษาที่ได้พบว่า จำนวนดาวเทียมที่รับได้ทั่วโลกมีการปรับปรุงเพิ่มขึ้นจาก 8-10ดวงที่รับได้จากระบบดาวเทียม GPS ไปเป็น 16-27 ดวงที่รับได้จากการประสมระบบดาวเทียม GPS/Compass, ค่า GDOP ได้ถูกปรับปรุงจาก 1.96-2.76 ของ GPS ไปเป็น 1.24-1.68 ของการรวมระบบ จำกัดเฉพาะขอบเขตภูมิภาคเอเชีย, การมองเห็นดาวเทียม และ ค่า GDOP ของ Compass ได้ถูกปรับปรุงจาก 8-17 ดวง (ทั่วโลก) ไปเป็น 11-17 ดวง (ภูมิภาค) และ จาก 1.72-2.55 (ทั่วโลก) ไปเป็น 1.73-2.34 (ภูมิภาค) ตามลำดับ การมองเห็นดาวเทียม และ ค่า GDOP ของระบบ GPS/Compass ได้ถูกปรับปรุงจาก 16-27ดวง (ทั่วโลก) ไปเป็น 20-27ดวง (ภูมิภาค) และ จาก 1.24-1.68 (ทั่วโลก) ไปเป็น 1.24-1.48 (ภูมิภาค) ตามลำดับเพราะฉะนั้นผู้ใช้งานในภูมิภาคเอเชียสามารถได้รับการแสดงผลที่ดีกว่าประเทศอื่น ๆ ในโลก

Gao et al. (2014) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คุณภาพข้อมูลของ GPS/ Compass และ ผลกระทบต่อความถูกต้องของการหาตำแหน่งจุดเดียวภายใต้การเก็บข้อมูลที่มีเงื่อนไขแตกต่างกัน พื้นที่ในการศึกษาอยู่ที่ The Central South University, China ผลการศึกษาที่ได้พบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square: RMS) ความผิดพลาดทางตำแหน่งของ GPS บ่งบอกถึงความถูกต้องในระดับ 2.723, 3.293 และ 7.779 เมตร ในทางทิศตะวันออก (East), ทางทิศเหนือ (North) และ ขึ้น (Up) ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ของ GSP/Compass ได้เป็น 1.683, 2.753 และ 5.743 เมตร ตามลำดับ การปรับปรุงความถูกต้องทางตำแหน่งทั้งสามมิติได้ถึง 26%

Sanguino et al. (2013) ได้ศึกษาการหาตำแหน่งด้วยข้อมูลที่รับจากระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS พื้นที่ในการศึกษาอยู่ที่ North Tower of IT/IST in Lisbon, Portugal ผลการศึกษาที่ได้พบว่าการประมวลผลด้วยการผสมระบบดาวเทียม GPS กับ GLONASS นำมาซึ่งการปรับปรุงอย่างมากมากกว่าการใช้เพียงระบบใดระบบหนึ่ง, การปรับปรุงเหล่านี้จะเห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ที่ใช้งานระบบดาวเทียม GLONASS ประโยชน์หลักที่ได้จากการประมวลผลร่วมกันทั้งสองระบบคือการเพิ่มขึ้นของจำนวนดาวเทียมโดยเฉพาะในเขตพื้นที่อับสัญญาณ หรือสถานที่ที่วิสัยทัศน์การมองเห็นท้องฟ้าไม่ค่อยดีจากการที่มีสิ่งกีดขวาง

Liu (2014) ได้ทำการศึกษาการประเมินผลของการผสมระบบดาวเทียม GPS/ BeiDou-2 สำหรับการนำหนด้วยดาวเทียมในเขตภูมิภาค พื้นที่ศึกษาอยู่ที่ Shanghai Ocean University, China ผลของการศึกษาพบว่า การใช้ระบบดาวเทียม GPS/BeiDou-2 จะให้จำนวนดาวเทียมที่มากกว่าการใช้ระบบใดระบบหนึ่งแบบเดี่ยว ๆ พร้อมทั้งมีค่าความถูกต้องและความเสถียรภาพกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบดาวเทียม GPS กับ BeiDou-2 จะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของระบบเทียม GPS จะให้ค่าตำแหน่งที่ดีกว่า ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของระบบดาวเทียม BeiDou-2 อยู่ที่ประมาณ 5 เมตร (ทางราบ) หรือน้อยกว่า และ ประมาณ 10 เมตร (ทางตั้ง) หรือน้อยกว่า

Pan et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวด้วยระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ BeiDou พื้นที่ในการศึกษาอยู่ที่ The Central South University, China ผลการศึกษาที่ได้พบว่า โดยการกำหนดค่ามุมสูงของการรับสัญญาณดาวเทียม 10° ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ (ทางราบ) และ ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ (ทางตั้ง) โดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/BeiDou เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS/GLONASS สำหรับการกำหนดค่ามุมสูงการรับสัญญาณดาวเทียมเป็น 30° เห็นว่าการใช้ระบบดาวเทียม GPS ระบบเดียวมีจำนวนดาวเทียมน้อยกว่า 4 ดวงทำให้ไม่สามารถทำการ

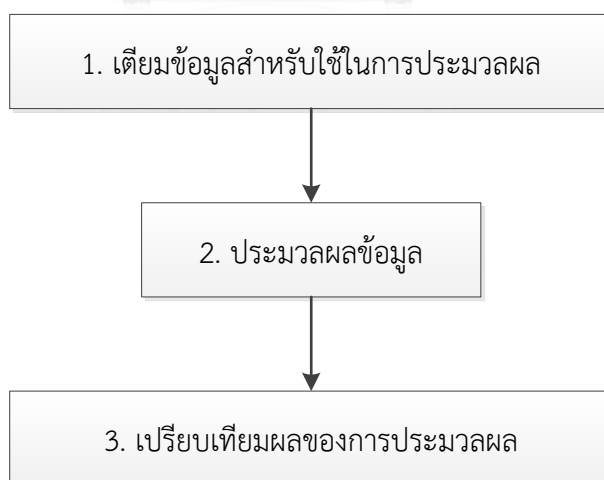
ประมวลผลได้ แต่สำหรับการผสมระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/BeiDou ทำให้มีจำนวนดาวเทียมที่มากพอในการประมวลผล ซึ่งให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (RMS) ประมาณ 5 เมตร

Yuan et al. (2013) ได้ศึกษาการวิจัยและการดำเนินการหาเลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็มในการระบุตำแหน่งของการประสานระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS โดยพื้นที่ในการศึกษาอยู่ที่ Hainan และ Guangzhou, China ผลการศึกษาที่ได้พบว่า การผสมกันของระบบดาวเทียมทั้งสามให้ผลดีกว่า การประมวลผลระบบดาวเทียม COMPASS แบบเดี่ยวๆ แต่เมื่อเทียบระบบดาวเทียม COMPASS กับระบบดาวเทียม GPS เห็นได้ว่าจำนวนดาวเทียมที่รับได้มากกว่า และการผสมระบบดาวเทียมเข้าด้วยกันก็ช่วยเพิ่มจำนวนดาวเทียมเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้ระบบดาวเทียม GPS แบบเดี่ยว และทำให้เรขาคณิตดาวเทียมมีความแข็งแรง ดังนั้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ ความน่าเชื่อถือ และ ความถูกต้องทางตำแหน่งมีการปรับปรุงที่ดีขึ้น

Sun et al. (2015) ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการหาตำแหน่งด้วยการผสมระบบดาวเทียม BeiDou/GPS/GLONASS พื้นที่ศึกษาอยู่ที่ประเทศจีน ผลของการศึกษาพบว่าเมื่อทำการผสมระบบดาวเทียม BeiDou/GPS/GLONASS เข้าด้วยกันในการหาตำแหน่งจะช่วยให้จำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้เพิ่มมากขึ้น, เรขาคณิตดาวเทียมมีการปรับปรุงที่ดีขึ้นเช่น ค่า GDOP ที่ได้น้อยกว่า 2 และที่สำคัญค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของการผสมระบบดาวเทียม BeiDou/GPS/GLONASS ดีกว่าการใช้ระบบดาวเทียมระบบใดระบบหนึ่ง หรือ แม้จะเป็น 2 ระบบก็ตาม

บทที่ 3 การดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานของงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการรังวัด เก็บข้อมูลพิกัดระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ชุดข้อมูลคือ ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวที่มีสถานีรังวัด 1 สถานีทำการรังวัดข้อมูลเป็นเวลาเกือบ 1 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 1-28 กรกฎาคม ค.ศ. 2014 และ ชุดข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลแบบสถิต ซึ่งจะมีสถานีรับสัญญาณ 4 สถานี ประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานี และ สถานีผู้ใช้งานอีก 3 สถานีที่มีระยะเส้นฐานที่แตกต่างกัน โดยจะทำการรังวัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทุก ๆ สถานีจะทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณที่สามารถรับสัญญาณได้หลายความถี่และสามารถรับสัญญาณระบบดาวเทียม GNSS ได้ สถานีที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณจะเป็นดาดฟ้าของตึกสูงที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง (เปิดโล่ง) การรับสัญญาณของเครื่องรับ ขั้นตอนที่ 2 ก็คือขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลโดยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP) และการประมวลผลแบบสถิต (Static) ซึ่งแต่ละวิธีก็จะถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ ประมวลผลระบบดาวเทียม GPS อย่างเดียว, GPS/GLONASS, และ GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 และ ขั้นตอนสุดท้ายก็คือเปรียบเทียบผลของการประมวลผล ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวมได้แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

จากแผนภูมิข้างบนจะเป็นขั้นตอนและแผนการดำเนินงานโดยรวม ซึ่งในหัวข้อถัดไปก็จะเป็นการอธิบายรายละเอียด ของแต่ละขั้นตอน ในแต่ละหัวข้อดังนี้

3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการประมวลผล

ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลทั้งหมดของงานวิจัยนี้ได้จากการนำเครื่องรับวัดแบบสำรวจไปติดตั้งบนดาดฟ้าของตึกและได้จากสถานีถาวรที่มีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมติดตั้งไว้บนดาดฟ้าของตึกเช่นกัน โดยการเก็บข้อมูลชุดแรกที่ใช้ในการประมวลผลแบบจุดเดียว ได้จากบริษัท ทริมเบิล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้อำนวยความสะดวกในการให้ข้อมูลการรังวัดด้วยดาวเทียมที่ประกอบมี ระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, และ COMPASS/BeiDou-2 ทำการรังวัดแบบสถิต เก็บข้อมูลทุก ๆ 15 วินาที เป็นเวลาเกือบ 1 เดือนเต็ม โดยเริ่มจากวันที่ 1-28 กรกฎาคม ค.ศ. 2014 โดยเครื่องรับจะถูกติดตั้งอยู่บนดาดฟ้า ชั้น 23 อาคาร โอลิมเปียไทยทาวเวอร์ ถ. รัชดาภิเษก แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร (ดูรูปที่ 3.2 ประกอบ)

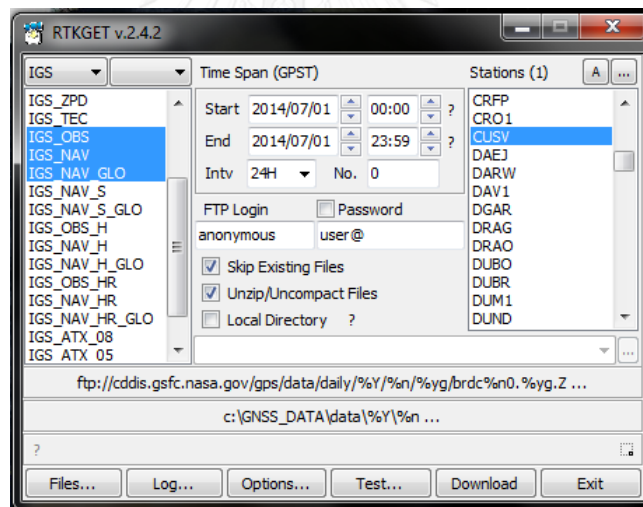


รูปที่ 3.2 สถานีรังวัดข้อมูลสำหรับการประมวลผลแบบจุดเดียว

ข้อมูลอีกชุด 1 ที่จำเป็นต่อการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยวก็คือ ข้อมูลที่จะใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งจากการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดียว ที่ได้จากสถานี CUSV ซึ่งเป็น 1 ในสถานี ให้บริการข้อมูลดาวเทียมระบบ GNSS นานาชาติ (International GNSS Service: IGS) ที่มีอยู่ในประเทศไทยสถานีเดียว โดยมีความถูกต้องทางตำแหน่งระดับมิลลิเมตรให้บริการข้อมูลดาวเทียมได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยเครื่องรับสัญญาณจะถูกติดตั้งอยู่ที่ ดาดฟ้า อาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร (ดูรูปที่ 3.3 ประกอบ)



รูปที่ 3.3 สถานี CUSV ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว ข้อมูลจากสถานี CUSV ได้จากการดาวน์โหลดข้อมูลผ่านโปรแกรม RTKGET v.2.4.3 (ดูรูปที่ 3.4 ประกอบ) โดยกำหนดวันของการเก็บข้อมูลเป็นวันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2014 ในช่วงเวลา 00:00:00-23:59:30 ซึ่งอัตราการเก็บข้อมูลทุก ๆ 15 วินาที ข้อมูลที่ดาวน์โหลดจะประกอบมี ข้อมูลรังวัดดาวเทียม (Observation file) และ ข้อมูลนำหน (Navigation file) ของระบบดาวเทียม GPS



รูปที่ 3.4 การดาวน์โหลดข้อมูลของสถานี CUSV จากโปรแกรม RTKGET v.2.4.3 ข้อมูลชุดที่ 2 เป็นข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลแบบสถิต โดยจะประกอบมีสถานีรังวัดข้อมูลทั้งหมด 4 สถานีด้วยกัน จะมี 1 สถานีฐาน (Base Station) และ 3 สถานีผู้ใช้งาน (User Station) สถานีฐานจะทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ Leica Viva GNSS GS10 Receiver (ดูรูปที่ 3.5 ประกอบ) ที่สามารถรังวัดข้อมูลระบบดาวเทียม GNSS ได้ในระบบหลายความถี่ โดยเครื่องรับได้ทำการติดตั้งอยู่ที่ ตาดฟ้า อาคาร ซีดีจีเฮ้าส์ (CDG House) ถนนวงเวียนใหญ่ แขวงช่องนนทรี เขตยานนาวา กรุงเทพมหานคร (ดูรูปที่ 3.5 ประกอบ) โดยที่ บริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นผู้ควบคุมดูแล และอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้วิจัยในการเก็บข้อมูล โดยค่าอ้างอิงของสถานีฐานได้จาก

การประมวลผลแบบ PPP ที่มีความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร การตั้งค่าการรับสัญญาณของเครื่องรับ จะถูกกำหนดให้รับข้อมูลเฉพาะ ระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, และ COMPASS/ BeiDou-2 เท่านั้น ในรูปแบบการรับข้อมูลแบบสถิตโดยอัตราการเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที รั้ววัดแบบสถิต เป็นเวลาประมาณ 1 สัปดาห์จนกว่าการรั้ววัดของสถานีผู้ใช้งานจะเสร็จ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับจะมีข้อมูลการรั้ววัดดาวเทียม (Observation file) และ ข้อมูลนำหนของระบบดาวเทียมทั้ง 3 ระบบ ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นชุดละ 24 ชั่วโมงโดยเครื่องรับ ก็หมายความว่าในแต่ละวันของการรั้ววัดก็จะมีข้อมูลเฉพาะของวันนั้น ส่วนวันต่อไปก็จะทำการบันทึกเป็นชุดข้อมูลใหม่ของวันนั้น ทำให้ง่ายต่อการประมวลผลข้อมูลที่จะช่วยลดขนาดของข้อมูลลงทำให้การประมวลผลได้เร็วขึ้น



รูปที่ 3.5 สถานีฐานสำหรับการหาตำแหน่งแบบสถิต และเครื่องรับสัญญาณ Leica Viva GNSS GS10 Receiver

การรั้ววัดสำหรับสถานีผู้ใช้งาน 3 สถานีประกอบมี สถานี SV01, LAND, และ DPT9 โดยสถานี SV01 จะทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ Leica Viva GNSS GS15 Receiver ในการรั้ววัดข้อมูลอยู่ที่ ดาดฟ้า ชั้น 4 อาคารศัลยกรรมนิเทศ ภาควิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ดูรูปที่ 3.6 ประกอบ) ได้ทำการรั้ววัดในวันที่ 5-7 มกราคม ค.ศ. 2015 ด้วยอัตราการรั้ววัดทุก ๆ 1 วินาที รั้ววัดแบบสถิต โดยมีระยะเส้นฐาน (Baseline Length) จากสถานีฐานประมาณ 3.8 กิโลเมตร ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับจะประกอบมีข้อมูลการรั้ววัด (Observation file) และ ข้อมูลนำหนของระบบดาวเทียมทั้ง 3 ระบบ



รูปที่ 3.6 สถานีผู้ใช้งาน SV01

สถานีผู้ใช้งาน DPT9 เป็นสถานีที่มีระยะเส้นฐานจากสถานีฐานประมาณ 6.7 กิโลเมตร โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ Trimble R10 ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ได้ ทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณไว้บนดาดฟ้า ชั้น 15 อาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง ถ.พระราม 9 แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร (ดูรูปที่ 3.7 ประกอบ) เริ่มทำการรับวัดในวันที่ 9-11 มกราคม ค.ศ. 2015 ด้วยอัตราการเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที รับวัดแบบสถิต ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับจะเป็นข้อมูลดิบ (Raw Data)



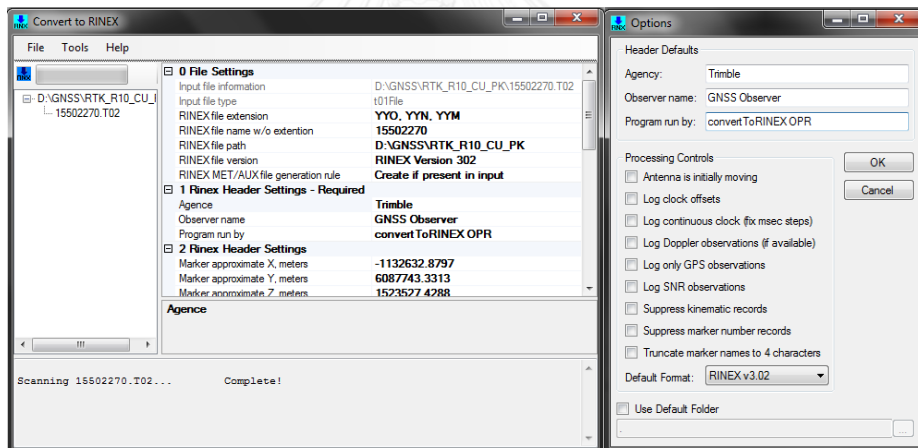
รูปที่ 3.7 สถานีผู้ใช้งาน DPT9

สถานีผู้ใช้งาน LAND เป็นสถานีที่มีระยะเส้นฐานจากสถานีฐานประมาณ 23.2 กิโลเมตร จะทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมสำรวจ Trimble R10 ไว้ข้างบนดาดฟ้า ชั้น 9 สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด, หมู่บ้านเมืองทองธานี ถ.แจ้งวัฒนะ ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี (ดูรูปที่ 3.8 ประกอบ) เริ่มรับวัดตั้งแต่วันที่ 6-8 มกราคม ค.ศ. 2015 ด้วยอัตราการรับวัดข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที รับวัดแบบสถิต โดยข้อมูลที่รับวัดได้จะเป็นข้อมูลดิบ (Raw Data)

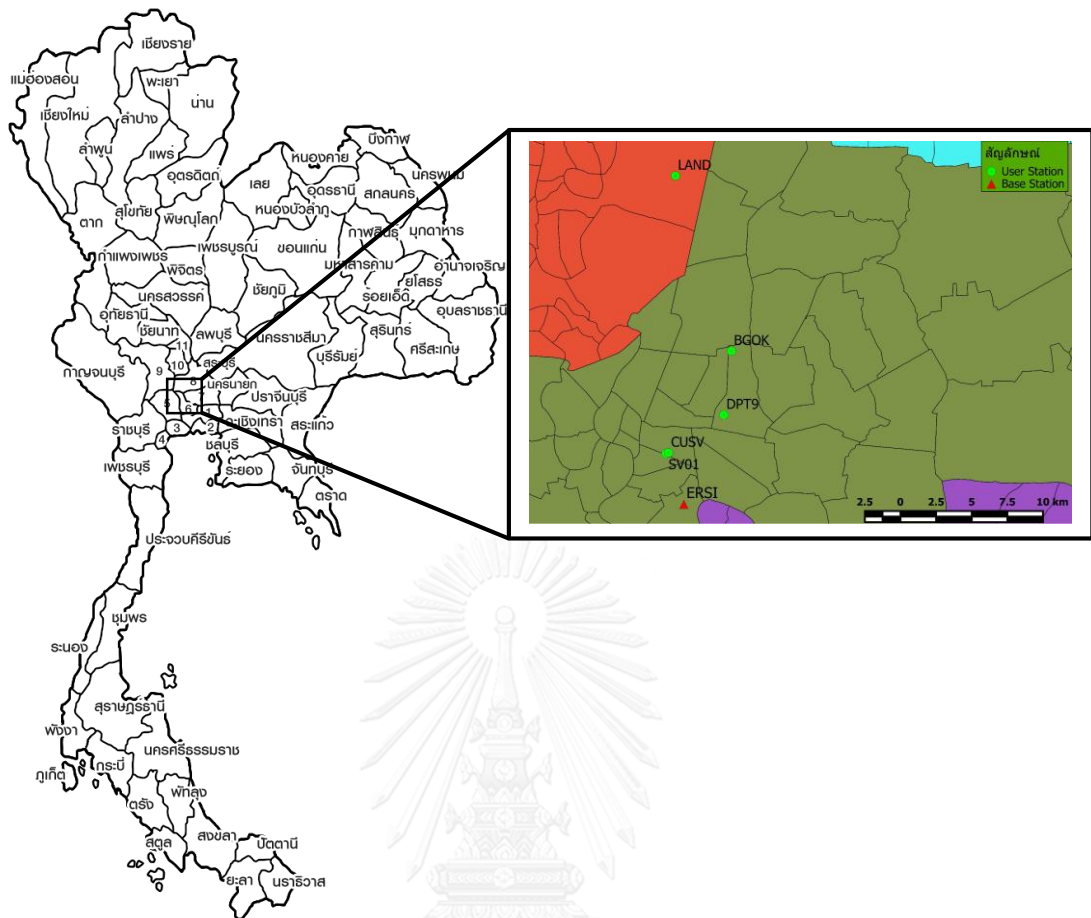


รูปที่ 3.8 สถานีผู้ใช้งาน LAND

ข้อมูลที่รับวัดได้จากเครื่องรับสัญญาณ Trimble R10 ที่เป็นข้อมูลดิบ จะถูกนำมาแปลงให้อยู่ในรูปแบบของ RINEX (Receiver Independent Exchange Format) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Convert to RINEX (ดูรูปที่ 3.9 ประกอบ) โดยตั้งค่าการแปลงเป็น RINEX v3.2 เพื่อที่จะสามารถแปลงข้อมูลดิบเป็นรูปแบบ RINEX ที่มีข้อมูลการรับวัด (Observation file) และ ข้อมูลนำหน (Navigation file) ที่ประกอบด้วยระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, และ COMPASS/BeiDou-2



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการแปลงข้อมูลจากข้อมูลดิบมาเป็นข้อมูล RINEX v3.2 ด้วยซอฟต์แวร์ Convert to RINEX



รูปที่ 3.10 ที่ตั้งโครงข่ายสถานีเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้

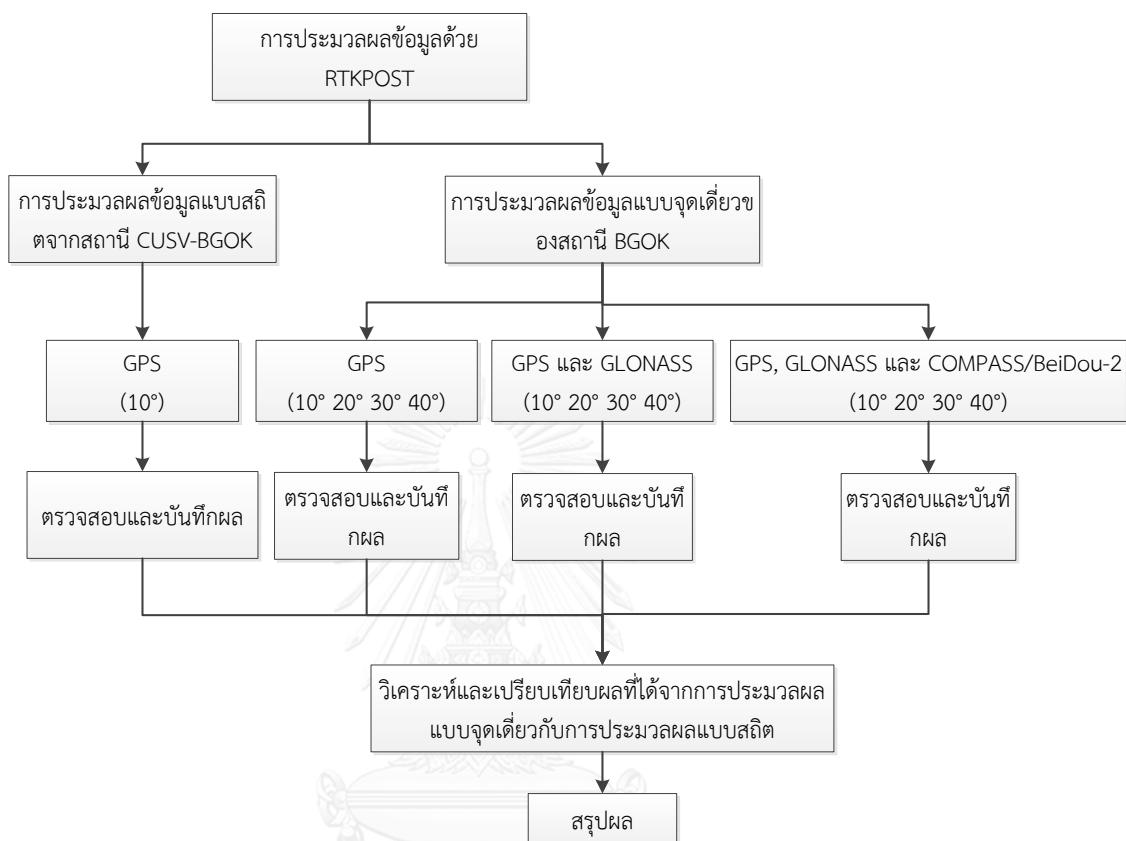
3.2 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล

3.2.1 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP)

ในส่วนของการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวจะทำการประมวลผลโดยใช้ ซอฟต์แวร์ RTKPOST ที่เป็นฟังก์ชันย่อยของซอฟต์แวร์ RTKLib 2.4.3 ซึ่งจะแยกการประมวลผลออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนแรกจะทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS อย่างเดียว, ส่วนที่ 2 ก็จะเป็นการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS และส่วนสุดท้ายก็จะเป็นการประมวลผลด้วยข้อมูลของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 โดยในแต่ละส่วนก็จะถูกแยกออกเป็น 4 ส่วนย่อยในการประมวลผล ซึ่งทั้ง 4 ส่วนย่อยจะถูกกำหนดเงื่อนไขในการประมวลผลที่แตกต่างกันไปโดยจะเปลี่ยนมุมรับสัญญาณดาวเทียมที่แตกต่างกันเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริง (ดูตารางที่ 3.1 ประกอบ)

ส่วนการประมวลผลจากสถานี CUSV ไปยังสถานี BGOK เพื่อเป็นค่าตำแหน่งในการตรวจสอบความถูกต้องของการประมวลผลทั้งหมด จะทำการประมวลผลด้วย ซอฟต์แวร์ RTKPOST ด้วยการ

ประมวลผลแบบสถิต โดยจะใช้ข้อมูลระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS ที่ดาวนิโหลดได้จากสถานี CUSV ด้วยมุมรับดาวเทียม 10° (ดูรูปที่ 3.11 ประกอบ)



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดียว

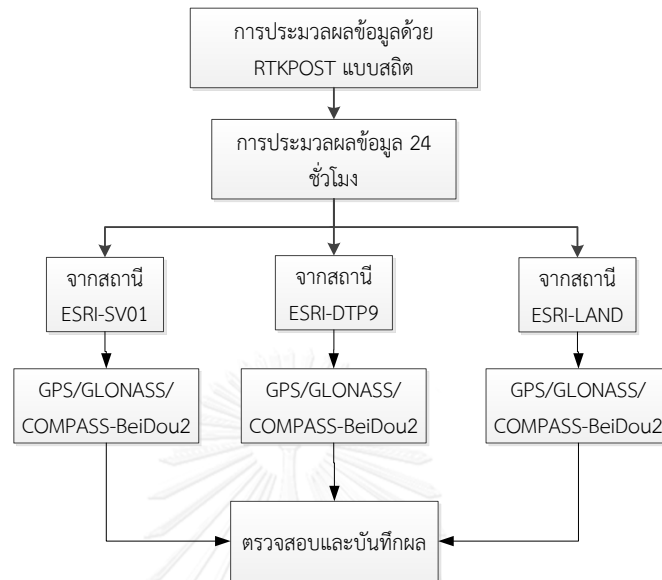
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของการทดลอง (Ferrao, Sanguino et al. 2013)

Elevation mask	Sky visibility	Description
10°	~82.635%	พื้นที่เปิดโล่ง และพื้นผิวมหาสมุทร
20°	~65.798%	ตัวเมืองที่มีอาคารสูงไม่มาก, สถานที่ใกล้ต้นไม้
30°	~50.000%	ตัวเมืองใหญ่ที่มีอาคารสูงไม่หนาแน่นมาก, สถานที่ใกล้ภูเขา หรือต้นไม้ใหญ่
40°	~35.721%	ตัวเมืองที่มีอาคารสูงหนาแน่น ใต้ต้นไม้ใหญ่ หุบเขา

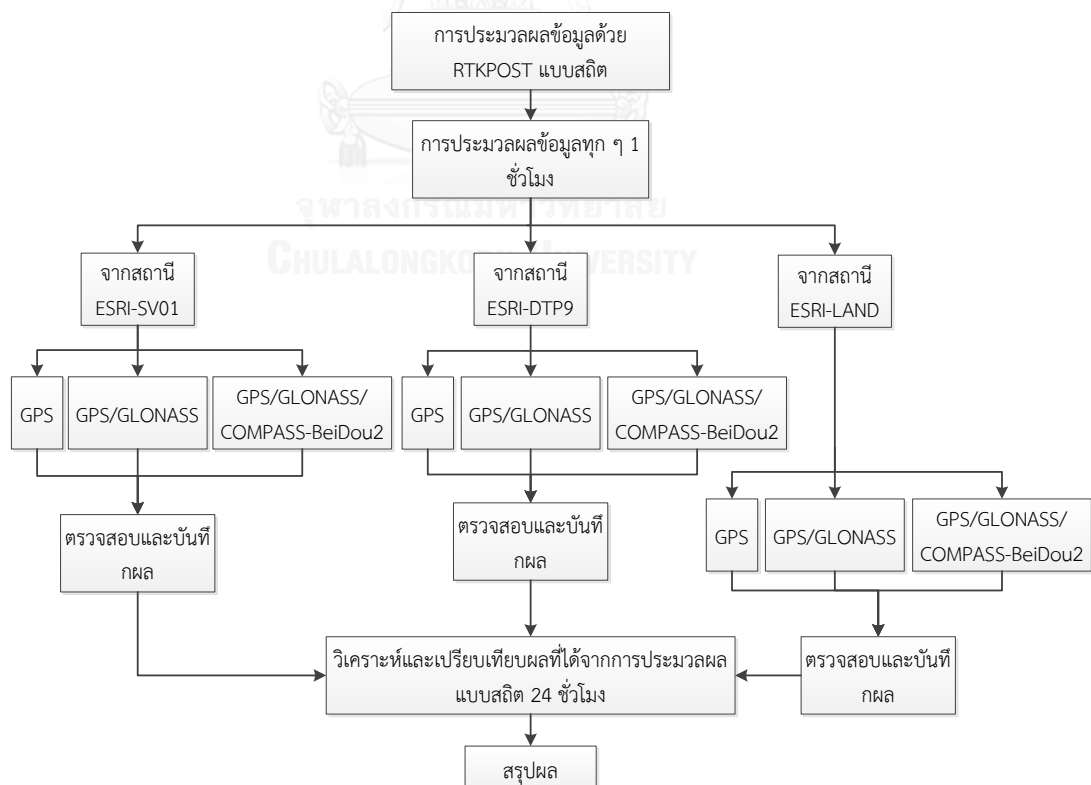
3.2.2 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบสถิต (Static)

ขั้นตอนแรกจะทำการประมวลผลข้อมูล 24 ชั่วโมง ด้วยซอฟต์แวร์ RTKPOST แบบสถิตจากสถานีฐานไปยังสถานีผู้ใช้งานเป็นระยะเส้นฐาน 3.8, 6.7, และ 23.2 กิโลเมตรตามลำดับ แบ่งการ

ประมวลผลของแต่ละเส้ฐานออกเป็น 3 ระบบด้วยกันได้แก่ GPS อย่างเดียว, GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 หลังจากนั้นก็ทำการประมวลผลข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมงของแต่ละระบบของแต่ละเส้ฐาน (ดูรูปที่ 3.12-3.13 ประกอบ)

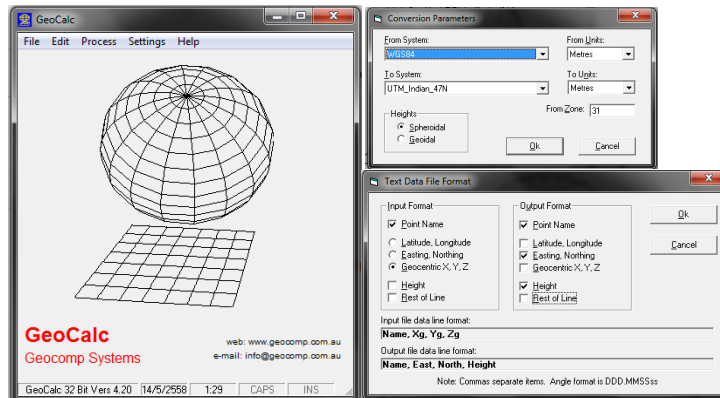


รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบสถิติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแบบสถิติเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง

ในการประมวลผลข้อมูลทุกครั้งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่งที่อยู่ในพื้นหลักฐาน WGS84 ในระบบพิกัด ECEF (Earth Centered Earth-Fixed) ในรูปแบบของค่าพิกัด (X, Y, Z) เพราะฉะนั้นก่อนที่จะนำเอาตำแหน่งที่ได้มาหาค่า RMS จะต้องทำการเปลี่ยนจากพื้นหลักฐาน WGS84 มาเป็น Indian Thailand 1975 ในรูปแบบระบบพิกัดฉาก UTM (E, N, H) โดยในบทวิจัยนี้จะนำซอฟต์แวร์ GeoClac ในการแปลงค่าพิกัด (ดูรูปที่ 3.14 ประกอบ)



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างขั้นตอนการเปลี่ยนพื้นหลักฐานของตำแหน่ง

3.3 ขั้นตอนการเปรียบเทียบ

ขั้นตอนของการเปรียบเทียบข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว และส่วนของการหาตำแหน่งแบบสถิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การเปรียบเทียบค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวของสถานี BGOK แต่ละกรณี มาเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิติจากสถานี CUSV ไปยังสถานี BGOK แล้วหาค่า RMS

การเปรียบเทียบข้อมูลสถิติจะนำค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิติ 24 ชั่วโมงด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS ในแต่ละเส้นฐานมาเปรียบเทียบกับค่าที่ประมวลผลได้ในทุก ๆ 1 ชั่วโมงของแต่ละระบบในแต่ละเส้นฐานโดยจะทำการหาค่า RMS ของแต่ละระบบมาเปรียบเทียบกัน พร้อมดูผลว่าระยะเส้นฐานมีผลต่อค่าความถูกต้องมากน้อยเพียงใดเหมือนกัน

สูตรการหาค่า RMS (Root Mean Square)

$$x_i = \bar{X} - X_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.1)$$

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (3.2)$$

โดยที่ N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

i คือจำนวนข้อมูลที่ 1 ถึง N

\bar{X} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

X_i คือข้อมูลที่ i

x_i คือค่าต่างที่ i ระหว่างค่าเฉลี่ยกับข้อมูลที่ i

สุดท้ายทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมวลผลของการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวและสถิติในทางสถิติด้วยการทดสอบ t-test

เริ่มจากต้องตรวจสอบดูว่าข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกันมีความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ โดยใช้ F-Test Two-Sample for Variances โดยการตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_0 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

โดยที่ σ_1^2 คือความแปรปรวนของค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลด้วย GPS และ σ_2^2 คือความแปรปรวนของค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลด้วย GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS

หลังจากนั้นทำการทดสอบ t-test Two-Sample Assuming Unequal Variance ตามผลที่ได้จากการทดสอบ F-Test Two-Sample for Variances โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_1^2 = \mu_2^2$$

$$H_0 : \mu_1^2 \neq \mu_2^2$$

โดยที่ μ_1^2 คือความแปรปรวนของค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลด้วย GPS และ μ_2^2 คือความแปรปรวนของค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลด้วย GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS

3.4 อุปกรณ์ (Equipment) และซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในงานวิจัย

3.4.1 อุปกรณ์ (Equipment)



Leica Viva GS15 Receiver



Leica Viva GS10 Receiver



Trimble R10

รูปที่ 3.15 เครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้ง 3 เครื่องสามารถที่จะรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้ สามารถรังวัดคลื่นความถี่ของสัญญาณดาวเทียมได้หลายคลื่นความถี่ โดยเครื่องรับสัญญาณ Leica Viva GS10 Receiver และ Leica Viva GS15 Receiver ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด ในการให้ยืมเครื่องมือในการทำงานวิจัยครั้งนี้ และ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

Trimble R10 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ทริมเบิล (ประเทศไทย) จำกัด ในการให้ยืม โดยเครื่องรับสัญญาณ Leica Viva GS10 Receiver จะถูกติดตั้งไว้ที่สถานีฐาน ESRI, ส่วนเครื่อง Leica Viva GS15 Receiver จะนำมาติดตั้งเพื่อรับข้อมูลอยู่ที่สถานีผู้ใช้งาน SV01 และส่วนเครื่อง Trimble R10 จะถูกนำไปรับวัดข้อมูลอยู่ที่สถานีผู้ใช้งาน DPT9 และ LAND

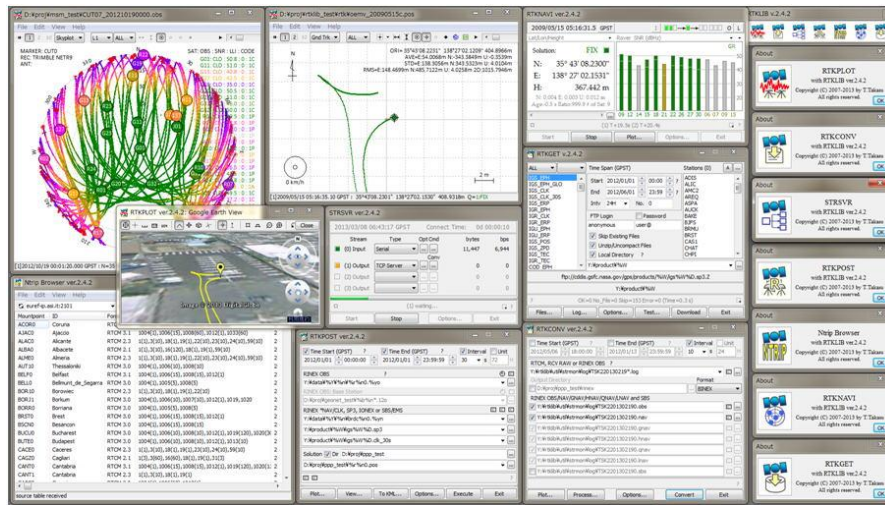
3.4.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

3.4.2.1 Convert to RINEX

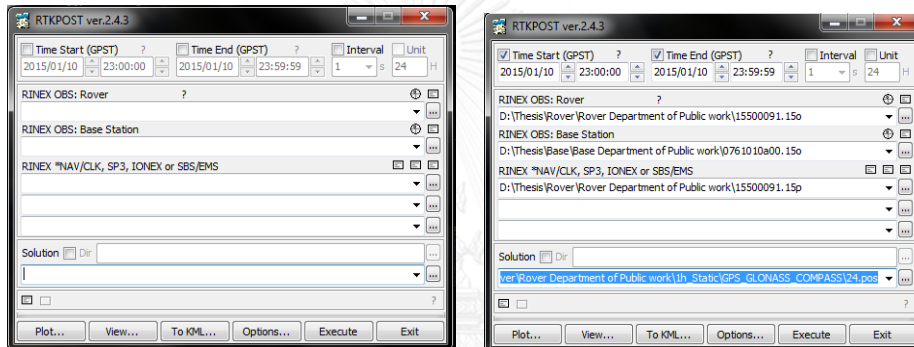
Convert to RINEX เป็นซอฟต์แวร์ ที่ถูกพัฒนาโดย Trimble เพื่อใช้ในการแปลงข้อมูลดิบ (Raw Data) จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่บันทึกข้อมูลเป็น DAT, T00, T01, RT17 ไปเป็นข้อมูล RINEX ในเวอร์ชัน 2.10, 2.11 และ 3.02 ตามต้องการ โดยซอฟต์แวร์รุ่นล่าสุดก็คือ Convert to RINEX v2.28.0

3.4.2.2 RTKlib 2.4.3

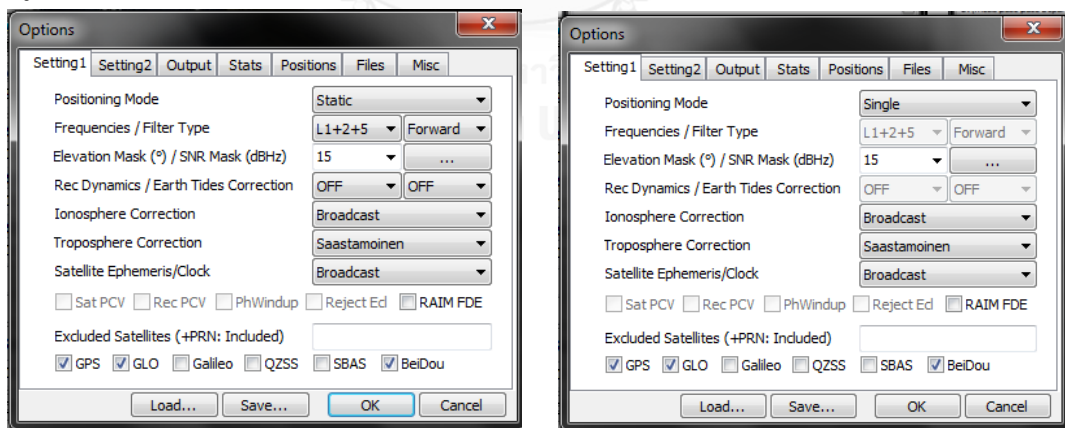
การประมวลผลแบบจุดเดี่ยว และ สถิต จะเลือกใช้ฟังก์ชัน RTKPOST จากซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3 เป็นซอฟต์แวร์ระบบเปิด (Open Source Software) ที่สามารถประมวลผลข้อมูลของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, SBAS และ BeiDou สามารถประมวลผลแบบ Single, DGPS/DGNSS, Kinematic, Static, Moving-Baseline, Fixed, PPP-Kinematic, PPP-Static และ PPP-Fixed (ดูรูปที่ 3.16 ประกอบ) ถูกพัฒนาโดย I.TAKASU ซึ่งขั้นตอนในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวและสถิตจะเริ่มจากการกำหนดและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการประมวลผลก่อน โดยการกดปุ่ม Option หลังจากนั้นจะเป็นการนำเข้าไฟล์ข้อมูลรังวัดของสถานีฐาน และสถานีผู้ใช้งาน ที่เป็น RINEX ที่ประกอบมี ข้อมูลการรังวัด (Observation file *15O) และข้อมูลนำหนดาวเทียม (Navigation file *15P) ที่จะทำการรวมทั้ง 3 ระบบเข้าด้วยกันเป็นไฟล์เดียวเพื่อความสะดวกในการประมวลผล หลังจากนั้นก็ทำการประมวลผลด้วยการกดตรงปุ่ม Execute สำหรับตัวอย่างหน้าต่างของซอฟต์แวร์, การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล (ดูรูปที่ 3.17, 3.18, 3.19 และ 3.20 ตามลำดับประกอบ)



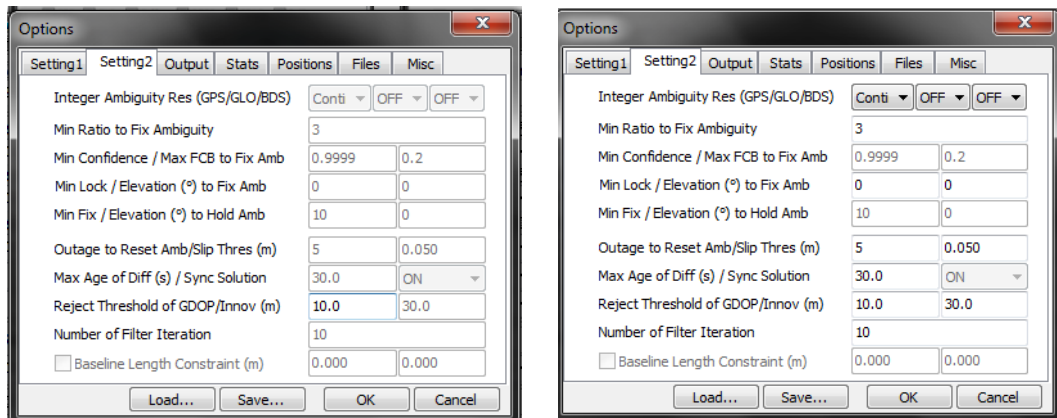
รูปที่ 3.16 แสดงตัวอย่างหน้าต่างต่างของฟังก์ชันที่มีใน RTKlib 2.4.3



รูปที่ 3.17 หน้าต่างของฟังก์ชัน RTKPOST สำหรับการประมวลผลภายหลัง (Post Processing)



รูปที่ 3.18 หน้าต่างการกำหนดค่าต่าง ๆ Setting 1



รูปที่ 3.19 หน้าต่างการกำหนดค่าต่าง ๆ Setting 2

```

D:\Thesis\Rover\Rover Department of Public work\Th_Static_GPS_GLONASS_COMPASS\24.poc
Find
% program : RTKPOST ver.2.4.3
% inp file : D:\Thesis\Rover\Rover Department of Public work\15500091.15o
% inp file : D:\Thesis\Base\Base Department of Public work\0761010a00.15o
% inp file : D:\Thesis\Rover\Rover Department of Public work\15500091.15p
% obs start : 2015/01/10 23:00:00.0 GPST (week1826 601200.0s)
% obs end : 2015/01/10 23:59:59.0 GPST (week1826 604799.0s)
% pos mode : static
% freqs : L1+L2+L5
% solution : forward
% elev mask : 15.0 deg
% dynamics : off
% tidecorr : off
% ionos opt : broadcast
% tropo opt : saastamoinen
% ephemeris : broadcast
% navi sys : gps glonass
% amb res : continuous
% amb glo : off
% val thres : 3.0
% antenna1 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% antenna2 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% ref pos : -1134102.5947 6093159.5330 1501095.8182
%
% (x/y/z-ecef=WGS84,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST x-ecef(m) y-ecef(m) z-ecef(m) Q ns sdx(m) sdy(m) sdz(m) sdx(y) sdy(z)
2015/01/10 23:00:00.000 -1136980.1118 6091174.4338 1506869.2449 1 29 0.0049 0.0110 0.0049 -0.0034 0.0055
2015/01/10 23:00:01.000 -1136980.1120 6091174.4361 1506869.2476 1 29 0.0035 0.0078 0.0035 -0.0024 0.0039
2015/01/10 23:00:02.000 -1136980.1098 6091174.4311 1506869.2459 1 29 0.0028 0.0063 0.0028 -0.0020 0.0032
2015/01/10 23:00:03.000 -1136980.1119 6091174.4369 1506869.2488 1 29 0.0024 0.0055 0.0025 -0.0017 0.0027
2015/01/10 23:00:04.000 -1136980.1095 6091174.4357 1506869.2475 1 29 0.0022 0.0049 0.0022 -0.0015 0.0025
2015/01/10 23:00:05.000 -1136980.1084 6091174.4374 1506869.2458 1 29 0.0020 0.0045 0.0020 -0.0014 0.0022
2015/01/10 23:00:06.000 -1136980.1084 6091174.4348 1506869.2450 1 29 0.0018 0.0041 0.0019 -0.0013 0.0021

```

รูปที่ 3.20 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยฟังก์ชัน RTKPOST

เพื่อความน่าเชื่อถือในการนำใช้ซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3 ได้ทำการเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ LGO (Leica Geo office combined) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่มีความถูกต้องในการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ทำการประมวลผลข้อมูลแบบสถิต โดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียม GPS จากสถานี CUSV ไปยังสถานี BGOK ด้วยระยะเวลาของการรับข้อมูล 24 ชั่วโมง อัตราการรับข้อมูลทุก ๆ 30 วินาที ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

Quality:	Sd. X: 0.0002 m	Sd. Y: 0.0004 m	Sd. Z: 0.0002 m
	Posn. Qlty: 0.0002 m	Hgt. Qlty: 0.0004 m	Sd. Slope: 0.0002 m
M0:	1.2376 m		
Cofactor matrix Qxx:	0.00000003	-0.00000002	-0.00000000
		0.00000011	0.00000003
			0.00000002

รูปที่ 3.21 ผลของการประมวลผลจากซอฟต์แวร์ LGO

sdx (m)	sdym (m)	sdz (m)	sdxy (m)	sdyz (m)	sdzx (m)	age (s)	ratio
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.5
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	-15.00	3.6
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.5
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	-15.00	3.8
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.8
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	-15.00	3.6
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.6
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	-15.00	3.7
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.6
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	-15.00	4.0
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.3
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	-15.00	3.6
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.5
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	-15.00	3.7
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	3.2
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	15.00	3.8
0.0005	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.00	5.0

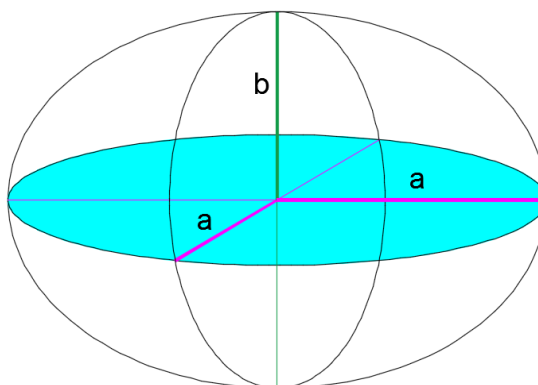
รูปที่ 3.22 ผลของการประมวลผลจากซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3

จากผลของการประมวลผลของทั้ง 2 ซอฟต์แวร์เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้ต่างกันที่ระดับทศนิยมที่ 4 แสดงว่าซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3 ให้ความน่าเชื่อถือในการประมวลผลที่ดีเช่นกัน

3.4.2.3 Geocal

Geocal เป็นซอฟต์แวร์ ที่ใช้ในการแปลงค่าพิกัดจากพื้นหลักฐานหนึ่งไปยังพื้นหลักฐานหนึ่ง หรือจากระบบพิกัดหนึ่งไปเป็นไปอีกระบบพิกัด โดยในการทำวิจัยนี้จะใช้แปลงพิกัดที่ได้จากการคำนวณมาเป็นพิกัด UTM โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากการประมวลผลข้อมูลค่าพิกัดที่ได้จะอยู่ในพื้นหลักฐาน WGS84 ในระบบพิกัดแบบ Geodetic (Latitude, Longitude, Height) เพราะฉะนั้นเราต้องแปลงมาเป็นพื้นหลักฐาน Indian Thailand 1975 ในระบบพิกัด UTM (Easting, Northing, Height) ซึ่งองค์ประกอบของแต่ละระบบพิกัดมีดังนี้



รูปที่ 3.23 แบบจำลองของโลกแบบ Spheroid

โดยมี

a = ความยาวของกึ่งแกนหลัก (Semi major axis)

b = ความยาวของกึ่งแกนรอง (Semi minor axis)

$f = \text{ความแบน (Flattening)} = (a - b) / a$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 1 - \frac{b^2}{a^2} = 2f - f^2 \quad (3.1)$$

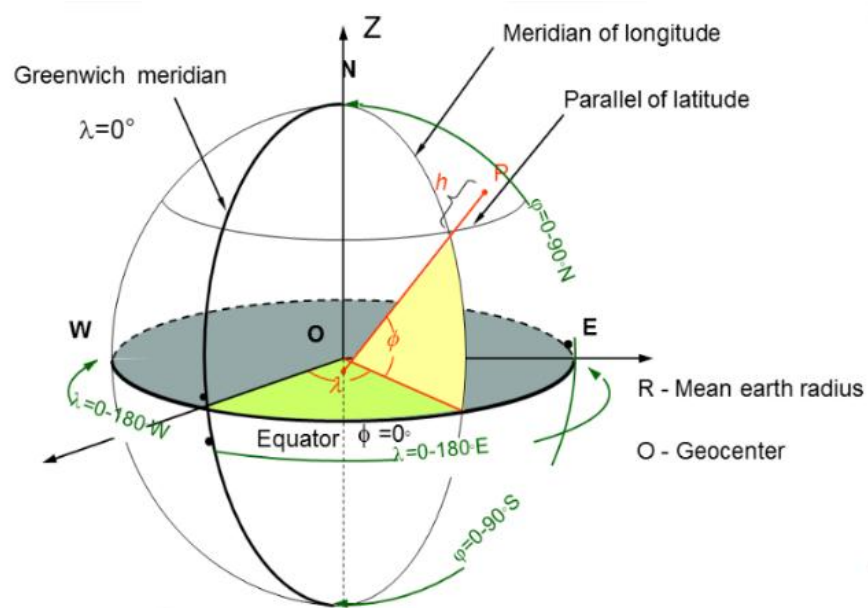
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ Ellipsoid

Reference Ellipsoid	Where used	a	1/f
Everest	India, Myanmar, Thailand	6,377,276.345	300.8
Clark 1880	France	6,378,249.17	293.465
GRS80	North America	6,378,137	298.2572222
Bessel	Central Europe	6,377,397.155	299.2
Krasovsky	Russia	6,378,245	298.3
WGS72	USA	6,378,135	298.26
WGS84	Global	6,378,137	298.25722356

ตารางที่ 3.3 ประเภท Geodetic Datum

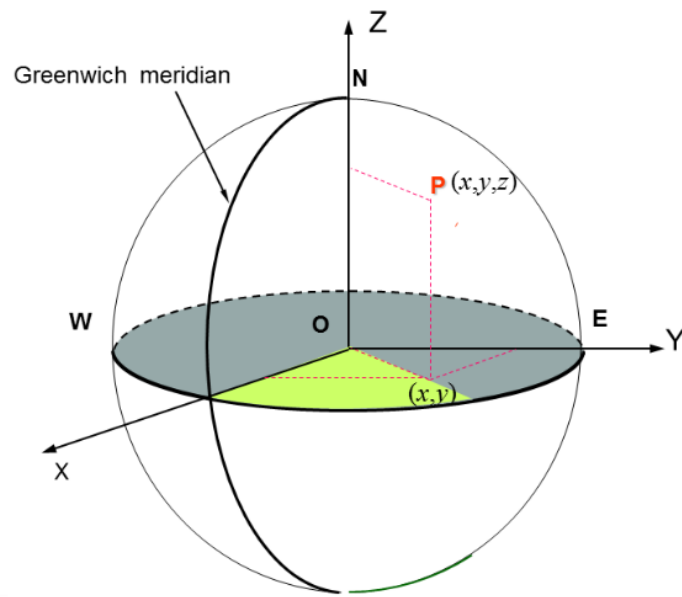
Datum	Area	Origin	Ellipsoid
WGS 1984	Global	Earth center of mass	WGS 84
Indian 1975	Thailand	Khau Sakaerang, Uthaithani	Everest 1830 (1937 Adjustment)
NAD 1983	North America, Caribbean	Earth center of mass	GRS 80
NAD 1927	North America	Meades Ranch	Clarke 1866
European 1950	Europe, Middle East, North Africa	Potsdam	International
Indian 1954	Myanmar & Thailand	Extension of Kaliapur 1937 over Myanmar and Thailand	Everest 1830 (1973 Adjustment)

Datum	Area	Origin	Ellipsoid
Indian 1960	Cambodia & Vietnam	DMA extension over Indo China of the Indian 1954	Everest 1830 (1973 Adjustment)
Lao National	Lao	Vientiane (Nongteng)	Krassowsky 1940



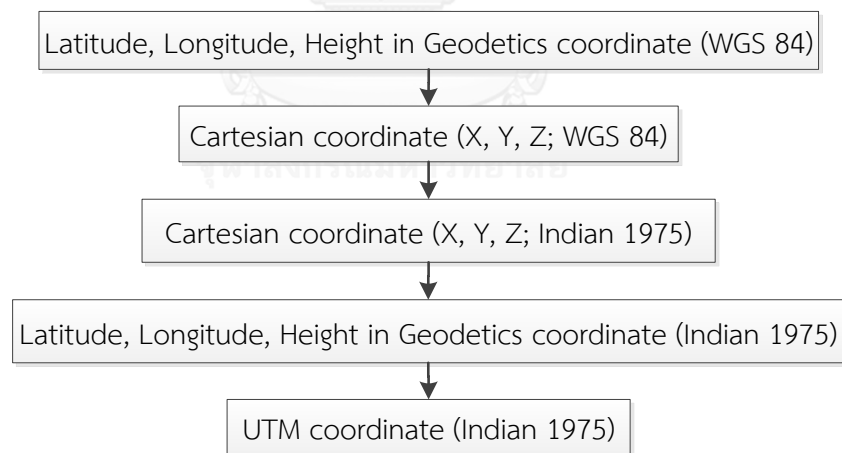
รูปที่ 3.24 แสดงระบบพิกัดแบบ Geodetic Coordinates

ที่มา: (Spatial Data Structure and Models. Lecture Documents. Assistant Prof.Sanphet Chunithipaisan, Ph.D. Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok)



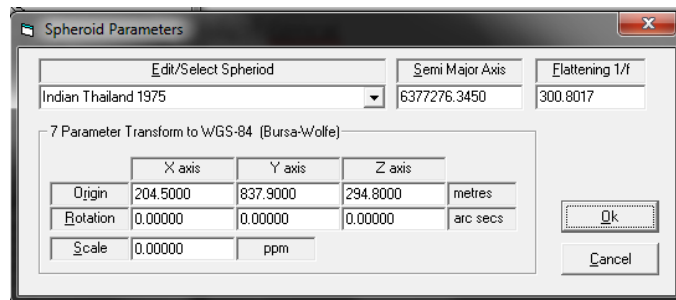
รูปที่ 3.25 แสดงระบบพิกัดแบบ ECEF (Earth-Center Earth-Fixed)

ที่มา: (Spatial Data Structure and Models. Lecture Documents. Assistant Prof.Sanphet Chunithipaisan, Ph.D. Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok)

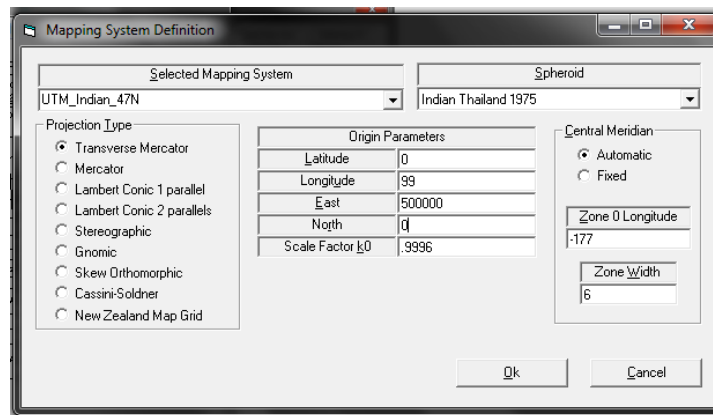


รูปที่ 3.26 แผนวาดการแปลงพิกัดจากระบบพิกัด Geodetics coordinate พื้นหลักฐาน WGS 84 ไปเป็นระบบพิกัด UTM coordinate พื้นหลักฐาน Indian 1975

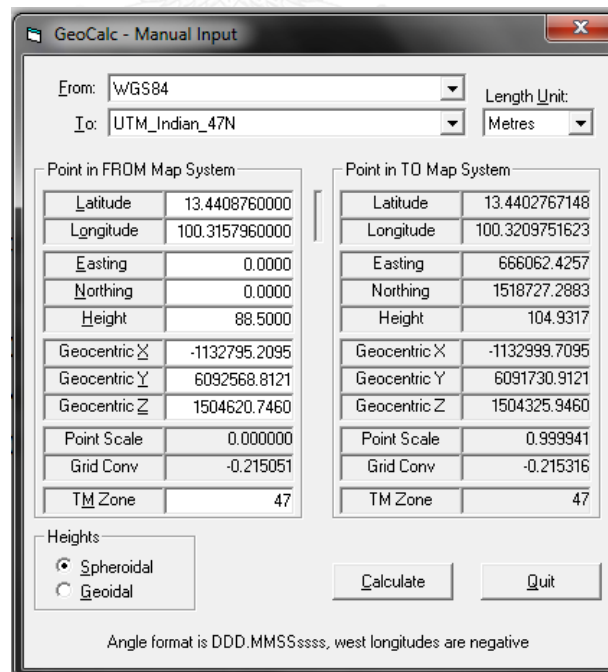
ตัวอย่าง: การแปลงค่าพิกัดในซอฟต์แวร์ Geocal



รูปที่ 3.27 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของพื้นหลักฐาน Indian 1975



รูปที่ 3.28 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบพิกัดฉาก UTM Indian Zone 47N



รูปที่ 3.29 การแปลงค่าพิกัดจาก Geodetics (WGS 84) เป็น UTM Zone 47N (Indian 1975)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

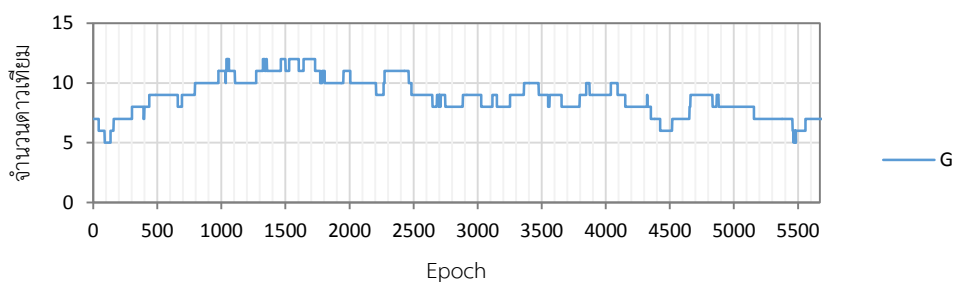
จากการศึกษาการประมวลผลข้อมูลระบบดาวเทียม GNSS ที่ประกอบด้วยระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 ในรูปแบบการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP) และ แบบสถิต (Static) โดยต่อไปนี้จะใช้สัญลักษณ์ G แทน GPS, R แทน GLONASS และ C แทน COMPASS/BeiDou-2 ซึ่งผลของการศึกษาได้แสดงในหัวข้อต่อไป

4.1 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning)

เป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิตจากสถานี CUSV ไปยังสถานี BGOK กับค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวที่สถานี BGOK โดยค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวจะมีด้วยกัน 12 ชุดได้แก่ การประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS, GPS/GLONASS, และ GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 ซึ่งแต่ละระบบก็จะแบ่งการประมวลผลออกเป็น 4 เงื่อนไขคือจะกำหนดค่ามุมสูงดาวเทียมที่แตกต่างกันได้แก่ 10° , 20° , 30° , และ 40° โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

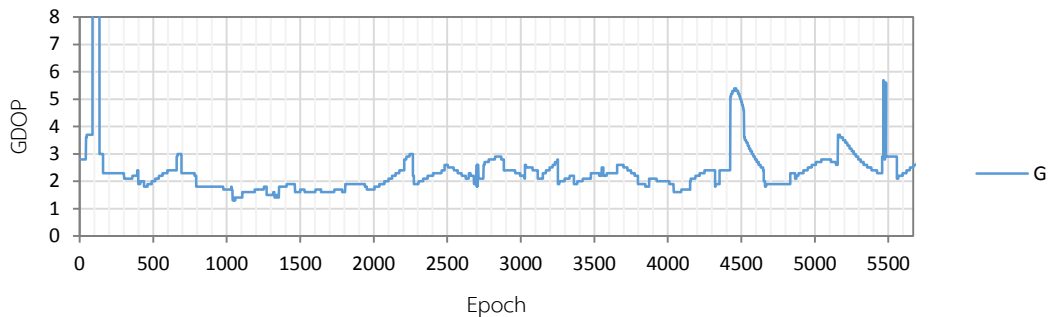
การประมวลผลข้อมูลจากสถานี CUSV ไปยังสถานี BGOK แบบสถิตด้วยข้อมูลระบบดาวเทียม GPS เพื่อเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวได้ แสดงผลของการประมวลผลในรูปที่ 4.1-4.2 และตารางที่ 4.1 ซึ่งรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงของสถานี CUSV โดยในช่วงเวลาที่มีจำนวนดาวเทียมน้อยสุดประมาณ 5 ดวง และในช่วงเวลาที่มีจำนวนดาวเทียมมากที่สุดประมาณ 12 ดวง รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นค่า GDOP ของสถานี CUSV ที่มุมสูงของการรับดาวเทียม 10° เห็นว่าค่า GDOP ส่วนมากอยู่ในระดับต่ำกว่า 3 สำหรับตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นค่า RMS และ ค่าพิกัดของสถานี BGOK ที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3

ค่ามุมสูงดาวเทียม 10°



รูปที่ 4.1 แสดงจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้ ณ สถานี CUSV เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ค่ามุมสูงดาวเทียม 10°



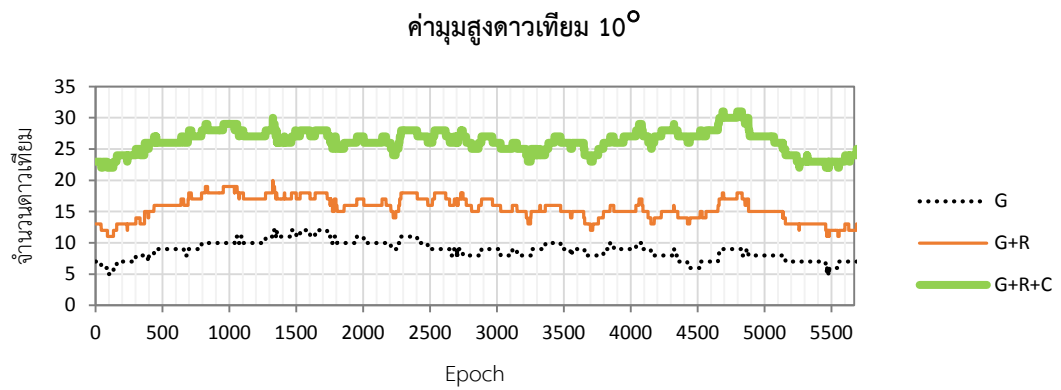
รูปที่ 4.2 แสดงค่า GDOP ที่รับวัดได้ ณ สถานี CUSV เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพิกัดของสถานี BGOK ที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิติจากสถานี CUSV

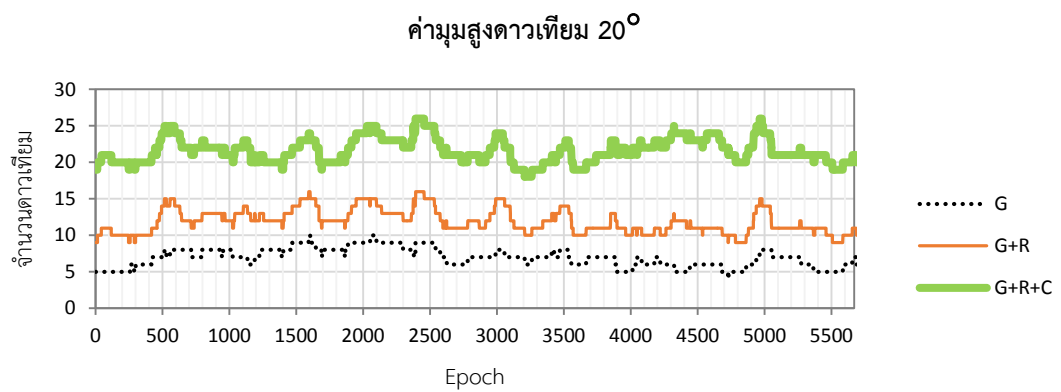
ระยะเส้นฐาน (กิโลเมตร)	RMS (เมตร)			พิกัด (เมตร)		
	ΔE	ΔN	ΔH	E	N	H
8.4	0.012	0.011	0.013	670,597.185	1,525,892.605	74.519

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่า RMS ของสถานี BGOK มีความถูกต้องในระดับเซนติเมตร

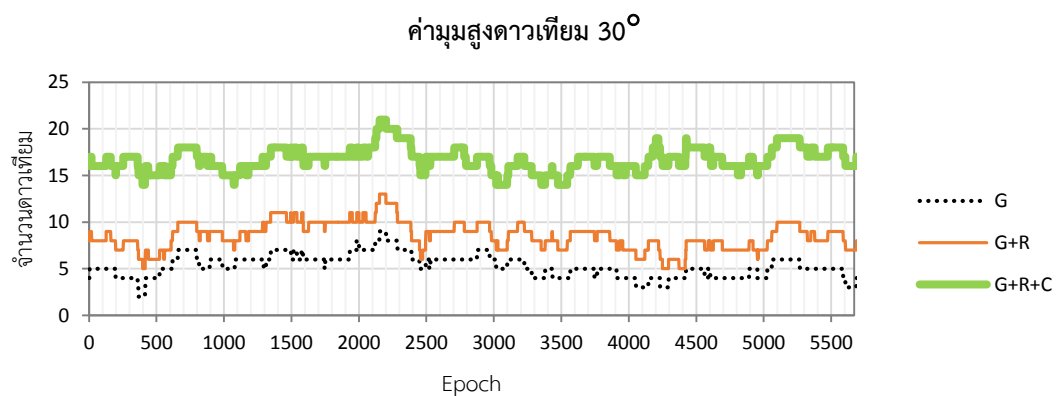
ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงผลที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวของสถานี BGOK โดยจะแสดงจำนวนดาวเทียม และค่า GDOP ที่รับวัดได้ในแต่ละระบบดาวเทียมและแต่ละเงื่อนไขของค่ามุมสูงดาวเทียมของแต่ละวันที่ทำการรับวัดจะแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1-ก.3 โดยจำนวนดาวเทียมและค่า GDOP ในแต่ละวันก็จะได้มาจากค่าเฉลี่ยของจำนวนดาวเทียมและค่า GDOP ในวันนั้น ๆ สำหรับค่าความถูกต้องทางตำแหน่งและเปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลข้อมูลจะแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.4-ก.9 โดยค่า RMS ของแต่ละค่าจะได้มาจากการนำเอาค่าตำแหน่ง E,N,H ของสถานี BGOK ที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิติในระบบพิกัด UTM มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวของแต่ละกรณีแล้วนำมาหาค่า RMS ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลข้อมูลจะเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงทุก ๆ epoch ของข้อมูลสามารถระบุตำแหน่งได้ทั้งหมดหรือไม่ ซึ่งได้มาจากซอฟต์แวร์ RTKlib 2.4.3 ที่ทำการประมวลผล หลังจากนั้นก็จะทำการหาค่าเฉลี่ยจำนวนดาวเทียมและค่า GDOP ค่าเฉลี่ยของ RMS และเปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลข้อมูลทั้งหมด 28 วัน ซึ่งสามารถดูได้ในตารางที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบเฉพาะค่า RMS ของแต่ละกรณีเพื่อให้ง่ายในการดูและสำหรับตารางที่ 4.4 จะเป็นการหาเปอร์เซ็นต์ในการปรับปรุงค่าตำแหน่งเทียบกับระบบดาวเทียม GPS ว่ามีการปรับปรุงดีขึ้นหรือว่าแย่ลงกว่าการใช้ระบบดาวเทียม GPS ระบบเดียว โดยสามารถดูรายละเอียดได้ดังนี้



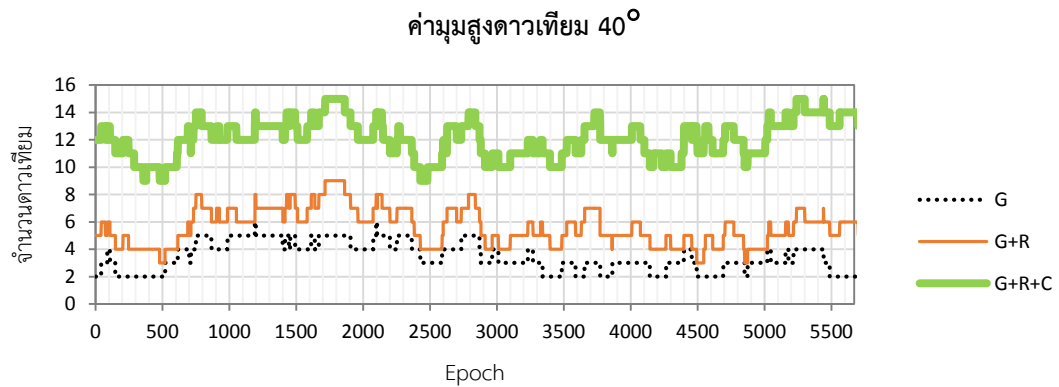
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°



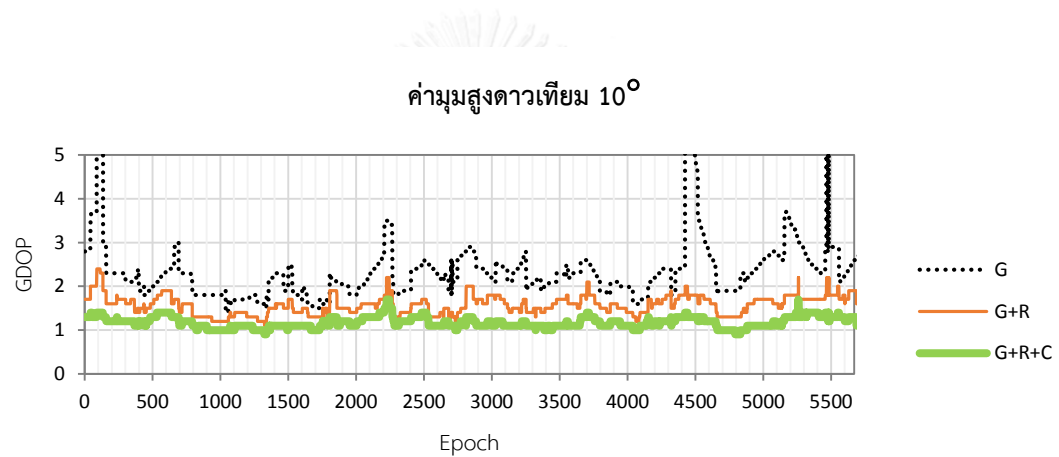
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°



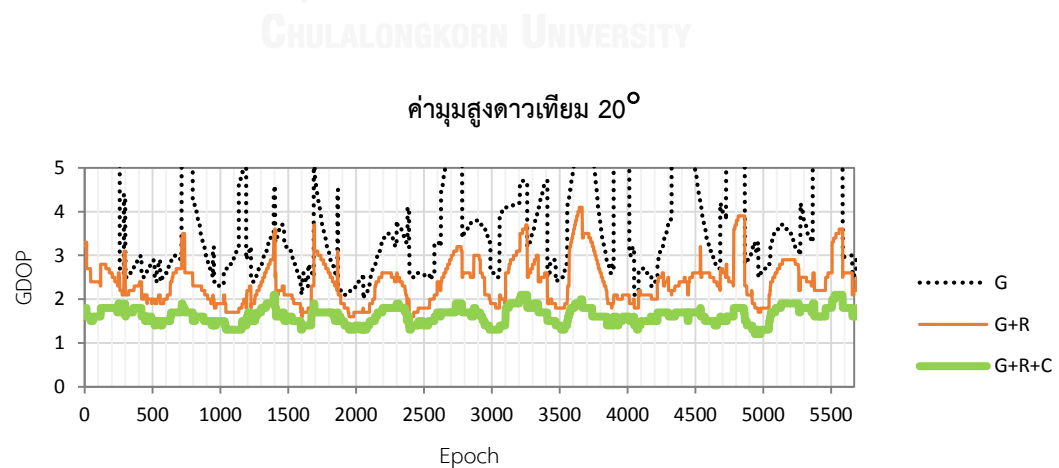
รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°



รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างจำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°

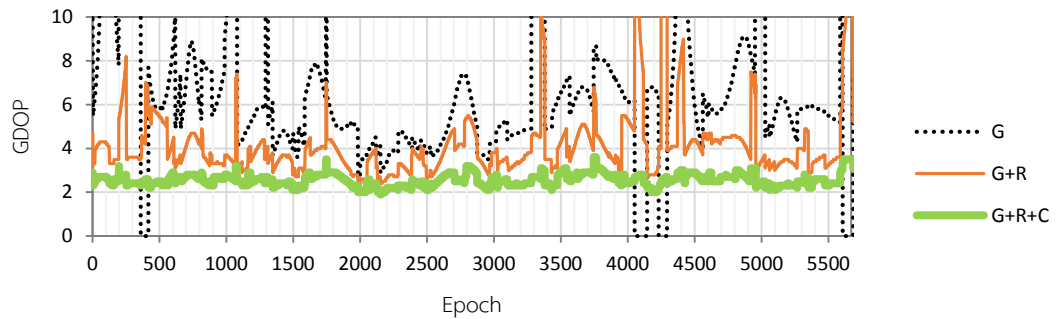


รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างค่า GDOP ที่รับวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°



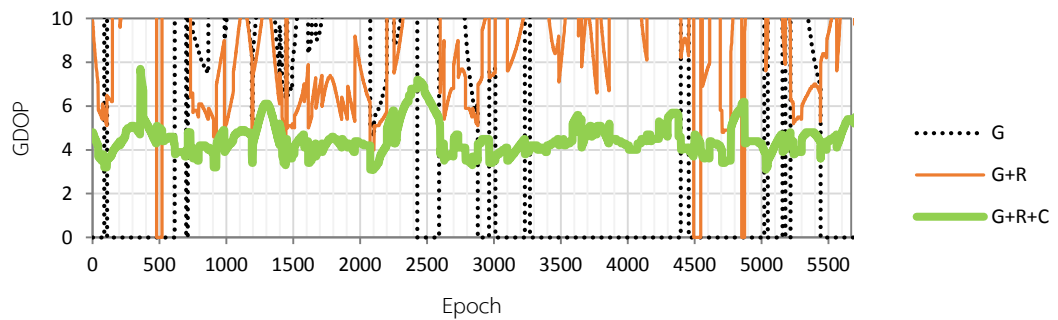
รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างค่า GDOP ที่รับวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°

ค่ามุมสูงดาวเทียม 30°



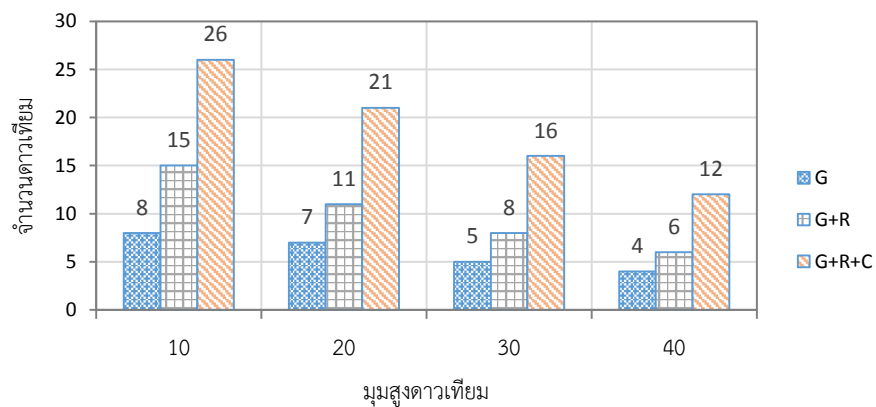
รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างค่า GDP ที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°

ค่ามุมสูงดาวเทียม 40°



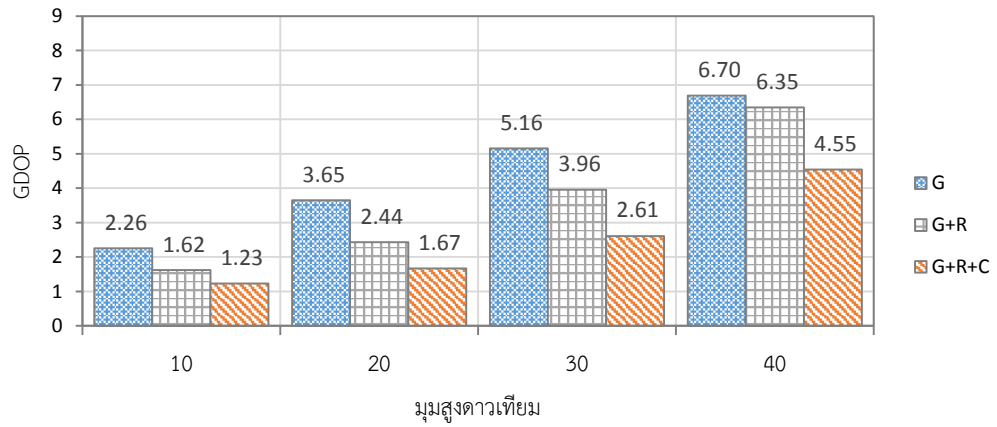
รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างค่า GDP ที่รังวัดได้ ณ วันที่ 01.07.2014 ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°

จำนวนดาวเทียมเฉลี่ย



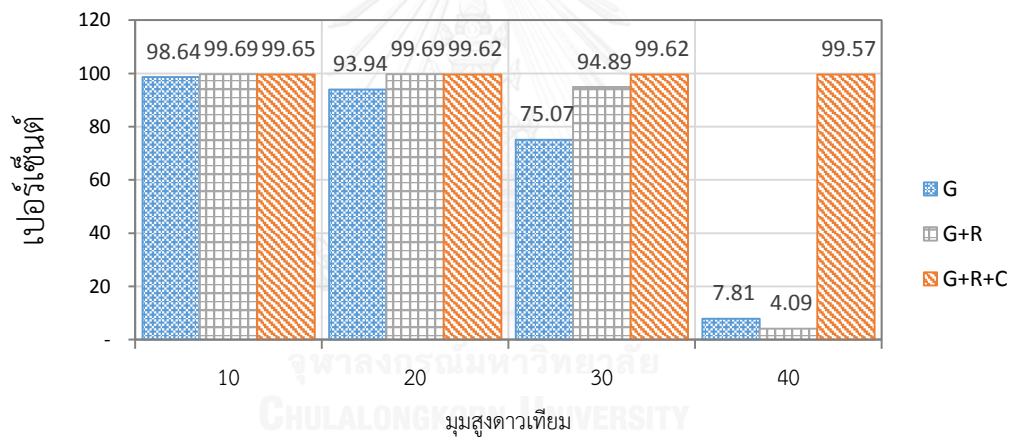
รูปที่ 4.11 สรุปจำนวนดาวเทียมเฉลี่ยทั้ง 28 วันของสถานี BGOK

ค่าเฉลี่ย GDP



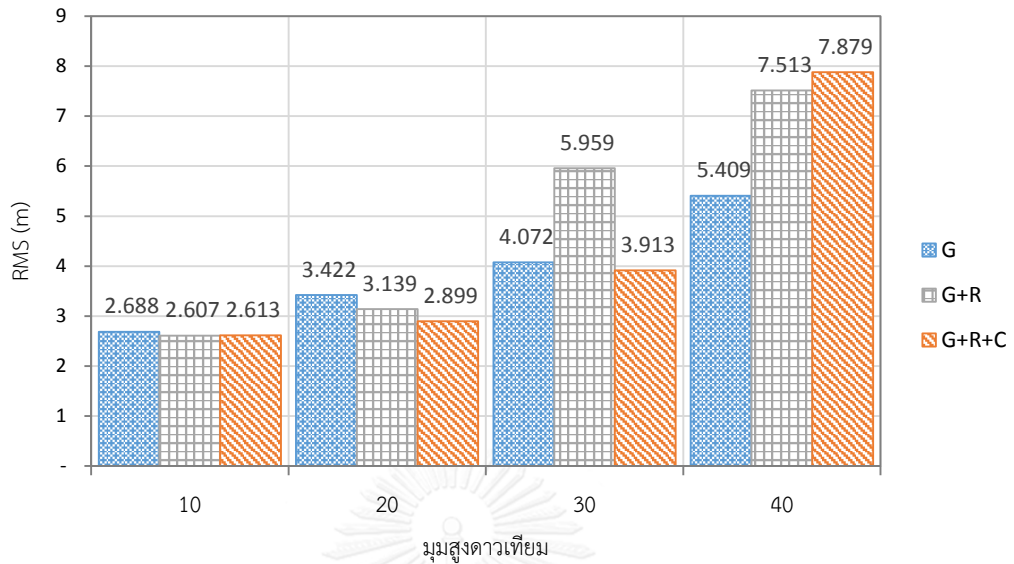
รูปที่ 4.12 สรุปค่า GDP เฉลี่ยทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK

เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยในการคำนวณหาตำแหน่ง



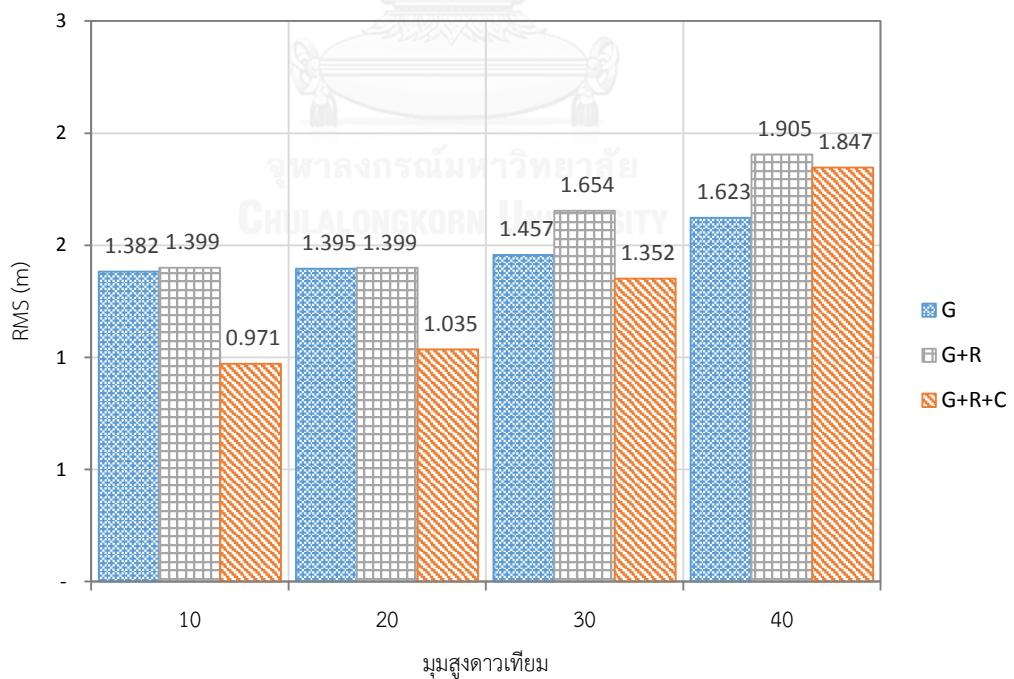
รูปที่ 4.13 สรุปเปอร์เซ็นต์การคำนวณหาตำแหน่งเฉลี่ยทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK

ค่าเฉลี่ย RMS ทางราบ



รูปที่ 4.14 สรุปค่า RMS เฉลี่ยทางราบทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK

ค่าเฉลี่ย RMS ทางตั้ง



รูปที่ 4.15 สรุปค่า RMS เฉลี่ยทางตั้งทั้ง 28 วัน ของสถานี BGOK

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าเฉลี่ยจำนวนดาวเทียม และ ค่า GDOP ของแต่ละระบบในเงื่อนไขมุมสูงดาวเทียมที่แตกต่างกัน

ระบบดาวเทียม	มุมสูงดาวเทียม 10°		มุมสูงดาวเทียม 20°		มุมสูงดาวเทียม 30°		มุมสูงดาวเทียม 40°	
	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP
G	8	2.26	7	3.65	5	5.16	4	6.70
G+R	15	1.62	11	2.44	8	3.96	6	6.35
G+R+C	26	1.23	21	1.67	16	2.61	12	4.55

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าเฉลี่ย RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของแต่ละระบบในเงื่อนไขของมุมสูงรับดาวเทียมที่แตกต่างกัน

		Error	G	G+R	G+R+C
ค่ามุมสูงดาวเทียม 10°	RMS (เมตร)	East	1.515	1.592	0.778
		North	1.249	1.206	1.165
		Height	2.688	2.607	2.613
	เปอร์เซ็นต์		98.64	99.69	99.65
ค่ามุมสูงดาวเทียม 20°	RMS (เมตร)	East	1.492	1.583	0.821
		North	1.299	1.215	1.249
		Height	3.422	3.139	2.899
	เปอร์เซ็นต์		93.94	99.69	99.61
ค่ามุมสูงดาวเทียม 30°	RMS (เมตร)	East	1.537	1.772	1.434
		North	1.377	1.535	1.270
		Height	4.072	5.959	3.913
	เปอร์เซ็นต์		75.07	94.89	99.62
ค่ามุมสูงดาวเทียม 40°	RMS (เมตร)	East	2.027	1.618	1.884
		North	1.219	2.193	1.809
		Height	5.409	7.513	7.879
	เปอร์เซ็นต์		7.81	4.09	99.57

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการประมวลผลข้อมูลด้วยระบบดาวเทียม GPS+GLONASS+COMPASS ให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุก ๆ สภาพเงื่อนไข แต่สำหรับระบบดาวเทียม GPS และ GPS+GLONASS จะให้ค่าทางตำแหน่งที่ไม่แตกต่างกันมาก และจะเห็นได้ว่าระบบดาวเทียม GPS+GLONASS+COMPASS มีเปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลหาตำแหน่งที่อยู่ในระดับเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ทุก ๆ เงื่อนไข นั่นก็แสดงว่าระบบดาวเทียม GPS+GLONASS+COMPASS จะให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีที่สุดและสามารถให้บริการได้ทุกสภาพเงื่อนไขตลอดเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับระบบดาวเทียม GPS และ GPS+GLONASS ที่มุมสูงดาวเทียม 40° จะสามารถให้บริการได้น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ทั้งวัน

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าเฉลี่ย RMS ทางราบ (Horizontal) และทางตั้ง (Vertical)

มุมสูงดาวเทียม	RMS (เมตร)					
	G		G+R		G+R+C	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
10°	1.382	2.688	1.399	2.607	0.971	2.613
20°	1.395	3.422	1.399	3.139	1.035	2.899
30°	1.457	4.072	1.654	5.959	1.352	3.913
40°	1.623	5.409	1.905	7.513	1.847	7.879

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย T-Test สำหรับการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว

4.1.1.1 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ

GPS/GLONASS

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°

Elevation mask 10°					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.382	1.399	Mean	2.688	2.464
Variance	0.044	0.045	Variance	0.488	0.305
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27

Elevation mask 10°					
Horizontal			Vertical		
F	0.986		F	1.600	
P(F<=f) one-tail	0.485	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.114	>0.025
F Critical one-tail	0.525		F Critical one-tail	1.905	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.382	1.399	Mean	2.688	2.464
Variance	0.044	0.045	Variance	0.488	0.305
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance	0.045		Pooled Variance	0.396	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	54		df	54	
t Stat	-0.305		t Stat	1.335	
P(T<=t) one-tail	0.381	>0.05	P(T<=t) one-tail	0.094	>0.05
t Critical one-tail	1.674		t Critical one-tail	1.674	
P(T<=t) two-tail	0.761		P(T<=t) two-tail	0.187	
t Critical two-tail	2.005		t Critical two-tail	2.005	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 10° ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10° มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°

Elevation mask 20°					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.395	1.399	Mean	3.422	3.139
Variance	0.049	0.040	Variance	0.612	0.304
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27

Elevation mask 20 °					
Horizontal			Vertical		
F	1.243		F	2.010	
P(F<=f) one-tail	0.288	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.038	>0.025
F Critical one-tail	1.905		F Critical one-tail	1.905	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.395	1.399	Mean	3.422	3.139
Variance	0.049	0.040	Variance	0.612	0.304
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance	0.045		Pooled Variance	0.458	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	54		df	54	
t Stat	-0.062		t Stat	1.563	
P(T<=t) one-tail	0.475	>0.05	P(T<=t) one-tail	0.062	>0.05
t Critical one-tail	1.674		t Critical one-tail	1.674	
P(T<=t) two-tail	0.951		P(T<=t) two-tail	0.124	
t Critical two-tail	2.005		t Critical two-tail	2.005	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 20° ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20° มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°

Elevation mask 30					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.457	1.654	Mean	4.072	4.745
Variance	0.053	0.083	Variance	0.810	0.938
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27

Elevation mask 30					
Horizontal			Vertical		
F	0.641		F	0.864	
P(F<=f) one-tail	0.127	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.353	>0.025
F Critical one-tail	0.525		F Critical one-tail	0.525	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.457	1.654	Mean	4.072	4.745
Variance	0.053	0.083	Variance	0.810	0.938
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance	0.068		Pooled Variance	0.874	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	54		df	54	
t Stat	-2.812		t Stat	-2.691	
P(T<=t) one-tail	0.003	<0.05	P(T<=t) one-tail	0.005	<0.05
t Critical one-tail	1.674		t Critical one-tail	1.674	
P(T<=t) two-tail	0.007		P(T<=t) two-tail	0.009	
t Critical two-tail	2.005		t Critical two-tail	2.005	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 30° ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30° มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°

Elevation mask 40°					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.677	1.870	Mean	5.516	7.513
Variance	0.102	0.305	Variance	3.239	5.731
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27

Elevation mask 40°					
Horizontal			Vertical		
F	0.336		F	0.565	
P(F<=f) one-tail	0.003	<0.025	P(F<=f) one-tail	0.072	>0.025
F Critical one-tail	0.525		F Critical one-tail	0.525	
t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	1.677	1.870	Mean	5.516	7.513
Variance	0.102	0.305	Variance	3.239	5.731
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance			Pooled Variance	4.485101	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	43		df	54	
t Stat	-1.603		t Stat	-3.527	
P(T<=t) one-tail	0.058	>0.05	P(T<=t) one-tail	0.00043	<0.05
t Critical one-tail	1.681		t Critical one-tail	1.674	
P(T<=t) two-tail	0.116		P(T<=t) two-tail	0.001	
t Critical two-tail	2.017		t Critical two-tail	2.005	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 40° ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบมีค่าน้อย (น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40° มีความแปรปรวนต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ ส่วนค่า P(F<=t) one-tail ของทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40° มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางตั้งมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40° มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ

4.1.1.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10°

Elevation mask 10°					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.382	0.971	Mean	2.688	2.613
Variance	0.044	0.054	Variance	0.488	0.470
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27
F	0.815		F	1.038	
P(F<=f) one-tail	0.299	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.461	>0.025
F Critical one-tail	0.525		F Critical one-tail	1.905	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.382	0.971	Mean	2.688	2.613
Variance	0.044	0.054	Variance	0.488	0.470
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance	0.049		Pooled Variance	0.479	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	54		df	54	
t Stat	6.915891		t Stat	0.405	
P(T<=t) one-tail	2.82E-09	<0.05	P(T<=t) one-tail	0.343	>0.05
t Critical one-tail	1.673565		t Critical one-tail	1.674	
P(T<=t) two-tail	5.64E-09		P(T<=t) two-tail	0.687	
t Critical two-tail	2.004879		t Critical two-tail	2.005	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 10° ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10° มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ สำ

ห้ค่า $P(T \leq t)$ one-tail ของทางดิ่งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 10° มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20°

Elevation mask 20°					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.395	1.035	Mean	3.422	2.899
Variance	0.049	0.080	Variance	0.612	0.427
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27
F	0.615		F	1.431	
P(F<=f) one-tail	0.106	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.179	>0.025
F Critical one-tail	0.525		F Critical one-tail	1.905	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.395	1.035	Mean	3.422	2.899
Variance	0.049	0.080	Variance	0.612	0.427
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance	0.065		Pooled Variance	0.519614	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	54		df	54	
t Stat	5.296366		t Stat	2.716	
P(T<=t) one-tail	1.11E-06	<0.05	P(T<=t) one-tail	0.004	<0.05
t Critical one-tail	1.673565		t Critical one-tail	1.674	
P(T<=t) two-tail	2.22E-06		P(T<=t) two-tail	0.009	
t Critical two-tail	2.004879		t Critical two-tail	2.005	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 20° ค่า $P(F \leq t)$ one-tail ของทางราบและทางดิ่งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า $P(T \leq t)$ one-tail ของทางราบและทางดิ่งมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่งของ

ระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 20° มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30°

Elevation mask 30°					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.457	1.352	Mean	4.072	4.020623
Variance	0.053	0.105	Variance	0.809	1.075454
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27
F	0.508		F	0.753	
P(F<=f) one-tail	0.042	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.233	>0.025
F Critical one-tail	0.525		F Critical one-tail	0.525	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.457	1.352	Mean	4.072	4.021
Variance	0.053	0.105	Variance	0.810	1.075
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance	0.079		Pooled Variance	0.942	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	54		df	54	
t Stat	1.402		t Stat	0.199	
P(T<=t) one-tail	0.083	>0.05	P(T<=t) one-tail	0.421	>0.05
t Critical one-tail	1.674		t Critical one-tail	1.674	
P(T<=t) two-tail	0.167		P(T<=t) two-tail	0.843	
t Critical two-tail	2.005		t Critical two-tail	2.005	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 30° ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของ

ระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 30° มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40°

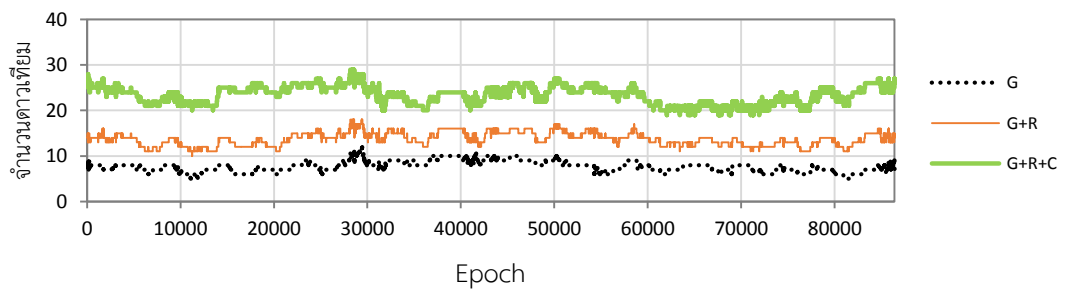
Elevation mask 40°					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.677	1.847	Mean	5.516	7.879
Variance	0.102	0.071	Variance	3.239	2.318
Observations	28	28	Observations	28	28
df	27	27	df	27	27
F	1.447		F	1.397	
P(F<=f) one-tail	0.172	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.194	>0.025
F Critical one-tail	1.905		F Critical one-tail	1.904	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	1.677	1.847	Mean	5.516	7.879
Variance	0.102	0.071	Variance	3.239	2.318
Observations	28	28	Observations	28	28
Pooled Variance	0.086		Pooled Variance	2.778	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	54		df	54	
t Stat	-2.165		t Stat	-5.30322	
P(T<=t) one-tail	0.017	<0.05	P(T<=t) one-tail	1.09E-06	<0.05
t Critical one-tail	1.674		t Critical one-tail	1.673565	
P(T<=t) two-tail	0.035		P(T<=t) two-tail	2.17E-06	
t Critical two-tail	2.005		t Critical two-tail	2.004879	

ผลลัพธ์ที่ได้ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/ COMPASS สำหรับค่าตำแหน่งด้วยมุมสูง 40° ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40° มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS /COMPASS ด้วยมุมสูงดาวเทียม 40° มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ

4.2 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประมวลผลแบบสถิต (Static)

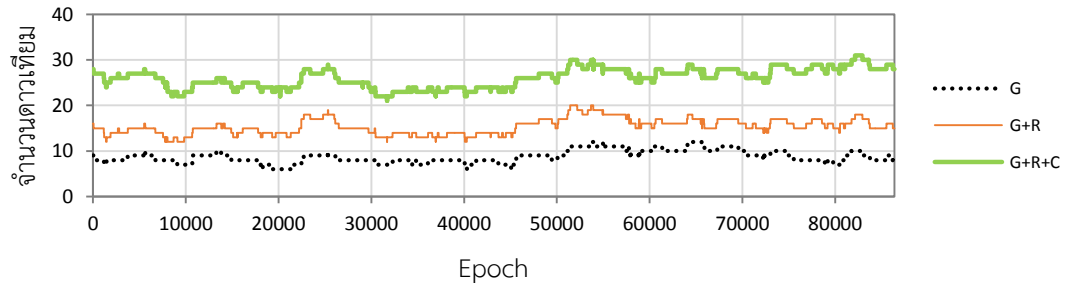
ทำการประมวลผลข้อมูลเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อน โดยจะเริ่มประมวลผลจากสถานี SV01, DPT9 และ LAND ซึ่งมีระยะเส้นฐาน 3.8, 6.7 และ 23.2 กิโลเมตรตามลำดับ ด้วยระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 ในรูปแบบสถิต โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นจำนวนดาวเทียม, ค่า GDOP และค่า พิกัดของตำแหน่งที่ประมวลผลได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

จำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้จากสถานี SV01 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



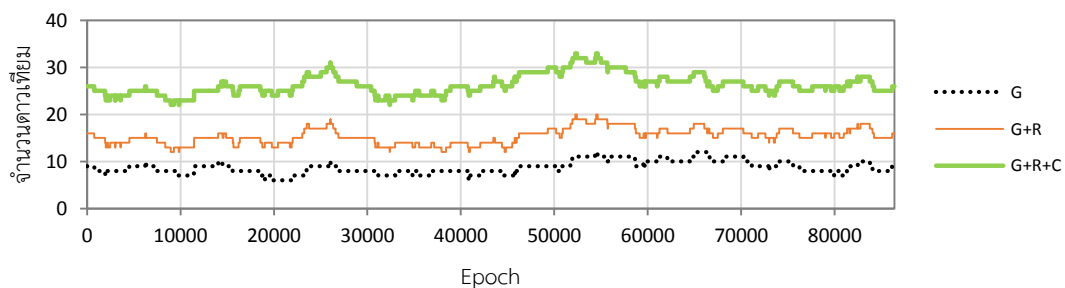
รูปที่ 4.16 แสดงจำนวนดาวเทียมของสถานี SV01

จำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้จากสถานี DPT9 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



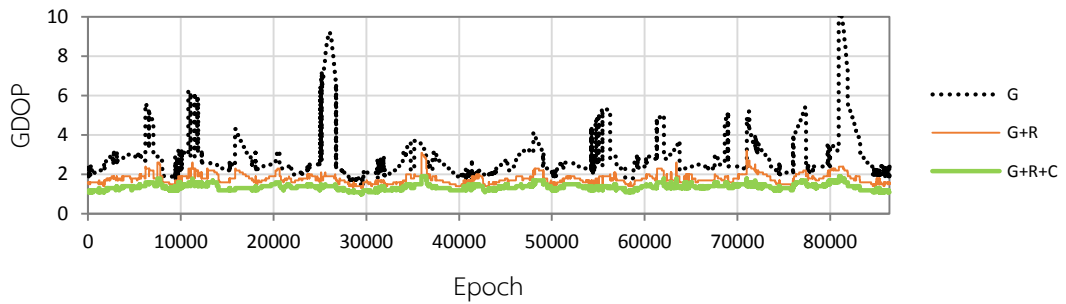
รูปที่ 4.17 แสดงจำนวนดาวเทียมของสถานี DPT9

จำนวนดาวเทียมที่รับวัดได้จากสถานี LAND เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



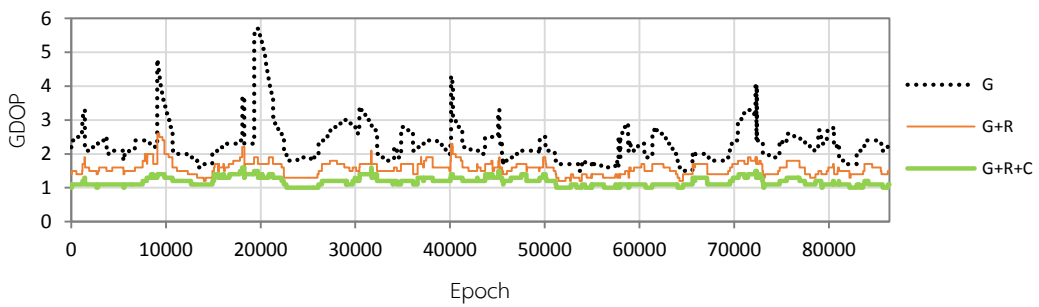
รูปที่ 4.18 แสดงจำนวนดาวเทียมของสถานี LAND

ค่า GDOP ที่รับวัดได้จากสถานี SV01 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



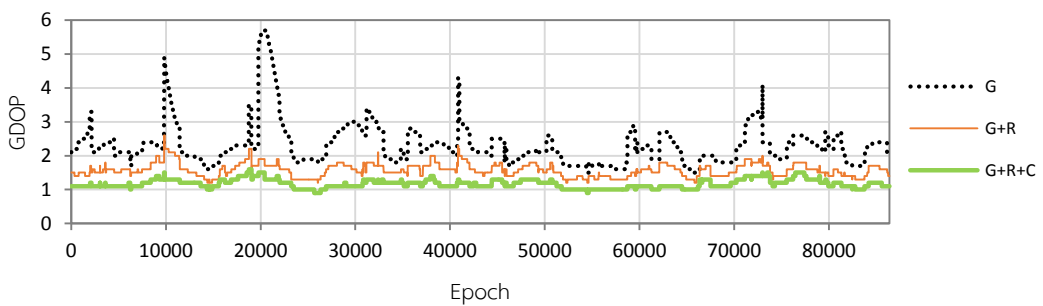
รูปที่ 4.19 แสดงค่า GDOP ของสถานี SV01

ค่า GDOP ที่รับวัดได้จากสถานี DPT9 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

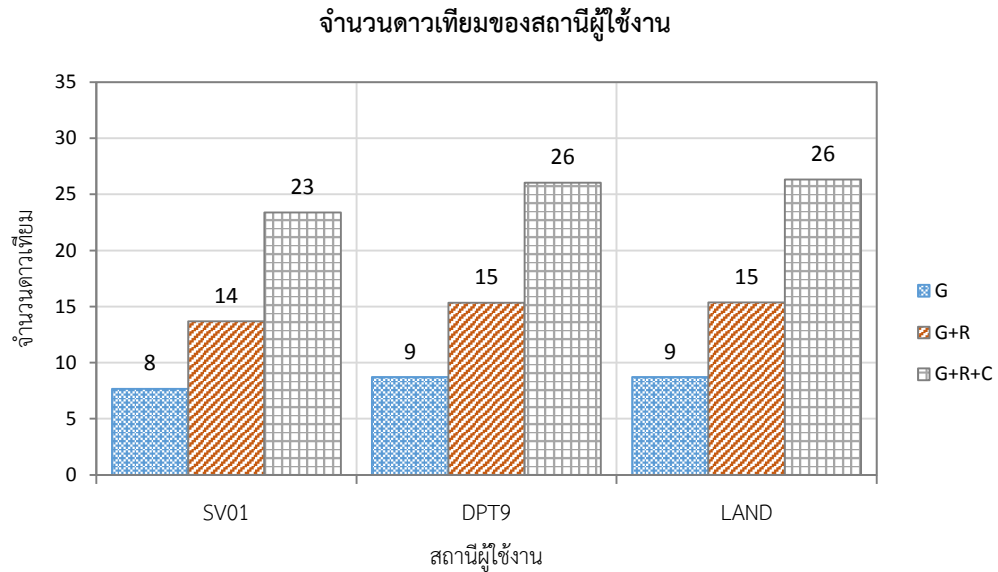


รูปที่ 4.20 แสดงค่า GDOP ของสถานี DPT9

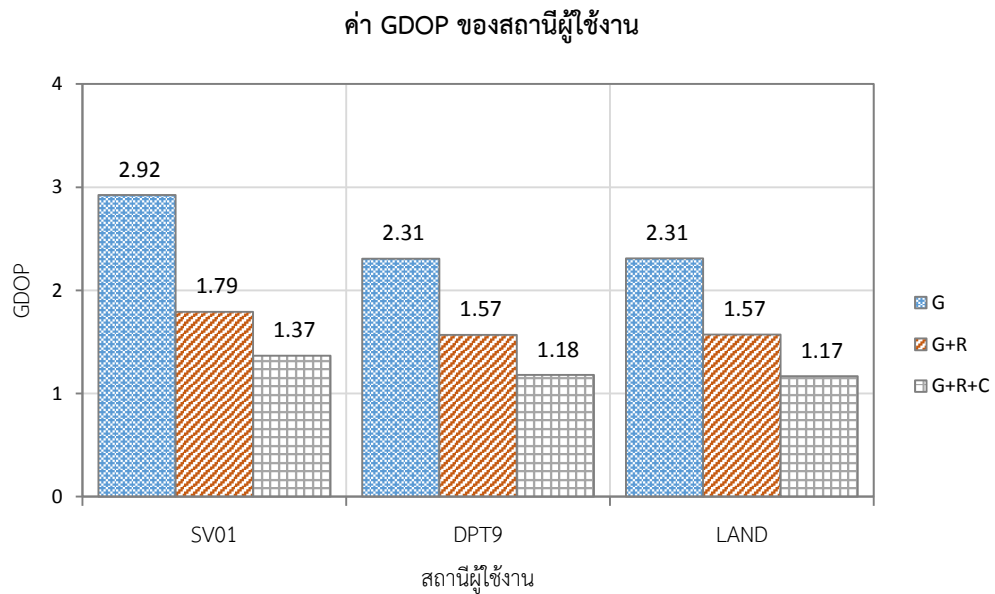
ค่า GDOP ที่รับวัดได้จากสถานี LAND เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.21 แสดงค่า GDOP ของสถานี LAND



รูปที่ 4.22 สรุปจำนวนดาวเทียมเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 สรุปค่า GDOP เฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

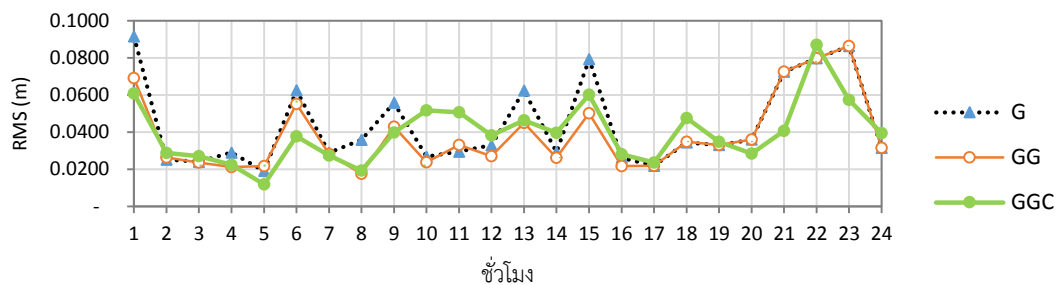
จากรูปที่ 4.30 จะสังเกตเห็นว่าจำนวนดาวเทียมของแต่ละสถานีจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS ที่มีจำนวนดาวเทียมเฉลี่ยมากที่สุดถึง 26 ดวงด้วยกัน และจากรูปที่ 4.31 ค่า GDOP เฉลี่ยของทุก ๆ สถานีผู้ใช้งานก็ลดน้อยลงตามลำดับซึ่งจะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนดาวเทียมโดยเฉพาะระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS จะให้ค่า GDOP ที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.13 ค่าพิกัดของแต่ละสถานีที่ทำการประมวลผลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

สถานี	ระยะเส้นฐาน (กิโลเมตร)	ระบบดาวเทียม	พิกัด (เมตร)		
			Easting	Northing	Height
SV01	3.8	GPS/GLONASS/COMPASS	666012.285	1518691.667	1.270
DPT9	6.7	GPS/GLONASS/COMPASS	670416.563	1521082.924	52.389
LAND	23.2	GPS/GLONASS/COMPASS	666713.500	1538293.710	27.038

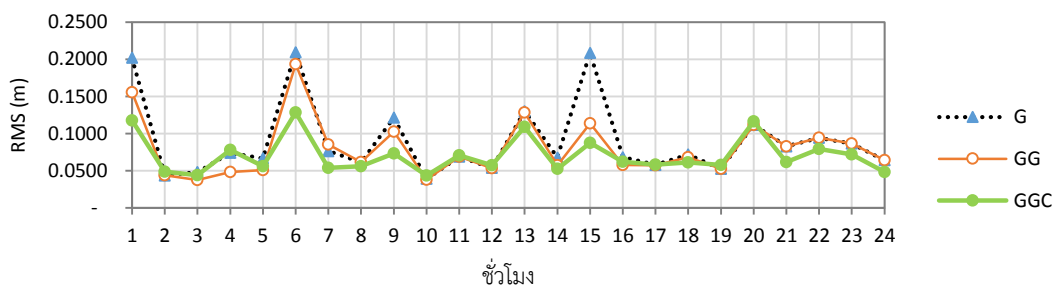
ต่อมาจะเป็นผลของการประมวลผลข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมงของแต่ละสถานี ผู้ใช้งาน โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นค่า RMS ของแต่ละระบบดาวเทียมในแต่ละเส้นฐานโดยค่า RMS จะแสดงในรูปแบบแผนภูมิ และตาราง โดยตารางจะอยู่ใน ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 – ข.3 ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผล 24 ชั่วโมง ดังนี้

เส้นฐาน 3.8 กิโลเมตร สถานี SV01



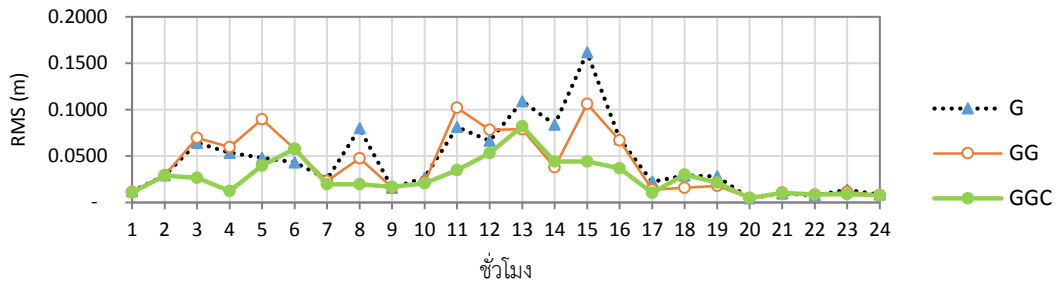
รูปที่ 4.24 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี SV01 ทางราบทุก ๆ 1 ชั่วโมง

เส้นฐาน 3.8 กิโลเมตร สถานี SV01



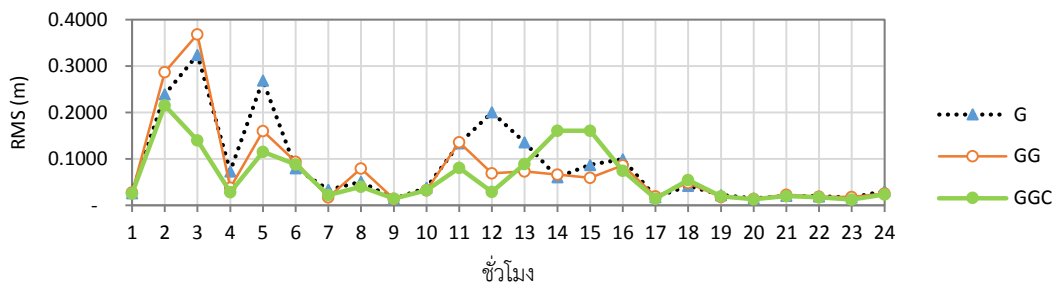
รูปที่ 4.25 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี SV01 ทางตั้งทุก ๆ 1 ชั่วโมง

เส้นฐาน 6.7 กิโลเมตร สถานี DPT9



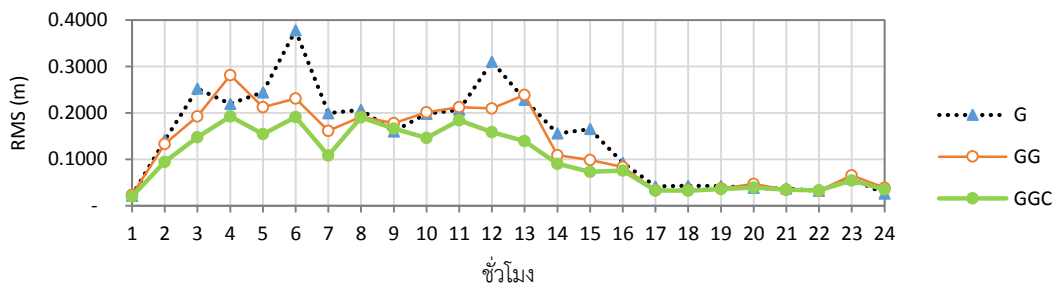
รูปที่ 4.26 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี DPT9 ทางราบทุก ๆ 1 ชั่วโมง

เส้นฐาน 6.7 กิโลเมตร สถานี DPT9



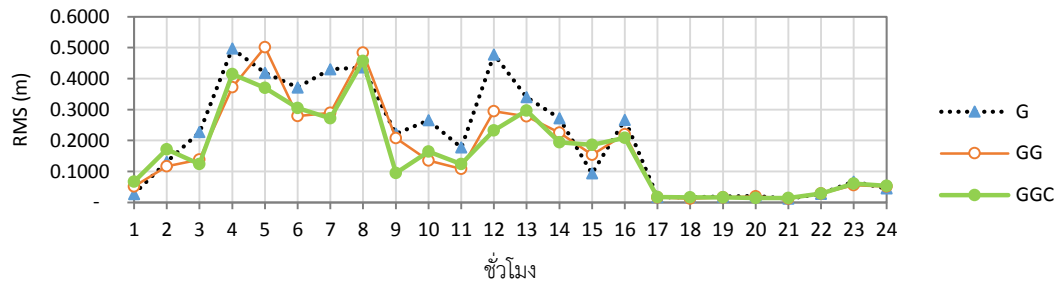
รูปที่ 4.27 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี DPT9 ทางตั้งทุก ๆ 1 ชั่วโมง

เส้นฐาน 23.2 กิโลเมตร สถานี LAND



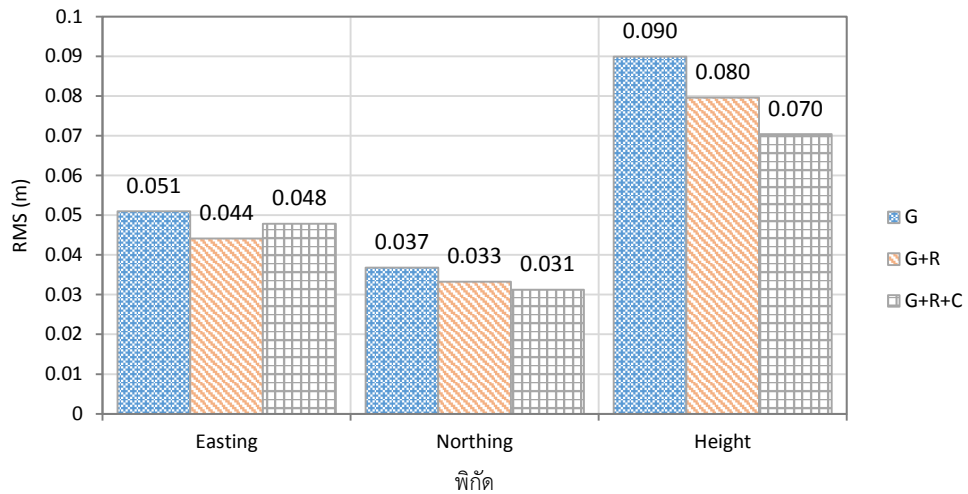
รูปที่ 4.28 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี LAND ทางราบทุก ๆ 1 ชั่วโมง

ค่าความถูกต้องตำแหน่งทางดิ่ง สถานี LAND



รูปที่ 4.29 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี LAND ทางดิ่งทุก ๆ 1 ชั่วโมง

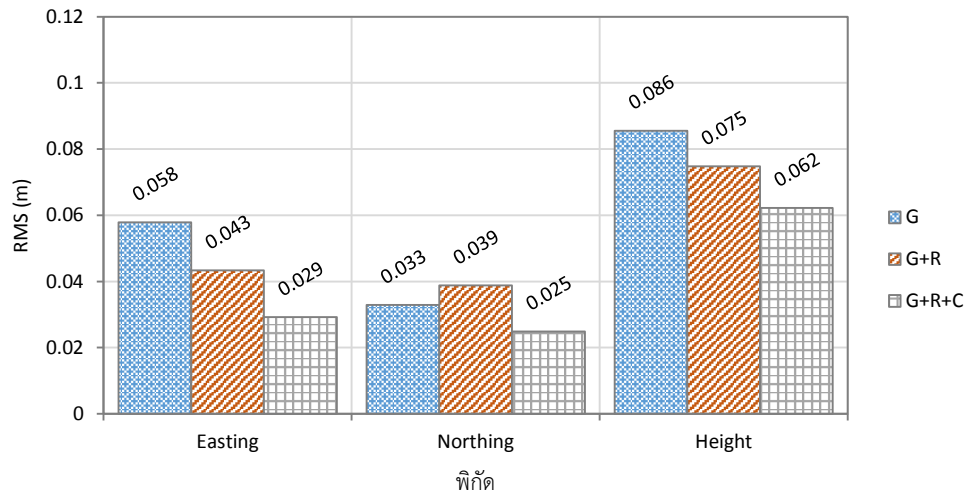
เส้นฐาน 3.8 กิโลเมตร สถานี SV01



รูปที่ 4.30 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานี SV01 ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นค่าความถูกต้องทางตำแหน่งเฉลี่ยของสถานี SV01 ที่ได้ทำการประมวลผลข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง ซึ่งการประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPAS จะให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ดีที่สุด

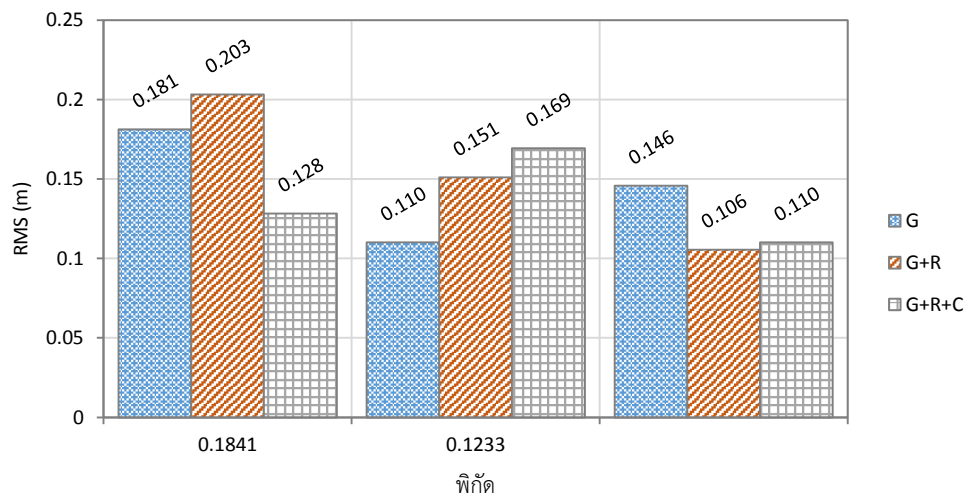
เส้นฐาน 6.7 กิโลเมตร สถานี DPT9



รูปที่ 4.31 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานี DPT9 ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

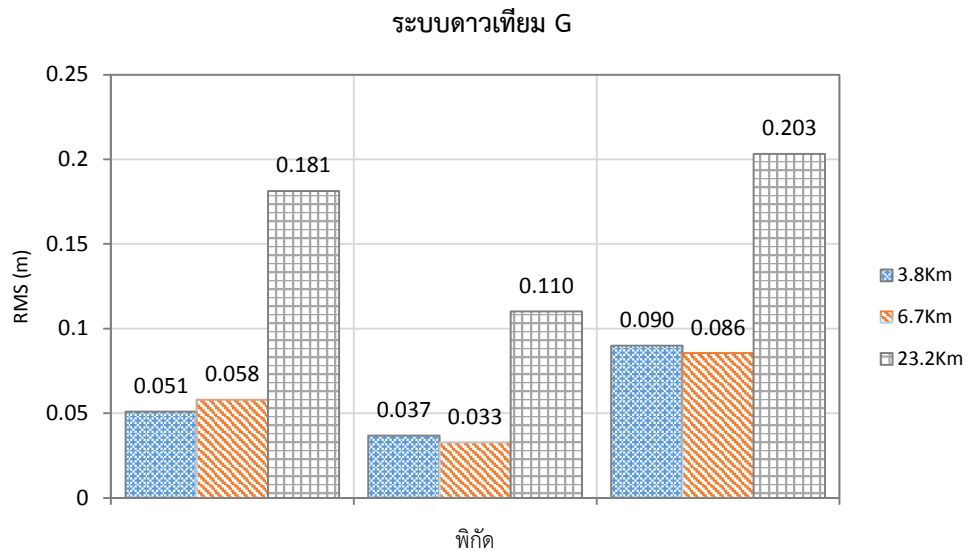
จากรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นค่าความถูกต้องทางตำแหน่งเฉลี่ยของสถานี DPT9 ที่มีระยะเส้นฐานในการประมวลผล 6.7 กิโลเมตร โดยทำการประมวลผลข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง ซึ่งระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS จะให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ดีที่สุด

เส้นฐาน 23.2 กิโลเมตร สถานี LAND

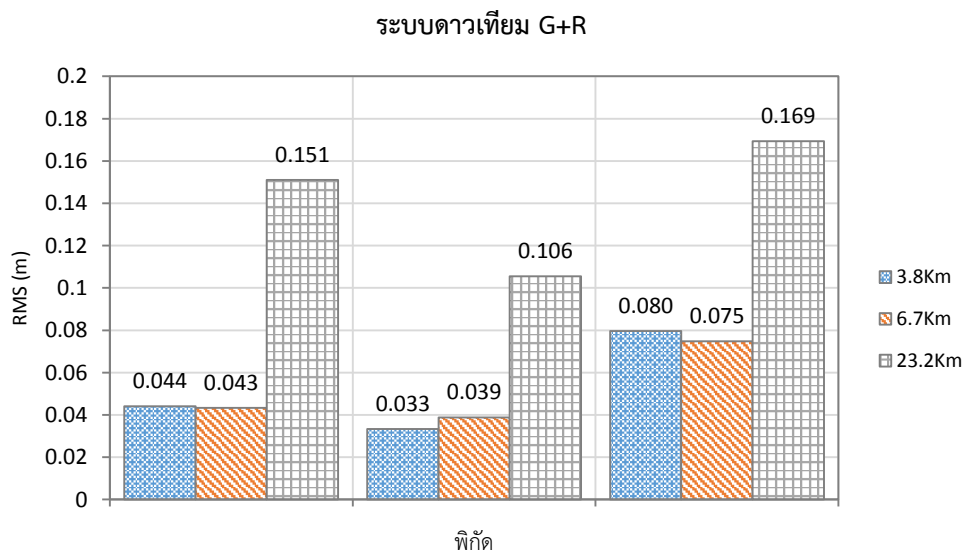


รูปที่ 4.32 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานี LAND ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

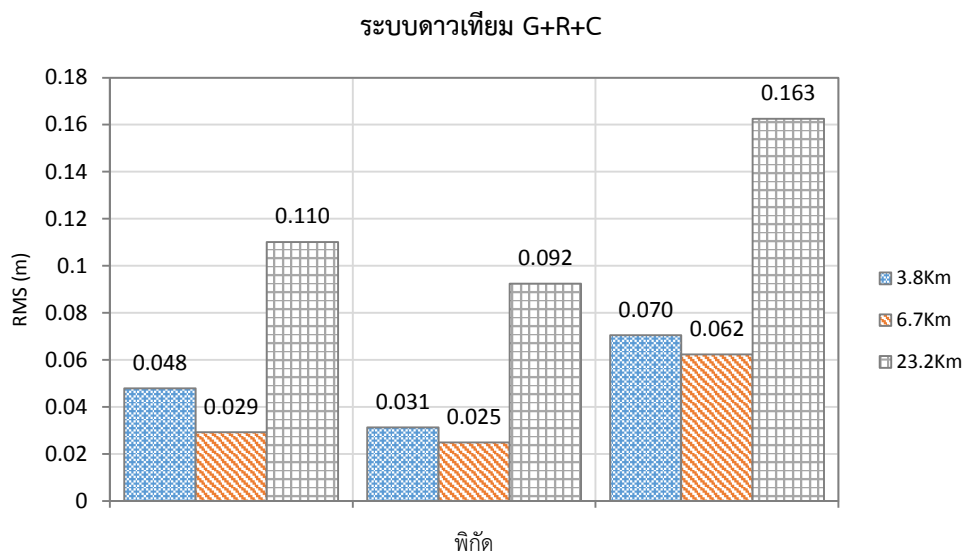
จากรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นค่าความถูกต้องทางตำแหน่งเฉลี่ยของสถานี LAND ที่มีระยะเส้นฐานในการประมวลผล 23.2 กิโลเมตร โดยทำการประมวลผลข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง ซึ่งระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS จะให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ดีที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 4.33 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานที่ประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS จากรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นการประมวลผลข้อมูลด้วยระบบดาวเทียม GPS ที่ระยะเส้นฐานที่แตกต่างกันโดยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจะลดลงตามความยาวของเส้นฐาน



รูปที่ 4.34 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานที่ประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS จากรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นการประมวลผลข้อมูลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS ที่ระยะเส้นฐานที่แตกต่างกันโดยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจะลดลงเมื่อระยะของเส้นฐานยาวขึ้น



รูปที่ 4.35 สรุปค่า RMS พิกัดเฉลี่ยของสถานีผู้ใช้งานที่ประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS

จากรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นการประมวลผลข้อมูลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS โดยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับระยะของเสัรฐาน

ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงผลค่าเฉลี่ย RMS ของแต่ละสถานีผู้ใช้งานที่ได้จากการประมวลผลทุก ๆ 1 ชั่วโมงในรูปแบบตาราง พร้อมทั้งแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS เทียบกับระบบดาวเทียม GPS ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.14 สรุปค่า RMS เฉลี่ยของแต่ละสถานีโดยการประมวลผลทุก ๆ 1 ชั่วโมง

สถานี	RMS (เมตร)					
	G		G+R		G+R+C	
	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง
SV01	0.044	0.090	0.039	0.080	0.040	0.070
DPT9	0.045	0.086	0.041	0.075	0.027	0.062
LAND	0.146	0.203	0.128	0.169	0.101	0.163

จากตารางที่ 4.21 จะเห็นว่า การประมวลผลข้อมูลที่ใช้เวลาในการรังวัดที่นานกว่าจะให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่าเช่น การประมวลผลข้อมูลที่รังวัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีกว่าการประมวลผลแบบ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.15 สรุปค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงค่าตำแหน่งของระบบดาวเทียม GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS เทียบกับระบบดาวเทียม GPS โดยการประมวลผลทุก ๆ 1 ชั่วโมง

สถานี	เปอร์เซ็นต์			
	G+R		G+R+C	
	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง
SV01	ดีขึ้น 11.87	ดีขึ้น 11.50	ดีขึ้น 9.98	ดีขึ้น 27.72
DPT9	ดีขึ้น 9.57	ดีขึ้น 12.64	ดีขึ้น 40.44	ดีขึ้น 37.50
LAND	ดีขึ้น 11.96	ดีขึ้น 16.65	ดีขึ้น 30.52	ดีขึ้น 25.02
เฉลี่ย	ดีขึ้น 11.14	ดีขึ้น 13.60	ดีขึ้น 26.98	ดีขึ้น 30.08

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย T-Test สำหรับการหาตำแหน่งแบบสถิติ

4.2.1.1 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี SV01

SV01					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	0.0439	0.0387	Mean	0.090	0.080
Variance	0.0005	0.0004	Variance	0.003	0.001
Observations	24	24	Observations	24	24
df	23	23	df	23	23
F	1.3206		F	1.6977	
P(F<=f) one-tail	0.2551	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.1060	>0.025
F Critical one-tail	2.0144		F Critical one-tail	2.0144	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	0.044	0.039	Mean	0.090	0.080
Variance	0.001	0.000	Variance	0.003	0.001

SV01					
Horizontal			Vertical		
Observations	24	24	Observations	24	24
Pooled Variance	0.00047		Pooled Variance	0.0020	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	46		df	46	
t Stat	0.837		t Stat	0.797	
P(T<=t) one-tail	0.204	>0.05	P(T<=t) one-tail	0.215	>0.05
t Critical one-tail	1.679		t Critical one-tail	1.679	
P(T<=t) two-tail	0.407		P(T<=t) two-tail	0.429	
t Critical two-tail	2.013		t Critical two-tail	2.013	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS สำหรับค่าตำแหน่งที่สถานี SV01 ค่า $P(F \leq t)$ one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ที่สถานี SV01 มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า $P(T \leq t)$ one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ที่สถานี SV01 มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี DPT9

DPT9					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	0.0454	0.0410	Mean	0.0856	0.0748
Variance	0.0015	0.0011	Variance	0.0078	0.0077
Observations	24	24	Observations	24	24
df	23	23	df	23	23
F	1.357		F	1.012	
P(F<=f) one-tail	0.235	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.489	>0.025
F Critical one-tail	2.014		F Critical one-tail	2.014	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	0.045	0.041	Mean	0.086	0.075
Variance	0.001	0.001	Variance	0.008	0.008
Observations	24	24	Observations	24	24

DPT9					
Horizontal			Vertical		
Pooled Variance	0.0013		Pooled Variance	0.008	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	46		df	46	
t Stat	0.422		t Stat	0.425	
P(T<=t) one-tail	0.338	>0.05	P(T<=t) one-tail	0.336	>0.05
t Critical one-tail	1.679		t Critical one-tail	1.679	
P(T<=t) two-tail	0.675		P(T<=t) two-tail	0.673	
t Critical two-tail	2.013		t Critical two-tail	2.013	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS สำหรับค่าตำแหน่งที่สถานี DPT9 ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ที่สถานี DPT9 มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญสำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ที่สถานี DPT9 มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี LAND

LAND					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	0.146	0.128	Mean	0.203	0.169
Variance	0.010	0.007	Variance	0.029	0.022
Observations	24	24	Observations	24	24
df	23	23	df	23	23
F	1.470		F	1.344	
P(F<=f) one-tail	0.181	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.242	>0.025
F Critical one-tail	2.014		F Critical one-tail	2.014	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R		G	G+R
Mean	0.146	0.128	Mean	0.203	0.169
Variance	0.010	0.007	Variance	0.029	0.022
Observations	24	24	Observations	24	24
Pooled Variance	0.009		Pooled Variance	0.025	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	

LAND					
Horizontal			Vertical		
df	46		df	46	
t Stat	0.6501		t Stat	0.735	
P(T<=t) one-tail	0.2594	>0.025	P(T<=t) one-tail	0.233	>0.025
t Critical one-tail	1.6787		t Critical one-tail	1.679	
P(T<=t) two-tail	0.5189		P(T<=t) two-tail	0.466	
t Critical two-tail	2.0129		t Critical two-tail	2.013	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS สำหรับค่าตำแหน่งที่สถานี LAND ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ที่สถานี LAND มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS ที่สถานี LAND มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

4.2.1.2 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี SV01

SV01					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	0.0439	0.0395	Mean	0.0899	0.0704
Variance	0.0005	0.0003	Variance	0.0025	0.0006
Observations	24	24	Observations	24	24
df	23	23	df	23	23
F	1.951		F	4.252	
P(F<=f) one-tail	0.0580	>0.025	P(F<=f) one-tail	0.00048	<0.025
F Critical one-tail	2.0144		F Critical one-tail	2.01442	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	0.0439	0.0395	Mean	0.090	0.070
Variance	0.0005	0.0003	Variance	0.003	0.001
Observations	24	24	Observations	24	24
Pooled Variance	0.0004007				

SV01					
Horizontal			Vertical		
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	46		df	33	
t Stat	0.758		t Stat	1.707	
P(T<=t) one-tail	0.226	>0.05	P(T<=t) one-tail	0.049	<0.05
t Critical one-tail	1.679		t Critical one-tail	1.692	
P(T<=t) two-tail	0.452		P(T<=t) two-tail	0.097	
t Critical two-tail	2.013		t Critical two-tail	2.035	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS สำหรับค่าตำแหน่งที่สถานี SV01 ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี SV01 มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(F<=t) one-tail ของทางตั้งมีค่าน้อย (น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี SV01 มีความแปรปรวนต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี SV01 มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางตั้งมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี SV01 มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี DPT9

DPT9					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	0.04538	0.0270	Mean	0.086	0.062
Variance	0.00147	0.0004	Variance	0.008	0.003
Observations	24	24	Observations	24	24
df	23	23	df	23	23
F	4.0095		F	2.347	
P(F<=f) one-tail	0.0007	<0.025	P(F<=f) one-tail	0.023	<0.025
F Critical one-tail	2.0144		F Critical one-tail	2.014	
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C

DPT9					
Horizontal			Vertical		
Mean	0.0454	0.0270	Mean	0.0856	0.0622
Variance	0.0015	0.0004	Variance	0.0078	0.0033
Observations	24	24	Observations	24	24
Pooled Variance	0.001				
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	46		df	40	
t Stat	2.0997		t Stat	1.0829	
P(T<=t) one-tail	0.0206	<0.05	P(T<=t) one-tail	0.1427	>0.05
t Critical one-tail	1.6787		t Critical one-tail	1.6839	
P(T<=t) two-tail	0.0413		P(T<=t) two-tail	0.2853	
t Critical two-tail	2.0129		t Critical two-tail	2.0211	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS สำหรับค่าตำแหน่งที่สถานี DPT9 ค่า $P(T \leq t)$ one-tail ของทางราบและทางตั้งมีค่าน้อย (น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี DPT9 มีความแปรปรวนต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ $P(T \leq t)$ one-tail ของทางราบมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี DPT9 มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ สำหรับค่า $P(T \leq t)$ one-tail ของทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี SV01 มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบความแปรปรวน F-Test และ T-test ทางตำแหน่งของสถานี LAND

LAND					
Horizontal			Vertical		
F-Test Two-Sample for Variances			F-Test Two-Sample for Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	0.1458	0.1013	Mean	0.2032	0.1625
Variance	0.0103	0.0039	Variance	0.0292	0.0181
Observations	24	24	Observations	24	24
df	23	23	df	23	23
F	2.6611		F	1.612	

LAND					
Horizontal			Vertical		
P(F<=f) one-tail	0.0114	<0.025	P(F<=f) one-tail	0.130	>0.05
F Critical one-tail	2.0144		F Critical one-tail	2.014	
t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances			t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	G	G+R+C		G	G+R+C
Mean	0.146	0.101	Mean	0.2032	0.1625
Variance	0.010	0.004	Variance	0.0292	0.0181
Observations	24	24	Observations	24	24
			Pooled Variance	0.0236	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	38		df	46	
t Stat	1.83293		t Stat	0.91681	
P(T<=t) one-tail	0.03733	<0.05	P(T<=t) one-tail	0.18201	>0.05
t Critical one-tail	1.68595		t Critical one-tail	1.67866	
P(T<=t) two-tail	0.07466		P(T<=t) two-tail	0.36402	
t Critical two-tail	2.02439		t Critical two-tail	2.01290	

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ย และค่าสถิติอื่น ๆ ของระบบ GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS สำหรับค่าตำแหน่งที่สถานี LAND ค่า P(F<=t) one-tail ของทางราบมีค่าน้อย (น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี LAND มีความแปรปรวนต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(F<=t) one-tail ของทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับนัยสำคัญ 0.025) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี LAND มีความแปรปรวนไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางราบมีค่าน้อย (น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี LAND มีค่าความถูกต้องต่างกัน หรือมีนัยสำคัญ สำหรับค่า P(T<=t) one-tail ของทางตั้งมีค่ามาก (มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05) แสดงว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งของระบบดาวเทียม GPS และ GPS/GLONASS/COMPASS ที่สถานี LAND มีค่าความถูกต้องไม่ต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการประมวลผลข้อมูลด้วยการผสมระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 เข้าด้วยกันพื้นที่ศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งสามารถสรุปผลออกเป็น 2 หัวข้อด้วยกันคือการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP) และแบบสถิต (Static) โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 การประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP)

จากผลการศึกษาพบว่าดาวเทียมมีจำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างระบบดาวเทียม GPS/ GLONASS และ GPS/GLONASS/BeiDou2 กับระบบดาวเทียม GPS เห็นว่า เมื่อคิดเฉลี่ยเป็นจำนวนดาวเทียมจากทุก ๆ กรณีของค่ามุมสูงในการรับดาวเทียมแล้วมีจำนวนเพิ่มขึ้นประมาณ 4 ดวง และ 12 ดวงตามลำดับ ซึ่งจำนวนดาวเทียมที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลทำให้ค่า DOP มีการปรับปรุงที่ดีขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน และค่า DOP จะแยกลงเมื่อจำนวนดาวเทียมลดลง ซึ่งเราจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อเราเปลี่ยนค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมจาก 10° 20° 30° และ 40° แล้วทำให้ค่า DOP เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยค่า DOP ที่มีค่าสูงมากจะมีผลทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งมีความถูกต้องน้อยลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การประมวลผลก็แสดงให้เห็นว่าการประมวลผลข้อมูลด้วย 3 ระบบจะสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ 24 ชั่วโมงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ในทุก ๆ เงื่อนไข

การประมวลผลด้วยการผสมระบบดาวเทียม GPS/GLONASS และ GPS/GLONASS/COMPASS/ BeiDou2 เข้าด้วยกันจะทำให้ผลของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวไม่แตกต่างกันกับระบบดาวเทียม GPS เพียงระบบเดียว โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติได้แสดงให้เห็นว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้ทั้ง 3 ระบบไม่แตกต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญ แต่การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวด้วยระบบดาวเทียมด้วย GPS/GLONASS/COMPASS จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถระบุตำแหน่งได้ตลอดเวลา 24 ชั่วโมงโดยเฉพาะในพื้นที่ที่อับสัญญาณ

5.1.2 การประมวลผลข้อมูลแบบสถิต (Static)

จากการประมวลผลข้อมูลแบบสถิตด้วยซอฟต์แวร์ RTKLib 2.4.3 ด้วยฟังก์ชัน RTKPOST ที่มีสถานีฐาน 1 สถานี และ สถานีผู้ใช้งานอีก 3 สถานี โดยมีเส้นฐาน 3.8, 6.7 และ 23.2 กิโลเมตรตามลำดับเห็นว่าทุก ๆ สถานีผู้ใช้งานการประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS จะมีจำนวนดาวเทียมโดยเฉลี่ยประมาณ 8-9 ดวง ส่วนการประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS ก็จะมีจำนวน

ดาวเทียมที่เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยที่รับได้ประมาณ 14-15 ดวงด้วยกัน และ การประมวลผลด้วยระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 จะมีจำนวนดาวเทียมที่รับได้โดยเฉลี่ยประมาณ 23-26 ดวง ซึ่งเป็นจำนวนดาวเทียมที่สามารถรับได้มากที่สุด ใน 3 ระบบดาวเทียมที่ทำการศึกษา และ ค่า DOP ก็มีการปรับปรุงให้ดีขึ้นไปพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนดาวเทียมเช่นค่า GDOP เฉลี่ยทั้ง 3 สถานี ซึ่งจะสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าเมื่อจำนวนดาวเทียมเพิ่มขึ้นก็จะช่วยให้ค่า DOP ของดาวเทียมลดลง สรุปแล้วจำนวนดาวเทียมที่ระบบดาวเทียม GPS/GLONASS รับได้เพิ่มขึ้นจากระบบดาวเทียม GPS ประมาณ 6 ดวง และจำนวนดาวเทียมที่รับได้จากระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS-BeiDou2 เพิ่มขึ้นจากระบบดาวเทียม GPS ประมาณ 16 ดวงด้วยกัน

สำหรับค่าความถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยเฉลี่ยของทุก ๆ สถานี ผ่านการวิเคราะห์ผลทางสถิติเห็นว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากระบบ GPS/GLONASS ไม่แตกต่าง หรือไม่มีนัยสำคัญ กับระบบดาวเทียม GPS สำหรับระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบแตกต่าง หรือมีนัยสำคัญกับระบบดาวเทียม GPS ส่วนค่าความถูกต้องทางดิ่งไม่แตกต่างกัน หรือไม่มีนัยสำคัญกับระบบดาวเทียม GPS

เพราะฉะนั้นการประมวลผลด้วยการผสมระบบดาวเทียม GPS/GLONASS ไม่ช่วยปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งแต่อย่างใด และ สำหรับการผสมระบบดาวเทียม GPS/GLONASS/COMPASS จะช่วยปรับปรุงค่าตำแหน่งทางราบ ส่วนค่าตำแหน่งทางดิ่งไม่ได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับระบบดาวเทียม GPS

5.1.3 สรุปผลการศึกษากับงานวิจัยที่ผ่านมา

จากผลการศึกษาในพื้นที่กรุงเทพมหานครที่ได้เห็นว่าจำนวนดาวเทียม และ ค่า DOP ที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Huang et al. (2009) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou-2/Compass โดยรวมในทวีปเอเชีย และค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวก็มีค่าความถูกต้องในระดับ 10 เมตรลงมา ซึ่งใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Gao et al. (2014) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คุณภาพข้อมูลของ GPS/Compass และ ผลกระทบต่อความถูกต้องของการหาตำแหน่งจุดเดี่ยวภายใต้การเก็บข้อมูลที่มีเงื่อนไขแตกต่างกัน

5.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อจำกัด

เนื่องด้วยสถานีที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้มีจำนวนจำกัดเช่น สถานีที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยวที่มีเพียงสถานีเดียว อาจจะเป็นตัวแทนให้พื้นที่ทั้งหมดไม่ได้มากเท่าไร สำหรับ

สถานที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบสถิติระยะเส้นฐานที่ใช้ในการประมวลผลยังมีระยะห่างที่ไม่แตกต่างกันมากใน 2 สถานที่แรกจึงไม่ค่อยแสดงให้เห็นค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่แตกต่างกันมากเท่าไร

5.2.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นการทดสอบการผสมระบบดาวเทียมให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ ต้องมีการเพิ่มจำนวนสถานีในการรับวัดข้อมูลทีมากและครอบคลุมพื้นที่กว้าง ๆ โดยมีระยะของเส้นฐานที่แตกต่างกันพอสมควร ทำการประมวลผลข้อมูลที่มีหลายรูปแบบเพื่อเป็นการทดสอบการผสมระบบดาวเทียมกับเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการสำรวจรับวัดว่าได้ผลเหมือนกันหรือไม่ และในอนาคตเมื่อระบบดาวเทียมอื่นที่มีความพร้อมในการใช้งาน ก็อาจจะทำการผสมระบบเหล่านั้นเข้าด้วยกันเพื่อเป็นการเพิ่มค่าความถูกต้องทางตำแหน่งมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- Angrisano, A., S. Gaglione and C. Gioia (2013). "Performance assessment of GPS/GLONASS single point positioning in an urban environment." Acta Geodaetica et Geophysica **48(2)**: 149-161.
- Cai, C., Y. Gao, L. Pan and W. Dai (2014). "An analysis on combined GPS/COMPASS data quality and its effect on single point positioning accuracy under different observing conditions." Advances in Space Research **54(5)**: 818-829.
- Chen., H.-C., Y.-S. Huang., K.-W. Chiang., M. Yang. and R.-J. Rau (2009). "The performance comparison between GPS and BeiDou-2/Compass: A perspective from Asia." The Chinese Institute of Engineer **32(5)**: 679-689.
- Ferrao, P., J. Sanguino and A. Rodrigues (2013). "Positioning using GPS and GLONASS observations."
- Hughes, W. J. (2014). "Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Analysis Report."
- Liu, T. and S. Liu (2014). "Study of Evaluation of GPS/BeiDou Combination Regional Navigation Satellite System." Advances in Intelligent Systems and Computing **297**: 323-327.
- Man, X., F. Sun, S. Liu, H. Li and H. Ding (2015). "Analysis of Positioning Performance on Combined BDS/GPS/GLONASS." China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings II: 399-409.
- Santerre, R., L. Pan, C. Cai and J. Zhu (2014). "Single Point Positioning Using GPS, GLONASS and BeiDou Satellites." Positioning **05(04)**: 107-114.
- Sergio Camacho-Lara (2013). "Current and Future GNSS and Their Augmentation Systems." pp 617-654.
- Shi, X., B. Yuan and Z. Bao (2013). "Research and Implementation of Ambiguity Resolution for Combined GPS/GLONASS/COMPASS Positioning." **245**: 469-477.
- Xu, G. (2007). "GPS Theory: Algorithms and Applications." 2nd ed, Springer.
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์ (ค.ศ. 2006). เอกสารประกอบการสอนวิชาการรังวัดดาวเทียมGPSขั้นสูง. กรุงเทพฯ, ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธีรทัต เจริญกาลัญญา และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ (ค.ศ. 2009). การประเมินค่าความถูกต้องจากการ
รังวัดด้วยดาวเทียมGPSแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานGPSระบบแรกในประเทศไทย:
ไทย: ผลการศึกษาเบื้องต้น. วิศวกรรมสาร มก., ปีที่ 23 ฉบับที่ 70, 45-56.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ผลการประมวลผลตำแหน่งแบบจุดเดียว

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าจำนวนดาวเทียมและค่า GDOP ของระบบดาวเทียม GPS ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันในแต่ละวัน

วันที่	10°		20°		30°		40°	
	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP
1	8	2.31	7	3.69	5	5.21	4	6.74
2	8	2.31	7	3.68	5	5.21	4	6.73
3	8	2.31	7	3.67	5	5.21	4	6.72
4	8	2.30	7	3.66	5	5.20	4	6.71
5	8	2.29	7	3.64	5	5.19	4	6.69
6	8	2.23	7	3.61	5	5.13	4	6.66
7	8	2.10	7	3.50	5	5.00	4	6.55
8	8	2.17	7	3.55	5	5.07	4	6.60
9	8	2.26	7	3.62	5	5.16	4	6.67
10	8	2.28	7	3.65	5	5.18	4	6.70
11	8	2.28	7	3.65	5	5.18	4	6.70
12	8	2.28	7	3.65	5	5.18	4	6.70
13	8	2.27	7	3.65	5	5.17	4	6.70
14	8	2.28	7	3.65	5	5.18	4	6.70
15	8	2.27	7	3.65	5	5.17	4	6.70
16	8	2.26	7	3.65	5	5.16	4	6.70
17	8	2.26	7	3.66	5	5.16	4	6.71
18	8	2.26	7	3.66	5	5.16	4	6.71
19	8	2.25	7	3.65	5	5.15	4	6.70
20	8	2.26	7	3.66	5	5.16	4	6.71
21	8	2.25	7	3.65	5	5.15	4	6.70
22	8	2.25	7	3.66	5	5.15	4	6.71
23	8	2.25	7	3.66	5	5.15	4	6.71

วันที่	10°		20°		30°		40°	
	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP
24	8	2.25	7	3.66	5	5.15	4	6.71
25	8	2.25	7	3.66	5	5.15	4	6.71
26	8	2.25	7	3.65	5	5.15	4	6.70
27	8	2.25	7	3.66	5	5.15	4	6.71
28	8	2.25	7	3.66	5	5.15	4	6.71
เฉลี่ย	8	2.26	7	3.65	5	5.16	4	6.70

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าจำนวนดาวเทียมและค่า GDOP ของระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันในแต่ละวัน

วันที่	10°		20°		30°		40°	
	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP
1	15	1.57	11	2.39	8	3.91	6	6.30
2	15	1.57	11	2.39	8	3.91	6	6.30
3	15	1.57	11	2.40	8	3.91	6	6.31
4	15	1.58	11	2.42	8	3.91	6	6.33
5	15	1.59	11	2.44	8	3.93	6	6.35
6	15	1.65	11	2.47	8	3.99	6	6.38
7	15	1.78	11	2.58	8	4.12	6	6.49
8	15	1.71	11	2.53	8	4.05	6	6.44
9	15	1.62	11	2.46	8	3.96	6	6.37
10	15	1.60	11	2.43	8	3.94	6	6.34
11	15	1.60	11	2.43	8	3.94	6	6.34
12	15	1.60	11	2.43	8	3.94	6	6.34
13	15	1.61	11	2.43	8	3.95	6	6.34
14	15	1.60	11	2.43	8	3.94	6	6.34
15	15	1.61	11	2.43	8	3.95	6	6.34
16	15	1.62	11	2.43	8	3.96	6	6.34
17	15	1.62	11	2.42	8	3.96	6	6.33

วันที่	10°		20°		30°		40°	
	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP
18	15	1.62	11	2.42	8	3.96	6	6.33
19	15	1.63	11	2.43	8	3.97	6	6.34
20	15	1.62	11	2.42	8	3.96	6	6.33
21	15	1.63	11	2.43	8	3.97	6	6.34
22	15	1.63	11	2.42	8	3.97	6	6.33
23	15	1.63	11	2.42	8	3.97	6	6.33
24	15	1.63	11	2.42	8	3.97	6	6.33
25	15	1.63	11	2.42	8	3.97	6	6.33
26	15	1.63	11	2.43	8	3.97	6	6.34
27	15	1.63	11	2.42	8	3.97	6	6.33
28	15	1.63	11	2.42	8	3.97	6	6.33
เฉลี่ย	15	1.62	11	2.44	8	3.96	6	6.35

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าจำนวนดาวเทียมและค่า GDOP ของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันในแต่ละวัน

วันที่	10°		20°		30°		40°	
	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP
1	26	1.18	21	1.62	16	2.56	12	4.50
2	26	1.18	21	1.63	16	2.56	12	4.51
3	26	1.18	21	1.64	16	2.56	12	4.52
4	26	1.19	21	1.65	16	2.57	12	4.53
5	26	1.20	21	1.67	16	2.58	12	4.55
6	26	1.26	21	1.70	16	2.64	12	4.58
7	26	1.39	21	1.81	16	2.77	12	4.69
8	26	1.32	21	1.76	16	2.70	12	4.64
9	26	1.23	21	1.69	16	2.61	12	4.57
10	26	1.21	21	1.66	16	2.59	12	4.54
11	26	1.21	21	1.66	16	2.59	12	4.54

วันที่	10°		20°		30°		40°	
	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP	จำนวน	GDOP
12	26	1.21	21	1.66	16	2.59	12	4.54
13	26	1.22	21	1.66	16	2.60	12	4.54
14	26	1.21	21	1.66	16	2.59	12	4.54
15	26	1.22	21	1.66	16	2.60	12	4.54
16	26	1.23	21	1.66	16	2.61	12	4.54
17	26	1.23	21	1.65	16	2.61	12	4.53
18	26	1.23	21	1.65	16	2.61	12	4.53
19	26	1.24	21	1.66	16	2.62	12	4.54
20	26	1.23	21	1.65	16	2.61	12	4.53
21	26	1.24	21	1.66	16	2.62	12	4.54
22	26	1.24	21	1.65	16	2.62	12	4.53
23	26	1.24	21	1.65	16	2.62	12	4.53
24	26	1.24	21	1.65	16	2.62	12	4.53
25	26	1.24	21	1.65	16	2.62	12	4.53
26	26	1.24	21	1.66	16	2.62	12	4.54
27	26	1.24	21	1.65	16	2.62	12	4.53
28	26	1.24	21	1.65	16	2.62	12	4.53
เฉลี่ย	26	1.23	21	1.67	16	2.61	12	4.55

ตารางที่ ก.4 แสดงค่า RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของระบบดาวเทียม GPS ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันในแต่ละวัน

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 10°				มุมสูงดาวเทียม 20°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
1	1.407	1.050	2.437	99.20	1.394	1.101	3.580	94.38
2	1.211	1.113	1.881	99.03	1.214	1.097	2.487	94.25
3	1.422	1.581	2.240	99.17	1.449	1.758	3.252	94.18
4	1.320	1.589	2.706	99.13	1.463	1.710	3.056	94.06

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 10°				มุมสูงดาวเทียม 20°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
5	1.391	1.299	2.229	98.96	1.414	1.348	2.651	93.94
6	1.772	1.004	2.439	98.84	1.549	1.044	3.688	94.03
7	1.682	1.012	1.825	95.40	1.579	0.925	2.296	90.68
8	1.421	1.272	2.065	98.26	1.496	2.045	4.104	93.89
9	1.463	1.782	3.447	98.75	1.496	2.045	4.104	93.89
10	1.226	0.927	2.476	98.33	1.407	1.016	3.246	92.40
11	1.202	1.606	3.522	99.05	1.120	1.558	4.295	94.08
12	1.352	0.786	2.325	99.03	1.235	0.907	2.439	94.15
13	1.307	1.513	2.436	98.61	1.322	1.454	2.223	93.98
14	1.207	0.952	1.989	98.85	1.129	1.049	3.009	94.22
15	1.461	1.211	1.955	98.94	1.384	1.169	2.397	94.32
16	1.665	1.260	2.153	98.52	1.786	1.383	3.138	93.92
17	1.546	0.884	3.546	98.87	1.472	0.947	4.251	94.31
18	1.429	0.874	4.157	98.89	1.333	0.829	4.731	94.36
19	1.321	1.125	3.589	98.44	1.275	1.216	4.620	93.89
20	1.829	0.986	4.543	98.84	1.636	1.039	5.188	94.29
21	1.596	1.330	2.666	98.28	1.585	1.312	3.300	93.75
22	1.745	1.002	2.137	98.61	1.649	0.951	2.850	94.13
23	1.561	1.015	2.925	98.84	1.530	1.155	3.984	94.34
24	1.915	1.118	2.568	98.66	2.054	1.250	3.476	94.22
25	1.443	2.093	2.788	98.75	1.415	1.756	3.386	94.25
26	1.766	0.906	2.470	98.26	1.741	0.887	3.523	93.84
27	1.991	1.775	2.449	98.78	1.827	1.536	2.811	94.34
28	1.759	1.920	3.312	98.73	1.823	1.883	3.728	94.31
เฉลี่ย	1.515	1.249	2.688	98.64	1.492	1.299	3.422	93.94

ตารางที่ ก.5 แสดงค่า RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของระบบดาวเทียม GPS ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันในแต่ละวัน (ต่อ)

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 30°				มุมสูงดาวเทียม 40°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
1	1.439	1.317	4.855	76.06	1.933	0.694	8.531	7.29
2	1.200	1.183	2.941	75.94	1.500	0.974	3.525	7.45
3	1.557	1.902	4.114	75.95	2.071	1.962	5.131	7.60
4	1.469	1.765	3.539	75.80	1.614	2.167	3.948	7.67
5	1.471	1.624	3.620	75.64	2.563	1.194	5.875	7.92
6	1.509	1.202	4.516	75.76	2.781	0.955	7.980	8.11
7	1.632	0.755	2.649	73.54	1.641	0.552	3.168	8.21
8	1.667	1.884	3.583	75.52	2.274	2.016	3.811	8.25
9	1.749	2.108	4.786	75.61	2.643	2.340	6.700	8.33
10	1.669	1.342	4.001	71.42	1.348	1.084	4.976	6.46
11	1.353	1.733	5.080	75.78	1.944	1.277	6.480	8.40
12	1.310	1.022	2.470	75.85	1.907	1.323	2.575	8.35
13	1.299	1.395	2.564	75.45	1.518	1.241	4.044	8.23
14	1.204	1.167	3.501	75.63	2.027	0.957	5.238	8.39
15	1.482	1.228	3.141	75.71	2.045	0.910	4.332	8.44
16	1.855	1.448	4.237	75.30	2.004	0.961	5.111	8.37
17	1.436	1.152	5.004	74.50	2.277	1.115	6.725	7.76
18	1.206	0.830	5.149	74.62	2.380	0.816	8.072	7.69
19	1.328	1.278	5.400	74.38	1.821	1.170	7.027	7.57
20	1.557	1.217	5.977	74.64	2.868	1.415	9.151	7.45
21	1.543	1.299	3.764	74.29	1.981	1.132	4.975	7.71
22	1.605	0.938	3.553	74.53	1.969	1.059	5.352	7.83
23	1.448	1.385	4.802	74.57	2.609	1.605	8.116	7.81
24	2.125	1.271	4.116	74.57	1.928	1.527	5.311	7.67
25	1.380	1.593	3.906	74.84	1.857	1.503	4.687	7.59

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 30°				มุมสูงดาวเทียม 40°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
26	1.705	1.172	4.681	74.98	2.660	1.062	6.833	7.33
27	1.863	1.429	3.441	75.33	2.580	1.045	3.405	7.38
28	1.974	1.931	4.634	75.63	0.011	0.071	0.370	7.48
เฉลี่ย	1.537	1.377	4.072	75.07	2.027	1.219	5.409	7.81

ตารางที่ ก.6 แสดงค่า RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันในแต่ละวัน

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 10°				มุมสูงดาวเทียม 20°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
1	1.023	1.301	0.295	99.84	1.617	1.249	4.918	99.84
2	1.380	1.149	1.935	99.84	1.424	1.258	2.408	99.84
3	1.590	1.369	2.568	100.00	1.709	1.518	4.102	100.00
4	1.488	1.520	2.176	99.97	1.570	1.541	2.959	99.97
5	1.432	1.113	2.498	99.83	1.416	1.157	2.948	99.83
6	1.918	0.995	2.751	99.93	1.526	1.048	3.562	99.93
7	1.843	0.890	2.594	96.58	1.946	0.842	2.944	96.58
8	1.461	1.116	2.446	99.46	1.525	1.206	2.429	99.46
9	1.357	1.647	2.513	99.81	1.355	1.692	3.229	99.81
10	1.307	1.146	2.119	99.31	1.365	1.326	3.040	99.31
11	1.532	1.668	2.988	100.00	1.483	1.497	3.338	100.00
12	1.640	0.848	2.132	100.00	1.461	0.977	2.443	100.00
13	1.436	1.517	3.558	99.60	1.419	1.414	2.874	99.60
14	1.295	0.846	3.969	99.84	1.219	0.983	3.543	99.84
15	1.628	1.188	3.986	99.95	1.591	1.052	2.856	99.95
16	1.637	1.260	3.413	99.55	1.705	1.246	3.471	99.55
17	1.685	0.715	1.853	99.95	1.487	0.714	2.282	99.95

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 10°				มุมสูงดาวเทียม 20°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
18	1.345	0.784	2.749	99.98	1.178	0.800	3.348	99.98
19	1.403	0.985	2.533	99.55	1.339	1.117	3.047	99.55
20	1.976	0.793	2.650	99.95	1.836	0.829	3.589	99.95
21	1.650	1.382	2.977	99.41	1.695	1.290	3.205	99.41
22	1.741	1.089	2.658	99.76	1.634	1.109	2.522	99.76
23	1.656	0.869	2.035	100.00	1.683	0.955	2.786	100.00
24	2.004	1.068	2.406	99.86	2.137	1.223	3.397	99.86
25	1.581	2.063	2.918	99.93	1.493	1.726	3.135	99.93
26	1.761	0.818	2.469	99.46	1.705	0.775	2.927	99.46
27	1.912	1.771	2.428	100.00	1.812	1.785	3.004	100.00
28	1.904	1.869	3.370	99.97	1.987	1.694	3.595	99.97
เฉลี่ย	1.592	1.206	2.607	99.69	1.583	1.215	3.139	99.69

ตารางที่ ก.7 แสดงค่า RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันในแต่ละวัน (ต่อ)

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 30°				มุมสูงดาวเทียม 40°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
1	1.816	1.754	6.755	95.76	1.292	1.750	4.646	2.55
2	1.964	2.054	20.285	95.40	1.454	2.614	10.844	4.34
3	2.072	1.905	6.263	95.02	1.859	2.308	6.958	3.72
4	1.720	1.610	4.266	96.75	2.248	2.873	7.813	4.58
5	1.408	1.438	4.151	94.97	1.139	2.200	11.480	4.43
6	1.319	1.259	4.689	96.09	0.777	1.766	8.346	4.43
7	2.300	1.661	5.362	93.78	2.152	2.519	4.952	3.84
8	1.756	1.535	3.368	92.93	1.127	0.942	5.601	3.49
9	1.827	1.856	5.148	95.49	1.364	1.911	9.946	3.73

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 30°				มุมสูงดาวเทียม 40°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
10	2.484	2.381	25.821	93.30	1.849	2.266	8.173	5.38
11	1.661	1.649	5.122	94.88	1.428	1.420	4.702	4.72
12	1.609	1.266	3.719	96.63	1.583	3.176	6.465	5.59
13	1.444	1.588	3.845	94.57	1.355	1.257	7.823	5.36
14	1.273	1.156	3.638	95.69	1.092	1.262	4.259	5.47
15	1.796	1.334	3.685	97.00	2.523	2.125	3.821	4.83
16	1.819	1.614	4.819	92.22	1.502	5.136	10.891	3.99
17	1.865	1.398	4.053	95.09	0.975	0.919	10.028	3.68
18	1.210	0.927	4.074	95.61	1.728	2.327	6.477	3.52
19	1.537	1.376	4.033	95.66	1.726	2.750	4.933	3.07
20	1.653	1.106	4.558	93.42	1.879	3.144	8.228	2.73
21	1.699	1.336	4.202	94.18	1.499	3.799	6.858	2.80
22	2.005	1.528	5.170	94.65	1.294	1.724	6.149	4.08
23	1.694	1.229	6.975	94.38	3.073	2.215	12.225	3.70
24	2.470	1.414	5.305	94.22	0.923	1.008	7.317	4.39
25	1.459	1.652	4.637	93.06	1.477	1.135	5.655	4.10
26	1.790	1.230	4.062	95.78	2.109	3.166	5.846	4.32
27	1.892	1.927	4.150	96.79	1.944	1.840	9.958	3.80
28	2.079	1.809	4.697	93.70	1.944	1.840	9.958	3.80
เฉลี่ย	1.772	1.535	5.959	94.89	1.618	2.193	7.513	4.09

ตารางที่ ก.8 แสดงค่า RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันโดยเฉลี่ยในแต่ละวัน

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 10°				มุมสูงดาวเทียม 20°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
1	0.844	1.031	2.004	100.00	0.948	1.168	2.755	100.00

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 10°				มุมสูงดาวเทียม 20°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
2	0.707	1.117	1.473	99.84	0.933	1.309	1.969	99.84
3	0.826	1.520	2.419	100.00	0.960	1.632	2.879	100.00
4	0.739	1.344	2.891	99.97	0.844	1.471	2.678	99.97
5	1.069	1.106	2.498	99.83	1.109	1.374	2.336	99.83
6	0.962	0.774	2.621	99.93	0.922	0.818	2.886	99.93
7	0.882	0.806	2.388	96.58	0.958	0.886	2.931	96.58
8	0.843	1.208	3.215	99.46	0.975	1.279	3.386	99.46
9	0.744	2.004	4.248	99.81	0.814	2.180	3.808	99.81
10	0.721	0.869	3.528	99.31	0.933	1.063	3.582	99.31
11	1.078	1.573	3.797	100.00	1.040	1.650	3.404	100.00
12	1.110	1.058	3.066	100.00	1.224	1.224	2.977	100.00
13	0.768	0.940	2.469	99.84	0.886	1.838	2.651	99.60
14	0.768	0.940	2.469	99.84	0.948	1.237	2.668	99.84
15	0.977	1.203	2.428	98.45	0.910	1.232	2.236	97.88
16	0.698	1.292	1.796	99.55	0.620	1.382	2.395	99.55
17	0.604	0.677	2.877	99.95	0.533	0.727	3.269	99.95
18	0.420	0.770	3.181	99.98	0.533	0.727	3.683	99.98
19	0.408	0.856	2.859	99.55	0.649	1.008	3.635	99.55
20	0.663	0.920	3.612	99.95	0.713	0.872	4.532	99.95
21	0.703	1.113	2.534	99.41	0.737	1.150	3.291	99.41
22	0.465	1.055	2.005	99.76	0.657	1.131	2.979	99.76
23	0.620	0.863	1.963	100.00	0.240	0.056	1.696	100.00
24	0.785	1.082	2.424	99.86	0.851	1.080	3.365	99.86
25	0.847	1.970	1.499	99.93	0.894	1.862	1.900	99.93
26	0.814	0.835	1.825	99.46	0.682	0.985	2.336	99.46
27	0.822	1.906	2.068	100.00	0.634	1.921	2.136	100.00
28	0.896	1.779	3.018	99.97	0.844	1.714	2.798	99.97

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 10°				มุมสูงดาวเทียม 20°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
เฉลี่ย	0.778	1.165	2.613	99.65	0.821	1.249	2.899	99.62

ตารางที่ ก.9 แสดงค่า RMS และ เปอร์เซ็นต์ในการประมวลผลของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS และ COMPASS/BeiDou-2 ในค่ามุมสูงของการรับดาวเทียมที่แตกต่างกันโดยเฉลี่ยในแต่ละวัน (ต่อ)

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 30°				มุมสูงดาวเทียม 40°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
1	1.537	1.236	3.668	100	1.901	2.001	8.116	98.89
2	1.595	1.286	3.374	99.84	1.825	1.960	8.516	99.84
3	1.564	1.575	4.687	100.00	1.968	2.067	9.066	100.00
4	1.442	1.552	4.853	99.97	1.636	2.068	9.442	99.20
5	1.627	1.490	4.139	99.83	1.979	1.863	8.377	99.83
6	1.474	1.036	4.816	99.93	1.947	1.684	8.752	99.93
7	1.289	1.047	4.368	96.58	1.606	1.625	8.947	96.58
8	1.240	1.371	5.071	99.46	1.695	1.766	9.658	99.41
9	1.419	2.268	6.005	99.81	2.208	2.675	11.017	99.81
10	1.476	1.139	5.301	99.31	1.962	1.807	9.108	99.31
11	1.659	1.723	5.325	100.00	2.278	2.182	9.114	100.00
12	1.868	1.382	4.935	100.00	2.509	1.809	9.080	100.00
13	1.590	1.891	4.804	99.60	2.127	2.180	8.528	99.60
14	1.739	1.373	4.405	99.84	2.164	1.874	8.307	99.83
15	0.247	0.278	0.761	97.88	1.566	1.695	8.043	98.35
16	0.972	1.364	3.421	99.55	1.346	1.804	6.736	99.55
17	0.960	0.779	2.451	99.95	1.080	1.132	6.696	99.95
18	1.260	0.749	2.912	99.98	1.807	1.352	5.847	99.98
19	1.623	1.056	2.905	99.55	2.437	1.384	5.440	99.55
20	1.294	0.979	3.364	99.95	2.074	1.371	3.997	99.95

วันที่	มุมสูงดาวเทียม 30°				มุมสูงดาวเทียม 40°			
	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์	RMS (เมตร)			เปอร์เซ็นต์
	East	North	Height		East	North	Height	
21	1.417	1.144	2.964	99.41	1.959	1.402	5.328	99.41
22	1.473	1.235	3.618	99.76	2.063	1.626	6.843	99.76
23	3.695	0.009	0.125	100.00	1.767	1.493	6.846	99.98
24	1.259	1.162	3.941	99.86	1.727	1.596	7.423	99.86
25	1.310	1.667	4.019	99.93	1.982	2.248	7.572	99.93
26	0.944	1.112	3.993	99.46	1.716	1.610	7.412	99.46
27	0.872	1.923	4.533	100.00	1.777	2.505	7.551	100.00
28	1.298	1.724	4.821	99.97	1.637	1.884	8.792	99.97
เฉลี่ย	1.434	1.270	3.913	99.62	1.884	1.809	7.879	99.57



ภาคผนวก ข
ผลการประมวลผลตำแหน่งแบบสถิต

ตารางที่ ข.1 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี SV01 ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

Session	SV01								
	G			G+R			G+R+C		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
1	0.1020	0.0811	0.2018	0.0747	0.0635	0.1555	0.0769	0.0446	0.1176
2	0.0206	0.0298	0.0436	0.0222	0.0304	0.0438	0.0268	0.0308	0.0484
3	0.0261	0.0219	0.0481	0.0263	0.0208	0.0374	0.0339	0.0202	0.0437
4	0.0375	0.0204	0.0740	0.0294	0.0130	0.0480	0.0304	0.0145	0.0778
5	0.0218	0.0164	0.0666	0.0331	0.0105	0.0509	0.0156	0.0081	0.0561
6	0.0801	0.0450	0.2093	0.0777	0.0325	0.1934	0.0377	0.0377	0.1281
7	0.0422	0.0157	0.0764	0.0291	0.0275	0.0850	0.0229	0.0317	0.0537
8	0.0525	0.0192	0.0612	0.0178	0.0173	0.0616	0.0212	0.0175	0.0558
9	0.0592	0.0523	0.1214	0.0408	0.0449	0.1023	0.0409	0.0386	0.0729
10	0.0253	0.0283	0.0391	0.0182	0.0292	0.0378	0.0733	0.0300	0.0433
11	0.0336	0.0254	0.0687	0.0391	0.0272	0.0690	0.0749	0.0265	0.0707
12	0.0348	0.0311	0.0537	0.0256	0.0286	0.0531	0.0434	0.0333	0.0572
13	0.0669	0.0580	0.1301	0.0420	0.0479	0.1281	0.0452	0.0473	0.1087
14	0.0200	0.0383	0.0677	0.0167	0.0358	0.0572	0.0435	0.0358	0.0525
15	0.0771	0.0815	0.2083	0.0502	0.0500	0.1135	0.0656	0.0546	0.0875
16	0.0158	0.0365	0.0680	0.0111	0.0322	0.0575	0.0242	0.0320	0.0621
17	0.0095	0.0343	0.0577	0.0089	0.0350	0.0571	0.0129	0.0344	0.0581
18	0.0271	0.0417	0.0718	0.0235	0.0462	0.0680	0.0446	0.0505	0.0611
19	0.0366	0.0295	0.0523	0.0366	0.0295	0.0523	0.0372	0.0323	0.0578
20	0.0484	0.0236	0.1115	0.0484	0.0236	0.1115	0.0374	0.0194	0.1164
21	0.1222	0.0228	0.0827	0.1222	0.0228	0.0827	0.0557	0.0256	0.0615
22	0.1161	0.0435	0.0942	0.1161	0.0435	0.0942	0.1493	0.0247	0.0791
23	0.1145	0.0582	0.0863	0.1145	0.0582	0.0863	0.0682	0.0465	0.0719
24	0.0345	0.0287	0.0640	0.0345	0.0287	0.0640	0.0659	0.0130	0.0480

Session	SV01								
	G			G+R			G+R+C		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
เฉลี่ย	0.051	0.037	0.090	0.044	0.033	0.080	0.048	0.031	0.070

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี DPT9 ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

Session	DPT9								
	G			G+R			G+R+C		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
1	0.0163	0.0075	0.0266	0.0152	0.0075	0.0278	0.0140	0.0074	0.0254
2	0.0361	0.0221	0.2391	0.0226	0.0361	0.2870	0.0269	0.0307	0.2150
3	0.0871	0.0412	0.3244	0.0959	0.0435	0.3686	0.0387	0.0142	0.1404
4	0.0507	0.0561	0.0734	0.0626	0.0568	0.0379	0.0149	0.0099	0.0286
5	0.0690	0.0267	0.2693	0.0698	0.1096	0.1597	0.0351	0.0441	0.1154
6	0.0564	0.0296	0.0804	0.0712	0.0436	0.0938	0.0752	0.0405	0.0887
7	0.0303	0.0200	0.0337	0.0250	0.0209	0.0177	0.0199	0.0190	0.0224
8	0.0951	0.0644	0.0511	0.0371	0.0580	0.0795	0.0253	0.0139	0.0401
9	0.0189	0.0126	0.0141	0.0198	0.0124	0.0143	0.0207	0.0130	0.0144
10	0.0240	0.0292	0.0380	0.0200	0.0232	0.0323	0.0197	0.0217	0.0326
11	0.1010	0.0613	0.1338	0.1077	0.0959	0.1358	0.0378	0.0315	0.0810
12	0.0737	0.0591	0.2005	0.0612	0.0952	0.0689	0.0434	0.0624	0.0292
13	0.1390	0.0788	0.1357	0.0906	0.0672	0.0733	0.0848	0.0792	0.0892
14	0.0884	0.0791	0.0605	0.0284	0.0471	0.0666	0.0373	0.0509	0.1604
15	0.2378	0.0852	0.0873	0.1255	0.0869	0.0598	0.0373	0.0509	0.1604
16	0.0982	0.0382	0.0996	0.0870	0.0467	0.0866	0.0495	0.0244	0.0746
17	0.0374	0.0072	0.0179	0.0204	0.0068	0.0195	0.0132	0.0076	0.0147
18	0.0509	0.0069	0.0421	0.0236	0.0077	0.0481	0.0446	0.0155	0.0549
19	0.0465	0.0097	0.0222	0.0265	0.0089	0.0183	0.0366	0.0056	0.0193
20	0.0038	0.0048	0.0151	0.0040	0.0057	0.0136	0.0042	0.0052	0.0131

Session	DPT9								
	G			G+R			G+R+C		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
21	0.0074	0.0118	0.0207	0.0077	0.0135	0.0226	0.0094	0.0111	0.0199
22	0.0039	0.0112	0.0197	0.0037	0.0126	0.0189	0.0046	0.0123	0.0173
23	0.0150	0.0121	0.0173	0.0120	0.0106	0.0180	0.0053	0.0125	0.0128
24	0.0026	0.0142	0.0310	0.0021	0.0136	0.0255	0.0023	0.0136	0.0236
เฉลี่ย	0.058	0.033	0.086	0.043	0.039	0.075	0.029	0.025	0.062

ตารางที่ ข.3 แสดงค่า RMS พิกัดของสถานี LAND ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

Session	LAND								
	G			G+R			G+R+C		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
1	0.0228	0.0203	0.0267	0.0250	0.0213	0.0510	0.0166	0.0236	0.0671
2	0.1906	0.0927	0.1312	0.1898	0.0764	0.1163	0.1254	0.0641	0.1713
3	0.3521	0.1524	0.2267	0.2797	0.1044	0.1387	0.2019	0.0931	0.1236
4	0.2424	0.1962	0.4968	0.3808	0.1812	0.3724	0.2450	0.1401	0.4147
5	0.3393	0.1492	0.4187	0.2477	0.1774	0.5008	0.1834	0.1255	0.3696
6	0.5384	0.2168	0.3713	0.2135	0.2483	0.2793	0.1751	0.2074	0.3043
7	0.2518	0.1471	0.4301	0.1691	0.1536	0.2896	0.1074	0.1090	0.2718
8	0.2423	0.1706	0.4357	0.1746	0.2088	0.4838	0.1901	0.1909	0.4565
9	0.1909	0.1295	0.2218	0.2160	0.1400	0.2071	0.2062	0.1267	0.0946
10	0.2436	0.1524	0.2652	0.2593	0.1431	0.1352	0.1637	0.1290	0.1639
11	0.1395	0.2736	0.1773	0.1916	0.2330	0.1087	0.1547	0.2135	0.1233
12	0.4612	0.1595	0.4778	0.2636	0.1554	0.2943	0.1871	0.1301	0.2328
13	0.3255	0.1310	0.3398	0.3417	0.1357	0.2774	0.1818	0.0973	0.2968
14	0.1532	0.1582	0.2721	0.1185	0.0997	0.2247	0.0884	0.0922	0.1939
15	0.2831	0.0474	0.0935	0.1693	0.0284	0.1537	0.1149	0.0305	0.1854
16	0.1214	0.0631	0.2669	0.1155	0.0516	0.2196	0.0831	0.0692	0.2084

Session	LAND								
	G			G+R			G+R+C		
	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH	ΔE	ΔN	ΔH
17	0.0315	0.0513	0.0172	0.0149	0.0519	0.0166	0.0141	0.0516	0.0178
18	0.0451	0.0406	0.0169	0.0262	0.0409	0.0124	0.0248	0.0400	0.0167
19	0.0387	0.0466	0.0188	0.0280	0.0464	0.0168	0.0255	0.0456	0.0166
20	0.0338	0.0430	0.0211	0.0509	0.0435	0.0195	0.0354	0.0429	0.0142
21	0.0221	0.0522	0.0118	0.0180	0.0513	0.0117	0.0188	0.0506	0.0140
22	0.0111	0.0535	0.0278	0.0119	0.0531	0.0284	0.0120	0.0535	0.0292
23	0.0632	0.0522	0.0672	0.0848	0.0454	0.0558	0.0612	0.0475	0.0605
24	0.0089	0.0441	0.0450	0.0348	0.0428	0.0512	0.0260	0.0440	0.0539
เฉลี่ย	0.181	0.11	0.203	0.151	0.106	0.169	0.11	0.092	0.163



ภาคผนวก ค
การตั้งค่าการประมวลผลข้อมูล

ตาราง ค.1 การตั้งค่าการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยว

Setting 1		Notes
Item	Set	
Positioning Mode	Single	
Frequencies	L1+2	
Filter Type	Forward	
Elevation mask	10° 20° 30° 40°	ให้ใช้ตามเงื่อนไขการประมวลผล
SNR Mask	-----	
Rec Dynamics	OFF	
Earth Tides Correction	OFF	
Ionosphere Correction	Broadcast	
Troposphere Correction	Saastamoinen	
Satellite Ephemeris/Clock	Broadcast	
Navigation System	GPS GLONASS COMPASS	ให้ใช้ตามเงื่อนไขการประมวลผล
Setting 2		Notes
Item	Set	
Reject Threshold of GDOP/Innov	8.0	ค่ามาตรฐาน
Output		Notes
Item	Set	
Solution Format	X/Y/Z-ECEF	
Output Header/Processing Options	OFF/OFF	
Time Format/# of Decimals	hh:mm:ss GPST/3	

Output Solution Status/Debug Trace	OFF/OFF	
Stats		ใช้ค่าที่โปรแกรมให้มา

ตาราง ค.2 การตั้งค่าการประมวลผลข้อมูลแบบสถิต

Setting 1		Notes
Item	Set	
Positioning Mode	Static	
Frequencies	L1+2	
Filter Type	Forward	
Elevation mask	10°	
SNR Mask	-----	
Rec Dynamics	OFF	
Earth Tides Correction	OFF	
Ionosphere Correction	Broadcast	
Troposphere Correction	Saastamoinen	
Satellite Ephemeris/Clock	Broadcast	
Navigation System	GPS GLONASS COMPASS	ให้ใช้ตามเงื่อนไขการประมวลผล
Setting 2		Notes
Item	Set	
Integer Ambiguity Res (GPS/GLO/BDS)	Continuous/OFF/OFF	
Min Ratio to Fix Ambiguity	3	
Min Lock/Elevation to Fix Amb	0/0	
Outage to Reset Amb/Slip Thres	5/0.050	

Max Age of Diff/Sync Solution	30.0	
Reject Threshold of GDOP/Innov	8.0	ค่ามาตรฐาน
Number of Filter Iteration	10	
Output		Notes
Item	Set	
Solution Format	X/Y/Z-ECEF	
Output Header/Processing Options	OFF/OFF	
Time Format/# of Decimals	hh:mm:ss GPST/3	
Solution for Static Mode	Single/All	Single ค่าตำแหน่งจุดเดียว All ค่าตำแหน่งจุดเดียวทุก ๆ Epoch
Output Solution Status/Debug Trace	OFF/OFF	
Stats		ใช้ค่าที่โปรแกรมให้มา
Positions		Note
Item	Set	
Base Station	RINEX Header Position	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ: นายสุขสันต์ ชัยยะวงค์

วันเดือนปีเกิด: 02 มิถุนายน 1989

คุณวุฒิทางการศึกษา:

ค.ศ. 2012 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย

แห่งชาติลาว

ผลงานทางวิชาการ:

ผลงานประชุมทางวิชาการ

1. สุขสันต์ ชัยยะวงค์ และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2588) “การประเมินค่าความถูกต้องของระบบGPS/GLONASS/COMPASS ในการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว กรณีศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร” การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558