

การวิเคราะห์ผลกระทบค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับ
ความเสถียรภาพสูงในการประมวลผลข้อมูล GNSS สำหรับการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง

นายชัยพร กิจประชา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Impact analyses of troposphere delay correlation with high-stability receiver clock in
GNSS data processing for Precise Point Positioning

Mr. Chaiyaporn Kitpracha



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

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ผลกระทบค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับความเสถียรภาพสูงในการประมวลผลข้อมูล GNSS สำหรับการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง

โดย

นายชัยพร กิจประชา

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดร.บรรเจิด พละการ)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.งทิต ฉายากุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.รดา สุวรรณทอง)

ชัยพร กิจประชา : การวิเคราะห์ผลกระทบค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับความเสถียรภาพสูงในการประมวลผลข้อมูล GNSS สำหรับการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Impact analyses of troposphere delay correlation with high-stability receiver clock in GNSS data processing for Precise Point Positioning) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 75 หน้า.

งานวิจัยนี้มีมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับที่มีความเสถียรภาพสูงกับนาฬิกาภายในเครื่องรับซึ่งมีความเสถียรภาพที่ต่ำในการประมาณค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์สำหรับการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ทั้งการวิธีประมวลผลแบบสถิตย์ และ วิธีการประมวลผลแบบจลน์ โดยแบ่งการใช้ข้อมูล GNSS ในแต่ละวิธีการประมวลผลเป็นอีก 3 กรณี ได้แก่ ข้อมูล GPS ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou

จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการประมวลผลแบบสถิตย์นั้นมีผลกระทบอย่างไม่มีนัยสำคัญจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับที่มีความเสถียรภาพสูงทั้ง 3 กรณี แต่สำหรับการประมวลผลแบบจลน์กลับเห็นผลกระทบจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับที่มีความเสถียรภาพสูงอย่างมีนัยสำคัญทั้งกรณี ข้อมูล GPS ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou โดยค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จะมีค่าอยู่ที่ 7 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นผลกระทบจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับที่มีความเสถียรภาพสูงในการประมาณค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์สำหรับการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ในการประมวลผลแบบจลน์มากกว่าแบบสถิตย์ อย่างไรก็ตามความแตกต่างที่ได้อาจยังแสดงอยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูลนั้นค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีความแปรปรวนที่ค่อนข้างน้อย

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5770499021 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM / TROPOSPHERIC DELAY / HIGH STABILITY CLOCK / PRECISE POINT POSITIONING

CHAIYAPORN KITPRACHA: Impact analyses of troposphere delay correlation with high-stability receiver clock in GNSS data processing for Precise Point Positioning. ADVISOR: PROF. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D., 75 pp.

This research focuses on impact of using high-stability receiver clock compare with low-stability internal receiver clock in estimation tropospheric delay for processing of GNSS's data in Precise Point Positioning (PPP) with static and kinematic techniques. GNSS data is divided into three case study such as GPS,GPS combine with GLONASS and GPS combine with GLONASS and Beidou.

According to the results, There's no significant improvement from using high-stability receiver clock in estimation tropospheric delay in Precise Point Positioning (PPP) with static technique for all of case study. In the other hand, Precise Point Positioning (PPP) with kinematic techniques has significant improvement from using high-stability receiver clock in estimation tropospheric delay. The Root Mean Square Error (RMSE) of tropospheric delay in case GPS,GPS combine with GLONASS and GPS combine with GLONASS and Beidou is 7 millimeters, 5 millimeters and 5 millimeters respectively.

This study show that impact of using high-stability receiver clock in estimation tropospheric delay for processing of GNSS's data in Precise Point Positioning (PPP) with kinematic technique is higher than static technique. Otherwise, The Different that show in this Research still small due to low variation of tropospheric delay within collecting GNSS data interval.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวคิด ความรู้ รวมถึงคำปรึกษาต่างๆ ที่มีประโยชน์ ในการทำวิจัย รวมถึงสนับสนุนการหาเครื่องรับสัญญาณ GNSS และ โปรแกรมเชิงวิจัยที่ชื่อว่า PANDA (Position and Navigation Data Analyst) จนสามารถทำงานวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ และได้มอบประสบการณ์ในการทำวิจัยต่อยอดในอนาคต ซึ่งถือเป็นประโยชน์และความรู้ที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่สนับสนุนทั้งร่างกาย แรงใจ และ แรงทรัพย์ รวมถึงกำลังใจ ซึ่งทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจจนสามารถทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จจนด้วยดี

ขอบพระคุณ รศ.ดร. บรรเจิด พละการ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ธงทิศ ฉายากุล กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำติชมต่างๆที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอบพระคุณ ดร.รดา ณาตมาร์ต กรรมการสอบภายนอก จาก สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ ที่ให้คำปรึกษาการวิเคราะห์ผลลัพธ์และคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และ ดร.ทยาทิพ ทองตัน จาก สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติซึ่งสนับสนุนนาฬิกาอะตอมซีเซียมสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงคำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ อีกด้วย

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ที่ให้ความรู้ในงานวิจัยชิ้นนี้ รวมไปถึงมิตรภาพจากพี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจที่มีให้กันตลอดมา

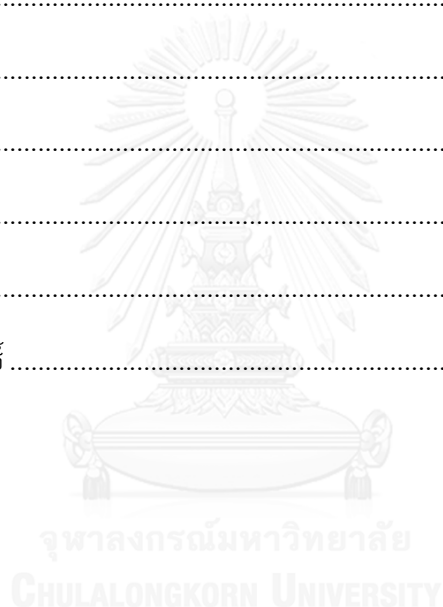
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย.....	3
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา	3
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	3
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	3
1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS).....	4
2.2 ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay)	10
2.3 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)	13
2.4 มาตรฐานความถี่ของนาฬิกาอะตอม (Atomic clock frequency standard)	14
บทที่ 3	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15

บทที่ 4	17
วิธีดำเนินงานวิจัย	17
4.1 การรับสัญญาณ GNSS.....	17
4.2 รายละเอียดการประมวลผลข้อมูล GNSS.....	17
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	23
4.4 แผนผังการดำเนินงาน	25
บทที่ 5	26
ผลการศึกษา	26
5.1 ผลลัพธ์จากการประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP static).....	27
5.1.1 ความสัมพันธ์ของความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซี เชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับกับค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพส เฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ.....	27
5.1.1.1 กรณีข้อมูล GPS	27
5.1.1.2 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS	28
5.1.1.3 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	29
5.1.2 ความแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกา อะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ	30
5.2 ผลลัพธ์จากการประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic).....	32
5.2.1 ความสัมพันธ์ของความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับ นาฬิกาเครื่องรับกับค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จาก นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ	32
5.2.1.1 กรณีข้อมูล GPS	32
5.2.1.2 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS	32
5.2.1.3 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	34

5.2.2 ความแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกา อะตอมซีซีเทียบกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ	35
5.3 ผลการทดสอบทางสถิติ	37
บทที่ 6	38
อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	38
6.1 อภิปรายผล	38
6.2 สรุปผล	40
6.3 ข้อเสนอแนะ	41
รายการอ้างอิง	44
ภาคผนวก ก.	46
ภาคผนวก ข.	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตระบบดาวเทียมนำหน Global Positioning System (GPS) ซึ่งได้รับการพัฒนาและดูแลโดย สหรัฐอเมริกา เป็นเครื่องมือที่ช่วยระบุตำแหน่งบนโลกได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ และในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาประเทศต่างๆ ได้มีการพัฒนาระบบดาวเทียมนำหนของตัวเองขึ้นมา ได้แก่ GLONASS ของรัสเซีย Galileoของสหภาพยุโรป BeiDou ของจีน QZSS ของญี่ปุ่น และในอนาคตอันเดียวจะทำการพัฒนา IRNSS เป็นของตัวเองซึ่งสามารถระบบดาวเทียมเหล่านี้ เป็นระบบที่ชื่อว่า GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ซึ่งให้ครอบคลุมกว้างมากขึ้นโดยมิได้จำกัดเฉพาะระบบดาวเทียม GPS เพียงระบบเดียวทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีความทันสมัยและตอบสนองความต้องการในการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายเพิ่มมากขึ้น มีข้อได้เปรียบหลายประการมากกว่าการเลือกใช้อุปกรณ์ GPS เพียงแหล่งเดียว อาทิเช่นเพิ่มคุณภาพข้อมูล ในด้านเรขาคณิตของดาวเทียมที่ดีขึ้น และ จำนวนของดาวเทียมที่รับสัญญาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของผลลัพธ์ในการประมวลผล เช่น ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ เป็นต้น

ในการประมวลผลข้อมูล GNSS นั้นข้อมูลรังวัดที่รับสัญญาณดาวเทียมนั้นมักจะมาพร้อมกับค่าคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบซึ่งจะประกอบไปด้วย ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ (clock offset) ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere delay) ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere delay) สำหรับงานเชิงยื่อเดติก (Geodetic) หรือยื่อเดซี (Geodesy) นั้นเป็นงานที่ต้องการผลลัพธ์เชิงสัมบูรณ์และความละเอียดสูง ดังนั้นจึงนิยมใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise point positioning: PPP) จึงจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์และข้อมูลนาฬิกาดาวเทียมที่มีความละเอียดสูง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกสร้างและดูแลโดย International GNSS Service (IGS) ทำให้ข้อมูลตำแหน่งดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมไม่จำเป็นต้องมีการประมาณค่าเนื่องจากมีความถูกต้องสูงอยู่แล้ว ส่วนค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับยังคงต้องทำการประมาณค่าในการประมวลผลต่อไป (Wang et al., 2015, Kouba and Héroux, 2000) ส่วนค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะใช้แบบจำลองเชิงเส้นของข้อมูล 2 ความถี่ในการขจัดออกไป สำหรับค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อปรับแก้ในขั้นต้น แต่ทว่าแบบจำลองที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นไม่สามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ได้ทั้งหมด จึงต้องมีการประมาณค่าใน

ขั้นตอนประมวลผลปรับแก้เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนนี้ให้ถูกต้องมากที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าคลาดเคลื่อนนี้มาทำการศึกษาในด้านอุตุนิยมวิทยาได้อีกด้วย เช่น การหาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นต้น

ถ้าพิจารณาจากแบบจำลองการปรับแก้ นั้น จะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นั้น มีความสัมพันธ์กับค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ และค่าความสูง (Dach et al., 2003, Weinbach and Schon, 2011, Rothacher and Beutler 1998) ถ้าหากค่าใดค่าหนึ่งเกิดความผิดพลาดค่าอื่นๆจะมีผลกระทบด้วย โดยเฉพาะค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับเป็นค่าที่สามารถเกิดความผิดพลาดได้มากที่สุดเนื่องจากนาฬิกาที่ใช้มีความเสถียรต่ำซึ่ง แต่ทว่าเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมปัจจุบัน สามารถใช้สัญญาณขาเข้าขนาด 10 MHz จากนาฬิกาอะตอม (atomic clock) แบบที่เรียกว่า นาฬิกาอะตอมซีเซียม (cesium frequency standard) หรือ นาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-maser) โดยนาฬิกาอะตอมซีเซียมมีค่าความถูกต้องสูงในระยะเวลา 1 วัน ส่วนนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์มีค่าความเสถียรสูงกว่าในระยะเวลา 1 วันซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาการใช้นาฬิกาเครื่องรับแบบอะตอมจะช่วยให้ค่าพิกัดโดยเฉพาะทางดิ่งในการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic PPP) นั้นแม่นยำขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (Kan and Rothacher, 2013, Wang et al., 2015) ซึ่งช่วยให้ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นั้นดีขึ้นด้วย

งานวิจัยนี้จะทำการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูงโดยใช้เครื่องรับสัญญาณสองเครื่องแบบยี่ห้อเดียวกันในสองเครื่องรับสัญญาณจะติดตั้งด้วยนาฬิกาแบบอะตอมซีเซียมที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology: NIMT) และทำการประมวลผลหาค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัยชื่อว่า PANDA (Position and Navigation Data Analyst) ที่พัฒนาโดย GNSS analysis center มหาวิทยาลัยวูฮั่น และในท้ายที่สุด งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมในการรับสัญญาณ GNSS เปรียบเทียบกับการใช้นาฬิกาทั่วไปที่ติดกับเครื่องรับสัญญาณในการประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ติดตั้งนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับ เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นาฬิกาแบบทั่วไป ในการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวเดี่ยวความละเอียดสูง

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในงานวิจัยนี้ทำการรับสัญญาณ GNSS ที่ตาดฟ้าของอาคารผดุงมาตรฐาน สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ จ.ปทุมธานี (ละติจูด 14.0430 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.7136 องศาตะวันออก)

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS รุ่น Trimble NetR9 จำนวน 2 เครื่อง ที่ทำการรับสัญญาณพร้อมกันทุกๆ 1 วินาทีต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 27 วัน โดยหนึ่งในเครื่องรับสัญญาณจะทำการติดตั้งนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็ม จาก สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT)

1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์วิจัย Position and Navigation Data Analyst (PANDA) ซึ่งพัฒนาโดย GNSS analysis center มหาวิทยาลัยอู่ฮั่น สาธารณรัฐประชาชนจีน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถประเมินความคุ้มค่าในการติดตั้งนาฬิกาอะตอมพร้อมกับการสร้างสถานีฐานอ้างอิงทำงานต่อเนื่อง (Continuous Operating Reference System :CORS) สำหรับงานเชิงยีออเดติก (Geodetic) หรืองานอื่นๆที่ต้องการความถูกต้องสูง
- สามารถนำค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ตีขึ้นจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับประสิทธิภาพสูงไปประยุกต์ในงานอุตุนิยมวิทยา โดยทำการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้เป็นค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ (Precipitate Water Vapor: PWV)

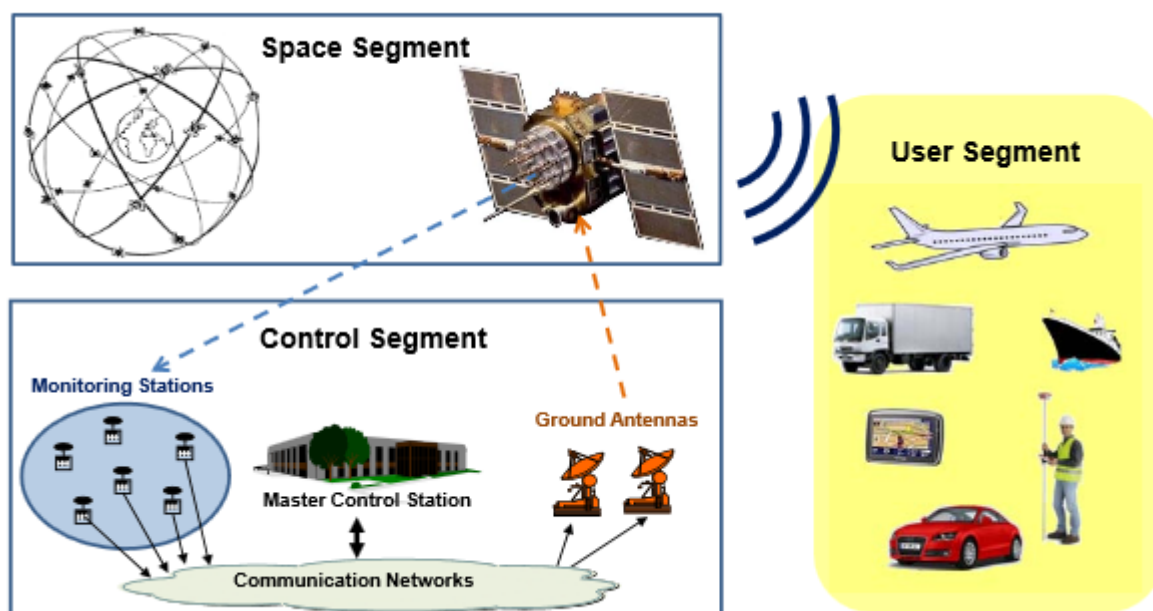
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย องค์ประกอบของระบบดาวเทียม GNSS ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง

2.1 ระบบดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS)

Global Navigation Satellite System (GNSS) คือคำเรียกรวมของระบบดาวเทียมนำหนที่มีอยู่ในปัจจุบันรวมถึงในอนาคต (ตัวอย่าง: GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou) โดย ปกติจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนอวกาศ (Space segment) ซึ่งก็คือส่วนของดาวเทียม ส่วนควบคุม (Control segment) คอยควบคุมดูแลดาวเทียม และส่วนผู้ใช้ (User segment) ซึ่งต้องการตำแหน่ง (Positioning) ความเร็ว (Velocities) และเวลา (Timing)



รูปที่ 1 : องค์ประกอบของระบบ GNSS (ที่มา: (J. Sanz Subirana, 2013)

ส่วนอวกาศ (Space segment)

ดาวเทียม GPS นั้น จะมีแนวระนาบวงโคจรอยู่ 6 แนวรอบโลก ในแต่ละแนวจะมีดาวเทียม 4 ดวงโคจรห่างเท่าๆกัน ด้วยกันเพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเห็นดาวเทียมพร้อมกัน 4 ดวง ได้ทุกที่ทั่วโลก ดาวเทียม GPS จะโคจรที่วงโคจรระดับปานกลาง (Medium Earth Orbit: MEO) ซึ่งมีความสูงที่ 20,200 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ทำมุม 55 องศา กับ ระนาบเส้นศูนย์สูตร รูปร่างวงโคจรมีลักษณะใกล้เคียงวงกลม โดยค่าเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity) มีค่าน้อยกว่า 0.02 ความยาวกึ่งแกนหลัก (Semi major axis) 26,560 กิโลเมตร คาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาที 2 วินาที ณ ปัจจุบัน สามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบ

สำหรับดาวเทียม GLONASS ประกอบไปด้วย ดาวเทียม 24 ดวง ในวงโคจรระดับปานกลาง โดยมี 3 ระนาบวงโคจรและในแต่ละวงโคจรจะมีดาวเทียมโคจรห่างเท่าๆกัน 8 ดวง โดยระนาบวงโคจรจะทำมุม inclination ประมาณ 64.8 องศา ที่ความสูง 19,100 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก และมีคาบการโคจร 11 ชั่วโมง 15 นาที 44 วินาที ปัจจุบันสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบเช่นกัน

สหภาพยุโรป ได้ทำการสร้างระบบดาวเทียม Galileo โดยกำหนดให้มีดาวเทียมหลักทั้งหมด 27 ดวง และสำรองอีก 3 ดวง โดยเป็นดาวเทียมวงโคจรระดับปานกลางทั้งหมด โคจรสูงจากพื้นโลก 23,222 กิโลเมตร มีค่าเยื้องศูนย์กลางอยู่ที่ 0.002 ระนาบวงโคจรทำมุม 56 องศาเทียบกับระนาบศูนย์สูตร วงโคจรทั้งหมด 3 ระนาบและในแต่ละระนาบจะมีดาวเทียมโคจร 10 ดวง โดยมีคาบการโคจร 14 ชั่วโมง 4 นาที 45 วินาที ซึ่งการันตีได้ว่าจะเห็นดาวเทียมทุกที่บนโลกพร้อมกัน 6 ดวง และมีมุมสูง 10 องศา แต่ปัจจุบันระบบ Galileo ยังไม่สามารถใช้งานได้เต็มระบบ ซึ่งได้คาดการณ์ว่าจะสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบในช่วง 2019-2020

ระบบดาวเทียม Beidou ถูกพัฒนาโดย สาธารณรัฐประชาชนจีน ประกอบด้วยดาวเทียมทั้งหมด 35 ดวง ในกรณีที่ใช้งานได้อย่างเต็มระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย ดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า 5 ดวง (Geostationary Orbit : GEO) ซึ่งจะโคจรสูงจากพื้นโลกประมาณ 35,786 กิโลเมตร โดยจะอยู่ที่ตำแหน่ง 58.75 องศาตะวันออก 80 องศาตะวันออก 110.5 องศาตะวันออก 140 องศาตะวันออก และ 160 องศาตะวันออก ตามลำดับและวงโคจรอื่นๆ 30 ดวง โดยประกอบไปด้วย ดาวเทียมวงโคจรแบบ Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) 3 ดวง และดาวเทียมวงโคจรระดับปานกลาง (Medium Earth Orbit : MEO) 3 ระนาบวงโคจรทำมุม inclination ประมาณ 55 องศา โคจรที่ความสูง 21,528 กิโลเมตร และมีคาบการโคจรประมาณ 12 ชั่วโมง 53 นาที และสามารถใช้งานได้ อย่างเต็มระบบประมาณปี 2020 แต่จากวันที่ 27 ธันวาคม ปี 2011ได้มีการปรับเปลี่ยนใหม่โดยเพิ่ม ดาวเทียมวงโคจรแบบ Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) เป็น 5 ดวง ส่วนดาวเทียมวง

โคจรระดับปานกลางนั้น (MEO) จะมีอยู่ด้วยกัน 4 ดวง และดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า (GEO) นั้นจะมี 5 ดวงเท่าเดิม เพื่อให้ครอบคลุมประเทศจีนและพื้นที่โดยรอบทั้งหมด และในอนาคตจะมีการเพิ่มจำนวนดาวเทียมเรื่อยๆจนสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบ

สัญญาณของดาวเทียม GNSS นั้น จะเป็นสัญญาณไมโครเวฟ ช่วง L-band โดยสัญญาณจะถูกปล่อยออกมา 2 ความถี่ หรือมากกว่าขึ้นกับระบบดาวเทียม ซึ่งในสัญญาณนี้จะมีข้อมูลรหัสสำหรับการวัดระยะ (Ranging code) และข้อมูลนำหนของดาวเทียม (Navigation data) ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถคำนวณตำแหน่งของเครื่องรับและดาวเทียมได้

สำหรับดาวเทียม GPS จะปล่อยสัญญาณออกมา 2 ความถี่ในช่วง L-band โดยแต่ละ 2 ความถี่จะถูกสร้างมาจากความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) จากนาฬิกาอะตอมซึ่งติดอยู่บนดาวเทียมซึ่งจะประกอบไปด้วยความถี่ L1 ($154 \times 10.23 \text{ MHz} = 1575.420 \text{ MHz}$) และความถี่ L2 ($120 \times 10.23 \text{ MHz} = 1227.600 \text{ MHz}$) ในการส่งข้อมูลจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Code Division Multiple Access (CDMA) เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลรหัสสัญญาณที่ต่างกันบนความถี่เดียวกันได้ ซึ่งข้อมูลรหัสเหล่านี้จะประกอบไปด้วย

Coarse/Acquisition (C/A) code ซึ่งเป็นข้อมูลรหัสที่เปิดให้ใช้สำหรับพลเรือน ซึ่งจะถูกถ้่าสัญญาณ (Modulation) ในความถี่ L1

- Precision code (P) code ข้อมูลรหัสนี้จะถูกสงวนไว้สำหรับใช้ในงานทหารและบุคคลที่อนุญาตเท่านั้น ซึ่งจะถูกถ้่าสัญญาณในความถี่ L1 และ L2
- Navigation message เป็นข้อมูลที่ถูกล้่าสัญญาณมาทั้ง 2 ความถี่ ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่บอกถึงวงโคจรของดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม รวมถึงข้อมูลอื่นๆ

ในอนาคตระบบดาวเทียม GPS จะทำการเพิ่มความถี่ใหม่ (L5) และเพิ่มข้อมูล C/A ในทุกความถี่ และเพิ่มข้อมูลรหัส M ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับใช้ทางทหารแบบใหม่ซึ่งได้เริ่มการพัฒนาตั้งแต่ปี 2005 ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 1

Link	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation Type	Code rate (Mcps)	Data rate (bps)	Service	
L1	1 575.420	C/A	BPSK(1)	1.023	50	Civil	
		P	BPSK(10)	10.23	50	Military	
		M	BOC _{sin} (10,5)	5.115	N/A	Military	
		L1C-I data	MBOC(6,1,1/11)	1.023	50	Civil	
		L1C-Q pilot			-		
L2	1 227.600	P	BPSK(10)	10.23	50	Military	
		L2C	M L	BPSK(1)	1.023	25	Civil
		M				N/A	
		M	BOC _{sin} (10,5)				
L5	1 176.450	L5-I data	BPSK(10)	10.23	50	Civil	
		L5-Q pilot			-		

ตารางที่ 1 : สรุปข้อมูลสัญญาณดาวเทียม GPS แบบใหม่ (ที่มา: (J. Sanz Subirana, 2013)

ในส่วนของดาวเทียม GLONASS นั้นใช้สัญญาณในช่วง L band เช่นเดียวกับ ระบบดาวเทียม GPS แต่ระบบดาวเทียม GLONASS จะประกอบไปด้วยความถี่ G1 และ G2 และในแต่ละดาวเทียมจะมีความถี่เฉพาะของแต่ละดาวเทียม ส่วนข้อมูลรหัสนั้นจะเหมือนกันทุกดาวเทียม เรียกกระบวนการนี้ว่า Frequency Division Multiple Access (FDMA) ซึ่งความถี่ G1 และ G2 ในแต่ละดาวเทียมสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$G1: 1602 + k \times \frac{9}{16} = (2848 + k) \times \frac{9}{16} \text{ MHz} \quad (1)$$

$$G2: 1246 + k \times \frac{9}{16} = (2848 + k) \times \frac{9}{16} \text{ MHz}$$

ซึ่ง k หมายถึงเลขของดาวเทียม GLONASS โดยจะมีจำนวนตั้งแต่ 1 ถึง 24 แต่ภายหลังปี 2005 ได้มีการเปลี่ยนค่า k เป็น -7 ถึง 6 แทนเพื่อลดการรบกวนกับระบบอื่นๆ ช่วงกุมภาพันธ์ปี 2011 รัสเซียได้มีการเพิ่มความถี่ใหม่สำหรับดาวเทียม GLONASS คือ G3 โดยความถี่นี้จะใช้กระบวนการ CDMA เหมือนกับ GPS เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับระบบอื่นๆ ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยมีความถี่ 1202.025 MHz และในปี 2014 ได้แผนการที่จะเพิ่มกระบวนการ CDMA เข้าไปทั้ง 3 ความถี่อีกด้วย

สำหรับ ระบบดาวเทียม Galileo ของสหภาพยุโรปในกรณีเต็มระบบ จะประกอบไปด้วย 4 ความถี่คือ E1 E6 E5a และ E5b ซึ่งในแต่ละความถี่จะมีข้อมูลซึ่งถูกออกแบบให้ใช้งานต่างกัน โดยงานหลักๆ ได้แก่ Open Service (Open Service) เหมาะสำหรับผู้ใช้ทั่วไป PRS (Public Regulated Service) เหมาะสำหรับทหาร ตำรวจ หรือบุคคลของรัฐบาล CS (Commercial Service) สำหรับใช้งานใน

องค์กรธุรกิจที่ต้องการความถูกต้องสูงกว่าผู้ใช้ทั่วไป SAR (Search and Rescue) ใช้สำหรับงานกู้ภัย ในกรณีที่มีเหตุฉุกเฉิน SoL (Safety of Life) คอบสนับสนุนด้านความปลอดภัยของการบินพลเรือน Galileo ได้ใช้ระบบการ CDMA เช่นเดียวกับระบบดาวเทียม GPS ซึ่งความถี่และข้อมูลรหัส ทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

Band	Carrier freq. (MHz)	Channel or sig. comp.	Modulation type	Code rate (Mcps)	Data rate (bps)	Services
E1	1575.420	E1-A data	$BOC_{cos}(15,2.5)$	2.5575	N/A	PRS
		E1-B data	MBOC(6,1,1/11)	1.023	125	OS, CS, SoL
		E1-C pilot			–	
E6	1278.750	E6-A data	$BOC_{cos}(10,5)$	5.115	N/A	PRS
		E6-B data	BPSK(5)		500	CS
		E6-C pilot			–	
E5a	1176.450	E5a-I data	BPSK(10)	10.23	25	OS
		E5a-Q pilot			–	
E5b	1207.140	E5b-I data	BPSK(10)	10.23	125	OS, CS, SoL
		E5b-Q pilot			–	

ตารางที่ 2 : โครงสร้างสัญญาณและประเภทการใช้งานของระบบดาวเทียม Galileo (ที่มา: (J. Sanz Subirana, 2013)

ระบบดาวเทียม Beidou จะปล่อยสัญญาณไมโครเวฟช่วง L- band เช่นเดียวกับระบบดาวเทียมอื่นๆ โดยจะปล่อยสัญญาณออกมา 3 ความถี่ ประกอบไปด้วย B1 B2 และ B3 และใช้ระบบการเดียวกับ GPS Galileo รวมถึง คลื่น G3 ของ GLONASS คือ CDMA ในการเข้ารหัสสัญญาณปัจจุบันจะอยู่ในช่วงเฟส 2 (Phase 2) ซึ่งให้ใช้ในระดัภูมิภาค (Regional Area) โดยโครงสร้างของสัญญาณและการใช้งานจะสรุปได้ดังตารางที่ 3

Band	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation type	Code rate (Mcps)	Service
B1	1561.098	B1-I	QPSK(2)	2.046	Open
		B1-Q			Authorised
B2	1207.14	B2-I	BPSK(2)	2.046	Open
		B2-Q	BPSK(10)	10.23	Authorised
B3	1268.52	B3	QPSK(10)	10.23	Authorised

ตารางที่ 3 : โครงสร้างสัญญาณของระบบดาวเทียม Beidou เฟส 2 (ที่มา: (J. Sanz Subirana, 2013)

ส่วนควบคุม (Control segment)

ระบบดาวเทียม GNSS จะมีสถานีควบคุมซึ่งคอยทำการ ติดตามสถานะของดาวเทียมแต่ละดวง คำนวณวงโคจรและค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกา ปรับปรุง navigation messages ของดาวเทียมและ มาตรฐานเวลาของแต่ละระบบดาวเทียม เป็นต้น

สำหรับดาวเทียมระบบ GPS ประกอบด้วย 5 สถานีภาคพื้นดินที่กระจายอยู่ทั่วโลก โดยมี สถานีควบคุมหลัก (Master Control Station) อยู่ที่เมือง Colorado Springs เป็นสถานีที่ทำหน้าที่ ประมวลผลข้อมูลทั้งหมด (ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้เวลานาฬิกาดาวเทียมหรือข้อมูลอื่น ๆ) โดยจะมีสถานีอัปโหลด (Upload Station) อีก 3 สถานี ที่คอยส่งข้อมูลที่คำนวณได้จากสถานีควบคุมหลักไปยังดาวเทียม ส่วนสถานีท้ายสุดเป็นสถานีติดตาม (Monitor Station) ทำหน้าที่คอยติดตาม ดาวเทียม

ส่วน GLONASS ก็เช่นกัน จะมีสถานีควบคุมระบบหลักซึ่งอยู่ในเมือง Krasnoznamensk (ในเขต Moscow) ส่วนสถานีอื่นๆ จะกระจายไปตามอาณาเขตที่เคยเป็นของ สหภาพโซเวียต (Soviet Union) สำหรับบางสถานีติดตามที่อยู่ในเขตของประเทศรัสเซีย (ตัวอย่าง Komsomolsk Schelkovo) ได้มีการติดตั้ง SLR (Satellite Laser Ranging) สำหรับการติดตามดาวเทียมอีกด้วย และยังคอยอัปโหลดข้อมูล navigation message ให้กับดาวเทียมพร้อมกับสถานีควบคุมหลัก

สำหรับระบบดาวเทียม Galileo จะมีสถานีควบคุมหลักจะมีด้วยกันถึง 2 (Ground Control Centre : GCC) สถานี 9 สถานี สำหรับคอยอัปโหลดข้อมูล (Uplink Stations : ULS) 5 สถานี สำหรับอัปโหลด ติดตามและควบคุม (Tracking Telemetry and Control : TT&C) ส่งให้สถานีหลัก เพื่อทำการประมวลผล คำนวณวงโคจรควบคุม ตรวจสอบสถานะของดาวเทียม และสถานีติดตาม คำนวณ เวลามาตรฐานเวลาของ Galileo (Galileo System Time) ซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วโลก สถานีหลักนั้นจะ ตั้งอยู่ที่ เมือง Fucino ประเทศอิตาลี และ เมือง Oberpfaffenhofen ประเทศเยอรมันนี

สำหรับระบบดาวเทียม Beidouจะประกอบไปด้วย สถานีหลักคอยทำหน้าที่ปรับแก้วงโคจร คำนวณนาฬิกา สร้าง navigation message ซึ่งได้ข้อมูลจาก สถานีติดตาม สถานีอัปโหลดจะคอยอัปโหลด navigation message ให้กับดาวเทียม และสถานีติดตามจะคอยอัปโหลดข้อมูลจากดาวเทียมและ ส่งให้สถานีหลักเพื่อทำการประมวลผลต่อไป

ส่วนผู้ใช้ (User Segment)

ในส่วนของผู้ใช้สามารถจะแบ่งกลุ่มของผู้ใช้ออกเป็น ผู้ใช้ฝ่ายทหารและผู้ใช้ฝ่ายพลเรือน โดย ปัจจุบันจากการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นไปอย่างรวดเร็ว และเพื่อตอบสนองความต้องการ โดยเฉพาะ ผู้ใช้ฝ่ายพลเรือนที่ซึ่งถือว่าเป็นตลาดที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีกลุ่มของผู้ใช้ที่หลากหลาย และเพื่อให้ผู้ใช้

โดยทั่วไปสามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลทางตำแหน่งได้ ทำให้หลายบริษัทได้ทำการผลิตเครื่องรับสัญญาณให้มีขนาดเล็กลง ราคาถูกลง มีขีดความสามารถที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานร่วมกันกับระบบดาวเทียมอื่น ๆ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ระบบดาวเทียมนำหน GNSS ร่วมกันระหว่าง GPS GLONASS Galileo และ Beidou ส่งผลให้สามารถปรับปรุงความน่าเชื่อถือ และยังสามารถใช้งานได้หลากหลายพื้นที่มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นบริเวณเขตเมืองที่เต็มไปด้วยตึกสูง, หุบเขา หรือเหมืองเปิดต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันยังได้มีการติดตั้งระบบดาวเทียมนำหน GNSS ภายในตัวเครื่องโทรศัพท์มือถือรุ่นใหม่ (สมาร์ตโฟน) ระบบติดตามยานพาหนะ (รถยนต์ เรือ และเครื่องบิน) และมีการให้บริการข้อมูลต่าง ๆ บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแก่ผู้ใช้ที่สนใจ เป็นต้น (Chris, 2010)

2.2 ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay)

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มบริเวณพื้นผิวโลกจนถึงความสูงประมาณ 8 กิโลเมตรบริเวณขั้วโลก และ 17 กิโลเมตรบริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งเนื่องจากองค์ประกอบของชั้นบรรยากาศส่งผลให้สัญญาณ GNSS ที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนี้เกิดการหักเห ทำให้ระยะทางที่เดินทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับนั้นยาวเกินความเป็นจริง โดยค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศนี้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2

$$Tr = \int (n-1)dl = 10^{-6} \int Ndl \quad (2)$$

โดยที่ n คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ และ $N = 10^6(n-1)$ ซึ่งเรียกว่า refractivityซึ่งค่านี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ dry part และ wet part ($N = N_{dry} + N_{wet}$) Tr คือ ระยะทางที่คลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้ง (Zenith Total Delay : ZTD)ซึ่งค่านี้ประกอบไปด้วยสองส่วนที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อสัญญาณ GNSS ดังนี้

- Dry part เกิดจากก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ (ตัวอย่าง 78% N_2 21% O_2 0.9% Ar เป็นต้น) แปรผันตามอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ แม้ว่าการแปรผันของส่วนนี้จะน้อยกว่า 1% ภายใน 1 ชั่วโมง แต่ขนาดความคลาดเคลื่อนนั้นมีมากถึง 2.3 เมตร โดยประมาณในทิศทางแนวตั้ง (Zenith) และมีขนาดถึง 10 เมตร ในสำหรับมุมสูงที่ต่ำ (10 องศาโดยประมาณ)

สำหรับ Dry part นั้นได้มีแบบจำลองที่สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้ ได้แก่ แบบจำลองของ Hopfield (1969) แบบจำลองของ Saastamonien (1972) เป็นต้น และพจน์นี้ถูกเรียกว่า Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) ในบริเวณประเทศไทยแบบจำลองของ Saastamonien มีความเหมาะสมมากที่สุด (Satirapod and Chalermwattanachai,

2005) ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจึงเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการประมวลผล ซึ่งจะสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3

$$ZHD = (2.2779 \pm 0.0024) \times P_s / f(\lambda, H) \quad (3)$$

โดยที่ P_s คือความดันบรรยากาศพื้นผิว มีหน่วยเป็น hPa และ $f(\lambda, H)$ ถูกเขียนได้ดังสมการที่ 4

$$f(\lambda, H) = (1 - 0.00266 \cos 2\lambda - 0.00028H) \quad (4)$$

โดยที่ $f(\lambda, H)$ นั้นคือแบบจำลองถึงความแปรปรวนของแรงโน้มถ่วงซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันที่ขึ้นกับ ละติจูด (ในหน่วยองศา) และความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (ในหน่วย เมตร)

- Wet part เกิดจากปริมาณไอน้ำที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ความแปรปรวนของส่วนนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศขณะทำการรับสัญญาณ แม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนนี้จะมีขนาดเล็ก แต่ทว่ามีความแปรปรวนสูงทำให้ยากต่อการสร้างแบบจำลอง ซึ่งในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงนั้นจำเป็นต้องมีการประมาณค่าพร้อมกับการหาพิคัดด้วย และได้ อีกด้วยสามารถเรียกเทอมนี้ได้ว่า Zenith Wet Delay (ZWD) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์กับงานอุตุนิยมวิทยา (Meteorology) โดยทำการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้เป็นค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ (Precipitate Water Vapor: PWV)

ทั้งนี้ทั้งนั้นแบบจำลองดังกล่าวเป็นการประมาณค่าคลาดเคลื่อนในแนวตั้งเท่านั้น ในความเป็นจริงขณะรับสัญญาณนั้นดาวเทียมไม่ได้อยู่ในแนวตั้ง จึงต้องมีการใช้ mapping function เพื่อให้สามารถทำการหาคลาดเคลื่อนในแนวตั้งได้ mapping function ที่มีในปัจจุบันและแพร่หลายได้แก่ Global Mapping Function (GMF) (Boehm et al., 2006) และ Neill Mapping Function (NMF) (Neill, 1996) เป็นต้นซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไปพร้อมกับค่า ZHD และ ค่า ZWD เพื่อหาค่า ZTD ได้ดังสมการที่ 5

$$ZTD(E) = ZHD \times M_{dry}(E) + ZWD \times M_{wet}(E) \quad (5)$$

โดยที่ E คือ ค่ามุมสูงของดาวเทียม (Elevation angle)

สำหรับ mapping function ของ Neill (1996) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ dry part และ wet part สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ โดยที่ E คือมุมสูงของดาวเทียม และ H คือความสูงเหนือระดับน้ำทะเลในหน่วย กิโลเมตร (km)

$$M_{dry}(E, H) = m(E, a_d, b_d, c_d) + \left[\frac{1}{\sin E} - m(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right] H \quad (6)$$

$$M_{wet}(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin E + \frac{a}{\sin E + \frac{b}{\sin E + c}}} \quad (7)$$

โดย a_d, b_d, c_d คือพารามิเตอร์ที่ประกอบไปด้วย เวลา (t) และ ละติจูด (φ) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$\xi(\varphi, t) = \xi_{avg}(\varphi) - \xi_{amp}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (8)$$

โดย ที่ t คือเวลาจากเดือนมกราคมในหน่วย วัน และ T_0 กำหนดให้เป็น Day of Year ที่ 28 สำหรับ $\xi_{avg}(\varphi)$ และ $\xi_{amp}(\varphi)$ หาได้จากการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (linear interpolated) จากตารางที่ 4 รวมทั้ง a_{ht}, b_{ht}, c_{ht} ก็สามารถหาได้จากตารางที่ 4 เช่นเดียวกัน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนของ wet part a, b, c สามารถหาได้จากการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (linear interpolated) จากตารางที่ 5

Coefficient ξ	Latitude (φ)				
	15°	30°	45°	60°	75°
	Average				
a	1.2769934e-3	1.2683230e-3	1.2465397e-3	1.2196049e-3	1.2045996e-3
b	2.9153695e-3	2.9152299e-3	2.9288445e-3	2.9022565e-3	2.9024912e-3
c	62.610505e-3	62.837393e-3	63.721774e-3	63.824265e-3	64.258455e-3
	Amplitude				
a	0.0	1.2709626e-5	2.6523662e-5	3.4000452e-5	4.1202191e-5
b	0.0	2.1414979e-5	3.0160779e-5	7.2562722e-5	11.723375e-5
c	0.0	9.0128400e-5	4.3497037e-5	84.795348e-5	170.37206e-5
	Height correction				
a_{ht}	2.53e-5				
b_{ht}	5.49e-3				
c_{ht}	1.14e-3				

ตารางที่ 4 : ค่าพารามิเตอร์สำหรับ dry part ของ Neil mapping function

Coefficient ξ	Latitude (φ)				
	15°	30°	45°	60°	75°
a	5.8021897e-4	5.6794847e-4	5.8118019e-4	5.9727542e-4	6.1641693e-4
b	1.4275268e-3	1.5138625e-3	1.4572752e-3	1.5007428e-3	1.7599082e-3
c	4.3472961e-2	4.6729510e-2	4.3908931e-2	4.4626982e-2	5.4736038e-2

ตารางที่ 5: ค่าพารามิเตอร์สำหรับ wet part ของ Neil mapping function

สำหรับ Global Mapping Function (GMF) Dry part และ wet part ซึ่งค่าพารามิเตอร์ b กับ c นั้นจะใช้ค่าแก้ตามตารางแบบเดียวกันกับแบบเดียวกับ Neil mapping function (NMF) แต่สำหรับพารามิเตอร์ a จะคำนวณจากอนุกรมฮาร์โมนิกเชิงพื้นผิว (Spherical harmonic) ได้ตามสมการ 9 ดังนี้

$$a = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \varphi) [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] + A \cos\left(\frac{doy - 28}{365} \cdot 2\pi\right) \quad (9)$$

แล้วจะนำค่าพารามิเตอร์ a ที่ได้ไปคำนวณกับ Neil Mapping Function ต่อไป

2.3 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)

การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงนั้น พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องประมาณค่าจากการคำนวณประกอบไปด้วย ค่าพิกัดของตำแหน่งเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความถี่ที่ต่างกัน เมื่อทำการประมวลผลสัญญาณ GNSS หลายระบบ ส่วนค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะถูกขจัดโดยใช้ข้อมูลสองความถี่ (Kouba and Héroux, 2000) ดังนั้น สมการสำหรับการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงสามารถเขียนได้เป็นดังนี้

$$(P^j(i))_{L3} = (\rho^j(i) + c(\delta t(i) - \delta T^j(i)) + ZTD(i) \cdot M(e^j(i)) + \varepsilon_p)_{L3}$$

$$(\varphi^j(i) \cdot \lambda)_{L3} = (\rho^j(i) + c(\delta t(i) - \delta T^j(i)) + ZTD(i) \cdot M(e^j(i)) + N^j(i) \cdot \lambda + \varepsilon_\varphi)_{L3} \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 i และ j คือหมายเลขของลำดับของข้อมูลที่รับ (epoch) และ หมายเลขดาวเทียมตามลำดับ $P^j(i)_{L3}$ และ $\varphi^j(i)_{L3}$ คือ สมการค่ารังวัดแบบซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ แบบเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) ส่วน $\rho^j(i)$ คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ $\delta t(i)$ และ $\delta T^j(i)$ คือค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับและค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมตามลำดับ λ ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (ionosphere free) $ZTD(i)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้ง (Zenith Total Delay) ของแต่ละข้อมูล $M(e^j(i))$ คือ Mapping ฟังก์ชันซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม $N^j(i)$ คือ เลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี (ionosphere free ambiguity) ε_p และ ε_φ ถูกจัดให้เป็นค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก คลื่นหลายวิถี (Multipath) และ ส่วนรบกวนของข้อมูล (Observation noise) สำหรับข้อมูล แบบซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ แบบเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) ตามลำดับ

สำหรับค่าพิกัดดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมนั้นสำหรับการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงโดยทั่วไปจะใช้ข้อมูล Final Orbit จาก International GNSS Service (IGS) หรืออาจจะใช้จากศูนย์วิเคราะห์อื่นๆ ซึ่งค่าพิกัดทั้งดาวเทียมและผลลัพธ์ค่าพิกัดของเครื่องรับจะตั้งอยู่ในระบบ ITRF2008

2.4 มาตรฐานความถี่ของนาฬิกาอะตอม (Atomic clock frequency standard)

ในปัจจุบันมาตรฐานความถี่ของนาฬิกาอะตอมมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Cesium frequency standard) นาฬิกาอะตอมรูบิเดียม (Rubidium frequency standard) และนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-maser)

คุณลักษณะเด่นของนาฬิกาอะตอมซีเซียมนั้นจะมีคุณสมบัติเด่นในการใช้งานระยะยาว ซึ่งการใช้งานเต็มประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 7.5 ปี แต่สามารถใช้งานได้ถึง 12 ปี นาฬิกาอะตอมรูบิเดียมจะมีเล็กและเบากว่านาฬิกาอะตอมซีเซียม และ นาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานระยะสั้น มีความเสถียรในระดับ 5×10^{-14} วินาที แต่ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพแวดล้อมด้วย ส่วนนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ และมีความเสถียรดีที่สุดในบรรดานาฬิกาอะตอมซึ่งมีความเสถียรในระดับ 10^{-16} วินาที แต่ทว่ามีน้ำหนักถึง 35 กิโลกรัม ประสิทธิภาพการใช้งานโดดเด่นทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งใช้ในศูนย์วิจัยด้านเวลาทั่วโลก

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลายปีที่ผ่านมาได้มีการใช้ GPS เพื่อศึกษาการปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของโลก (Rothacher and Beutler 1998) โดยเทียบกับกระบวนการทางยี่ห้ออื่น ๆ เช่น SLR/LLR (Satellite Laser Ranging/Lunar Laser Ranging) VLBI (Very Long Baseline Interferometry) เป็นต้น และได้แสดงปัญหาของ GPS ในการหาค่าความสูง ซึ่งมีผลต่อการค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และมีผลต่อเนื่องไปสู่การหาค่าไอน้ำในอากาศในชั้นบรรยากาศ ในงานวิจัยนี้ได้มีการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและค่าคลาดเคลื่อนนี้จากแบบจำลองการปรับแก้ อีกทั้งศึกษาความสัมพันธ์ปรากฏการณ์ต่าง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางโลก (motion of geocenter variations) การติดตามระดับน้ำทะเล (Sea level monitoring) ซึ่งมีความสัมพันธ์ค่าทางดิ่งถ้าพิจารณาในระดับโลก (Global scale) โดยใช้ GPS

ในการถ่ายทอดเวลา (Time transfer) (Dach et al. 2003) ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายทอดเวลา (Time transfer) ด้วยข้อมูลเฟสคลื่นส่งของดาวเทียม GPS (Carrier phase) และศึกษาการแปรของค่าคลาดเคลื่อนต่างๆในการทำการถ่ายทอดเวลา ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจร และค่าแปรปรวนของเสาอากาศ (Phase-center variations) และพบความสัมพันธ์ที่สูง (Strong correlation) ระหว่างตัวแปรนาฬิกาเครื่องรับ ค่าทางดิ่ง และค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และ (Weinbach and Schon 2010) ได้ทำการถ่ายทอดเวลา (Time transfer) ด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning : PPP) ซึ่งค้นพบว่าประสิทธิภาพของการถ่ายทอดเวลานั้นมีความสัมพันธ์กันกับค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์กับค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับเช่นเดียวกัน อีกทั้งงานวิจัยดังกล่าวได้อธิบายถึงผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับที่มีต่อค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และแสดงผลกระทบจากการใช้แบบจำลองโทรโพสเฟียร์แบบต่างๆกัน ซึ่งมีผลในการประมาณค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ

เมื่อมีการค้นพบความสัมพันธ์ข้างต้น ได้มีการทำการศึกษาแบบจำลองสโตคาสติก (Stochastic model) สำหรับการใช้นาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-maser) ที่เครื่องรับ (Kan and Rothacher 2013) ในการประมาณค่าตัวแปรนาฬิกาเครื่องรับแบบใหม่แทนการใช้นาฬิกาทั่วไป งานวิจัยดังกล่าวได้แสดงผลกระทบกับคุณภาพของตำแหน่งโดยเฉพาะทางดิ่ง ในการประมวลผลด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูงนั้นแบบจลน์ (Kinematic PPP) นอกจากนี้ยังได้มีการสร้าง

แบบจำลองใหม่สำหรับนาฬิกาเครื่องรับความแม่นยำสูงโดย Weinbach and Schon (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการสร้างแบบจำลองสำหรับนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-maser) โดยใช้ Single quadratic polynomial เป็นแบบจำลองค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ แล้ววิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของเมทริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรในการประมวลผลเพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดกับค่าพิกัด ซึ่งค้นพบว่าการใช้โดยใช้ Single quadratic polynomial เป็นแบบจำลองค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับและตัดการประมาณค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวแบบความละเอียดสูงแบบจลน์ส่งผลให้ค่าพิกัดทางดิ่งดีขึ้นถึง 70 % อีกทั้ง Wang Chen and Guo (2015) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองนาฬิกาเครื่องรับสำหรับการประมวลผลร่วมกันระหว่าง GPS/GLONASS ซึ่งนำข้อมูลจากเครื่องรับได้ติดตั้งนาฬิกาอะตอมจากสถานี IGS เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเวลาในการลู่เข้าของผลลัพธ์ (Convergence time) ในการประมวลผลด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีคุณภาพพร้อมกับเวลาในการลู่เข้าของคำตอบ และค่า RMS (Root mean square) ของผลลัพธ์ และยังสามารถเปรียบเทียบระหว่างการใช้ GPS กับ GPS/GLONASS ร่วมกัน ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัยข้างต้นล้วนแสดงถึงความแม่นยำของค่าพิกัดที่มากขึ้นโดยเฉพาะทางดิ่งดีกว่าการใช้นาฬิกาเครื่องรับแบบทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด และมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าการประมาณคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP)

บทที่ 4

วิธีดำเนินงานวิจัย

4.1 การรับสัญญาณ GNSS

ในการรับสัญญาณ GNSS ในงานวิจัยนี้ จะใช้ เครื่องรับสัญญาณ GNSS 2 เครื่อง โดยใช้เสาอากาศ (Antenna) หนึ่งตัวและใช้ Antenna Splitter เพื่อทำให้สัญญาณจากเสาอากาศส่งไปยังเครื่องรับทั้ง 2 พร้อมกันและเพื่อให้เชื่อถือได้ว่ารับสัญญาณ ณ ตำแหน่งเดียวกัน เป็นการขจัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตำแหน่งการรับสัญญาณที่ต่างกันซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยหนึ่งในเครื่องรับทำการติดตั้งนาฬิกาอะตอมซีเซียม ส่วนอีกเครื่องใช้นาฬิกาทั่วไปที่มาพร้อมกับเครื่องรับ และทำการรับสัญญาณ ณ ดาดฟ้าอาคารผดุงมาตรฐานสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เพื่อหลีกเลี่ยงค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (multipath error) จากสิ่งก่อสร้างที่บดบัง โดยช่วงเวลาที่รับสัญญาณ (epoch) จะทำการรับสัญญาณทุกๆ 1 วินาที ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งหมด 26 วัน ดังรูปที่ 2

4.2 รายละเอียดการประมวลผลข้อมูล GNSS

ในงานวิจัยนี้จะทำการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (PPP Static) และแบบจลน์ (PPP Kinematic) โดยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงทั้งสองแบบข้างต้น จะใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase) โดยทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier Phase) ก่อนที่จะทำการประมวลผล จะต้องทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบ (Systematic error) ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere delay) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน (Phase Center Offset & Phase Center Variation : PCO & PCV) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide , Ocean loading) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Phase wind-up (Wu et al., 1993) ที่เกิดจากการหมุนของดาวเทียม ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่กล่าวมา

ข้างต้นทำให้เกิดความผิดพลาดได้ในระดับเมตร (meters level) ในการประมวลผลแบบจุดเดียว ความละเอียดสูง (Kouba and Héroux, 2000) ซึ่งแต่ละค่าคลาดเคลื่อนจะถูกขจัดด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

- ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere delay) จะใช้แบบจำลองเชิงเส้นจากข้อมูลสองความถี่ (Ionosphere free combination) ซึ่งจะขจัดทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) จะทำให้ได้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) ที่อยู่ในรูปแบบ Ionosphere free
- ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) จะใช้แบบจำลองของ Saastamonien ในการปรับแก้ขั้นต้น แต่ทว่ายังคงเหลือค่าคลาดเคลื่อนนี้อยู่ในข้อมูล จึงต้องกำหนดให้เป็นตัวแปรในการประมาณค่าในขั้นตอนการประมวลผลเพื่อให้สามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนนี้ได้ดีขึ้น
- ค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset) จะใช้ข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงจาก German Research Centre for Geosciences (GFZ) ซึ่งเป็นหนึ่งในศูนย์วิเคราะห์ GNSS ที่ IGS ยอมรับ ซึ่งสำหรับข้อมูลวงโคจรจะมีความถูกต้องในระดับ 5 – 10 เซนติเมตร และค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมจะอยู่ในระดับ 20 picosecond แต่สำหรับดาวเทียม Beidou GEO (ดาวเทียมหมายเลข C01-C05) จะมีความถูกต้องของวงโคจรอยู่ที่ระดับ 50 เซนติเมตร (Uhlemann et al., 2012)
- ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน (Phase Center Offset & Phase Center Variation : PCO & PCV) จะทำการปรับแก้โดยใช้แบบจำลองของ IGS
- ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide , Ocean loading) จะทำการปรับแก้โดยใช้แบบจำลอง IERS 2003 จากหน่วยงาน International Earth Rotation Service (IERS) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่จะติดตามปรากฏการณ์ต่างๆ เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกและการหมุนตัวของโลก
- และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหมุนของเสาอากาศดาวเทียม Phase-windup จะทำการแก้ไขโดยหลักการเฟสโพลาไรซ์เซชัน (Phase polarization) (Wu et al., 1993)

เมื่อทำการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเป็นระบบ (Systematic error) ข้างต้นแล้วจะทำการปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square adjustment) โดยใช้สมการที่ 10 ทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) ที่อยู่รูป Ionosphere free ซึ่งรายละเอียดการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่กล่าวมาข้างต้นจะสรุปอยู่ในตารางที่ 6

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (PPP Static) และ การประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP Kinematic) ซึ่งจะมีวิธีการประมาณค่าและตัวแปรในการประมาณค่าที่ต่างกันดังต่อไปนี้

❖ ตัวแปรและการประมาณค่าแบบสถิตย์ (PPP static)

- ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ 3 มิติ (Earth Center Earth Fixed Coordinates: ECEF) ประกอบไปด้วยค่าพิกัดในแกน X,Y,Z 3 ค่า โดยใช้จำนวนข้อมูลรังวัดทั้งหมดมาทำการประมาณพิกัด ทั้ง 3 ค่า
- ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ (Receiver clock error) จะทำการประมาณค่าทุกของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล (Observation interval) เนื่องจากนาฬิกาอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกะทันหันเนื่องจากความไม่เสถียร
- ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) หลังจากทำการปรับแก้ชั้นต้นก็จะทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (J. Sanz Subirana, 2013) จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมาการประมาณค่าของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล (Observation interval)

❖ ตัวแปรและการประมาณค่าแบบจลน์ (PPP kinematic)

- ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ 3 มิติ (Earth Center Earth Fixed Coordinates: ECEF) ประกอบไปด้วยค่าพิกัดในแกน X,Y,Z 3 ค่า แต่จะทำการประมาณค่าทุกช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล (Observation interval) ซึ่งจะใช้ข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาของข้อมูล (epoch) จะทำให้ได้ผลลัพธ์ค่าพิกัดออกมาทุกช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล (epoch by epoch) ต่างจากการประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP Static) ซึ่งจะต่างจากกรณีสถิตย์ซึ่งจะทำการประมาณค่าพิกัด 3 มิติ จากข้อมูลรังวัดทั้งหมด โดยจะได้ผลลัพธ์ค่าพิกัดออกมาเพียงชุดเดียว
- ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ (Receiver clock error) จะทำการประมาณค่าทุกช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล (Observation interval) เนื่องจากนาฬิกาอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกะทันหันเนื่องจากความไม่เสถียร เช่นเดียวกับแบบสถิตย์ (PPP Static)
- ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) หลังจากทำการปรับแก้ชั้นต้นก็จะทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (J. Sanz Subirana, 2013) จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมาการประมาณค่าของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล (Observation interval) เช่นเดียวกับแบบสถิตย์ (PPP Static)

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีข้อกำหนดเรื่องช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลอยู่ที่ทุกๆ 30 วินาที เนื่องจากข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วง 30 วินาที ถ้ากำหนดช่วงเวลาข้อมูลของการประมวลผลให้น้อยกว่า 30 วินาที อาจทำให้เกิดความผิดพลาดของค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมจากการประมาณค่าได้ และ มุมสูงของดาวเทียมอยู่ที่ 5 องศา โดยแสดงอยู่ในตารางที่ 6

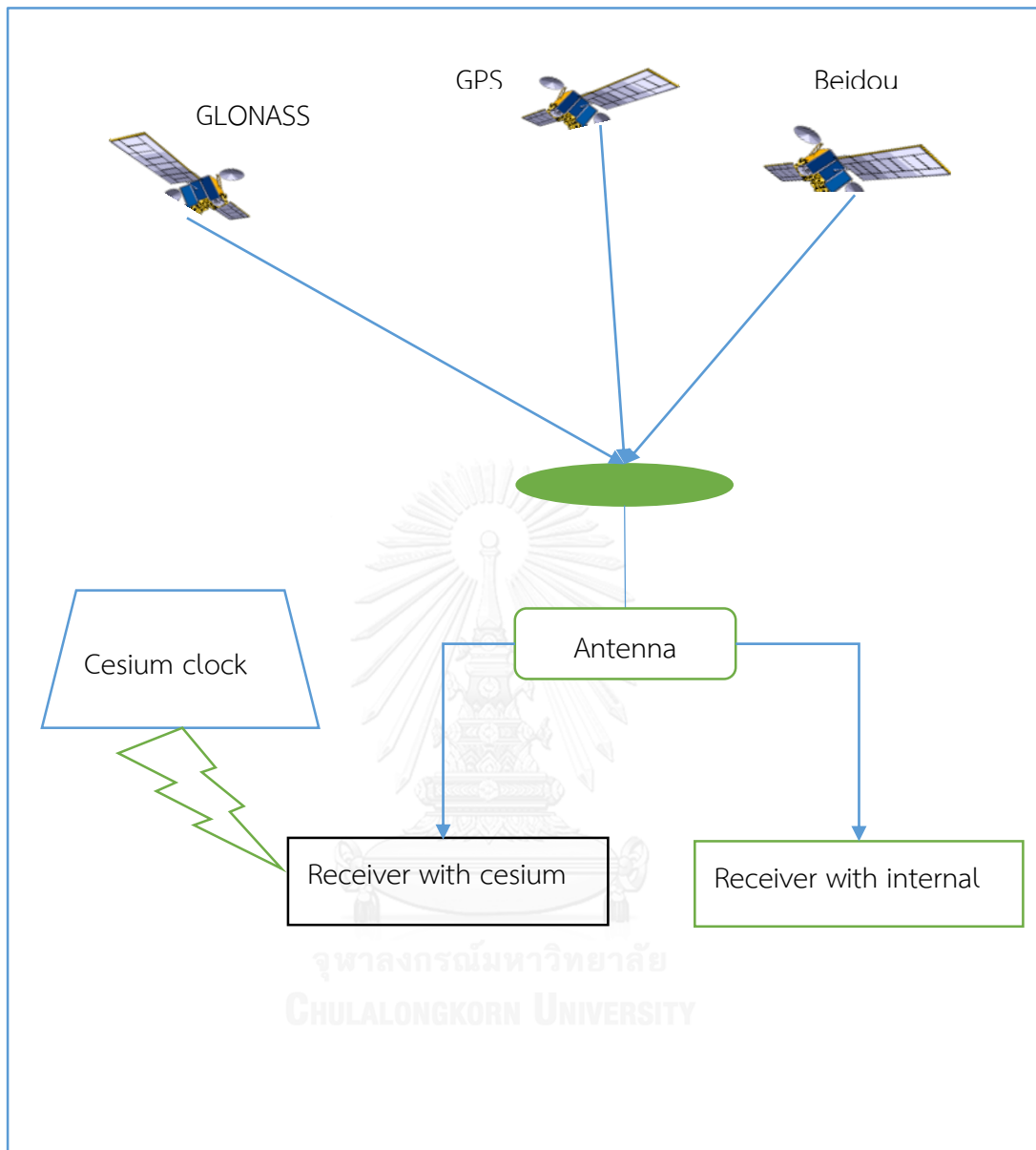
จากนั้นจะทำการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงโดยใช้ข้อมูลที่มีระยะเวลา 24 ชั่วโมงทั้งหมด 26 วัน จากที่ได้ทำการรับสัญญาณมาทั้งเครื่องรับที่ใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมและนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยจะประมวลผลข้อมูลที่ใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมและข้อมูลที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) ทั้งแบบสถิตย์ (Static) และแบบจลน์ (Kinematic) โดยใช้รายละเอียดและกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น ในการประมวลทั้งแบบสถิตย์ (Static) และแบบจลน์ (Kinematic) กับข้อมูลที่ใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมและข้อมูลที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay :ZTD) ที่ได้ออกมาทุกๆ 2 ชั่วโมงต่อวัน ทั้งหมด 26 วันทั้งการประมวลทั้งแบบสถิตย์ (Static) และแบบจลน์ (Kinematic) และเพื่อศึกษาผลกระทบจากการใช้ข้อมูล GNSS ที่มากขึ้น ในงานวิจัยนี้จะทำการแบ่งการใช้ข้อมูลออกเป็น 3 กรณีโดยแบ่งเป็น

- ข้อมูล GPS
- ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS
- ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou

ทั้งการประมวลทั้งแบบสถิตย์ (Static) และแบบจลน์ (Kinematic) จากนั้นจะนำผลลัพธ์ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay: ZTD) ที่ได้จาก 3 กรณีข้างต้น ทั้งการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) และแบบจลน์ (Kinematic) กับข้อมูลที่ใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมและนาฬิกาภายในเครื่องรับไปทำการวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis) เพื่อศึกษาว่าการใช้นาฬิกาที่มีความเสถียรภาพสูงมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ในการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

รายละเอียด	แบบจำลองและการแก้ไข
มุมสูงดาวเทียม (Cut-off Elevation angle)	5 องศา
ช่วงเวลาข้อมูล (Observation interval)	30 วินาที
ข้อมูลวงโคจรและค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม	German Research Centre for Geosciences (GFZ) โดยช่วงเวลาข้อมูลวงโคจรคือ ทุกๆ 15 นาที ส่วนค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาคือ ทุกๆ 30 วินาที
ค่าคลาดเคลื่อนศูนย์เสาอากาศดาวเทียม (Phase Center Offset)	ตามค่าปกติจาก IGS MGEX
ค่าแปรปรวนศูนย์กลางเสาอากาศดาวเทียม (Phase Center Variation)	ตามค่าปกติจาก IGS MGEX
ค่าแก้เนื่องจากการหมุนของเสาอากาศดาวเทียม (Phase Wind-up Effect)	ใช้หลักการเฟสโพลาริซเซชัน (Wu et al., 1993)
แบบจำลองค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere Model)	แบบจำลอง Saastamonien ทั้ง wet และ dry ร่วมกับ Global Mapping function
ค่าคลาดเคลื่อนไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere model)	แบบจำลอง Ionosphere free combination
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและแรงมหาสมุทร (Ocean loading, Ocean tide, Solid Earth Tide)	ใช้แบบจำลอง IERS 2003
มาตรฐานเวลา	ระบบเวลาของดาวเทียม GPS
พื้นหลักฐาน	ITRF2008
การประมาณความถูกต้องค่าพิกัดเริ่มต้น	ให้พิกัดเริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนที่ 5 เมตร
การหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity Fixing)	ทำให้เป็นเลขจำนวนจริง (Ambiguity float)

ตารางที่ 6 : รายละเอียดการประมวลผลและการกำจัดความคลาดเคลื่อน (ดัดแปลงจาก: (Li et al., 2014))



รูปที่ 2 : แผนผังการรับสัญญาณ GNSS

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากทำการประมวลผลข้อมูลที่ใช้สถานีภาคพื้นดินกับสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay) ทั้งการประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP static) และ การประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic) ในกรณีการใช้ข้อมูล

- ใช้ข้อมูล GPS
- ใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS
- ใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou

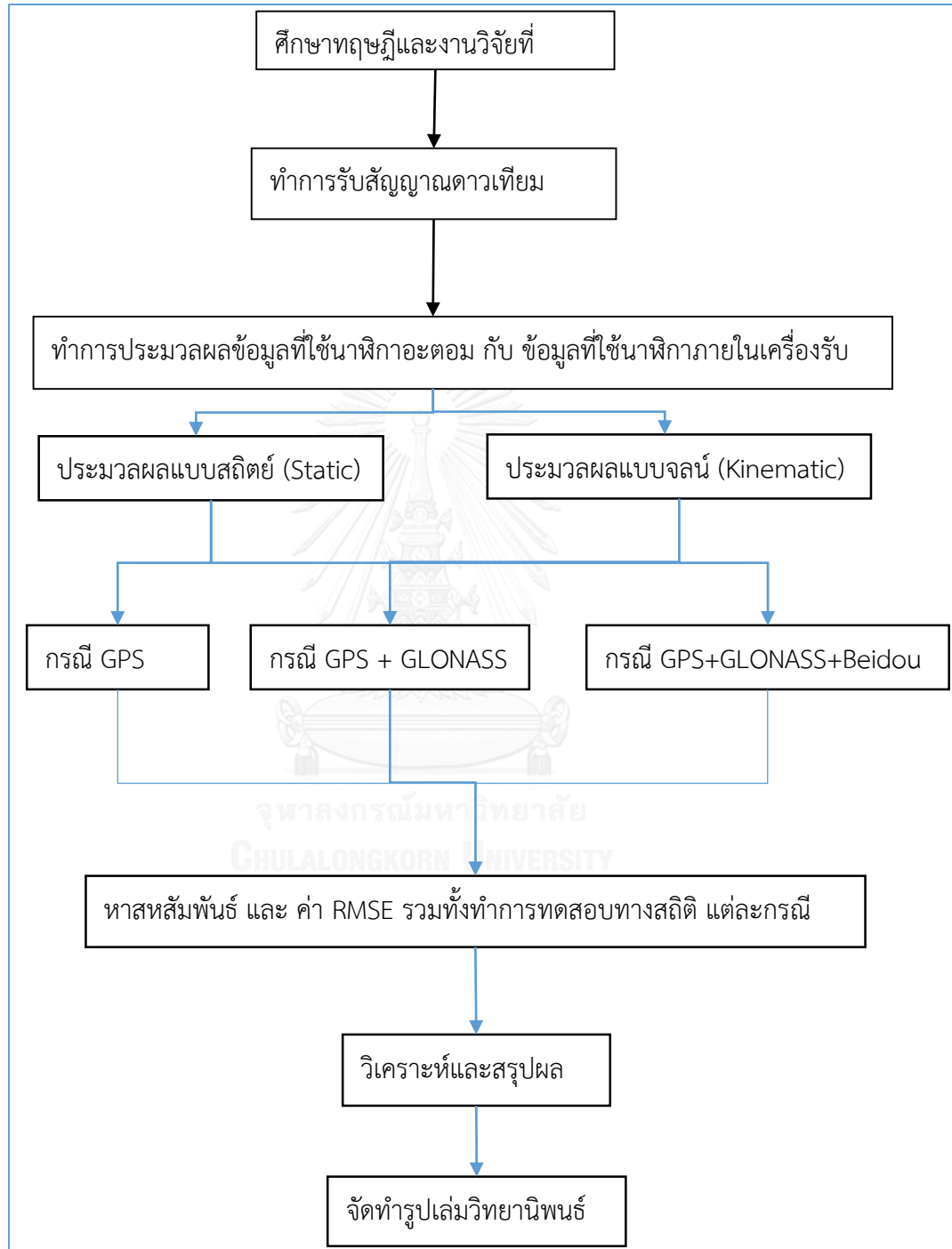
เป็นทั้งหมด 26 วัน ทั้งการประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP static) และ การประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic) หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistics analysis) เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จากการใช้สถานีภาคพื้นดินเชื่อมกับสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับว่ามีนัยสำคัญสถิติมากน้อยเพียงใด ด้วยกระบวนการทางสถิติดังต่อไปนี้

- ทำการพล็อตกราฟ cross correlation โดยแกนนอนจะเป็น ผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนสถานีภาคพื้นดินที่ได้ออกมาจากการประมวลผลจากข้อมูลที่ใช้สถานีภาคพื้นดินเชื่อมและสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับที่คูณกับความเร็วแสงเพื่อทำให้เป็นหน่วยเมตร และแกนตั้งจะเป็น ผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้ สถานีภาคพื้นดินเชื่อมกับสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับในหน่วยเมตร ทั้งการประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP Static) และการประมวลผลแบบจลน์ (PPP Kinematic) ในแต่ละกรณีการใช้ข้อมูลที่ ได้แบ่งไว้ข้างต้น เพื่อศึกษาว่าความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนสถานีภาคพื้นดินที่ประมวล ค่าจากการใช้สถานีภาคพื้นดินกับสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่าง กับค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้สถานีภาคพื้นดินเชื่อม กับสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับหรือไม่มากน้อยเพียงใด โดยจะดูแนวโน้มของกลุ่มข้อมูลว่าไปใน ทิศทางใด
- ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เพื่อแสดงระดับ ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนสถานีภาคพื้นดินที่ได้ออกมาจากการประมวลผลจาก ข้อมูลที่ใช้สถานีภาคพื้นดินเชื่อมและสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับที่คูณกับความเร็วแสงเพื่อทำให้ เป็นหน่วยเมตร ออกมาซึ่งผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งถ้า ค่านี้มีค่าที่ใกล้ 1 จะแสดงให้เห็นว่าผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนสถานีภาคพื้นดินที่ได้ออกมาจากการ ประมวลผลจากข้อมูลที่ใช้สถานีภาคพื้นดินเชื่อมและสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับ ส่งผลให้เกิด ความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากสถานีภาคพื้นดินเชื่อม กับสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับ ทั้งการประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP Static) และการ ประมวลผลแบบจลน์ (PPP Kinematic) ในแต่ละกรณีที่กล่าวมาข้างต้น

- ทำการทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนที่มีชื่อว่า F-test เพื่อ ยืนยันผลลัพธ์ความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้ จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งการ ประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP Static) และการประมวลผลแบบจลน์ (PPP Kinematic) ในแต่ ละกรณีที่กำลังกล่าวมาข้างต้น รวมถึงแสดงค่าสถิติพื้นฐานได้แก่ ค่าเฉลี่ยของค่าต่าง (mean difference) และค่า RMSE อีกด้วย



4.4 แผนผังการดำเนินงาน



รูปที่ 3 : แผนผังดำเนินงาน

บทที่ 5

ผลการศึกษา

หลังจากทำการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning :PPP) กับข้อมูลที่ใช้สถานีภาคพื้นดินที่เชื่อมและข้อมูลที่ใช้สถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับ แบบสถิตย์ (Static) และแบบจลน์ (Kinematic) ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทุกๆ 2 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลาทั้งหมด 26 วัน (28 มกราคม – 23 กุมภาพันธ์ 2559) จากข้อมูล GNSS ที่ใช้สถานีภาคพื้นดินที่เชื่อมและสถานีภาคพื้นดินในเครื่องรับ จากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis) โดย จะทำการแบ่งการวิเคราะห์ผลลัพธ์ออกเป็นกรณีดังต่อไปนี้

- การประมวลผลแบบสถิตย์โดยใช้ข้อมูล GPS
- การประมวลผลแบบสถิตย์โดยใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS
- การประมวลผลแบบสถิตย์โดยใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou
- การประมวลผลแบบจลน์โดยใช้ข้อมูล GPS
- การประมวลผลแบบจลน์โดยใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS
- การประมวลผลแบบจลน์โดยใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou

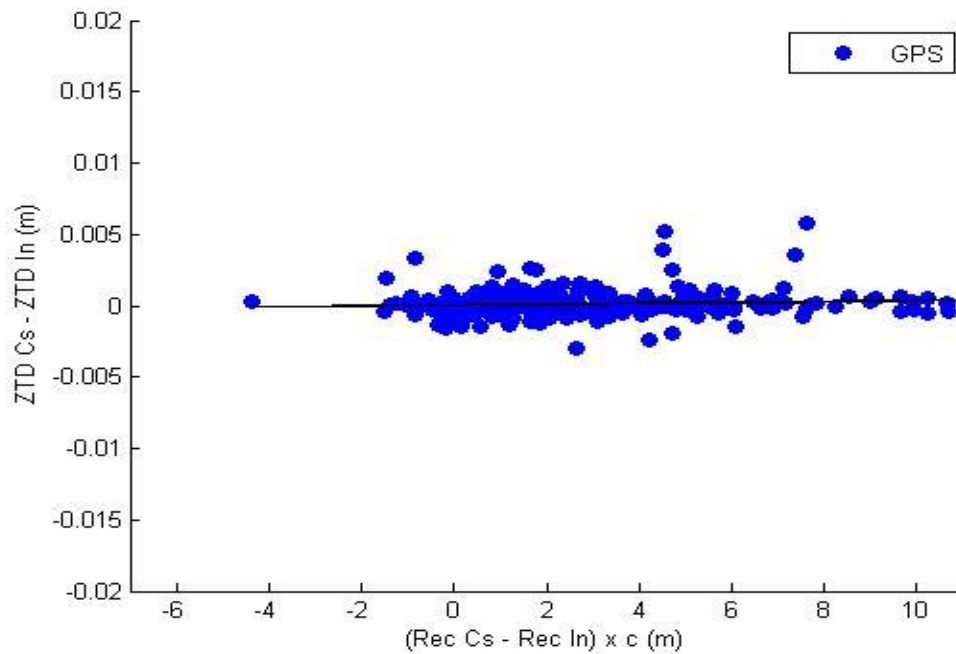
โดยในแต่ละกรณี จะทำการพล็อตกราฟ cross correlation ระหว่างผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนของสถานีภาคพื้นดินที่เชื่อมกับสถานีภาคพื้นดินที่ความเร็วแสงจะเป็นแกนนอน กับ ผลต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากสถานีภาคพื้นดินที่เชื่อมกับสถานีภาคพื้นดินที่อยู่ในแกนตั้งเพื่อดูแนวโน้มความสัมพันธ์ว่าความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนของสถานีภาคพื้นดินที่เชื่อมกับสถานีภาคพื้นดินส่งผลให้เกิดความแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากสถานีภาคพื้นดินที่เชื่อมกับสถานีภาคพื้นดินหรือไม่ นอกจากนี้จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ข้างต้นออกมาในรูปแบบตัวเลข ตั้งแต่ -1 ถึง 1 และจะทำการหาค่า RMSE ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากสถานีภาคพื้นดินที่เชื่อมกับสถานีภาคพื้นดินที่เกิดขึ้นด้วย

5.1 ผลลัพธ์จากการประมวลผลแบบสถิตย์ (PPP static)

5.1.1 ความสัมพันธ์ของความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับกับค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ

5.1.1.1 กรณีข้อมูล GPS

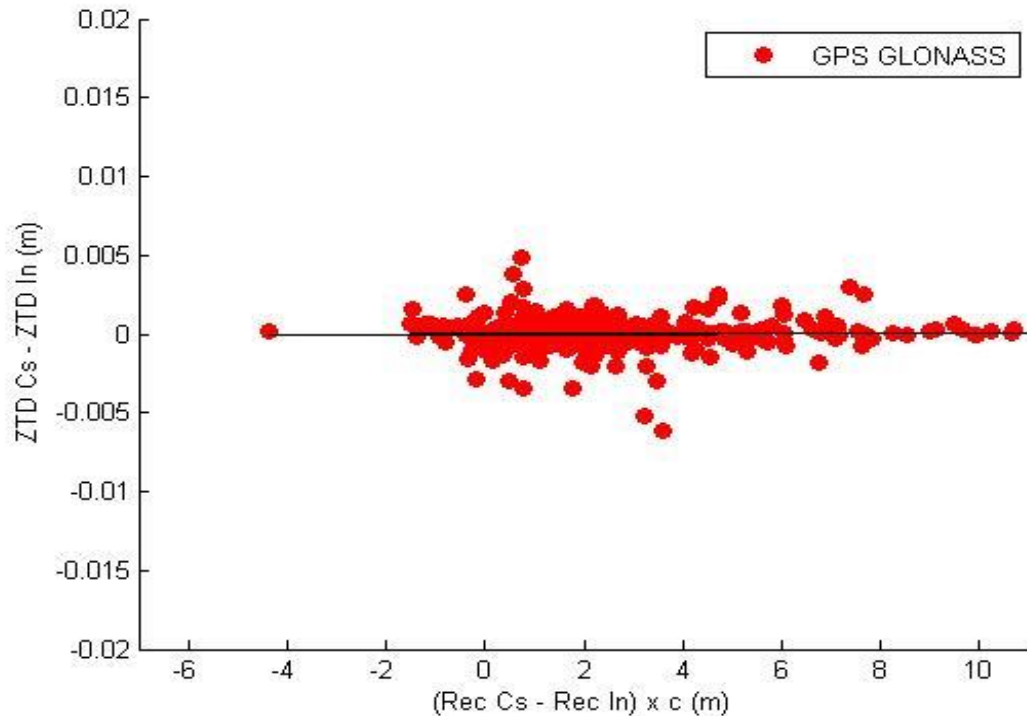
จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง กับค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ ทั้ง 23 วัน ที่สถานี NIMT จะมีค่า 0.085 และจากรูปที่ 4 กราฟระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ (Cross Correlation) จะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มของข้อมูลที่ชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ มีความสัมพันธ์กับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาเครื่องรับในระดับต่ำ



รูปที่ 4: กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กรณี ข้อมูล GPS ประมวลผลแบบสถิติ

5.1.1.2 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ ทั้ง 23 วัน ที่สถานี NIMT จะมีค่า 0.026 และจากรูปที่ 5 กราฟระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ (Cross Correlation) จะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มของข้อมูลที่ชัดเจนเช่นเดียวกับกรณี ใช้ข้อมูล GPS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ มีความสัมพันธ์กับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาเครื่องรับอยู่ในระดับต่ำ

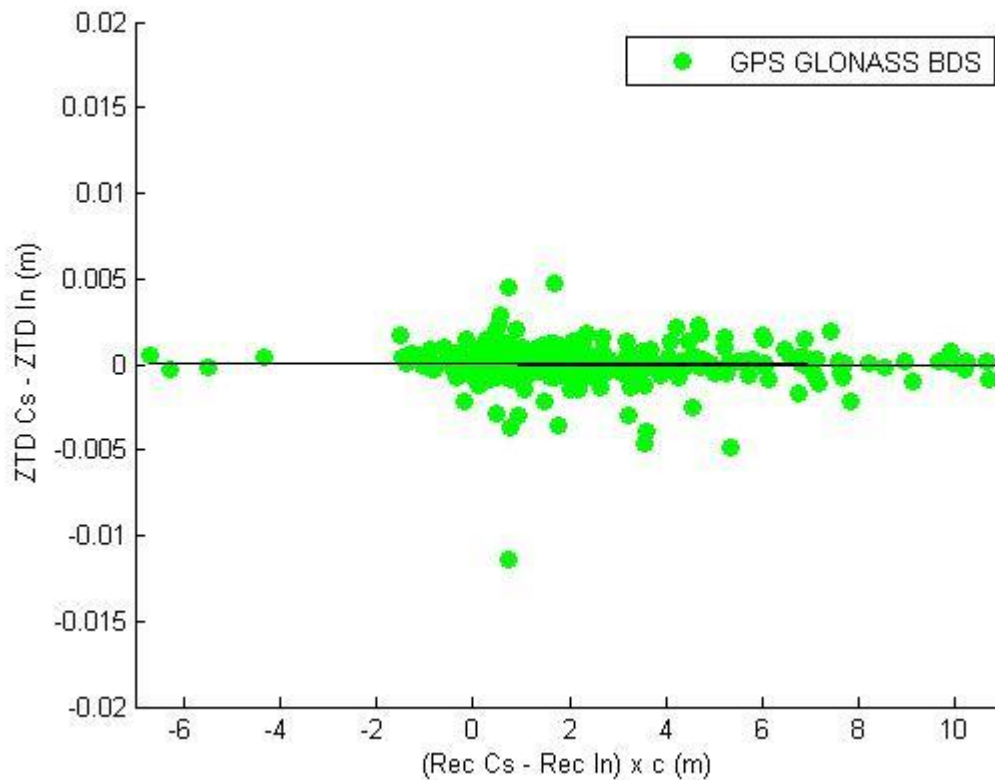


รูปที่ 5: กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กรณี ข้อมูล GPS GLONASS ประมวลผลแบบสถิติ

5.1.1.3 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ ทั้ง 23 วัน ที่สถานี NIMT จะมีค่า -0.002 และจากรูปที่ 6 กราฟระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ (Cross Correlation) จะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มของข้อมูลที่ชัดเจนเช่นเดียวกับกรณี เช่นเดียวกับกรณีใช้ข้อมูล GPS และ กรณี ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง มีความสัมพันธ์ในระดับต่ำกับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทร

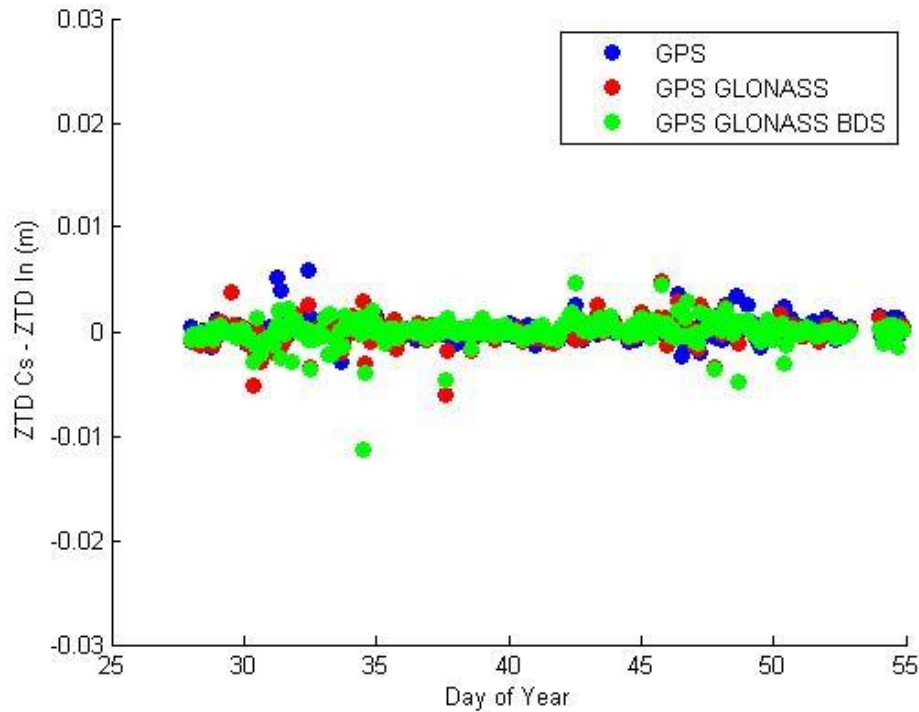
โพสเพียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาเครื่องรับ



รูปที่ 6: กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กรณี ข้อมูล GPS GLONASS ประมวลผลแบบสถิติ

5.1.2 ความแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ

จากรูปที่ 7 ซึ่งแสดงค่าแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ทั้งกรณีข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou ทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 23 วัน ซึ่งจะมีค่า RMSE อยู่ในระดับ 1 มิลลิเมตรโดยประมาณ ทั้ง 3 กรณีการใช้ข้อมูล GPS ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou อีกทั้งค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง (mean difference) จะมีค่าที่ใกล้ 0 ทุกกรณี ซึ่งแสดงในตารางที่ 7



รูปที่ 7: ผลต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ทั้งกรณีข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou ทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 23 วัน ในการประมวลแบบสถิตย์

กรณีข้อมูล	ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Difference)		ค่า RMSE	
	mm	%	mm	%
GPS	0.100	0.01	0.80	0.03
GPS ร่วมกับ GLONASS	0.030	0.01	1.00	0.04
GPS ร่วมกับ GLONASS Beidou	0.003	0.02	1.20	0.05

ตารางที่ 7: เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Difference) และ ค่า RMSE ในแต่ละกรณีการใช้ข้อมูล ในการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static)

5.2 ผลลัพธ์จากการประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic)

5.2.1 ความสัมพันธ์ของความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับกับค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับ

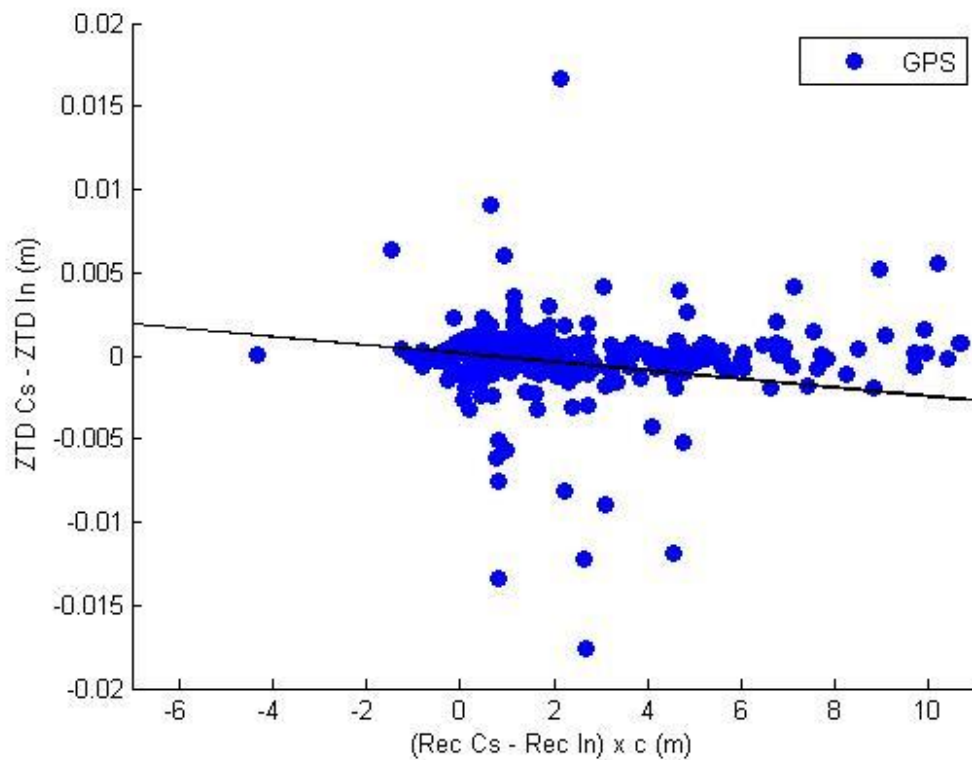
5.2.1.1 กรณีข้อมูล GPS

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณด้วยความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับ ทั้ง 23 วัน ที่สถานี NIMT ที่ได้จากการประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic) จะมีค่า -0.27 และจากรูปที่ 8 กราฟ Cross Correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณด้วยความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับ จะเห็นว่าแนวโน้มของข้อมูลนั้นไม่ชัดเจน แสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ที่ต่ำซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณด้วยความเร็วแสง มีความสัมพันธ์ในระดับต่ำกับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาเครื่องรับ และจะเห็นว่ามีบางช่วงที่ผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาภายในเครื่องรับเกิดความแตกต่างที่มากเนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาที่ได้จากนาฬิกาภายในเครื่องรับ เกิดจากความไม่เสถียรขึ้นในช่วงเวลานั้นของนาฬิกาภายในเครื่องรับ และจำนวนข้อมูลรังวัด (Observation) ที่น้อย ในการประมวลผลแบบจลน์ (PPP Kinematic) ทำให้เกิดความผิดพลาดที่มากในการประมาณค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ

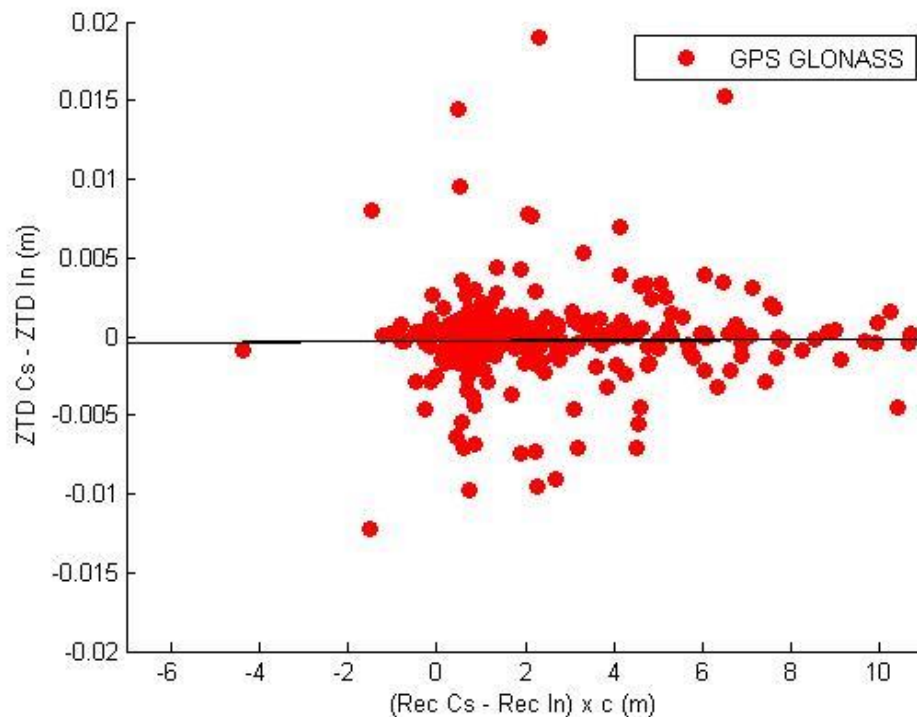
5.2.1.2 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณด้วยความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับ ทั้ง 23 วัน ที่สถานี NIMT ที่ได้จากการประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic) จะมีค่า 0.007 และจากรูปที่ 9 กราฟ Cross Correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับคูณด้วยความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพส

เพียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ แนวโน้มของข้อมูลที่ไม่ชัดเจน เช่นเดียวกันกับกรณี GPS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง มีความสัมพันธ์ในระดับต่ำกับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเพียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเพียร์ที่ได้จากนาฬิกาเครื่องรับ



รูปที่ 8: กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเพียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กรณี ข้อมูล GPS ประมวลผลแบบจลน์

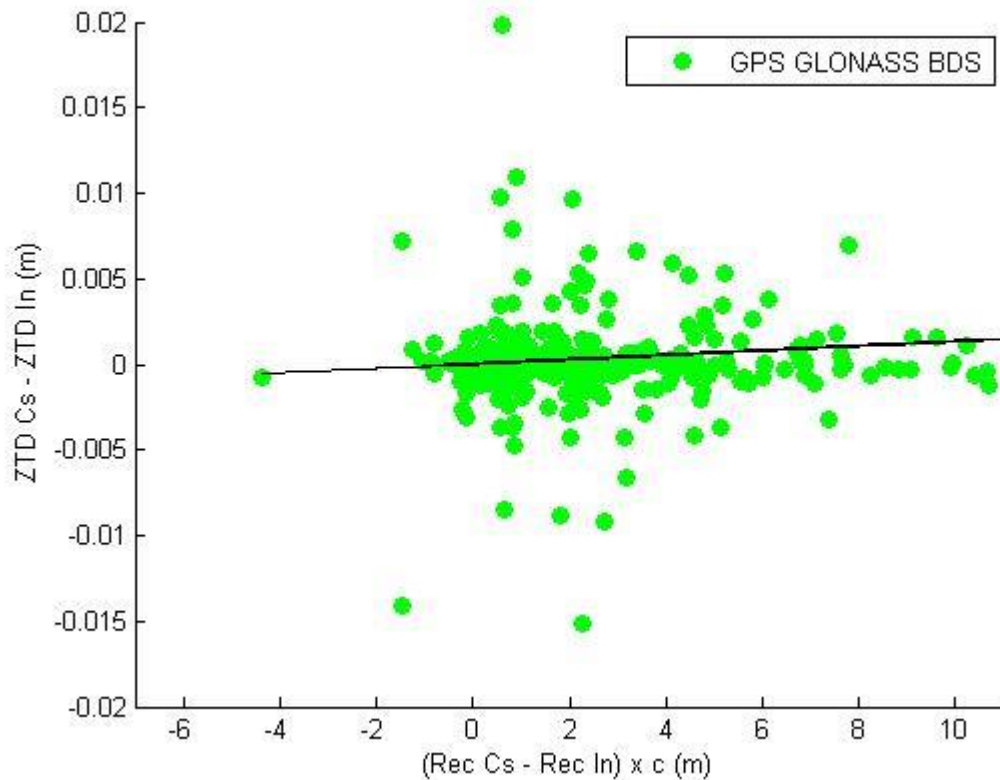


รูปที่ 9: กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กรณี ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ประมวลผลแบบจลน์

5.2.1.3 กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณด้วยความเร็วแสง กับ ผลต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ ทั้ง 23 วัน ที่สถานี NIMT ที่ได้จากการประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic) จะมีค่า 0.096 และจากรูปที่ 9 กราฟ Cross Correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับคูณด้วยความเร็วแสง กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ แนวโน้มของข้อมูลที่ไม่ชัดเจน เช่นเดียวกับกรณี GPS และ กรณี GPS ร่วมกับ GLONASS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณความเร็วแสง มีความสัมพันธ์ในระดับต่ำกับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้น

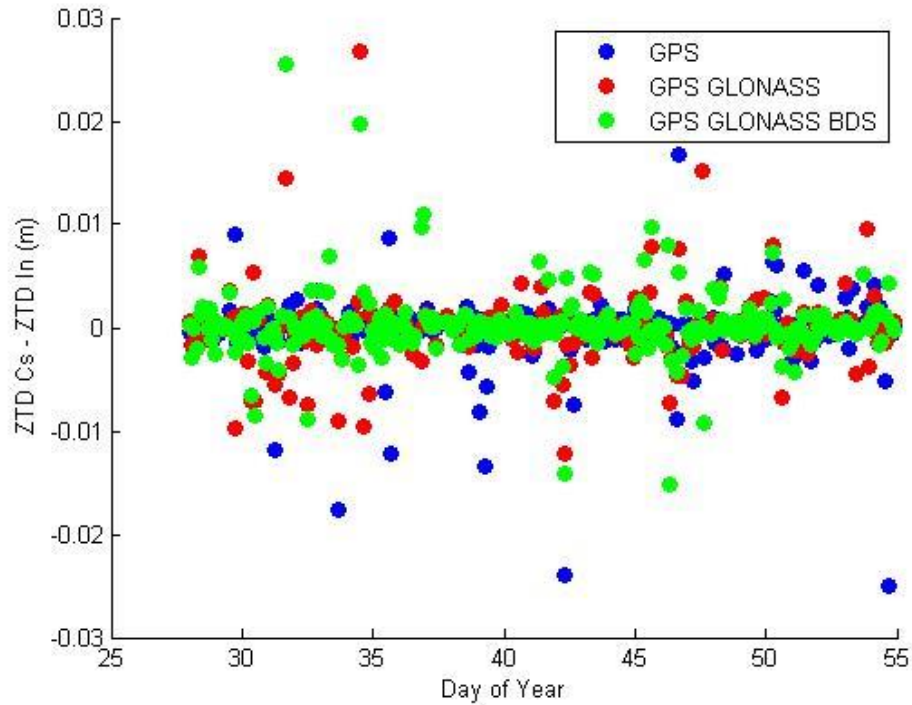
บรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาเครื่องรับ



รูปที่ 10: กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กับ ค่าต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ กรณี ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou ประมวลผลแบบจลน์

5.2.2 ความแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ

จากรูปที่ 11 ซึ่งแสดงค่าแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ทั้งกรณีข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou ทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 23 วัน จากการประมวลผลแบบจลน์ (PPP kinematic) จะมีค่า RMSE ของกรณีข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS กรณี GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou เป็น 7 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่หว่าค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง (mean difference) จะมีค่าที่ใกล้ 0 ทุกกรณีซึ่งแสดงในตารางที่ 8



รูปที่ 11: ผลต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับในแต่ละกรณีการใช้ข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 23 วัน ในการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic)

กรณีข้อมูล	ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Difference)		ค่า RMSE	
	mm	%	mm	%
GPS	-0.5	-0.0201	7.3	0.2942
GPS ร่วมกับ GLONASS	-0.2	-0.0101	5.2	0.2101
GPS ร่วมกับ GLONASS Beidou	0.4	0.0156	3.9	0.1587

ตารางที่ 8: เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Difference) และ ค่า RMSE ในแต่ละกรณีการใช้ข้อมูล ในการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic)

5.3 ผลการทดสอบทางสถิติ

จากการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวน (F-test) ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ในการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) และการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) ในกรณีการใช้ข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และกรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou จากการทดสอบโดยการใช้ข้อมูลตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง และกำหนดระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% จะพบที่มีความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาภายในเครื่องรับอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) และการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) ในทุกกรณีการใช้ข้อมูล ซึ่งผลลัพธ์การทดสอบจะแสดงอยู่ในตารางที่ 9 และตารางที่ 10 ตามลำดับ

กรณีการใช้ข้อมูล	ผลการทดสอบทางสถิติในการประมวลผลแบบสถิตย์		
	F-value	dF	P-value
ข้อมูล GPS	1.0104	29	0.9779
ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS	1.0055	29	0.9883
ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	0.9959	29	0.9912

ตารางที่ 9: ผลการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวน (F-test) ในการประมวลผลแบบสถิตย์

กรณีการใช้ข้อมูล	ผลการทดสอบทางสถิติในการประมวลผลแบบจลน์		
	F-value	dF	P-value
ข้อมูล GPS	0.9956	29	0.9906
ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS	1.0136	29	0.9713
ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	0.9406	29	0.8701

ตารางที่ 10: ผลการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวน (F-test) ในการประมวลผลแบบจลน์

บทที่ 6

อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัยในประเด็นต่างๆ ข้อจำกัดในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้และข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยหรือเทคนิควิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

6.1 อภิปรายผล

จากวิเคราะห์ผลลัพธ์ประกอบไปด้วย กราฟ Cross Correlation ระหว่างระหว่างผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณด้วยความเร็วแสง กับ ผลต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างผลต่างของค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับที่คูณด้วยความเร็วแสง กับ ผลต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ รวมถึงค่า RMSE และ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง (Mean Difference) ของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ การประมวลผลข้อมูล GNSS ที่ใช้ข้อมูลนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับข้อมูลที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับ แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงทั้งแบบสถิตย์ (Static) และแบบจลน์ (Kinematic) ในกรณีการใช้ข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และกรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou ทุกๆ 2 ชั่วโมง ทั้งหมด 26 วัน จากกราฟ cross correlation ที่มีแนวโน้มของข้อมูลที่ไม่ชัดเจน และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ที่มีค่าใกล้ 0 ทุกกรณีการใช้ข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และกรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou ทั้งการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) และ การประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) จะเห็นว่าความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับที่ได้จากการประมาณค่าจากข้อมูลที่ใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับส่งผลกระทบต่อในระดับที่ต่ำกับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างผลลัพธ์ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ และจากการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวน (F-test) ทางสถิติ รวมทั้งค่า RMSE รวมถึงค่าเฉลี่ยของความ

แตกต่าง (Mean Difference) แสดงให้เห็นถึงระดับความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ทุกกรณีการใช้ข้อมูล ทั้งการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) และการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic)

แม้ว่าความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทว่าระดับความแตกต่างที่เกิดขึ้นกับการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) นั้นกลับมากกว่าการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) โดยค่า RMSE ของการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) นั้น จะมีค่าอยู่ในระดับ 1 มิลลิเมตร โดยประมาณทั้งกรณีการใช้ข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และกรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou และในส่วนของ การประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) ในกรณีการใช้ข้อมูล GPS กรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และกรณีข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou จะอยู่ในระดับ 7 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร โดยประมาณตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเกิดจากรายละเอียดการประมวลผลที่ต่างกัน โดยการประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) นั้นจะใช้ข้อมูลทั้งหมด 24 ชั่วโมงมาทำการประมาณค่าพิคัด 3 มิติแต่จะทำการประมาณค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับทุกช่วงข้อมูล (epoch by epoch) และค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทุกๆ 2 ชั่วโมง แต่ทว่าการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) นั้นจะใช้ข้อมูลในแต่ละช่วงข้อมูล (epoch) พร้อมกับประมาณค่าพิคัด 3 มิติพร้อมกับค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับและค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทุกๆ 2 ชั่วโมง ซึ่งจากจำนวนข้อมูล (Observation) ที่ใช้ในการประมาณค่า และความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิคัดทางตั้ง (Vertical) ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ และ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Dach et al., 2003, Weinbach and Schon, 2011, Zongqiu et al., 2012, Weinbach and Schon, 2010) ที่ขณะทำการประมาณค่า จะส่งผลให้ในการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) เกิดความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาเครื่องรับ มากกว่าแบบสถิตย์ (Static)

จากการทบทวนวรรณกรรมในปัจจุบัน การใช้นาฬิกาอะตอมทำการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning :PPP) นั้นจะต้องมีการปรับแบบจำลองสโตคาสติก (Stochastic modeling) ให้เหมาะสมกับนาฬิกาอะตอมชนิดต่างๆ เพื่อให้เห็นผลกระทบกับค่าพิคัดทางตั้งในการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) (Kan and Rothacher, 2013) รวมถึงการสร้างแบบจำลองนาฬิกาให้มีความเหมาะสมกับนาฬิกาอะตอม (Weinbach and Schon, 2011) และด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิคัดทางตั้ง (Vertical) ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ และ ค่าคลาดเคลื่อน

เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ อาจส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) แต่การประมวลผลแบบสถิตย์ (Static) ไม่ว่าจะใช้นาฬิกาอะตอมหรือใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับจะมีผลกระทบอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Weinbach and Schon, 2011, Kan and Rothacher, 2013) ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนหรือ ใช้แบบจำลองนาฬิกาที่เหมาะสมกับนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็ม ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ระดับความแตกต่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

6.2 สรุปผล

จากการอภิปรายผลข้างต้น จะสรุปได้ว่าในการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงทั้งแบบสถิตย์ (PPP static) และแบบจลน์ (PPP kinematic) เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ด้วยนาฬิกาความเสถียรภาพสูง เช่น นาฬิกาอะตอม ในงานวิจัยนี้ใช้นาฬิกาอะตอมซีซีเอ็ม โดยใช้โปรแกรมเชิงวิจัย Position and Navigation Data Analyst (PANDA) ทำการประมวลผลเป็นเวลา 23 วัน พบว่าการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (PPP Static) และการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP Kinematic) ด้วยการใช้นาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มในการรับสัญญาณ GNSS เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยผลลัพธ์ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็ม มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับ แม้ว่าระดับความแตกต่างระหว่างค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาเครื่องรับจากการประมวลผลแบบจลน์ (Kinematic) จะมากกว่าแบบสถิตย์ (Static) ก็ตาม อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดีในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถปรับแบบจำลองค่าคลาดเคลื่อนที่เหมาะสมกับนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงการใช้แบบจำลองนาฬิกาที่เหมาะสมสำหรับนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็ม ซึ่งเป็นข้อจำกัดของโปรแกรมเชิงวิจัย PANDA ได้ และอาจเป็นสาเหตุทำให้เห็นผลกระทบค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการใช้นาฬิกาเสถียรภาพสูงในการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ควรมีการปรับแบบจำลองสโตคาสติก (Stochastic model) ในโปรแกรมเชิงวิจัย PANDA ให้เหมาะสมกับนาฬิกาเสถียรภาพสูงสำหรับการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) อาจส่งผลให้เกิดผลกระทบกับค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จากการใช้นาฬิกาเสถียรภาพสูง

6.3.2 ควรมีการตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation) ที่ได้จากซอฟต์แวร์ PANDA เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถตรวจสอบได้อันเนื่องมาจากข้อมูลนั้นอยู่ในรูปแบบเลขฐานสอง (Binary format)

6.3.3 ควรมีการใช้นาฬิกาอะตอมชนิดอื่น ได้แก่ ไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-maser) และ รูบิเดียม (Rubidium Frequency Standard) ร่วมทดสอบในการรับสัญญาณด้วยเพื่อให้เห็นผลลัพธ์ที่ครอบคลุมมากขึ้นในการใช้นาฬิกาอะตอมที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากประเทศไทยมีแค่นาฬิกาซีเซียม (Cesium Frequency Standard) ดังนั้นผู้วิจัยจึงสามารถทดสอบได้แค่นาฬิกาอะตอมชนิดเดียวเท่านั้น

6.3.4 ควรมีการเปรียบเทียบการใช้ข้อมูลวงโคจรและข้อมูลนาฬิกาดาวเทียมจากศูนย์วิเคราะห์ GNSS ต่างๆ เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่

6.3.5 ควรมีการประมวลผลเปรียบเทียบในมุมสูงดาวเทียมที่ต่างกันเพื่อดูผลกระทบค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จากมุมสูงที่ต่างกันเนื่องจากอาจมีค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก mapping function อาจทำให้การใช้นาฬิกาเสถียรภาพสูงเกิดผลกระทบกับค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

6.3.6 ควรมีการเพิ่มระยะเวลาการรับสัญญาณ GNSS ให้ยาวขึ้นถึง 1 ปีโดยประมาณเพื่อให้เห็นผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแต่ละช่วงเวลาของปี ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาโดยเฉพาะฤดูฝน ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีความแปรปรวนที่สูงเนื่องจากปริมาณไอน้ำในอากาศซึ่งอาจทำให้เห็นผลกระทบที่ชัดเจนจากการใช้นาฬิกาที่มีความเสถียรภาพสูงในการประมวลผล

BOEHM, J., WERL, B. & SCHUH, H. 2006. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, 111.

CHRIS, R. 2010. Manual of Geospatial Science and Technology: GPS, GNSS and the Future, 2nd ed., CRC Press.

DACH, R., BEUTLER, G., HUGENTOBLER, U., SCHAER, S., SCHILDKNECHT, T., SPRINGER, T., DUDLE, G. & PROST, L. 2003. Time transfer using GPS carrier phase: error propagation and results. *Journal of Geodesy*, 1–14.

J. SANZ SUBIRANA, J. M. J. Z. A. M. H.-P. 2013. *GNSS DATA PROCESSING*, ESA Communications

ESTEC, PO Box 299, 2200 AG Noordwijk, the Netherlands

Tel: +31 71 565 3408 Fax: +31 71 565 5433 www.esa.int.

KAN, W. & ROTHACHER, M. 2013. Stochastic modeling of high-stability ground clocks in GPS analysis. *Springer*, 427–437.

KOUBA, J. & HÉROUX, P. 2000. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5, 12-28.

LI, M., QU, L., ZHAO, Q., GUO, J., SU, X. & LI, X. 2014. Precise point positioning with the BeiDou navigation satellite system. *Sensors (Basel)*, 14, 927-43.

NEILL, A. E. 1996. Global mapping functions for atmosphere delay at radio wavelength. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2):3227–3246, 3227-3246.

ROTHACHER, M. & BEUTLER, G. 1998. The Role of GPS in the Study of Global Change. *Pergamon*, 1029-1040.

SATIRAPOD, C. & CHALERMWATTANACHAI, P. 2005. Impact of Different Tropospheric Models on GPS Baseline Accuracy: Case study in Thailand. *Journal of Global Positioning Systems*, 4, 36-40.

UHLEMANN, M., GENDT, G., RAMATSCHI, M. & DENG, Z. 2012. GFZ Global Multi-GNSS Network and Data Processing Results. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

WANG, F., CHEN, X. & GUO, F. 2015. GPS/GLONASS Combined Precise Point Positioning with. *Sensors*.

WEINBACH, U. & SCHON, S. On the correlation of tropospheric zenith path delay and station clock estimates in geodetic GNSS frequency transfer. EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, 13-16 April 2010 2010. 1-8.

WEINBACH, U. & SCHON, S. 2011. GNSS receiver clock modeling when using high-precision oscillators and its impact on PPP. *sciencedirect*, 229-238.

WU, J. T., WU, S. C., HAJJ, G. A., BERTIGER, W. I. & LICHTEN, S. M. 1993. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 91-98.

ZONGQIU, X. U., AIGONG, X. U., XINCHAO, X. U. & JISHAN, L. 2012. Research on the Correlation of Troposphere Delay Parameters in GPS. *INTERNATIONAL JOURNAL ON Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 4, 336-343.



รายการอ้างอิง





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก. ตารางแสดงค่าตลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเซียม
และนาฬิกาภายในเครื่องรับทุกๆ 2 ชั่วโมงทั้งหมด 26 วัน ในการประมวลผลแบบสถิติ



ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าตลาดเคลื่อนที่บนบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
28.000	2.55477	2.55425	2.55322	2.55412	2.55457	2.55534
28.083	2.54731	2.54741	2.54762	2.5479	2.54819	2.54839
28.167	2.54044	2.54063	2.53783	2.53843	2.53827	2.53864
28.250	2.54189	2.54238	2.54033	2.54138	2.54146	2.54223
28.333	2.54439	2.5444	2.54034	2.54157	2.54257	2.54272
28.417	2.54653	2.54641	2.54544	2.54622	2.54577	2.54655
28.500	2.54846	2.54848	2.54644	2.5472	2.54714	2.5477
28.583	2.55449	2.5546	2.55434	2.55484	2.55404	2.5544
28.667	2.5527	2.5526	2.5507	2.55141	2.55123	2.55166
28.750	2.56167	2.56309	2.54805	2.54791	2.55013	2.54992
28.833	2.5616	2.56225	2.55717	2.55855	2.55612	2.55696
28.917	2.56027	2.56044	2.55764	2.55749	2.55953	2.55973
29.000	2.5623	2.56116	2.56067	2.55991	2.56308	2.56268
29.083	2.55609	2.55632	2.55589	2.55497	2.55596	2.55543
29.167	2.55242	2.55234	2.55143	2.55105	2.55097	2.55108
29.250	2.5424	2.54222	2.54282	2.54245	2.54254	2.54251
29.333	2.54009	2.54009	2.53709	2.53639	2.53677	2.53669
29.417	2.5396	2.53938	2.53967	2.5393	2.53863	2.53873
29.500	2.53952	2.53934	2.5379	2.53406	2.53738	2.53753
29.583	2.53468	2.53461	2.53627	2.53562	2.53518	2.53513
29.667	2.53855	2.53839	2.53664	2.53599	2.53674	2.53671

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
29.750	2.55085	2.5506	2.53868	2.53912	2.53762	2.5383
29.833	2.54814	2.5476	2.54767	2.54727	2.54653	2.54668
29.917	2.54539	2.5453	2.54364	2.54317	2.54397	2.54367
30.000	2.5401	2.53985	2.53846	2.53885	2.53961	2.53956
30.083	2.54099	2.54209	2.54093	2.54191	2.5415	2.54217
30.167	2.53982	2.54057	2.53782	2.53892	2.5379	2.53872
30.250	2.53642	2.53638	2.53685	2.53701	2.53583	2.53643
30.333	2.52364	2.52406	2.52006	2.52521	2.52044	2.52341
30.417	2.50752	2.5081	2.50667	2.50874	2.50746	2.50875
30.500	2.50555	2.50595	2.5054	2.50512	2.50617	2.50493
30.583	2.52016	2.52026	2.52154	2.52256	2.52094	2.52246
30.667	2.53318	2.53475	2.53309	2.536	2.53431	2.53648
30.750	2.56077	2.56207	2.55488	2.55651	2.56201	2.5628
30.833	2.5627	2.56299	2.56043	2.56148	2.56119	2.56201
30.917	2.56207	2.56224	2.56017	2.56161	2.55878	2.55963
31.000	2.54899	2.54858	2.55066	2.55122	2.55151	2.55201
31.083	2.5422	2.54176	2.54214	2.54417	2.54472	2.54606
31.167	2.54622	2.54585	2.54952	2.54948	2.55147	2.55122
31.250	2.55834	2.55318	2.54603	2.54601	2.54681	2.54626
31.333	2.54481	2.54513	2.53815	2.53833	2.53957	2.53757
31.417	2.49345	2.48952	2.49941	2.50088	2.4979	2.50038
31.500	2.47595	2.47508	2.46937	2.47008	2.46939	2.46957
31.583	2.49453	2.49384	2.49347	2.49392	2.49378	2.4937

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
31.667	2.51151	2.51048	2.50733	2.5053	2.50836	2.50611
31.750	2.52393	2.52365	2.52363	2.52318	2.52447	2.52368
31.833	2.51301	2.51306	2.51299	2.51597	2.51245	2.51534
31.917	2.49893	2.49876	2.49811	2.4964	2.49902	2.49786
32.000	2.49549	2.49452	2.49456	2.49395	2.49538	2.4953
32.083	2.49649	2.49633	2.49731	2.49748	2.49827	2.49844
32.167	2.51254	2.5124	2.51186	2.51181	2.51043	2.51047
32.250	2.49931	2.49839	2.49987	2.49984	2.49952	2.49938
32.333	2.49568	2.49454	2.49478	2.49519	2.49386	2.49365
32.417	2.54441	2.53857	2.53578	2.53329	2.53368	2.53446
32.500	2.56262	2.5632	2.55382	2.55725	2.55278	2.55629
32.583	2.56002	2.55989	2.56039	2.56026	2.56057	2.5612
32.667	2.5508	2.54958	2.55278	2.55291	2.55301	2.55386
32.750	2.55487	2.55418	2.54549	2.54531	2.54717	2.54729
32.833	2.55364	2.55275	2.54931	2.54895	2.54936	2.54921
32.917	2.56153	2.56065	2.55921	2.55884	2.55982	2.56006
33.000	2.56105	2.5605	2.56116	2.56089	2.56218	2.5626
33.083	2.56979	2.56949	2.5749	2.5749	2.57595	2.57471
33.167	2.55469	2.55434	2.5585	2.55745	2.55576	2.55792
33.250	2.53183	2.53192	2.53393	2.53435	2.53645	2.53486
33.333	2.52416	2.52402	2.52377	2.52411	2.52426	2.52644
33.417	2.5215	2.52125	2.52334	2.52365	2.52356	2.5242
33.500	2.51847	2.51814	2.521	2.52116	2.51993	2.52082

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
33.583	2.52107	2.52069	2.52371	2.52378	2.52251	2.52242
33.667	2.51354	2.51647	2.51762	2.51971	2.51596	2.51735
33.750	2.50645	2.50725	2.49261	2.49394	2.4951	2.49657
33.833	2.50798	2.507	2.50584	2.50469	2.50613	2.5047
33.917	2.5119	2.51151	2.51274	2.51295	2.5123	2.51201
34.000	2.51141	2.51116	2.51249	2.51136	2.51422	2.51366
34.083	2.50311	2.50295	2.50448	2.50293	2.50361	2.50244
34.167	2.49847	2.49837	2.4981	2.4973	2.49763	2.4973
34.250	2.48473	2.48459	2.48796	2.48688	2.48723	2.48649
34.333	2.47215	2.47209	2.47255	2.47274	2.47377	2.4724
34.417	2.46744	2.46738	2.46862	2.46839	2.46832	2.46865
34.500	2.46059	2.46007	2.46247	2.45957	2.45047	2.46183
34.583	2.45294	2.45308	2.45088	2.45392	2.45025	2.45418
34.667	2.44748	2.44752	2.44758	2.44582	2.45106	2.44954
34.750	2.45733	2.45725	2.44868	2.44964	2.45042	2.45026
34.833	2.46657	2.4665	2.46585	2.46455	2.46522	2.46323
34.917	2.47094	2.47081	2.47369	2.47222	2.47507	2.47434
35.000	2.49089	2.48947	2.49083	2.49011	2.49189	2.49111
35.083	2.49379	2.49391	2.49331	2.49357	2.49266	2.49292
35.167	2.49033	2.49098	2.49163	2.49177	2.49096	2.49131
35.250	2.48403	2.48435	2.48525	2.48568	2.4849	2.48526
35.333	2.48092	2.48118	2.48133	2.4821	2.48023	2.48144
35.417	2.492	2.49257	2.4916	2.49214	2.4913	2.4919

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
35.500	2.5041	2.50373	2.50578	2.50525	2.5046	2.50427
35.583	2.49919	2.49939	2.50195	2.50276	2.50041	2.50098
35.667	2.49599	2.49514	2.49517	2.49397	2.49243	2.49211
35.750	2.48092	2.48087	2.47266	2.4744	2.47452	2.47516
35.833	2.48489	2.48593	2.48178	2.48274	2.48125	2.48193
35.917	2.4904	2.49031	2.49166	2.49188	2.49328	2.49334
36.000	2.48961	2.4895	2.49101	2.49101	2.49146	2.49117
36.083	2.48923	2.48902	2.49083	2.49093	2.49045	2.49038
36.167	2.48645	2.48671	2.4861	2.48623	2.48596	2.48595
36.250	2.47358	2.47364	2.47346	2.47346	2.47345	2.47339
36.333	2.46816	2.46826	2.46929	2.46942	2.46913	2.46897
36.417	2.47161	2.47196	2.4705	2.47081	2.47101	2.47106
36.500	2.47075	2.47162	2.47196	2.47186	2.47197	2.47161
36.583	2.4726	2.47286	2.4737	2.47297	2.47317	2.47279
36.750	2.47026	2.47041	2.46046	2.46019	2.4637	2.46359
36.833	2.47161	2.47157	2.46885	2.46971	2.46999	2.47057
36.917	2.46906	2.46917	2.46872	2.46945	2.47196	2.47263
37.000	2.47984	2.47982	2.47847	2.47835	2.47965	2.47932
37.083	2.4844	2.48437	2.48391	2.48332	2.48408	2.48356
37.167	2.48074	2.48074	2.4802	2.4798	2.48042	2.48002
37.250	2.46833	2.46813	2.46849	2.46784	2.46893	2.46823
37.333	2.46364	2.46375	2.46242	2.46251	2.46212	2.46231
37.417	2.45255	2.45275	2.45041	2.45043	2.45088	2.45102

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
37.500	2.44078	2.43993	2.438	2.43735	2.43756	2.43726
37.583	2.43744	2.43727	2.43177	2.43789	2.43246	2.43709
37.667	2.42904	2.42941	2.4211	2.42297	2.42517	2.42378
37.750	2.42412	2.424	2.41687	2.41646	2.41744	2.41728
37.833	2.42913	2.429	2.42725	2.42701	2.42767	2.42737
37.917	2.42158	2.4215	2.42054	2.42009	2.42091	2.42058
38.000	2.40887	2.41007	2.40932	2.40946	2.40993	2.41015
38.083	2.41266	2.413	2.4126	2.41232	2.41274	2.41253
38.167	2.41673	2.41681	2.41569	2.4157	2.41623	2.41627
38.250	2.40887	2.40889	2.40994	2.40984	2.41011	2.41001
38.333	2.40433	2.40441	2.40503	2.40482	2.40528	2.40494
38.417	2.40505	2.40492	2.40347	2.40327	2.40349	2.40312
38.500	2.39688	2.39704	2.39659	2.39709	2.39589	2.39623
38.583	2.39183	2.39186	2.39154	2.3933	2.39108	2.39277
38.667	2.3915	2.39211	2.38894	2.38893	2.38791	2.38809
38.750	2.38008	2.38012	2.37607	2.3761	2.37638	2.37651
38.833	2.37767	2.37713	2.37655	2.37597	2.37609	2.37555
38.917	2.37765	2.37798	2.37647	2.37668	2.37746	2.37716
39.000	2.38782	2.38731	2.38763	2.38728	2.38861	2.38729
39.083	2.40262	2.4025	2.40129	2.40156	2.40086	2.40106
39.167	2.4026	2.40262	2.4021	2.40201	2.40263	2.40256
39.250	2.3953	2.39478	2.39601	2.39577	2.39643	2.39614
39.333	2.39094	2.39077	2.39118	2.39077	2.39112	2.39074

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
39.417	2.3928	2.39284	2.39107	2.39137	2.39264	2.39265
39.500	2.39233	2.3922	2.39129	2.39206	2.39087	2.3913
39.583	2.39668	2.39645	2.39812	2.39791	2.39746	2.39701
39.667	2.39464	2.39434	2.39155	2.3919	2.39152	2.39173
39.750	2.38837	2.38832	2.38137	2.38152	2.38237	2.38229
39.833	2.39127	2.39151	2.38814	2.38801	2.38875	2.38813
39.917	2.39048	2.39034	2.38927	2.38885	2.39051	2.38994
40.000	2.39287	2.39216	2.39284	2.3927	2.39338	2.39336
40.083	2.39987	2.39979	2.3995	2.39943	2.399	2.39899
40.167	2.40098	2.40135	2.40159	2.40173	2.40135	2.40156
40.250	2.3969	2.39718	2.3978	2.39788	2.39906	2.399
40.333	2.39532	2.39494	2.39633	2.39613	2.3978	2.39791
40.417	2.40389	2.40415	2.40272	2.40281	2.40332	2.40379
40.500	2.40344	2.4037	2.4025	2.40355	2.40172	2.40248
40.583	2.40344	2.40354	2.40527	2.40596	2.4043	2.40469
40.667	2.4058	2.40543	2.39989	2.40005	2.40051	2.40095
40.750	2.39987	2.39921	2.39391	2.39406	2.39462	2.39475
40.833	2.3995	2.39957	2.39688	2.39746	2.39664	2.39716
40.917	2.39779	2.39789	2.39782	2.39794	2.39802	2.39815
41.000	2.397	2.39837	2.39852	2.39917	2.4004	2.40054
41.083	2.40808	2.40899	2.40897	2.40946	2.4097	2.40919
41.167	2.40958	2.40976	2.41032	2.41098	2.41092	2.41127
41.250	2.41158	2.41099	2.41239	2.41177	2.41336	2.41274

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
41.333	2.4089	2.40912	2.41017	2.40999	2.41084	2.4105
41.417	2.40553	2.40618	2.40471	2.40544	2.40564	2.40604
41.500	2.40264	2.40351	2.40339	2.40434	2.40358	2.40413
41.583	2.40816	2.40897	2.4105	2.41142	2.41087	2.41125
41.667	2.41649	2.41714	2.40988	2.41096	2.4139	2.41408
41.750	2.41042	2.41071	2.40594	2.40667	2.4078	2.40784
41.833	2.4219	2.42238	2.42027	2.42102	2.42003	2.42077
41.917	2.43288	2.43364	2.43342	2.43402	2.43473	2.4351
42.000	2.43045	2.4303	2.4323	2.43254	2.43476	2.43426
42.083	2.43178	2.43137	2.43208	2.43188	2.4323	2.43155
42.167	2.43358	2.43327	2.43535	2.43518	2.43599	2.43515
42.250	2.43025	2.4305	2.43153	2.43168	2.43213	2.43148
42.333	2.44728	2.44767	2.44259	2.44194	2.44276	2.44109
42.417	2.43541	2.43557	2.43663	2.43625	2.43816	2.43637
42.500	2.43053	2.42793	2.42727	2.42811	2.42965	2.42492
42.583	2.43708	2.43683	2.4392	2.43954	2.43833	2.43701
42.667	2.44622	2.44553	2.44448	2.4436	2.44619	2.44497
42.750	2.44378	2.44335	2.44375	2.44323	2.44386	2.44285
42.833	2.4588	2.45952	2.45682	2.45744	2.45782	2.45765
42.917	2.47363	2.47325	2.47337	2.47304	2.47454	2.47368
43.000	2.48889	2.48884	2.48968	2.48915	2.48981	2.48925
43.083	2.48801	2.48786	2.48756	2.48715	2.48645	2.48652
43.167	2.49336	2.49314	2.49333	2.49283	2.49269	2.49266

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
43.250	2.48559	2.48443	2.48794	2.48663	2.48649	2.48545
43.333	2.48188	2.48217	2.48092	2.47843	2.48264	2.48198
43.417	2.46826	2.46834	2.46788	2.46635	2.46828	2.46696
43.500	2.4684	2.46829	2.46884	2.46842	2.46869	2.46845
43.583	2.47938	2.47905	2.48027	2.4803	2.47828	2.47813
43.667	2.49255	2.49223	2.48986	2.48925	2.48861	2.48813
43.750	2.48669	2.48639	2.48758	2.48698	2.48814	2.48757
43.833	2.49151	2.49137	2.48859	2.4881	2.49011	2.4887
43.917	2.48872	2.48819	2.48919	2.48847	2.48959	2.48898
44.000	2.49313	2.4933	2.49455	2.49364	2.49483	2.49446
44.083	2.49776	2.49772	2.4982	2.49827	2.49782	2.49782
44.167	2.50074	2.50074	2.50147	2.50132	2.50178	2.50165
44.250	2.48907	2.48914	2.49071	2.49066	2.49119	2.49109
44.333	2.47444	2.47441	2.47503	2.47506	2.4758	2.4757
44.417	2.45649	2.45634	2.45711	2.45704	2.45743	2.45726
44.500	2.43201	2.43292	2.43487	2.4354	2.43483	2.43519
44.583	2.43237	2.43245	2.43306	2.43304	2.4319	2.43181
44.667	2.44955	2.44946	2.44907	2.44865	2.44818	2.44761
44.750	2.45966	2.4598	2.45743	2.45754	2.45819	2.45785
44.833	2.47393	2.47474	2.47291	2.47327	2.47284	2.47312
44.917	2.48305	2.48336	2.48277	2.48246	2.48333	2.48339
45.000	2.49863	2.49797	2.49723	2.49542	2.49785	2.49645
45.083	2.50819	2.508	2.50871	2.50814	2.50839	2.50813

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
45.167	2.50527	2.50525	2.50493	2.50439	2.50562	2.50528
45.250	2.49228	2.4922	2.49185	2.49133	2.49358	2.49329
45.333	2.48501	2.48474	2.4784	2.47845	2.47775	2.47829
45.417	2.4762	2.4762	2.47397	2.47276	2.47332	2.47224
45.500	2.47356	2.47334	2.47276	2.47194	2.47215	2.47145
45.583	2.484	2.48372	2.48329	2.48246	2.48215	2.4813
45.667	2.49545	2.49552	2.49487	2.49364	2.49434	2.49334
45.750	2.51703	2.51677	2.51365	2.50884	2.51329	2.50875
45.833	2.52872	2.52871	2.52757	2.52741	2.52479	2.52475
45.917	2.53725	2.53668	2.53578	2.53448	2.53529	2.53492
46.000	2.53502	2.5353	2.53575	2.53706	2.53988	2.53907
46.083	2.53859	2.53873	2.53742	2.53783	2.53793	2.53841
46.167	2.5219	2.52207	2.52321	2.52216	2.52365	2.52344
46.250	2.51342	2.51367	2.51281	2.51323	2.51209	2.5126
46.333	2.5058	2.50631	2.49829	2.49799	2.49013	2.49081
46.417	2.50078	2.49721	2.49969	2.49676	2.50127	2.49933
46.500	2.52889	2.53126	2.5297	2.528	2.53134	2.52918
46.583	2.54766	2.54876	2.54481	2.54532	2.54453	2.54505
46.667	2.54869	2.54818	2.55215	2.55117	2.55279	2.55148
46.750	2.56454	2.56602	2.56063	2.5601	2.56283	2.55995
46.833	2.57013	2.5703	2.56683	2.56723	2.56641	2.56691
46.917	2.56722	2.56767	2.566	2.56571	2.56673	2.56726
47.000	2.57044	2.57104	2.57059	2.57188	2.57136	2.57238

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
47.083	2.57021	2.57049	2.56935	2.56945	2.57075	2.57076
47.167	2.57481	2.57532	2.57432	2.57607	2.57478	2.57588
47.250	2.56973	2.5717	2.57181	2.56933	2.57707	2.5753
47.333	2.56551	2.56461	2.56648	2.56471	2.56608	2.56434
47.417	2.56494	2.56539	2.56344	2.56311	2.56466	2.56452
47.500	2.57264	2.57211	2.57292	2.57256	2.57099	2.57072
47.583	2.57205	2.5721	2.57322	2.57213	2.57171	2.57022
47.667	2.57087	2.56973	2.56871	2.56808	2.5696	2.56882
47.750	2.56822	2.56827	2.56198	2.56538	2.56196	2.56559
47.833	2.56968	2.57028	2.56769	2.56696	2.56779	2.56689
47.917	2.56885	2.56914	2.56734	2.56723	2.56876	2.56848
48.000	2.56016	2.55854	2.56394	2.56321	2.56349	2.56194
48.083	2.56938	2.57012	2.56633	2.56662	2.56614	2.56598
48.167	2.53298	2.53047	2.529	2.52669	2.52984	2.5276
48.250	2.50239	2.50268	2.4983	2.49705	2.49745	2.49601
48.333	2.48807	2.4883	2.48533	2.48507	2.48556	2.48516
48.417	2.48914	2.48881	2.48625	2.48607	2.48633	2.48615
48.500	2.49044	2.49097	2.48825	2.48806	2.48575	2.48607
48.583	2.49301	2.48964	2.48785	2.48736	2.48683	2.48595
48.667	2.51602	2.51553	2.49221	2.49335	2.48857	2.49347
48.750	2.48865	2.48838	2.48582	2.48557	2.48632	2.48532
48.833	2.48406	2.48389	2.48418	2.48381	2.48284	2.4823
48.917	2.4961	2.49583	2.49434	2.49345	2.49512	2.49424

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
49.000	2.49416	2.49168	2.49399	2.49281	2.49346	2.49237
49.083	2.48905	2.48903	2.48993	2.48971	2.48845	2.48815
49.167	2.47595	2.47534	2.47694	2.47647	2.4764	2.47576
49.250	2.46108	2.46034	2.459	2.4593	2.45848	2.45882
49.333	2.46327	2.46407	2.46434	2.46416	2.46306	2.46286
49.417	2.46881	2.46868	2.46734	2.46713	2.46733	2.46703
49.500	2.47557	2.47706	2.47507	2.47588	2.47518	2.47608
49.583	2.47605	2.47573	2.47476	2.47462	2.47278	2.47239
49.667	2.48065	2.48049	2.47823	2.47826	2.47418	2.47416
49.750	2.46612	2.46619	2.46861	2.46853	2.46851	2.46735
49.833	2.45882	2.45853	2.45748	2.4575	2.45773	2.45689
49.917	2.45894	2.45845	2.4578	2.45767	2.45744	2.45732
50.000	2.47202	2.47131	2.47286	2.47355	2.47237	2.47313
50.083	2.48792	2.48783	2.487	2.48686	2.48753	2.4874
50.167	2.50828	2.50694	2.50849	2.50831	2.5084	2.50828
50.250	2.50721	2.50524	2.50423	2.50262	2.50219	2.50183
50.333	2.49895	2.49871	2.49659	2.49663	2.49725	2.49645
50.417	2.46321	2.46084	2.46602	2.46523	2.46176	2.46477
50.500	2.4607	2.46201	2.46098	2.46227	2.46025	2.46149
50.583	2.47672	2.47537	2.47869	2.4781	2.47752	2.47747
50.667	2.51056	2.50939	2.50623	2.50645	2.50586	2.50632
50.750	2.50849	2.50806	2.51152	2.51096	2.51066	2.51032
50.833	2.52816	2.52748	2.52579	2.52609	2.52591	2.52625

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
50.917	2.51628	2.5157	2.51465	2.51466	2.51466	2.51489
51.000	2.50844	2.50837	2.50821	2.50867	2.50954	2.50975
51.083	2.52015	2.52002	2.51992	2.52011	2.52201	2.52212
51.167	2.53635	2.5364	2.53695	2.53732	2.53757	2.53774
51.250	2.52407	2.5242	2.52481	2.5244	2.52459	2.5242
51.333	2.51532	2.51467	2.51526	2.51535	2.51433	2.51446
51.417	2.53025	2.52974	2.52837	2.52825	2.52883	2.52869
51.500	2.54726	2.54634	2.54576	2.54571	2.54637	2.54627
51.583	2.54627	2.5462	2.54726	2.54757	2.5478	2.54816
51.667	2.57039	2.57033	2.56548	2.56617	2.56231	2.56267
51.750	2.56281	2.56331	2.56109	2.56202	2.56091	2.56129
51.833	2.55336	2.55313	2.55427	2.55418	2.55199	2.55201
51.917	2.53978	2.5394	2.53974	2.53973	2.54058	2.54054
52.000	2.5421	2.54075	2.54287	2.54219	2.54205	2.54216
52.083	2.54648	2.5463	2.54704	2.54689	2.54783	2.54781
52.167	2.54607	2.54536	2.54571	2.54538	2.54637	2.54621
52.250	2.55149	2.55134	2.5576	2.55722	2.55727	2.55708
52.333	2.5479	2.54867	2.54791	2.54838	2.54777	2.54833
52.417	2.54373	2.54373	2.543	2.54298	2.54274	2.54283
52.500	2.54317	2.54287	2.543	2.54301	2.54267	2.54278
52.583	2.54985	2.54971	2.55021	2.55012	2.54972	2.54987
52.667	2.55656	2.55645	2.5496	2.54992	2.54997	2.55036
52.750	2.54631	2.5461	2.54564	2.54556	2.54519	2.54523

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
52.833	2.54904	2.54883	2.54866	2.54845	2.54731	2.54731
52.917	2.54594	2.54549	2.54579	2.54544	2.54539	2.54536
54.000	2.52627	2.52473	2.5292	2.52788	2.52752	2.52718
54.083	2.53575	2.53623	2.53755	2.53743	2.53755	2.53768
54.167	2.53445	2.53427	2.53677	2.53688	2.53694	2.5381
54.250	2.53077	2.5302	2.53257	2.53222	2.53129	2.53227
54.333	2.51508	2.51529	2.51573	2.51559	2.5162	2.5155
54.417	2.51787	2.51831	2.52248	2.52216	2.52022	2.52112
54.500	2.53343	2.53219	2.53269	2.53219	2.53436	2.53401
54.583	2.54589	2.54561	2.54643	2.54604	2.54741	2.54678
54.667	2.56912	2.56781	2.56426	2.56384	2.56347	2.56489
54.750	2.57063	2.57095	2.56987	2.56946	2.56973	2.56978
54.833	2.56527	2.56509	2.56505	2.56445	2.56468	2.56442
54.917	2.56455	2.56437	2.56318	2.56276	2.56299	2.56294

ภาคผนวก ข. ตารางแสดงค่าตลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายในเครื่องรับทุกๆ 2 ชั่วโมงทั้งหมด 26 วัน ในการประมวลผลแบบจลน์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
28.000	2.55725	2.55775	2.5516	2.55104	2.55034	2.55006
28.083	2.54698	2.54645	2.54923	2.55098	2.5489	2.5518
28.167	2.54137	2.54168	2.53937	2.53965	2.53881	2.53895
28.250	2.54257	2.54265	2.54378	2.54489	2.54412	2.54621
28.333	2.54533	2.54607	2.5516	2.5446	2.5504	2.54449
28.417	2.54694	2.54765	2.55003	2.5488	2.54996	2.54857
28.500	2.54789	2.54686	2.54406	2.54374	2.54665	2.54468
28.667	2.5501	2.55068	2.54458	2.54576	2.54891	2.54901
28.750	2.53902	2.53794	2.54124	2.53941	2.53699	2.53523
28.833	2.56024	2.56045	2.55667	2.55685	2.55813	2.55924
28.917	2.56145	2.5626	2.5612	2.56138	2.56225	2.56139
29.000	2.56689	2.56709	2.56041	2.56055	2.55887	2.56139
29.083	2.56031	2.56087	2.55671	2.55627	2.55611	2.55563
29.167	2.55459	2.55461	2.55091	2.55072	2.55135	2.55122
29.250	2.5461	2.54582	2.54542	2.54516	2.5467	2.54675
29.333	2.53995	2.53987	2.53944	2.53924	2.54009	2.53987
29.417	2.54083	2.54079	2.54113	2.54115	2.54085	2.5407
29.500	2.54027	2.53863	2.52904	2.52543	2.52914	2.52571
29.667	2.53027	2.52946	2.53408	2.53317	2.53297	2.53332
29.750	2.51436	2.50534	2.54327	2.55302	2.53402	2.53644
29.833	2.54158	2.54314	2.53835	2.5392	2.54234	2.54323
29.917	2.542	2.54214	2.54315	2.54436	2.5462	2.54701
30.000	2.54258	2.54273	2.54448	2.54311	2.54234	2.5418

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
30.083	2.54208	2.54308	2.54524	2.54447	2.54517	2.5449
30.167	2.54383	2.54327	2.5419	2.54051	2.54269	2.5415
30.250	2.5372	2.5385	2.53571	2.53898	2.53735	2.53879
30.333	2.52777	2.52881	2.52527	2.53231	2.52563	2.53226
30.417	2.5046	2.50476	2.51103	2.50565	2.51103	2.51039
30.500	2.50138	2.5015	2.50273	2.50979	2.50336	2.51179
30.667	2.52872	2.52848	2.52007	2.51933	2.52155	2.52001
30.833	2.56744	2.56935	2.55345	2.55443	2.55376	2.55474
30.917	2.55379	2.55421	2.55587	2.56022	2.55628	2.55972
31.000	2.55932	2.55827	2.55943	2.5573	2.55875	2.5568
31.083	2.5641	2.56451	2.55867	2.55907	2.55696	2.55716
31.167	2.55909	2.55932	2.55225	2.55257	2.55347	2.55347
31.250	2.5194	2.53125	2.52286	2.52843	2.52165	2.52241
31.333	2.53852	2.53923	2.52842	2.52882	2.52809	2.52955
31.417	2.49384	2.49516	2.50372	2.50824	2.50344	2.50754
31.500	2.49012	2.48922	2.48436	2.48387	2.48516	2.484
31.667	2.5024	2.50208	2.52287	2.50848	2.53924	2.51368
31.833	2.5343	2.53207	2.50971	2.5164	2.51587	2.51491
31.917	2.50317	2.50305	2.50297	2.50644	2.5045	2.50622
32.000	2.49871	2.49954	2.49766	2.49825	2.49843	2.49845
32.083	2.50317	2.50045	2.50325	2.50357	2.50249	2.50261
32.167	2.51956	2.52054	2.51414	2.5143	2.51318	2.51345
32.250	2.50707	2.50864	2.50591	2.50493	2.50268	2.50268

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
32.333	2.49803	2.49852	2.49933	2.49982	2.49626	2.49706
32.417	2.54848	2.54919	2.53287	2.53427	2.53448	2.53477
32.500	2.56209	2.56205	2.54769	2.55514	2.54413	2.55298
32.583	2.5646	2.56576	2.55834	2.55835	2.55829	2.55744
32.667	2.56153	2.56182	2.54812	2.54644	2.55216	2.54858
32.833	2.56455	2.56279	2.54509	2.54676	2.55208	2.55097
32.917	2.55222	2.54866	2.55281	2.55395	2.5544	2.55479
33.000	2.56698	2.56566	2.56441	2.56401	2.56366	2.56008
33.083	2.57814	2.57817	2.57256	2.57153	2.57361	2.57435
33.167	2.55534	2.55516	2.55423	2.55439	2.55302	2.55272
33.250	2.53219	2.53241	2.54068	2.54017	2.54486	2.54136
33.333	2.52734	2.52748	2.52503	2.5253	2.53513	2.52817
33.417	2.52518	2.52577	2.52431	2.52423	2.52235	2.52349
33.500	2.52158	2.52257	2.51669	2.51716	2.51386	2.51556
33.667	2.49008	2.50764	2.50007	2.50912	2.50273	2.50447
33.833	2.51153	2.51222	2.49706	2.49997	2.49682	2.49994
33.917	2.50302	2.50303	2.50334	2.50398	2.50409	2.50402
34.000	2.50951	2.5089	2.50859	2.5083	2.50749	2.50729
34.083	2.49869	2.49722	2.50338	2.50284	2.50315	2.50218
34.167	2.50467	2.50422	2.5038	2.50332	2.5025	2.5022
34.250	2.48991	2.49051	2.48647	2.48836	2.48954	2.4888
34.333	2.47504	2.475	2.47166	2.47067	2.47091	2.47056
34.417	2.46919	2.46839	2.47267	2.47021	2.46852	2.47216

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
34.500	2.45878	2.45872	2.48243	2.45559	2.47399	2.45421
34.667	2.44551	2.44586	2.42546	2.43496	2.44417	2.44076
34.833	2.46956	2.46841	2.46003	2.46642	2.46126	2.45895
34.917	2.46217	2.46239	2.46726	2.46595	2.46843	2.46997
35.000	2.49739	2.49707	2.49679	2.4967	2.49544	2.49571
35.083	2.49407	2.49453	2.49238	2.49312	2.4898	2.49177
35.167	2.49519	2.49527	2.4935	2.49345	2.4929	2.49288
35.250	2.48523	2.48492	2.48698	2.48701	2.48862	2.48767
35.333	2.48113	2.48116	2.48184	2.48199	2.47924	2.48208
35.417	2.48197	2.48257	2.49034	2.49139	2.49079	2.49187
35.500	2.49527	2.50146	2.50213	2.50239	2.50278	2.50147
35.583	2.51276	2.50404	2.49464	2.49285	2.49876	2.49818
35.667	2.43868	2.45087	2.48404	2.48371	2.48319	2.48384
35.833	2.48624	2.48736	2.48478	2.48215	2.47944	2.47899
35.917	2.48386	2.48328	2.48193	2.48213	2.48672	2.48811
36.000	2.49346	2.49254	2.49221	2.49365	2.49126	2.49293
36.083	2.48675	2.48679	2.48783	2.48823	2.48833	2.48812
36.167	2.48908	2.48918	2.48729	2.48714	2.48684	2.48658
36.250	2.4752	2.47512	2.47626	2.47587	2.47741	2.47584
36.333	2.46996	2.47	2.46912	2.46964	2.4684	2.46939
36.417	2.46549	2.46648	2.47227	2.47307	2.47215	2.47281
36.500	2.47136	2.47058	2.46779	2.47038	2.46609	2.46766
36.583	2.46999	2.4702	2.46974	2.4703	2.47224	2.4731

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
36.833	2.47154	2.47175	2.46158	2.46477	2.46378	2.45401
36.917	2.4629	2.46219	2.46404	2.46369	2.46825	2.45726
37.000	2.48433	2.48307	2.48185	2.48054	2.48175	2.48068
37.083	2.48362	2.48175	2.48069	2.47955	2.48127	2.48042
37.167	2.48154	2.4818	2.4808	2.4805	2.48135	2.4812
37.250	2.46833	2.46795	2.46683	2.46672	2.46768	2.46679
37.333	2.46669	2.46654	2.46271	2.46245	2.46264	2.46261
37.417	2.44644	2.44661	2.44555	2.44724	2.44517	2.44721
37.833	2.42537	2.42456	2.42589	2.42475	2.42544	2.42486
37.917	2.42028	2.42007	2.42248	2.42172	2.42632	2.42591
38.000	2.41115	2.41121	2.41032	2.41042	2.40886	2.40909
38.083	2.41157	2.41181	2.41379	2.41394	2.41378	2.41328
38.167	2.42209	2.42166	2.41806	2.41809	2.41826	2.41823
38.250	2.41355	2.41328	2.41103	2.41091	2.4127	2.4125
38.333	2.4088	2.40846	2.4076	2.40828	2.40911	2.41074
38.417	2.40369	2.4029	2.40158	2.40081	2.4015	2.40057
38.500	2.39851	2.39821	2.39593	2.39514	2.39644	2.39516
38.583	2.3876	2.38551	2.39154	2.39135	2.39168	2.39062
38.667	2.34373	2.34795	2.38847	2.39028	2.39249	2.39358
38.833	2.37606	2.37507	2.36624	2.36595	2.36884	2.36894
38.917	2.37122	2.37018	2.37497	2.37522	2.37391	2.37475
39.000	2.39155	2.39321	2.39014	2.39057	2.38968	2.38957
39.083	2.40237	2.41051	2.40136	2.40141	2.40157	2.40099

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
39.167	2.40661	2.40752	2.40357	2.40344	2.4032	2.40321
39.250	2.39761	2.41096	2.39473	2.39481	2.39607	2.39589
39.333	2.39318	2.39885	2.39306	2.39286	2.39284	2.39256
39.417	2.39308	2.3949	2.39127	2.39029	2.39354	2.39399
39.500	2.39319	2.39275	2.39335	2.39286	2.39189	2.39262
39.583	2.39445	2.39495	2.39498	2.39411	2.39505	2.39484
39.667	2.33495	2.33505	2.38516	2.38397	2.38383	2.3848
39.833	2.38919	2.38844	2.38439	2.38427	2.38529	2.38446
39.917	2.38377	2.38302	2.38885	2.38666	2.38819	2.38779
40.000	2.39659	2.39656	2.39655	2.39679	2.39563	2.39545
40.083	2.40121	2.40085	2.40051	2.40008	2.39947	2.39949
40.167	2.40387	2.4045	2.40331	2.40384	2.40145	2.40204
40.250	2.40012	2.39995	2.39709	2.39627	2.39998	2.39993
40.333	2.39633	2.39632	2.38902	2.39022	2.39348	2.39354
40.417	2.40407	2.40393	2.39886	2.39965	2.40202	2.40053
40.500	2.40584	2.40576	2.40055	2.403	2.40222	2.40245
40.583	2.4036	2.40406	2.40564	2.40586	2.40665	2.40666
40.667	2.35392	2.35246	2.39963	2.3953	2.40379	2.40321
40.833	2.39703	2.39563	2.39139	2.39126	2.39155	2.39232
40.917	2.38872	2.38955	2.39217	2.39275	2.39396	2.39425
41.000	2.40382	2.40429	2.40458	2.40412	2.40423	2.40381
41.083	2.40894	2.41163	2.40799	2.40965	2.40833	2.40933
41.167	2.41256	2.41499	2.41157	2.41361	2.41225	2.41352

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
41.250	2.41041	2.41102	2.41503	2.41486	2.45115	2.41486
41.333	2.41108	2.41161	2.40906	2.40915	2.4164	2.40993
41.417	2.40267	2.40168	2.40448	2.40062	2.40458	2.40435
41.500	2.41115	2.41051	2.40845	2.40699	2.406	2.40658
41.583	2.41197	2.41175	2.40933	2.40913	2.40897	2.40948
41.667	2.39226	2.39038	2.40408	2.40393	2.41151	2.40687
41.833	2.4163	2.41638	2.41481	2.41474	2.41513	2.41461
41.917	2.4258	2.42524	2.43062	2.43764	2.43073	2.43551
42.000	2.43721	2.43716	2.43722	2.43678	2.43625	2.43682
42.083	2.43392	2.43384	2.43496	2.43408	2.43473	2.43443
42.167	2.43736	2.43714	2.43716	2.43609	2.43661	2.43607
42.250	2.43293	2.43252	2.42828	2.43374	2.43082	2.43452
42.333	2.43934	2.46328	2.43357	2.44577	2.43373	2.44781
42.417	2.43746	2.43909	2.44047	2.44205	2.43973	2.43485
42.500	2.43228	2.43454	2.41984	2.4235	2.42419	2.42227
42.583	2.43735	2.43923	2.44015	2.43987	2.44374	2.44147
42.667	2.40856	2.41609	2.43693	2.43839	2.44405	2.44394
42.833	2.46012	2.45943	2.45607	2.45627	2.45481	2.45492
42.917	2.45982	2.46003	2.46548	2.4665	2.46608	2.4653
43.000	2.49036	2.49017	2.49072	2.49014	2.48887	2.48884
43.083	2.48605	2.48613	2.4863	2.48637	2.48587	2.48595
43.167	2.49786	2.49892	2.49708	2.49767	2.49678	2.49742
43.250	2.48671	2.48626	2.48889	2.48551	2.4899	2.48461

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
43.333	2.47721	2.47751	2.47496	2.47782	2.47667	2.47622
43.417	2.46531	2.46448	2.46428	2.46101	2.46707	2.46188
43.500	2.46817	2.46811	2.46841	2.46866	2.46981	2.46967
43.583	2.48045	2.47966	2.48147	2.48124	2.47999	2.48144
43.667	2.47949	2.47724	2.48929	2.48916	2.4851	2.48539
43.833	2.48723	2.4885	2.48521	2.48424	2.48384	2.48402
43.917	2.48035	2.47917	2.48169	2.4805	2.48405	2.4831
44.000	2.49629	2.49701	2.49767	2.49678	2.49673	2.4954
44.083	2.49675	2.49693	2.49761	2.49748	2.49845	2.49837
44.167	2.50457	2.50468	2.50481	2.50443	2.50418	2.50414
44.250	2.49431	2.4954	2.49365	2.49447	2.49256	2.49322
44.333	2.47335	2.47329	2.47418	2.47418	2.47438	2.47438
44.417	2.45658	2.45586	2.45771	2.45811	2.45643	2.45681
44.500	2.42082	2.42008	2.43201	2.43257	2.43198	2.43221
44.583	2.43352	2.43338	2.43162	2.43173	2.43417	2.43408
44.667	2.4213	2.42258	2.4482	2.44815	2.45192	2.45145
44.833	2.46984	2.46948	2.46833	2.47005	2.47158	2.47145
44.917	2.479	2.47804	2.47518	2.47805	2.47815	2.47777
45.000	2.50943	2.50762	2.5061	2.50319	2.50475	2.50737
45.083	2.51184	2.51167	2.50951	2.50966	2.50894	2.50704
45.167	2.50816	2.50822	2.50703	2.50804	2.50761	2.50861
45.250	2.49219	2.49311	2.49074	2.49208	2.49439	2.49178
45.333	2.48205	2.48205	2.47525	2.47424	2.48153	2.47497

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
45.417	2.4749	2.47543	2.47231	2.47416	2.47366	2.47215
45.500	2.47338	2.47315	2.47136	2.47254	2.4697	2.47163
45.583	2.48371	2.48304	2.48097	2.47751	2.48367	2.48392
45.667	2.38489	2.38611	2.49471	2.48692	2.49906	2.48939
45.833	2.53319	2.53283	2.52889	2.52935	2.52593	2.52687
45.917	2.52904	2.52811	2.53844	2.53827	2.53884	2.53858
46.083	2.53678	2.53718	2.53821	2.5384	2.54022	2.54009
46.167	2.52424	2.52534	2.52466	2.52534	2.52558	2.52732
46.250	2.51671	2.51682	2.51335	2.51524	2.51557	2.50766
46.333	2.50855	2.50803	2.48805	2.49541	2.47617	2.49126
46.417	2.50616	2.50794	2.50004	2.50289	2.50501	2.50825
46.583	2.54975	2.55865	2.54589	2.55051	2.549	2.55332
46.667	2.49854	2.48185	2.55057	2.54293	2.55422	2.54887
46.833	2.56951	2.56924	2.56035	2.56493	2.56494	2.56759
46.917	2.56111	2.56353	2.56221	2.55961	2.56273	2.56088
47.000	2.57441	2.57438	2.57189	2.57401	2.57006	2.57055
47.083	2.5686	2.56839	2.56524	2.5665	2.56809	2.56868
47.167	2.57186	2.57503	2.5715	2.57302	2.57086	2.57206
47.250	2.55717	2.56236	2.55996	2.56181	2.57375	2.5739
47.333	2.56684	2.56759	2.56904	2.56884	2.56609	2.56682
47.417	2.56554	2.56533	2.56641	2.56667	2.56566	2.56403
47.583	2.58264	2.58208	2.59908	2.58387	2.57084	2.57069
47.667	2.48001	2.48295	2.58076	2.56179	2.55375	2.56288

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
47.917	2.57341	2.57396	2.57322	2.57384	2.57484	2.57548
48.000	2.5713	2.57041	2.57147	2.57071	2.57307	2.56932
48.083	2.57183	2.57328	2.57052	2.57056	2.57076	2.57106
48.167	2.53224	2.52834	2.53011	2.52679	2.53031	2.52744
48.250	2.49573	2.49568	2.50449	2.50059	2.50558	2.50183
48.333	2.48612	2.48801	2.47575	2.47791	2.48352	2.4828
48.417	2.48635	2.48111	2.48383	2.4834	2.48265	2.48295
48.833	2.48187	2.43565	2.48253	2.48229	2.48252	2.48191
48.917	2.4929	2.49537	2.49097	2.49033	2.49032	2.49102
49.000	2.5004	2.50051	2.49701	2.49773	2.49665	2.49722
49.083	2.48498	2.48489	2.48678	2.48655	2.4871	2.48702
49.167	2.4786	2.47799	2.47949	2.47872	2.47999	2.47937
49.250	2.46573	2.46601	2.46467	2.46411	2.46513	2.46481
49.333	2.46982	2.46835	2.46525	2.4632	2.46293	2.46115
49.417	2.46527	2.46523	2.46423	2.46455	2.46713	2.46675
49.583	2.48134	2.48131	2.47025	2.47117	2.47645	2.47721
49.667	2.49869	2.50082	2.47102	2.46823	2.47039	2.47029
49.833	2.4526	2.45241	2.45675	2.4566	2.45737	2.45647
49.917	2.4496	2.44985	2.45594	2.45299	2.45436	2.45427
50.000	2.47393	2.47508	2.47733	2.47786	2.47791	2.4774
50.083	2.4861	2.48623	2.48499	2.4844	2.48588	2.48516
50.167	2.50514	2.50252	2.50675	2.50441	2.50699	2.5047
50.250	2.5103	2.50393	2.51165	2.50363	2.51161	2.50441

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
50.333	2.50247	2.50089	2.49882	2.49926	2.49816	2.4983
50.417	2.46429	2.45827	2.4675	2.46805	2.46703	2.46792
50.583	2.48148	2.48127	2.47098	2.47781	2.47366	2.47738
50.667	2.52529	2.52567	2.50581	2.50722	2.50811	2.50543
50.833	2.51895	2.51889	2.52429	2.52387	2.5243	2.52488
50.917	2.51579	2.51676	2.51228	2.51343	2.51498	2.51701
51.000	2.50892	2.512	2.51218	2.51446	2.51242	2.51374
51.083	2.51804	2.5189	2.51873	2.51895	2.51951	2.52375
51.167	2.54192	2.54211	2.54166	2.54388	2.54281	2.54288
51.250	2.52693	2.52686	2.52696	2.52741	2.52869	2.52929
51.333	2.51818	2.51777	2.5163	2.5165	2.51518	2.51541
51.417	2.54056	2.53504	2.5318	2.53027	2.53288	2.53173
51.583	2.46768	2.56502	2.54499	2.5475	2.54637	2.54728
51.750	2.55134	2.55456	2.55969	2.56024	2.55481	2.55642
51.833	2.54509	2.54648	2.55049	2.55127	2.55199	2.55292
51.917	2.53667	2.53614	2.53653	2.53619	2.5395	2.53841
52.000	2.54453	2.54032	2.5432	2.54165	2.54233	2.54218
52.083	2.54648	2.54582	2.54709	2.54701	2.54735	2.5476
52.167	2.54962	2.54937	2.54942	2.54825	2.54894	2.54754
52.250	2.55296	2.55301	2.55463	2.55408	2.55585	2.55525
52.333	2.54274	2.54292	2.5488	2.54868	2.54858	2.54835
52.417	2.5441	2.54482	2.5451	2.54498	2.54481	2.5448
52.583	2.55294	2.55363	2.55018	2.55047	2.55041	2.55092

ช่วงข้อมูล ทุกๆ 2 ชั่วโมง	ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์					
	ข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และ Beidou	
	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ	นาฬิกา อะตอม	นาฬิกา ภายใน เครื่องรับ
52.667	2.5317	2.53128	2.53985	2.53974	2.54039	2.5403
52.750	2.54549	2.54507	2.54541	2.54595	2.54434	2.545
52.833	2.54329	2.54291	2.54656	2.54581	2.54588	2.54584
52.917	2.53928	2.53937	2.54291	2.54212	2.54172	2.54188
53.000	2.53589	2.53293	2.54122	2.5369	2.53892	2.53839
53.083	2.53757	2.53667	2.53852	2.53799	2.53825	2.53803
53.167	2.53817	2.5401	2.53809	2.5378	2.53838	2.53872
53.250	2.52767	2.52711	2.5291	2.52836	2.52891	2.5288
53.333	2.52395	2.52023	2.52598	2.52603	2.52503	2.52515
53.417	2.52737	2.52752	2.52855	2.53309	2.53153	2.53216
53.750	2.52906	2.52861	2.4288	2.49407	2.53026	2.52513
53.833	2.52259	2.52057	2.53766	2.52808	2.52548	2.52524
53.917	2.52072	2.51892	2.51658	2.52034	2.52168	2.52173
54.000	2.52905	2.52848	2.52978	2.52886	2.53096	2.53068
54.083	2.53389	2.53386	2.53599	2.53619	2.53524	2.5343
54.167	2.53666	2.53256	2.53592	2.53282	2.53648	2.53506
54.250	2.53156	2.5303	2.52984	2.53127	2.52922	2.52761
54.333	2.50859	2.50652	2.51733	2.51688	2.51694	2.5186
54.417	2.5296	2.52882	2.52659	2.52646	2.52538	2.52666
54.583	2.54995	2.55509	2.54522	2.54669	2.55137	2.55029
54.667	2.52132	2.54631	2.55394	2.5547	2.5604	2.55618
54.833	2.56159	2.56229	2.56297	2.56292	2.5651	2.56479
54.917	2.56425	2.56413	2.56393	2.56328	2.56367	2.56397

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชัยพร กิจประชา เกิดเมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัด สมุทรสงคราม
ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาหลักสูตร วิศวกรรมสำรวจ เมื่อปี พ.ศ. 2556 จาก คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ

- การประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงโดยใช้ข้อมูลจากระบบดาวเทียม GPS
GLONASS และ Beidou ด้วยโปรแกรม PANDA, งานประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิ
สารสนเทศแห่งชาติ ประจำปี 2559

