

การศึกษากาหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน



นาย อรุณ บุรีรักษ์

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

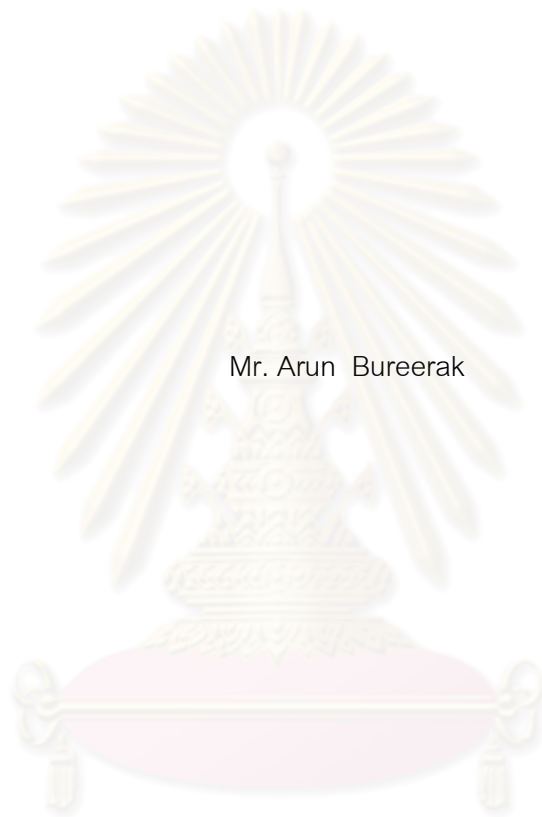
สาขาวิชาการระบบสารสนเทศปริภูมิทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF VEHICLE TRAJECTORY DETERMINATION USING GNSS



Mr. Arun Bureerak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Spatial Information System in Engineering

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียม  
นำหน

โดย

นายอรุณ นูรีรักษ์

สาขาวิชา

ระบบสารสนเทศปริภูมิทางวิศวกรรม

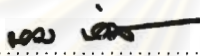
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์

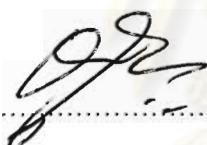
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

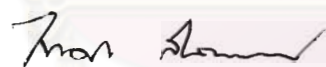
ศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

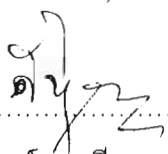
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์)

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

  
..... กรรมการ  
(พันเอก ดร. กนก วีรวงศ์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดีบุญ เมธากุลชาติ)

อรุณ บุรีรักษ์ : การศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน

(A STUDY OF VEHICLE TRAJECTORY DETERMINATION USING GNSS)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :

ศ.ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 84 หน้า.

วิถีของยานพาหนะเป็นองค์ประกอบสำคัญในงานทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ได้ วิธีหนึ่งที่ทำได้รวดเร็วและให้ค่าความถูกต้องสูง ได้แก่ การใช้ระบบดาวเทียมนำหน แต่มักเกิดปัญหาการบดบังสัญญาณไปจนถึงไม่มีสัญญาณในพื้นที่เมืองหนาแน่นที่เต็มไปด้วยตึกสูง ส่งผลให้จำนวนดาวเทียมและคุณภาพสัญญาณไม่ดีพอสำหรับการคำนวณวิถี ซึ่งระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial Navigation System, INS) ได้ถูกนำมาบูรณาการร่วมกับ GPS เรียกว่าระบบ GPS/INS สามารถลดข้อจำกัดในพื้นที่ดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินถึงการมีค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability) ของวิถีของยานพาหนะ แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ (1) ใช้ระบบดาวเทียม GPS เพียงระบบเดียว (2) ใช้ระบบดาวเทียม GPS/GLONASS และ (3) ระบบบูรณาการ GPS/INS ทดสอบทั้งพื้นที่ชานเมืองและในเมืองหนาแน่น พร้อมทั้งได้ประเมินเปรียบเทียบวิถีของยานพาหนะจากการใช้ระบบสถานีฐานของกรมที่ดินเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานเสมือน (Virtual Base Station) กับการตั้งสถานีฐานจริงในพื้นที่ สุดท้ายเป็นการประเมินถึงศักยภาพของซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB เปรียบเทียบกับกลุ่มซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ที่ใช้งานกันโดยทั่วไปในการหาวิถีของยานพาหนะ

ผลการศึกษาพบว่า ระบบดาวเทียม GPS/GLONASS มีค่า Availability เพิ่มขึ้นประมาณ 13% และ 45% ในพื้นที่ชานเมืองและในเมืองตามลำดับเมื่อเทียบกับระบบดาวเทียม GPS ในขณะที่ระบบ GPS/INS สามารถให้ค่าพิกัดตำแหน่งครบถ้วนตลอดเส้นทางที่แตกต่างกันทั้งสองพื้นที่ ส่วนการเปรียบเทียบวิถีของยานพาหนะที่คำนวณได้จากการใช้สถานีฐานเสมือนที่สร้างจากระบบ VRS กับการตั้งสถานีฐานจริงในพื้นที่พบว่า มีค่าต่างจากความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในทางราบ 0.04 เมตร ทางตั้ง 0.18 เมตร สุดท้ายการประมวลผลในภายหลังของวิถีของยานพาหนะที่ได้จากการรับสัญญาณดาวเทียมนำหนด้วยกลุ่มซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์พบว่า ให้ค่าพิกัดที่สอดคล้องกัน ในขณะที่ผลการคำนวณวิถีของยานพาหนะที่ได้จากซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB ทั้ง fixed และ float solution จำนวน 6,411 epochs มีค่าต่างทางตำแหน่งทางราบ 0.32 เมตร ทางตั้ง 0.45 เมตร และหากพิจารณาเฉพาะ fixed solution ที่มีจำนวน 895 epochs มีค่าต่างทางตำแหน่งทางราบ 0.02 เมตร ทางตั้ง 0.04 เมตร เมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

ภาควิชา ..... วิศวกรรมสำรวจ ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... อรุณ บุรีรักษ์  
สาขาวิชา ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ทางวิศวกรรม ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ..... ไพศาล สันติธรรมนนท์  
ปีการศึกษา ..... 2553 ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ..... เฉลิมชนม์ สติระพจน์

# # 5170519421 : MAJOR SPATIAL INFORMATION SYSTEM IN ENGINEERING

KEYWORDS : VEHICLE TRAJECTORY / GNSS / GPS/INS / VRS / RTKLIB

ARUN BUREERAK : A STUDY OF VEHICLE TRAJECTORY DETERMINATION

USING GNSS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. PHISAN SANTITAMNONT DR.-

ING., THESIS CO-ADVISOR : PROF. CHALERMCHON SATIRAPOD Ph.D., 84 pp.

Vehicle trajectory is crucial information for mobile mapping system (MMS). One of the methods to improve a position accuracy of MMS trajectory is to use the emerging Global Navigation Satellite Systems (GNSS) technology. However, the major limitation of employing the GNSS technology is the degradation of satellite geometry and signal quality due to dense vegetations and high-rise buildings. An integration of inertial navigation system (INS) and Global Navigation System (GPS), commonly known as GPS/INS, can be used to solve such problems. The objective of this research is to evaluate the availabilities of vehicle trajectory derived from the GNSS technology, with three different scenarios; (1) using only the GPS signal, (2) using a combination of GPS/GLONASS signal and (3) the integration of GPS and INS. In addition, the experiments are carried out under different environments, both urban and rural areas. Furthermore, virtual base stations generated from Virtual Reference Station (VRS) of the Department of Lands (DOL) were tested and compared with a local single base station. Finally, trajectories obtained from the use of different commercial software packages (LGO and GrafNav) and open source RTKLIB software were compared.

The results revealed that the availability of trajectory using the GPS/GLONASS has been improved by 13% and 45% in rural and urban areas respectively when they were compared with GPS only solution. It was also confirmed that the GPS/INS integrated system could provide the complete trajectory for both rural and urban areas. The trajectories computed from the VRS base station compared with those from the local base station indicated that the differences in root-mean-square error (RMSE) are 0.04 and 0.18 m for horizontal and vertical component respectively. The computed trajectories from commercial software solutions were well agreed amongst each other. The trajectories obtained from the free and open source software RTKLIB with fixed and float solution deviated upto 0.32 and 0.45 m for horizontal and vertical component accounted for 6,411 epochs. Nevertheless, when the 895 epochs of fixed-only solution were considered, the difference results 0.02 m and 0.04 m for horizontal and vertical component.

Department : Survey Engineering

Field of Study : Spatial Information System in Engineering

Academic Year : 2010

Student's Signature Arun Bureerak  
 Advisor's Signature Phisan Santitamnont  
 Co-Advisor's Signature Chalermchon Satirapod

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับข้าพเจ้า และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พันเอก ดร.กนก วีรวงศ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ดิบุญ เมธากุลชาติ ที่ได้ให้คำแนะนำในการศึกษาวิจัยครั้งนี้และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยโดยสมบูรณ์ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณมูลนิธินิธิสิดาเก่า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณกรมที่ดิน, บริษัท โนวาเทล แคนาดา, บริษัท REPCO (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท ฮอลดีวีดูอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด และบริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณธีรชาย ชำของ, คุณนิกร สุทธิเสงี่ยม, อาจารย์ภาณุ อุทัยศรี, คุณธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์, คุณชัยพล กীরติกสิกร และพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ รวมทั้งผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณดีของวิทยานิพนธ์ เพื่อเป็นกตเวทิตาคุณแด่บิดา มารดา ญาติพี่น้องและคณาจารย์ทุกท่าน พร้อมกันนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ระบบนำหนด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม (Navigation Satellite Systems, NSS)...	7
2.1.1 ระบบดาวเทียมนำหนบนโลก (Global Navigation Satellite System, GNSS).....	7
2.1.1.1 ระบบดาวเทียม GPS.....	8
2.1.1.2. ระบบดาวเทียม GLONASS .....	9
2.1.2 การรวมระบบดาวเทียม GLONASS มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบดาวเทียม GPS.....	11
2.1.3 การรังวัดวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน .....	13
2.2 ระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial navigation system, INS).....	17
2.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (Inertial Measure Unit, IMU) .....	18
2.2.1.1 เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้น (Linear Accelerometer) .....	19
2.2.1.2 เครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุม (Gyroscope) .....	19
2.2.1.3 อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวชนิดเมมส์ (MEMS IMU) .....	20
2.2.2 ความสัมพันธ์และขอบเขตหน้าที่ของระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย.....	22
2.3 ระบบบูรณาการ GPS/INS (GPS/INS Integration) .....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 วิธีบูรณาการแบบ Loosely Coupled Integration .....	25
2.3.2 วิธีบูรณาการแบบ Tightly Coupled Integration .....	26
2.4 ระบบโครงข่ายสถานีฐาน DOL VRS ของกรมที่ดิน .....	29
2.5 ซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB .....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	32
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย .....	32
3.2 การติดตั้งเครื่องมือ .....	33
3.3 ความสัมพันธ์จาก IMU ไปยังเสอากาศ GPS .....	36
3.4 การบริการข้อมูลสถานีฐานเสมือนจากระบบ DOL VRS Reference Station .....	37
บทที่ 4 ผลการศึกษา .....	40
4.1 การมีค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability) .....	40
4.1.1 ประโยชน์ของการใช้ GPS/GLONASS .....	40
4.1.2 ประโยชน์ของการใช้ระบบบูรณาการ GPS/INS .....	44
4.2 ผลการเปรียบเทียบการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ 50 .....	50
4.3 ผลการเปรียบเทียบซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัสกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ .....	59
4.3.1 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Leica Geo Office .....	59
4.3.2 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav .....	62
4.3.3 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB .....	63
4.3.4 การเปรียบเทียบผลต่างค่าพิกัด .....	65
4.3.4.1 ผลต่างค่าพิกัดของซอฟต์แวร์ Leica Geo Office กับ GrafNav .....	65
4.3.4.2 ผลต่างค่าพิกัดของซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB .....	65
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา .....	69
5.1 ผลการศึกษา .....	69
5.2 ปัญหาและอุปสรรค .....	71
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	71
รายการอ้างอิง .....	72
ภาคผนวก .....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	84



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS.....	10
ตารางที่ 2.2	เปรียบเทียบการปรากฏของดาวเทียม GPS กับดาวเทียม GPS/GLONASS	12
ตารางที่ 2.3	เทคนิคการกำหนดตำแหน่ง ความละเอียดถูกต้องและวิธีการประมวลผลโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน.....	17
ตารางที่ 2.4	ประสิทธิภาพและความสามารถของ IMU แต่ละประเภท.....	22
ตารางที่ 2.5	คุณสมบัติที่เอื้อประโยชน์ของระบบ GPS และ INS.....	24
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย IMU บรรจุใน SPAN-CPT.....	34
ตารางที่ 3.2	ประสิทธิภาพของ SPAN-CPT ขณะดาวเทียมขาดหายไป.....	34
ตารางที่ 3.3	ชุดคำสั่งที่ใช้เก็บข้อมูลของเครื่องรับ ProPak V3 และ SPAN-CPT ผ่านโปรแกรม NovAtel CDU .....	35
ตารางที่ 3.4	ระยะ Level-arm offset จาก IMU ไปยังเสาอากาศ GPS.....	37
ตารางที่ 3.5	ค่าพิกัดที่ขอรับบริการให้ระบบ DOL VRS สร้างสถานีฐาน.....	37
ตารางที่ 4.1	แสดง Availability ของ GPS/GLONASS ในพื้นที่ชานเมือง.....	42
ตารางที่ 4.2	แสดง Availability ของ GPS/GLONASS พื้นที่ในเมือง.....	43
ตารางที่ 4.3	แสดง Availability ของ GPS/INS ของพื้นที่ชานเมืองและในเมืองหนาแน่น...	45
ตารางที่ 4.4	ค่าพิกัดอ้างอิงหมด CU09 ที่โยงยึดเข้ากับระบบพิกัดของกรมที่ดิน.....	51
ตารางที่ 4.5	ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่.....	54
ตารางที่ 4.6	ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ในเมือง.....	55
ตารางที่ 4.7	ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า $3\sigma$ .....	56
ตารางที่ 4.8	ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ในเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า $3\sigma$ ...	57
ตารางที่ 4.9	ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB .....	64
ตารางที่ 4.10	ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB ของ Fixed solution.....	67

## สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ระบบโครงข่ายสถานีฐาน VRS ของกรมที่ดินและพื้นที่ศึกษา.....	4
รูปที่ 1.2	แนวคิดการใช้สถานีฐานเดียวในพื้นที่และสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS	5
รูปที่ 2.1	สถาปัตยกรรมของระบบดาวเทียมนำหน GNSS.....	7
รูปที่ 2.2	ตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS.....	8
รูปที่ 2.3	ส่วนประกอบของระบบดาวเทียม GLONASS.....	10
รูปที่ 2.4	ระบบดาวเทียม GNSS ช่วยให้ประสิทธิภาพการกำหนดตำแหน่งในพื้นที่เมือง และพื้นที่มีสิ่งปกคลุม.....	11
รูปที่ 2.5	ตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS และ GLONASS.....	12
รูปที่ 2.6	การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning).....	13
รูปที่ 2.7	การเปรียบเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายัง เครื่องรับ.....	13
รูปที่ 2.8	การวัดระยะทางด้วยเฟสของคลื่นส่ง	15
รูปที่ 2.9	วิธีการนำหนแบบ Dead Reckoning.....	17
รูปที่ 2.10	แนวคิดพื้นฐานของระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย.....	18
รูปที่ 2.11	แผนผังการทำงานของระบบระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย.....	18
รูปที่ 2.12	แนวคิดพื้นฐานการวัดอัตราเร่งเชิงเส้น.....	19
รูปที่ 2.13	หลักการเครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุมไจโรสโคป.....	19
รูปที่ 2.14	Strapdown IMU Systems.....	20
รูปที่ 2.15	MEMS-base DoF IMU รุ่น ADIS16355.....	21
รูปที่ 2.16	นิยามและความสัมพันธ์ของ ISA, IMU และ INS.....	23
รูปที่ 2.17	การบูรณาการ GPS/INS แบบ Loosely coupled integration .....	25
รูปที่ 2.18	การบูรณาการ GPS/INS แบบ Tightly coupled integration .....	26
รูปที่ 2.19	เปรียบเทียบค่า RMS position error ของระดับการบูรณาการ GPS/INS ระหว่างแบบ Loosely coupled integration และแบบ Tightly coupled integration .....	28
รูปที่ 2.20	ระบบโครงข่ายสถานีฐาน DOL VRS ของกรมที่ดิน.....	29
รูปที่ 2.21	การกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางตะวันออก ทางเหนือและทางดิ่งโดยใช้ VRS ที่ สถานีเปิดโล่ง.....	30

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.22 Application Program ของโปรแกรมฟรีเปิดรหัส RTKLIB.....	31
รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
รูปที่ 3.2 รูปถ่ายการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
รูปที่ 3.3 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม NovAtel CDU ในขณะที่เก็บข้อมูล GPS/IMU	35
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ Level-arm offset ระหว่าง GPS และ IMU.....	36
รูปที่ 3.5 การวัดระยะ Level-arm offset ด้วยกล้อง Total Station.....	36
รูปที่ 3.6 การขอรับบริการให้ระบบ DOL VRS สร้างสถานีฐานในตำแหน่งและเวลาที่กำหนด.....	38
รูปที่ 3.7 คุณภาพสัญญาณของสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS.....	39
รูปที่ 4.1 รูปแบบและองค์ประกอบของ GNSS Rinex file.....	41
รูปที่ 4.2 Trajectory ในพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง.....	42
รูปที่ 4.3 จำนวนดาวเทียม GPS, GLONASS และ GPS/GLONASS ในพื้นที่ชานเมือง	43
รูปที่ 4.4 จำนวนดาวเทียม GPS, GLONASS และ GPS/GLONASS ในพื้นที่ในเมือง...	43
รูปที่ 4.5 ข้อมูลดิบของอัตราเร่งและอัตราการหมุนรอบแกน 3 มิติ ที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์ SPAN-CPT.....	44
รูปที่ 4.6 หน้าตาของโปรแกรม Waypoint Inertial Explorer และการกรอกค่า Level-arm offset.....	45
รูปที่ 4.7 Trajectory ที่ได้จากระบบ GPS, GPS/GLONASS และ GPS/INS พื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง.....	46
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบ Trajectory ที่ได้จากระบบ GPS, GPS/GLONASS และ GPS/INS ในพื้นที่ต่างๆ.....	47
รูปที่ 4.9 Trajectory ที่ได้จากระบบ GPS อย่างเดียว, IMU และ GPS/IMU.....	48
รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งของ Trajectory ซ้อนทับกับภาพถ่ายทางอากาศ DMC.....	49
รูปที่ 4.11 สถานีฐาน GNSS ที่ติดตั้งบนหมุดหลักฐานถาวรในพื้นที่.....	50
รูปที่ 4.12 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ชานเมือง.....	51
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งที่เกิดค่ากระโดดขนาดใหญ่จากการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS..	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งของสถานีฐานในพื้นที่ สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS (V1) และ สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานี (V2, V3) ของพื้นที่ชานเมือง.....	52
รูปที่ 4.15 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานี กับ ตั้งสถานีฐานในพื้นที่.....	53
รูปที่ 4.16 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับการตั้ง สถานีฐานในพื้นที่ในเมือง.....	54
รูปที่ 4.17 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานีกับตั้ง สถานีฐานในพื้นที่ชานเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า $3\sigma$ .....	56
รูปที่ 4.18 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานีกับตั้ง สถานีฐานในพื้นที่ชานเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า $3\sigma$ .....	57
รูปที่ 4.19 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับการตั้ง สถานีฐานในพื้นที่ในเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า $3\sigma$ .....	58
รูปที่ 4.20 เปลี่ยนโหมดการทำงานจาก Static เป็น Kinematic ใน Observation rinex file...	60
รูปที่ 4.21 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ประมวลผล GPS/GLONASS ของซอฟต์แวร์ Leica Geo office.....	61
รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล GPS/GLONASS ด้วยซอฟต์แวร์ Leica Geo office	61
รูปที่ 4.23 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ประมวลผล GPS/GLONASS ของซอฟต์แวร์ GrafNav.....	62
รูปที่ 4.24 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล GPS/GLONASS ด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav...	63
รูปที่ 4.25 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ประมวลผล GPS/GLONASS ของซอฟต์แวร์ RTKPOST.....	64
รูปที่ 4.26 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล GPS/GLONASS ด้วยซอฟต์แวร์ RTKPOST	64
รูปที่ 4.27 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ Leica Geo Office กับ GrafNav.....	65
รูปที่ 4.28 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB.....	66
รูปที่ 4.29 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB ของ Fixed solution..	67
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบ Trajectory ที่คำนวณด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB และ GrafNav ของ Fixed solution และ Float solution.....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการแผนที่และข้อมูลภูมิสารสนเทศที่เป็นปัจจุบันยังเป็นที่ต้องการเสมอสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ด้าน โดยเฉพาะการทำแผนที่และปรับปรุงแผนที่ในเมืองที่มีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำแผนที่และปรับปรุงข้อมูลแผนที่คือระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ได้ (Mobile Mapping System, MMS) เป็นระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่สามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างรวดเร็วโดยการเคลื่อนผ่าน ครอบคลุมการใช้เครื่องมือสำรวจรังวัดที่เคลื่อนย้ายได้โดยบุคคล ยานพาหนะบนพื้นดิน เรือแล่นบนผิวน้ำ ไปจนถึงอากาศยาน (El-Sheimy, 2004) ในปัจจุบันเทคโนโลยีการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ได้ที่ใช้ยานพาหนะบนพื้นดินนั้นจะถูกติดตั้งระบบบันทึกภาพรอบทิศทางในการบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูงของโครงข่ายถนนและสภาพแวดล้อมของสิ่งที่ปรากฏ ณ ขณะเวลาที่ทำการสำรวจ ระบบวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ระบบนำหนความละเอียดถูกต้องสูง (Precise navigation) เพื่อให้ทราบวิถีของยานพาหนะ (Vehicle Trajectory) ซึ่งการเชื่อมโยงค่าพิกัดไปยังวัตถุทั้งสามมิติ (3D object coordinate) ของสิ่งที่ปรากฏต่างๆ ที่ต้องการวัดนั้นจะขึ้นอยู่กับระบบนำหนที่ติดตั้งบนยานพาหนะ

วิธีการในการได้มาซึ่งวิถีของยานพาหนะที่ถูกต้องสูงจะได้มาจากวิธีหลักๆ ได้แก่ วิธีการรังวัดด้วยภาพถ่าย (Photogrammetry) และวิธีการรังวัดโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหนซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและทำงานได้รวดเร็ว แต่การทำงานด้วยวิธีการรังวัดโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหนมักจะเกิดปัญหาเรื่องจำนวนดาวเทียมไม่เพียงพอต่อการทำงานโดยเฉพาะพื้นที่ในเขตเมือง เนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนดาวเทียมที่ได้มาจากระบบ GPS เพียงระบบเดียว ทำให้ไม่สามารถรังวัดตำแหน่งได้ในจุดที่มีจำนวนดาวเทียมไม่ครบ 4 ดวง แต่ในปัจจุบันมีระบบดาวเทียม GLONASS ที่พัฒนาโดยประเทศรัสเซีย เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ปี 1970 ซึ่งในปัจจุบันปี 2011 มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 22 ดวง (IAC, 2011) ซึ่งหากรวมกับระบบดาวเทียม GPS ที่มีจำนวนดาวเทียม 31 ดวง (USNO, 2011) รวมเป็นทั้งหมด 53 ดวง (ข้อมูล ณ วันที่ 22 มกราคม 2554) จะมีผลทำให้เพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณจากดาวเทียมมากขึ้น เรายกคณิตของการกำหนดตำแหน่งจะดีขึ้น ส่งผลให้ปัญหาการบดบังสัญญาณของอาคารสิ่งปลูกสร้างในเมืองลดลง

อย่างไรก็ตาม การได้ตำแหน่งในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดสูง ได้แก่ พื้นที่มีการบดบังสัญญาณด้วยสภาพทางกายภาพของพื้นที่ เช่น ใต้ทางด่วน อุโมงค์ ใต้สถานีรถไฟฟ้าบีทีเอส การใช้ระบบดาวเทียมนำหนเพียงระบบเดียวนั้นไม่เพียงพอ ซึ่งเทคโนโลยีระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย

(Inertial Navigation System, INS) ได้ถูกนำมาบูรณาการร่วมกับ GPS รวมเรียกว่า GPS/INS integration เพื่อลดข้อจำกัดของสภาพทางกายภาพของพื้นที่ เนื่องจาก GPS นั้นสามารถให้ข้อมูลทางตำแหน่ง ความเร็วและเวลาที่ถูกต้องสูงโดยไม่มีผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนตามเวลาแต่ก็ต้องการอาศัยการรับสัญญาณที่ต่อเนื่อง ซึ่งถือว่าเป็นข้อด้อยของ GPS ในขณะที่ INS สามารถให้ข้อมูลเชิงตำแหน่ง ความเร็ว และการวางตัว โดยมีอัตราการให้ข้อมูลที่สูงกว่าได้ แต่อย่างไรก็ดี INS เองก็ยังมีข้อด้อยในเรื่องของค่าคลาดเคลื่อนที่มีการสะสมตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการบูรณาการเทคโนโลยีทั้งสองชนิดที่มีข้อเด่นและข้อด้อยของแต่ละระบบที่แตกต่างกัน แต่ข้อเด่นของทั้งสองเทคโนโลยีสามารถช่วยส่งเสริมกันและกันได้ ระบบบูรณาการดังกล่าวประกอบด้วยหน่วยตรวจจับการเคลื่อนไหวด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit, IMU) ได้แก่ เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) และเครื่องวัดอัตราการหมุน (Gyroscope) เมื่อนำมาประมวลผลร่วมกับข้อมูล GPS ทำให้ได้ข้อมูลการนำหนของยานพาหนะอย่างต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่างๆ (Kim et al, 1998, Lee, 2004, Kennedy et al, 2007, Hao et al, 2009, Martin et al, 2010)

ในการทำงานรังวัดด้วยดาวเทียมนำหนที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงนั้นจะใช้เทคนิคการรังวัดแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning) วิธีการนี้จะอ้างอิงจากหมุดที่ทราบค่าพิกัดที่ใช้เป็นสถานีฐาน แต่การอ้างอิงนี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับสถานีฐาน ซึ่งหากสถานีฐานเกิดการหลุดตัวส่งผลให้ค่าพิกัดที่รังวัดได้มีความผิดพลาดไปด้วย และผู้ใช้จะต้องจัดหาเครื่องรับ 2 เครื่องในการทำงาน อีกทั้งต้องใช้เวลาในการค้นหา เดินทางเข้าสู่สถานีฐาน การติดตั้ง และการเฝ้าระวัง ส่งผลให้สิ้นเปลืองทั้งแรงงานและงบประมาณ ปัจจุบันกรมที่ดินเป็นหน่วยงานแรกของประเทศไทยที่นำระบบสถานีฐานแบบโครงข่ายและทำงานแบบ VRS (Virtual Reference Station) มาใช้ในการสำรวจรังวัดที่ดิน (กรมที่ดิน, 2553) โดยได้ติดตั้งสถานีฐานรับสัญญาณดาวเทียม GPS/GLONASS ทั้งหมด 11 สถานีครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ นครปฐม ชลบุรี และสระบุรี และระบบยังให้บริการสร้างไฟล์ RINEX ในตำแหน่งและวันเวลาที่ผู้ใช้กำหนดผ่านทางเว็บไซต์ ดังนั้นหากสามารถใช้สถานีฐานเสมือน VRS จากบริการดังกล่าวมาทดแทนการตั้งสถานีฐานในพื้นที่ จะช่วยให้เกิดความสะดวกรวดเร็ว และสามารถลดต้นทุนทั้งแรงงานและงบประมาณได้

ในปัจจุบันวิวัฒนาการของซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส (Free/Libre and Open Source Software) ได้รับการพัฒนามากขึ้นและนำไปใช้งานในงานปฏิบัติได้จริง รวมทั้งซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลสัญญาณดาวเทียมนำหน คือ RTKLIB ในปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 2.4.0 รองรับการทำงานแบบ Real-Time และ Post-processing สามารถประมวลผลข้อมูลดาวเทียม GPS และ GLONASS ทั้งการรังวัดในโหมด Single, DGNS, Kinematic, Static, Moving Baseline, PPP และ Fixed ดังนั้นหากสามารถนำซอฟต์แวร์ดังกล่าวที่สามารถใช้งานได้ฟรีมาทดแทนซอฟต์แวร์

เชิงพาณิชย์ในการประมวลผลสัญญาณดาวเทียมสำหรับการหาวิถีของยานพาหนะ จะส่งผลให้ลดต้นทุนในงานจัดทำแผนที่ได้

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหนที่ได้จาก GPS, GPS ร่วมกับ GLONASS เรียกว่า GPS/GLONASS และระบบบูรณาการ GPS/INS เพื่อประเมินการมีค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability) ในพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมืองหนาแน่น พร้อมทั้งได้ประเมินและเปรียบเทียบระหว่างการตั้งสถานีฐานในพื้นที่กับการใช้สถานีฐานของกรมที่ดินเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานเสมือน (VRS) นอกจากนี้ยังได้ประเมินถึงศักยภาพของซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB สำหรับการประมวลผลสัญญาณดาวเทียมนำหนในการหาวิถีของยานพาหนะด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะ (Trajectory) ที่ได้จากการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมนำหน GPS, GPS/GLONASS และระบบบูรณาการ GPS/INS
- 1.2.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพวิถีของยานพาหนะของการมีค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability) ที่ได้จากการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมนำหน GPS, GPS/GLONASS และระบบบูรณาการ GPS/INS
- 1.2.3 เพื่อประเมินศักยภาพของสถานีฐานเสมือน (VRS) ที่สร้างจากระบบให้บริการของกรมที่ดิน เปรียบเทียบกับการตั้งสถานีฐานในพื้นที่ในการประมวลผลวิถีของยานพาหนะ
- 1.2.4 เพื่อประเมินศักยภาพของซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB เปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ในการหาผลลัพท์ในรูปแบบค่าพิกัดซึ่งเป็นวิถีของยานพาหนะ

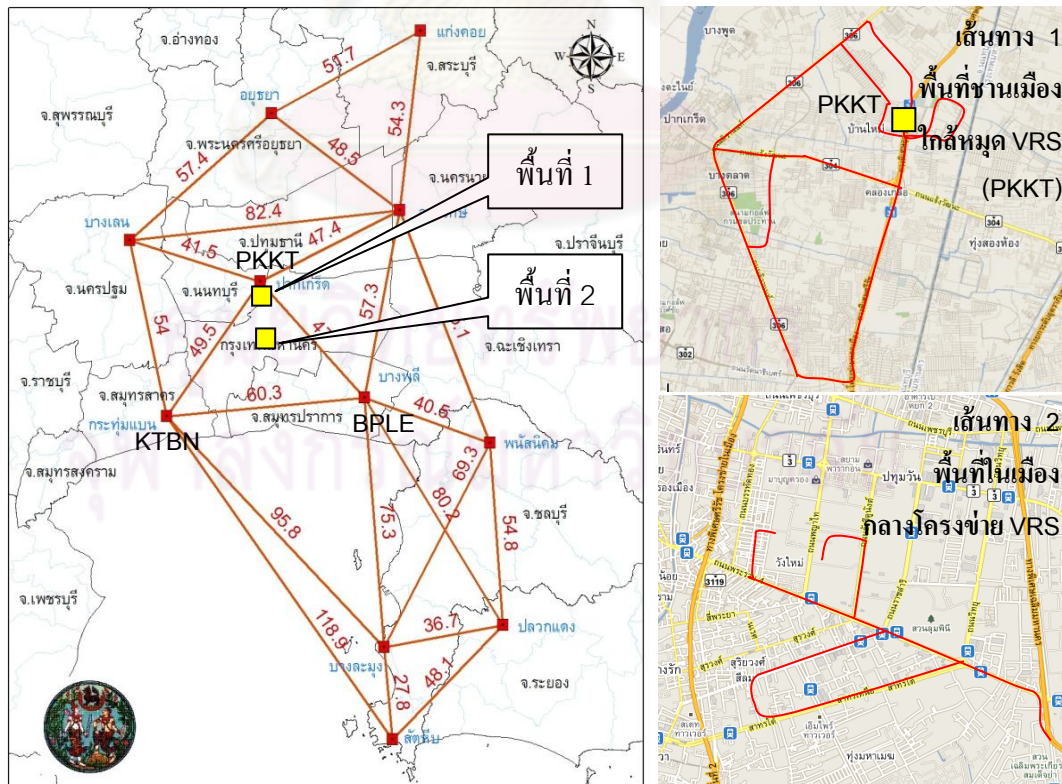
## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา
  - 1.3.1.1 ศึกษาวิธีการรังวัดสัญญาณดาวเทียมนำหนด้วยเครื่องรับประเภทรังวัดชนิดสองความถี่ระบบ GPS และระบบ GLONASS เท่านั้น ซึ่งเรียกรวมในงานวิจัยนี้ว่าระบบ “GPS/GLONASS” โดยมีการเลือกใช้ข้อมูลความถี่เดียวและสองความถี่มาประมวลผล
  - 1.3.1.2 ศึกษาวิธีการรังวัดตำแหน่งด้วยระบบบูรณาการ GPS/INS โดยมีการเลือกใช้ข้อมูล GPS เพียงระบบเดียว และ GPS/INS มาประมวลผล
  - 1.3.1.3 การประมวลผลสัญญาณดาวเทียม GPS/GLONASS และระบบบูรณาการ GPS/INS เป็นแบบ Post-processing เท่านั้น

1.3.1.4 การใช้สถานีฐานของกรมที่ดินเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานเสมือน (VRS) เรียกในงานวิจัยนี้ว่า “สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS” จะสร้างในตำแหน่งประมาณกลางโครงข่ายเส้นทางวิ่งรถ

### 1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ในการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ชานเมืองที่เป็นตัวแทนของพื้นที่เปิดโล่งซึ่งสามารถรับสัญญาณดาวเทียมนำหน้ได้ดี และพื้นที่ในเมืองที่เป็นตัวแทนของพื้นที่บดบังสัญญาณของดาวเทียมที่เกิดจากสภาพทางกายภาพของพื้นที่ และจากผลการประเมินค่าความถูกต้องแบบสถิติของการรังวัดด้วยดาวเทียม GPS แบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐาน VRS ของกรมที่ดิน พบว่าค่าพิกัดทั้งทางราบและทางตั้งในบางช่วงเวลามีค่ากระโดดขนาดใหญ่ในระดับ 10 เซนติเมตร (ธีรทัต เจริญภาลัญญูตา และเฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2552) ซึ่งหากพิจารณาระยะทางของสถานีฐานในโครงข่ายแต่ละสถานีพบว่ามึระยะทางค่อนข้างไกล อาจส่งผลให้ระบบยังมีค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดแฝงอยู่ ด้วยเหตุผลทั้งสองประการข้างต้น จึงได้ทำการคัดเลือกพื้นที่ ได้แก่ พื้นที่บริเวณกรมที่ดินสาขาปากเกร็ดและใกล้เคียง เนื่องจากอยู่ใกล้กับสถานีฐานถาวรของโครงข่าย VRS (หมู่ด PKKT) ที่ตั้งอยู่ที่อาคารรังวัดและทำแผนที่ กรมที่ดิน จังหวัดนนทบุรีและเป็นพื้นที่ชานเมือง, พื้นที่ย่านสาทร สีลมและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากเป็นจุดที่อยู่ตรงกลางโครงข่าย (หมู่ด KTBN, PKKT, BPLE) และเป็นพื้นที่เมืองหนาแน่น ดังรูปที่ 1.1

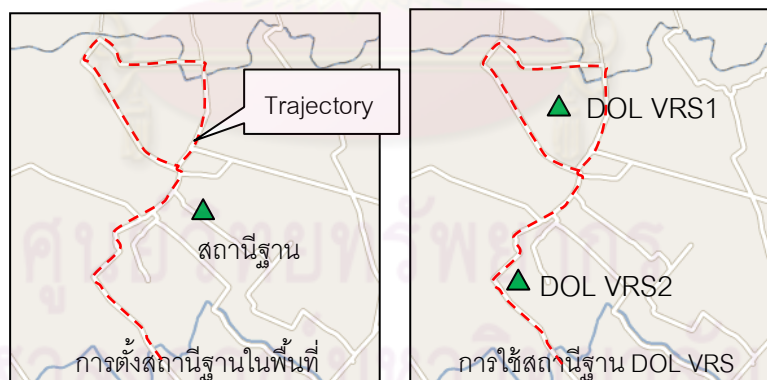


รูปที่ 1.1 ระบบโครงข่ายสถานีฐาน VRS ของกรมที่ดินและพื้นที่ศึกษา



## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาวิธีการรังวัดสัญญาณดาวเทียมนำหนดด้วยเครื่องรับสัญญาณชนิดหนึ่งความถี่และสองความถี่
- 1.4.3 ศึกษาการทำงานของระบบบูรณาการ GPS/INS
- 1.4.4 ติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมชนิดสองความถี่พร้อมอุปกรณ์ที่สถานีฐานในพื้นที่
- 1.4.5 ติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS/GLONASS, GPS/IMU พร้อมอุปกรณ์บนยานพาหนะ วัดระยะ Level arm offset วิ่งรถเก็บข้อมูลในเส้นทางของพื้นที่ที่ได้ออกแบบไว้
- 1.4.6 สร้างไฟล์ RINEX ของสถานีฐานเสมือน ( VRS) จากเว็บไซต์ให้บริการของกรมที่ดินในเส้นทางและเวลาที่วิ่งรถ
- 1.4.7 ประมวลผลข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมในภายหลัง (Post-processing) ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ได้แก่ Leica Geo Office, GrafNav และซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB
- 1.4.8 ประเมินประสิทธิภาพวิถีของยานพาหนะที่ได้จากระบบ GPS, GPS/GLONASS และ GPS/INS
- 1.4.1 สรุปผลการศึกษา เรียบเรียง จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



รูปที่ 1.2 แนวคิดการใช้สถานีฐานเดียวในพื้นที่และสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เรียนรู้การทำงานของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนำหน้ประเภทรังวัดชนิดหนึ่ง ความถี่ สองความถี่ และระบบบูรณาการร่วมของ GPS/INS ในการหาวิถีของ ยานพาหนะ
- 1.5.2 ได้ทราบถึงประสิทธิภาพวิถีของยานพาหนะที่ได้จากข้อมูลการรังวัดด้วยดาวเทียม GPS, GPS/GLONASS และระบบบูรณาการ GPS/INS
- 1.5.3 ได้ทราบถึงประสิทธิภาพของสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS ของกรมที่ดิน เปรียบเทียบกับการตั้งสถานีฐานที่ในพื้นที่
- 1.5.4 ได้ทราบถึงศักยภาพและความสามารถของซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB ในการประมวลผลสัญญาณดาวเทียม GPS/GLONASS สำหรับการคำนวณตำแหน่งแบบ เคลื่อนที่



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

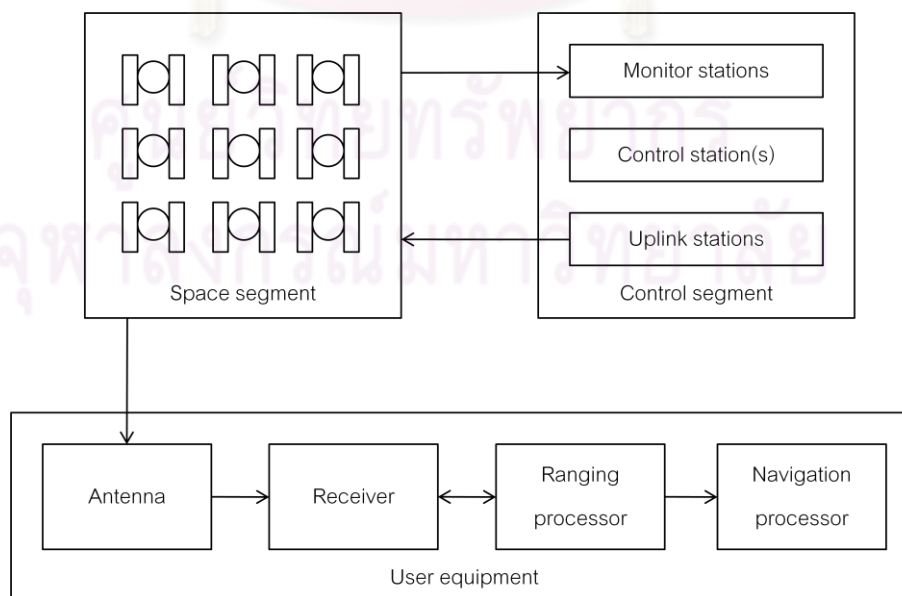
## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบนำหนด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม (Navigation Satellite Systems, NSS)

##### 2.1.1 ระบบดาวเทียมนำหนบนโลก (Global Navigation Satellite Systems, GNSS)

การหาค่าพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียมได้เป็นที่รู้จักและมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการสำรวจจริงวัดแบบเดิม นั่นคือสามารถทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืนตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่ขึ้นกับสถานที่และสภาพอากาศ มีความสะดวกในการทำงาน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเลือกตำแหน่งมุมดูให้มองเห็นกัน อีกทั้งไม่เสียค่าใช้จ่ายในการรับสัญญาณดาวเทียมมีแต่เพียงค่าใช้จ่ายในส่วนของอุปกรณ์รับสัญญาณและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีทางการสำรวจจริงวัดด้วยดาวเทียมได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จนได้มีการกำหนดคำเฉพาะขึ้นมาที่มีชื่อว่า Global Navigation Satellite Systems หรือเรียกโดยย่อว่า GNSS โดยเป็นคำที่ใช้แทนระบบการหาพิกัดตำแหน่งด้วยดาวเทียม ที่ประกอบด้วยดาวเทียมหลายระบบรวมกัน (โดยปกติหมายถึง ต้องมีอย่างน้อย 2 ระบบขึ้นไป) ได้แก่ ระบบดาวเทียม GPS ของสหรัฐอเมริกา ระบบดาวเทียม GLONASS ของรัสเซีย ระบบดาวเทียม Galileo ของสหภาพยุโรป ระบบดาวเทียม Beidou (หรือ Compass) ของประเทศจีน ระบบดาวเทียม IRNSS ของอินเดีย ระบบดาวเทียม DORIS ของฝรั่งเศส ระบบดาวเทียม QZSS ของญี่ปุ่น ซึ่งทุกระบบจะมีส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนอวกาศ (Space segment) ส่วนควบคุม (Control segment) และส่วนผู้ใช้ (User segment) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมของระบบดาวเทียมนำหน GNSS (Grove, 2008)

### 2.1.1.1 ระบบดาวเทียม GPS

ระบบดาวเทียม GPS (Global Positioning System, GPS) เป็นระบบที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียม GPS ถูกพัฒนาโดยกระทรวงกลาโหม (The United States Department of Defense, DoD) ประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 เพื่อประโยชน์ทางการทหารและหน่วยงานราชการของสหรัฐอเมริกา โดยใช้การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุลงมายังพื้นโลก เมื่อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS รับสัญญาณจากดาวเทียมได้แล้วจะนำเอาข้อมูลต่างๆ ที่ได้ไปประมวลผลหาตำแหน่งที่ต้องการ

ระบบดาวเทียม GPS ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนอวกาศ ส่วนควบคุม และส่วนผู้ใช้ โดยส่วนควบคุมจะมีสถานีติดตามภาคพื้นดินที่กระจายอยู่บนพื้นโลกเพื่อคอยติดตามการเคลื่อนที่ของดาวเทียม ซึ่งทำให้สามารถคำนวณวงโคจรและตำแหน่งของดาวเทียมที่ช่วงเวลาต่างๆ ได้ จากนั้นส่วนควบคุมก็จะทำนายวงโคจรและตำแหน่งของดาวเทียมทุกดวงในระบบล่วงหน้าแล้วส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังส่วนอวกาศซึ่งก็คือตัวดาวเทียม ดาวเทียมก็จะทำการส่งข้อมูลเหล่านี้ออกมาพร้อมกับคลื่นวิทยุมายังโลก ในส่วนของผู้ใช้เมื่อต้องการจะทราบตำแหน่งของจุดใดๆ ก็เพียงนำเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมไปตั้งตรงจุดที่ต้องการหาตำแหน่ง แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลก็จะทราบตำแหน่งที่ต้องการ

ในส่วนอวกาศประกอบด้วยตัวดาวเทียมและสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียม โดยระบบออกแบบให้มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวง โคจรอยู่ในวงโคจร 6 ระนาบ แต่ละระนาบมีจำนวนดาวเทียม 4 ดวง โดยทุกระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร 55 องศา และทำมุมระหว่างกัน 60 องศา มีวงโคจรเหนือพื้นโลกประมาณ 20,200 กิโลเมตร และมีคาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาที ดังรูปที่ 2.2



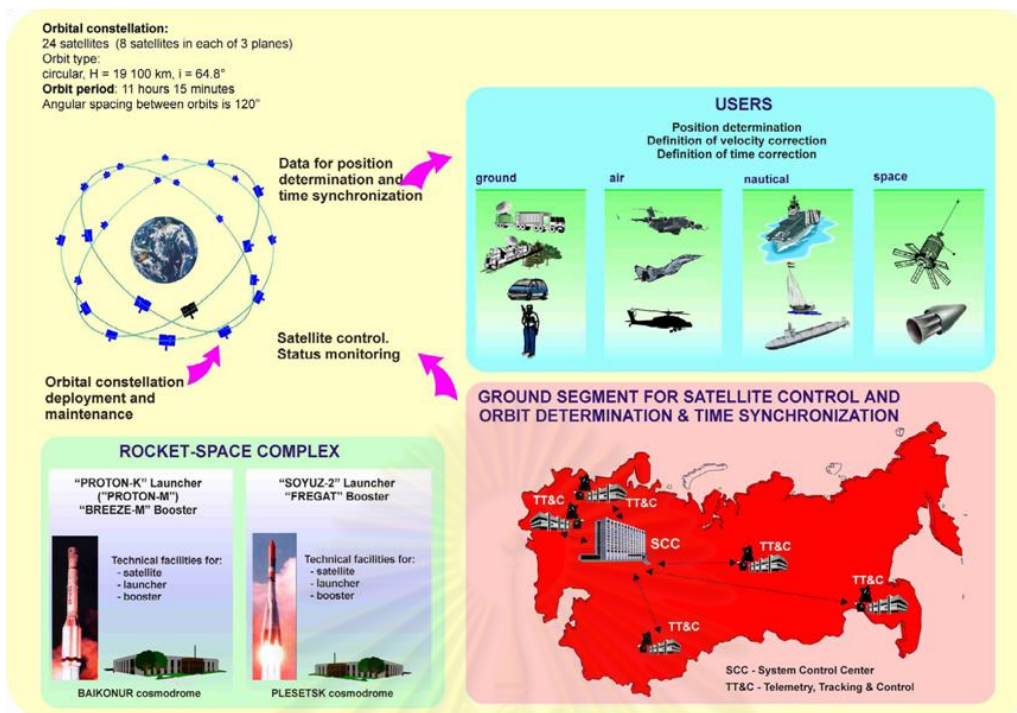
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS (NGA, 2011)

จากตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS ในลักษณะดังกล่าวทำให้ผู้ใช้สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวงทั่วโลกตลอด 24 ชั่วโมง ในปัจจุบันมีดาวเทียมอยู่ในวงโคจรถึง 31 ดวง (ข้อมูล ณ วันที่ 22 มกราคม 2554)

คลื่นสัญญาณที่ดาวเทียม GPS ส่งออกมาเป็นคลื่นวิทยุในช่วงคลื่น L-band ที่มีสองความถี่คือ ความถี่ 1575.42 MHz เรียกว่าคลื่น L1 ซึ่งมีความยาวคลื่น 19.05 cm และความถี่ 1227.60 MHz เรียกว่าคลื่น L2 ซึ่งมีความยาวคลื่น 24.45 cm คลื่นวิทยุดังกล่าวจะถูกกล้ำสัญญาณ (Modulation) ด้วยรหัสและข้อมูลดาวเทียม รหัสที่ใช้ในการกล้ำสัญญาณมี 2 ชนิดคือ รหัส C/A-code (Coarse/Acquisition-code) มีความถี่ 1.023 MHz ความยาวคลื่น 300 m และรหัส P-code (Precision-code) มีความถี่ 10.23 MHz ความยาวคลื่น 30 m ซึ่งรหัส P-code จะส่งวนไว้ใช้เฉพาะในวงทหารและบางหน่วยงานของสหรัฐอเมริกาเท่านั้น ในคลื่น L1 นั้นจะถูกกล้ำสัญญาณด้วยรหัสทั้งสองชนิด แต่คลื่น L2 จะถูกกล้ำสัญญาณเฉพาะรหัส P-code ส่วนข้อมูลดาวเทียมจะมีทั้งในคลื่น L1 และ L2 โดยข้อมูลนำหนดาวเทียม (Navigation message) จะประกอบด้วยข้อมูลวงโคจรดาวเทียมหรืออีพีเมอริสดาวเทียม (Satellite ephemerides) ค่าแก้ไขนาฬิกาดาวเทียม (Satellite clock corrections) และสถานะภาพของดาวเทียม (Satellite status)

#### 2.1.1.2. ระบบดาวเทียม GLONASS

ระบบดาวเทียม GLONASS เป็นระบบที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียม GLONASS ถูกพัฒนาโดยสหภาพโซเวียต (Union of Soviet Socialist Republics, USSR) หรือประเทศรัสเซียในปัจจุบัน มาตั้งแต่ปี 1970 ดาวเทียมดวงแรกถูกส่งขึ้นเมื่อปี 1982 โดยระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้มีความคล้ายคลึงกับระบบดาวเทียม GPS ทั้งส่วนประกอบและหลักการทำงาน ที่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนอวกาศ ส่วนควบคุม และส่วนผู้ใช้ ดังรูปที่ 2.3 โดยระบบออกแบบให้มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวง โคจรอยู่ในวงโคจร 3 ระนาบ แต่ละระนาบมีดาวเทียม 8 ดวง โดยทุกระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร 64.8 องศา และทำมุมระหว่างกัน 120 องศา มีวงโคจรเหนือพื้นโลกประมาณ 19,100 กิโลเมตร และมีคาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 15 นาที ดังตารางที่ 2.1 แต่เนื่องจากรัสเซียประสบปัญหาทางเศรษฐกิจจึงทำให้ไม่สามารถส่งดาวเทียมขึ้นไปในวงโคจรได้ตามแผนที่วางไว้ ซึ่งระบบดาวเทียม GLONASS ได้รับการประกาศเริ่มปฏิบัติงานอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 24 กันยายน 1993 ปัจจุบันปี 2011 จำนวนดาวเทียมได้ถูกส่งขึ้นไปในวงโคจรทั้งหมด 26 ดวง โดยใช้งานได้ 22 ดวงและซ่อมบำรุงรักษาอีก 4 ดวง รายละเอียดเกี่ยวกับสถานะของดาวเทียม GLONASS สามารถดูได้ที่ <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของระบบดาวเทียม GLONASS (Polischuk et al., 2002)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS ข้อมูล ณ 22/1/2554 (ดัดแปลงจาก Cai, 2009)

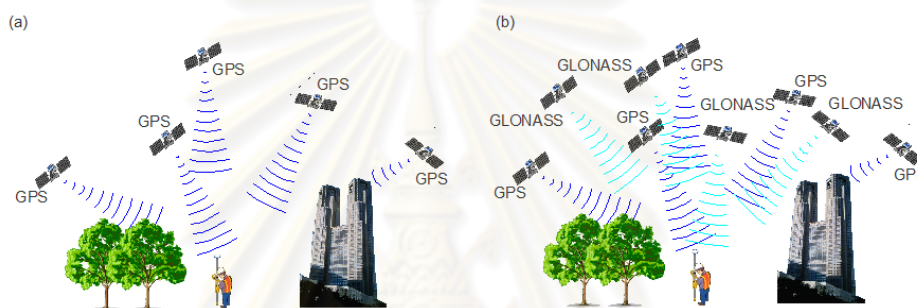
Parameter	Detail	GLONASS <sup>1</sup>	GPS <sup>2</sup>
Satellites	Number of satellites	24 (22)	24 (31)
	Number of orbital planes	3	6
	Number of satellite in each planes	8	4
	Orbital plane inclination (degrees)	64.8	55
	Orbital altitude (kilometers)	19,100	20,200
	Period of revolution	11h 15m	11h 58m
	Time reference	UTC (SU)	UTC (USNO)
	Position reference (geodetic datum)	PZ-90	WGS84
Signals	Signal separation technique	FDMA	CDMA
	Carrier frequencies (MHz) L1	1598.0625 – 1609.3125	1575.42
	L2	1242.9375 – 1251.6875	1227.6
	Code clock rate (MHz) C/A	0.511	1.023
	P	5.11	10.23

<sup>1</sup> อ้างอิงจาก GLONASS Interface Control Document (ICD), Version 5.0, Moscow, 2002

<sup>2</sup> อ้างอิงจาก UNITED STATES NAVAL OBSERVATORY (USNO), 2011

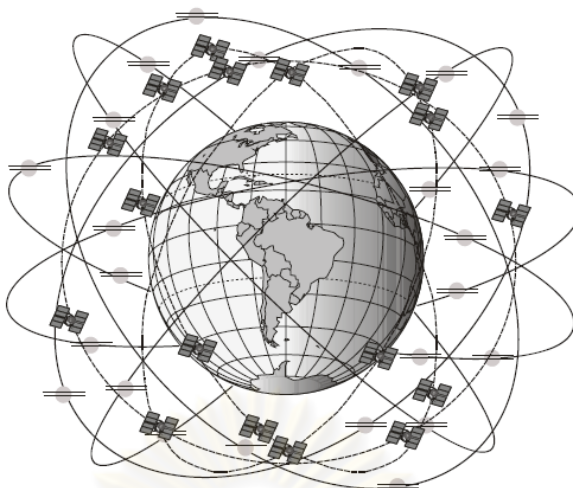
## 2.1.2 การรวมระบบดาวเทียม GLONASS มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบดาวเทียม GPS

โดยทั่วไปค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลทางตำแหน่งที่ได้รับจาก GPS นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียมและเรขาคณิตของดาวเทียมในขณะที่ได้รับสัญญาณ ในงานที่สามารถเลือกตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณและเวลาที่จะรับสัญญาณได้นั้น การใช้ข้อมูลจาก GPS เพียงระบบเดียวก็เพียงพอ แต่ในบางพื้นที่ ดังเช่น การทำงานในเมืองที่เต็มไปด้วยตึกสูงหรือบริเวณที่มีต้นไม้หนาแน่นมาก็ีความยากลำบาก ทำให้จำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้นั้นไม่เพียงพอต่อการหาตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.4(a) แต่เมื่อมีการเพิ่มจำนวนดาวเทียมจากระบบ GLONASS จะช่วยให้ได้ตำแหน่งในจุดดังกล่าว ดังรูปที่ 2.4(b)



รูปที่ 2.4 ระบบดาวเทียม GPS/GLONASS ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำหนดตำแหน่งในพื้นที่เมืองและพื้นที่ที่มีสิ่งปกคลุม (ดัดแปลงจาก ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553)

ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการผนวกรวมกับระบบอื่นเข้ากับ GPS เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบที่มีอยู่เดิม วิธีการหนึ่งได้แก่การเพิ่มจำนวนดาวเทียม ซึ่งในปัจจุบันมีระบบดาวเทียม GLONASS ที่มีจำนวนดาวเทียมอยู่ในวงโคจร 22 ดวง เมื่อผนวกรวมกับดาวเทียมระบบ GPS 31 ดวง รวมเป็น 53 ดวง แสดงดังรูปที่ 2.5 จะมีผลทำให้การหาตำแหน่งมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น เนื่องจากมีจำนวนดาวเทียมที่เพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ค่า Dilution of Precision (DOP) ลดลง ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญจากการเพิ่มจำนวนดาวเทียมนั้นจะเพิ่มโอกาสให้พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางสัญญาณดาวเทียมโดยเฉพาะการหาตำแหน่งแบบเคลื่อนที่ในเมืองสามารถทำงานได้ต่อเนื่องมากขึ้น



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS และ GLONASS (NovAtel, 2007)

ในตารางที่ 2.2 เป็นตัวอย่างการปรากฏตัวของดาวเทียม GPS เปรียบเทียบกับดาวเทียม GPS/GLONASS สำหรับพื้นที่จังหวัดนนทบุรี ที่ตำแหน่ง Lat: 13 49 59.9, long: 100 28 59.9, Alt: 30 m ของวันที่ 1 กรกฎาคม 2553 เวลาท้องถิ่น 12.00 น. ที่ระดับมุมมองไม่ต่ำกว่า 15 องศาจากแนวราบ

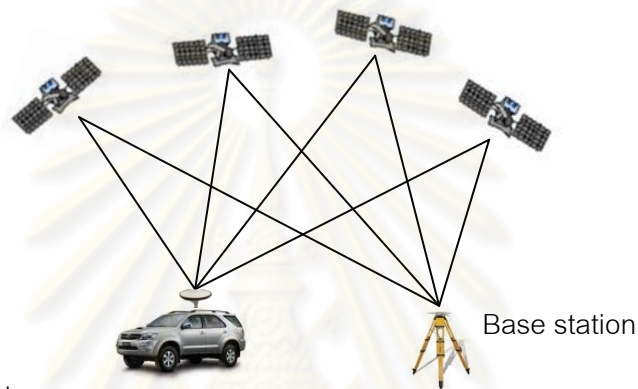
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการปรากฏของดาวเทียม GPS กับดาวเทียม GPS/GLONASS

การเปรียบเทียบ	ระบบ GPS เพียงระบบเดียว	ระบบ GPS/GLONASS
Satellite in view	12 ดวง (SV5 SV9 SV12 SV14 SV15 SV18 SV21 SV22 SV26 SV27 SV29 SV30)	21 ดวง (SV5 SV9 SV12 SV14 SV15 SV18 SV21 SV22 SV26 SV27 SV29 SV30 GLONASS713 ) GLONASS714 GLONASS718 GLONASS721 GLONASS723 GLONASS727 GLONASS728 GLONASS730 GLONASS732
DOP	GDOP=2.28 PDOP=2.16 HDOP=1.18 VDOP=1.81 TDOP=0.74	GDOP=2.28 PDOP=2.06 HDOP=1.18 VDOP=1.69 TDOP=0.73



### 2.1.3 การรังวัดวิธีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน

วิธีการรังวัดหาค่าพิกัดสำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูงจะใช้การวัดข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase) และใช้วิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning) ซึ่งจะต้องทราบตำแหน่งค่าพิกัดอย่างน้อยหนึ่งจุดเพื่อใช้หาตำแหน่งค่าพิกัดของจุดอื่นๆ เป็นการไว้เครื่องรับอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งจะวางอยู่ที่จุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว เรียกว่า สถานีฐาน (Base station) ส่วนเครื่องรับที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณในตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด ดังรูปที่ 2.6 ผลที่ได้จากการทำงานในลักษณะนี้จะสามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนมีระบบ (Systematic error) ทิ้งไป ทำให้สามารถบีบค่าความถูกต้องลงมาอยู่ในระดับเซนติเมตรได้ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2552)

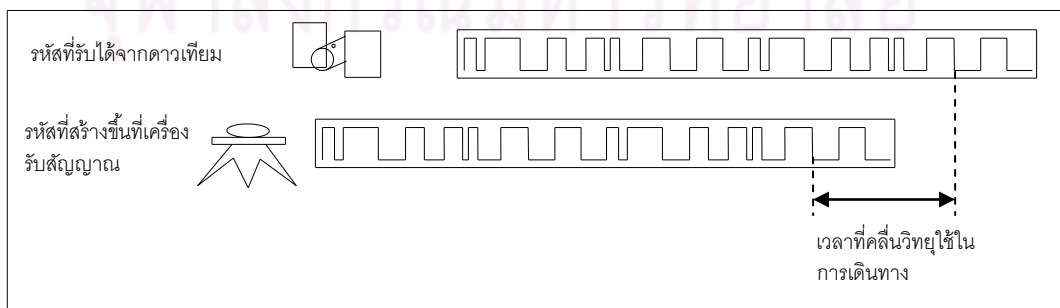


รูปที่ 2.6 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

อย่างไรก็ตาม ค่าที่รังวัดได้จากการรับสัญญาณดาวเทียมนำหนและนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาตำแหน่งที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ ชูโดเรนจ์ (Pseudorange) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)

#### - ชูโดเรนจ์ (Pseudorange)

ชูโดเรนจ์ คือ ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณ หาได้จากการถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมเปรียบเทียบกับรหัสที่เครื่องรับสัญญาณสร้างขึ้น โดยจะทำการเลื่อนไปมาจนได้รหัสที่ตรงกัน ค่าเลื่อนระหว่างรหัสทั้งสองคือระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ

(เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2552)

เมื่อนำความเร็วของคลื่นวิทยุคูณด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ จะได้ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณซึ่งเรียกว่า “ซูดเรนจ์” ดังสมการที่ 2.1

$$R = v \times t \quad (2.1)$$

โดยที่

$R$	คือ ระยะทางซูดเรนจ์ระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณ (เมตร)
$v$	คือ ความเร็วของคลื่นวิทยุ (เท่ากับความเร็วแสง) (เมตรต่อวินาที)
$t$	คือ ระยะเวลาที่คลื่นเดินทาง (วินาที)

ซูดเรนจ์ที่ได้ี้จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากระยะทางจริงระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนหลายชนิด เช่น ความคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม และความคลาดเคลื่อนเมื่อคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ เป็นต้น โดยมีสมการของซูดเรนจ์ที่ได้จากการหัดและมีหน่วยเป็นระยะทาง ดังนี้ (Leick, 2004)

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

โดยที่

$R$	คือ ซูดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัส (เมตร)
$\rho$	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ (เมตร)
$\Delta r$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
$d_{ion}$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
$d_{trop}$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)
$c$	คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตรต่อวินาที)
$\Delta\delta_r$	คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
$\Delta\delta^s$	คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
$dm_r$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
$\varepsilon_R$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวน (Noise) (เมตร)

ซึ่งระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับเราสามารถเขียนในรูปของสมการได้

ดังนี้

$$\rho = \sqrt{(X^s - x_i)^2 + (Y^s - y_i)^2 + (Z^s - z_i)^2} \quad (2.3)$$

โดยที่

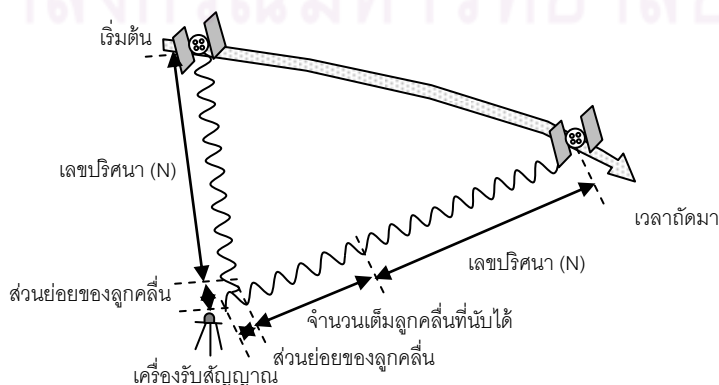
$X^s, Y^s, Z^s$  คือ ค่าพิกัดของดาวเทียม

$x_i, y_i, z_i$  คือ ค่าพิกัดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

เมื่อแทนค่าสมการ (2.3) ในสมการ (2.2) จะพบว่า มีตัวแปรไม่ทราบค่า ได้แก่ ค่าพิกัด  $(x, y, z)$  ของเครื่องรับ และค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ซึ่งวิธีการที่นิยมกันอย่างแพร่หลายที่ใช้ในการขจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นดังกล่าว คือ เทคนิคการหาค่าต่าง (Differencing technique) อย่างไรก็ตามการหาตำแหน่งพื้นฐานที่สุด ได้แก่ การหาตำแหน่งจุดเดียวจะใช้สมมติฐานเบื้องต้นว่าตำแหน่งของดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมเป็นค่าที่ทราบ (สามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์ที่อยู่ในข้อมูลนำหนที่ส่งมาพร้อมกับคลื่นสัญญาณดาวเทียม) ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนจากการล่าช้าเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศได้ถูกปรับแก้ด้วยแบบจำลองมาตรฐานไปแล้ว และไม่คำนึงถึงค่าความคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีและค่าความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนในเครื่องรับ ดังนั้น จะพบว่า มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า คือ ตำแหน่งของเครื่องรับ 3 ตัวแปร และค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอีก 1 ตัว และจะเห็นว่าการวัดระยะทางไปยังดาวเทียมแต่ละดวงสามารถนำมาสร้างสมการได้ 1 สมการ ดังนั้นจึงต้องวัดระยะทางไปยังดาวเทียม 4 ดวง จึงจะเพียงพอในการคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับ

#### - เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)

สำหรับงานที่ต้องการค่าความละเอียดถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตรจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการประมวลผล ซึ่งการวัดเฟสของคลื่นส่งในเครื่องรับเป็นการวัดเปรียบเทียบหรือค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมากับเฟสของคลื่นความถี่  $f_0$  ที่เครื่องรับสร้างขึ้นมา โดยคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมานั้นแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของคลื่นจำนวนเต็มรอบ (Integer cycle part) กับส่วนที่ไม่เต็มรอบ (Fractional part) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การวัดระยะทางด้วยเฟสของคลื่นส่ง (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2546)

ในการรับสัญญาณนั้นเครื่องรับสัญญาณไม่สามารถจะนับจำนวนเต็มรอบของคลื่นส่งที่ส่งลงมาได้ จำนวนเต็มรอบนี้มีชื่อเรียกว่า Ambiguity หรือเลขปริศนา การวัดเฟสของคลื่นส่งมีสมการดังนี้ (Leick, 2004)

$$\phi = \rho + \Delta r - d_{ion} + d_{trop} + c(\Delta\delta_r - \Delta\delta^s) + dm_\phi + \varepsilon_\phi + \lambda N \quad (2.4)$$

โดยที่

$\phi$	คือ ชูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัส (เมตร)
$\rho$	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ (เมตร)
$\Delta r$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
$d_{ion}$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
$d_{trop}$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)
$c$	คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตรต่อวินาที)
$\Delta\delta_r$	คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
$\Delta\delta^s$	คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
$dm_\phi$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
$\varepsilon_\phi$	คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวน (Noise) (เมตร)
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)
$N$	คือ Ambiguity หรือเลขปริศนาของคลื่นส่ง

อย่างไรก็ตามการกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียมนำหน GNSS มีด้วยกันหลายเทคนิค แต่ละเทคนิคต้องการเครื่องมืออุปกรณ์ วิธีการทำงาน ข้อมูลที่นำมาประมวลผล ซอฟต์แวร์ที่ใช้ รวมไปถึงวิธีการสื่อสารระหว่างระบบที่เคลื่อนที่และสถานีฐาน ทั้งนี้เทคนิคเหล่านี้จะให้ความน่าเชื่อถือ ความสะดวกในการทำงาน และให้ความละเอียดถูกต้องแตกต่างกันไปตั้งแต่ระดับ 10 เมตร ไปจนถึงระดับเซนติเมตร ดังตารางที่ 2.3

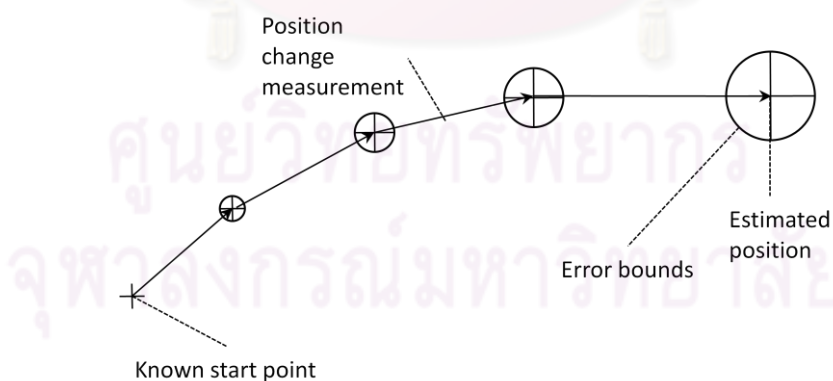
ตารางที่ 2.3 เทคนิคการกำหนดตำแหน่ง ความละเอียดถูกต้องและวิธีการประมวลผลโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน (Jeffrey, 2010)

Method	Accuracy	Real-time/Post-processed
Pseudorange	10 m-level	Post-processed
Pseudorange-based differential	m-level	Post-processed
WASS pseudorange	m-level	Real-time
Differential with base station	cm-level(*)	Real-time/Post-processed
Differential with network solution	cm-level	Real-time/Post-processed
Satellite base differential correction	Sub-m level	Real-time
RTK	cm-level	Real-time
VRS	cm-level	Real-time
PPP	Sub-dm level	Post-processed

(\*) ขึ้นอยู่กับระยะเส้นฐาน

## 2.2 ระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial Navigation System, INS)

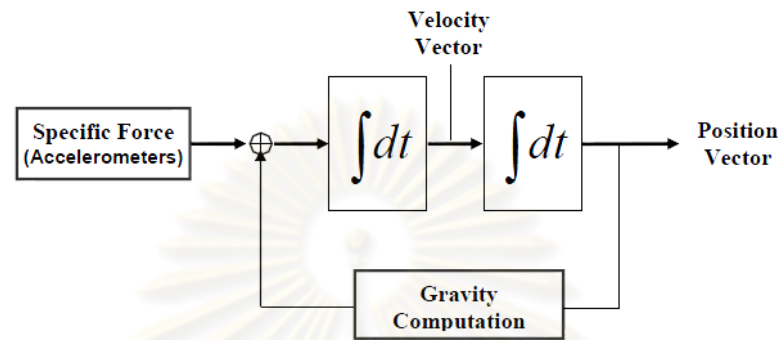
การนำหนด้วยการวัดความเฉื่อยเป็นวิธีการหาค่าตำแหน่งใดๆ จากการทำนายค่าตำแหน่งถัดไปที่อ้างอิงจากข้อมูลเก่า โดยการวัดระยะสัมพัทธ์ออกจากจุดที่ทราบแล้วสะสมไปเรื่อยๆ จะทำให้ได้ค่าพิกัดที่เป็นปัจจุบัน เรียกกระบวนการนี้ว่า Dead Reckoning (DR) ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาง ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วิธีการนำหนแบบ Dead Reckoning (Grove, 2008)

ระบบนำหนด้วยการวัดความเฉื่อยหรือ INS เป็นระบบช่วยการนำหนที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว เช่น เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้น (Linear Accelerometer) เครื่องวัดอัตราการหมุน (Gyroscope) โดยใช้หลักการวัดความเฉื่อยที่เกิดจากการที่พาหนะที่มีมวลสาร

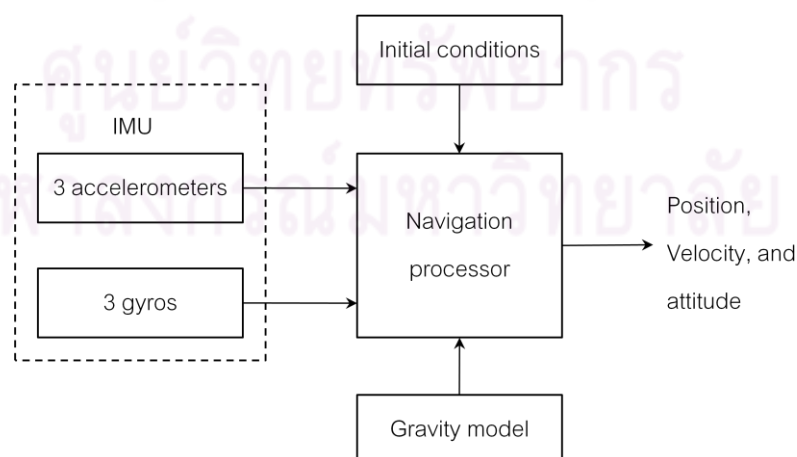
เปลี่ยนแปลงสถานะทางตำแหน่งและความเร็ว ซึ่งจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดอัตราเร่งที่สามารถตรวจวัดได้ในรูปของแรงเฉื่อย (Inertial Force) ดังนั้น ผลการคำนวณเชิงเลขและการอินทิเกรต (Integration) อัตราเร่ง (Acceleration) จะได้ความเร็ว (Velocity) และการอินทิเกรตความเร็วจะได้ระยะขจัด (Displacement) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แนวคิดพื้นฐานของระบบนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อย (Savage, 2000)

### 2.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (Inertial Measure Unit, IMU)

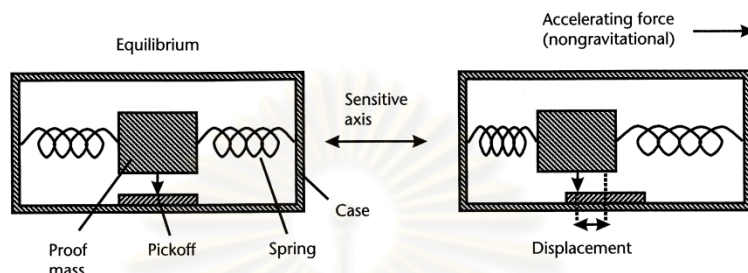
อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย หรือ IMU คือหน่วยวัดที่บูรณาการเครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้นและเครื่องวัดอัตราการหมุนไว้ด้วยกัน พร้อมกับมีการคำนวณปรับชดเชยค่าที่วัดได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งถือว่า IMU เป็นองค์ประกอบสำคัญและมีบทบาทอย่างมากที่มีส่วนทำให้การกำหนดพิกัดและการวางตัวของระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานะที่สัญญาณดาวเทียมนำหน้ไม่สมบูรณ์ หน่วยตรวจวัดความเฉื่อยประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้นในสามแกน และเครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุมสามแกน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังการทำงานของระบบระบบนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อย (Grove, 2008)

### 2.2.1.1 เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้น (Linear Accelerometer)

เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้นพัฒนามาบนพื้นฐานของการตรวจจับการเคลื่อนไหวของมวลทดสอบ (Proof mass) มวลทดสอบจะถูกจับยึดกับอุปกรณ์ด้วยสปริงสองข้างให้มีความอิสระ หากมีแรงกระทำในแนวใดๆ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลทดสอบ จะมีการออกแบบกลไกแม่เหล็กไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจจับการเคลื่อนที่เรียกว่า pick-off ดังรูปที่ 2.12

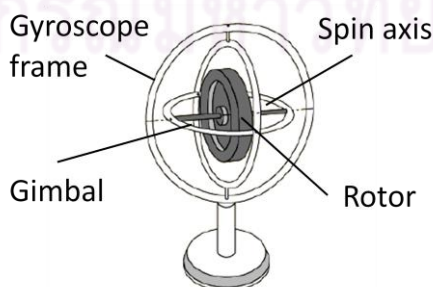


รูปที่ 2.12 แนวคิดพื้นฐานการวัดอัตราเร่งเชิงเส้น (Schultz, 2006)

การวัดอัตราเร่งเชิงเส้นจะใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนที่ของพาหนะในรูปอัตราเร่ง ( $\vec{a}$ ) ในกรณีมีแรงดึงดูดโลกเข้ามาเกี่ยวข้องก็จะทำให้เกิดอัตราเร่งในทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางโลก เรียกว่า (Gravitation acceleration) หรือ  $\vec{g}$  ซึ่งอัตราเร่งที่ตรวจจับได้จะต้องเป็นอัตราเร่งพาหนะจริง ( $\vec{f}$ ) ลบด้วย  $\vec{g}$  ดังนั้นการวัดอัตราเร่งจะต้องคำนึงถึงกายภาพของโลก เช่น แรงดึงดูดของโลกที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิวโลก อัตราการหมุนของโลกและกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ต่างๆ

### 2.2.1.2 เครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุม (Gyroscope)

เครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุมเรียกว่า ไจโรสโคป หรือ ไจโร (Gyroscope หรือ Gyro) ทำหน้าที่ในการรักษาทิศทาง โดยมีเซนเซอร์ที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงการหมุนของวัตถุที่พยายามอนุรักษ์โมเมนตัมการหมุนไว้หากไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ระบบไจโรดั้งเดิมได้จากการใช้มวลหมุนที่เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ติดตั้งบนแกนยึดบนฐานของอุปกรณ์ (Gyroscope frame) ตัวมวลทดสอบติดกับแกนหมุน (Spin axis) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หลักการเครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุมไจโรสโคป (Weston and Titterton, 2000)

การพัฒนาอุปกรณ์วัดอัตราหมุนที่ใช้กลไกเพื่อแยกใจโรออกจากพาหนะที่เคลื่อนไหวตามรูปที่ 2.13 มีการใช้กลไกแยกเดี่ยวมวลหมุนทดสอบให้มีความอิสระจากเฟลตฟอรัมที่ใช้ กลไกดังกล่าวเรียกว่า Gimbal จึงเรียกเครื่องวัดอัตราหมุนที่สร้างบนพื้นฐานกลไกประเภทนี้ว่า Gimbal IMU ในช่วงแรกของการพัฒนาระบบนี้มีข้อด้อยหลายประการทั้งน้ำหนัก มวลทดสอบขนาดใหญ่ และหมุนตลอดเวลา ต่อมา มีการใช้กลไกไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยทำให้อุปกรณ์เล็กกลงและการเชื่อมต่อบนทำได้ดีขึ้น ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยเครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุมของทั้งสามมุมและเครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้นสำหรับทั้งสามแกนพร้อมๆ กันในระบบเฟลตฟอรัมเดียวกัน เรียกว่า Strapdown IMU ดูรายละเอียดได้ดังรูปที่ 2.14

เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องวัดอัตราหมุนเชิงมุมด้วยเทคโนโลยี gimbal และ strapdown จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่มีความสามารถในการตรวจวัดอัตราหมุนที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ต้องการกระแสไฟฟ้าน้อย และมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น คือ เครื่องวัดอัตราการหมุนด้วยเมมส์ (MEMS-base gyro)



รูปที่ 2.14 Strapdown IMU Systems (Lawrence, 2001)

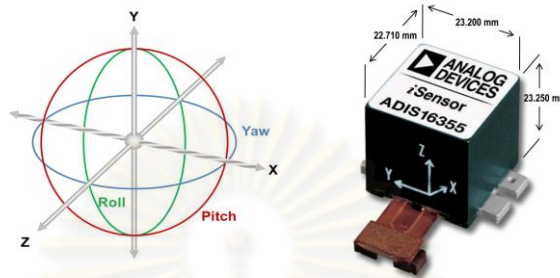
### 2.2.1.3 อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวชนิดเมมส์ (MEMS IMU)

อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวด้วยเมมส์ (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) ใช้เทคโนโลยีของไมโครอิเล็กทรอนิกส์และกลไกขนาดจิ๋วพร้อมแผงวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ระบบมีขนาดเล็ก กินพื้นที่น้อย กินไฟน้อย และต้นทุนการผลิตต่ำ โดยอุปกรณ์วัดอัตราเร่งเชิงเส้นที่พัฒนาบนพื้นฐานของเมมส์ เรียกว่า MEMS accelerometer จะผลิตมาใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ โดยใช้เป็นส่วนสำคัญสำหรับถุงลมนิรภัย ระบบการควบคุมการทรงตัว และระบบกันสะเทือน สำหรับการตรวจวัดอัตราหมุนเชิงมุมด้วย MEMS gyro ได้ถูกผลิตขึ้นมาใช้งานในอุตสาหกรรมรถยนต์ อุปกรณ์มือถือ อุปกรณ์พกพาที่สามารถบอกทิศทางและระดับ ซึ่งเครื่องวัด



การเคลื่อนไหวที่ครอบคลุมการวัดอัตราเร่งเชิงเส้นทั้ง 3 แกน และอัตราหมุนเชิงมุม 3 แกน เรียกว่า การตรวจวัดความอิสระ 6 อย่าง หรือ 6-degree of freedom รูปที่ 2.15 แสดง IMU ที่รวมกันในกล่องเดียวของ Analog Device รุ่น ADIS16355 มีขนาดเล็กกว่า 1 ลูกบาศก์นิ้ว (0.75 inch<sup>3</sup>)

**ADIS16355** 6-Degrees of Freedom (6-DoF)  
Inertial Measurement Unit (IMU) in Less than 0.75 Cubic Inch



รูปที่ 2.15 MEMS-base DoF IMU รุ่น ADIS16355 (<http://www.analog.com/>)

สำหรับประเภทของ IMU ที่มีความละเอียดถูกต้องจากความถูกต้องสูงไปยังความถูกต้องต่ำกว่า ได้แก่ Strategic, Navigation, Tactical, Automotive และ Consumer โดย Schultz (2006) ได้จำแนกไว้ในตารางที่ 2.4

สำหรับระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ได้ จะเลือกใช้อุปกรณ์ IMU เกرد Navigation และ Tactical เพื่อให้ได้วิถีของยานพาหนะที่ละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับเชื่อมโยงไปยังเซนเซอร์วัดไปยังวัตถุเพื่อทำแผนที่และภูมิสารสนเทศ

การประเมินคุณภาพของ IMU โดยทั่วไปจะพิจารณาค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- Gyro bias คือ ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนการวัดอัตราหมุนเชิงมุม ซึ่งค่าน้อยยิ่งดี ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 2.5 IMU ประเภท Strategic มีค่า Gyro bias เพียง 0.0001 deg/h เท่านั้น
- Gyro output range คือ ความสามารถในการตรวจจับอัตราการหมุน ค่ามากหมายความว่าระบบสามารถตรวจจับอัตราการหมุนได้ดี ซึ่งสามารถใช้งานบนพาหนะที่เคลื่อนไหวรวดเร็วมากๆ เช่น ซีปนาวุธ เครื่องบินเจ็ต เป็นต้น ส่วนค่าน้อยจะสามารถใช้กับรถยนต์ที่เคลื่อนไหวช้าบนท้องถนนได้
- Accelerometer bias คือ ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนการวัดอัตราเร่งเชิงเส้น ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 2.5 IMU ประเภท Strategic มีค่า Accelerometer bias เพียง 1  $\mu$ g เท่านั้น
- Accelerometer range คือ ความสามารถในการตรวจจับการเคลื่อนไหวของพาหนะที่ระบบติดตั้งอยู่ ค่ามากหมายความว่าระบบสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้ดี

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพและความสามารถของ IMU แต่ละประเภท (Schultz, 2006)

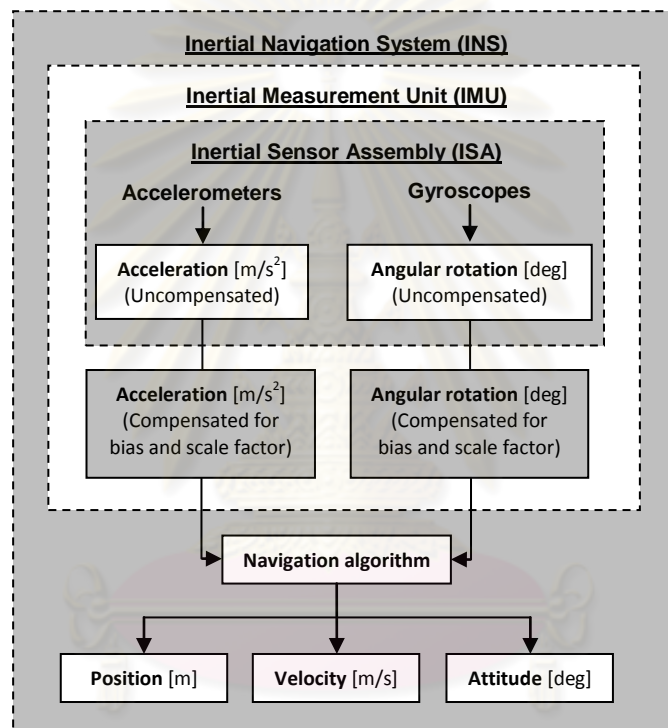
Grade		Strategic	Navigation	Tactical	Automotive	Consumer
Performance						
Stand alone		< 30 (m/hr)	1-4 (km/hr)	20-40 (km/min)	2 (km/min)	3 (km/min)
Position error						
Gyroscope	Bias	0.0001	0.005-0.010	0.1-10	>100	360
	[deg/hr]	-	0.003 <sup>#1</sup> /0.01 <sup>#2</sup>	1 <sup>#3</sup>	1040 <sup>#4</sup>	-
	Scale factor	-	5-50	200-500	N/A	-
	[ppm]	-	1 <sup>#1</sup> /5 <sup>#2</sup>	150 <sup>#3</sup>	10000 <sup>#4</sup>	-
	Noise (ARM)	-	0.002-0.005	0.2-0.5	N/A	-
[deg/hr/√Hz]	-	-	0.125 <sup>#3</sup>	227 <sup>#4</sup>	-	
Accelerometer	Bias [μg]	1	50-500	500-1000	>1200	2400
		-	250 <sup>#1</sup> /500 <sup>#2</sup>	1000 <sup>#3</sup>	2500 <sup>#4</sup>	-
	Scale factor	-	10-20	400-1000	N/A	-
	[ppm]	-	50 <sup>#1</sup> /50 <sup>#2</sup>	300 <sup>#3</sup>	10000 <sup>#4</sup>	-
	Noise	-	5-10	200-400	N/A	-
[μg/hr/√Hz]	-	-	216 <sup>#3</sup>	370 <sup>#4</sup>	-	
Approximately price		>200,000 US \$	50,000-200,000 US \$	10,000-50,000 US \$	<10,000 US \$	<100 US \$
Application		Ballistic missiles And submarines	Navigation and high precision georeferencing	INS/GPS and Short time system (weapons)	Short time systems	Airbags

#1=Honeywell LRF-111, #2=Litton LTN90-100, #3=Honeywell HG1700 AG11, #4=low-cost MEMS Crista IMU

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.2.2 ความสัมพันธ์และขอบเขตหน้าที่ของระบบนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อย

ระบบนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อย เป็นระบบช่วยการนำหน้ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว ได้แก่ เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้น เครื่องวัดอัตราการหมุน โดยระบบสามารถผลิตค่าตำแหน่ง (Latitude, Longitude, High) ความเร็ว (Velocity) และทิศทาง การเคลื่อนที่ (Roll, Pitch, Yaw) ตลอดเวลา โดยระบบนำหน้ด้วยการวัดความเฉื่อย (Inertial Navigation System, INS) หน่วยวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit, IMU) และชิ้นส่วน เซนเซอร์วัดความเฉื่อย (Inertial Sensor Assembly, ISA) มีขอบเขต หน้าที่และความสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 นิยามและความสัมพันธ์ของ ISA, IMU และ INS (Schultz, 2006)

โดยความหมายของ INS IMU และ ISA ที่ปรากฏในรูป สามารถอธิบายได้ดังนี้

- INS หมายถึง ระบบบูรณาการสูงสุดที่มีองค์ประกอบสำคัญคือ คอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์พร้อมอัลกอริทึมในการให้ผลคำตอบวิถีของยานพาหนะ ได้แก่ ตำแหน่ง ความเร็ว และมุมเอียง ณ เวลาใดๆ
- IMU คือ หน่วยวัดที่บูรณาการเครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้นและเครื่องวัดอัตราการหมุนไว้ด้วยกัน พร้อมกับมีการคำนวณปรับชดเชยค่าที่วัดได้อย่างเป็นระบบ
- ISA คือ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ ได้แก่ เครื่องวัดอัตราเร่งเชิงเส้นและเครื่องวัดอัตราการหมุน

### 2.3 ระบบบูรณาการ GPS/INS (GPS/INS Integration)

ระบบ INS ได้ถูกนำมาบูรณาการร่วมกับ GPS รวมเรียกว่า GPS/INS integration ในการที่จะลดข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากระบบทั้งสอง เนื่องจาก GPS นั้นสามารถให้ข้อมูลทางตำแหน่ง ความเร็วและเวลาที่ถูกต้องสูงโดยไม่มีผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนตามเวลาแต่ก็ต้องอาศัยการรับสัญญาณที่ต่อเนื่อง ซึ่งถือว่าเป็นข้อด้อยของ GPS ในขณะที่ INS สามารถให้ข้อมูลเชิงตำแหน่ง ความเร็ว และการวางตัว โดยมีอัตราการให้ข้อมูลที่สูงกว่าได้ แต่มีข้อด้อยในเรื่องของค่าคลาดเคลื่อนที่มีการสะสมตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการบูรณาการเทคโนโลยีทั้งสองชนิดที่มีข้อเด่นและข้อด้อยของแต่ละระบบที่แตกต่างกัน แต่ข้อเด่นของทั้งสองเทคโนโลยีสามารถช่วยส่งเสริมกันและกันได้ ดังตารางที่ 2.5

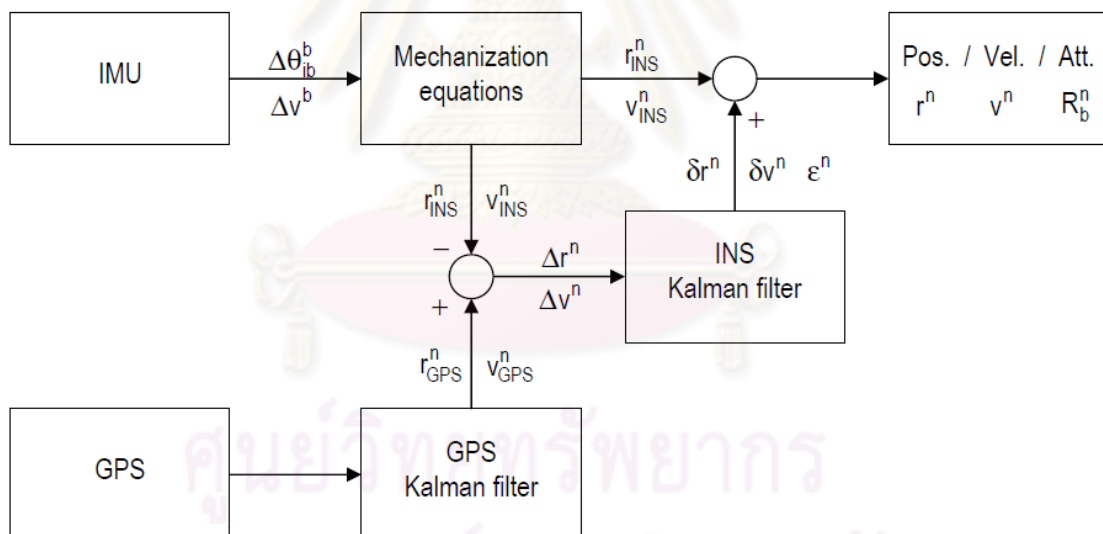
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติที่เชื่อมโยงประโยชน์ของระบบ GPS และ INS (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553)

คุณลักษณะ	ระบบ GPS	ระบบ INS
การรับสัญญาณภายนอก	รับสัญญาณจากดาวเทียม เมื่อมีการบดบังสัญญาณหรือรบกวนสัญญาณจะให้ข้อมูลไม่ได้ เช่น ในเมืองมีตึกสูง สิ่งปลูกสร้าง หรือมีพืชพรรณบดบัง	อิสระ เมื่อ GPS รับสัญญาณไม่ได้ จะยังให้ตำแหน่งได้ในเวลาสั้น และความผิดพลาดจะสะสมตามเวลา
ความถี่ของค่าพิกัด	ให้ค่าพิกัดเป็นจุดต่อเนื่องด้วยความถี่ 1 Hz...10Hz	ให้ค่าพิกัดเป็นจุดต่อเนื่องด้วยความถี่สูงกว่ามากถึง 100...400 Hz
ความละเอียดถูกต้อง	ความละเอียดถูกต้องสูงสัมบูรณ์ (absolute) บนโลกตลอดเวลา	ความละเอียดถูกต้องสูงชนิดสัมพัทธ์ (relative) และยังสามารถเปลี่ยนตามเวลา acceleration bias และ angular bias
การวางตัว (orientation)	ให้ได้แต่ไม่ดี ต้องคำนวณจากวิธีหรือใช้ Antenna 2-3 ชิ้นทำงานร่วมกัน	สามารถวิเคราะห์จากอัตราการหมุน
การให้ค่าพิกัด	ค่าพิกัดสัมบูรณ์	ค่าพิกัดสัมพัทธ์จากการคำนวณก่อนหน้าซึ่งเรียกว่า dead reckoning

การผนวกรวมระบบ GPS/INS จะพิจารณาระบบรวมเป็นระบบที่เคลื่อนที่โดยใช้ทฤษฎีของ Kalman filter ที่ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ การทำนายตำแหน่งไปข้างหน้า (Prediction step) และการปรับปรุงตำแหน่งของระบบปัจจุบัน (Update step) ซึ่งการบูรณาการ GPS/INS สามารถทำได้หลายระดับ ขึ้นอยู่กับความต้องการความละเอียดถูกต้องและความยากง่ายของอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลผลเพื่อให้ได้วิถีของยานพาหนะมีความต่อเนื่อง โดยทั่วไปจะมีแนวทางอยู่ 2 แนวทางหลักๆ ได้แก่ วิธีบูรณาการแบบ Loosely coupled integration และวิธีบูรณาการแบบ Tightly coupled integration

### 2.3.1 วิธีบูรณาการแบบ Loosely Coupled Integration

เป็นการประมวลผลสัญญาณของระบบค่อนข้างแยกกัน โดยจะประมวลผลสัญญาณ GPS ผ่าน GPS Kalman filter ทำให้ได้เวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็ว ในขณะที่เดียวกันข้อมูลอัตราเร่งเชิงเส้นและอัตราการหมุนจาก IMU ก็จะถูกประมวลผลทำให้ได้เวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วเช่นกัน จากนั้นข้อมูลทั้งหมดจะมาผ่าน INS Kalman filter ทำให้ได้เวกเตอร์ตำแหน่ง ความเร็ว และมุมหมุนของระบบ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การบูรณาการ GPS/INS แบบ Loosely coupled integration (Schultz, 2006)

ขั้นตอนการประมวลผล ดังนี้

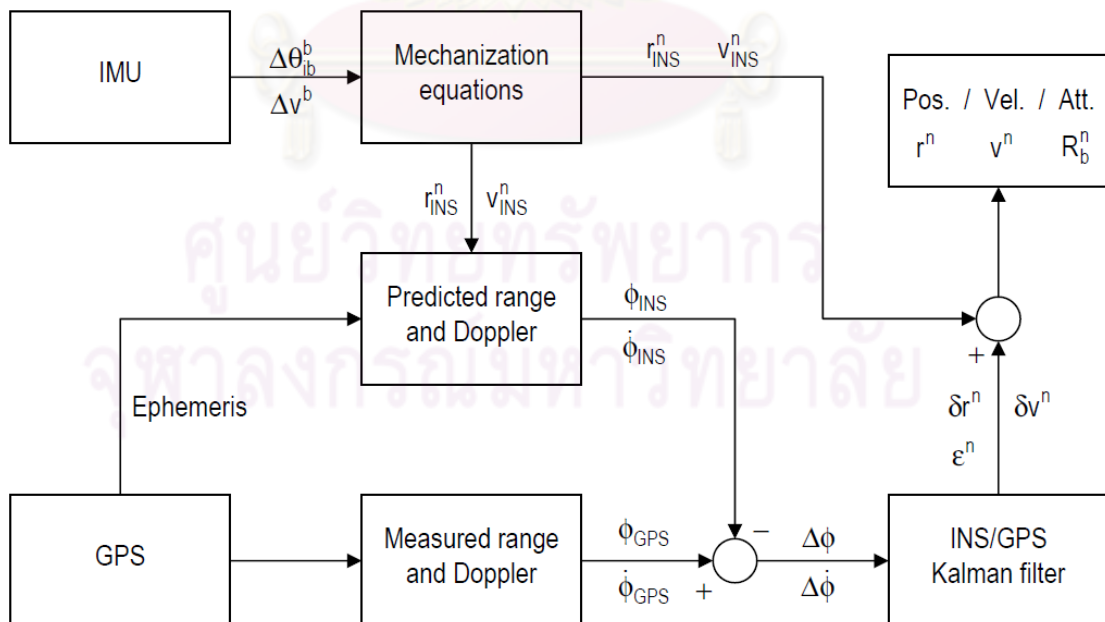
1. ประมวลผล Raw GPS measurement ผ่าน GPS kalman filter จะได้เวกเตอร์ตำแหน่ง ( $r_{GPS}^n$ ) และความเร็ว ( $v_{GPS}^n$ ) จาก GPS
2. ประมวลผล Raw INS measurement ( $\Delta\theta_{ib}^b, \Delta v^b$ ) ด้วย Mechanization equations จะได้เวกเตอร์ตำแหน่ง ( $r_{INS}^n$ ) และความเร็ว ( $v_{INS}^n$ ) จาก INS

3. ใช้เวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วที่ได้จากขั้นตอน 1 นำเข้า INS kalman filter โดย filter จะคำนวณหาค่าต่างของตำแหน่งและความเร็วระหว่างขั้นตอน 1 และขั้นตอน 2 ( $\Delta r^n, \Delta v^n$ ) ทำให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและความเร็ว ( $\delta r^n, \delta v^n$ ) พร้อมด้วยค่า misalignment error ( $\epsilon^n$ )
4. นำค่าคลาดเคลื่อนในขั้นตอนที่ 3 มา update เวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วที่ได้ในขั้นตอนที่ 2 จะได้ผลคำตอบเวกเตอร์ตำแหน่ง เวกเตอร์ความเร็ว และเวกเตอร์มุมหมุนของระบบ ( $r^n, v^n, R_b^n$ )

ข้อดีของวิธีบูรณาการแบบ Loosely coupled integration คือ ง่ายและใช้เวลาประมวลผลน้อย (Petovello, 2003) แต่ก็มีข้อด้อยที่สำคัญคือ กรณีที่จำนวนดาวเทียม GPS น้อยกว่า 4 ดวง จะไม่สามารถให้ข้อมูล measurement update จาก GPS filter ได้ วิธีการบูรณาการแบบนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการทำงานพื้นที่ในเมืองที่มีการบดบังสัญญาณดาวเทียม GPS (Godha, 2006)

### 2.3.2 วิธีบูรณาการแบบ Tightly Coupled Integration

เป็นการประมวลผลสัญญาณที่ใช้ Kalman filter เพียงจุดเดียวในที่นี้เรียกว่า INS/GPS kalman filter และที่สำคัญมีการใช้ข้อมูล GPS Broadcast Ephemeris ที่มาพร้อมกับ Navigation message มาประมวลผลร่วมด้วย ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การบูรณาการ GPS/INS แบบ Tightly coupled integration (Schultz, 2006)

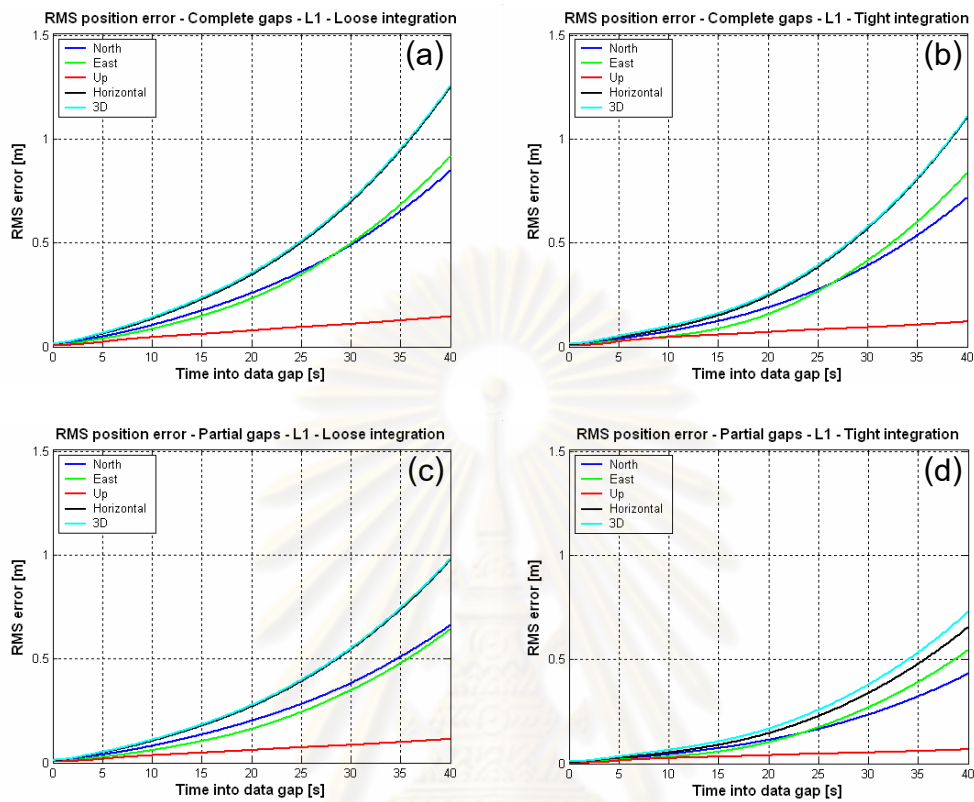
ขั้นตอนการประมวลผล ดังนี้

1. ประมวลผล Raw INS measurement ( $\Delta\theta_{ib}^b, \Delta v^b$ ) ด้วย Mechanization equations จะได้เวกเตอร์ตำแหน่ง ( $r_{INS}^n$ ) และความเร็ว ( $v_{INS}^n$ ) จาก INS
2. ใช้ข้อมูล Raw GPS ephemeris และข้อมูลเวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำนายระยะ Pseudoranges และ Doppler measurement ( $\hat{\phi}_{INS}, \hat{\phi}_{INS}$ )
3. ใช้ค่าที่ทำนายจากขั้นตอนที่ 2 นำเข้าใน INS/GPS kalman filter จะได้ค่าต่างของ Pseudoranges และ Doppler ระหว่างค่าที่ทำนายและค่าที่รับวัดมา ( $\hat{\phi}_{GPS}, \hat{\phi}_{GPS}$ ) ทำให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและความเร็ว ( $\delta r^n, \delta v^n$ ) พร้อมด้วยค่า misalignment error ( $\varepsilon^n$ )
4. นำค่าคลาดเคลื่อนในขั้นตอนที่ 3 มา update เวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 จะได้ผลคำตอบเวกเตอร์ตำแหน่ง เวกเตอร์ความเร็ว และเวกเตอร์มุมหมุนของระบบ ( $r^n, v^n, R_b^n$ )

ข้อดีของวิธีการบูรณาการแบบ Tightly coupled integration คือ ในขณะที่จำนวนดาวเทียม GPS น้อยกว่า 4 ดวง การ update ค่าของระบบ INS ยังสามารถทำงานต่อไปได้โดยใช้ค่าการทำนายที่ได้จาก GPS Broadcast Ephemeris (Godha, 2005) ดังนั้นจะเห็นว่าวิธีนี้เหมาะสำหรับการทำงานในพื้นที่เมืองที่มีการบดบังสัญญาณดาวเทียม แต่ก็ยังมีข้อด้อยบางประการ ได้แก่ การใช้ kalman filter เพียงจุดเดียวจะทำให้ขนาดของเวกเตอร์ข้อมูลทั้ง INS และ GPS มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ใช้เวลาในการประมวลผล (Petovello, 2003)

เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระดับการบูรณาการ GPS/INS Schultz (2006) ได้ทำการเปรียบเทียบการประมวลผลทั้ง 2 แบบ โดยใช้ข้อมูล GPS/INS และ INS อย่างเดียว (simulate GPS outage 40 วินาที) แบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ การบดบังสัญญาณดาวเทียม GPS โดยสมบูรณ์ (Complete gap) เช่น อุโมงค์ และการบดบังสัญญาณดาวเทียม GPS บางส่วน (Partial gap) เช่น ตึกสูง ต้นไม้หนาแน่น พบว่า ในสภาพพื้นที่ที่บดบังสัญญาณดาวเทียมโดยสมบูรณ์นั้นการใช้การบูรณาการแบบ Loosely coupled integration และแบบ Tightly coupled integration ค่า RMS position error ที่ได้ไม่แตกต่างกัน ดังรูป 2.19(a) และ 2.19(b) ตามลำดับ โดยที่แกนตั้งแสดงค่า RMS error ของค่าพิกัดในทิศทางแกน East, North, Up, Horizontal และ 3D ที่ได้จากการประมวลผล ในส่วนของแกนนอนแสดงช่วงระยะเวลาที่สัญญาณดาวเทียม GPS ขาดหายไป ส่วนสภาพพื้นที่การบดบังสัญญาณดาวเทียมบางส่วนการบูรณาการแบบ Tightly coupled integration ดังรูป 2.19(d) จะให้ค่า RMS position error น้อยกว่าแบบ Loosely coupled

integration ดังรูปที่ 2.19(c) เนื่องจากมีการใช้ประโยชน์จาก Ephemeris ดาวเทียมมาประมวลผลร่วมด้วย และ ตามลำดับ



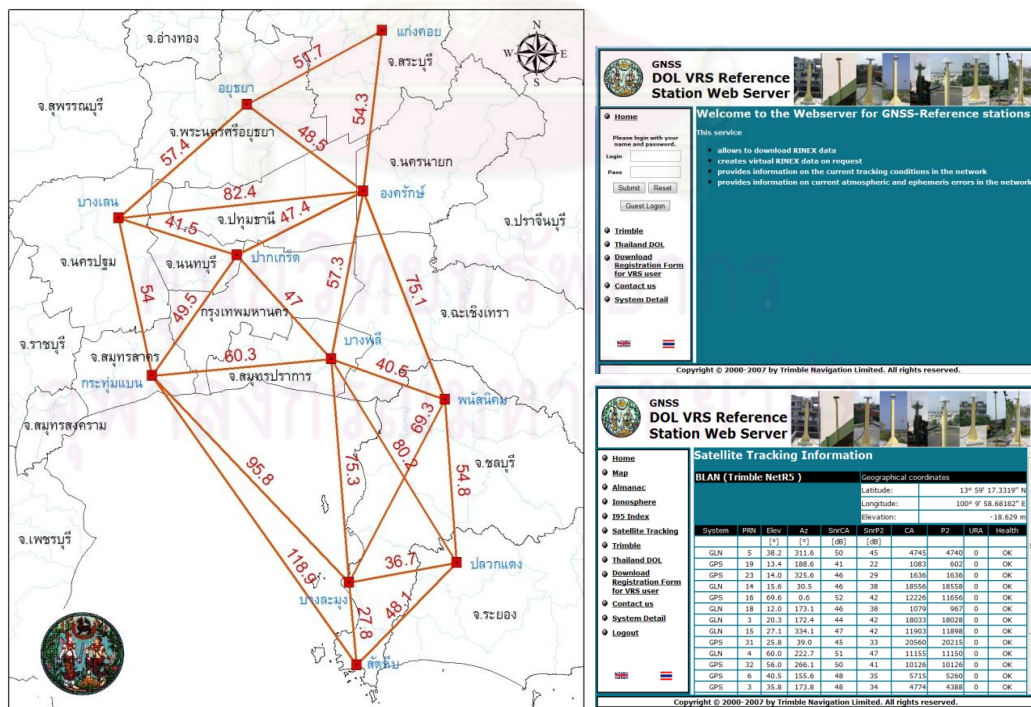
รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบค่า RMS position error ของระดับการบูรณาการ GPS/INS ระหว่างแบบ Loosely coupled integration และแบบ Tightly coupled integration ในพื้นที่ที่ติดตั้งสัญญาณดาวเทียม GPS โดยสมบูรณ์ และพื้นที่ที่ติดตั้งสัญญาณดาวเทียม GPS บางส่วน (Schultz, 2006)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



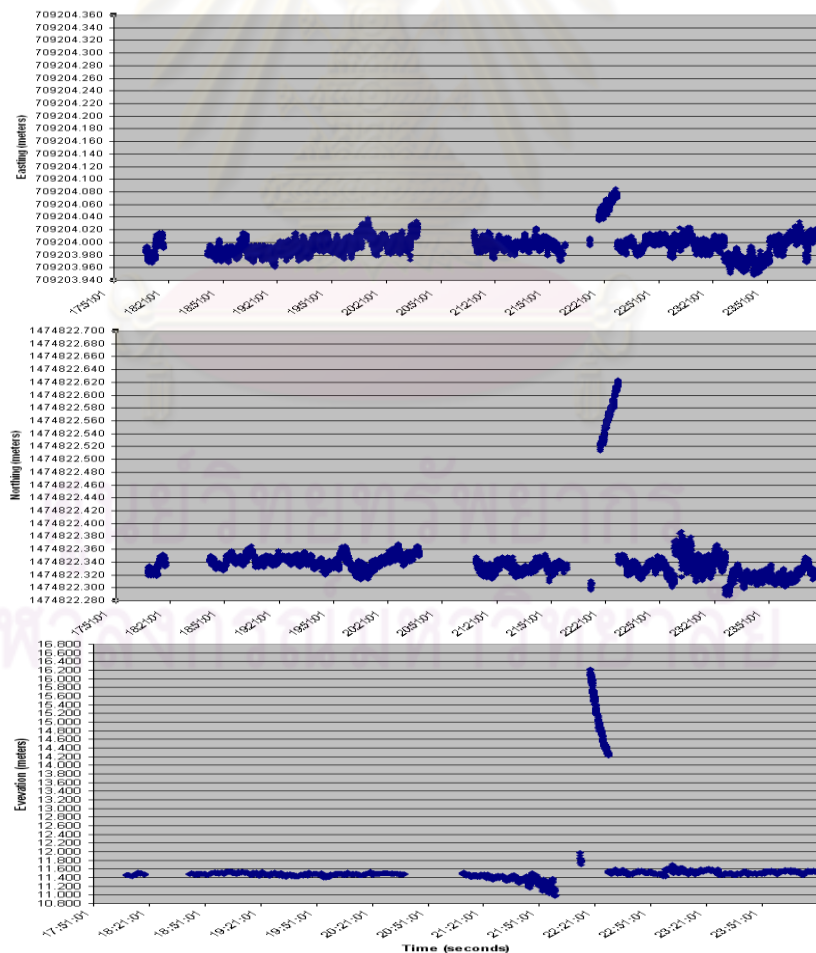
## 2.4 ระบบโครงข่ายสถานีฐาน DOL VRS ของกรมที่ดิน

กรมที่ดินเป็นหน่วยงานแรกของประเทศไทยที่ติดตั้งระบบโครงข่ายสถานีฐาน GNSS และทำงานแบบ VRS เพื่อการสำรวจออกโฉนดที่ดิน ซึ่งมีการติดตั้งสถานีฐานถาวรเพื่อรับสัญญาณดาวเทียมทั้งหมด 11 สถานี โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Trimble รุ่น NetR5 ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GPS และ GLONASS ตั้งอยู่ที่สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการสาขาบางพลี สำนักงานที่ดินจังหวัดชลบุรีสาขาพนัสนิคม สำนักงานที่ดินจังหวัดชลบุรีสาขาบางละมุง สำนักงานที่ดินจังหวัดชลบุรีสาขาสัตหีบ สำนักงานที่ดินจังหวัดระยองสาขาปลวกแดง สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายกสาขาองครักษ์ สำนักงานที่ดินจังหวัดอยุธยา สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรีสาขาแก่งคอย สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาครสาขากระทุ่มแบน สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐมสาขาบางเลน และสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรีสาขาปากเกร็ด ดังรูปที่ 2.20 ครอบคลุมเนื้อที่ประมาณ 13,518 ตารางกิโลเมตร มีส่วนควบคุมตั้งอยู่ที่สำนักเทคโนโลยีทำแผนที่ อาคารรังวัด และทำแผนที่ กรมที่ดิน จังหวัดนนทบุรี ซึ่งที่ศูนย์ควบคุมใช้ชุดซอฟต์แวร์ระบบ Trimble VRS ประกอบด้วย GPStream, TNC, GPServer, GPSWeb, GPSNet, และ TED เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ การให้บริการข้อมูลจะมีทั้งหมด Real time และ Post-processing ได้แก่ ให้บริการดาวน์โหลดข้อมูล RINEX สร้างไฟล์ RINEX ตามต้องการ แสดงข้อมูลสถานะการรับสัญญาณดาวเทียมของ Network และแสดงข้อมูล Atmospheric และ Ephemeris errors ของ Network ทางเว็บไซต์ <http://www.i-dolnet.com/>



รูปที่ 2.20 ระบบโครงข่ายสถานีฐาน DOL VRS ของกรมที่ดิน (กรมที่ดิน, 2553)

ธีรทัต เจริญกาลัญญาตา และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2552) ได้ประเมินค่าความถูกต้องแบบสถิติของการรังวัดด้วยดาวเทียม GPS แบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐาน VRS ของกรมที่ดิน โดยติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Trimble 5700 จำนวน 2 สถานี ได้แก่ สถานีเปิดโล่งและสถานีที่มีสิ่งปกคลุมระดับปานกลาง ทั้งสองสถานีตั้งอยู่ที่วัดอ่างศิลา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี กำหนดอัตราการบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 วินาที จำนวน 13 ชั่วโมง ของวันที่ 14 และ 15 สิงหาคม 2551 โดยใช้ระบบสื่อสารระหว่างสถานีผู้ใช้งานกับศูนย์ควบคุมผ่าน GPRS ด้วยโทรศัพท์มือถือ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่เปิดโล่งมีโอกาสได้ค่าพิกัดตำแหน่งมากกว่าพื้นที่ที่มีสิ่งปกคลุมปานกลาง และการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของทั้งสองสถานีในทางราบอยู่ในระดับ 1-3 เซนติเมตร ทางดิ่งอยู่ในระดับ 45 เซนติเมตร และยังพบว่าค่าพิกัดทั้งทางราบและทางดิ่งของทั้งสองสถานีเกิดค่ากระโดดขนาดใหญ่ในบางช่วงเวลา ดังรูปที่ 2.21 เป็นการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของสถานีเปิดโล่งโดยที่แกนตั้งแสดงถึงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางตะวันออก, ทางเหนือและทางดิ่ง เทียบกับระยะเวลาที่บันทึกข้อมูลในแนวแกนนอน ซึ่งจะเห็นว่าเกิดค่ากระโดดขนาดใหญ่ในช่วงเวลาประมาณ 22:21:00 ถึง 22:30:00

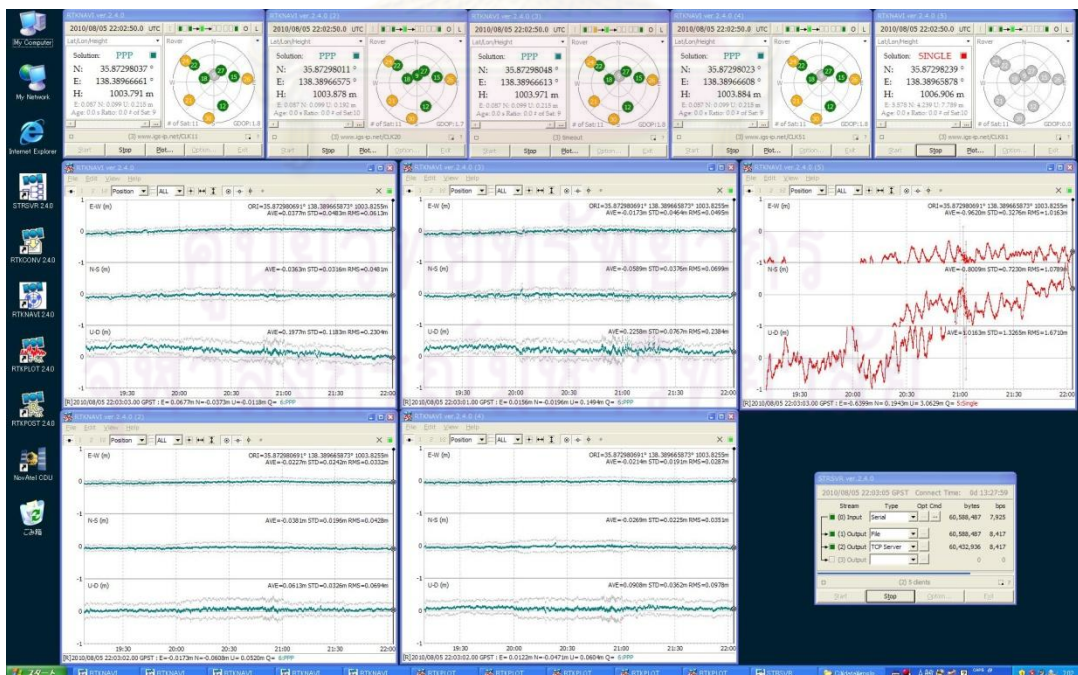


รูปที่ 2.21 การกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางตะวันออก ทางเหนือและทางดิ่งโดยใช้ VRS ที่สถานีเปิดโล่ง (ธีรทัต เจริญกาลัญญาตา และเฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2552)

## 2.5 ซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB

เป็นโปรแกรมสำหรับประมวลผลสัญญาณดาวเทียม GNSS พัฒนาด้วยภาษา C มาตั้งแต่ปี 2006 (Takasu and Yasuda, 2007) ในปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 2.4.0 รองรับการทำงานแบบ Real-Time และ Post-processing ในการประมวลผลข้อมูลดาวเทียม GPS, GLONASS และ SBAS (รองรับ Galileo และ QZSS แต่ยังไม่สามารถใช้งานได้ในเวอร์ชัน 2.4.0) ทั้งการรับวัดในโหมด Single, DGNSS, Kinematic, Static, Moving Baseline, Fixed, PPP Kinematic และ PPP Static โดย Format ที่รองรับประกอบด้วย Rinex (2.10, 2.11, 2.12, 3.0), RTCM 2.3, RTCM 3.1, NTRIP1.0, NMEA 0183, NovAtel (OEM4V, OEM3, OEMStar, SuperstarII, U-BLOX (LEA-4T, LEA-5T), Hemisphere (Eclipse, Crescent) และ SkyTraq (S1315F) สามารถดาวน์โหลดโปรแกรมมาใช้ฟรีได้ที่ <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm> รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างของโปรแกรม RTKLIB ซึ่งในชุดของโปรแกรมจะมี Application Program ประกอบด้วย

- RTKNAVI โปรแกรมสำหรับการประมวลผลในการหาตำแหน่งแบบ Real-Time
- RTKPOST โปรแกรมสำหรับการประมวลผลพื้นฐาน Post-processing
- RTKPLOT โปรแกรม Plot ข้อมูล
- RTKCONV โปรแกรมแปลง format ข้อมูลเป็นไฟล์ RINEX
- STRSVR โปรแกรมตั้งค่าการสื่อสารของอุปกรณ์
- NTRIPSRCBROWS โปรแกรม NTRIP source table browser

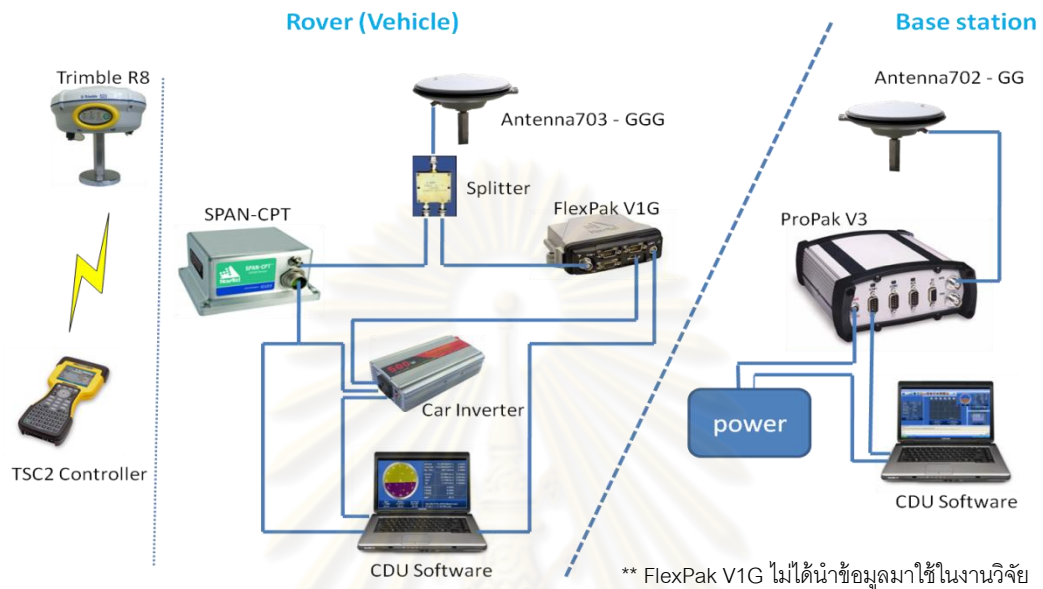


รูปที่ 2.22 Application Program ของโปรแกรมฟรีเปิดรหัส RTKLIB



### 3.2 การติดตั้งเครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยจะถูกนำมาติดตั้งบนยานพาหนะเพื่อใช้หาวิถีของยานพาหนะ ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 รูปถ่ายการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย IMU บรรจุใน SPAN-CPT (NovAtel, 2011)

Parameter	NovAtel SPAN-CPT
IMU Grade	Tactical
Embedded GNSS	OEMV-3 receiver
Acceleration Type	MEMS
Accelerometer Range	$\pm 10$ mg
Accelerometer Bias	$\pm 50$ mg
Gyros Type	FOG
Gyro Output Range	$\pm 375^{\circ}$ /s
Gyro Bias	$\pm 20^{\circ}$ /hr
Data Rate (IMU)	100 Hz
Data Rate (GPS)	5 Hz
Dimensions	152 x 168 x 89 mm
Weight	2.36 kg

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพของ SPAN-CPT ขณะดาวเทียมขาดหายไปทั้งหมด Post-processing (NovAtel, 2011)

Outage Duration	Position Accuracy (m) RMS		Velocity Accuracy (m/s) RMS		Attitude Accuracy (degree) RMS		
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Pitch	Yaw	Roll
10s	0.010	0.015	0.020	0.010	0.015	0.030	0.015
30s	0.030	0.020	0.020	0.010	0.015	0.032	0.016
60s	0.290	0.100	0.030	0.020	0.033	0.074	0.033

อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานพาหนะที่ประกอบด้วย เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Trimble R8 จะบันทึกข้อมูลในอัตรา 1 Hz ลงในหน่วยความจำของเครื่องรับ, ชุด SPAN-CPT บันทึกข้อมูลในอัตรา 100 Hz สำหรับ IMU และ 1 Hz สำหรับ GPS ลงในคอมพิวเตอร์ชนิดพกพาผ่านโปรแกรม NovAtel CDU Version 3.8 แสดงดังรูปที่ 3.3 ส่วนฐานในพื้นในที่ที่ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ProPak V3 จะบันทึกข้อมูลในอัตรา 1 Hz ลงในคอมพิวเตอร์ชนิดพกพาผ่านโปรแกรม NovAtel CDU เช่นกัน



รูปที่ 3.3 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม NovAtel CDU ในขณะที่เก็บข้อมูล GPS/IMU

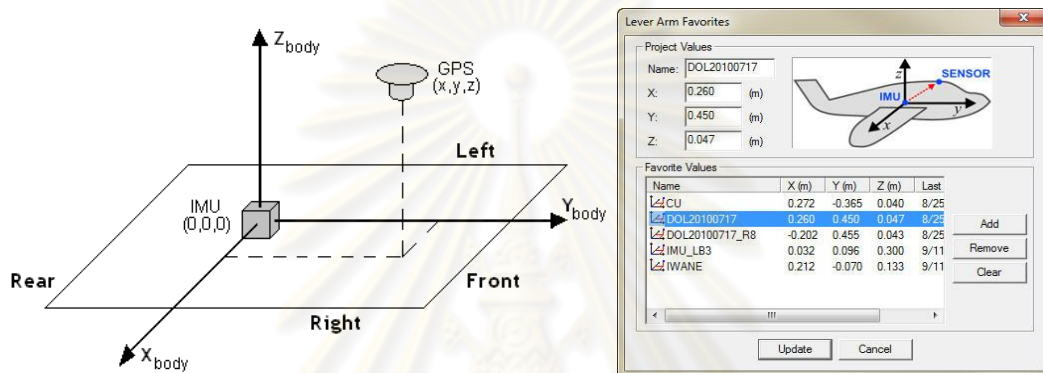
การเก็บข้อมูลผ่านโปรแกรม NovAtel CDU ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ProPak V3 และชุดอุปกรณ์ SPAN-CPT จะใช้คำสั่งเป็น Command line ที่ประกอบด้วยชุดคำสั่งและพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ชุดคำสั่งที่ใช้เก็บข้อมูลของเครื่องรับ ProPak V3 และ SPAN-CPT ผ่านโปรแกรม NovAtel CDU

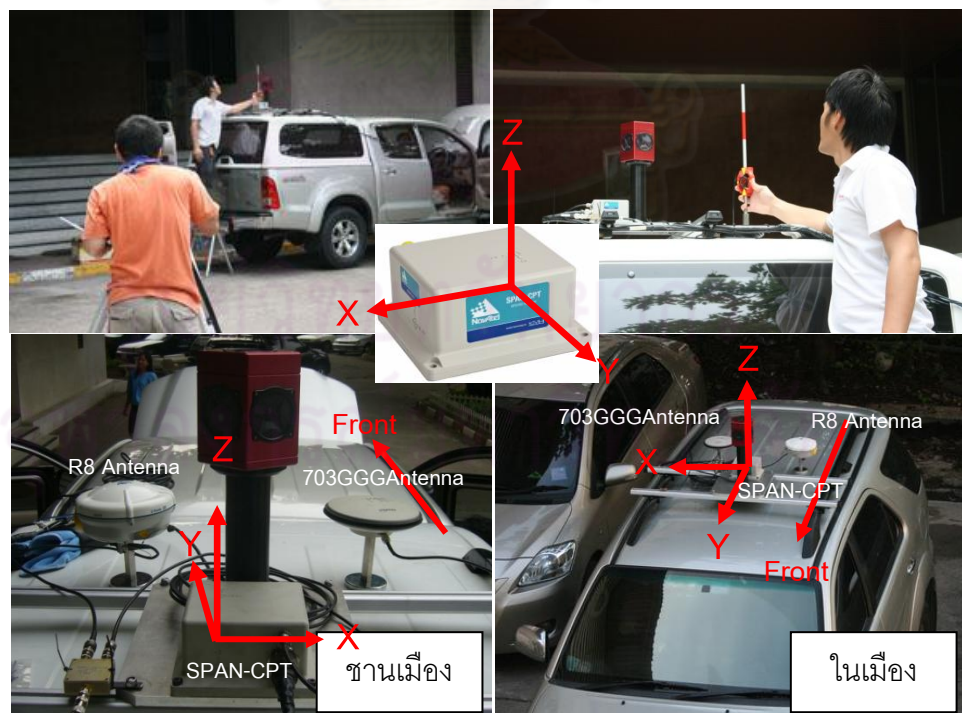
Equipment	Command	Description
ProPak V3	LOG VERSIONA ONCE	Receiver version numbers
	LOG RXCONFIGA ONCE	Receiver config status
	LOG BESTPOSB ONTIME 1	Position data
	LOG RAWEPHEMB ONCHANGED	Raw ephemeris
	LOG RANGECPMB ONTIME 1	Satellite range info (1 Hz)
	LOG GLOEPHEMERISB	GLONASS Ephemeris data
	LOG GLOALMANACB	Raw GLONASS Almanac
SPAN-CPT	LOG GLOCLOCKB	GLONASS Clock information
	LOG VERSIONA ONCE	Receiver version numbers
	LOG RXCONFIGA ONCE	Receiver config status
	LOG BESTPOSB ONTIME 1	Position data
	LOG RAWEPHEMB ONCHANGED	Raw ephemeris
	LOG RANGECPMB ONTIME 0.01	Satellite range info (100 Hz)
	LOG RAWIMUB ONNEW	IMU Measurements data

### 3.3 ความสัมพันธ์จาก IMU ไปยังเสาอากาศ GPS

การบูรณาการ GPS/IMU เป็นการผสมผสาน GPS และ IMU ที่พัฒนาบนพื้นฐานของเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน เนื่องจากระบบ GPS ต้องรับสัญญาณดาวเทียมผ่านเสาอากาศ และตำแหน่งที่ได้จากระบบจะเป็น Phase Center ของเสาอากาศบนยานพาหนะที่ติดตั้ง เมื่อนำข้อมูลมาประมวลผลร่วมกับ IMU จะต้องย้ายค่าพิกัดมายัง Center ของ IMU เรียกกระบวนการนี้ว่า Level-arm offset ที่ประกอบด้วยค่าทางแกน X, Y, Z ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในการรังวัดระยะดังกล่าวในงานวิจัยนี้จะใช้กล้อง Total Station พร้อมด้วยเป้าปริซึม ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ Level-arm offset ระหว่าง GPS และ IMU



รูปที่ 3.5 การรังวัดระยะ Level-arm offset ด้วยกล้อง Total Station



เนื่องจากการวิ่งรถเก็บข้อมูลในพื้นที่ชานเมืองและในเมืองใช้รถยนต์ที่ติดตั้งเครื่องมือเป็น  
คนละคันกัน ดังนั้นจึงต้องวัดระยะ Level-arm offset 2 ครั้ง โดยค่าที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ระยะ Level-arm offset จาก IMU ไปยังเสาอากาศ GPS

พื้นที่	อุปกรณ์	X (m)	Y (m)	Z (m)
ชานเมือง	IMU Center	0	0	0
	703GGG Antenna	0.260	0.450	0.047
	Trimble R8	-0.202	0.455	0.052
	R8 to 703GGG Antenna	0.462	0.005	0.005
ในเมือง	IMU Center	0	0	0
	703GGG Antenna	0.272	-0.365	0.040
	Trimble R8	-0.206	-0.364	0.037
	R8 to 703GGG Antenna	0.478	0.001	0.003

### 3.4 การบริการข้อมูลสถานีฐานเสมือนจากระบบ DOL VRS Reference Station

ปัจจุบันประเทศไทยโดยกรมที่ดินได้พัฒนาระบบ VRS ตั้งแต่ปี 2552 โดยได้ติดตั้งสถานี  
ฐานถาวรสำหรับการรับสัญญาณและรวบรวมสัญญาณดาวเทียมทั้ง GPS และ GLONASS รวม  
ทั้งสิ้น 11 สถานี โครงข่าย VRS ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ  
นครปฐม ชลบุรี และสระบุรี การใช้งานจากระบบสามารถทำหนังสือไปยังกรมที่ดินเพื่อสร้างชื่อ  
ผู้ใช้และรหัสผ่านสำหรับการใช้ข้อมูลที่ให้บริการ

การขอรับบริการจากระบบ DOL VRS ผ่านทางจากเว็บไซต์ <http://www.i-dolnet.com/>  
เพื่อสร้างข้อมูลค่าสังเกตสำหรับดาวเทียม GPS และ GLONASS ที่นำมาใช้เป็นสถานีฐาน (Base  
Station) ตามพิกัดสถานีที่กำหนดในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 สถานี (พื้นที่ชานเมือง 3 สถานี ใน  
เมือง 1 สถานี) โดยมีค่าพิกัดดังตารางที่ 3.5 และการขอรับบริการผ่านทางเว็บไซต์ดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ค่าพิกัดที่ขอรับบริการให้ระบบ DOL VRS สร้างสถานีฐาน

Latitude	Longitude	Elevation	Time	Interval	Area
13 54 59 N	100 31 56 E	1.85 m	4.30 h	1 s	ชานเมือง
13 53 04 N	100 31 32 E	1.85 m	4.30 h	1 s	ชานเมือง
13 53 58 N	100 31 38 E	1.85 m	4.30 h	1 s	ชานเมือง
13 43 49 N	100 32 01 E	1.85 m	3.00 h	1 s	ในเมือง

**GNSS DOL VRS Reference Station Web Server**

Home

Please login with your name and password.

Login

Pass

Submit Reset

--Since 7 February 2011 Department of Land has changed the coordinates of 11 reference station from "July 41 frame" to "October 52 frame" --Phase I GNSS Reference stations(PNNK PLDG BLI area affected) using communication system which may cause RTK user in the area affected.

This service

- allows users to request RINEX data
- creates virtual RINEX data on request
- provides information on the current tracking conditions in the network

**กรอกชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่าน**

---

**GNSS DOL VRS Reference Station Web Server**

Home

Map

Almanac

Ionosphere

I95 Index

Predicted Ionospheric Error

Predicted Geometric Error

Satellite Tracking

RINEX Shop

**RINEX Shop – Virtual Reference Station**

Enter the coordinates of a virtual reference station. You can switch between the geographical and geocentric Cartesian coordinate system.

**Virtual Reference Station – Geographical Position**

Latitude:*	<input type="text" value="13 54 59"/>	<input checked="" type="radio"/> N <input type="radio"/> S
Longitude:*	<input type="text" value="100 31 56"/>	<input checked="" type="radio"/> E <input type="radio"/> W
Elevation:	<input type="text" value="1.85"/>	m

<< Back: Station Type Selection    Reset to initial values    Next: Time Selection >>

**กำหนดตำแหน่งที่ต้องการ**

---

**GNSS DOL VRS Reference Station Web Server**

Home

Map

Almanac

Ionosphere

I95 Index

Predicted Ionospheric Error

Predicted Geometric Error

Satellite Tracking

RINEX Shop

Trimble

Thailand DOL

Download Registration Form for VRS user

Contact us

System Detail

**RINEX Shop – Date & Time Selection**

You have selected the following reference station(s):

VRS: Lat: 13 54 59 N Lon: 100 31 56 E Elev: 1.85 m

Please enter your desired observation period:

**Observation Period**

Date:	<input type="text" value="17"/>	<input type="text" value="July"/>	<input type="text" value="2010"/>			
Start time:	<input type="text" value="04"/>	h	<input type="text" value="0"/>	m	<input type="text" value="0"/>	s
Duration:	<input type="text" value="4"/>	h	<input type="text" value="30"/>	m		
Interval:	<input type="text" value="1"/>	s				

Time system: GPS  
 [GPS time = Local time - xx hour(s) (summer time)]  
 [GPS time = Local time - yy hour(s) (winter time)]

Include Broadcast ephemeris

<< Back: VRS Position    Reset to initial values    Next: Add to order >>

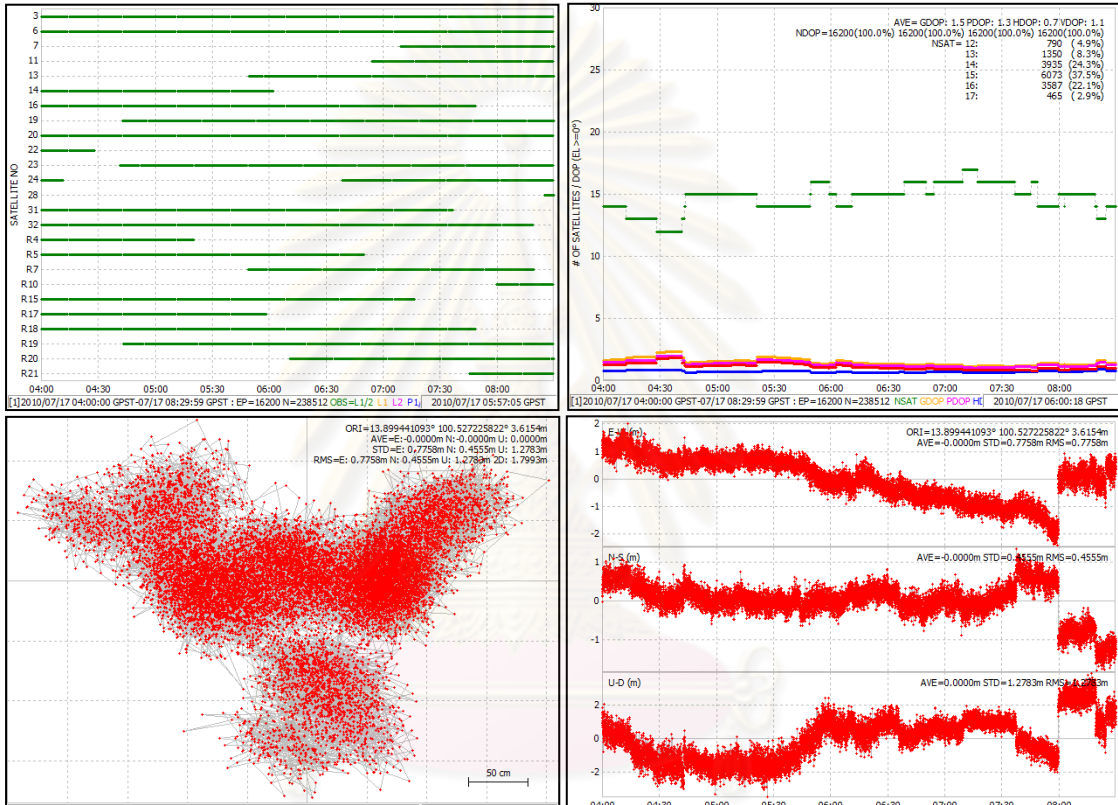
**กำหนดวันเวลาและอัตราการบันทึกข้อมูล**

Copyright © 2000-2007 by Trimble Navigation Limited. All rights reserved.

รูปที่ 3.6 การขอรับบริการให้ระบบ DOL VRS สร้างสถานีฐานในตำแหน่งและเวลาที่กำหนด

ตัวอย่างข้อมูลสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS และคุณภาพของสัญญาณที่ดาวน์โหลดมาจากเว็บไซต์ให้บริการของกรมที่ดิน ประกอบด้วย 3 ไฟล์ ดังรูปที่ 3.7

Name	Date modified	Type	Size
VirA198E.10g	29/8/2553 14:36	10G File	39 KB
VirA198E.10n	29/8/2553 14:36	10N File	46 KB
VirA198E.10o	14:36	10O File	28,769 KB
VirA198E.txt	29/8/2553 14:36	Text Document	2 KB



รูปที่ 3.7 คุณภาพสัญญาณของสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 การมีค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability)

Availability ในงานวิจัยนี้หมายถึง การที่ระบบสามารถให้ค่าพิกัดออกมาใช้งานได้ โดยพิจารณาถึงความน่าจะเป็นของระบบที่สามารถให้ข้อมูลตำแหน่งครบถ้วนสมบูรณ์ ณ ขณะเวลาใดๆ คำนวณออกมาเป็นจำนวนร้อยละ ดังสมการ

$$A = \frac{T_n}{T_t} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่	$T_n$	จำนวนของ Epoch ที่ได้ข้อมูลตำแหน่ง
	$T_t$	จำนวนของ Epoch ทั้งหมดที่รังวัดตลอดช่วงเวลารับสัญญาณดาวเทียม
	A	เปอร์เซ็นต์จำนวนของค่าพิกัดที่มีให้ใช้งานได้

##### 4.1.1 ประโยชน์ของการใช้ GPS/GLONASS

การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์จาก GPS/GLONASS เป็นผลจากการใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Trimble R8 ซึ่งเป็นข้อมูล GNSS 2 ความถี่ (GPS + GLONASS) จะนำมาใช้ในการประเมิน Availability โดยมีการเลือกใช้ข้อมูลความถี่เดียวและสองความถี่มาประมวลผลพิจารณาแยกออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ GPS ความถี่เดียว, GPS สองความถี่, GPS/GLONASS ความถี่เดียว และ GPS/GLONASS 2 ความถี่ ทั้งในพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง

จากข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมของเครื่องรับ Trimble R8 ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ ได้ตั้งค่าอัตราการบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ในพื้นที่ชานเมือง เริ่มบันทึกข้อมูลเวลา 5:13:50 (GPS Time) สิ้นสุดเวลา 8:24:44 ใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลทั้งหมด 3 ชั่วโมง 10 นาที 54 วินาที แต่ได้ตัดข้อมูลช่วงเวลาที่ใช้เริ่มทำงาน (Initialization) เหลือเวลาในการบันทึกข้อมูล 2 ชั่วโมง 54 นาที 15 วินาที ดังนั้นจะได้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 10,455 epoch ส่วนพื้นที่ในเมือง เริ่มบันทึกข้อมูลเวลา 4:06:16 สิ้นสุดเวลา 5:49:54 ใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลทั้งหมด 1 ชั่วโมง 43 นาที 38 วินาที แต่ได้ตัดข้อมูลช่วงเวลาที่ใช้เริ่มทำงาน เหลือเวลาในการบันทึกข้อมูล 1 ชั่วโมง 38 นาที 35 วินาที ดังนั้นจะได้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 5,915 epoch

จากนั้นได้ทำการแปลงรูปแบบข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Trimble Convert to Rinex จาก .T01 เป็น Rinex file ที่มีองค์ประกอบจำนวน 3 ไฟล์ ได้แก่ .10o คือ observation data (ประเภท Mixed = GPS และ GLONASS), .10n คือ GPS Navigation file และ .10g คือ GLONASS Navigation file ดังรูปที่ 4.1

20100717.10o

2.11	OBSERVATION DATA	Mixed(MIXED)	RINEX VERSION / TYPE		
cnvtToRINEX 2.02.0	convertToRINEX OPR	21-Aug-10 11:17	UTC PGM / RUN BY / DATE		
-----			COMMENT		
2263			MARKER NAME		
2263			MARKER NUMBER		
GNSS Observer	Trimble		OBSERVER / AGENCY		
4612112263	Unknown	Version 4.01	REC # / TYPE / VERS		
			ANT # / TYPE		
-1132648.3260	6087748.3116	1523523.6503	APPROX POSITION XYZ		
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N		
1	1	0	WAVELENGTH FACT L1/2		
4	C1	L1 L2 P2	# / TYPES OF OBSERV		
2010	7	17 4 41	19.0000000	GPS	TIME OF FIRST OBS
2010	7	17 8 24	44.0000000	GPS	TIME OF LAST OBS
0	RCV CLOCK OFFS APPL				
15	LEAP SECONDS				
22	# OF SATELLITES				
G03	12312	12111	12011	12131	PRN / # OF OBS
G06	10884	10611	10444	10614	PRN / # OF OBS
G07	2129	1945	1865	1969	PRN / # OF OBS
G11	2899	2617	2440	2553	PRN / # OF OBS
G13	7426	7178	6784	6963	PRN / # OF OBS

20100717.10n

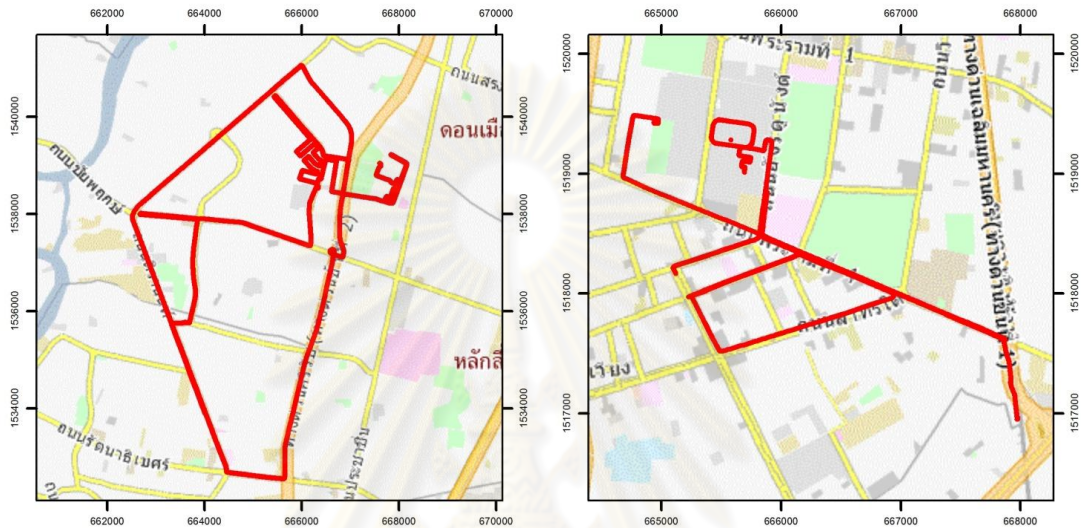
2.10	NAVIGATION DATA	GPS(GPS)	RINEX VERSION / TYPE						
cnvtToRINEX 2.02.0	convertToRINEX OPR	21-Aug-10 11:17	UTC PGM / RUN BY / DATE						
-----			COMMENT						
0.4657D-08	0.1490D-07	-0.5960D-07	-0.1192D-06	ION ALPHA					
0.7987D+05	0.8192D+05	-0.6554D+05	-0.4588D+06	ION BETA					
0.186264514923D-08	0.106581410364D-13	147456		57 DELTA-UTC: A0,A1,T,W					
15	LEAP SECONDS								
END OF HEADER									
3	10	7	17	6	0	0.0	0.582616776228D-03	0.500222085975D-11	0.000000000000D+00
0.710000000000D+02	-0.574375000000D+02	0.550987236544D-08	-0.997307660816D+00						
-0.268220901489D-05	0.133492891910D-01	0.823661684990D-05	0.515371549416D+04						
0.540000000000D+06	0.160187482834D-06	-0.268027035963D+01	0.253319740295D-06						
0.927675475419D+00	0.201312500000D+03	0.100982576304D+01	-0.8618930444162D-08						
-0.194650965137D-09	0.100000000000D+01	0.159200000000D+04	0.000000000000D+00						
0.240000000000D+01	0.000000000000D+00	-0.465661287308D-08	0.710000000000D+02						
0.534588000000D+06	0.400000000000D+01	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00						
20	10	7	17	6	0	0.0	0.532744452357D-04	-0.454747350886D-12	0.000000000000D+00
0.740000000000D+02	0.472812500000D+02	0.542629745564D-08	0.195505304431D+01						
0.225566327572D-05	0.413604418281D-02	0.429712235928D-05	0.515356967163D+04						

20100717.10g

2.10	GLONASS NAV DATA		RINEX VERSION / TYPE						
cnvtToRINEX 2.02.0	convertToRINEX OPR	21-Aug-10 11:17	UTC PGM / RUN BY / DATE						
-----			COMMENT						
2010	7	17	0.164378434420D-06	CORR TO SYSTEM TIME					
15				LEAP SECONDS					
				END OF HEADER					
4	10	7	17	4	45	0.0	-0.793682411313D-04	0.000000000000D+00	0.168300000000D+05
-0.609255273438D+04	-0.109662055969D+00	-0.186264514923D-08	0.000000000000D+00						
0.183374042969D+05	-0.227652549744D+01	-0.931322574615D-09	0.600000000000D+01						
-0.166367773438D+05	-0.247830772400D+01	0.186264514923D-08	0.000000000000D+00						
18	10	7	17	4	45	0.0	-0.217417255044D-04	-0.909494701773D-12	0.168300000000D+05
-0.184213901367D+05	-0.522134780884D+00	-0.372529029846D-08	0.000000000000D+00						
0.166489414063D+05	0.581768989563D+00	0.000000000000D+00	-0.300000000000D+01						
-0.553392333984D+04	0.348102474213D+01	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00						
5	10	7	17	4	45	0.0	-0.153063796461D-03	0.000000000000D+00	0.168300000000D+05
0.231817236328D+04	0.163700103760D+00	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00						

รูปที่ 4.1 รูปแบบและองค์ประกอบของ GNSS Rinex file

ส่วนสถานีฐานที่ใช้เครื่องรับ NovAtel ProPak V3 ข้อมูลดิบที่บันทึกจากโปรแกรม NovAtel CDU มีรูปแบบข้อมูลเป็น .gps สามารถแปลงรูปแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ GrafNav 8.3 (GNSS Data Converter) จากชุดข้อมูลที่ติดตั้งบนยานพาหนะและสถานีฐานจะนำมาประมวลผลแบบสัมพัทธ์โดยใช้ซอฟต์แวร์ GrafNav จะได้ Trajectory ของพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 Trajectory ในพื้นที่ชานเมือง (ซ้าย) และพื้นที่ในเมือง (ขวา)

จากการประมวลผลในพื้นที่ชานเมือง กรณีใช้ GPS ความถี่เดียว ให้ค่า Availability 75%, GPS สองความถี่ ให้ค่า Availability 75%, GPS/GLONASS ความถี่เดียว ให้ค่า Availability 85% และ GPS/GLONASS สองความถี่ ให้ค่า Availability 85% ซึ่งจะเห็นว่ากรณีใช้ GPS/GLONASS ให้ค่า Availability เพิ่มขึ้นประมาณ 13% เมื่อเทียบกับระบบ GPS ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดง Availability ของ GPS/GLONASS ในพื้นที่ชานเมือง

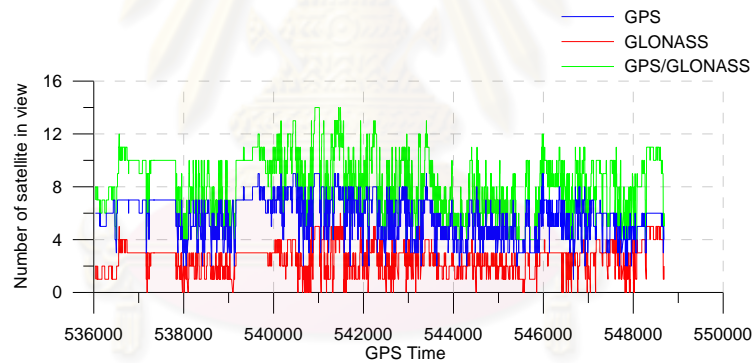
Type	Measured	Total Epoch	Availability	Compare with GPS
GPS only 1 freq	7,843	10,455	75 %	-
GPS only 2 freq.	7,825	10,455	75 %	-
GPS/GLONASS 1 freq.	8,879	10,455	85 %	13 %
GPS/GLONASS 2 freq.	8,879	10,455	85 %	13 %

ส่วนพื้นที่ในเมือง พบว่า กรณีใช้ GPS ความถี่เดียว ให้ค่า Availability 40%, GPS สองความถี่ ให้ค่า Availability 40%, GPS/GLONASS ความถี่เดียว ให้ค่า Availability 58% และ GPS/GLONASS สองความถี่ ให้ค่า Availability 58% ซึ่งจะเห็นว่ากรณีใช้ GPS/GLONASS ให้ค่า Availability เพิ่มขึ้นประมาณ 45% เมื่อเทียบกับระบบ GPS ดังตารางที่ 4.2

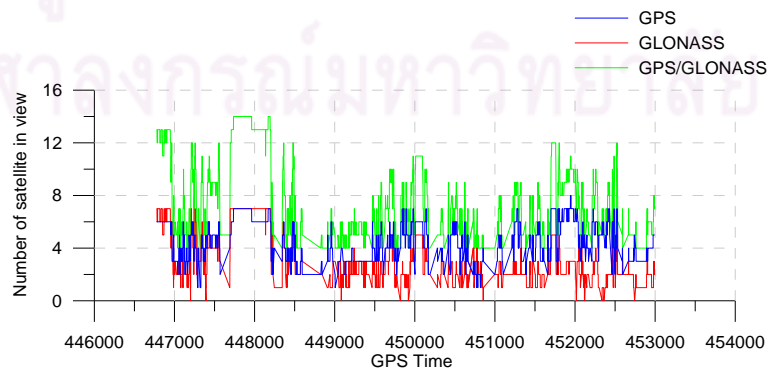
ตารางที่ 4.2 แสดง Availability ของ GPS/GLONASS ในพื้นที่เมือง

Type	Measured	Total Epoch	Availability	Compare with GPS
GPS only 1 freq	2,385	5,915	40 %	-
GPS only 2 freq.	2,385	5,915	40 %	-
GPS/GLONASS 1 freq.	3,428	5,915	58 %	45 %
GPS/GLONASS 2 freq.	3,434	5,915	58 %	45 %

เมื่อพิจารณาถึงจำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ตลอดช่วงเวลากារบันทึกข้อมูลของพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 จำนวนดาวเทียม GPS, GLONASS และ GPS/GLONASS ในพื้นที่ชานเมือง



รูปที่ 4.4 จำนวนดาวเทียม GPS, GLONASS และ GPS/GLONASS ในพื้นที่ในเมือง

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าทั้งสองพื้นที่ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GPS/GLONASS ได้สูงสุดถึง 14 ดวง เฉลี่ยอยู่ที่ 9 ดวง โดยพื้นที่ชานเมืองสามารถรับสัญญาณดาวเทียม GPS ได้สูงสุด 9 ดวง ต่ำสุด 1 ดวง เฉลี่ยอยู่ที่ 6 ดวง ส่วนดาวเทียม GLONASS รับสัญญาณสูงสุด 6 ดวง เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ดวง พื้นที่ในเมืองสามารถรับสัญญาณดาวเทียม GPS ได้สูงสุด 8 ดวง ต่ำสุด 1 ดวง เฉลี่ยอยู่ที่ 5 ดวง ส่วนดาวเทียม GLONASS รับสัญญาณได้สูงสุด 7 ดวง เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ดวง

#### 4.1.2 ประโยชน์ของการใช้ระบบบูรณาการ GPS/INS

การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์จาก GPS/INS เป็นผลจากการใช้ข้อมูลจากชุดอุปกรณ์ SPAN-CPT ที่ประกอบด้วย เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS 2 ความถี่ และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย IMU ที่บรรจุอยู่ในเบ็ดเสร์จกล่องเดียว จะนำมาใช้ในการประเมิน Availability โดยพิจารณาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ GPS ระบบเดียว และระบบบูรณาการ GPS/INS ทั้งพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง

จากข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมและการวัดความเฉื่อยของชุดอุปกรณ์ SPAN-CPT ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ ได้ตั้งค่าอัตราการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมทุก 1 วินาที และอัตราการตรวจวัดความเฉื่อยทุก 0.01 วินาที สำหรับพื้นที่ชานเมือง ได้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 6,922 epoch ส่วนพื้นที่ในเมือง ได้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 4,680 epoch

ข้อมูลดิบที่บันทึกได้จากชุดอุปกรณ์ SPAN-CPT ประกอบด้วยข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียม 2 ความถี่ และข้อมูลอัตราการเร่งเชิงเส้นและอัตราหมุนรอบแกน 3 มิติ ดังรูปที่ 4.5

```

WPG READER 1.0 - D:\Project\GPS_IMU\DOL\Post-Processing\Waypoint\SPAN-CPT\Processing
File: D:\Project\GPS_IMU\DOL\Post-Processing\Waypoint\SPAN-CPT\Processing
Type: Inertial

HEADER INFORMATION
IMU Name: NovAtel SPAN CPT
Version: 8.30
Gyro Meas: Delta Thetas
Gyro SP: 160849.54386300
Time Tags: GPS, Corrected Time
Sensor Def: X=right Y=front Z=up
Press any key to continue . . .

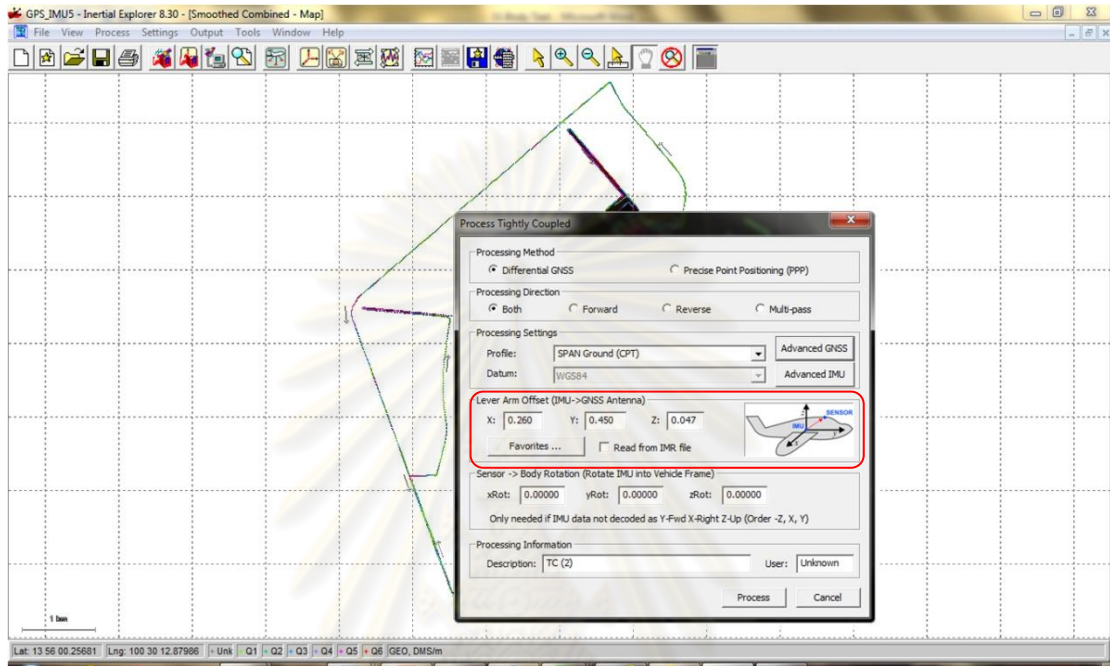
WPG READER 1.0 - D:\Project\GPS_IMU\DOL\Post-Processing\Waypoint\SPAN-CPT\Processing by Inertial Explorer\SPAN_CPT\CPT4.imr
Time Gyro X Gyro Y Gyro Z Accel X Accel Y Accel Z
(s) (deg/s) (deg/s) (deg/s) (m/s^2) (m/s^2) (m/s^2)
540897.958614 -0.18631 -0.14299 0.05409 0.19867 -0.43076 9.57611
540897.968614 -0.08890 -0.42249 0.00574 -0.94776 -0.67381 9.94781
540897.978614 -0.00187 -0.24371 0.38234 0.20035 -0.58212 10.00896
540897.988614 0.67517 -0.85484 0.37613 0.37216 -0.39764 10.00839
540897.998614 0.37861 0.00560 0.20001 0.53354 -0.49881 9.74686
540898.008614 -0.09636 -0.73360 0.08952 0.59570 -0.17349 9.58069
540898.018614 -0.20143 -0.16662 0.21884 0.28412 -0.44815 9.86420
540898.028614 -0.27790 -0.31147 0.34877 0.67459 0.46722 9.92676
540898.038614 0.07398 -0.35064 0.22195 0.18646 -0.61222 9.98199
540898.048614 0.46627 0.05284 0.21946 0.24734 -0.59738 9.45160
540898.058614 0.38670 -0.34380 0.46503 0.41458 -0.54703 9.58577
540898.068614 0.30481 0.35882 0.25490 0.27344 -0.11963 9.75990
540898.078614 0.05533 -0.37299 0.24433 0.48976 -0.59814 9.97925
540898.088614 -0.42711 0.17781 0.22506 0.53879 -0.24002 9.78653
540898.098614 0.75039 0.22195 0.38048 0.08698 -0.11368 9.41879
540898.108614 0.83100 0.37302 0.30951 0.57571 -0.65414 9.61624
540898.118614 -0.58378 -0.02114 -0.02904 0.38406 0.73923 9.11505
540898.128614 -0.21946 0.84924 0.20765 -0.12589 -0.54596 9.79248
540898.138614 0.00249 -0.40440 0.20523 0.51895 -0.58670 9.37485
540898.148614 0.55456 1.12717 0.20330 -0.40588 -0.20425 9.20425
540898.158614 0.17408 -0.22568 0.14113 0.63004 -0.62958 9.37393
540898.168614 -0.06167 0.14361 0.20143 -0.08865 -0.29495 9.78287
540898.178614 -0.45845 0.64960 0.02300 -0.19196 -0.42350 9.45343
540898.188614 0.12807 -0.69568 0.01679 -0.06636 -0.93475 9.44260
540898.198614 0.27603 0.79204 0.05347 0.15564 -0.38986 9.27551
540898.208614 0.73547 -0.50171 0.21884 -0.05493 -0.23834 9.69666
540898.218614 -0.29779 -0.13645 0.10302 0.26596 -0.46326 9.99329
main / quit / header / gaps / top / bottom / up / *down / find / save to file:

```

รูปที่ 4.5 ข้อมูลดิบอัตราเร่งและอัตราการหมุนรอบแกน 3 มิติ ที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์ SPAN-CPT



ข้อมูลที่ได้จาก SPAN-CPT ที่ติดตั้งบนยานพาหนะและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งบนสถานีฐานในพื้นที่ จะนำมาประมวลผลในภายหลังโดยใช้ซอฟต์แวร์ Waypoint Inertial Explorer โดยเลือกการประมวลผลแบบ Tight integration และเลือก Smooth solution ซึ่งในขั้นตอนการประมวลผลจะต้องกรอกค่า Level-arm offset ที่รังวัดมาได้ ดังรูปที่ 4.6



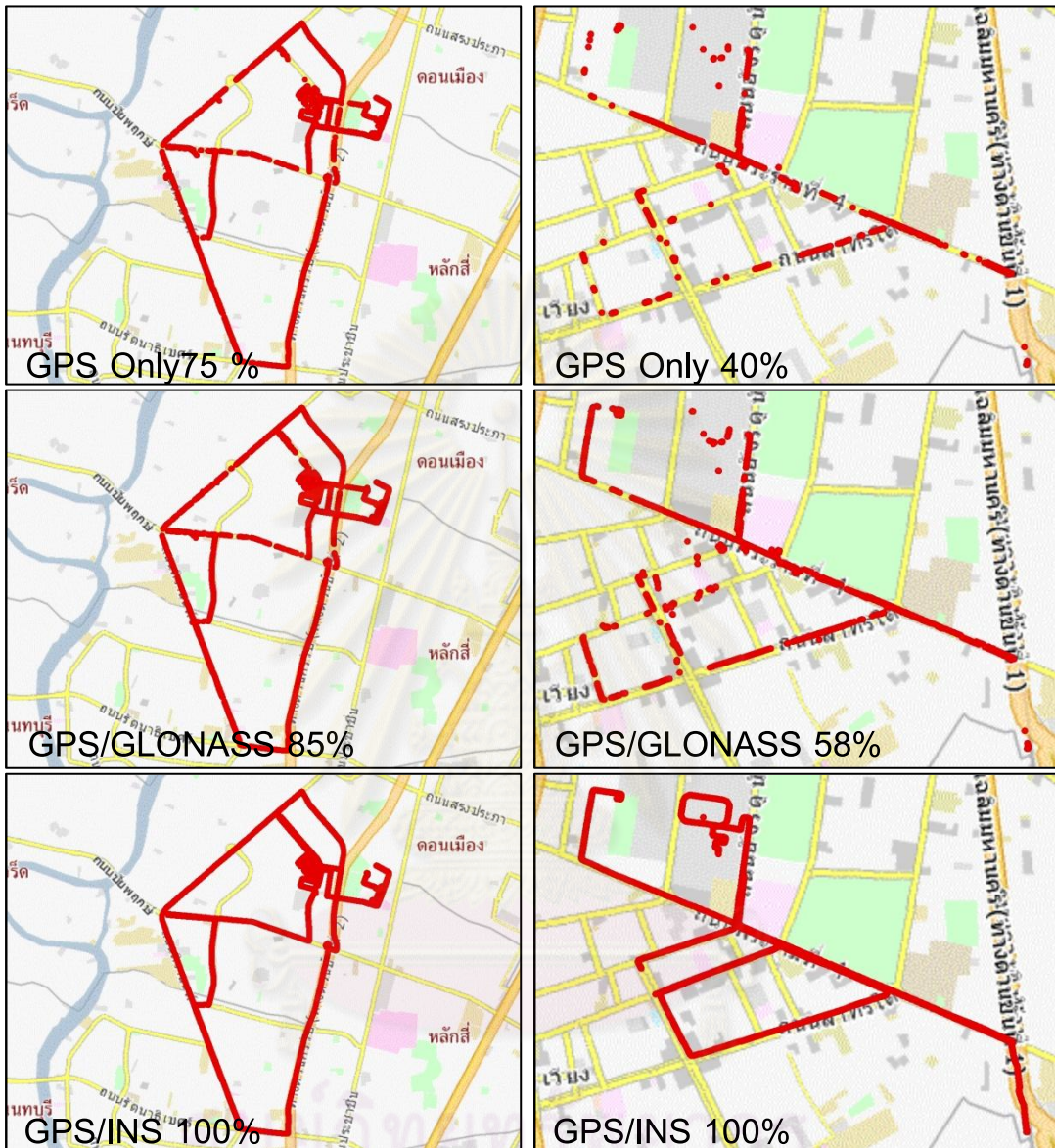
รูปที่ 4.6 หน้าตาของโปรแกรม Waypoint Inertial Explorer และการกรอกค่า Level-arm offset

จากการประมวลผลพื้นที่ชานเมืองพบว่า กรณีใช้ GPS เพียงระบบเดียว ให้ค่า Availability 80%, ระบบ GPS/INS ให้ค่า Availability 100% (Fixed solution 50%) ส่วนพื้นที่ในเมืองหนาแน่น พบว่า กรณีใช้ GPS เพียงระบบเดียว ให้ค่า Availability 55%, ระบบ GPS/INS ให้ค่า Availability 100% (Fixed solution 33%) ดังตารางที่ 4.3 อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะการได้ค่าตำแหน่งจากระบบ INS เพียงระบบเดียวนั้นจะพบว่าสามารถให้ Availability 100% แต่ความคลาดเคลื่อนจะสะสมตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยการปรับปรุงตำแหน่งจาก GPS ในกรณีที่จะได้ตำแหน่งของ Trajectory ต่อเนื่อง (Smoothing) ตลอดเส้นทางและสามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป ดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 แสดง Availability ของ GPS/INS ของพื้นที่ชานเมืองและในเมืองหนาแน่น

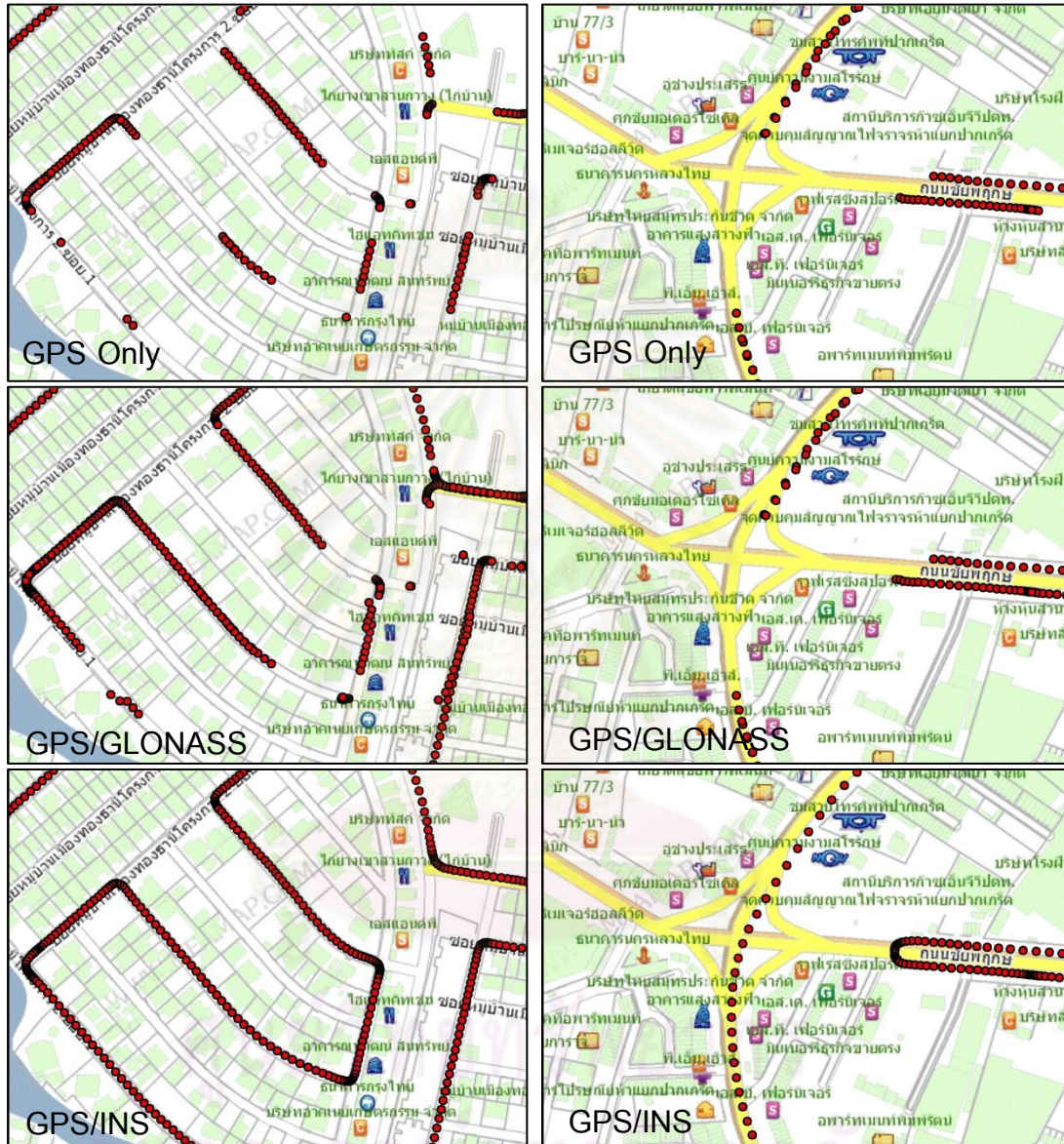
Type	Rural Area			Urban Area		
	Measured	Total epoch	Availability	Measured	Total epoch	Availability
GPS only	5,529	6,922	80%	2,604	4,680	55%
GPS/INS	6,922	6,922	100%	4,680	4,680	100%

การเปรียบเทียบ Trajectory ที่ได้จากการวิ่งวัดโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน GPS, GPS/GLONASS และระบบบูรณาการร่วมของ GPS/INS ของพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง แสดงดังรูปที่ 4.7

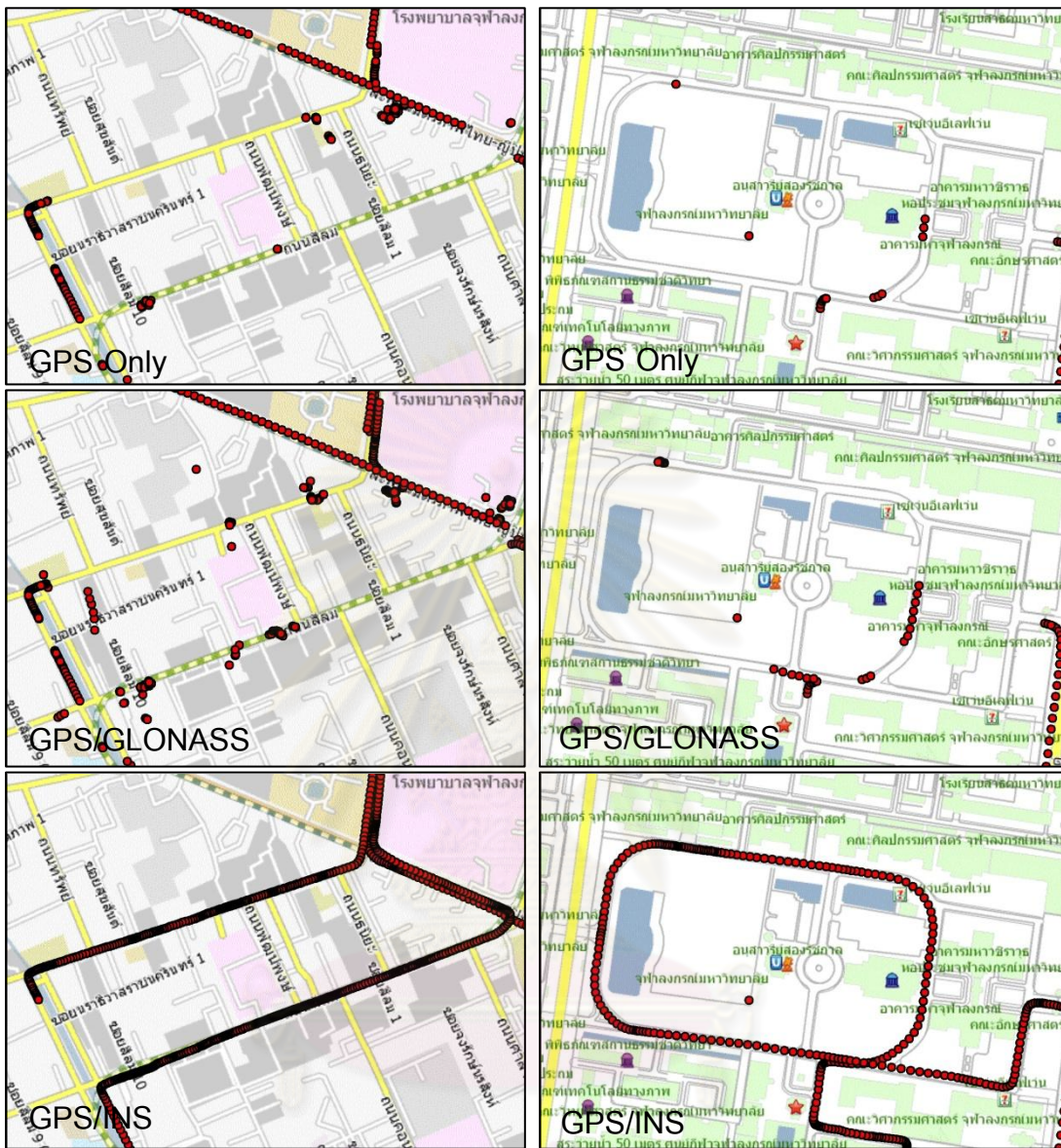


รูปที่ 4.7 Trajectory ที่ได้จากระบบ GPS, GPS/GLONASS และ GPS/INS ในพื้นที่ชานเมือง (ซ้าย) และพื้นที่ในเมือง (ขวา)

การเปรียบเทียบ Trajectory ที่ได้จากการรังวัดโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน GPS, GPS/GLONASS และระบบบูรณาการร่วมของ GPS/INS ของพื้นที่ตัวอย่าง ได้แก่ หมู่บ้าน อุโมงค์ ย่านธุรกิจตึกสูง และต้นไม้ปกคลุมสองข้างทางภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบ Trajectory ที่ได้จากระบบ GPS, GPS/GLONASS และ GPS/INS ในพื้นที่ต่างๆ



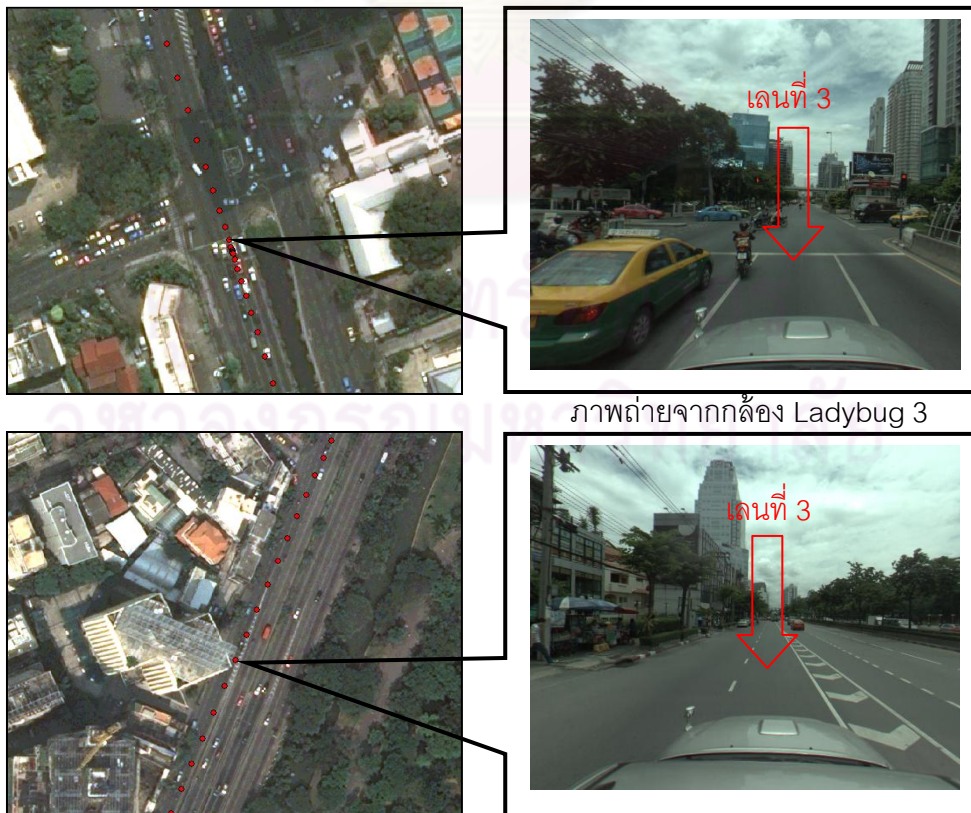
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบ Trajectory ที่ได้จากระบบ GPS, GPS/GLONASS และ GPS/INS ในพื้นที่ต่างๆ (ต่อ)



รูปที่ 4.9 Trajectory ที่ได้จากระบบ GPS อย่างเดียว (a) IMU (b) และ GPS/IMU (c)

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าบริเวณใต้ทางด่วนย่านคลองเตยมีช่วงเวลาอัปเดตสัญญาณ GPS ประมาณ 5 นาที ทำให้ไม่สามารถได้ค่าตำแหน่งจากระบบ GPS ดังรูป 4.9(a) ในขณะที่ IMU จะให้ตำแหน่งตลอดเส้นทางแต่ตำแหน่งเกิดการกระโดด (Drifting) ดังรูป 4.9(b) เมื่อนำข้อมูล GPS/IMU มาประมวลผลในภายหลังจะได้ตำแหน่งต่อเนื่องตลอดเส้นทาง ดังรูป 4.9(c)

และเนื่องจากภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับมอบภาพถ่ายทางอากาศครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของกรุงเทพมหานครและธนบุรี จากกรมแผนที่ทหาร เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและวิจัย โดยภาพถ่ายบันทึกได้จากกล้องถ่ายภาพทางอากาศดิจิทัล DMC ความละเอียดจุดภาพ GSD = 0.3 เมตร นำมาจัดทำจุดบังคับภาพโดยใช้โครงข่ายรังวัด GPS ซึ่งในจุดบังคับภาพได้ใช้หมุด CU09 ที่ถ่ายค่าพิกัดมาจากกรุงเทพมหานคร จากการประมวลผลจะได้ภาพออร์โท มีค่า RMSE ประมาณ 0.20 เมตร ดังนั้นเพื่อประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของ Trajectory ในเบื้องต้น ผู้วิจัยจึงได้ประมวลผลข้อมูล GPS/IMU พื้นที่ในเมืองโดยใช้หมุด CU09 เป็นหมุดหลักฐานอ้างอิงและใช้ค่าพิกัดอ้างอิงที่ได้มาจากโครงการข้างต้น นำผลที่ได้มาซ้อนทับกับภาพถ่ายทางอากาศ DMC แล้วเปรียบเทียบตำแหน่งที่ได้จากกล้องถ่ายภาพรอบทิศทาง LadyBug 3 ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของรถอยู่ในเลนตรงกัน ดังรูปที่ 4.10 (อย่างไรก็ตาม การหาค่าความถูกต้องของ Trajectory ต้องมี True trajectory หรือใช้วิธีการรังวัดทางโฟโตแกรมเมตรี)



รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งของ Trajectory ซ้อนทับกับภาพถ่ายทางอากาศ DMC

4.2 ผลการเปรียบเทียบการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ การตั้งสถานีฐานในพื้นที่ สำหรับพื้นที่ชานเมือง จะใช้หมุดเฉลิมพระเกียรติ (เรียกว่า หมุด CDOL) ที่อยู่หน้าตึกสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด ส่วนพื้นที่ในเมืองได้ติดตั้งสถานี ฐานบนหมุดหลักฐาน CU09 บริเวณสนามรักบี้ ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 4.11



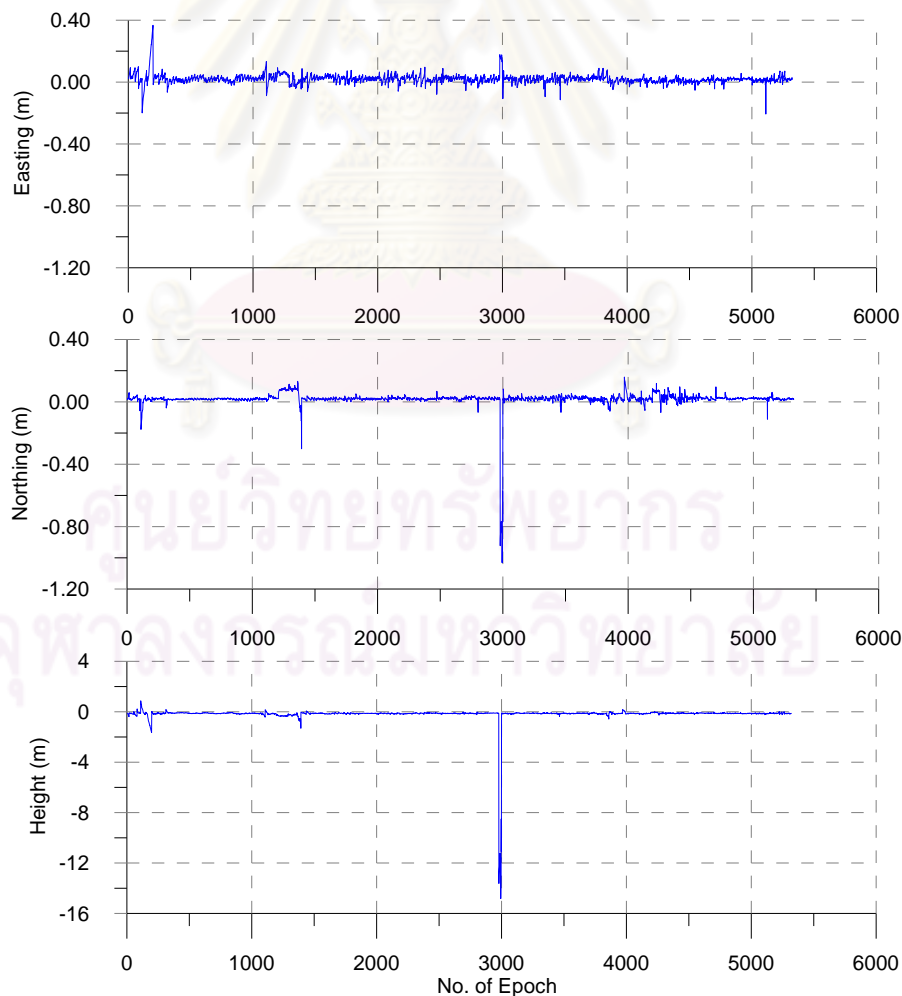
รูปที่ 4.11 สถานีฐาน GNSS ที่ติดตั้งบนหมุดหลักฐานถาวรในพื้นที่

ส่วนสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS จะดาวนิโหลดมาจากเว็บไซต์ให้บริการของ กรมที่ดิน และเนื่องจากค่าพิกัดของสถานีฐานที่ดาวนิโหลดมาจากระบบ DOL VRS นั้นจะเป็น ระบบพิกัดที่โยงยึดอยู่กับโครงข่ายของกรมที่ดินเอง ดังนั้นการที่จะเปรียบเทียบค่าพิกัดที่คำนวณ ได้จากสถานีฐานถาวรในพื้นที่ต้องทำการโยงยึดค่าพิกัดของสถานีฐานนั้นเข้ากับระบบพิกัดของ กรมที่ดินก่อน ซึ่งหมุด CDOL นั้นค่าพิกัดอ้างอิงเป็นของกรมที่ดินเองจึงไม่ต้องโยงยึดค่าพิกัดใหม่ แต่หมุดหลักฐาน CU09 ต้องทำการโยงยึดเข้ากับระบบพิกัดของกรมที่ดินโดยใช้วิธีดาวนิโหลด Rinex file จากระบบ DOL VRS ในโหมดของ Continuously Operating Reference Station (CORS) ที่ครอบคลุมหมุด CU09 จำนวน 3 หมุด ได้แก่ หมุด PKKT BPLE KTBN มาประมวลผล แบบเส้นฐานเพื่อหาค่าพิกัดอ้างอิงของหมุด CU09 ที่ละเส้นฐาน ได้แก่ PKKT-CU09, BPLE- CU09 และ KTBN-CU09 จากนั้นนำค่าพิกัดของหมุด CU09 ที่ได้มาเฉลี่ยและนำไปใช้เป็นค่าพิกัด อ้างอิงต่อไป ค่าพิกัดที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าพิกัดอ้างอิงหมุด CU09 ที่โยงยึดเข้ากับระบบพิกัดของกรมที่ดิน

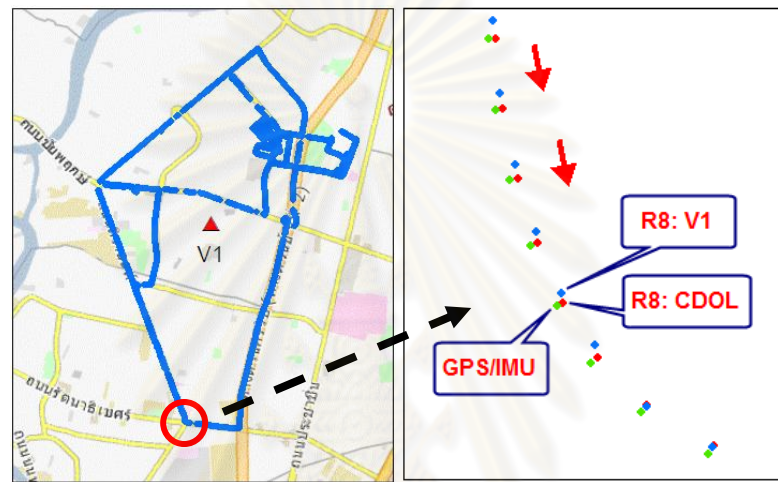
Baseline	E	N	H
PKKT-CU09	665580.507	1519282.269	-30.290
BPLE-CU09	665580.525	1519282.249	-30.299
KTBN-CU09	665580.520	1519282.275	-30.353
Average CU09	665580.517	1519282.264	-30.314

ข้อมูลที่ใช้ได้จากเครื่องรับ Trimble R8 มาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav พบว่า พื้นที่ชานเมืองซึ่งเป็นพื้นที่ใกล้กับสถานีฐานถาวรของโครงข่าย VRS และสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS (เรียกในที่นี้ว่าสถานีฐาน V1) ให้ Fixed solution 5,812 จุด และการตั้งสถานีฐานในพื้นที่ (หมุด CDOL) ให้ Fixed solution 6,055 จุด จากจำนวนจุดที่คำนวณได้ทั้งหมด 8,879 จุด ระยะเส้นฐานไกลสุดประมาณ 6 กิโลเมตร เมื่อนำผลลัพธ์ที่เป็น Fixed solution ของแต่ละจุดในเวลาตรงกันมาลบกันจะได้ค่าต่างพิกัดของแต่ละจุด แสดงดังรูปที่ 4.12

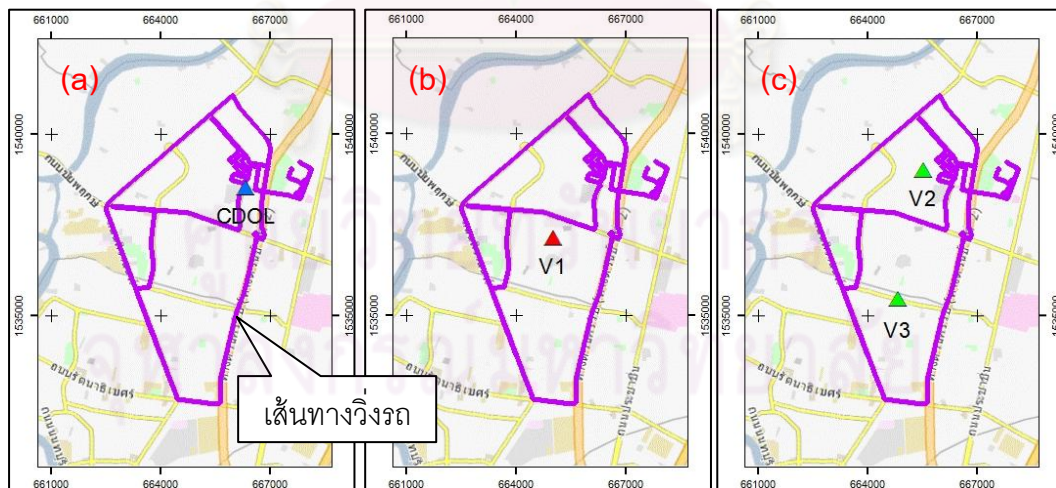


รูปที่ 4.12 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ชานเมือง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 จะพบว่า เกิดค่ากระโดดขนาดใหญ่ (ประมาณ epoch ที่ 3,000) ในตำแหน่งของ Trajectory ที่อยู่ช่วงโค้งของถนนด้านล่าง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ได้จาก GPS/INS แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่กระโดดเป็นตำแหน่งของเครื่อง Trimble R8 ที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS (สถานีฐาน V1) ดังรูปที่ 4.13 และด้วยความสามารถของซอฟต์แวร์ GrafNav ที่สามารถใช้ในการคำนวณแบบหลายสถานีฐาน (Muti-Base station mode) ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการกำหนดจุดสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS ขึ้นมาใหม่จำนวน 2 จุด ได้แก่ สถานีฐาน V2 และสถานีฐาน V3 โดยมีระยะเส้นฐานไกลสุดประมาณ 3 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.14



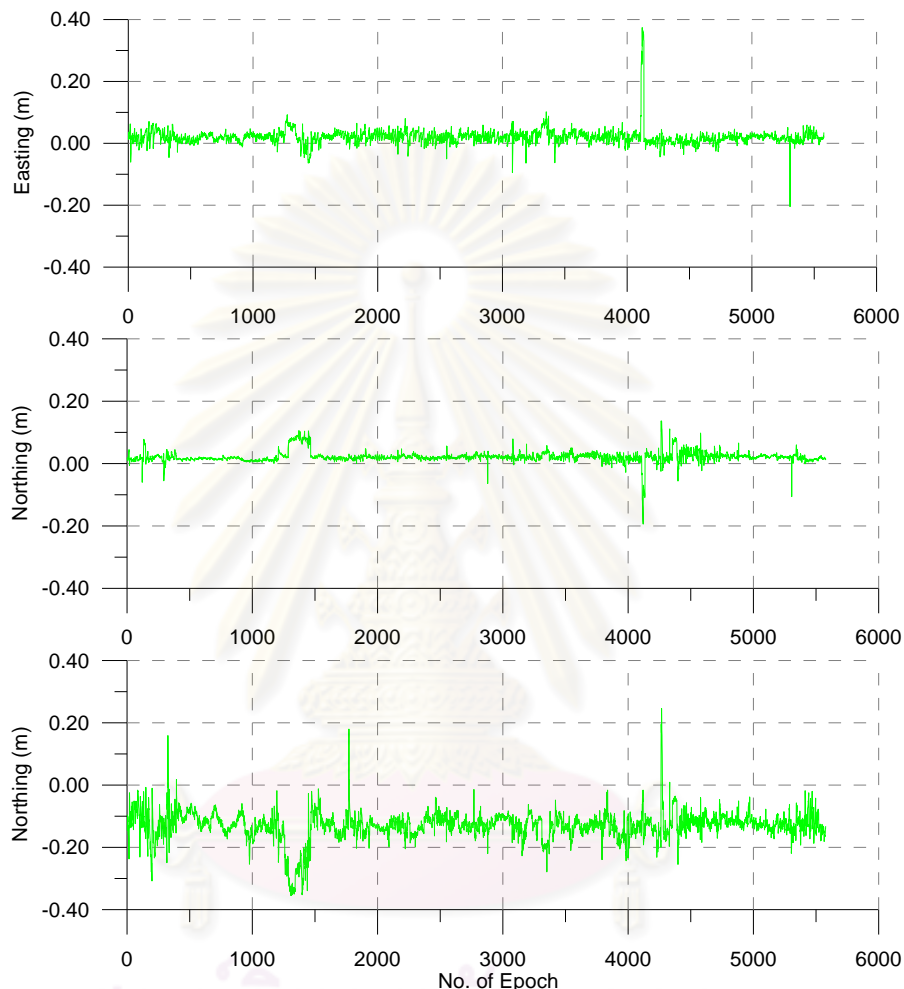
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งที่เกิดค่ากระโดดขนาดใหญ่จากการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งของสถานีฐานในพื้นที่ (a) สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS (V1) (b) และ สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานี (V2, V3) (c) ของพื้นที่ชานเมือง



จากการประมวลผล พบว่า การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานีให้ Fixed solution 6,034 จุด ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานี จำนวน 222 จุด และเมื่อนำผลลัพธ์ที่เป็น Fixed solution ของแต่ละจุดในเวลาตรงกันมาลบกับการใช้สถานีฐานในพื้นที่จะได้ค่าต่างพิกัดของแต่ละจุด ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานี กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่

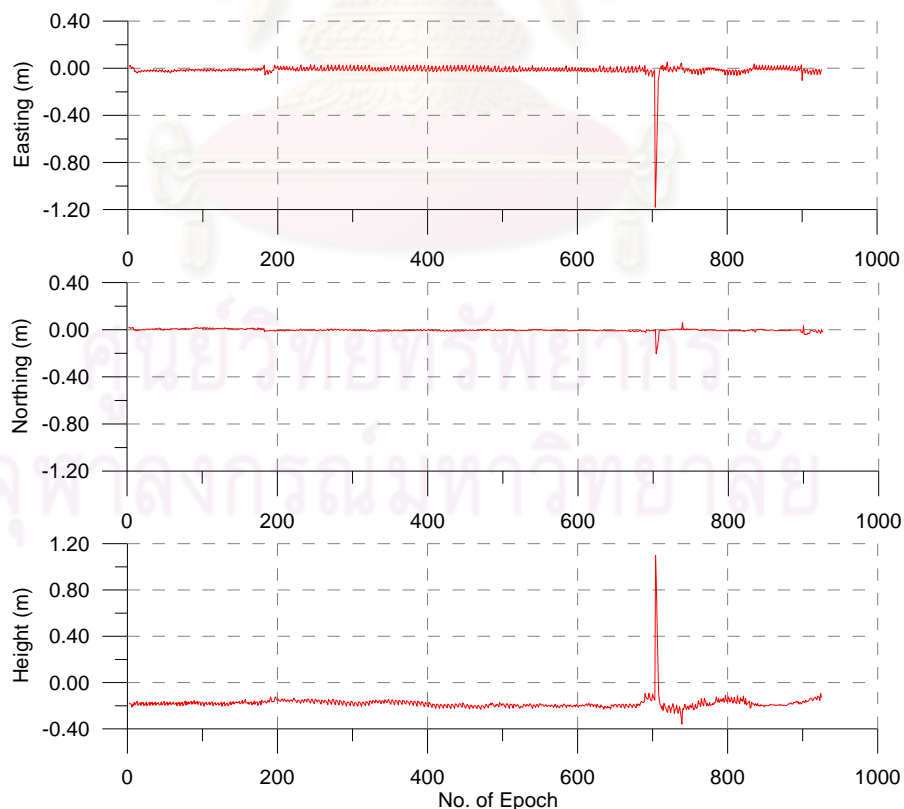
เมื่อพิจารณาถึงค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานีและ 2 สถานี เปรียบเทียบกับการใช้สถานีฐานในพื้นที่ โดยแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่ได้ในทางราบ (Horizontal Error) และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง (Vertical Error) แทนด้วย dHor และ dVer ตามลำดับ พบว่า การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานีมีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งสูงสุดประมาณ 1.05 เมตรและ 14.82 เมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยทางราบและทางตั้งประมาณ 0.04 เมตรและ 0.19 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางตั้งประมาณ 0.07 เมตรและ 0.78 เมตร ตามลำดับ ส่วนการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานี มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งสูงสุดประมาณ 0.39 เมตรและ 0.36

เมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.04 เมตรและ 0.13 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.04 เมตรและ 0.14 เมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่

สถานีฐาน	MAX (+/-) (เมตร)		MEAN (เมตร)		RMSE (เมตร)	
	dHor	dVer	dHor	dVer	dHor	dVer
DOL VRS (V1)	1.05	14.82	0.04	0.19	0.07	0.78
DOL VRS (V2 และ V3)	0.39	0.36	0.04	0.13	0.04	0.14

สำหรับพื้นที่ในเมืองซึ่งเป็นพื้นที่กลางโครงข่าย VRS มีระยะเส้นฐานไกลสุดประมาณ 3 กิโลเมตร การประมวลผลโดยใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS เทียบกับการตั้งสถานีฐานในพื้นที่ที่หมุด CU09 พบว่า กรณีใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS (หมุด V4) ให้ Fixed solution 925 จุด และการตั้งสถานีฐานในพื้นที่ (หมุด CU09) ให้ Fixed solution 1,424 จุด จากจำนวนจุดที่คำนวณได้ทั้งหมด 3,434 จุด เมื่อนำผลลัพธ์ที่เป็น Fixed solution ของแต่ละจุดในเวลาที่ยตรงกันมาลบกันจะได้ค่าต่างพิกัดของแต่ละจุด ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ในเมือง

เมื่อพิจารณาถึงค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้ โดยแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่ได้ในทางราบ และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง แทนด้วย dHor และ dVer ตามลำดับ พบว่า การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งสูงสุดประมาณ 1.20 เมตรและ 1.10 เมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยทางราบและทางตั้งประมาณ 0.02 เมตร และ 0.19 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางตั้งประมาณ 0.06 เมตรและ 0.19 เมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ในเมือง

MAX (+/-) (เมตร)		MEAN (เมตร)		RMSE (เมตร)	
dHor	dVer	dHor	dVer	dHor	dVer
1.20	1.10	0.02	0.19	0.06	0.19

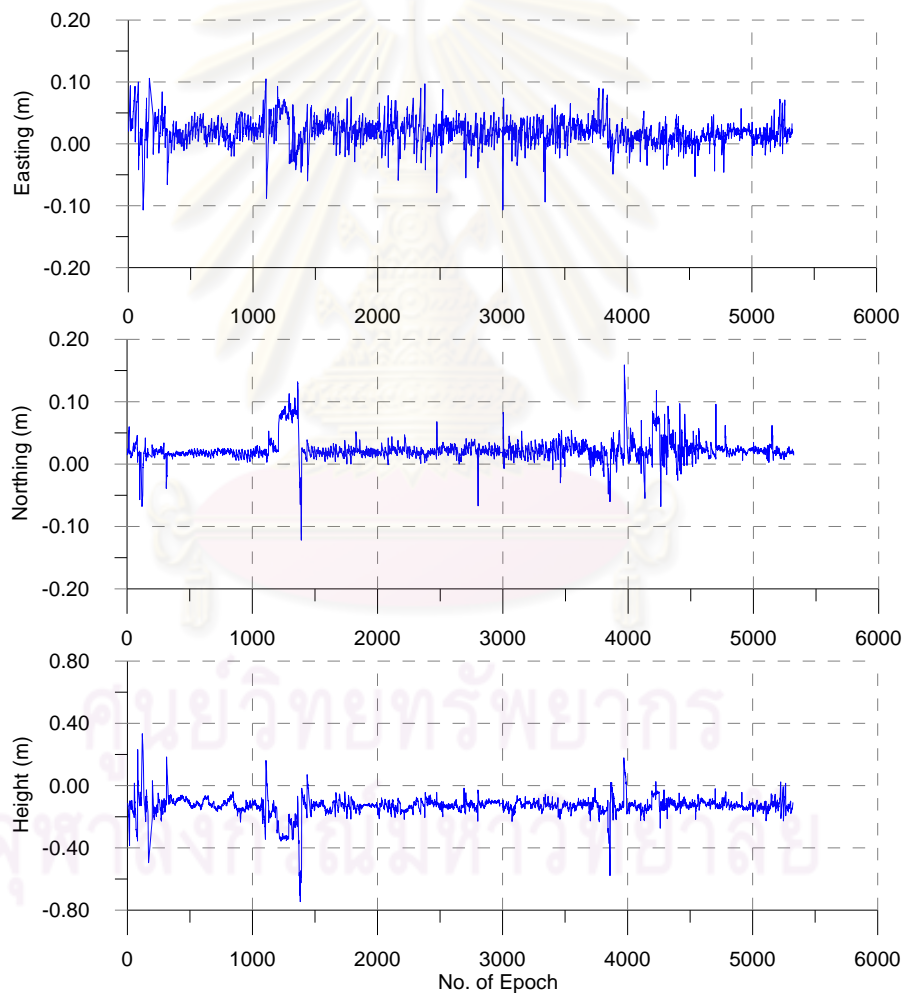
อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งค่าพิคัดที่คำนวณได้จากการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS เปรียบเทียบกับการตั้งสถานีฐานในพื้นที่ของทั้งสองพื้นที่ จะเห็นว่ามีค่ากระโดดในช่วงของ Trajectory ช่วงต้นดังรูปที่ 4.12, รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ซึ่งแนวคิดการตัดสินใจเกี่ยวกับการใช้งานค่าพิคัดที่คำนวณมาได้นั้น จะต้องขจัดค่าผิดปกติหรือ Outliers ของข้อมูลที่มีค่าแยกออกจากกลุ่มหรือผิดแผกแตกต่างไปจากข้อมูลอื่นๆ ในทางสถิติเมื่อพิจารณาถึงการแจกแจงเป็นเส้นโค้งปกติ (Normal curve) แล้วถือว่าการกระจายตัวของข้อมูลจะมีค่าอยู่ประมาณไม่เกิน  $3\sigma$  เนื่องจากในการประมาณค่าการแจกแจงเส้นโค้งปกติจะมีข้อมูลประมาณ 99% ที่ตกอยู่ใน 3 ช่วงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ถ้าหากข้อมูลใดมีค่าเกินกว่านี้แสดงว่าเป็นค่าผิดปกติ

ดังนั้น เพื่อขจัดค่า Outliers ที่เกิดขึ้นในช่วงของ Trajectory จะตัดข้อมูลตำแหน่งค่าพิคัดที่มีค่า RMSE ทั้งทางราบและทางตั้งมากกว่า  $3\sigma$  (ในที่นี้คือ  $3*RMSE$ ) ทิ้งแล้วนำค่าที่เหลือมาคำนวณใหม่ พบว่า ในพื้นที่ชานเมืองสำหรับการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานี มีตำแหน่งที่เป็น Outliers ทั้งหมด 65 จุด และใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานี มีตำแหน่งที่เป็น Outliers ทั้งหมด 75 จุด เมื่อนำค่าที่เหลือมาคำนวณค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานี มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งสูงสุดประมาณ 0.16 เมตรและ 0.75 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางตั้งประมาณ 0.04 เมตรและ 0.15 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.7 การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานี มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งสูงสุดประมาณ 0.12 เมตร

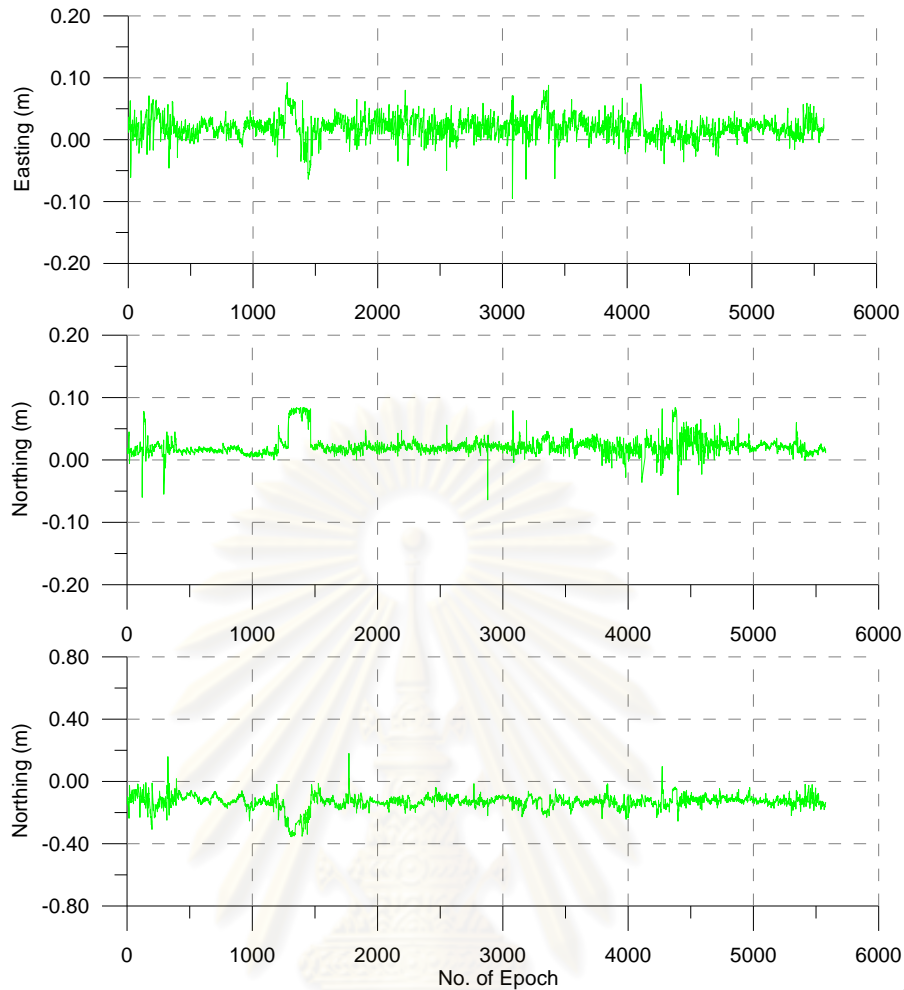
และ 0.35 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางตั้งประมาณ 0.04 เมตรและ 0.14 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า  $3\sigma$

สถานีฐาน	MAX (+/-) (เมตร)		MEAN (เมตร)		RMSE (เมตร)	
	dHor	dVer	dHor	dVer	dHor	dVer
DOL VRS (V1)	0.16	0.75	0.04	0.13	0.04	0.15
DOL VRS (V2 และ V3)	0.12	0.35	0.03	0.13	0.04	0.14



รูปที่ 4.17 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานีกับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ชานเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า  $3\sigma$

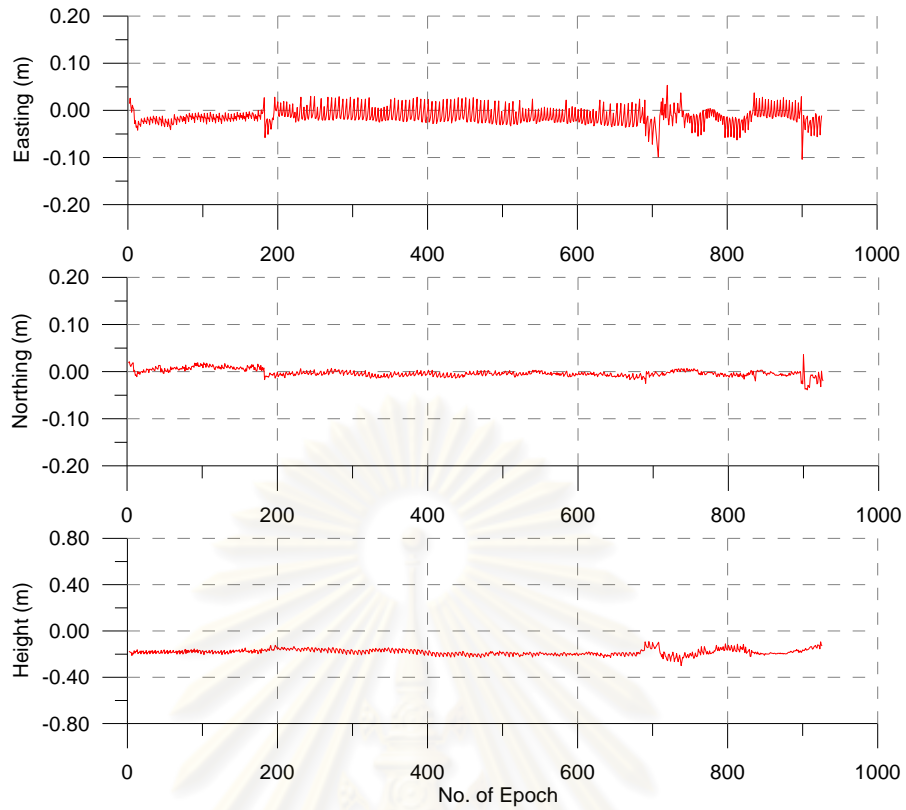


รูปที่ 4.18 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานีกับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ชานเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า  $3\sigma$

สำหรับพื้นที่กลางโครงข่าย VRS พบว่า การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS มีตำแหน่งที่เป็น Outliers ทั้งหมด 7 จุด เมื่อนำค่าที่เหลือมาคำนวณค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งสูงสุดประมาณ 0.11 เมตรและ 0.30 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.02 เมตรและ 0.18 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ในเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า  $3\sigma$

MAX (+/-) (เมตร)		MEAN (เมตร)		RMSE (เมตร)	
dHor	dVer	dHor	dVer	dHor	dVer
0.11	0.30	0.02	0.18	0.02	0.18



รูปที่ 4.19 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณด้วยสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS กับตั้งสถานีฐานในพื้นที่ในเมืองที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า  $3\sigma$

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัสกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

การเปรียบเทียบซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัสกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่สามารถประมวลผลสัญญาณดาวเทียมนำหน้ได้เลือกใช้ 2 ซอฟต์แวร์ ได้แก่ Leica Geo Office ของบริษัท Leica Geosystems และ GrafNav ของบริษัท NovAtel เนื่องจาก Leica Geo Office ถือว่าได้พัฒนามาเป็นเวลานานและเป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน เวอร์ชันล่าสุดในขณะดำเนินงานวิจัย คือ Leica Geo Office V.7.0 สามารถประมวลผลสัญญาณดาวเทียม GPS+GLONASS ได้ ดังนั้นเพื่อให้เห็นถึงศักยภาพของซอฟต์แวร์ RTKLIB ที่สามารถใช้งานได้ฟรี ได้แยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การเปรียบเทียบค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จาก Leica Geo Office กับ GrafNav และค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จาก GrafNav กับ RTKLIB

#### 4.3.1 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Leica Geo Office

ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Trimble R8 ที่ติดตั้งบนยานพาหนะมาประมวลผลแบบสัมพัทธ์กับสถานีฐานที่ได้จากเครื่องรับ ProPak V3 ของพื้นที่ชานเมือง โดยแปลงรูปแบบข้อมูลให้เป็น Rinex file แต่เนื่องจากซอฟต์แวร์ Leica Geo office เมื่อนำเข้า Rinex file ของเครื่องรับที่ติดตั้งบนยานพาหนะจะตั้งค่าเป็นแบบ Static ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนจาก Static mode เป็นแบบ Kinematic mode ใน Observation rinex file โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ของ Epoch flag=0 เป็น Epoch flag=2 ใน epoch แรก เพื่อให้คำนวณตำแหน่งแต่ละ epoch ดังรูปที่ 4.20

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
GPB2RIN 8.30.0318 26-AUG-10 20:18 PGM / RUN BY / DATE
MARKER NAME
OBSERVER / AGENCY
RINEX Unknown REC # / TYPE / VERS
ANT # / TYPE
APPROX POSITION XYZ
ANTENNA: DELTA H/E/N
WAVELENGTH FACT L1/2
# / TYPES OF OBSERV
INTERVAL
TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER

-1132662.0000 6087740.2187 1523549.7661
0.0000 0.0000 0.0000
1 1
5 C1 L1 L2 P2 D1
1.000
2010 7 17 4 41
10 7 17 4 41 19.0000000 2 8G 3G 6G16G20G32R 4R 5R18
22310945.773 117244811.835 91359621.571 22310951.531 0.000
21609534.758 113558902.117 88487453.176 21609539.059 0.000
20171086.500 105999768.231 82597240.056 20171090.875 0.000
22297043.992 117171724.231 91302696.447 22297049.543 0.000
21326317.836 112070551.359 87327728.739 21326324.133 0.000
22229581.086 119038287.793 92585416.389 22229585.867 0.000
19618454.328 104871884.425 81567046.032 19618462.438 0.000
21495984.313 114747054.111 -0.000 0.000 0.000
10 7 17 4 41 20.0000000 0 8G 3G 6G16G20G32R 4R 5R18
22310024.859 117239973.865 91355851.760 22310030.695 4839.436
21608771.188 113554890.080 88484326.923 21608775.992 4012.587
20170921.555 105998900.871 82596564.189 20170925.648 866.792
22296513.633 117168939.923 91300526.858 22296520.063 2787.055
21325930.406 112068516.641 87326143.246 21325936.898 2035.958
22230029.188 119040685.358 92587281.164 22230033.434 -2399.566
19618396.219 104871573.299 81566804.047 19618404.668 310.626
21495197.617 114742853.034 -0.000 0.000 4199.437
10 7 17 4 41 21.0000000 0 8G 3G 6G16G20G32R 4R 5R18
22309104.305 117235135.899 91352081.935 22309109.984 4837.544
21608007.727 113550878.129 88481200.705 21608012.445 4012.015
20170756.492 105998033.936 82595888.652 20170761.102 867.412

```

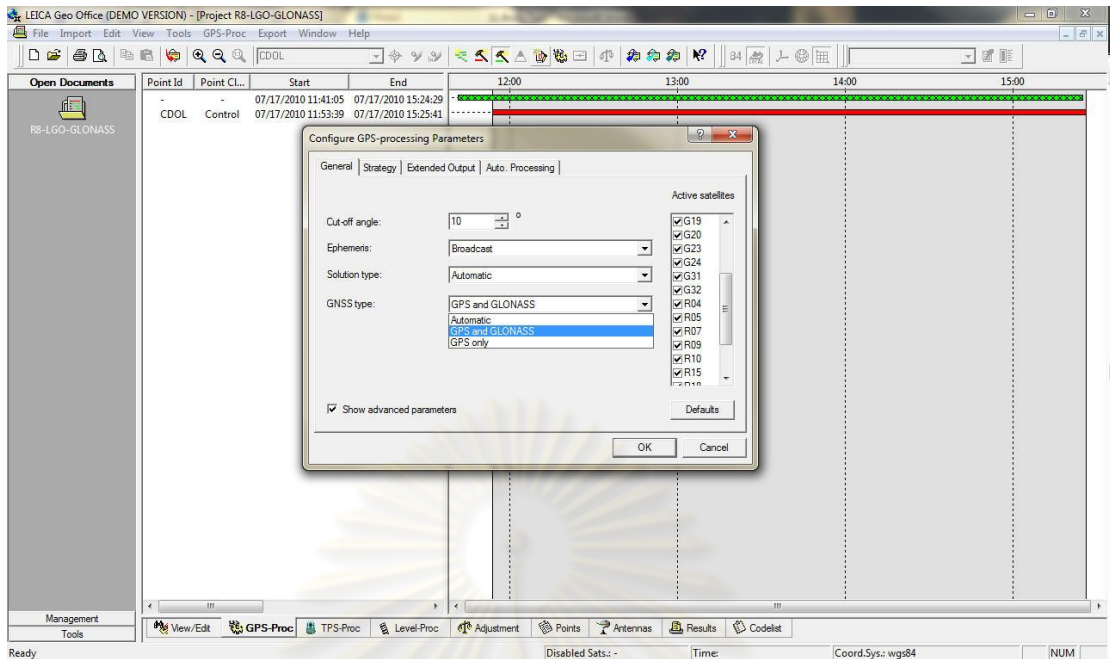
เปลี่ยน 0 เป็น 2

รูปที่ 4.20 เปลี่ยนโหมดการทำงานจาก Static เป็น Kinematic ใน Observation rinex file

จากนั้นนำเข้าข้อมูลเพื่อประมวลผลในโปรแกรม LGO แสดงดังรูปที่ 4.21 และผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 4.22 โดยตั้งค่าให้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- Rover: Trimble R8, Reference: ProPak v3 (ค่าพิกัดอ้างอิง Lat: 13° 54' 43.02384", Long: 100° 32' 22.36937", Height: -27.622)
- Cut-off angle: 10°
- GNSS type: GPS and GLONASS
- Tropospheric model: Saastamoinen
- Ionospheric model: Klobuchar
- Ephemeris: Broadcast





รูปที่ 4.21 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ประมวลผล GPS/GLONASS ของซอฟต์แวร์ Leica Geo Office

The screenshot shows the 'Results' table in the Leica Geo Office software. The table contains the following data:

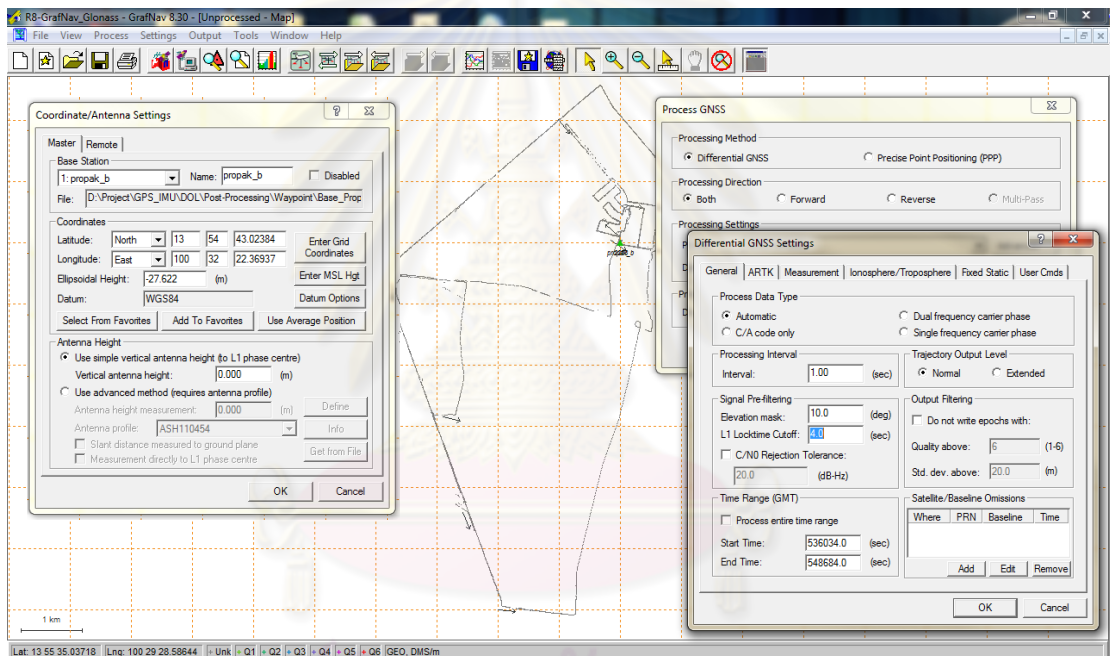
Point...	Epoch	Stored Stat...	Ambiguity St...	GNSS Type	Type	Solutio...	Frequ...	Easting	Northing	Ellip. Hgt.	Posn. Q...
071...	07/17/2010 12:08:29	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5560	1538532.2598	-27.6947	0.0148
071...	07/17/2010 12:08:30	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5523	1538532.2597	-27.6891	0.0152
071...	07/17/2010 12:08:31	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5547	1538532.2579	-27.6907	0.0154
071...	07/17/2010 12:08:32	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5512	1538532.2601	-27.6950	0.0151
071...	07/17/2010 12:08:33	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5540	1538532.2590	-27.6843	0.0151
071...	07/17/2010 12:08:34	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5535	1538532.2573	-27.6828	0.0165
071...	07/17/2010 12:08:35	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5548	1538532.2586	-27.6842	0.0154
071...	07/17/2010 12:08:36	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5542	1538532.2592	-27.6889	0.0152
071...	07/17/2010 12:08:37	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5572	1538532.2583	-27.6856	0.0146
071...	07/17/2010 12:08:38	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5562	1538532.2612	-27.6925	0.0150
071...	07/17/2010 12:08:39	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5559	1538532.2596	-27.6868	0.0151
071...	07/17/2010 12:08:40	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5560	1538532.2623	-27.6883	0.0150
071...	07/17/2010 12:08:41	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5559	1538532.2625	-27.6938	0.0142
071...	07/17/2010 12:08:42	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5581	1538532.2632	-27.7014	0.0150
071...	07/17/2010 12:08:43	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5539	1538532.2593	-27.6911	0.0159
071...	07/17/2010 12:08:44	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5569	1538532.2599	-27.6882	0.0154
071...	07/17/2010 12:08:45	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5559	1538532.2583	-27.6944	0.0154
071...	07/17/2010 12:08:46	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5530	1538532.2581	-27.6890	0.0150
071...	07/17/2010 12:08:47	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5540	1538532.2570	-27.6882	0.0151
071...	07/17/2010 12:08:48	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5565	1538532.2559	-27.6886	0.0153
071...	07/17/2010 12:08:49	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5577	1538532.2560	-27.6864	0.0159
071...	07/17/2010 12:08:50	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5546	1538532.2566	-27.6910	0.0154
071...	07/17/2010 12:08:51	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5567	1538532.2589	-27.6950	0.0146
071...	07/17/2010 12:08:52	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5567	1538532.2573	-27.6880	0.0148
071...	07/17/2010 12:08:53	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5541	1538532.2555	-27.6912	0.0157
071...	07/17/2010 12:08:54	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5544	1538532.2559	-27.6914	0.0158
071...	07/17/2010 12:08:55	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5533	1538532.2575	-27.6816	0.0152
071...	07/17/2010 12:08:56	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5568	1538532.2564	-27.6920	0.0156
071...	07/17/2010 12:08:57	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5545	1538532.2546	-27.6893	0.0152
071...	07/17/2010 12:08:58	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5547	1538532.2566	-27.6842	0.0154
071...	07/17/2010 12:08:59	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5559	1538532.2557	-27.6939	0.0153
071...	07/17/2010 12:09:00	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5581	1538532.2546	-27.6885	0.0155
071...	07/17/2010 12:09:01	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5551	1538532.2565	-27.6916	0.0153
071...	07/17/2010 12:09:02	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5575	1538532.2583	-27.6877	0.0145
071...	07/17/2010 12:09:03	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5545	1538532.2560	-27.6897	0.0156
071...	07/17/2010 12:09:04	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5546	1538532.2563	-27.6866	0.0158
071...	07/17/2010 12:09:05	Yes	yes	GPS/GLONASS	Moving	Phase...	L1 + L2	666343.5562	1538532.2568	-27.6836	0.0158

รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล GPS/GLONASS ด้วยซอฟต์แวร์ Leica Geo Office

### 4.3.2 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav

ใช้ข้อมูลชุดเดียวกับที่ใช้ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Leica Geo Office ดังรูปที่ 4.23 และผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 4.24 โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- Rover Data: Trimble R8, Base station: ProPak v3 (ค่าพิกัดอ้างอิง Lat: 13° 54' 43.02384", Long: 100° 32' 22.36937", Height: -27.622)
- Elevation mask: 10°
- GLONASS Usage: Enable GLONASS processing
- Processing Direction: Forward and Reverse
- Ephemeris: Broadcast



รูปที่ 4.23 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ประมวลผล GPS/GLONASS ของซอฟต์แวร์ GrafNav

Project: R8-GrafNav\_Glonass  
 Program: GrafNav Version 8.30.0623  
 Profile: UTM  
 Source: GPS Epochs(GPS Combined)  
 ProcessInfo: Run (6) by Unknown on 02/06/2011 at 15:50:43

Datum: WGS84, (processing datum)  
 Master 1: Name propak\_b, Status ENABLED  
 Antenna height 0.000 m, to L1-PC (Generic)  
 Position 13 54 43.02384, 100 32 22.36937, -27.622 m (WGS84, Ellipsoidal hgt)  
 Remote: Antenna height 0.000 m, to L1-PC (Generic)

Map projection Info:  
 UTM Zone: 47  
 SD/Covariance Scaling Settings:  
 Position: No scaling (1-sigma)  
 Velocity: No scaling (1-sigma)  
 Increase SD on kinematic float: No

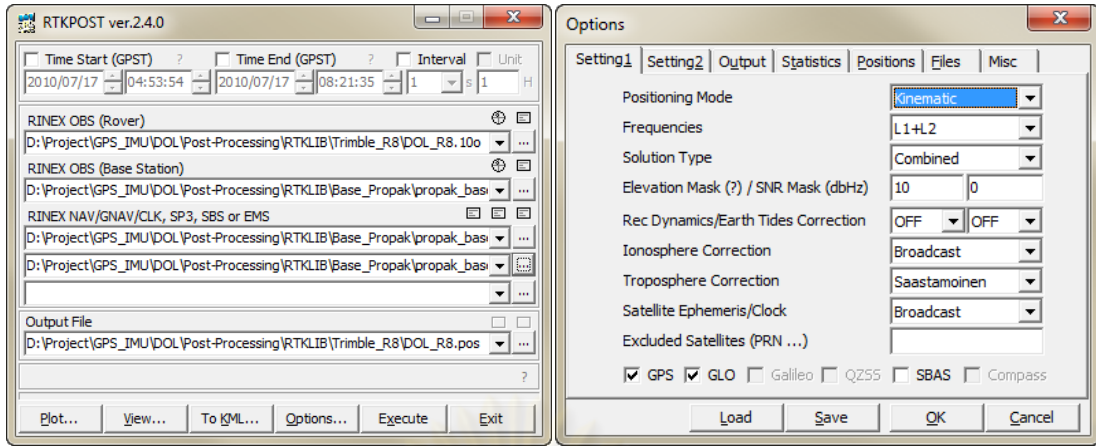
Stati	GPSTime	Date	Easting	Northing	H-Ell	SDHoriz	SDHeigh	Latitude	Longitude	VDOP	HDOP	PDOP	NS	GP	GL	Q	AmbStatus	SDHoriz
(HMS)	(MDY)	(m)	(m)	(m)	(m)	(+/-D M S)	(+/-D M S)	(dop)	(dop)	(dop)	(dop)	(dop)	(dop)	(m)				(m)
756-K	4:53:54.00	7/17/2010	866354.161	1538553.024	-27.487	0.033	0.073	13 54 43.90084	100 32 22.91982	1.97	1.37	2.39	7 6 1 2	Float			0.033	
757-K	4:53:55.00	7/17/2010	866354.159	1538553.023	-27.492	0.061	0.093	13 54 43.90079	100 32 22.91977	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.061	
758-K	4:53:56.00	7/17/2010	866354.162	1538553.027	-27.483	0.061	0.093	13 54 43.90094	100 32 22.91987	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.061	
759-K	4:53:57.00	7/17/2010	866354.165	1538553.023	-27.481	0.061	0.093	13 54 43.90081	100 32 22.91996	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.061	
760-K	4:53:58.00	7/17/2010	866354.166	1538553.027	-27.484	0.061	0.093	13 54 43.90092	100 32 22.92000	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.061	
761-K	4:53:59.00	7/17/2010	866354.166	1538553.026	-27.471	0.062	0.093	13 54 43.90091	100 32 22.92001	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.062	
762-K	4:54:00.00	7/17/2010	866354.165	1538553.026	-27.481	0.062	0.094	13 54 43.90091	100 32 22.91995	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.062	
763-K	4:54:01.00	7/17/2010	866354.164	1538553.024	-27.479	0.062	0.094	13 54 43.90095	100 32 22.91994	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.062	
764-K	4:54:02.00	7/17/2010	866354.168	1538553.029	-27.480	0.062	0.094	13 54 43.90100	100 32 22.92005	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.062	
765-K	4:54:03.00	7/17/2010	866354.163	1538553.027	-27.472	0.063	0.094	13 54 43.90095	100 32 22.91991	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.063	
766-K	4:54:04.00	7/17/2010	866354.168	1538553.028	-27.478	0.063	0.094	13 54 43.90096	100 32 22.92008	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.063	
767-K	4:54:05.00	7/17/2010	866354.169	1538553.031	-27.481	0.063	0.094	13 54 43.90105	100 32 22.92011	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.063	
768-K	4:54:06.00	7/17/2010	866354.168	1538553.028	-27.469	0.064	0.094	13 54 43.90098	100 32 22.92006	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.064	
769-K	4:54:07.00	7/17/2010	866354.170	1538553.029	-27.483	0.064	0.095	13 54 43.90100	100 32 22.92013	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.064	
770-K	4:54:08.00	7/17/2010	866354.168	1538553.031	-27.480	0.065	0.095	13 54 43.90106	100 32 22.92006	1.51	1.21	1.94	8 6 2 2	Float			0.065	

รูปที่ 4.24 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล GPS/GLONASS ด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav

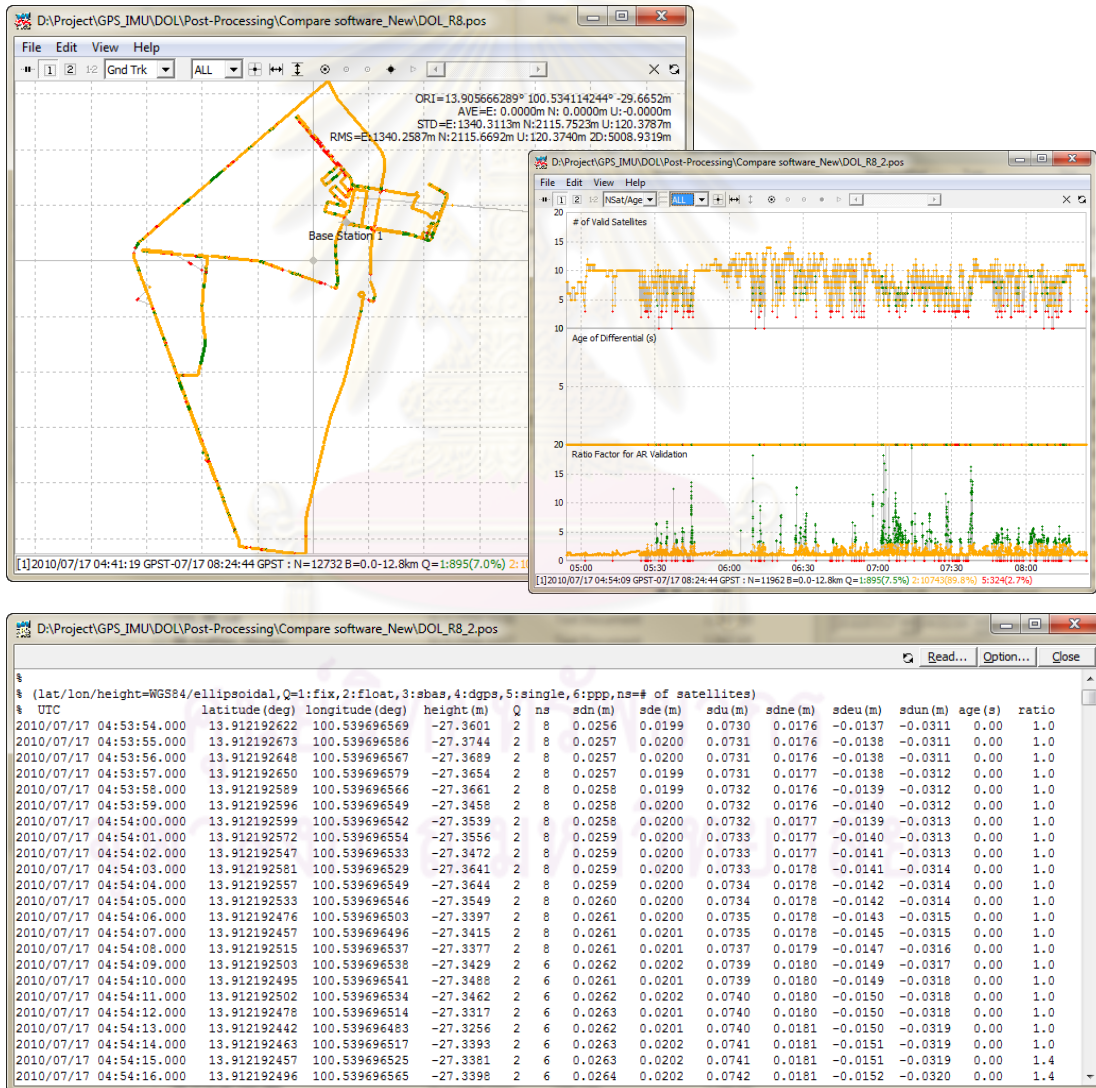
### 4.3.3 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB

การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB จะใช้โปรแกรมชื่อ RTKPOST ดาวน์โหลดได้ที่ <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm> ในขณะที่ดำเนินงานวิจัยเวอร์ชันล่าสุดคือ 2.4.0 ส่วนข้อมูลที่ใช้จะเป็นชุดเดียวกับข้างต้น การประมวลผลดังรูปที่ 4.25 และผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 4.26 โดยตั้งค่าการประมวลผล ดังนี้ (การใช้งานโปรแกรมดูได้จากภาคผนวก ก)

- Rover: Trimble R8, Base station: ProPak v3 (ค่าพิกัดอ้างอิง Lat: 13° 54' 43.02384", Long: 100° 32' 22.36937", Height: -27.622)
- Elevation mask: 10°
- Position mode: Kinematic
- Frequencies: L1+L2
- Solution type: Combined
- GLONASS Usage: Enable GLONASS processing
- Integer Ambiguity Resolution: Continous
- Ephemeris: Broadcast



รูปที่ 4.25 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ประมวลผล GPS/GLONASS ของซอฟต์แวร์ RTKPOST

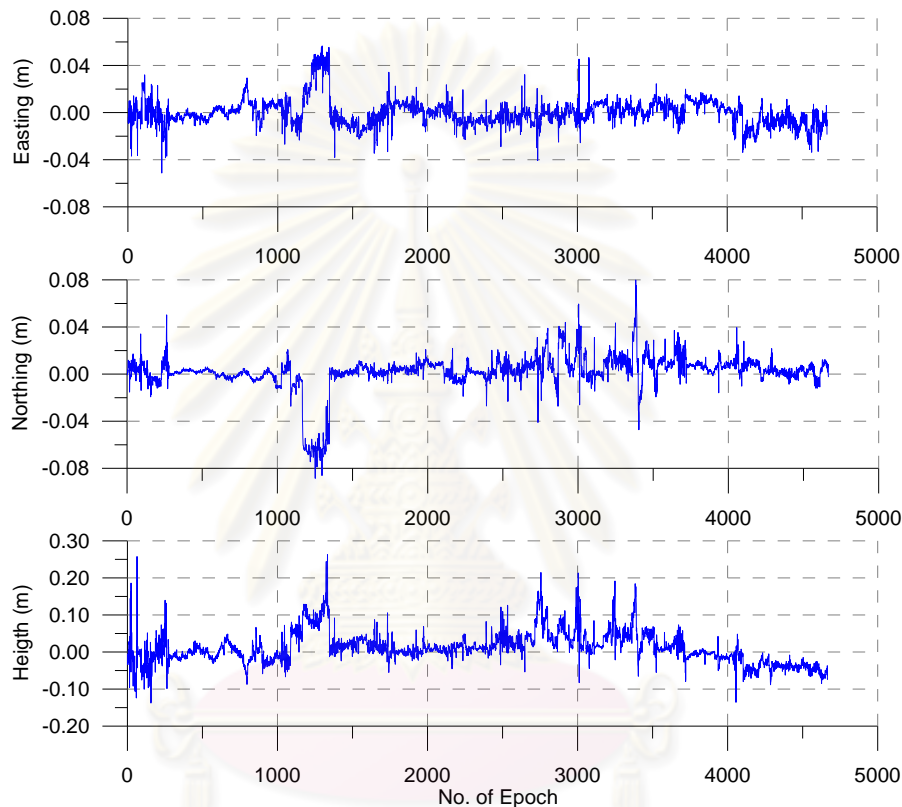


รูปที่ 4.26 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล GPS/GLONASS ด้วยซอฟต์แวร์ RTKPOST

#### 4.3.4 การเปรียบเทียบผลต่างค่าพิกัด

##### 4.3.4.1 ผลต่างค่าพิกัดของซอฟต์แวร์ Leica Geo Office กับ GrafNav

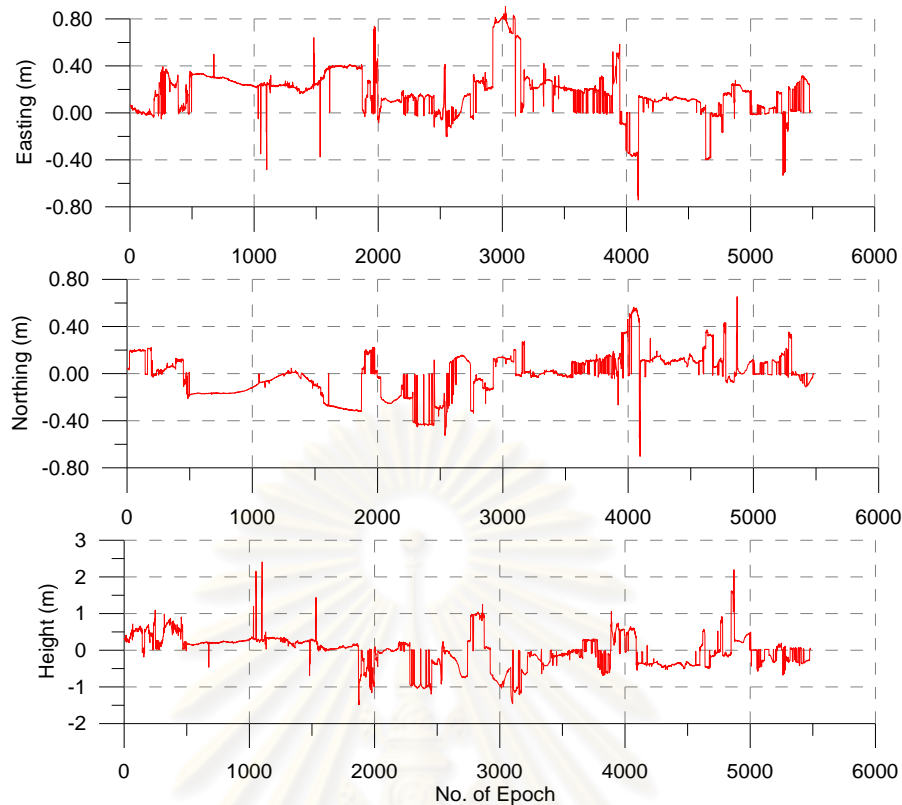
ค่าพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ Leica Geo Office ให้ Fixed solution ทั้งหมด 5,291 จุด ส่วนซอฟต์แวร์ GrafNav ให้ Fixed solution ทั้งหมด 6,411 จุด ซึ่งในจำนวนดังกล่าวมีจุดที่ให้ Fixed solution ตรงกันจำนวน 4,666 จุด เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาลบกันจะได้ผลต่างทางราบและทางตั้ง ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ Leica Geo Office กับ GrafNav

##### 4.3.4.2 ผลต่างค่าพิกัดของซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB

ค่าพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ GrafNav ให้ Fixed solution ทั้งหมด 6,411 จุด ส่วนซอฟต์แวร์ RTKLIB ให้ Fixed solution ทั้งหมด 895 จุด ซึ่งในการเปรียบเทียบจะยึดค่าพิกัดที่ได้จากซอฟต์แวร์ GrafNav ที่ให้ Fixed solution ทั้งหมดเป็นหลัก แล้วนำผลลัพธ์การคำนวณตำแหน่งที่ได้จากซอฟต์แวร์ RTKLIB ที่มีทั้ง Float solution และ Fixed solution มาหาผลต่างทางตำแหน่งในเวลาทีตรงกัน เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาลบกันจะได้ผลต่างทางราบและทางตั้ง ดังรูปที่ 4.28



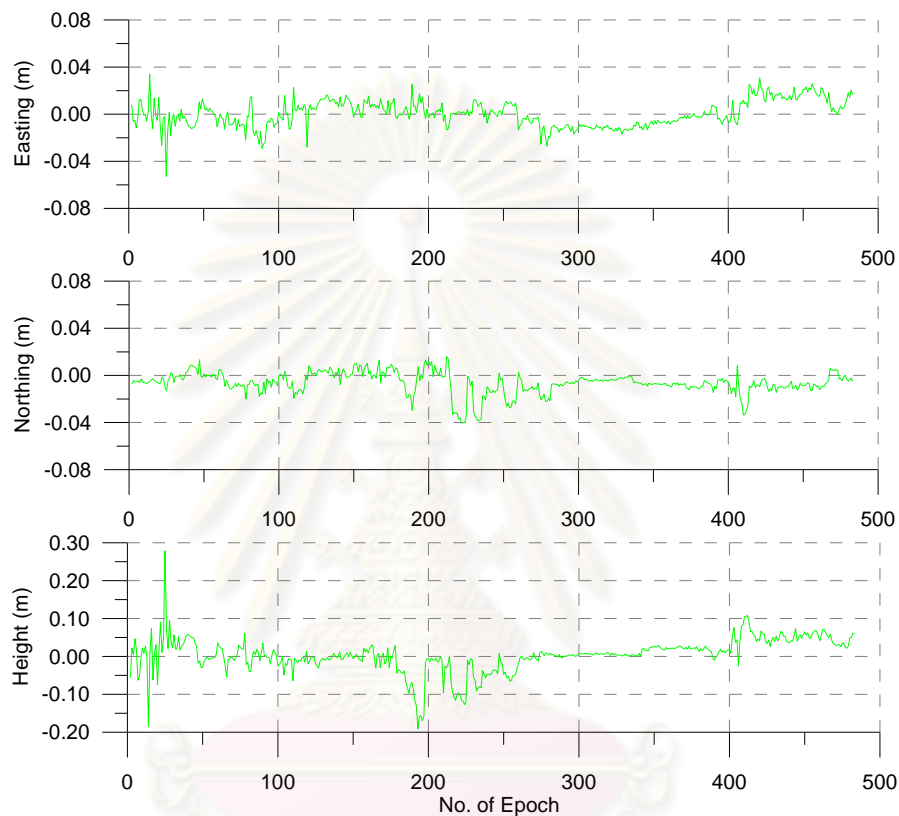
รูปที่ 4.28 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB

เมื่อพิจารณาถึงค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้ โดยแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่ได้ในทางราบ และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง แทนด้วย dHor และ dVer ตามลำดับ พบว่า ระหว่างซอฟต์แวร์ LGO และ GrafNav มีค่าต่างพิกัดเกาะกลุ่มกันโดยมีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งสูงสุดประมาณ 0.10 เมตรและ 0.26 เมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยทางราบและทางตั้งประมาณ 0.01 เมตรและ 0.03 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางตั้งประมาณ 0.02 เมตรและ 0.04 เมตร ตามลำดับ ส่วนระหว่างซอฟต์แวร์ GrafNav และ RTKLIB มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งสูงสุดประมาณ 1.02 เมตรและ 2.41 เมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยทางราบและทางตั้งประมาณ 0.27 เมตรและ 0.34 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางตั้งประมาณ 0.32 เมตรและ 0.45 เมตร ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB

Software	MAX (+/-) (เมตร)		MEAN (เมตร)		RMSE (เมตร)	
	dHor	dVer	dHor	dVer	dHor	dVer
LGO-GrafNav	0.10	0.26	0.01	0.03	0.02	0.04
GrafNav-RTKLIB	1.02	2.41	0.27	0.34	0.32	0.45

และหากพิจารณาเฉพาะ Fixed solution ที่ได้จากซอฟต์แวร์ RTKLIB เทียบกับ GrafNav พบว่า มีค่าต่างพิกัดเกาะกลุ่มกันโดยมีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งสูงสุดประมาณ 0.05 เมตรและ 0.28 เมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.01 เมตรและ 0.03 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.02 เมตรและ 0.04 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.29 และดังตารางที่ 4.10



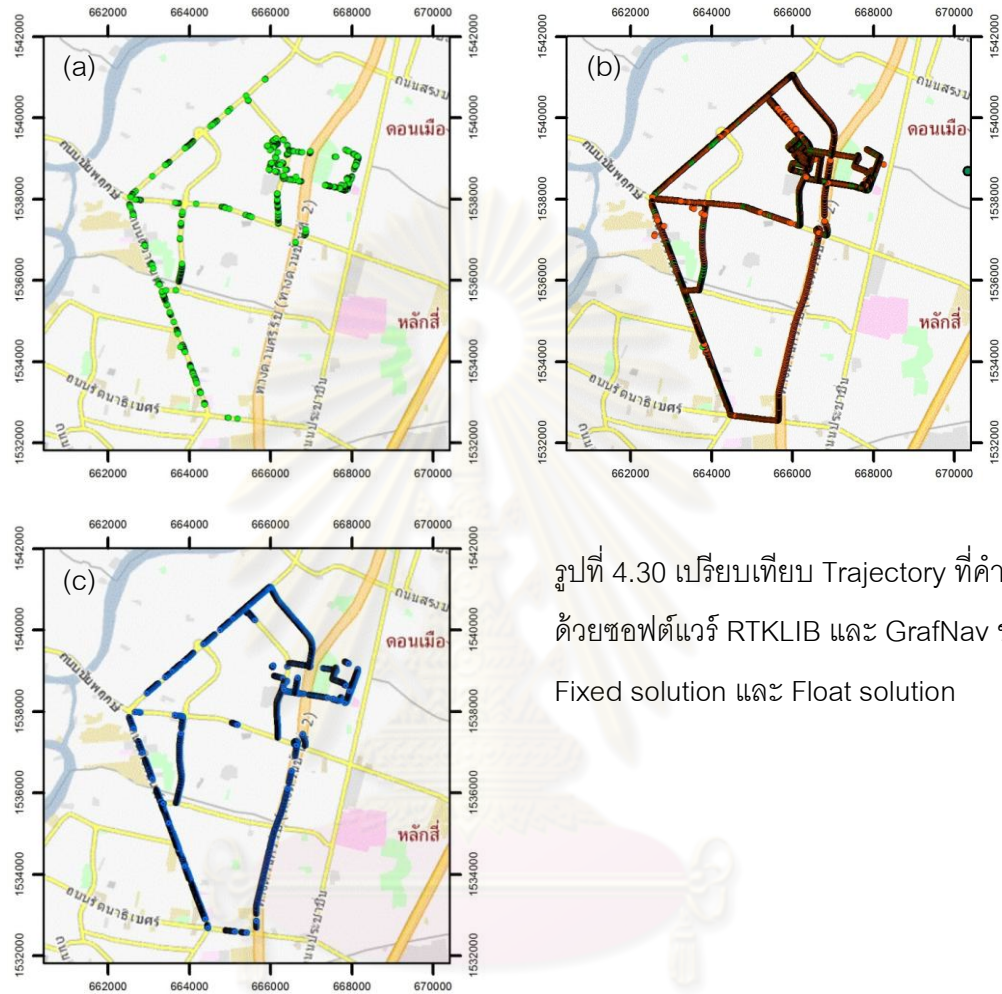
รูปที่ 4.29 ค่าต่างพิกัดที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB ของ Fixed solution

ตารางที่ 4.10 ค่าทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB ของ Fixed solution

MAX (+/-) (เมตร)		MEAN (เมตร)		RMSE (เมตร)	
dHor	dVer	dHor	dVer	dHor	dVer
0.05	0.28	0.01	0.03	0.02	0.04

จากรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าต่างพิกัดระหว่างซอฟต์แวร์ GrafNav กับ RTKLIB มีลักษณะเกาะกลุ่มอยู่ในระดับเดียวกับค่าต่างระหว่างซอฟต์แวร์ LGO กับ GrafNav แต่อย่างไรก็ตามค่าพิกัดที่คำนวณได้จาก RTKLIB ให้ Fixed solution น้อยกว่ามากเพียง 895 จุด เท่านั้น ในขณะที่ GrafNav ให้ Fixed solution ถึง 6,411 จุด ดังรูปที่ 4.30 เป็นการเปรียบเทียบ

Trajectory ที่คำนวณด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB เฉพาะ Fixed solution ดังรูปที่ 4.30(a) ซอฟต์แวร์ RTKLIB ทั้ง Fixed solution และ Float solution ดังรูปที่ 4.30(b) และซอฟต์แวร์ GrafNav เฉพาะ Fixed solution ดังรูปที่ 4.30(c)



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบ Trajectory ที่คำนวณด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB และ GrafNav ของ Fixed solution และ Float solution

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

จากการทำวิจัยในหัวข้อ การศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน สามารถสรุปงานวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 ผลการศึกษา

จากงานวิจัยเพื่อศึกษาถึงการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน ใช้พื้นที่ศึกษา 2 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ชานเมือง (กรมที่ดินสาขาปากเกร็ด) ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่เปิดโล่งที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ดีและอยู่ใกล้หอดูดาวสถานีฐานของโครงข่าย VRS ที่ตั้งอยู่ที่อาคารรังวัดและท่าแผนที่ กรมที่ดิน จังหวัดนนทบุรี และพื้นที่ในเมือง (สาทร สีลม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) เป็นตัวแทนของพื้นที่ที่บดบังสัญญาณดาวเทียมสูงและอยู่กึ่งกลางโครงข่าย VRS จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลในภายหลัง (Post-processing) เพื่อประเมินถึงการมีค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability) โดยมีการเลือกใช้ข้อมูล GNSS ความถี่เดียวและสองความถี่มาประมวลผลพิจารณาแยกออกเป็น 4 กรณีคือ การสัญญาณดาวเทียมระบบ GPS 1 ความถี่, GPS 2 ความถี่, GPS/GLONASS 1 ความถี่ และ GPS/GLONASS 2 ความถี่ รวมทั้งการใช้ระบบบูรณาการ GPS/INS จากนั้นได้ประเมินและเปรียบเทียบระหว่างการตั้งสถานีฐานในพื้นที่กับการใช้สถานีฐานของกรมที่ดินเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานเสมือน VRS ในตำแหน่งและเวลาที่กำหนดสุดท้ายได้ประเมินถึงศักยภาพของซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB เปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่เป็นที่ยอมรับและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ Leica Geo Office และ GrafNav ในการประมวลผลสัญญาณดาวเทียมนำหนเพื่อหาวิถีของยานพาหนะ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.1.1 การมีค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability) จากระบบ GPS, GPS/GLONASS และ GPS/INS

จากตารางที่ 4.1, ตารางที่ 4.2, ตารางที่ 4.3, รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 พบว่าการนำระบบดาวเทียม GLONASS มาประมวลผลร่วมกับระบบ GPS สามารถช่วยเพิ่ม Availability ให้พื้นที่ที่มีการบดบังสัญญาณดาวเทียมได้ตำแหน่งต่อเนื่องมากขึ้น โดยพื้นที่ชานเมืองมีค่าพิกัดใช้งานได้เพิ่มขึ้นประมาณ 13% เมื่อเทียบกับระบบ GPS ส่วนพื้นที่ในเมืองเพิ่มขึ้นประมาณ 45% เมื่อเทียบกับระบบ GPS และการคำนวณตำแหน่งที่ได้จากระบบบูรณาการ GPS/INS ได้ค่าพิกัดตำแหน่งต่อเนื่อง (Smoothing) ครบถ้วน 100% ตลอดเส้นทางที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากต้องการตำแหน่งของ Trajectory ที่ต่อเนื่องสมบูรณ์นั้นอุปกรณ์ IMU มีความจำเป็นอย่างยิ่ง

### 5.1.2 การเปรียบเทียบสถานีฐานเสมือน VRS กับการตั้งสถานีฐานในพื้นที่

จากรูปที่ 4.15, รูปที่ 4.18, รูปที่ 4.19, ตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 พบว่า พื้นที่ชานเมืองซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานถาวรของโครงข่าย VRS นั้น กรณีใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 1 สถานี มีค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.07 เมตรและ 0.78 เมตร ตามลำดับ และเกิดค่ากระโดดขนาดใหญ่ระดับเมตรในบางช่วงของ Trajectory เมื่อเพิ่มจำนวนสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS เป็น 2 สถานี ทำให้ค่ากระโดดดังกล่าวหายไป ได้จำนวนของ Fixed solution เพิ่มขึ้นและค่า RMSE ลดลง โดยมีค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.04 เมตรและ 0.14 เมตร ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ในเมืองซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่กลางโครงข่าย VRS พบว่า การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS มีค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.06 เมตรและ 0.19 เมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS ทั้งสองพื้นที่ที่มีค่า RMSE ในทางราบอยู่ในระดับ 6 เซนติเมตร ทางดิ่ง 20 เซนติเมตร และการใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS 2 สถานีจะช่วยให้ค่าต่างทางตำแหน่งลดลงเมื่อเทียบกับสถานีฐานในพื้นที่

และจะเห็นว่ามีความกระโดดในบางช่วงของ Trajectory ซึ่งแนวคิดการตัดสินใจเกี่ยวกับการใช้งานค่าพิกัดที่คำนวณมาได้นั้น จะต้องขจัดค่าผิดปกติหรือ Outliers ที่เกิดขึ้นในบางช่วงของ Trajectory ที่มีค่า RMSE ทั้งทางราบและทางดิ่งมากกว่า  $3\sigma$  ออกไปจากข้อมูล พบว่า การใช้สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS มีค่า RMSE ทั้งทางราบและทางดิ่งที่ดีขึ้นอยู่ในระดับ 0.04 เมตรและ 0.18 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17, รูปที่ 4.18, รูปที่ 4.19, ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

### 5.1.3 การประเมินศักยภาพซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB กับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

จากรูปที่ 4.27, รูปที่ 4.28, รูปที่ 4.29, ตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 แสดงถึงการประเมินศักยภาพของซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB กับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Leica Geo Office (LGO) และ GrafNav พบว่า ระหว่างซอฟต์แวร์ LGO และ GrafNav มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งสูงสุดประมาณ 0.10 เมตรและ 0.26 เมตร ตามลำดับ ค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งประมาณ 0.02 เมตรและ 0.04 เมตร ตามลำดับ ส่วนระหว่างซอฟต์แวร์ GrafNav และ RTKLIB พิจารณาเฉพาะ Fixed solution มีผลต่างค่าพิกัดอยู่ในระดับเดียวกันคือ ทางราบอยู่ในระดับ 0.02 เมตร ทางดิ่ง 0.04 เมตร แต่จะให้จำนวนตำแหน่งน้อยมากเพียง 895 จุดเท่านั้นในขณะที่ GrafNav ให้ Fixed solution ถึง 6,411 จุด และเมื่อพิจารณาทั้ง Fixed solution และ Float solution ที่ได้จาก RTKLIB พบว่า ค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งอยู่ในระดับประมาณ 0.32 เมตรและ 0.45 เมตร ตามลำดับ

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

- ในช่วงแรกของการติดตั้งเครื่องมือมีปัญหาเกี่ยวกับกระแสกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะมาใช้กับชุดอุปกรณ์ GPS/IMU SPAN-CPT ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเก็บข้อมูล เนื่องจากใช้ Inverter 500W ต่อเข้ากับแบตเตอรี่รถยนต์ และยังเกิดปัญหาไฟกระชากขณะรถยนต์ออกตัวทำให้ต้องต้องเริ่มงานใหม่ ซึ่งปัญหาดังกล่าวแก้ไขโดยใช้ UPS ต่อกับ Car inverter แล้วมาจ่ายกระแสไฟให้กับ SPAN-CPT และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ทำให้สามารถวิ่งรถเก็บข้อมูลได้ต่อเนื่อง

- กระแสไฟฟ้าหลักที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ จะต่อมาจากแบตเตอรี่รถยนต์ มาเข้า Car inverter --> UPS --> ปลั๊กสามตา --> อุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดปัญหาที่เด้าเสียบจุดต่อของสายไฟ ซึ่งในบางเส้นทางจะมีหลุม บ่อ ลูกกระพรวน จะทำให้สายไฟบางจุดที่ต่อหลุด

- การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ บนยานพาหนะคันใหม่ต้องมีการวัดระยะ Offset ใหม่ทุกครั้ง ทำให้ต้องเสียเวลาในการทำงาน

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (Accuracy) ของ Trajectory ที่ได้จากระบบ GNSS และระบบบูรณาการ GPS/IMU เนื่องจากไม่มี True Trajectory ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาการหา True Trajectory เพื่อจะได้ทราบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้

- สถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS ควรสร้างในตำแหน่งที่ใกล้กับเส้นทางมากที่สุด และจะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS จาก 1 สถานีเป็น 2 สถานีให้ผลค่าพิกัดที่ดีขึ้น แต่ยังไม่ได้ศึกษาว่าการเพิ่มจำนวนสถานีจาก 2 เป็น 3 หรือมากกว่า 3 สถานีจะให้ผลดีเพียงใด ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับจำนวนของสถานีฐานที่สร้างจากระบบ DOL VRS ที่ใช้และระยะทางเส้นฐานที่เหมาะสม

- ซอฟต์แวร์ฟรีเปิดรหัส RTKLIB ยังมีความสามารถในการประมวลผล Trajectory แบบ PPP Kinematic และการประมวลผลแบบอื่นๆ ทั้งหมด Static และการประมวลผลแบบ Real-Time ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เห็นถึงศักยภาพของซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้งานได้ฟรี

- การได้มาซึ่ง Trajectory โดยใช้ระบบดาวเทียมนำหนมีเทคนิคการประมวลผลหลายวิธี ทั้งแบบ Post-processing เช่น Precise Point Positioning (PPP) และการประมวลผลแบบ Real-Time เช่น การใช้สถานีฐานเสมือน VRS การใช้บริการ DGPS Service จาก OmniSTAR ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาการหา Trajectory ที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคที่หลากหลายเพิ่มเติม เพื่อจะได้นำมาเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการทำงานต่อไป

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมที่ดิน. 2553. ระบบโครงข่าย GNSS DOL VRS Reference Station. สำนักเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน. กระทรวงมหาดไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.i-dolnet.com> [2010, มีนาคม 22]
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. 2546. การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. 2552. เอกสารคำสอนงานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรทัต เจริญภาลัญญาตา และเฉลิมชนม์ สติระพจน์. 2552. การประเมินค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบแรกในประเทศไทย: ผลการศึกษาเบื้องต้น. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ประจำปี 2552. 16 – 18 ธันวาคม 2552 ณ อิมแพ็ค คอนเวนชันเซ็นเตอร์ เมืองทองธานี จังหวัดนนทบุรี.
- ไพศาล สันติธรรมนนท์. 2553. เอกสารคำสอนการรังวัดด้วยภาพในทางปฏิบัติ. ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Cai, C. 2009. Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurements. Master's Thesis. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- El-Sheimy, N. 2004. Emerging land-based mobile mapping systems. Journal of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). 68 (January) : 13-17.
- Godha, S. 2006. Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application. Master's Thesis. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- Grove, P.D. 2008. Principals of GNSS Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems. London : Artech House,

- Hao, W., Lei, T., and Jian, R. 2009. New Approach for GPS/INS Integrated Navigation. Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application. 21-22 November 2009, NanChang, China.
- IAC. 2011. National Geospatial-Intelligence Agency. U.S.A. [Online]. Available from: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru> [2011, February 2]
- ICD. 2002. GLONASS Interface Control Document Version 5. Coordinational Scientific Information Center Russian Space Force, Moscow. [Online]. Available from: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru> [2010, March 22]
- Jeffery, C. 2010. An introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and other Global Navigation Satellite System. First edition. NovAtel Inc. Canada.
- Kennedy, S., Cosandier, D., and Hamilton, J. 2007. GPS/INS Integration in Real-time and Post-processing with NovAtel's SPAN System. International Global Navigation Systems Society IGSS Symposium 2007. 4-6 December 2007, Sydney, Australia.
- Kim, J., Jee, G., and Lee, J.G. 1998. A complete GPS/INS integration technique using GPS carrier phase measurements. Position Location and Navigation Symposium, IEEE 1998. 20-23 April 1998, Rancho Mirage, California.
- Lawrence, A. 2007. Modern Inertial Technology Navigation, Guidance, and Control. Second edition. U.S.A. : Springer,
- Lee, H.K. 2004. Integration of GPS/Pseudolite/INS for High Precision Kinematic Positioning and Navigation. Doctoral Dissertation. School of Survey and Spatial Information Systems, The University of New South Wales, Australia.
- Leick, A. 2004. GPS Satellite Surveying. 3<sup>rd</sup> edition. New York : John Wiley & Sons,
- Martin, S., Travis, W., and Bevely, D. 2010. Performance Comparison of Single and Dual Frequency Closely Coupled GPS/INS Relative Positioning Systems. Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2010 IEEE/ION. 4-6 May 2010, Palm Springs, California.
- Mohamad, I., Ali, M., and Ismail, M. 2009. Availability, Reliability and Accuracy of GPS Signal in Bandar Baru Bangi for the Determination of Vehicle Position and Speed. International Conference on Space Science and Communication. 26-27 October 2009, Negeri Sembilan, Malaysia.

- NGA. 2011. Information Analytical Center. Russian space agency. [Online]. Available from: <https://www1.nga.mil> [2011, February 2]
- NovAtel. 2007. GLONASS Overview. NovAtel Inc. Canada. [Online]. Available from: <http://www.novatel.com/Documents/Papers/GLONASSOverview.pdf> [2010, March 30]
- NovAtel. 2011. SPAN-CPT System Performance Document. NovAtel Inc. Canada. [Online]. Available from: <http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Papers/SPAN-CPT.pdf> [2011, January 22]
- Petovello, M.G. 2003. Real-Time Integration of a Tactical-Grade IMU and GPS for High-Accuracy Position and Navigation. Doctoral Dissertation. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- Polischuk, G.M., et al. 2002. The Global Navigation Satellite System GLONASS: Development and usage in the 21<sup>st</sup> century. Precise Time and Time Interval 34<sup>th</sup> (PTTI). 3 – 5 December 2002, Hyatt Regency Hotel, Reston, Virginia.
- Savage, P.G. 2000. Strapdown Analytics: Part I. Strapdown Associates. Inc.
- Schultz, C.E. 2006. INS and GPS integration. Master's Thesis. Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.
- Takasu, T., and Yasuda, A. 2009. Development Evaluation and Application of RTKLIB: A program library for RTK-GPS. GPS/GNSS Symposium 2007. 20 – 22 November 2007, Tokyo, Japan.
- USNO. 2011. United States Naval Observatory. U.S.A. [Online]. Available from: <http://www.usno.navy.mil/USNO> [2011, February 2]
- Weston, J.L., and Titterton, D.H. 2000. Modern inertial navigation technology and its application. Electronics & Communication Engineering Journal. 12 (April 2000) : 49-64.

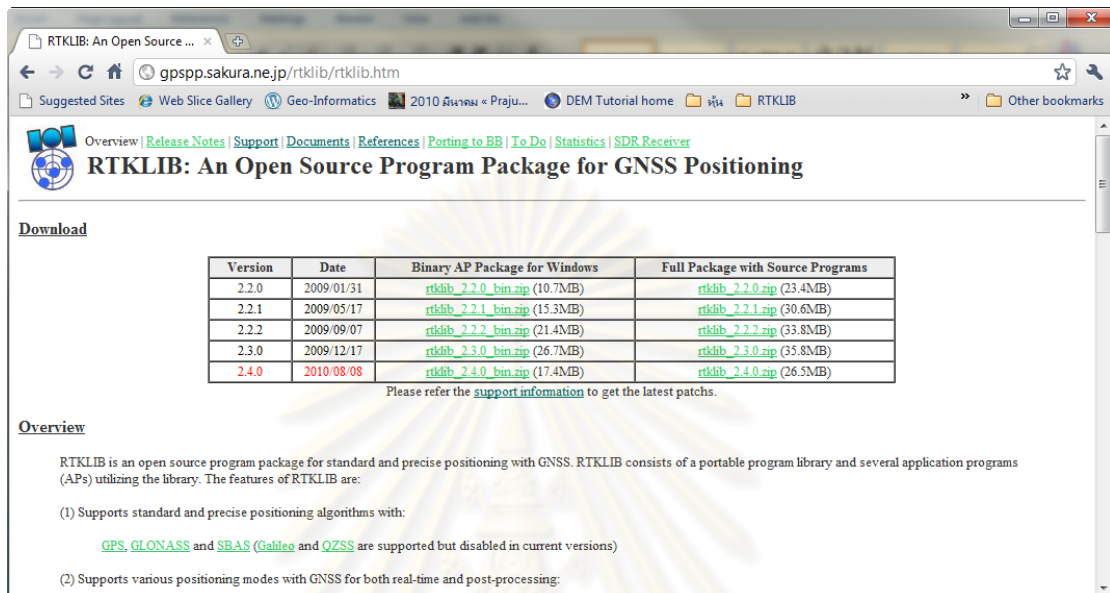


ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การใช้งานโปรแกรม RTKLIB (RTKPOST)

1. ดาวน์โหลดโปรแกรมได้ที่ <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm> จะมีให้เลือก 2 Package ได้แก่ Binary AP Package for Windows และ Full Package with Source Programs



The screenshot shows the RTKLIB website interface. At the top, there are navigation links: Overview, Release Notes, Support, Documents, References, Porting to BB, To Do, Statistics, and SDR Receiver. The main heading is "RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning". Below this is a "Download" section containing a table with the following data:

Version	Date	Binary AP Package for Windows	Full Package with Source Programs
2.2.0	2009/01/31	<a href="#">rtklib_2.2.0_bin.zip</a> (10.7MB)	<a href="#">rtklib_2.2.0.zip</a> (23.4MB)
2.2.1	2009/05/17	<a href="#">rtklib_2.2.1_bin.zip</a> (15.3MB)	<a href="#">rtklib_2.2.1.zip</a> (30.6MB)
2.2.2	2009/09/07	<a href="#">rtklib_2.2.2_bin.zip</a> (21.4MB)	<a href="#">rtklib_2.2.2.zip</a> (33.8MB)
2.3.0	2009/12/17	<a href="#">rtklib_2.3.0_bin.zip</a> (26.7MB)	<a href="#">rtklib_2.3.0.zip</a> (35.8MB)
2.4.0	2010/08/08	<a href="#">rtklib_2.4.0_bin.zip</a> (17.4MB)	<a href="#">rtklib_2.4.0.zip</a> (26.5MB)

Below the table, it says: "Please refer the [support information](#) to get the latest patches."

The "Overview" section states: "RTKLIB is an open source program package for standard and precise positioning with GNSS. RTKLIB consists of a portable program library and several application programs (APs) utilizing the library. The features of RTKLIB are:

- (1) Supports standard and precise positioning algorithms with:
  - GPS, GLONASS and SBAS (Galileo and QZSS are supported but disabled in current versions)
- (2) Supports various positioning modes with GNSS for both real-time and post-processing:

2. การใช้งานโปรแกรมให้แตกไฟล์บีบอัดข้อมูลที่ดาวน์โหลดมาซึ่งภายในไฟล์เดอริจะประกอบด้วยไฟล์ต่างๆ ดังนี้

```

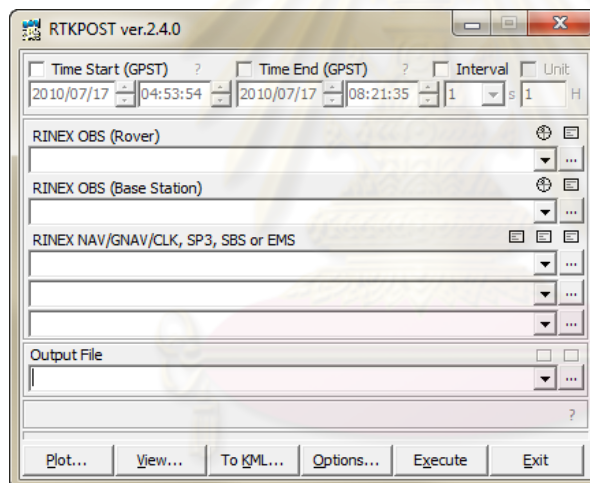
rtklib_<ver>
  \src           : Source programs of RTKLIB libraries *
  \rcv           : Source programs depending on GPS/GNSS receivers *
  \bin           : Executable binary APs and DLLs for Windows
  \data          : Sample data for APs
  \app           : Build environment for APs *
  \rtknavi       : RTKNAVI (GUI) * --> สำหรับ Real-time Positioning
  \strsvr        : STRSVR (GUI) *
  \rtkpost       : RTKPOST (GUI) * --> สำหรับ Post-processing
  \rtkpost_mkl   : RTKPOST_MKL (GUI) *
  \rtkplot       : RTKPLOT (GUI) * --> สำหรับ Plot graph
  \rtkconv       : RTKCONV (GUI) * --> สำหรับแปลงข้อมูลเป็น Rinex file
  \srctblbrows  : NTRIP source table browser (GUI) *
  \rtkrcv        : RTKRVC (console) *
  
```



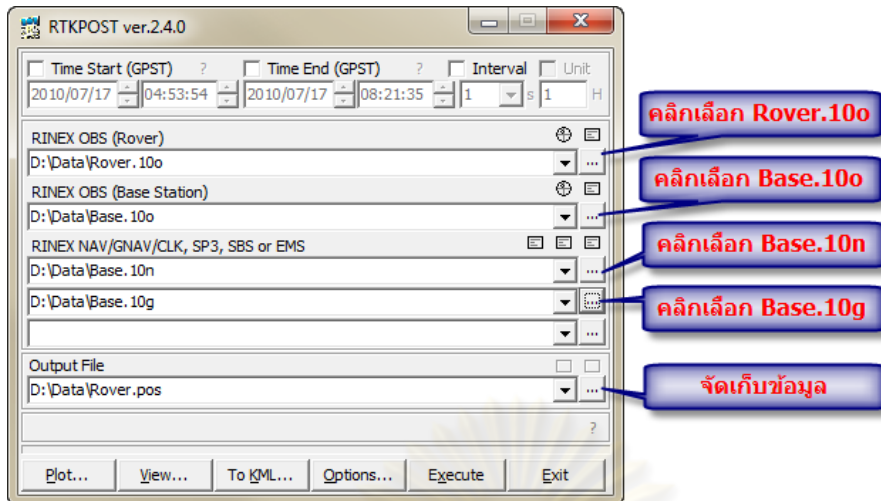
\rnx2rtkp	: RNX2RTKP (console) *
\pos2kml	: POS2KML (console) *
\convbin	: CONVBIN (console) *
\str2str	: STR2STR (console) *
\appcmn	: Common routines for GUI APs *
\icon	: Icon data for GUI APs *
\mkl	: Intel MKL libraries for Borland environment *
\test	: Test program and data *
\util	: Utilities *
\doc	: Document files

\* Not included in the package rtklib\_<ver>\_bin.zip

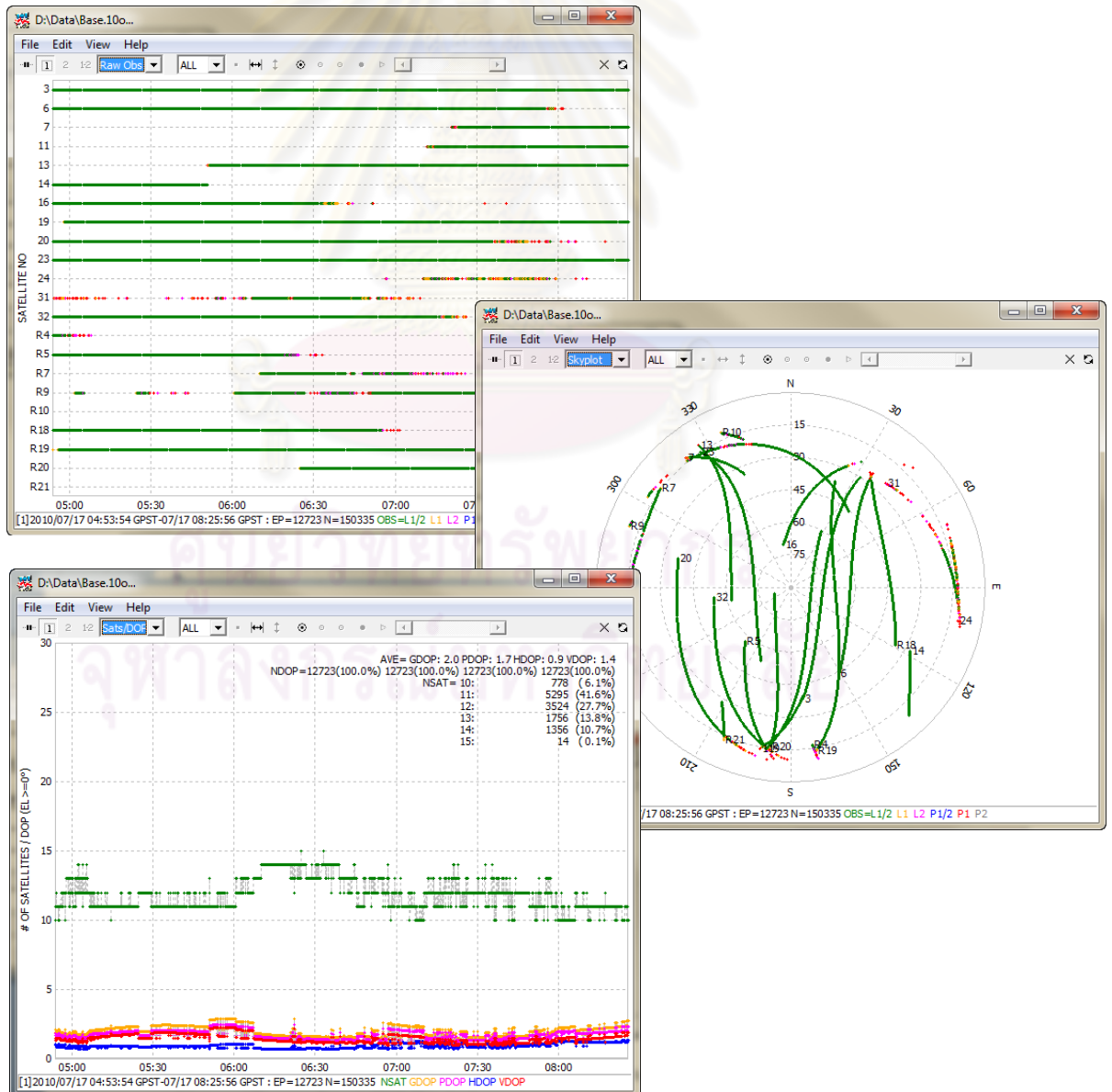
### 3. เปิดโปรแกรม RTKPOST ที่อยู่ในโฟลเดอร์ rtklib\_2.4.0\bin



- ### 4. การนำเข้าข้อมูลสำหรับประมวลผล ดังนี้
- RINEX OBS (Rover) คลิกปุ่ม [...] แล้วเลือกข้อมูล Observation ของ Rover (เช่น rover.10o)
  - RINEX OBS (Base Station) คลิกปุ่ม [...] แล้วเลือกข้อมูล Observation ของ Base Station (เช่น Base.10o)
  - RINEX NAV/GNAV/CLK, SP3, SBS or EMS เป็นช่องสำหรับใส่ข้อมูล Navigation file, Satellite orbit, Satellite clock (ในที่นี้จะใช้ Broadcast ของ Base Station ได้แก่ Base.10n และ Base.10g )



ข้อมูล Rinex file ของ Rover และ Base Station สามารถดูสถานะการรับสัญญาณจากดาวเทียมแต่ละดวง Skyplot จำนวนดาวเทียมที่รับได้และค่า DOP ต่างๆ โดยคลิกที่ปุ่ม



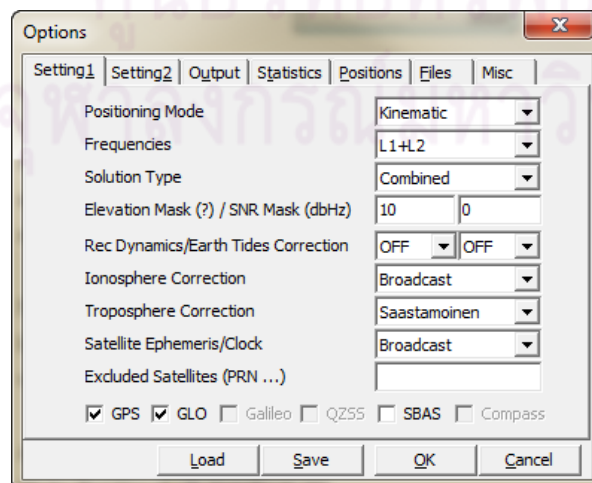
5. ตั้งค่าการประมวลผลโดยคลิกเลือกปุ่ม **Options...** จะปรากฏ Tab ได้แก่ Setting1, Setting2, Output, Statistics, Positions, Files, Misc

■ Tab: Setting1

- Positioning Mode: สำหรับเลือกโหมดในการประมวลผล ประกอบด้วย Single, DGPS/DGNSS, Kinematic, Static, Moving-Base, Fixed, PPP Kinematic, PPP Static
- Frequencies: สำหรับเลือกความถี่ ประกอบด้วย L1, L1+L2, L1+L2+L5
- Solution Type: เลือกรูปแบบการประมวลผล ประกอบด้วย Forward, Backward, Combined
- Elevation Mask: สำหรับตัดข้อมูลดาวเทียมดวงที่อยู่ต่ำกว่ามุมที่กำหนด
- Ionosphere Correction: เลือกโมเดลสำหรับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ประกอบด้วย OFF, Broadcast, SBAS, Dual-Frequency, Estimate STEC
- Tropospheric Correction: เลือกโมเดลสำหรับชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ ประกอบด้วย OFF, Saastamoinen, SBAS, Estimate ZTD
- Satellite Ephemeris/Clock: สำหรับเลือกประเภทวงโคจรดาวเทียม ประกอบด้วย Broadcast, Precise, Broadcast+SBAS
- ปุ่ม Check box ด้านล่างใช้เลือกระบบดาวเทียมที่ต้องการประมวลผล ได้แก่ GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, SBAS, Compass (ในเวอร์ชันนี้สามารถใช้งานได้เพียง 3 ระบบ คือ GPS, GLONASS และ SBAS)

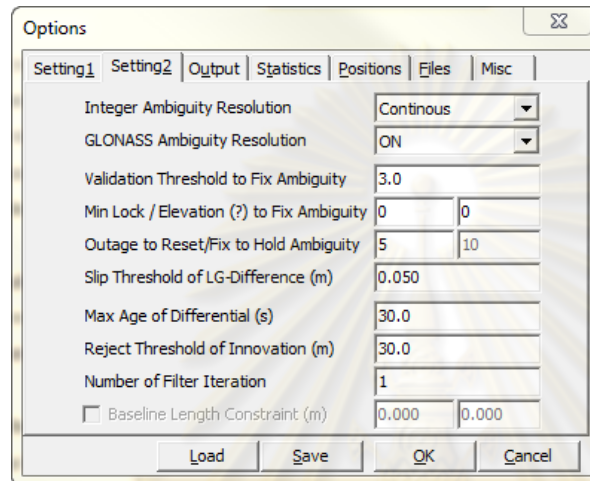
สำหรับข้อมูลข้างต้นจะทำการประมวลผลแบบ Kinematic และตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ดังนี้



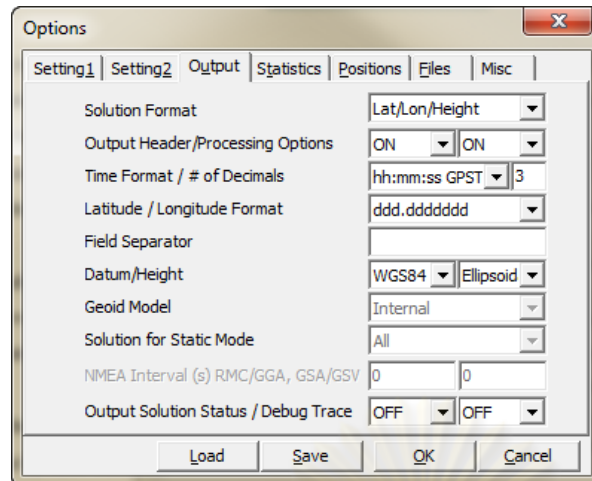
■ Tab: Setting2

- Integer Ambiguity Resolution: สำหรับเลือกรูปแบบการหาจำนวนเต็มของเลขปริศนา (Ambiguity) ประกอบด้วย OFF, Continous, Instantaneous, Fix and Hold
- GLONASS Ambiguity Resolution: สำหรับการคำนวณ Ambiguity ของดาวเทียม GLONASS



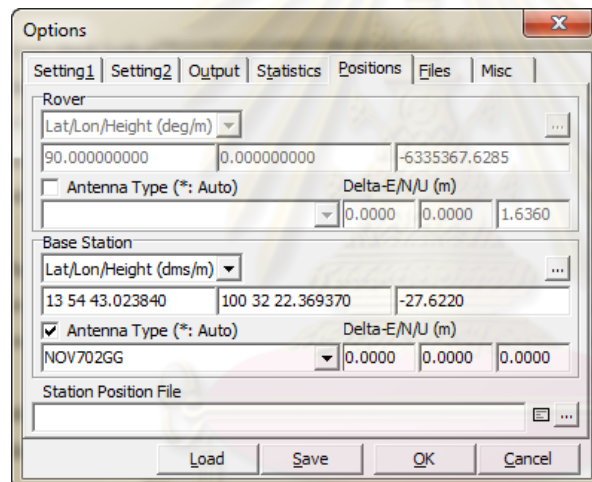
■ Tab: Output

- Solution Format: รูปแบบของค่าพิกัดของผลลัพธ์ ประกอบด้วย Lat/Lon/Height, X/Y/Z-ECEF, E/N/U-Baseline, NMEA0183
- Output Header/Processing Option: เลือก Header file ผลลัพธ์
- Time Format/ # of Decimals: เลือกรูปของเวลา ประกอบด้วย GPST, UTC, JST
- Latitude/Longitude Format: เลือกรูปแบบค่าพิกัด ประกอบด้วย ddd.ddddddd, ddd mm ss.sss
- Datum/Height: เลือก Datum ประกอบด้วย WGS84/Ellipsoidal, WGS84/Geodetic
- Geoid Model: เลือกโมเดลของ Geoid ประกอบด้วย Internal, EGM96-BE(15"), EGM2008-SE(2.5"), EGM2008-SE(1.0")
- Solution for Static Mode: สำหรับเลือกให้การประมวลผลแบบ Static ได้ผลลัพธ์ทุกแต่ละ Epoch หรือทั้งหมด



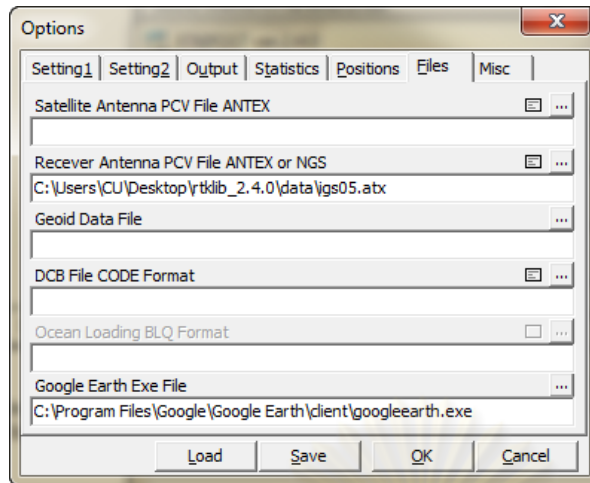
■ Tab: Positions

- Rover: กำหนดค่าพิกัดของ Antenna, Antenna Type, Delta-E/N/U (m)
- Base Station: กำหนดค่าพิกัดของสถานีฐานอ้างอิง, Antenna Type

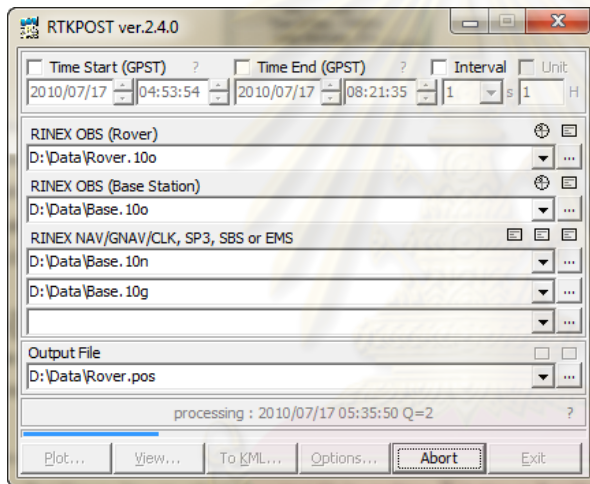


■ Tab: Files

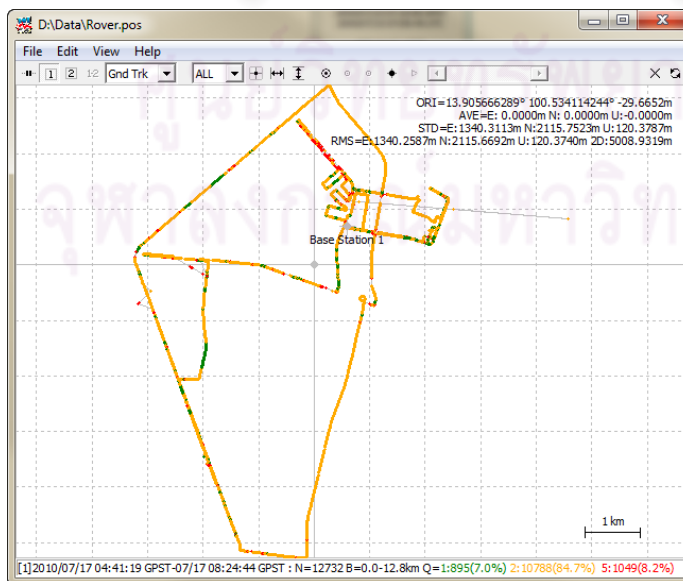
- Satellite Antenna PCV File ANTEX: กำหนดไฟล์พารามิเตอร์ Antenna ของดาวเทียม
- Receiver Antenna PCV File ANTEX or NGS: กำหนดไฟล์พารามิเตอร์ Antenna ของเครื่องรับ (จะอยู่ใน `\rtklib_2.4.0\data\igs05.atx`)
- Geoid Data File: กำหนดไฟล์ของ Geoid
- Google Earth Exe File: กำหนด Path ของโปรแกรม Google Earth



6. หลังจากตั้งค่าการประมวลผลต่างๆ ตามที่ต้องการแล้วให้คลิกปุ่ม **Execute** เพื่อประมวลผล ข้อมูลที่ได้จะมีนามสกุล .pos



7. สามารถ Plot graph เพื่อดู Trajectory โดยคลิกที่ปุ่ม **Plot...**



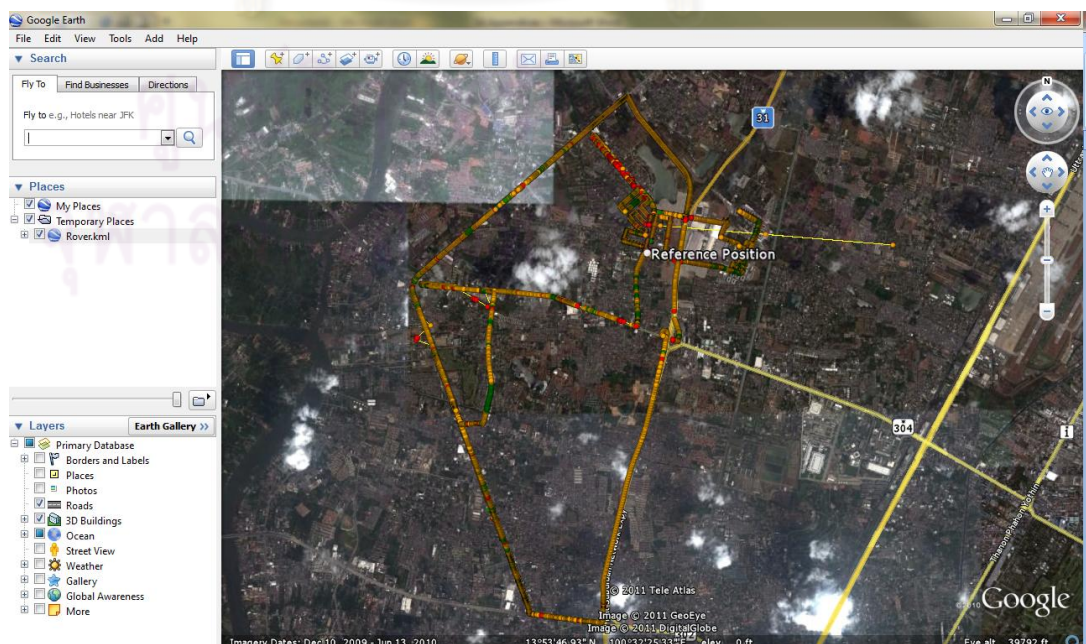
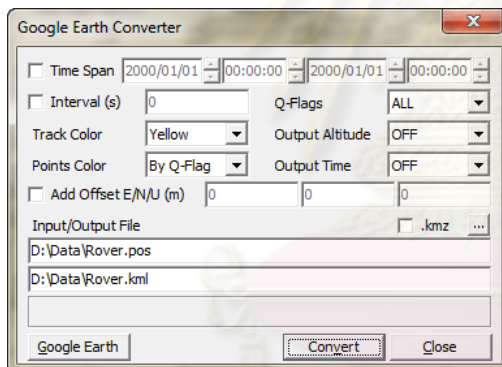
8. สามารถดูผลลัพธ์ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลโดยการคลิกปุ่ม **View...**

```

D:\Data\Rover.pos
% program : RTKPOST ver.2.4.0
% inp file : D:\Data\Rover.10o
% inp file : D:\Data\Base.10o
% inp file : D:\Data\Base.10n
% inp file : D:\Data\Base.10g
% obs start : 2010/07/17 04:41:19.0 GPST (week1592 535279.0s)
% obs end : 2010/07/17 08:24:44.0 GPST (week1592 548684.0s)
% pos mode : kinematic
% freqs : L1+L2
% solution : combined
% elev mask : 10.0 deg
% snr mask : 0.0 dBHz
% dynamics : off
% tidecorr : off
% loncor : off
% loncor opt : broadcast
% tropo opt : saastamainen
% ephemeris : broadcast
% navi sys : gps glonass
% amb res : continuous
% amb glo : on
% val thres : 3.0
% antenna1 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% antenna2 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% ref pos : 13.911951067 100.539547047 -27.6220
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sduu(m) age(s) ratio
2010/07/17 04:41:19.000 13.912172237 100.539684210 -26.6190 5 8 4.3946 3.8800 8.1224 3.4054 -3.1919 -4.7363 -755.00 0.0
2010/07/17 04:41:20.000 13.912171425 100.539680305 -27.2401 5 8 4.3940 3.8787 8.1238 3.4042 -3.1914 -4.7363 -754.00 0.0
2010/07/17 04:41:21.000 13.912168589 100.539681741 -26.3515 5 8 4.3933 3.8774 8.1252 3.4029 -3.1908 -4.7364 -753.00 0.0
2010/07/17 04:41:22.000 13.912170887 100.539681180 -25.9423 5 8 4.3926 3.8762 8.1266 3.4017 -3.1902 -4.7365 -752.00 0.0
2010/07/17 04:41:23.000 13.912170465 100.539686496 -25.8026 5 8 4.3920 3.8749 8.1281 3.4005 -3.1896 -4.7365 -751.00 0.0
2010/07/17 04:41:24.000 13.912168206 100.539680240 -25.8417 5 8 4.3913 3.8737 8.1295 3.3993 -3.1891 -4.7366 -750.00 0.0
2010/07/17 04:41:25.000 13.912160335 100.539677559 -25.0268 5 8 4.3906 3.8724 8.1309 3.3980 -3.1885 -4.7366 -749.00 0.0

```

9. สามารถส่งออกค่าพิกัดที่ได้เป็นรูปแบบ .kml เพื่อใช้กับโปรแกรม Google Earth ได้โดยคลิกที่ปุ่ม **To KML...**



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ:** นายอรุณ บุรีรักษ์
- วันเดือนปีเกิด:** 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2523
- คุณวุฒิทางการศึกษา:**
- พ.ศ. 2547 วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- พ.ศ. 2554 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาระบบสารสนเทศปริภูมิทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ประสบการณ์ทำงาน:**
- พ.ศ. 2549-2551 หัวหน้าแผนก GIS บริษัท เดฟพีเนทลี คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- พ.ศ. 2553-2554 นักวิจัย โครงการสิ่งประดิษฐ์ “การพัฒนาเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสวีอาร์เอสที่มีความถูกต้องระดับเซนติเมตร” ทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พ.ศ. 2553-2554 ผู้ช่วยสอนปฏิบัติการวิชา “ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อธุรกิจ” คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยศิลปากร
- รางวัลที่ได้รับ:** บทความทางวิชาการดีเด่น ด้านการสำรวจรังวัดและการแผนที่ ในงานการประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ประจำปี 2553 ณ อิมแพ็ค คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ เมืองทองธานี จังหวัดนนทบุรี 15-17 ธันวาคม 2553

### ผลงานทางวิชาการ: บทความตีพิมพ์

1. อรุณ บุรีรักษ์, ไพศาล สันติธรรมนนท์ และเฉลิมชนม์ สติระพจน์. 2553. การศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ประจำปี 2553. อิมแพ็ค คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ เมืองทองธานี จังหวัดนนทบุรี 15-17 ธันวาคม 2553
2. เฉลิมชนม์ สติระพจน์, เมธารักษ์ ชะอุ่มพานิช, สมเกียรติ อนงค์เลขา, อรุณ บุรีรักษ์, รจณา คุณพูล, อาทกร จุฬาราง. 2554. การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสความถี่เดียวราคาถูกลำหรับงานสำรวจรังวัด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16. โรงแรมเดอะซานีย์ พัทยา จังหวัดชลบุรี 18-20 พฤษภาคม 2554