

การประเมินสมรรถนะของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ติดตั้งนาฬิกาอะตอมความถูกต้องสูง

ในงานรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE EVALUATIONS OF A GNSS RECEIVER EQUIPPED WITH A HIGH ACCURACY
ATOMIC FREQUENCY STANDARD IN PRECISE POINT POSITIONING (PPP) MODE

Miss Pornchanit Moonaksorn



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินสมรรถนะของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่
ติดตั้งนาฬิกาอะตอมความถูกต้องสูงในงานรังวัดจุดเดียว
ความละเอียดสูง

โดย

นางสาวพรชนิตร์ มูลอักษร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชรินทร์ ทินนโชติ)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรเพชญ์ ชี้อินธิไพศาล)

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

พรชนิตร์ มุลอักษร : การประเมินสมรรถนะของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ติดตั้งนาฬิกาอะตอมความถูกต้องสูงในงานรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง (PERFORMANCE EVALUTIONS OF A GNSS RECEIVER EQUIPPED WITH A HIGH ACCURACY ATOMIC FREQUENCY STANDARD IN PRECISE POINT POSITIONING (PPP) MODE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 87 หน้า.

ในงานรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ เป็นงานที่ให้ความถูกต้องในระดับเซนติเมตร ซึ่งนาฬิกาที่ใช้ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS มีค่าความถูกต้องและเสถียรภาพที่เพียงพอต่อการหาค่าพิกัดทางตำแหน่งอยู่แล้ว แต่เนื่องจากงานทางด้านวิทยาศาสตร์ต้องการความถูกต้องในการหาพิกัดทางตำแหน่งที่ดีกว่า จึงได้ทำการศึกษาโดยใช้นาฬิกาอะตอมแบบซีเซียม (Caesium frequency standard) ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อให้ได้ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีขึ้น

ข้อมูลสัญญาณ GNSS ที่รังวัดจากเครื่องรับสัญญาณแบบยี่ห้อเดียวกันจำนวน 2 เครื่องได้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อศึกษาค่าความแตกต่างของเวลาที่เกิดจากการใช้นาฬิกาที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบระหว่างอาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาภายในเครื่องรับและอาศัยสัญญาณเวลาจากมาตรฐานความถี่ที่อยู่ภายนอก โดยได้มีการทดลองศึกษาเปรียบเทียบทั้งกรณีการใช้ข้อมูลเฉพาะระบบ GPS และการใช้ข้อมูลระบบ GPS ร่วมกับระบบ GLONASS วัดดูประสงค์มี 2 ส่วนคือประเมินสมรรถนะคุณลักษณะของนาฬิกาในด้านความถูกต้องของเวลา, เสถียรภาพเชิงความถี่ และเสถียรภาพเชิงเวลา และทำการประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งโดยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ด้วยซอฟต์แวร์เชิงวิจัยชื่อ PANDA ในการประมวลผลหาผลลัพธ์ทางพิกัดและเวลา

ผลการประเมินสมรรถนะของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ พบว่าเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมจะให้ค่าที่ดีกว่าเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาภายในเครื่องรับ และเมื่อทำการประมวลผลทางตำแหน่งโดยใช้การรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์พบว่า ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมมีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ไม่แตกต่างกันกับข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยอยู่ในระดับเซนติเมตร สำหรับค่าคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าพิกัดมีความสัมพันธ์กับค่าคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเวลาที่เครื่องรับสัญญาณในระดับที่ต่ำมาก อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่แสดงออกมานั้นไม่ได้บ่งบอกความแตกต่างอย่างชัดเจน อาจเกิดจากสาเหตุปัจจัยหลายอย่าง จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770504521 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: KINEMATIC PPP / RECEIVER CLOCK OFFSET / CAESIUM FREQUENCY STANDARD

PORNCHANIT MOONAKSORN: PERFORMANCE EVALUTIONS OF A GNSS RECEIVER EQUIPPED WITH A HIGH ACCURACY ATOMIC FREQUENCY STANDARD IN PRECISE POINT POSITIONING (PPP) MODE. ADVISOR: PROF. DR.CHALERMCHON SATIRAPOD, 87 pp.

Precise point positioning algorithm (PPP) in Kinematic mode provides the centimeter-level of accuracy for a surveyed point. The GNSS receiver internal oscillator does provide enough accuracy and stability to determine the high precision and accuracy for kinematic PPP results. However, because the science needs to be better. This study applies a high performance caesium frequency standard in order to better position accuracy.

The collected GNSS observation data from two geodetic receivers are designed to investigate the receiver clock offsets in two modes; based on its internal oscillator and the external frequency standard. The tested scenarios contain only GPS and combined GPS and GLONASS observations. Objectives are in two folds; namely, to evaluate the characteristics of the receiver clocks comprised of accuracy, frequency stability and timing stability; and to data processing for positioning determination in kinematic PPP by applying software named PANDA, in order to determine the positioning and timing solutions.

The receiver clock evaluation shows that the receiver equipped with the external caesium frequency standard provides the better results than the receiver operating on its internal clock as a time base. The positioning determination using the kinematic PPP shows the evaluation results obtained from the observation data from the receiver with or without external frequency standard do not show the significant differences in positioning accuracy at a centimeter-level of accuracy. The estimated positioning errors are weakly correlated with the estimated receiver clock error. Even though the results do not show differences significantly, this may be due to several parameters where further investigations are required.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็ได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่ายบุคคล โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่คอยให้คำแนะนำ เป็นแนวทางเริ่มต้นในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงคอยให้ความช่วยเหลือต่างๆ ทั้งในเรื่องการติดต่อยืมเครื่องมือเพื่อนำมาใช้ในงานครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณป้าซึ่งเป็นผู้ปกครองของข้าพเจ้า ที่ได้คอยให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง โดยเฉพาะเรื่องค่าใช้จ่าย รวมถึงคอยให้กำลังใจเสมอมา จนสามารถบรรลุเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ได้สละเวลาเป็นกรรมการสอบภายนอก คอยให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือทุกอย่าง ทั้งในเรื่องคอยอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่เพื่อที่จะทำการติดตั้งเครื่องมือ คอยชี้แนวทางให้สามารถดำเนินงานได้บรรลุเป้าหมาย เสมือนเป็นที่ปรึกษาอีกหนึ่งท่านที่มีพระคุณในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชรินทร์ ทินนโชนิตี ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรเพชญ์ ชื่นนิธิไพศาล กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำพร้อมทั้งให้แนวความคิดรวมถึงคำติชมต่างๆให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ กรมที่ดิน ที่อนุเคราะห์เครื่องมือรับสัญญาณ GNSS จำนวน 2 เครื่อง เพื่อนำมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ที่คอยเป็นกำลังใจให้มีกำลังใจในการดำเนินงานให้บรรลุเป้าหมาย โดยเฉพาะนายปวีตร ภูริระวณิชกุล เพื่อนที่คอยช่วยเหลือ คอยแนะนำแนวทางแก้ปัญหา จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
คำย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ระบบดาวเทียมนำทางบนพื้นโลก Global Navigation Satellite System (GNSS).....	9
2.1.1 ระบบดาวเทียม GPS (Global Positioning System)	10
2.1.2 ระบบดาวเทียม GLONASS (Global Navigation Satellite System).....	13
2.2 มาตรฐานความถี่ (Frequency Standards).....	14
2.2.1 ออสซิลเลเตอร์แบบควอตซ์ (Quartz oscillators)	14
2.2.2 ออสซิลเลเตอร์แบบอะตอม (Atomic oscillators).....	14
2.3 ระบบเวลา (Time System).....	16
2.3.1 เวลาอะตอมสากล (International Atomic Time).....	16

2.3.2 เวลาสากลเชิงพิกัด (Coordinated universal Time).....	17
2.3.3 เวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ.....	17
2.3.4 ค่าเวลาสากล (Solar Time).....	17
2.3.5 ระบบเวลาดาวเทียม GPS (Global Positioning System Time).....	17
2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะเครื่องรับสัญญาณ (Data Analysis).....	19
2.5 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	27
3.1 การรับสัญญาณข้อมูลดาวเทียม	29
3.2 การแปลงรูปแบบไฟล์ข้อมูล	31
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับ	34
3.4 การประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning) โดยใช้โปรแกรม PANDA.....	37
3.5 การทดสอบประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม PANDA	38
3.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation)	40
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	42
4.1 ผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับ	42
4.1.1 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ	43
4.1.2 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ.....	47
4.1.3 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ.....	51

4.2 ผลการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Precise Point Positioning Kinematic) โดยใช้โปรแกรม PANDA	55
4.3 ผลจากการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่ง (Positioning accuracy) จากการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP) ตามมาตรฐานของ NSSDA	58
4.4 ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP).....	59
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	65
5.1 อภิปรายผลการดำเนินงาน.....	65
5.2 สรุปผลการศึกษา	68
5.3 ข้อเสนอแนะ	68
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ (Equipment) ที่ใช้ในงานวิจัย	73
ภาคผนวก ข ตารางแสดงค่าเสถียรภาพทางความถี่ (Frequency Stability).....	77
ภาคผนวก ค ตารางแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability)	81
ภาคผนวก ง ตารางแสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด (RMSE).....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	87

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS.....	5
รูปที่ 1.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานการวิจัย	7
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักการทำงานของระบบ GNSS (Jeffrey, 2010).....	10
รูปที่ 2.2 วงโคจรดาวเทียมระบบ GPS (Jeffrey, 2010).....	11
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของสถานีควบคุมหลักและสถานีติดตามดาวเทียม.....	12
รูปที่ 2.4 นาฬิกาอะตอมแบบซีเซียม (Caesium Atomic Clock) รุ่น 5017A.....	15
รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนในการคำนวณหาค่าTAI และ UTC	18
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	28
รูปที่ 3.2 เสออากาศยี่ห้อ Trimble รุ่น Zephyr Geodetic	30
รูปที่ 3.3 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ ยี่ห้อ Trimble รุ่น Net R9 จำนวน 2 เครื่อง.....	30
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรูปแบบไฟล์ CGGTTS มาตรฐาน.....	32
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการแปลงไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ CGGTTS มาตรฐาน.....	32
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม (UTC(NIMT)) กับนาฬิกาภายในเครื่องรับ (UTC) ด้วยการใช้อุปกรณ์ GPS.....	44
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอม ...	46
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ด้วยข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST	47
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ของข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับโดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST	48
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST	49

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับโดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST	50
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST	51
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST.....	52
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST	53
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST	54
รูปที่ 4.11 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS	59
รูปที่ 4.12 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางเหนือ (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS	60
รูปที่ 4.13 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้ง (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS	61
รูปที่ 4.14 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS.....	62

รูปที่ 4.15 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศเหนือ (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แนวนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS..... 63

รูปที่ 4.16 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้ง (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แนวนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS 64



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	คุณสมบัตินาฬิกาอะตอมซีเซียมที่เก็บรักษาเวลา UTC(NIMT) (microsemi, 2014).....	16
ตารางที่ 3.1	คำอธิบายข้อมูลในรูปแบบของ CGGTTS (CGGTTS, 2016)	33
ตารางที่ 3.2	ตัวอย่างแสดงค่าความถูกต้องที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC และเวลา GPST	35
ตารางที่ 3.3	ตัวอย่างแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC และเวลา GPST.....	35
ตารางที่ 3.4	ตัวอย่างแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC และเวลา GPST.....	36
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณด้วยการใช้ข้อมูล GPS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ (วินาที/วินาที)	43
ตารางที่ 4.2	แสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ (วินาที/วินาที).....	45
ตารางที่ 4.3	แสดงค่า RMSE ด้วยการใช้อุปกรณ์ GPS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมและต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ	56
ตารางที่ 4.4	แสดงค่า RMSE ด้วยการใช้อุปกรณ์ GPS ร่วมกับ GLONASS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมและต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ.....	57
ตารางที่ 5.1	สรุปผลลัพธ์จากการประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งตามมาตรฐาน NSSDA.....	67
ตารางที่ 5.2	สรุปผลลัพธ์การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดกับค่าความแตกต่างของเวลา	67

คำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
BIPM	International Bureau of Weights and Measures	สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ
CGGTTS	Common GPS GLONASS Time Transfer Standard	ไฟล์ข้อมูลมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณเวลาจากนาฬิกา
Cs-133	Caesium- 133	ธาตุซีเซียม 133
DOY	Day of Year	ลำดับวันใน 1 ปี ตั้งแต่ 1 ถึง 365 วัน
FGDC	Federal Geographic Data Committee	สหพันธ์คณะกรรมการข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานการจัดการกับความถูกต้องของชุดข้อมูลทางภูมิศาสตร์
GFZ	German Research Centre For Geosciences	หนึ่งในศูนย์ข้อมูลสถานีจากหน่วยงาน IGS ที่บริการข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง
GNSS	Global Navigation Satellite Systems	ระบบดาวเทียมนำทางบนพื้นโลก
GPST	Global Positioning System Time	ระบบเวลาดาวเทียมจีพีเอส
IERS	International Earth rotation and Reference systems Service	หน่วยงานสังเกตการณ์และบันทึกการหมุนรอบตัวเองของโลก
IGS	International GNSS Service	หน่วยงานบริการข้อมูลการประมวลผลที่ให้ค่าวงโคจรความละเอียดสูงและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง
MJD	Modified Julian Date	การนับจำนวนวันตามเวลามาตรฐานสากล เริ่มนับตั้งแต่เที่ยงคืนของ 17 พฤศจิกายน ค.ศ.1858
NAVSTAR	Navigation Satellite Timing and Ranging	ระบบที่ระบุตำแหน่งทุกแห่งบนโลก

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่ง
PANDA	Position and Navigation Data Analyst	โปรแกรมซอฟต์แวร์เชิงวิจัย จากมหาวิทยาลัยวูฮั่น ประเทศจีน
PPP	Precise Point Positioning	ค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง
RINEX	Receiver Independent Exchange Format	รูปแบบไฟล์ที่แปลงข้อมูลจากข้อมูลดิบให้อยู่ในรูปแบบไฟล์มาตรฐาน
RMSE	Root Mean Square Error	ค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยกำลังสอง
SD	Standard Deviation	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SPP	Standard Point Positioning	ค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยวมาตรฐาน
TAI	Time International Atomic	เวลาอะตอมสากล
TEQC	Translation Editing Quality Check	โปรแกรมในการแปลงข้อมูลไฟล์, แก้ไข ให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น RINEX
UT-1	Universal Time	ค่าเวลาสากล
UTC	Coordinated Universal Time	เวลาสากลเชิงพิกัด
UTC(NIMT)	Coordinated Universal Time (National Institute of Metrology (Thailand))	เวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบดาวเทียมนำทางบนพื้นโลกมีชื่อว่า Global Navigation Satellite Systems (GNSS) ประกอบด้วยระบบดาวเทียมทั้งหมด 4 ระบบหลักคือ ระบบดาวเทียม GPS ของประเทศสหรัฐอเมริกา, ระบบดาวเทียม GLONASS ของประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย, ระบบดาวเทียม Galileo ของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรปและระบบดาวเทียม Beidou ของสาธารณรัฐประชาชนจีน ระบบเหล่านี้มีการประยุกต์ใช้งานหลักๆ จำนวน 3 ด้านคือ การระบุตำแหน่ง (Positioning), การนำทาง (Navigation) และ การบอกเวลา (Timing) ในด้านการระบุตำแหน่งทำได้โดยการหาระยะเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังตัวรับสัญญาณบนพื้นโลก ด้วยเหตุนี้จำเป็นต้องรู้ค่าความแตกต่างของนาฬิกาที่ตัวรับสัญญาณ (Receiver clock offset) ซึ่งในการประมวลผลทางตำแหน่งการนำทางได้มีการประยุกต์การใช้ด้วยแอปพลิเคชันบนมือถือรวมถึงอุปกรณ์ที่ติดตั้งในรถยนต์ในการระบุเส้นทางที่ต้องการ ส่วนด้านการบอกเวลาจะใช้ในการดูสถานะของเวลาและในการเปรียบเทียบตั้งเวลานาฬิกา

ระบบดาวเทียมนำทางบนพื้นโลก (GNSS) นอกจากใช้ในด้านการนำทางแล้วยังนำไปประยุกต์ใช้ในงานสำรวจ เช่นการทำงานหมุดควบคุม เป็นต้น อีกทั้งยังได้นำไปประยุกต์ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์ งานธรณีฟิสิกส์ ซึ่งเป็นงานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องแม่นยำสูงกว่างานสำรวจทั่วไป ปัจจุบันในงานสำรวจมีวิธีการหาพิกัดแบบจุดเดี่ยวที่ให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งเชิงสัมบูรณ์ (Absolute Positioning) แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือ ประเภทแรกได้แก่การหาค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยวมาตรฐาน (Standard Point Positioning: SPP) มีค่าความถูกต้องที่หาได้อยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 เมตร และประเภทที่สองได้แก่การหาค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) มีค่าความถูกต้องที่หาได้อยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 เซนติเมตร งานวิจัยครั้งนี้เป็นงานที่ต้องการความละเอียดสูงจึงได้เลือกใช้วิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)(F. Wang, Chen, & Guo, 2015)

สำหรับขั้นตอนในการประมวลผลนั้นมีการพิจารณา 3 ส่วนประกอบด้วย 1) ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและที่ต้องประมาณค่า (Estimated unknown parameter), 2) ตัวแปรที่ทราบค่า (Known parameter) และตัวแปรที่ขจัดได้ (Eliminated parameter) และ 3) วิธีการประมวลผล (Modeling) ในส่วนแรกก็คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและที่ต้องประมาณค่า ประกอบด้วยค่าพิกัด 3 มิติ (x, y, z), ค่าความแตกต่างของนาฬิกาที่ตัวรับสัญญาณดาวเทียม (Receiver clock offset), ค่าคลาดเคลื่อนใน

บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) และค่าประมาณของเลขปริศนา (Ambiguity resolution) ในส่วนที่สองคือ ตัวแปรที่ทราบค่าและที่ขจัดได้ ซึ่งตัวแปรที่ทราบค่าประกอบด้วย ค่าคลาดเคลื่อนของวงโคจร (Satellite ephemeris error) และค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาบนดาวเทียม (Satellite clock offset) จะใช้ข้อมูลการประมวลผลที่ให้ค่าวงโคจรความละเอียดสูงและค่านาฬิกา ดาวเทียมความละเอียดสูงที่ชื่อว่า Final Products ที่อยู่ในรูปแบบของ SP3 จากหน่วยงานชื่อว่า International GNSS Service (IGS) ส่วนตัวแปรที่ขจัดได้ประกอบด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) จะขจัดโดยใช้ผลรวมของแบบจำลองเชิงเส้นของ ข้อมูลสองความถี่ที่เรียกว่า (Ionosphere-free combination), ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่น หลายวิถี (Multipath mitigation) สามารถกำหนดไม่ให้เกิดขึ้นโดยการตั้งเสาอากาศในบริเวณที่ไม่มี สิ่งกีดขวางใดๆ ไม่มีพื้นผิวที่จะสะท้อนสัญญาณ อยู่ในที่โล่งแจ้ง และ ใช้เสาอากาศแบบ Geodetic มี รูปแบบการออกแบบที่เรียกว่า Ground plane design และในส่วนที่สามคือ วิธีการประมวลผล (Processing) จะทำการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP Kinematic)

ปัจจุบันนาฬิกาที่ใช้อยู่ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS มีค่าความถูกต้องและเสถียรภาพที่ไม่ เพียงพอต่องานที่ต้องการความละเอียดสูง ซึ่งการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงใน การหาพิกัดทางตำแหน่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ จึงได้ทำการศึกษาประเภทนาฬิกาชนิดที่มี ความถูกต้องเชิงความถี่ (Frequency accuracy) และเสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency stability) ที่สูงขึ้นกล่าวคือการประยุกต์ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาอะตอม (Atomic clock) การวิจัยครั้งนี้จะ ใช้นาฬิกาอะตอมแบบซีเซียม (Caesium frequency standard) มีค่าความถูกต้องอยู่ในระดับ 10^{-14} (หน่วยเป็น วินาที/วินาที) งานวิจัยที่ผ่านมาการใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาอะตอมที่เครื่องรับ สัญญาณจะช่วยปรับปรุงแก้ไขค่าความแม่นยำ (Precision) ซึ่งตำแหน่งกล่าวคือค่า RMS ส่งผลต่อค่า พิกัดในทางดิ่งสำหรับการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ถึง 70% อย่างเห็นได้ชัด (F. Wang et al., 2015; K. Wang & Rothacher, 2013)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษา 2 ส่วน กล่าวคือ ในส่วนแรกจะทำการประเมินสมรรถนะของนาฬิกา ระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่มีการเชื่อมต่อกับสัญญาณเวลาจากเครื่องกำเนิดความถี่มาตรฐาน แบบซีเซียมจากภายนอก โดยสัญญาณเวลาดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของสัญญาณเวลารูปไซน์ที่มีความถี่ 10 MHz และเปรียบเทียบสมรรถนะของนาฬิกาที่อยู่ภายในของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้ สัญญาณเวลาจากนาฬิกาหรือเครื่องกำเนิดความถี่ที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ที่มากับ เครื่องรับสัญญาณ GNSS จุดประสงค์เพื่อดูว่าค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ ดาวเทียมมีความแตกต่างกันน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับสัญญาณเวลาระบบของระบบดาวเทียม GPS (GPS System Time: GPST) และในส่วนที่สองจะทำการประมวลผลทางตำแหน่งโดยใช้การรังวัดจุด

เดี่ยวความละเอียดสูงโดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัยที่ชื่อ Position and Navigation Data Analyst (PANDA) ของ GNSS research center ของ มหาวิทยาลัยวู่ฮั่น ประเทศจีน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (Positioning accuracy) ด้วยการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาอะตอมจากภายนอก กับค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่อาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ (Receiver clock offset) จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

1.3.1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ โดยจะวิเคราะห์ค่าความถูกต้องเชิงความถี่ (Frequency accuracy), ค่าความเสถียรเชิงความถี่ (Frequency stability) และค่าความเสถียรเชิงเวลา (Time stability)

1.3.1.2 ข้อมูลประเภทนาฬิกาอะตอมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นนาฬิกาอะตอมแบบซีเซียม (Caesium atomic clock) รุ่น 5017A

1.3.1.3 การประมวลผลทางตำแหน่งจะใช้การรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูงโดยรังวัดแบบจลน์ (Kinematic PPP)

1.3.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณด้วยการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการวิจัยครั้งนี้จะทำการรับสัญญาณในระบบ GNSS โดยการรังวัดเก็บข้อมูลที่ตาตฟ้าของอาคารมตงมาตร ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เป็นระยะเวลา 26 วัน ตั้งแต่วันที่ 28 มกราคม พ.ศ.2559 ถึงวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2559

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น NetR9 จำนวน 2 เครื่อง ที่ทำการรับสัญญาณพร้อมกันทุกๆ 1 วินาทีต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 26 วันโดยหนึ่งในเครื่องรับสัญญาณจะมีการเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) คือสัญญาณเวลารูปไซน์ที่มีความถี่ 10 MHz จากนาฬิกาอะตอมซีเซียมของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบไฟล์ RINEX มาตรฐานและสามารถแปลงเป็นไฟล์ CGGTTS มาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณเวลากานาฬิกา โดยสามารถเปรียบเทียบสัญญาณเวลากานาฬิกาที่อยู่ไกลกันและนาฬิกาที่ต้องทำงานตลอด 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 วันต่อสัปดาห์ วิธีการนี้เรียกว่า การถ่ายทอดเวลาด้วยสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทาง (GNSS time transfer)

1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย

1.3.4.1 โปรแกรม R2CGGTTS เวอร์ชัน 4.3 โดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (International Bureau of Weights and Measures: BIPM) เป็นโปรแกรมสำหรับการแปลงรูปแบบไฟล์ Observation ที่อยู่ในรูปแบบ RINEX มาตรฐานให้เป็นไฟล์มาตรฐานชื่อ Common GPS GLONASS Time Transfer Standard (CGGTTS) เพื่อให้การเปรียบเทียบนาฬิกาและการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกามีความเป็นมาตรฐานสากลตามข้อกำหนดของสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ

1.3.4.2 โปรแกรม Position and Navigation Data Analyst (PANDA) เป็นโปรแกรมทางวิทยาศาสตร์สำหรับประมวลผลสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS เพื่อหาค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่มีความละเอียดสูง โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่งในระดับเซนติเมตร

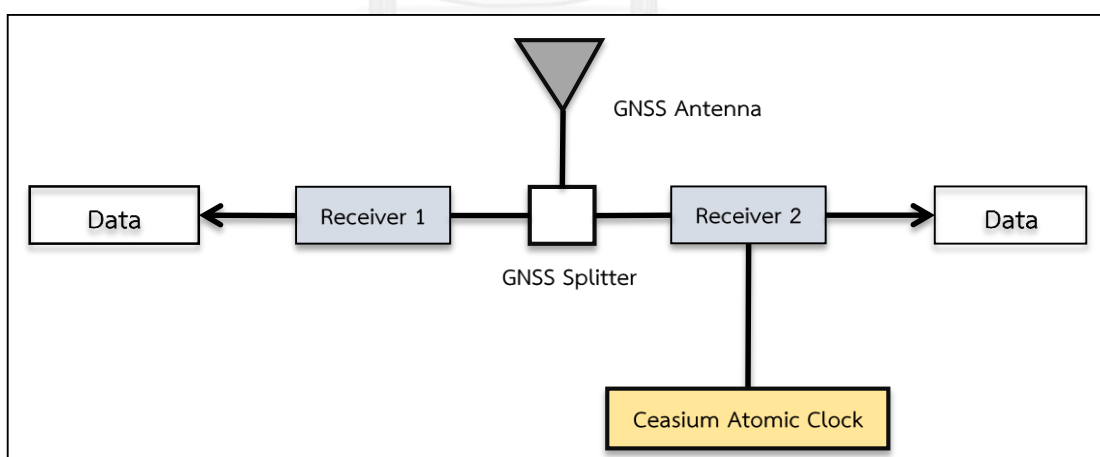
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1.2 มีลำดับขั้นตอนการดำเนินงานเป็นดังนี้

1.4.1 ศึกษาบทความงานวิจัยที่เน้นด้านการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณในระบบ GNSS และวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Quality Measurement) ของนาฬิกา รวมถึงศึกษาคุณสมบัติของนาฬิกาอะตอมที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

1.4.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม R2CGTTS เวอร์ชัน 4.3 เพื่อที่จะทำการแปลงรูปแบบไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS และศึกษาโปรแกรม PANDA เพื่อใช้ในการประมวลผลหาค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

1.4.3 ทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องแรกทำการเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) คือสัญญาณความถี่ 10 MHz จากนาฬิกาอะตอมซีเซียม ยี่ห้อ Symmetricom รุ่น 5017A และอีกหนึ่งเครื่องรับสัญญาณ GNSS จะใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ของเครื่องรับสัญญาณโดยใช้ Antenna รุ่นเดียวกันจำนวน 1 ตัวก็คือ Trimble Zephyr Geodetic พร้อมทั้งต่อ Antenna Splitter ไปยังเครื่องรับทั้ง 2 พร้อมกันเพื่อให้เชื่อมั่นได้ว่าการรับสัญญาณ ณ ตำแหน่งเดียวกัน ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำการติดตั้งไว้ในห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ



รูปที่ 1.1 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS

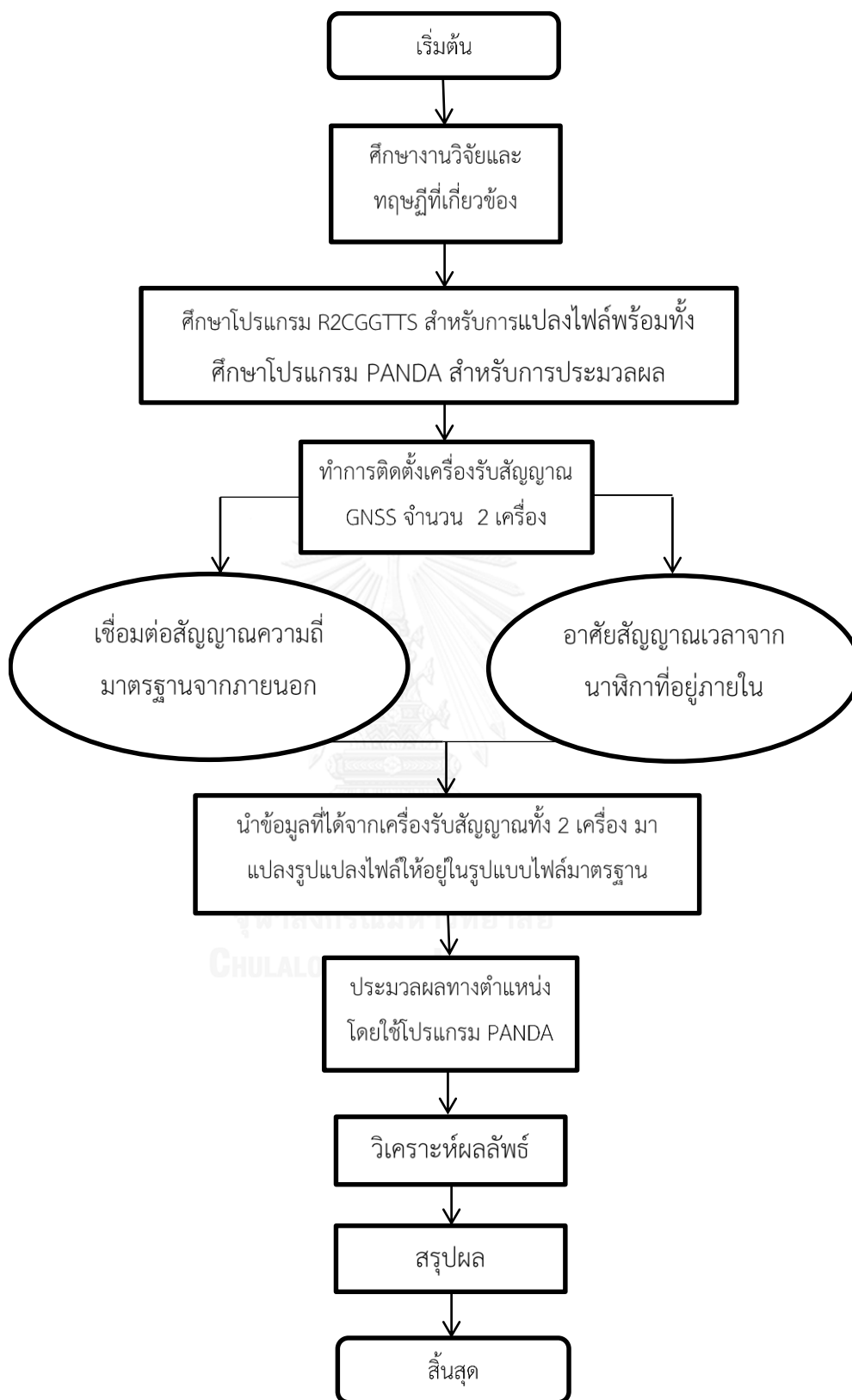
1.4.4 นำข้อมูลที่ได้จากการรับสัญญาณ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือข้อมูลชุดที่ 1 จะเป็นข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่มีการเชื่อมต่อสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) และข้อมูลชุดที่ 2 จะเป็นข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) เครื่องรับสัญญาณ จากนั้นนำข้อมูลทั้ง 2 ชุดมาทำการแปลงรูปแบบไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์มาตรฐาน CGGTTS เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ นาฬิกาและการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกา

1.4.5 ทำการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงด้วยการรังวัดแบบจลน์ (Kinematic PPP) โดยใช้โปรแกรม PANDA

1.4.6 เปรียบเทียบวิเคราะห์ผลลัพธ์ค่าพิกัดทางตำแหน่งเพื่อดูค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด และเวลารวมถึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดและเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ

1.4.7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.4.8 นำเสนอผลงานวิจัย



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ทราบถึงความแตกต่างของคุณลักษณะนาฬิกาในด้านความถูกต้องและเสถียรภาพระหว่างเครื่องรับสัญญาณแบบมีนาฬิกาอะตอมความถูกต้องสูงกับเครื่องรับสัญญาณแบบนาฬิกาทั่วไป โดยใช้สัญญาณเวลาของระบบดาวเทียมนำทางในการเปรียบเทียบ

1.5.2 ได้ทราบถึงผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนของเวลาในด้านความถูกต้อง เนื่องจากการใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมและนาฬิกาที่อยู่ภายในเครื่องรับสัญญาณ จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP)



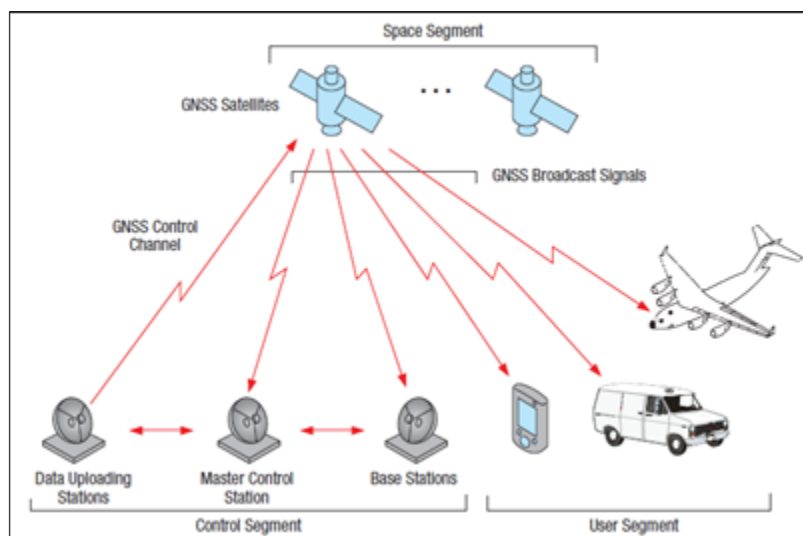
บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทฤษฎีซึ่งเกี่ยวกับ องค์ประกอบของระบบดาวเทียมนำทางบนพื้นโลก (GNSS) มาตรฐานความถี่ของนาฬิกาอะตอม ระบบเวลา การวิเคราะห์คุณลักษณะเครื่องรับสัญญาณ และการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

2.1 ระบบดาวเทียมนำทางบนพื้นโลก Global Navigation Satellite System (GNSS)

ในปัจจุบันการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมมีได้จำกัดอยู่ที่ระบบดาวเทียม GPS (Global Positioning System) ของประเทศสหรัฐอเมริกาดังเช่นที่รับรู้กันในอดีตอีกต่อไป แต่ได้มีระบบดาวเทียมที่มีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกับระบบดาวเทียม GPS เกิดขึ้นอีกหลายระบบได้แก่ ระบบดาวเทียม GLONASS ของประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย ระบบดาวเทียม Galileo ของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป ระบบดาวเทียม BeiDou ของสาธารณรัฐประชาชนจีน ระบบดาวเทียม IRNSS ของสาธารณรัฐอินเดียและระบบดาวเทียม QZSS ของประเทศญี่ปุ่น โดยมีการกำหนดชื่อเฉพาะขึ้นมาสำหรับใช้เรียกแทนทุกระบบว่า Global Navigation Satellite Systems (GNSS) ซึ่งในอนาคตทุกระบบสามารถใช้งานร่วมกันได้และจะทำให้การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยขึ้นอยู่กับภาคเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและวิธีในการประมวลผลของซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลข้อมูลดาวเทียม อย่างไรก็ตามระบบดาวเทียม GPS ก็ยังเป็นองค์ประกอบหลักของระบบ GNSS เนื่องจากระบบอื่น ๆ ยังไม่ได้มีการเปิดใช้งานได้เต็มระบบ ดังนั้นจึงสามารถใช้ระบบดาวเทียม GPS อธิบายหลักการทำงานของระบบ GNSS ได้เป็นอย่างดี โดยหลักการทำงานของระบบ GNSS ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนอวกาศ (Space Segment), ส่วนควบคุม (Control Segment) และส่วนผู้ใช้ (User Segment) ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทั้งสาม แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 มีรายละเอียดของส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Jeffrey, 2010)



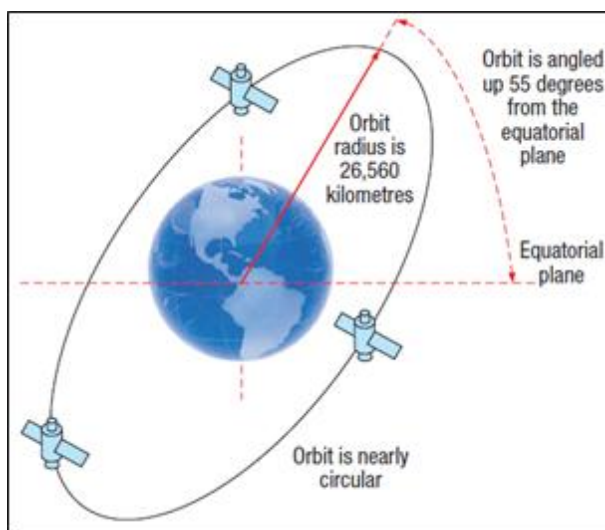
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักการทำงานของระบบ GNSS (Jeffrey, 2010)

2.1.1 ระบบดาวเทียม GPS (Global Positioning System)

ระบบดาวเทียม GPS เป็นระบบดาวเทียมแรกใน GNSS เพื่อใช้ในการนำทาง (navigation) ซึ่งออกแบบและจัดสร้างโดยกองทัพสหรัฐอเมริกา โดยใช้สัญญาณจากดาวเทียม NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging) ซึ่งระบบดาวเทียม GPS มีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนอวกาศ (Space Segment), ส่วนควบคุม (Control Segment) และส่วนผู้ใช้ (User Segment) (GPS.GOV, 2016)

2.1.1.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment)

ประกอบด้วยดาวเทียม NAVSTAR จำนวน 24 ดวง (ในจำนวนนี้ จะมีดาวเทียมสำรอง 3 ดวง เพื่อทดแทนการปฏิบัติงานของดาวเทียมดวงที่เกิดขัดข้องได้ทันที) จัดเป็นวงโคจร (GPS Constellation) อยู่ใน 6 ระนาบๆ ละ 4 ดวง โดยแต่ละระนาบเอียงทำมุม 55 องศากับระนาบศูนย์สูตร และทำมุมระหว่างกัน 60 องศา ดาวเทียมเหล่านี้ที่อยู่สูงจากผิวโลกประมาณ 20,200 กิโลเมตร ใช้เวลาในการโคจรรอบโลกประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาที และมีเวลาอยู่เหนือเส้นขอบฟ้าในแต่ละสถานที่ราว 5 ชั่วโมง ด้วยการออกแบบกลุ่มดาวเทียมในลักษณะนี้ จึงทำให้มีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง อยู่เหนือทุกๆ จุดบนพื้นผิวโลกตลอดเวลา ในปัจจุบันมีดาวเทียม GPS อยู่ในวงโคจรถึง 31 ดวง ดังรูปที่ 2.2

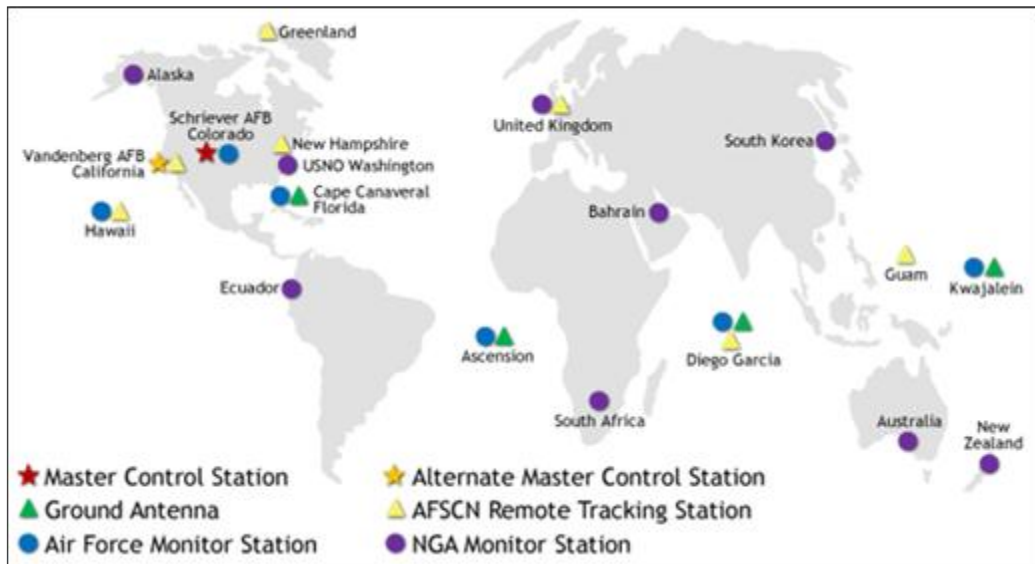


รูปที่ 2.2 วงโคจรดาวเทียมระบบ GPS (Jeffrey, 2010)

บนดาวเทียมจะมีชุดของนาฬิกาอะตอมมิก (atomic clock) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดความถี่เป็นรูบิเดียม (rubidium) จำนวน 2 เรือน และซีเซียม (cesium) จำนวน 2 เรือน ทำให้เวลามาตรฐานของดาวเทียมมีความถูกต้องสูงมาก นอกจากนี้นาฬิกาชุดนี้ยังใช้ในการควบคุมความถี่ของคลื่นส่งและรหัสที่ใช้ในระบบดาวเทียมทั้งหมด คลื่นวิทยุที่ส่งออกมาจากดาวเทียมเป็นคลื่นในช่วง L-band มี 2 ความถี่ คือ L1 ที่ความถี่ 1572.42 MHz มีความยาวคลื่น 19.03 เซนติเมตร และ L2 ที่ความถี่ 1227.60 MHz มีความยาวคลื่นเป็น 24.42 เซนติเมตร ซึ่งในปัจจุบันระบบดาวเทียม GPS ได้มีการเพิ่มความถี่ใหม่คือ L5 ที่ความถี่ 1176.45 MHz คลื่นวิทยุเหล่านี้จะถูกผสมสัญญาณเรียกสั้นๆว่าการกล้ำสัญญาณ (modulation) ด้วยรหัสข้อมูลซึ่งใช้ในการหาค่าพิกัดตำแหน่ง มีลักษณะเป็นรหัสเลขฐานสอง (binary) ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า pseudo-random noise รหัสที่ใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ รหัส C/A (coarse/acquisition code) มีความถี่ 1.023 MHz มีความยาวคลื่น 300 เมตร มีคาบเวลา 1 ใน 1,000 วินาที รหัสนี้เปิดให้พลเรือนใช้ได้อย่างอิสระ และรหัส P (precision code) มีความถี่ 10.23 MHz มีความยาวคลื่น 30 เมตร มีคาบเวลา 267 วัน รหัสนี้จะถูกสงวนไว้ใช้เฉพาะในทางการทหาร และบางหน่วยงานของรัฐบาลสหรัฐอเมริกาเท่านั้น

2.1.1.2 ส่วนควบคุม (Control Segment)

ส่วนการควบคุมของระบบ GPS ประกอบด้วยสถานีควบคุมหลัก (Master Control Station) สถานีตรวจสอบเสาอากาศพื้นดินและสถานีติดตาม (Monitor Stations) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของสถานีควบคุมหลักและสถานีติดตามดาวเทียม

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

ในปัจจุบันส่วนควบคุมของระบบ GPS ที่มีการปฏิบัติงานอยู่จะประกอบด้วยสถานีควบคุมหลัก, สถานีควบคุมหลักสำรอง, 11 สถานีควบคุมคำสั่งและติดตั้งเสาอากาศภาคพื้นดินและ 15 สถานีติดตาม โดยสถานีควบคุมหลัก (Master Control Station) จะตั้งอยู่ ณ ฐานทัพอากาศฟอลคอน (Falcon Air Force Base) ณ เมือง Colorado Springs ประเทศสหรัฐอเมริกา สถานีนี้เป็นสถานีทำการประมวลผลทั้งหมด ทั้งข้อมูลวงโคจรดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้เวลานาฬิกาดาวเทียมรวมทั้งข้อมูลอื่นๆ สถานีควบคุมคำสั่งและติดตั้งเสาอากาศภาคพื้นดิน 11 แห่งจะเป็นสถานีที่คอยส่งข้อมูลที่คำนวณได้จากสถานีควบคุมหลักไปยังดาวเทียมหรือเรียกสั้นๆ ว่า สถานีอัฟโพลิต ส่วนสถานีติดตาม (Monitor Stations) อีก 15 สถานีจะทำหน้าที่คอยติดตามดาวเทียม

ส่วนผู้ใช้ (User Segment)

ประกอบด้วย ผู้ใช้ในส่วนของพลเรือนและทหาร รวมถึงชุดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS (receiver) ซึ่งมีหลายประเภท เช่น เครื่องสำหรับงานนำหน (navigator receiver) หรือเครื่องรับสัญญาณแบบสวมใส่สำหรับการออกกำลังกายเป็นต้น ที่มีความถูกต้องในระดับ 10 เมตร เครื่องสำหรับใช้ในการทำแผนที่ (mapping receiver) ที่มีความถูกต้องในระดับน้อยกว่า 1 เมตร (sub-meter) และเครื่องที่ใช้ในงานสำรวจรังวัดความถูกต้องสูง (geodetic receiver) ที่มีความถูกต้องในระดับน้อยกว่าเซนติเมตร (sub-centimeter) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีที่ใช้ในการรังวัด (measuring techniques) และการคำนวณประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมด้วย

2.1.2 ระบบดาวเทียม GLONASS (Global Navigation Satellite System)

ระบบดาวเทียม GLONASS มีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนอวกาศ (Space Segment), ส่วนควบคุม (Control Segment) และส่วนผู้ใช้ (User Segment) (NOVATEL, 2016)

2.1.2.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment)

สำหรับดาวเทียม GLONASS ประกอบไปด้วย ดาวเทียม 24 ดวง ในวงโคจรระดับปานกลาง โดยมี 3 ระนาบวงโคจรและในแต่ละวงโคจรจะมีดาวเทียมโคจรห่างเท่าๆกัน 8 ดวง โดยระนาบวงโคจรจะทำมุมเอียงจากเป้าหมาย ประมาณ 64.8 องศา ที่ความสูง 25,510 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก จะอยู่ต่ำกว่าดาวเทียม GPS ราวๆ 1,050 กิโลเมตร และมีคาบการโคจร 11 ชั่วโมง 15 นาที 44 วินาที ปัจจุบันสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบเช่นกัน

2.1.2.2 ส่วนควบคุม (Control Segment)

ส่วนการควบคุมระบบดาวเทียม GLONASS ประกอบด้วยศูนย์ควบคุมระบบและเครือข่ายของสถานีติดตามทั่วประเทศรัสเซีย ซึ่งจะคล้ายกับของระบบ GPS ก็คือติดตามดาวเทียมที่พร้อมใช้งานเช่นเดียวกับ รวมถึงการชดเชยนาฬิกาดาวเทียมที่เกี่ยวกับเวลา GLONASS และเวลา UTC ในแต่ละวันจะอัปเดตค่าแก้ดาวเทียม 2 ครั้ง ระบบดาวเทียม GLONASS คลื่นในช่วง L-band มี 2 ความถี่ คือ L1 ที่ความถี่ 1572.42 MHz มีความยาวคลื่น 19.03 เซนติเมตร และ L2 ที่ความถี่ 1227.60 MHz มีความยาวคลื่นเป็น 24.42 เซนติเมตร

2.1.2.3 ส่วนผู้ใช้ (User Segment)

ส่วนผู้ใช้ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ติดตามและรับสัญญาณดาวเทียม ซึ่งอุปกรณ์นี้จะต้องมีความสามารถในการประมวลผลสัญญาณพร้อมกันจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง เพื่อให้การวัดทางตำแหน่ง, ความเร็วและระยะเวลาที่มีความถูกต้อง

2.2 มาตรฐานความถี่ (Frequency Standards)

มาตรฐานความถี่ทั้งหมดจะมีอยู่ภายในอุปกรณ์ ซึ่งจะผลิตความถี่ออกมาเป็นระยะๆ ซ้ำๆ เรียกอุปกรณ์นี้ว่า Resonator โดยจะขับเคลื่อนได้จากแหล่งพลังงานก็คือเครื่องกำเนิดความถี่หรือเรียกว่า ออสซิลเลเตอร์ (Oscillators) ประเภทหลักของออสซิลเลเตอร์ที่ใช้เป็นมาตรฐานความถี่แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้ (Lombardi, 2001)

2.2.1 ออสซิลเลเตอร์แบบควอตซ์ (Quartz oscillators)

ออสซิลเลเตอร์แบบควอตซ์เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1920 มีความเสถียรในช่วงสั้นที่ดีและได้มีการนำมาแทนที่ลูกตุ้มที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานสำหรับความถี่และเวลาซึ่งได้มีการนำไปใช้งานภายในนาฬิกาข้อมือรวมถึงนาฬิกาที่ต่อไปยังโครงข่ายภายในองค์กรและระบบการติดตามพื้นที่ อีกทั้งยังใช้ในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอีกด้วย

2.2.2 ออสซิลเลเตอร์แบบอะตอม (Atomic oscillators)

ออสซิลเลเตอร์แบบอะตอมหรือนาฬิกาอะตอมเป็นนาฬิกาที่ให้เวลาที่มีความถูกต้อง (หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นนาฬิกาที่มีความเที่ยงตรง) สูงมาก หลักการวัดเวลาของนาฬิกาดังกล่าวทำโดยการนำจำนวนครึ่งของการถ่ายเทพลังงานระหว่างชั้นพลังงานที่ต่างระดับกันภายในอะตอมของธาตุมารกำหนดเป็นค่าเวลา โดยหน่วยเวลาวินาทีในระบบหน่วยระหว่างประเทศหรือที่เรียกย่อๆ ว่า ระบบ SI (International System of Units) ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 9,192,631,770 ครึ่งของการถ่ายเทพลังงานภายในอะตอมของธาตุซีเซียม 133 (Cs-133) ค่าความถูกต้องของนาฬิกาอะตอมจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คืออุณหภูมิและความถี่ เมื่อความถี่สูงก็จะยิ่งเพิ่มความแม่นยำ ประเภทของนาฬิกาอะตอมจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.2.2.1 ออสซิลเลเตอร์อะตอมแบบรูบิเดียมหรือนาฬิกาอะตอมรูบิเดียม (Rubidium oscillators) เป็นนาฬิกาที่มีราคาต่ำสุดในกลุ่มนาฬิกาอะตอม มีขนาดเล็ก และมีความโดดเด่นในการใช้งานระยะสั้น เสถียรภาพทางความถี่จะอยู่ที่ 1×10^{-12} ต่อวัน

2.2.2.2 ออสซิลเลเตอร์อะตอมแบบซีเซียมหรือนาฬิกาอะตอมซีเซียม (Caesium oscillators) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นมาตรฐานความถี่เบื้องต้น ออกแบบโดย Britain's National Physical Laboratory ในปี ค.ศ. 1955 โดยธาตุ Caesium- 133 จะถูกให้ความร้อน ในเตาควบคุม ทำให้อะตอมที่มีความเร็วสูง วิ่งผ่านแม่เหล็กอะตอม ที่สามารถดูดกลืนพลังงานได้ เมื่อผ่านคลื่น Microwave จะปลดปล่อยพลังงานออกมา ที่ความถี่ 9,192,631,770 รอบต่อวินาที อะตอมบางส่วนที่ปลดปล่อยพลังงานออกมา จะเคลื่อนที่ผ่านต่อไปยังแม่เหล็ก ก่อนจะถึงตัวตรวจจับ (Detectors) ซึ่งจะวัดพลังงานที่ได้ ไปปรับเพิ่ม

ค่าความถี่ของ Microwave จนกว่าค่าความถี่ของ Microwave จะเท่ากับค่าความถี่ในการปลดปล่อยพลังงานของ Caesium-133 ซึ่งจะทำให้ Detectors วัดพลังงานได้สูงสุด ซึ่งความถี่จะมีค่าคงที่ต่อมาในปี ค.ศ. 1967 ในการประชุมเรื่องมาตรฐานหน่วยวัด ได้มีการกำหนดให้ 1 วินาที เท่ากับ "ช่วงเวลา ที่ Caesium-133 รับ และปลดปล่อยพลังงาน ในการเปลี่ยนระดับสถานะครบ 9,192,631,770 รอบ" ซึ่งกลายมาเป็นหน่วยมาตรฐานเวลา ในระบบ SI ในปัจจุบัน จะมีความโดดเด่นในการใช้งานระยะยาว ซึ่งมีอายุการใช้งาน 3 ถึง 25 ปี แบบเต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.4 นาฬิกาอะตอมแบบซีเซียม (Caesium Atomic Clock) รุ่น 5017A
ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

2.2.2.3 ออสซิลเลเตอร์อะตอมแบบไฮโดรเจนเมเซอร์หรือนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ (Hydrogen masers) นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับกันเป็นมาตรฐานความถี่ไฮโดรเจน เป็นชนิดเฉพาะของเมเซอร์ที่ใช้คุณสมบัติของอะตอมไฮโดรเจนเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงความถี่ที่มีความแม่นยำ เป็นนาฬิกาที่มีความโดดเด่นในการใช้งานระยะสั้นและระยะยาวและมีเสถียรภาพดีที่สุดในบรรดานาฬิกา แต่มีราคาแพง มีน้ำหนักมากจึงนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการด้านเวลาเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัตินาฬิกาอะตอมซีเซียมที่เก็บรักษาเวลา UTC(NIMT) (microsemi, 2014)

Characteristics	
Type of atomic clock	Caesium
Manufacturer	Symmetricom
Model	5071A
Option	High performance tube
Frequency outputs	5 MHz, 10 MHz, 1 PPS
Frequency signals	Sine
Load impedance	50 Ω
Accuracy	$\pm 5 \times 10^{-13}$
Stability (typical)	$\leq 5 \times 10^{-15}$

2.3 ระบบเวลา (Time System)

2.3.1 เวลาอะตอมสากล (International Atomic Time)

เวลาอะตอมสากลเรียกว่าเวลา TAI เป็นมาตราเวลาที่สร้างขึ้นจากค่าที่เกิดซ้ำๆ ของนาฬิกาอะตอมที่มีความเสถียรสูงสุด จึงเป็นเวลาที่ใช้อ้างอิงระหว่างประเทศสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศคำนวณเวลาดังกล่าวโดยใช้ข้อมูลจากนาฬิกาอะตอมซีเซียม (Caesium atomic frequency Standard), นาฬิกาไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-Masers) และนาฬิกาที่ห้องปฏิบัติการออกแบบเอง จำนวนมากกว่า 400 เครื่อง โดยนาฬิกาเหล่านั้นตั้งอยู่ตามสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National metrology institute) และห้องปฏิบัติการทางเวลา (Timing laboratory) ของประเทศต่างๆ จำนวนประมาณ 70 ประเทศ โดยหนึ่งในห้องปฏิบัติการที่เข้าร่วมคือ ห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศไทย โดยมีการส่งค่าเวลาจากนาฬิกาอะตอมจำนวน 3 เครื่อง การนับเวลาจากนาฬิกาอะตอมนี้ไม่คำนึงถึงการหมุนรอบตัวเองของโลกหรือการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

เมื่อได้ค่า TAI แล้วจะเอาค่า TAI นี้บวกเข้ากับ Leap second จึงจะได้เป็นค่า UTC ออกมา ดังรูปภาพที่ 3 ซึ่ง Leap second นี้ได้มาจากการสังเกตการณ์และบันทึกการหมุนรอบตัวเองของโลก โดย The International Earth rotation and Reference systems Service (IERS) ซึ่งจากการที่โลกหมุนรอบตัวเองช้าลงจึงมีการปรับค่า Leap second จาก 35 วินาทีเป็น 36 วินาทีเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 เป็นต้นมา ลำดับการเพิ่ม Leap second ตามเวลา UTC เป็นดังนี้

30 มิถุนายน 2558	23 นาฬิกา 59 นาที 59 วินาที
30 มิถุนายน 2558	23 นาฬิกา 59 นาที 60 วินาที
1 กรกฎาคม 2558	00 นาฬิกา 00 นาที 00 วินาที
1 กรกฎาคม 2558	00 นาฬิกา 00 นาที 01 วินาที

Leap second นี้จะถูกเพิ่มหรือลดเข้าไปกับค่า TAI เพื่อรักษาระยะห่างของ UTC กับ UT1 (เวลาที่โลกหมุนรอบตัวเอง) ให้ไม่เกินกว่า 0.9 วินาที นั่นคือ $UTC = TAI \pm \text{Leap}$ ดังนั้นตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2558 จำนวน Leap second = 36 วินาทีซึ่งเท่ากับเวลาที่ต่างกันระหว่างเวลาTAI – UTC = 36 วินาที จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังรูปที่ 2.5

2.3.2 เวลาสากลเชิงพิกัด (Coordinated universal Time)

เวลาสากลเชิงพิกัดเรียวย่อว่า UTC คือเวลา TAI ที่มีการเพิ่มหรือลดวินาทีทด (Leap second) เพื่อให้สอดคล้องกับเวลาที่ไ้จากการโคจรของโลก

2.3.3 เวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

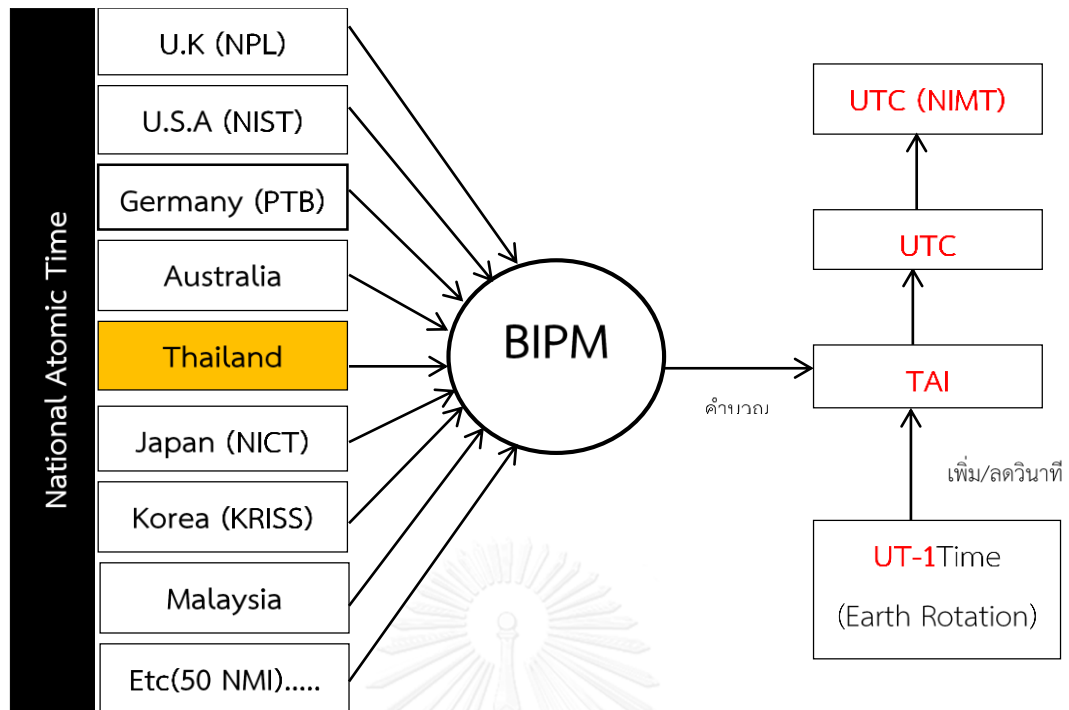
เวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติหรือเรียกว่า UTC (NIMT) คือเวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เวลาดังกล่าวได้มาจากการคำนวณค่าความแตกต่างของเวลาจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมจำนวน 3 เครื่องโดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ โดยเทียบกับเวลามาตรฐานอ้างอิงคือเวลาสากลเชิงพิกัด ซึ่งมีความไม่แน่นอน (Timing uncertainty) อยู่ที่ 20 นาโนวินาที จากรายงานเป็นประจำทุกเดือนในวารสารที่เรียกว่า เซอร์คูลาร์ ที่ ออกโดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (BIPM Circular T)

2.3.4 ค่าเวลาสากล (Solar Time)

ค่าเวลาสากล คือเวลาที่โลกใช้หมุนรอบตัวเองในหนึ่งรอบโดยเริ่มนับตั้งแต่เที่ยงคืน ซึ่งเรียกอย่างย่อว่า UT1 (Universal Time) ที่ขึ้นอยู่กับการหมุนของโลก โดยที่หน่วยงาน International Earth Rotation Service (IERS) ทำหน้าที่คำนวณหาเวลาที่โลกหมุนรอบตัวเองโดยใช้ผลการวัดการหมุนของโลกเทียบกับตำแหน่งของดวงดาวบนท้องฟ้าที่เส้น Meridian ที่ตั้งอยู่ที่เมืองกรีนนิช (Greenwich) ในประเทศอังกฤษเป็นจุดอ้างอิง

2.3.5 ระบบเวลาดาวเทียม GPS (Global Positioning System Time)

ระบบเวลาดาวเทียม GPS เรียวย่อว่า GPST ตั้งขึ้นโดยส่วนควบคุม (Control Segment) และอ้างอิงกับเวลา UTC ซึ่งมีการเก็บรักษาโดย UTC (USNO) จุดเวลาที่ 00^h กำหนดจากเที่ยงคืนของคืนวันที่ 5 มกราคม 1980 จนถึงตอนเช้าของวันที่ 6 มกราคม 1980 ซึ่ง GPST จะนำหน้าเวลา UTC อยู่ที่ 19 วินาที (Gonzalez Martinez, 2013)



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนในการคำนวณหาค่าTAI และ UTC

(http://www.nimt.or.th/?page_id=356)

จะเห็นได้ว่าค่า UTC นั้นไม่ได้เป็นค่านาฬิกาอะตอมของประเทศใดประเทศหนึ่งแต่เกิดจากนาฬิกาของหลายๆประเทศมาคำนวณร่วมกันเมื่อได้ค่า UTC แล้วแต่ละประเทศก็จะนำเอาค่าที่ได้ไปปรับเทียบเป็นเวลามาตรฐานของประเทศนั้นๆเช่นของประเทศไทยก็จะเป็น UTC(NIMT) นาฬิกาอะตอมที่ดูแลรักษาเวลา UTC(NIMT) มีการเชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณ GPS ค่าความต่างของเวลาระหว่างนาฬิกาที่เชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณ GPS และนาฬิกาดาวเทียมสามารถตรวจสอบได้โดยตรง การประสานเชื่อมต่อที่ผิดพลาดระหว่างนาฬิกาดาวเทียมและตารางเวลาอ้างอิงได้รับการกำหนดไว้แล้วใน Navigation Message

2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะเครื่องรับสัญญาณ (Data Analysis)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะมีการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ประกอบไปด้วย ความถูกต้อง (Accuracy), เสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability) และ เสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability)

2.4.1 ความถูกต้อง (Accuracy)

ในการหาค่าเพื่อบ่งบอกถึงความถูกต้องนั้น สามารถหาได้จากค่าความต่างของนาฬิกา การหาค่าความต่างของนาฬิกาจะเป็นการเปรียบเทียบจากประเภทนาฬิกาอะตอมต่อนาฬิกาที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง โดยส่วนใหญ่จะทำการเปรียบเทียบเฟสระหว่างความถี่ที่ผลิตภายในนาฬิกาอะตอมกับความถี่ที่ผลิตจากนาฬิกาที่ใช้อ้างอิง ซึ่งเมื่อทราบจำนวนของเฟส (Phase deviation) และช่วงระยะเวลาในการวัด (Measurement period) ก็จะสามารถประมาณค่าความต่างของนาฬิกาได้ จะทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่วัดใน 1 ชั่วโมง ซึ่งการหาค่าความต่างของความถี่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่มีการเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบ กับ GPST และในส่วนที่สองเราจะใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยสัญญาณเวลาจาก นาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) เครื่องรับสัญญาณ โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST ซึ่งหาได้จากสูตรดังนี้ (Riley, 2008)

$$f(\text{offset}) = \frac{\Delta t}{T} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$f(\text{offset})$	คือ ค่าความต่างของนาฬิกาในระยะเวลา 1 วัน (วินาที/วินาที)
	Δt	คือ ผลต่างช่วงเวลาที่มียค่ามากที่สุดกับค่าน้อยสุด (วินาที)
	T	คือ ช่วงเวลาที่ทำการวัดในระยะเวลา 1 วัน (วินาที)

2.4.2 เสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณนาฬิกา ค่าคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบจะมีการพิจารณาและสอบเทียบค่าต่างเชิงเวลาและค่าต่างเชิงความถี่ให้มีค่าคงที่ ซึ่งในส่วนของ การพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนความถี่มีการกำหนดโดยใช้ Allan Deviation ตามที่ระบุไว้ (Riley, 2008)

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} [x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i]^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\sigma_y(\tau)$	คือ Allan Deviation (วินาที/วินาที)
	x_i	คือ ชุดเวลาของผลการวัดความถี่ (วินาที)
	N	คือ จำนวนของผลการวัดความถี่
	τ	คือ ช่วงเวลาที่ทำการวัด (วินาที)

2.4.3 เสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability)

เสถียรภาพทางเวลาจะอธิบายคุณลักษณะด้วยค่าเบี่ยงเบนเวลา (Time deviation) ของนาฬิกาหรือระบบการกระจายสัญญาณเวลาเป็นการประมาณค่าที่ขึ้นอยู่กับ (Modified Allan Deviation) สำหรับความคลาดเคลื่อนเวลาในชุดของเวลา ตามที่กำหนดไว้ (Riley, 2008)

$$\text{Mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2 \tau^2 (N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} [x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i] \right]^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ	$\text{Mod } \sigma_y^2$	คือ Modified Allan Deviation (วินาที/วินาที)
	x_i	คือ ชุดของเฟสที่ทำการวัด (วินาที)
	N	คือ จำนวนผลของการวัดเฟสที่ทำการวัด
	m	คือ ค่าเฉลี่ย factor ซึ่ง $\tau = m\tau_0$
	τ	คือ ช่วงของเวลาที่ทำการวัด (วินาที)

ค่าเบี่ยงเบนทางเวลา (Time deviation) มีการกำหนดดังนี้

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\tau}{\sqrt{3}} \cdot \text{Mod } \sigma(\tau) \quad (2.4)$$

เมื่อ	$\sigma(\tau)$	คือ ค่าเบี่ยงเบนทางเวลา (Time Deviation) (วินาที)
	$\text{Mod } \sigma(\tau)$	คือ Modified Allan Deviation (วินาที/วินาที)
	τ	คือ เวลาเฉลี่ย (วินาที)

2.5 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)

การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงเป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณแบบ geodetic ซึ่งเป็นการรวมกันของตำแหน่งดาวเทียมที่มีความละเอียดสูงกับนาฬิกาดาวเทียมด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบ 2 ความถี่ เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Héroux & Kouba, 2001)

2.5.1 สมการค่ารังวัด

ผลรวมของแบบจำลองเชิงเส้นของข้อมูลสองความถี่ที่เรียกว่า (Ionosphere-free combination) ประกอบด้วยค่ารังวัดซูโดเรจัน (Pseudorange) และค่ารังวัดเฟส (Carrier-phase) มีความสัมพันธ์กันกับพารามิเตอร์ตำแหน่งของผู้ใช้, นาฬิกา, ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และเลขปริศนา ดังสมการค่ารังวัดต่อไปนี้

$$P^j(i) = \rho^j(i) + c(\delta t(i) - \delta T^j(i)) + ZTD(i) \cdot M(e^j(i)) + \varepsilon_p \quad (2.5)$$

$$\varphi^j(i) \cdot \lambda = \rho^j(i) + c(\delta t(i) - \delta T^j(i)) + ZTD(i) \cdot M(e^j(i)) + N^j(i) \cdot \lambda + \varepsilon_\varphi \quad (2.6)$$

โดยที่ $\rho = \sqrt{(X_s - x)^2 + (Y_s - y)^2 + (Z_s - z)^2}$ (2.7)

จากสมการ (2.5), (2.6) และ (2.7)

เมื่อ	i	คือ หมายเลขลำดับข้อมูลที่รับ
	j	คือ หมายเลขดาวเทียม
	$P^j(i)$	คือ สมการค่ารังวัดแบบซูโดเรนจ์ (เมตร)
	$\varphi^j(i)$	คือ สมการแบบเฟสคลื่นส่ง (เมตร)
	$\rho^j(i)$	คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ (เมตร) สามารถคำนวณหาได้จากฟังก์ชันของดาวเทียม (X_s, Y_s, Z_s) ค่า พิกัดของสถานี (x, y, z)
	(X_s, Y_s, Z_s)	คือ ค่าพิกัดตำแหน่งดาวเทียม (เมตร)
	(x, y, z)	คือ ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ (เมตร)
	$\delta t(i)$	คือ ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
	$\delta T^j(i)$	คือ ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
	λ	คือ ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)
	$ZTD(i)$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้ง (Zenith Total Delay) ของแต่ละข้อมูล
	$M(e^j(i))$	คือ Mapping ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม
	$N^j(i)$	คือ เลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี
	ϵ_p	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี และส่วนรบกวนของ ข้อมูลสำหรับข้อมูลแบบซูโดเรนจ์
	ϵ_φ	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี และส่วนรบกวนของ ข้อมูลสำหรับข้อมูลแบบเฟสคลื่นส่ง

2.5.2 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรดาวเทียม (Satellite orbit error)

ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมถูกคำนวณขึ้นที่สถานีควบคุมหลัก โดยอาศัยข้อมูลที่ได้รับจากสถานีติดตามดาวเทียมที่กระจายตัวอยู่รอบโลก ซึ่งมีการทำนายวงโคจรดาวเทียมล่วงหน้าและส่งข้อมูลที่ทำนายไปยังตัวดาวเทียมเพื่อให้ดาวเทียมส่งมาให้กับผู้ใช้ข้อมูลนำหนที่มาพร้อมกับคลื่นสัญญาณดาวเทียม ในความเป็นจริงคือการทำนายวงโคจรดาวเทียมให้สมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ เนื่องจากมีแรง

ต่างๆ มากกระทำกับตัวดาวเทียมมากมายหลายชนิด ด้วยเหตุนี้ตำแหน่งของดาวเทียมที่คำนวณได้จาก ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจึงปรากฏค่าคลาดเคลื่อนอยู่

2.5.3 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม (Satellite clock error)

ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมนั้นเกิดขึ้นจากการเทียบเวลาและความถี่มาตรฐานที่ แตกต่างไปจากเวลาจีพีเอส นอกจากค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (clock error) ยัง ปรากฏความคลาดเคลื่อนระยะยาวที่เกิดจากความไม่เสถียรของมาตรฐานความถี่ที่เรียกว่า ตรีฟท์ของ นาฬิกา (clock drift) และอัตราตรีฟท์ของนาฬิกา (clock drift rate) อีกด้วย โดยที่ข้อมูลค่า คลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมแต่ละดวงจะอยู่ในข้อมูลนำหนที่ส่งลงมาพร้อมกับคลื่นสัญญาณ ดาวเทียมในรูปแบบของสัมประสิทธิ์ค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมทั้งสามตัว เช่นเดียวกับค่าคลาดเคลื่อนจาก วงโคจรดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมแต่ละดวงเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณล่วงหน้า จากสถานีควบคุมหลัก

2.5.4 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ (Receiver clock error)

เนื่องจากความเสถียรของระบบนาฬิกาที่ใช้ในเครื่องรับมีความเสถียรต่ำกว่านาฬิกา ที่ใช้ใน ดาวเทียมมาก จึงมีผลให้ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาของเครื่องรับผิดไปจากเวลาจีพีเอสค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับนาฬิกาดาวเทียม ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนจะส่งผลต่อระยะที่วัดได้จะมีขนาดใหญ่กว่า ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมมาก โดยอาจมากถึงระดับไมโครวินาที ซึ่งเทียบเท่าได้กับการวัด ระยะที่ผิดพลาดไปประมาณ 300 เมตร ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาเครื่องรับจึงถือเป็นค่า คลาดเคลื่อนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดสำหรับการหาตำแหน่งจุดเดียว

2.5.5 การล่าช้าเนื่องจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศ (Atmospheric delay)

เมื่อคลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม จึงเกิดการล่าช้าอัน เนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศ ในทางทฤษฎี กำหนดให้คลื่นเดินทางใน สุญญากาศมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง แต่ในความเป็นจริง การเดินทางของคลื่นไม่ได้ผ่าน สุญญากาศโดยตลอด มีการเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกหลายชั้น ซึ่งมีชั้นบรรยากาศที่มีผลต่อ การเดินทางของคลื่น คือ ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) และชั้นโทรโปสเฟียร์ (Troposphere)

2.5.6 ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath error)

คลื่นหลายวิถี เกิดจากการสะท้อนของคลื่นสัญญาณระหว่างเดินทางจากดาวเทียมกับ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ลักษณะของพื้นผิวที่สะท้อนอาจอยู่ในแนวตั้ง ราบ หรือเอียง เช่น ผนังตึก ถนน ผิวน้ำ หรือยานพาหนะ เป็นต้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, พ.ศ. 2549)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาคุณลักษณะของนาฬิกาอะตอมความถูกต้องสูงที่เครื่องรับสัญญาณ GNSS และการวิเคราะห์ทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง ดังนั้นการกำหนดกรอบแนวคิดกระบวนการทำวิจัยทั้งการวิเคราะห์และการประมวลผลทางตำแหน่งจะต้องศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคุณลักษณะของนาฬิกาอะตอมรวมถึงศึกษาการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยเทคนิคการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง โดยได้ทำการสรุปไว้ดังนี้

จากการศึกษางานวิจัยบางส่วน พบเนื้อหาที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ก็คือ การศึกษาแบบจำลองนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ GNSS เมื่อมีการใช้เครื่องกำเนิดความถี่ (Oscillator) ที่มีประสิทธิภาพสูงรวมถึงการวิเคราะห์ผลที่มีต่อการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าการประมวลผลข้อมูลจากระบบนำทางบนพื้นโลกส่วนใหญ่ต้องการเวลาในช่วงเดียวกันระหว่างนาฬิกาส่งสัญญาณและนาฬิกาเครื่องรับ เนื่องจากความเสถียรที่จำกัดของออสซิลเลเตอร์ภายในเครื่องรับ ค่าต่างของนาฬิกาที่เครื่องรับจะเกี่ยวข้องกับระบบเวลา ซึ่งมีการประมาณค่ารังวัดทุกๆ epoch หรือขจัดออกโดยการประมวลผลที่แตกต่างกันระหว่างการรังวัดในเวลาเดียวกัน ในทางตรงกันข้าม ถ้าออสซิลเลเตอร์ภายในของเครื่องรับมีการแทนที่ด้วยนาฬิกาอะตอมที่มีความเสถียรสามารถใช้เป็นแบบจำลองค่าต่างนาฬิกาที่เครื่องรับแทนการประมาณค่า epoch by epoch ในมุมมองของความคืบหน้าในด้านของมาตรฐานความถี่ที่มีความแม่นยำสูงเราจะตรวจสอบข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการสร้างแบบจำลองนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ระดับ carrier phase และวิเคราะห์ผลกระทบต่อความแม่นยำของการประมาณค่าทางตำแหน่ง

หากเราต้องการจะใช้ประโยชน์จากเสถียรภาพความถี่จากออสซิลเลเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงร่วมกับเครื่องรับสัญญาณ GNSS เราต้องแน่ใจว่าความล่าช้าของสัญญาณภายในฮาร์ดแวร์เครื่องรับมีค่าคงที่ ดังนั้นเราจึงมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ค่าต่างของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ สำหรับจำนวนเครื่องรับสัญญาณ GNSS ซึ่งได้รับการอ้างอิงความถี่จากออสซิลเลเตอร์ทั่วไป การทดลองขึ้นอยู่กับข้อมูลจากเครื่องรับแบบ Geodetic 2 เครื่อง ซึ่งจะแสดงสัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงความล่าช้าของฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องรับไม่เกินสัญญาณรบกวนนาฬิกาที่เครื่องรับ (5ps RMS) เมื่อผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อมทั้งหมดถูกควบคุมอย่างระมัดระวัง

นอกเหนือจากเสถียรภาพเชิงความถี่ของนาฬิกาภายนอก ความเสถียรของความล่าช้าอิเล็กทรอนิกส์ในเสาอากาศรับสัญญาณที่มีความสำคัญสำหรับการสร้างแบบจำลองนาฬิกา ถึงแม้ว่าออสซิลเลเตอร์ที่ดีที่สุดจะเป็นประโยชน์สำหรับการสร้างแบบจำลองนาฬิกา หากสัญญาณความถี่หรือสัญญาณ GNSS มีการผิดเพี้ยนภายในเครื่องรับ จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อเสา

อากาศ สาย และตัวเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งเป็นแหล่งค่าคลาดเคลื่อนที่มีความสำคัญในการจำกัดเสถียรภาพความล่าช้าเล็กน้อยในเครื่องรับสัญญาณ ขนาดของข้อผิดพลาดเหล่านี้ขึ้นอยู่กับเสาอากาศและสายเคเบิลในการใช้งานเช่นเดียวกับประเภทเครื่องรับและการตั้งค่า เนื่องจากความหลากหลายของแหล่งที่มาของข้อผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในอุปกรณ์จีพีเอส

ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ GNSS โดยทั่วไปไม่สามารถแยกออกจากความล่าช้าภายในอิเล็กทรอนิกส์เครื่องรับสัญญาณ สำหรับวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองนาฬิกา แต่ค่าสัมบูรณ์ของความล่าช้าฮาร์ดแวร์ไม่สำคัญราบใดที่ยังมีค่าคงที่ในช่วงเวลาที่ต้องการ เงื่อนไขนี้สามารถตรวจสอบได้ในการทดลองด้วยเครื่องรับตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไปโดยใช้นาฬิกาทั่วไป โดยให้สัญญาณจากออสซิลเลเตอร์เหมือนกันไปยังเครื่องรับทั้งหมด เพื่อให้มั่นใจว่าความสัมพันธ์ค่าต่างนาฬิกาที่เครื่องรับระหว่างพอร์ตนำเข้าความถี่ของเครื่องรับมีค่าคงที่ นอกจากนี้ตั้งค่า baseline เป็น 0 ระยะทางขึ้นอยู่กับค่าคลาดเคลื่อนและค่าคลาดเคลื่อนเฉพาะของสถานีซึ่งสามารถจัดได้ในการประมวลผลข้อมูล ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงใดๆสามารถนำมาเป็นเหตุผลการเปลี่ยนแปลงความล่าช้าภายในเครื่องรับ การทดลองมีการติดตั้งที่ห้องปฏิบัติการมาตรวิทยา Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ประเทศเยอรมัน อุณหภูมิเสถียรถึง ± 0.5 เคลวิน ใช้นาฬิกาอะตอมแบบ active Hydrogen Maser PTB H6 (VCH-1003A) ให้สัญญาณความถี่ 5 MHz ซึ่งเป็นสองเท่าและกระจายไปยังเครื่องรับ JPS Legacy ทั้ง 2 เครื่องโดยใช้ splitter ในการแยกสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อรับทั้งหมดไปยังเสาอากาศเดียวกันรุ่น Leica AX1202 และเพื่อลดอิทธิพลของอุณหภูมิของสายอากาศของคาร์ริงวัตเฟสและซูโดเรนจ์ จะใช้สายเคเบิลเสาอากาศ รุ่น HELIAXe ยาว 50 เมตร

โดยการวิเคราะห์ตัวแปรของ covariance matrix สำหรับกรณีการวางตำแหน่งอย่างง่ายศึกษาผลกระทบจากการสร้างแบบจำลองนาฬิกาเครื่องรับ GNSS ในการแก้ปัญหาแบบสถิตและแบบจลน์ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงการใช้ low-order polynomial อย่างเหมาะสมที่จะสร้างแบบจำลองนาฬิกาเครื่องรับ ซึ่งจะมีการล็อกกับความถี่ของ hydrogen maser ตลอด 24 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับข้อมูลแบบจำลองกับข้อมูลจริงจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนาฬิกาที่เครื่องรับจะช่วยปรับปรุงความแม่นยำ (RMS) ขององค์ประกอบทางดิ่งในการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ได้ถึง 70 % ซึ่งจะปรับปรุงได้ดีกว่าการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (Static PPP) (Weinbach & Schön, 2011) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมอีกว่า เมื่อนำข้อมูลจากการรังวัดแบบสถิตย์มาใช้ในการประมวลผลแบบจลน์เพื่อทำการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งด้วยเทคนิคการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง การประมาณค่ารูปแบบใช้สำหรับการ

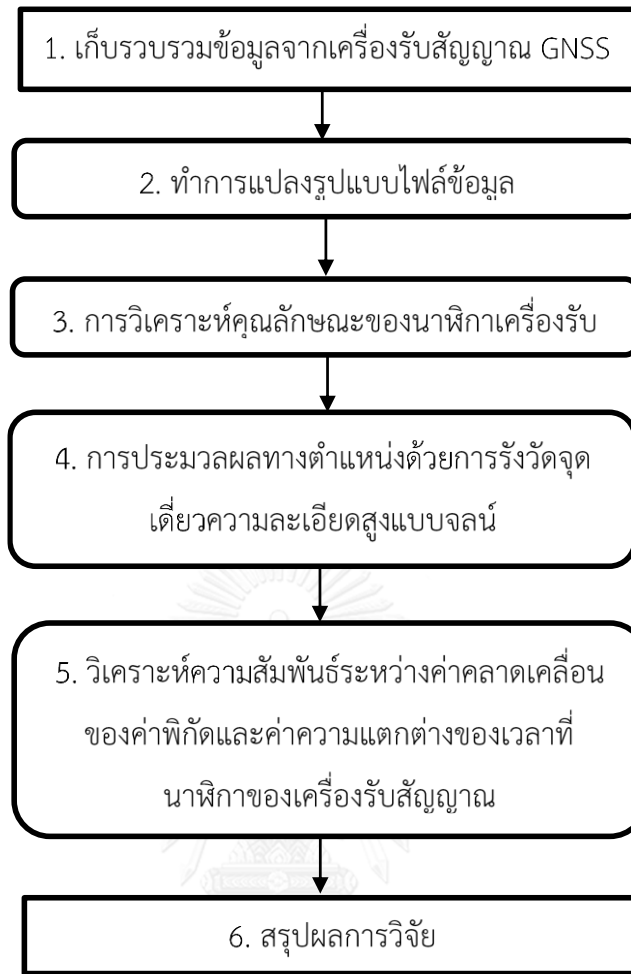
แก้ปัญหาการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์มีการปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสมเพื่อให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของผลการทดสอบ ซึ่งค่าความถูกต้องจากการประมวลผลจะอยู่ในระดับเซนติเมตร (Andrei, Salazar, & Chen, 2010)



บทที่ 3

การดำเนินงาน

จากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกเพื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณในระบบ GNSS ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) และอีกหนึ่งเครื่องรับสัญญาณที่ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ของเครื่องรับสัญญาณ ในส่วนที่สองนั้นจะทำการประมวลผลทางตำแหน่งและเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและค่าต่างของค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ (Receiver clock offset) ด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning, Kinematic PPP) โดยใช้ข้อมูลรังวัดเฉพาะข้อมูลระบบ GPS และข้อมูลระบบ GPS ร่วมกับข้อมูลระบบ GLONASS ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การรับสัญญาณข้อมูลดาวเทียม

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเนื้อหาเกี่ยวกับด้านเวลาเป็นประเด็นหลัก รวมถึงจำเป็นต้องอาศัยสัญญาณจากนาฬิกาอะตอม ซึ่งเป็นนาฬิกาอะตอมแบบซีเซียม (Caesium clock) มีอยู่ภายในห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ผู้วิจัยจึงทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น NetR9 รายละเอียดดังภาคผนวก ก จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องแรกทำการเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) คือสัญญาณความถี่ 10 MHz จากนาฬิกาอะตอมซีเซียม รุ่น 5017A ดังรูปที่ 2.4 และอีกหนึ่งเครื่องรับสัญญาณ GNSS จะใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ของเครื่องรับสัญญาณโดยใช้ Antenna รุ่นเดียวกันจำนวน 1 ตัวก็คือ Trimble Zephyr Geodetic (TRM41249.00) ดังรูป 3.2 รายละเอียดดังภาคผนวก ก พร้อมทั้งต่อ Antenna Splitter ไปยังเครื่องรับทั้ง 2 พร้อมกัน ดังรูปที่ 3.3 เพื่อให้เชื่อมั่นได้ว่าจะมีการรับสัญญาณ ณ ตำแหน่งเดียวกัน โดยทำการรังวัดเก็บข้อมูลเป็นเวลาทั้งหมด 26 วัน เริ่มตั้งแต่วันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2559 ถึง 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

ข้อมูลที่ได้จากการรับสัญญาณจะแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่มีการเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) และข้อมูลชุดที่ 2 จะเป็นข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) เครื่องรับสัญญาณ ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับและการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์นั้น ต้องมีการแปลงรูปแบบไฟล์ก่อน



รูปที่ 3.2 เสาอากาศยี่ห้อ Trimble รุ่น Zephyr Geodetic



รูปที่ 3.3 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ ยี่ห้อ Trimble รุ่น Net R9 จำนวน 2 เครื่อง
พร้อมทั้งต่อ Antenna Splitter

3.2 การแปลงรูปแบบไฟล์ข้อมูล

ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS เบื้องต้นจะเป็นข้อมูลไฟล์แบบ .T02 ซึ่งในการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาและการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงจะต้องทำการแปลงรูปแบบไฟล์ก่อน งานวิจัยครั้งนี้มีการแปลงรูปแบบไฟล์ออกเป็น 2 รูปแบบดังนี้

3.2.1 รูปแบบ Rinex (Receiver Independent Exchange) มาตรฐาน

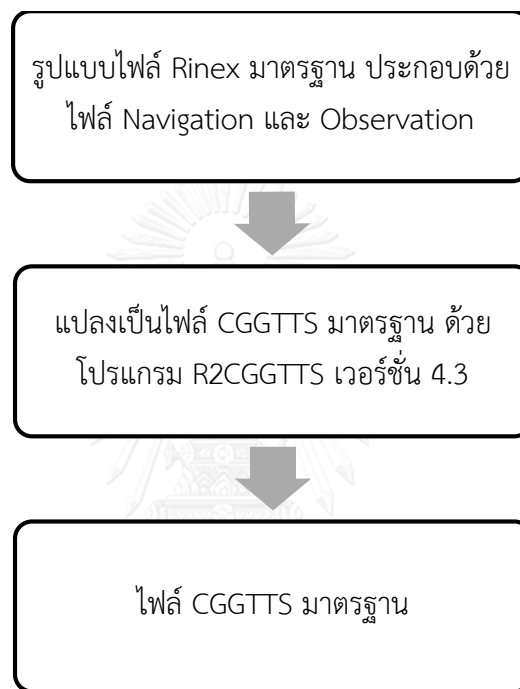
การวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาและการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ต้องมีการแปลงข้อมูลไฟล์แบบ .T02 ให้เป็นไฟล์ Rinex มาตรฐาน ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการใช้ 2 โปรแกรมในการแปลงไฟล์ข้อมูลคือ โปรแกรม ConvertToRinex เวอร์ชัน 2.50.0 และโปรแกรม TEQC ซึ่งข้อมูลที่แปลงด้วยโปรแกรม ConvertToRinex เวอร์ชัน 2.50.0 มีการนำไปใช้ในการประมวลผลข้อมูลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงโดยรังวัดแบบจลน์ (Kinematic PPP) โดยใช้โปรแกรม PANDA ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก http://www.trimble.com/support_trl.aspx?Nav=Collection-40773&pt=Trimble%20RINEX ส่วนข้อมูลที่แปลงด้วยโปรแกรม TEQC จะนำไปใช้ต่อไปในการแปลงรูปแบบไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ CGGTTS มาตรฐานเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกา ซึ่งสามารถดาวน์โหลดโปรแกรมได้จาก <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>

3.2.2 รูปแบบ CGGTTS (The CCTF Group on GNSS Time Transfer Standards) มาตรฐาน

การวิเคราะห์คุณลักษณะนาฬิกาเครื่องรับจำเป็นต้องใช้รูปแบบไฟล์ CGGTTS มาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งทำการแปลงข้อมูลจากรูปแบบไฟล์ Rinex มาตรฐานเป็นไฟล์ CGGTTS มาตรฐาน โดยใช้ไฟล์ข้อมูล observation และไฟล์ navigation message ที่มีการรับข้อมูลทุกๆ 30 วินาที ในการนำมาใช้แปลงไฟล์ข้อมูลด้วยโปรแกรม R2CGGTTS เวอร์ชัน 4.3 จาก BIPM ดังรูปที่ 3.4 และคำอธิบายข้อมูลในรูปแบบของ CGGTTS ดังตารางที่ 3.1

PRN	CL	MJD	STTIME	TRKL	ELV	AZTH	REFSV	SRSV	REFSYS	SRSYS	DSG	IOE	MDTR	SMDT	MDIO	SMDI	MSIO	SMSI	ISG	FR	HC	FRC	CK	PS1	PS2
			hhmmss	s	.1dg	.1dg	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ns	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns						
15	FF	57415	000600	780	443	1951	+2941704	-13	-1982	-31	4	75	118	-17	478	+35	478	35	6	0	0	L3P	36	L1C	L2P
2	FF	57415	000600	780	391	531	-5996264	+7	-1923	+9	7	80	130	+1	453	+11	453	11	5	0	0	L3P	C1	L1C	L2P
12	FF	57415	000600	780	299	2169	-3642184	-43	-1994	-16	5	66	165	+24	491	+24	491	24	1	0	0	L3P	36	L1C	L2P
5	FF	57415	000600	780	433	91	+1512055	-19	-1971	+16	5	72	120	+12	449	-1	449	-1	4	0	0	L3P	C6	L1C	L2P
6	FF	57415	000600	780	119	892	-1363571	-107	-1920	-46	17	40	388	+67	536	+71	536	71	12	0	0	L3P	47	L1C	L2P
25	FF	57415	000600	780	255	2614	+1066951	+67	-1935	+2	8	9	190	+11	443	+14	443	14	7	0	0	L3P	FB	L1C	L2P
29	FF	57415	000600	780	280	3261	-6530754	-45	-1988	-35	15	41	175	-39	488	+29	488	29	12	0	0	L3P	71	L1C	L2P
13	FF	57415	000600	780	622	1246	+1811961	+23	-1984	-3	5	29	93	-4	461	+4	461	4	3	0	0	L3P	C3	L1C	L2P
20	FF	57415	000600	780	453	2907	-3889490	-22	-1912	+5	8	71	116	-2	418	-7	418	-7	4	0	0	L3P	F4	L1C	L2P
15	FF	57415	002200	780	522	1961	+2941717	+49	-1987	+31	4	75	104	-12	484	-22	484	-22	5	0	0	L3P	37	L1C	L2P
2	FF	57415	002200	780	387	626	-5996258	+28	-1915	+30	9	80	131	+2	458	-4	458	-4	5	0	0	L3P	EB	L1C	L2P

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรูปแบบไฟล์ CGGTTS มาตรฐาน



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการแปลงไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ CGGTTS มาตรฐาน

ตารางที่ 3.1 คำอธิบายข้อมูลในรูปแบบของ CGGTTS (CGGTTS, 2016)

ประเภทของข้อมูล	คำอธิบาย
PRN	เลข PRN ของดาวเทียม
CL	ประเภทของการมองเห็นร่วมของการติดตามสัญญาณจากดาวเทียม
MJD	Modified Julian Date ของการเริ่มติดตามสัญญาณจากดาวเทียม
STTIME	เวลาสากลเชิงพิกัดเป็น ชั่วโมง นาที วินาที ของการเริ่มติดตามสัญญาณจากดาวเทียม
TRKL	ระยะเวลาของการติดตามสัญญาณจากดาวเทียมเป็นวินาที
ELV	มุมเงยของดาวเทียมที่จุดกึ่งกลางของการติดตามสัญญาณจากดาวเทียม
AZTH	มุมกวาดของดาวเทียมที่วัดบนพื้นโลก (Azimuth) ที่จุดกึ่งกลางของการติดตามสัญญาณจากดาวเทียม
REFSV	ความแตกต่างของเวลาระหว่างนาฬิกาอ้างอิงของห้องปฏิบัติการและเวลาจากนาฬิกาบนดาวเทียม (วินาที)
SRSV	ความลาดชันหาจากกระบวนการ Linear Fit เพื่อหาค่า REFSV
REFGPS	ความแตกต่างของเวลาระหว่างนาฬิกาอ้างอิงของห้องปฏิบัติการและเวลาของระบบดาวเทียมจีพีเอส (GPS System Time) (วินาที)
SRGPS	ความลาดชันหาจากกระบวนการ Linear Fit เพื่อหาค่า REFGPS
DSG	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าตกค้าง (Residual) ของกระบวนการ Linear Fit ใช้เพื่อหาค่า REFGPS (วินาที)
IOE	Index of Ephemeris ดัชนีของตำแหน่งของดาวเทียม
MDTR	Modelled Tropospheric Delay (วินาที)
SMDT	ความลาดชันหาจากกระบวนการ Linear Fit เพื่อหาค่า MDTR
MDIO	Modelled Ionospheric Delay (วินาที)
SMDI	ความลาดชันหาจากกระบวนการ Linear Fit เพื่อหาค่า MDIO
MSIO	Measured Ionospheric Delay (วินาที)
SMSI	ความลาดชันหาจากกระบวนการ Linear Fit เพื่อหาค่า MSIO
ISG	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าตกค้างจากกระบวนการ Linear Fit เพื่อหาค่า MSIO (วินาที)

3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับ

เครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น NetR9 เป็นเครื่องรับสัญญาณหลายช่องรับสัญญาณ (multi - channel) แบบสองความถี่ (dual frequency) สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกา จะทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบ ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับ สัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) ก็คือจากนาฬิกาอะตอมซีเซียม และเครื่องรับสัญญาณที่ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ของเครื่องรับสัญญาณ ข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบไฟล์ CGGTTS มาตรฐาน จาก BIPM เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกา จะประกอบไปด้วยข้อมูลไฟล์ observation จำนวน 2 ไฟล์ ได้แก่ไฟล์ข้อมูล GPS และไฟล์ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 การใช้เฉพาะข้อมูล GPS
- กรณีที่ 2 การใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

ทั้ง 2 กรณีจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลในด้านความถูกต้อง ดังรูปที่ 3.6, เสถียรภาพเชิงความถี่ ดังรูปที่ 3.7, เสถียรภาพเชิงเวลา ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีการวิเคราะห์ข้อมูล 2 ชุด โดยชุดแรกจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ของเครื่องรับสัญญาณ ก็คือทำการเทียบระหว่างเวลา UTC และเวลา GPST และชุดสองจากเครื่องรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) ก็คือทำการเทียบระหว่างเวลา UTC (NIMT) และเวลา GPST

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างแสดงค่าความถูกต้องที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ
ด้วยการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC และเวลา GPST

Clock offset (second/second)	MJD
	57415
Maximum (ns)	-169.64
Minimum (ns)	-198.03
Average (ns)	-184.10
Range (ns)	28.33
Frequency offset (s/s)	3.28E-13

จากตารางที่ 3.2 ค่าความแตกต่างของเวลา UTC และ GPST เฉลี่ยที่ -184.10 นาโนวินาที
คิดเป็นค่าคลาดเคลื่อนเป็นระยะทาง คือ -55.23 เมตร

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายใน
เครื่องรับด้วยการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC และเวลา GPST

Frequency stability (second/second)	
Interval time (minute)	MJD
	57315
16	3.12E-12
32	1.60E-12
48	8.81E-13
64	5.06E-13
80	3.34E-13
96	2.43E-13
112	1.83E-13
128	1.42E-13
144	1.07E-13

จากตาราง 3.3 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ใน 1 วัน โดยพิจารณาเป็นช่วงเวลาที 16 นาที 32 นาที 48 นาที 64 นาที 80 นาที 96 นาที 112 นาที 128 นาที และ 144 นาที ตามลำดับ พบว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่จะมีค่าน้อยกว่า $1E-12$ เมื่อระยะเวลาในการตรวจรับสัญญาณนานขึ้น

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC และเวลา GPST

Time stability (nanosecond)	
Interval time (minute)	MJD
	57315
16	1.73
32	1.77
48	1.47
64	1.12
80	0.92
96	0.81
112	0.71
128	0.63
144	0.54

จากตาราง 3.4 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาใน 1 วัน โดยพิจารณาเป็นช่วงเวลาที 16 นาที 32 นาที 48 นาที 64 นาที 80 นาที 96 นาที 112 นาที 128 นาที และ 144 นาที ตามลำดับ พบว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาจะมีค่าที่ดีขึ้นเป็นจำนวน 3 เท่า เมื่อระยะเวลาในการตรวจรับสัญญาณนานขึ้น

3.4 การประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning) โดยใช้โปรแกรม PANDA

การประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์โดยใช้โปรแกรม PANDA มีการกำหนดช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลอยู่ที่ทุกๆ 30 วินาทีและรับสัญญาณต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 26 วัน

สำหรับการประมวลผลจะใช้ข้อมูลค่ารังวัดซูโดเรจัน (Pseudorange) และค่ารังวัดเฟส (Carrier-phase) ก่อนการประมวลผลจำเป็นต้องขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่สามารถขจัดได้ประกอบไปด้วย ค่าคลาดเคลื่อนของวงโคจร (Satellite ephemeris error) และค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาบนดาวเทียม (Satellite clock offset) สามารถขจัดโดยใช้ข้อมูลการประมวลผลที่ให้ค่าวงโคจรความละเอียดสูงและค่านาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงที่ชื่อว่า Final Products ที่อยู่ในรูปแบบของ SP3 จากหน่วยงานชื่อว่า International GNSS Service (IGS) ซึ่งในการประมวลผลนี้จะใช้ข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงจาก German Research Centre For Geosciences (GFZ), ค่าความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) สามารถขจัดโดยใช้ผลรวมของแบบจำลองเชิงเส้นของข้อมูลสองความถี่ที่เรียกว่า (Ionosphere-free combination), ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (Multipath mitigation) สามารถขจัดโดยกำหนดไม่ให้เกิดขึ้นโดยการตั้งเสาอากาศในบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ ไม่มีพื้นผิวที่จะสะท้อนสัญญาณ อยู่ในที่โล่งแจ้ง

ในการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP Kinematic) จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและที่ต้องประมาณค่า ประกอบด้วยค่าพิกัดตำแหน่งของเครื่องรับ 3 มิติ (x, y, z) , ค่าความแตกต่างของนาฬิกาที่ตัวรับสัญญาณดาวเทียม (Receiver clock offset), ค่าคลาดเคลื่อนในบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ (Tropospheric delay) และค่าประมาณของเลขปริศนา (Ambiguity resolution)

หลังจากทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆข้างต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้มาจากเครื่องรับสัญญาณที่มีการเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) ก็คือนาฬิกาอะตอมซีเซียม และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) เครื่องรับสัญญาณ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 การใช้เฉพาะข้อมูล GPS
- กรณีที่ 2 การใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

หลังจากทำการประมวลผลข้อมูลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP) ทั้ง 2 กรณีแล้ว ก็ทำการนำผลลัพธ์ที่ได้นั้นมาทำการประเมินความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่ง รวมถึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation) เพื่อดูว่าหากเราใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมที่มีเสถียรภาพสูงจะส่งผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (Positioning accuracy) ดีกว่าการใช้นาฬิกาที่อยู่ภายในเครื่องรับสัญญาณมากน้อยเพียงใด

3.5 การทดสอบประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม PANDA

การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับภายในเครื่องรับและเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมในครั้งนี้ ใช้มาตรฐานสำหรับข้อมูลเชิงพื้นที่ (National Standard for Spatial Data Accuracy : NSSDA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นหลัก โดยใช้ค่า RMSE (Root Mean Square Error) ประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่ง และค่าถูกต้องเชิงตำแหน่งจะอยู่ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ซึ่งใช้มาตรฐาน National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) ของ Federal Geographic Data Committee (FGDC) ในการทดสอบ (FGDC, 1999)

3.5.1 ค่าถูกต้องทางราบ ใช้ค่าสถิติของความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ดังนี้

$$RMSE_E = \sqrt{\sum(E_{data\ i} - E_{check\ i})^2 / n} \quad (3.1)$$

$$RMSE_N = \sqrt{\sum(N_{data\ i} - N_{check\ i})^2 / n} \quad (3.2)$$

โดยที่	$RMSE_E$	คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน East (เมตร)
	$RMSE_N$	คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน North (เมตร)
	sqrt	Square Root
	$E_{data\ i}, N_{data\ i}$	เป็นค่าพิกัดของจุดทดสอบที่ i ในชุดข้อมูล (เมตร)
	$E_{check\ i}, N_{check\ i}$	เป็นค่าพิกัดของจุดทดสอบที่ i ที่ใช้เป็นค่าอ้างอิงที่ได้จากการรังวัดในสนาม (เมตร)
	n	คือ จำนวนจุดที่ใช้ทดสอบทั้งหมด
	i	คือ จุดทดสอบเริ่มจาก 1 ถึง n

ความคลาดเคลื่อนทางราบของจุดที่ i คือ

$$RMSE_{EN} = \sqrt{(E_{data\ i} - E_{check\ i})^2 + (N_{data\ i} - N_{check\ i})^2} \quad (3.3)$$

$$RMSE_r = \sqrt{\sum((E_{data\ i} - E_{check\ i})^2 + (N_{data\ i} - N_{check\ i})^2) / n} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 นำมาซึ่งผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดใดๆ เป็น
ดังสมการที่ 3.5

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_E^2 + RMSE_N^2} \quad (3.5)$$

การคำนวณความถูกต้อง (Accuracy) เชิงตำแหน่ง ตามมาตรฐาน NSSDA สามารถคำนวณ
ได้จากสูตร ดังนี้ (FGDC, 1999)

$$Accuracy_r = 1.7308 \times RMSE_r \quad (3.6)$$

โดยที่ $Accuracy_r$ คือ ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (เมตร)
1.7308 คือ ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้คูณเข้าไปเพื่อให้ได้ความถูกต้องทางราบที่
ระดับความเชื่อมั่น 95%
 $RMSE_r$ คือ ความคลาดเคลื่อนทางราบของจุดที่ i (เมตร)

3.5.2 ค่าความถูกต้องทางดิ่ง ใช้ค่าสถิติของความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ดังนี้

$$RMSE_H = \sqrt{\sum(H_{data\ i} - H_{check\ i})^2 / n} \quad (3.7)$$

โดยที่ $RMSE_H$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน Height (เมตร)
 $\sqrt{\quad}$ Square Root
 $H_{data\ i}$ เป็นค่าพิกัดของจุดทดสอบที่ i ในชุดข้อมูล (เมตร)
 $H_{check\ i}$ เป็นค่าพิกัดของจุดทดสอบที่ i ที่ใช้เป็นค่าอ้างอิงที่ได้จาก
การรังวัดในสนาม (เมตร)
 n คือ จำนวนจุดที่ใช้ทดสอบทั้งหมด
 i คือ จุดทดสอบเริ่มจาก 1 ถึง n

ความคลาดเคลื่อนทางดิ่งของจุดที่ i คือ

$$RMSE_H = \sqrt{(H_{data\ i} - H_{check\ i})^2} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.7 ค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดใดๆ เป็นดังสมการที่ 3.9

$$RMSE_H = \sqrt{RMSE_H^2} \quad (3.9)$$

การคำนวณความถูกต้อง (Accuracy) เชิงตำแหน่ง ตามมาตรฐาน NSSDA สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{Accuracy}_H = 1.9600 \times \text{RMSE}_H \quad (4.0)$$

โดยที่ Accuracy_H คือ ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง (เมตร)
 1.9600 คือ ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้คูณเข้าไปเพื่อให้ได้ความถูกต้องทางดิ่งที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 RMSE_H คือ ความคลาดเคลื่อนทางดิ่งของจุดที่ i (เมตร)

3.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation)

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ จะหาโดยการหาค่าต่างของข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละค่าพิกัด และค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อเนื่องกันในเครื่องรับกับเครื่องรับสัญญาณที่ต่อเนื่องกันในเครื่องรับ จากนั้นทำการพล็อตกราฟพร้อมทั้งหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งจะหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เป็นค่าวัดความสัมพันธ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใช้วัดขนาดของความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปร มี 2 ลักษณะ คือ $-1 \leq r \leq 1$ และ $0 \leq r \leq 1$

การบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ จะใช้ตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง แต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับน้อย หรือไม่มีเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยทั่วไปอาจใช้เกณฑ์ดังนี้ (Hinkle, Wiersma, & Jurs, 1998)

ค่า r ระดับของความสัมพันธ์

- 0.90 - 1.00 มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
- 0.70 - 0.90 มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
- 0.50 - 0.70 มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง
- 0.30 - 0.50 ความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ
- 0.00 - 0.30 ความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก

และเครื่องหมาย $+$, $-$ หน้าตัวเลขสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะบอกถึงทิศทางของความสัมพันธ์
โดยที่หาก r มีเครื่องหมาย $+$ หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางเดียวกัน
 r มีเครื่องหมาย $-$ หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางตรงกันข้าม
ยกเว้นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางชนิดที่มีลักษณะ $0 \leq r \leq 1$ ซึ่งจะบอกได้เพียงขนาดหรือ
ระดับของความสัมพันธ์เท่านั้น ไม่สามารถบอกทิศทางของความสัมพันธ์ได้



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณและประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์โดยใช้โปรแกรม PANDA ซึ่งใช้เฉพาะข้อมูล GPS และข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในช่วงต้นที่ผ่านมาสามารถสรุปผลการดำเนินงานโดยแสดงผลออกมาในรูปแบบตารางรวมถึงกราฟได้ดังนี้

4.1 ผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับ

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาเครื่องรับในด้านความถูกต้อง, เสถียรภาพเชิงความถี่ และเสถียรภาพเชิงเวลานั้น จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีซึ่งแต่ละกรณีจะมีข้อมูล 2 ชุด โดยในชุดแรกเป็นผลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) โดยใช้เวลา UTC (NIMT) เทียบกับ GPST ในชุดที่สองเป็นผลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ของเครื่องรับสัญญาณโดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST สามารถแบ่งการวิเคราะห์ผลลัพธ์ออกเป็นกรณีได้ดังนี้

- กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ที่ใช้เฉพาะข้อมูล GPS
- กรณีที่ 2 การวิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

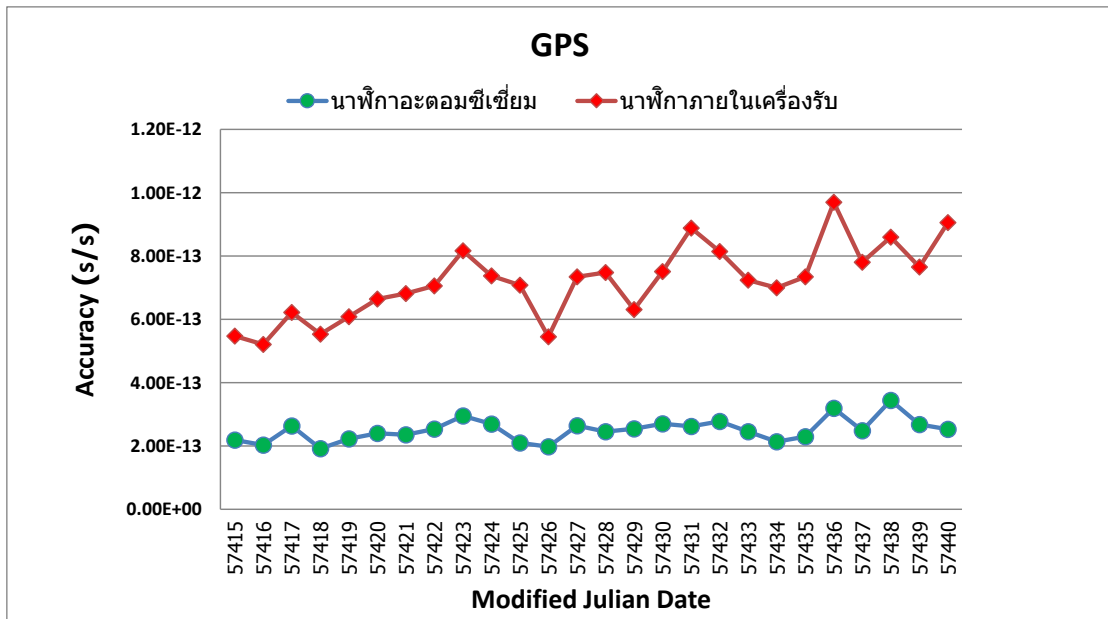
ซึ่งในแต่ละกรณีจะแสดงผลออกมาเพื่อดูว่าระหว่างข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) ก็คือนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ของเครื่องรับสัญญาณ ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

4.1.1 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ

4.1.1.1 ค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ด้วยการใช้อุปกรณ์ GPS แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณด้วยการใช้อุปกรณ์ GPS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ (วินาที/วินาที)

DOY	MJD	นาฬิกาภายในเครื่องรับ	นาฬิกาอะตอมซีเซียม
028	57415	3.28E-13	2.19E-13
029	57416	3.18E-13	2.03E-13
030	57417	3.58E-13	2.64E-13
031	57418	3.62E-13	1.92E-13
032	57419	3.86E-13	2.23E-13
033	57420	4.24E-13	2.40E-13
034	57421	4.45E-13	2.36E-13
035	57422	4.52E-13	2.54E-13
036	57423	5.21E-13	2.96E-13
037	57424	4.68E-13	2.70E-13
038	57425	4.98E-13	2.10E-13
039	57426	3.47E-13	1.98E-13
040	57427	4.70E-13	2.65E-13
041	57428	5.03E-13	2.46E-13
042	57429	3.77E-13	2.54E-13
043	57430	4.81E-13	2.70E-13
044	57431	6.26E-13	2.62E-13
045	57432	5.36E-13	2.78E-13
046	57433	4.79E-13	2.46E-13
047	57434	4.86E-13	2.14E-13
048	57435	5.05E-13	2.29E-13
049	57436	6.51E-13	3.20E-13
050	57437	5.32E-13	2.49E-13
051	57438	5.15E-13	3.45E-13
052	57439	4.97E-13	2.68E-13
053	57440	6.53E-13	2.53E-13



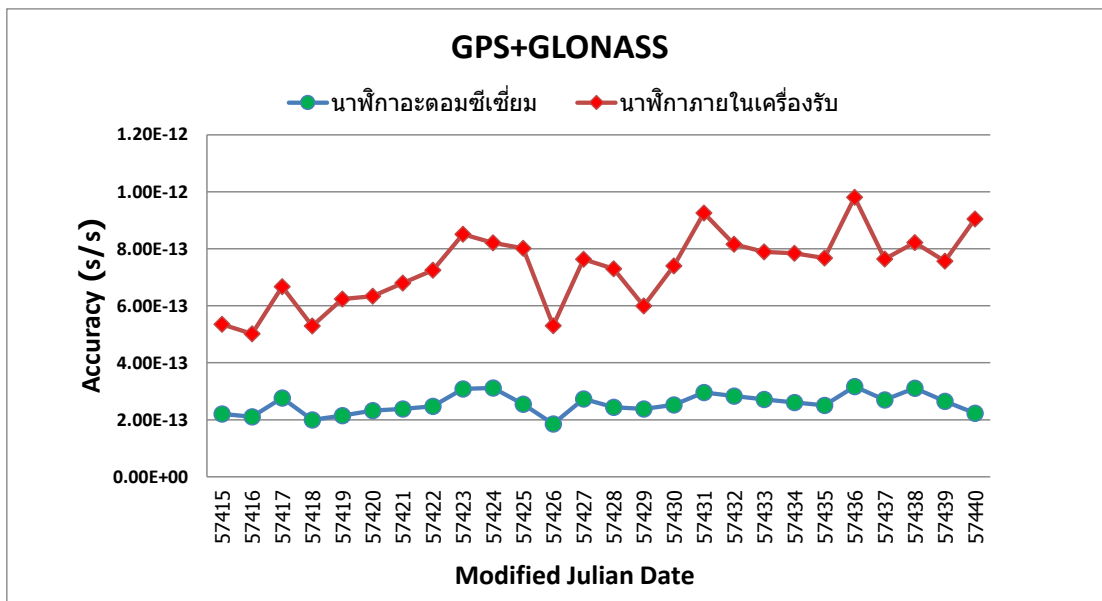
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม (UTC(NIMT)) กับนาฬิกาภายในเครื่องรับ (UTC) ด้วยการใช้ข้อมูล GPS

จากตารางที่ 4.1 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS เพื่อหาค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับทั้งหมด 26 วัน ปรากฏว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันประมาณ 5×10^{-13} (วินาที/วินาที) โดยค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อจากนาฬิกาภายในเครื่องรับอยู่ที่ 3.18×10^{-13} ถึง 6.53×10^{-13} (วินาที/วินาที) ส่วนค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาซีเซียมอยู่ที่ 1.92×10^{-13} ถึง 3.45×10^{-13} (วินาที/วินาที) ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมดีกว่าเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ

4.1.1.2 ค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับ
นาฬิกาภายในเครื่องรับ ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณด้วยการใช้ข้อมูล
GPS ร่วมกับ GLONASS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายใน
เครื่องรับ (วินาที/วินาที)

DOY	MJD	นาฬิกาภายในเครื่องรับ	นาฬิกาอะตอมซีเซียม
028	57415	3.14E-13	2.21E-13
029	57416	2.91E-13	2.11E-13
030	57417	3.90E-13	2.77E-13
031	57418	3.29E-13	2.00E-13
032	57419	4.09E-13	2.15E-13
033	57420	4.01E-13	2.33E-13
034	57421	4.42E-13	2.38E-13
035	57422	4.77E-13	2.47E-13
036	57423	5.42E-13	3.09E-13
037	57424	5.09E-13	3.12E-13
038	57425	5.48E-13	2.54E-13
039	57426	3.45E-13	1.85E-13
040	57427	4.91E-13	2.73E-13
041	57428	4.86E-13	2.44E-13
042	57429	3.60E-13	2.39E-13
043	57430	4.87E-13	2.52E-13
044	57431	6.30E-13	2.96E-13
045	57432	5.32E-13	2.84E-13
046	57433	5.17E-13	2.72E-13
047	57434	5.24E-13	2.61E-13
048	57435	5.17E-13	2.51E-13
049	57436	6.63E-13	3.17E-13
050	57437	4.94E-13	2.70E-13
051	57438	5.11E-13	3.11E-13
052	57439	4.91E-13	2.65E-13
053	57440	6.81E-13	2.23E-13

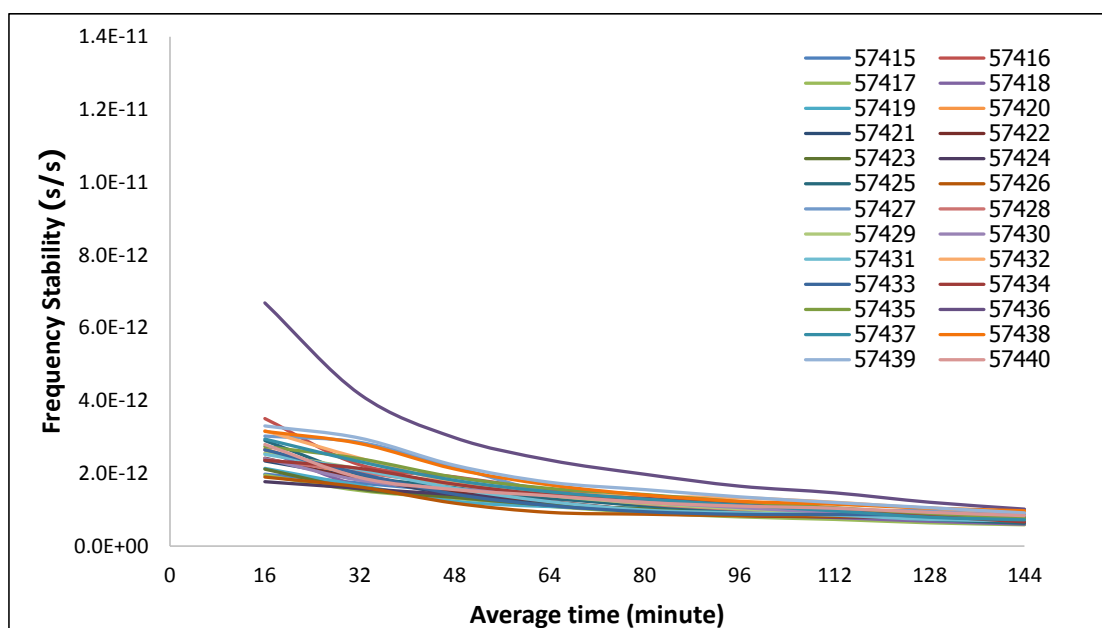


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม (UTC(NIMT)) กับนาฬิกาภายในเครื่องรับ (UTC) ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

จากตารางที่ 4.2 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS เพื่อหาค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับทั้งหมด 26 วัน ปรากฏว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันประมาณ 5×10^{-13} (วินาที/วินาที) เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล GPS โดยค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อจากนาฬิกาภายในเครื่องรับอยู่ที่ 2.91×10^{-13} ถึง 6.81×10^{-13} (วินาที/วินาที) ส่วนค่าความถูกต้อง จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมอยู่ที่ 1.85×10^{-13} ถึง 3.17×10^{-13} (วินาที/วินาที) ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความถูกต้องจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมดีกว่าเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ

4.1.2 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ

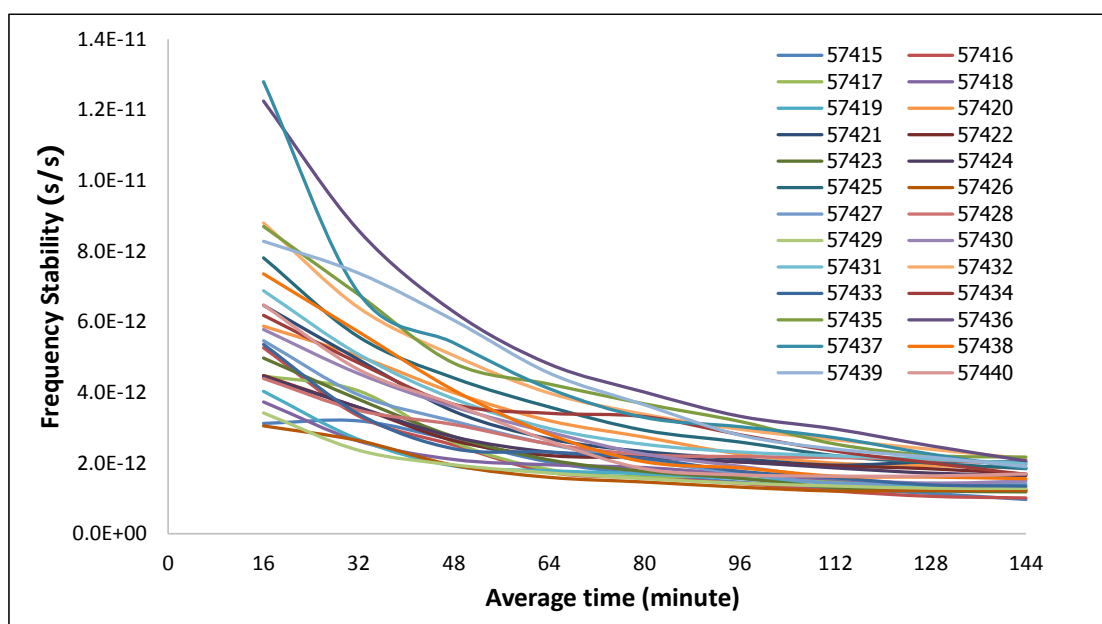
4.1.2.1 ค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณ ที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST (วินาที/วินาที) (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ด้วยข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST

จากรูปที่ 4.3 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิงความถี่จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เครื่องรับทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่เฉลี่ยจะอยู่ที่ 2.73×10^{-12} , 2.12×10^{-12} , 1.67×10^{-12} , 1.37×10^{-12} , 1.19×10^{-12} , 1.06×10^{-12} , 9.58×10^{-13} , 8.51×10^{-13} , 7.67×10^{-13} (วินาที/วินาที) ต่อวันตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่จะมีความเสถียรขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 64 นาที

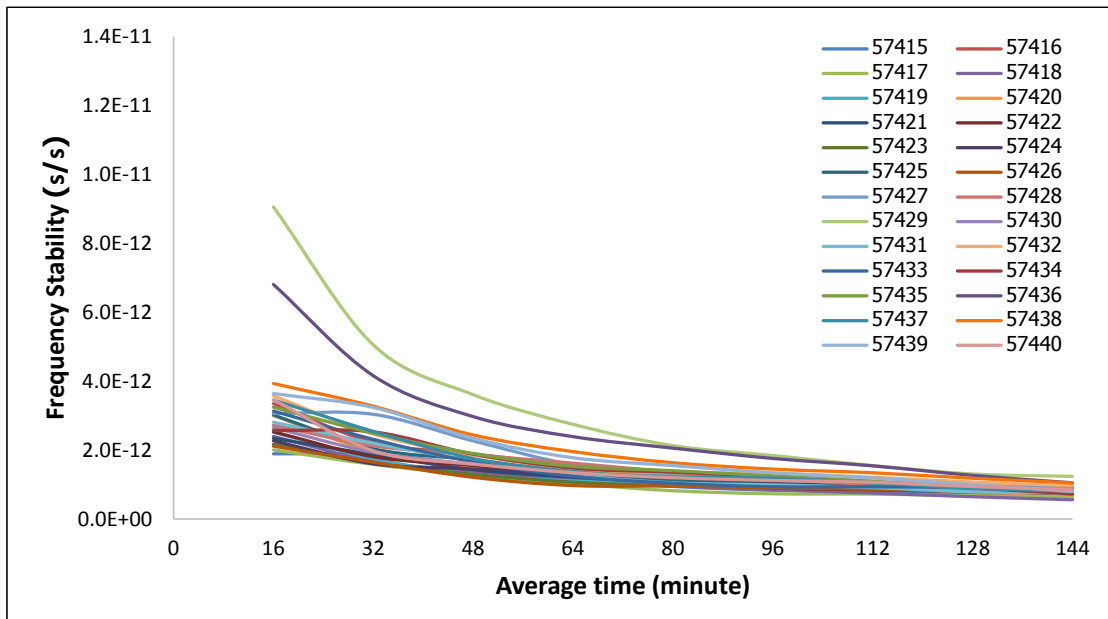
4.1.2.2 ค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับโดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST (วินาที/วินาที) (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ของข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับโดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

จากรูปที่ 4.4 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิงความถี่จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่เฉลี่ยจะอยู่ที่ 6.15×10^{-12} , 4.57×10^{-12} , 3.48×10^{-12} , 2.78×10^{-12} , 2.38×10^{-12} , 2.10×10^{-12} , 1.86×10^{-12} , 1.72×10^{-12} , 1.60×10^{-12} (วินาที/วินาที) ต่อวันตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่จะมีความเสถียรขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 96 นาที

4.1.2.3 ค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ที่ได้ จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST (วินาที/วินาที) (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ข)

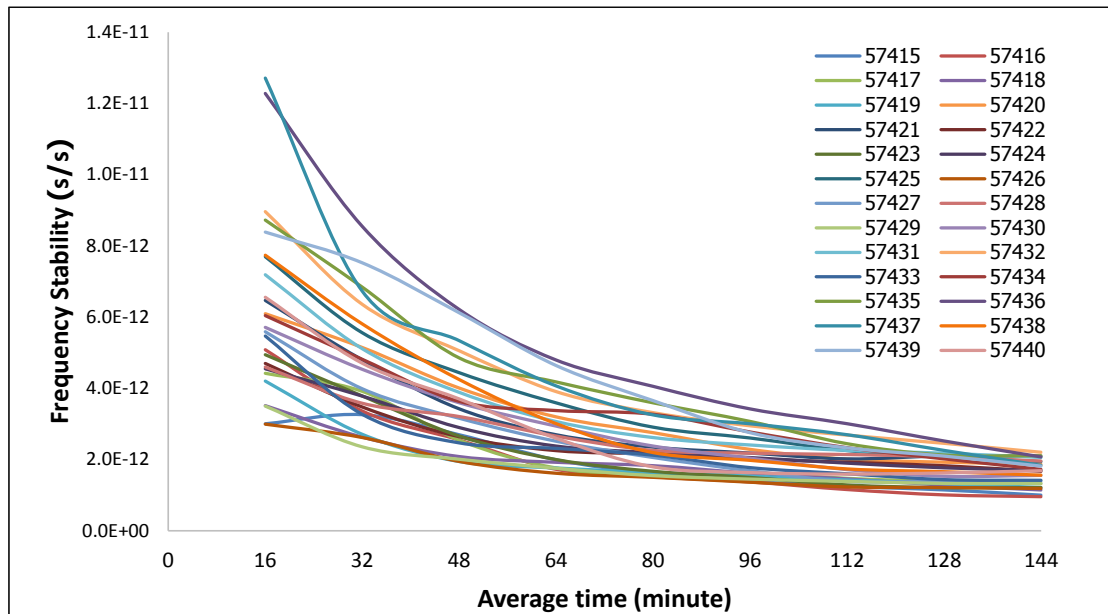


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST



จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิงความถี่จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่เฉลี่ยจะอยู่ที่ 3.22×10^{-12} , 2.35×10^{-12} , 1.81×10^{-12} , 1.46×10^{-12} , 1.26×10^{-12} , 1.14×10^{-12} , 1.03×10^{-12} , 9.09×10^{-13} , 8.20×10^{-13} (วินาที/วินาที) ต่อวันตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่จะมีความเสถียรขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 64 นาที

4.1.2.4 ค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับโดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST (วินาที/วินาที) (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ข)

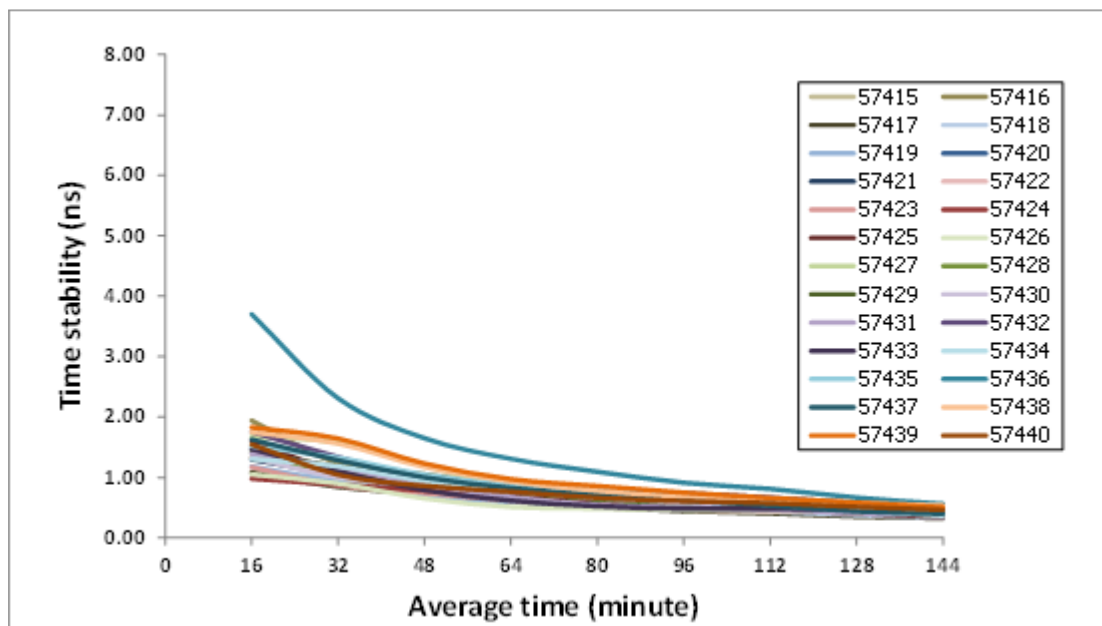


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับโดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

จากรูปที่ 4.6 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิงความถี่จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อจากนาฬิกาภายในเครื่องรับทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่เฉลี่ยจะอยู่ที่ 6.19×10^{-12} , 4.58×10^{-12} , 3.51×10^{-12} , 2.79×10^{-12} , 2.37×10^{-12} , 2.10×10^{-12} , 1.87×10^{-12} , 1.73×10^{-12} , 1.61×10^{-12} (วินาที/วินาที) ต่อวันตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพเชิงความถี่จะมีความเสถียรขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 96 นาที

4.1.3 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability) ของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ

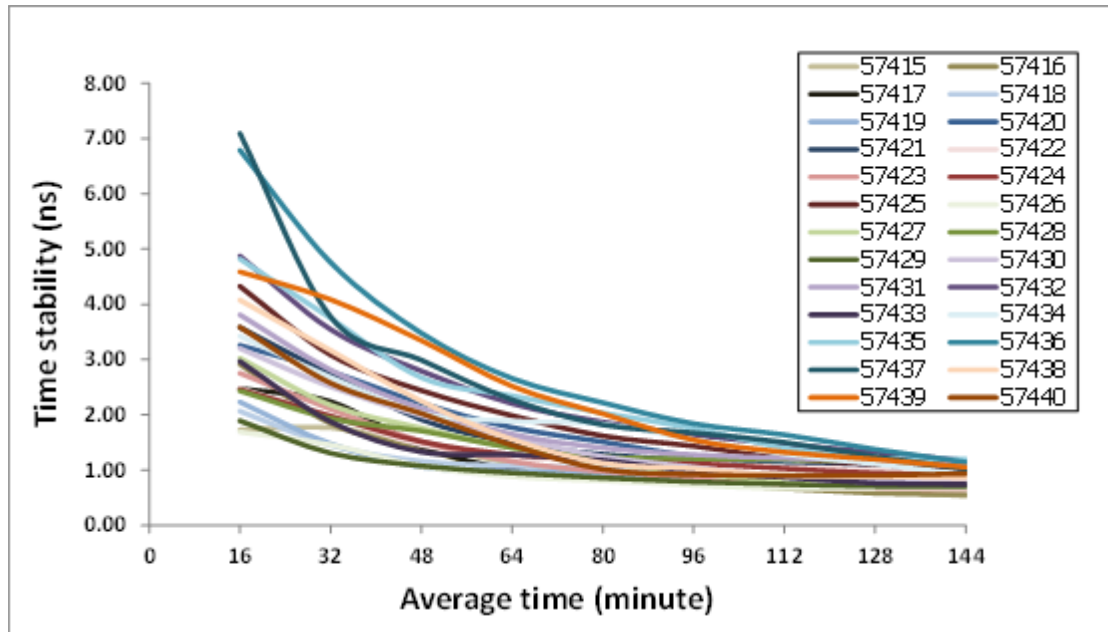
4.1.3.1 ค่าเสถียรภาพเชิงเวลาด้วยการใช้ข้อมูล GPS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST

จากรูปที่ 4.7 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิง เวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม ทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาเฉลี่ยจะอยู่ที่ 1.51, 1.18, 0.93, 0.76, 0.66, 0.59, 0.53, 0.47, 0.43 นาโนวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติเสถียรภาพเชิงเวลาจะมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 64 นาที

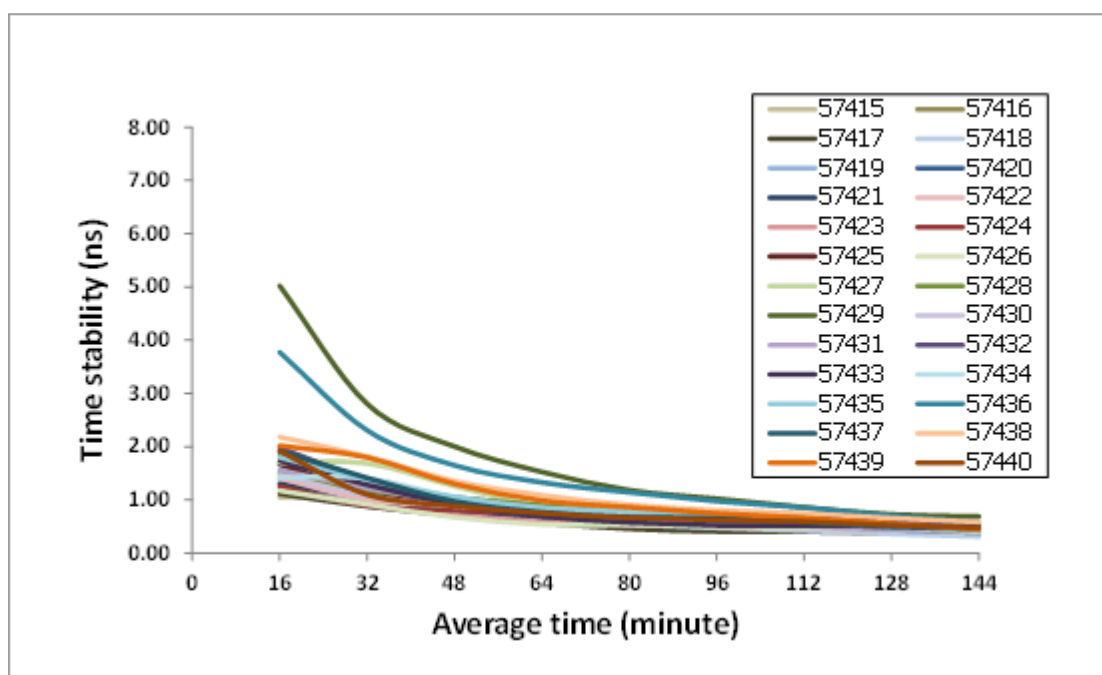
4.1.3.2 ค่าเสถียรภาพเชิงเวลาด้วยการใช้ข้อมูล GPS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จาก เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

จากรูปที่ 4.8 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิงเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาเฉลี่ยจะอยู่ที่ 3.41, 2.53, 1.93, 1.54, 1.32, 1.16, 1.03, 0.95, 0.89 นาโนวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาจะมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 80 นาที

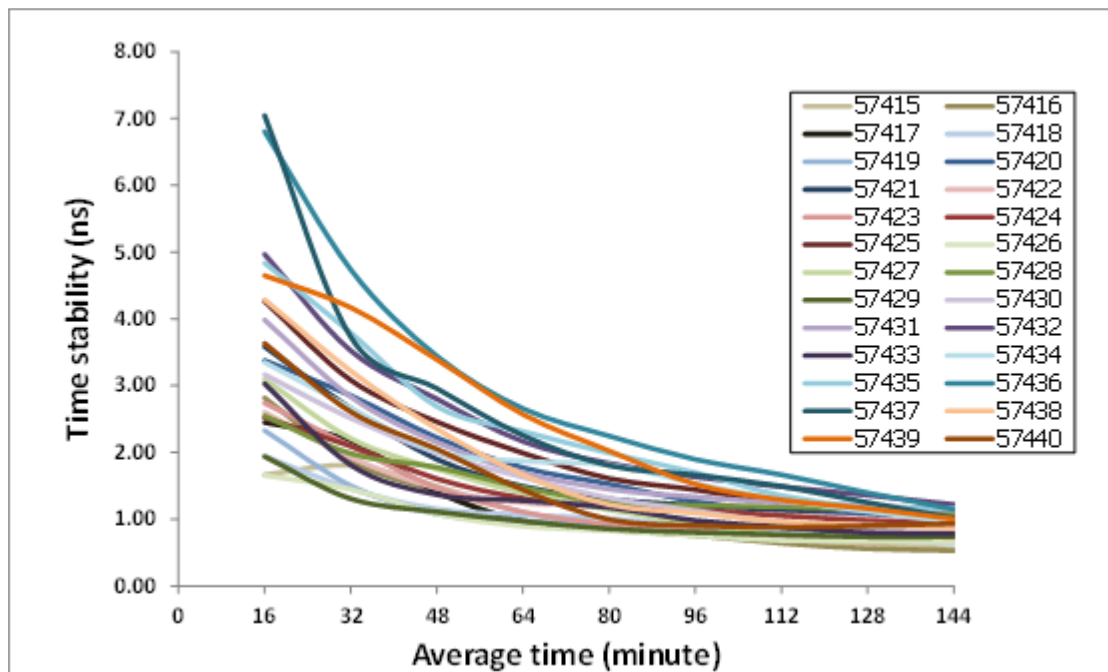
4.1.3.3 ค่าเสถียรภาพเชิงเวลาด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST

จากรูปที่ 4.9 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิงเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม ทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาเฉลี่ยจะอยู่ที่ 1.79, 1.30, 1.00, 0.81, 0.70, 0.63, 0.57, 0.50, 0.45 นาโนวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาจะมีความเสถียรเมื่อเวลาผ่านไป 64 นาที

4.1.3.4 ค่าเสถียรภาพเชิงเวลาด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ในแต่ละช่วงเวลาเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

จากรูปที่ 4.10 พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS เพื่อหาค่าความเสถียรภาพเชิงเวลาจากเครื่องรับสัญญาณต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ทั้งหมด 26 วัน มีการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งช่วงเวลาที่ทำการวัดที่ 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144 นาที ในแต่ละวันปรากฏว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาเฉลี่ยจะอยู่ที่ 3.34, 2.46, 1.88, 1.49, 1.27, 1.12, 0.99, 0.91, 0.85 นาโนวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพเชิงเวลาจะมีความเสถียรเมื่อเวลาผ่านไป 80 นาที

4.2 ผลการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Precise Point Positioning Kinematic) โดยใช้โปรแกรม PANDA

หลังจากทำการประมวลผลข้อมูลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP) ด้วยการใช้ข้อมูล GPS อย่างเดียวและข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS จากเครื่องรับสัญญาณที่มีการเชื่อมต่อสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External Frequency Standard) ก็คือนาฬิกาอะตอมซีเซียม และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยสัญญาณเวลาจากนาฬิกาที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) เครื่องรับสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม PANDA จากนั้นก็จะนำมาทำการประเมินหาความถูกต้องเชิงตำแหน่ง (Positioning accuracy) รวมถึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 การใช้เฉพาะข้อมูล GPS
- กรณีที่ 2 การใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

ซึ่งในแต่ละกรณีจะแสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศตะวันออก ค่าพิกัดทางทิศเหนือ ค่าพิกัดทางตั้ง ที่ได้จากการเฉลี่ยในแต่ละวัน ระหว่างข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับอีกทั้งยังทำการหาค่าความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของ ค่าพิกัดทางทิศตะวันออก ค่าพิกัดทางทิศเหนือ ค่าพิกัดทางตั้ง กับค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP) เพื่อดูว่าค่าความแตกต่างของเวลามีผลอย่างไรต่อค่าพิกัด หากมีการใช้เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

4.2.1 ผลลัพธ์ค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของค่าพิกัด กรณีการใช้เฉพาะข้อมูล GPS (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ง)

จากการวิเคราะห์ข้อมูล GPS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมและต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ ทั้งหมด 26 วัน ด้วยการใช้อุปกรณ์ GPS ปรากฏว่าข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศตะวันออกที่ 6.6 เซนติเมตร ค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศเหนือที่ 4.8 เซนติเมตรและค่า RMSE เฉลี่ยทางดิ่งที่ 12.2 เซนติเมตร ส่วนข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ มีค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศตะวันออกที่ 7.1 เซนติเมตร ค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศเหนือที่ 5.3 เซนติเมตรและค่า RMSE เฉลี่ยทางดิ่งที่ 12.4 เซนติเมตร ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า RMSE ด้วยการใช้อุปกรณ์ GPS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมและต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ

RMSE	นาฬิกาภายในเครื่องรับ (เซนติเมตร)			นาฬิกาอะตอมซีเซียม (เซนติเมตร)		
	Easting	Northing	Height	Easting	Northing	Height
Min	2.6	1.8	4.5	3.0	1.7	3.8
Max	17.2	12.0	28.4	12.4	11.9	30.6
Average	7.1	5.3	12.4	6.6	4.8	12.2

4.2.2 ผลลัพธ์ค่าคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของค่าพิกัด กรณีการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ง)

จากการวิเคราะห์ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมและต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ ทั้งหมด 26 วัน ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ปรากฏว่าข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศตะวันออกที่ 5.2 เซนติเมตร ค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศเหนือที่ 3.4 เซนติเมตรและค่า RMSE เฉลี่ยทางตั้งที่ 7.0 เซนติเมตร ส่วนข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ มีค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศตะวันออกที่ 5.0 เซนติเมตร ค่า RMSE เฉลี่ยทางทิศเหนือที่ 3.6 เซนติเมตรและค่า RMSE เฉลี่ยทางตั้งที่ 7.2 เซนติเมตร ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า RMSE ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมและต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ

RMSE	นาฬิกาภายในเครื่องรับ (เซนติเมตร)			นาฬิกาอะตอมซีเซียม (เซนติเมตร)		
	Easting	Northing	Height	Easting	Northing	Height
Min	1.4	1.4	2.9	1.4	1.3	2.9
Max	12.4	7.6	16.5	10.9	6.1	18.5
Average	5.0	3.6	7.2	5.2	3.4	7.0

4.3 ผลจากการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่ง (Positioning accuracy) จากการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP) ตามมาตรฐานของ NSSDA

4.3.1 ผลจากการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งด้วยการใช้เฉพาะข้อมูล GPS

4.3.1.1 ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ มีค่าความถูกต้องทางราบ 2.11 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางตั้งที่ต่อนาฬิกาภายใน มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 2.03 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.3.1.2 ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่าความถูกต้องทางราบ 1.78 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางตั้งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 2.55 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.3.2 ผลจากการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

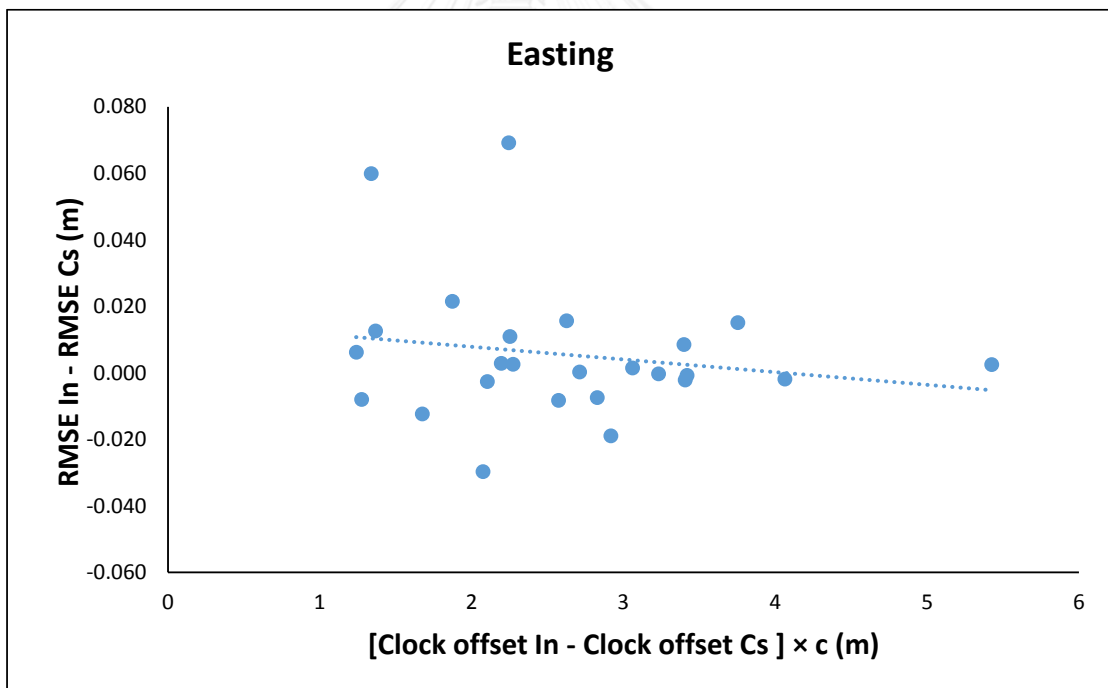
4.3.2.1 ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ มีค่าความถูกต้องทางราบ 1.66 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางตั้งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ มีค่าความถูกต้องทางราบ 2.03 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.3.2.2 ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่าความถูกต้องทางราบ 1.53 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางตั้งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 1.49 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.4 ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP)

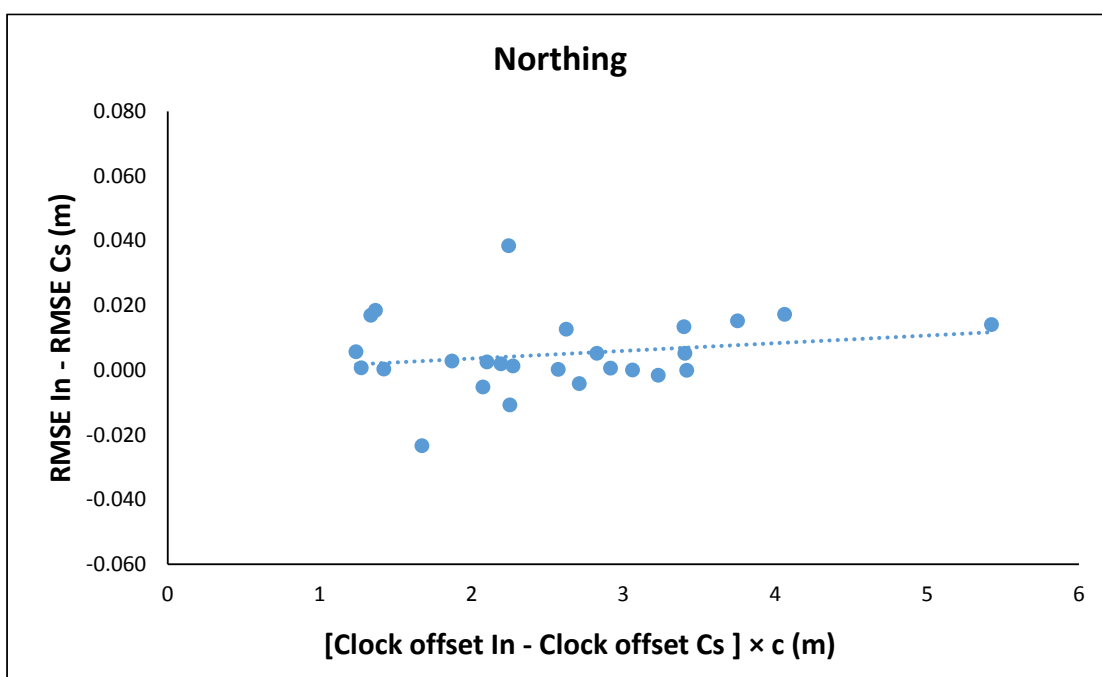
4.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณด้วยการใช้ข้อมูล GPS

จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ ด้วยข้อมูล GPS ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (Easting) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ และค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ -0.152 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมากและไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.11



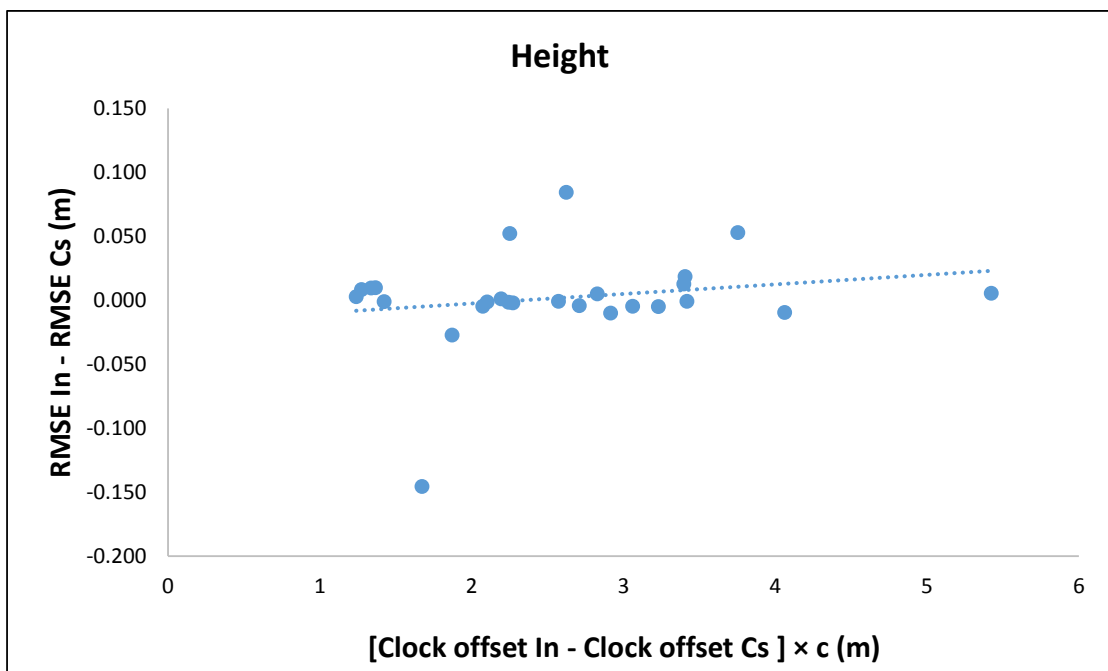
รูปที่ 4.11 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคูณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS

จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ ด้วยข้อมูล GPS ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางทิศเหนือ (North) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ และค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ 0.203 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางเหนือ (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคูณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS

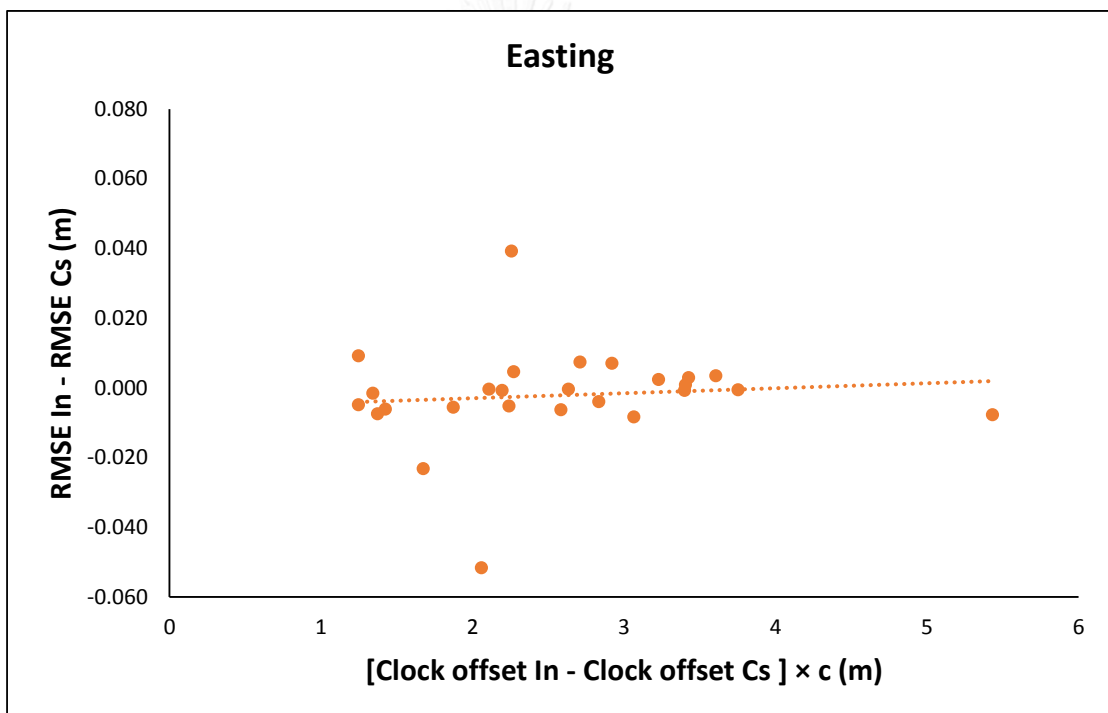
จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ด้วยข้อมูล GPS ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางตั้ง (Height) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ และค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ 0.197 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้ง (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคูณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS

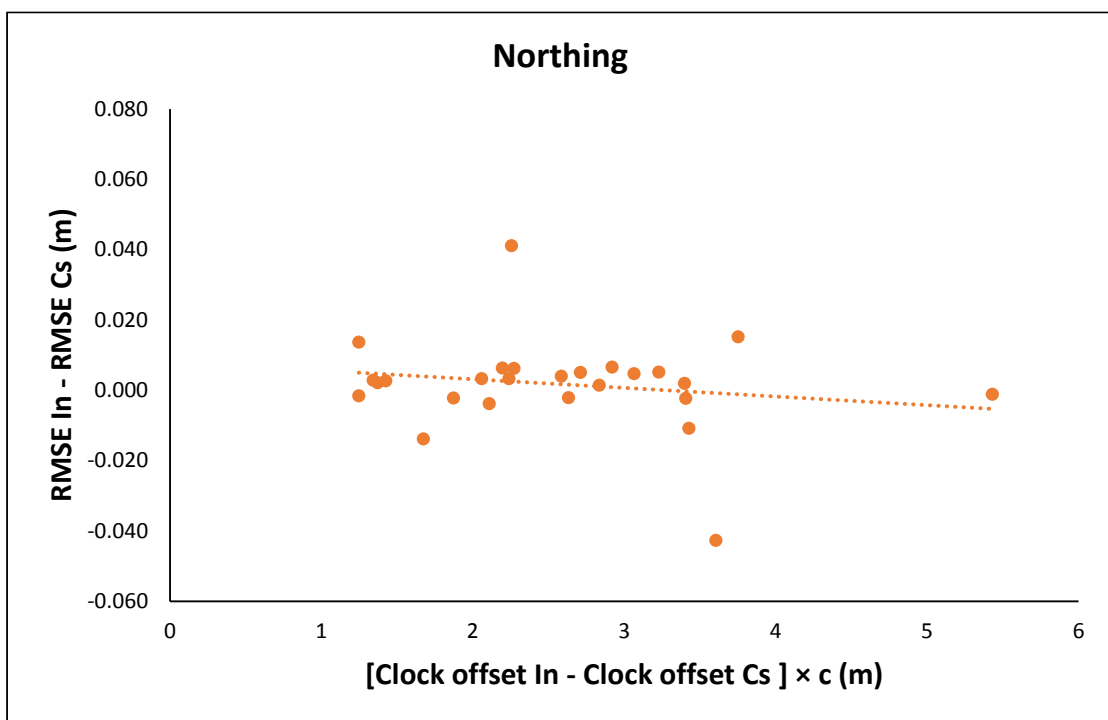
4.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดและค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (Easting) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ และค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ 0.097 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก ดังรูปที่ 4.14



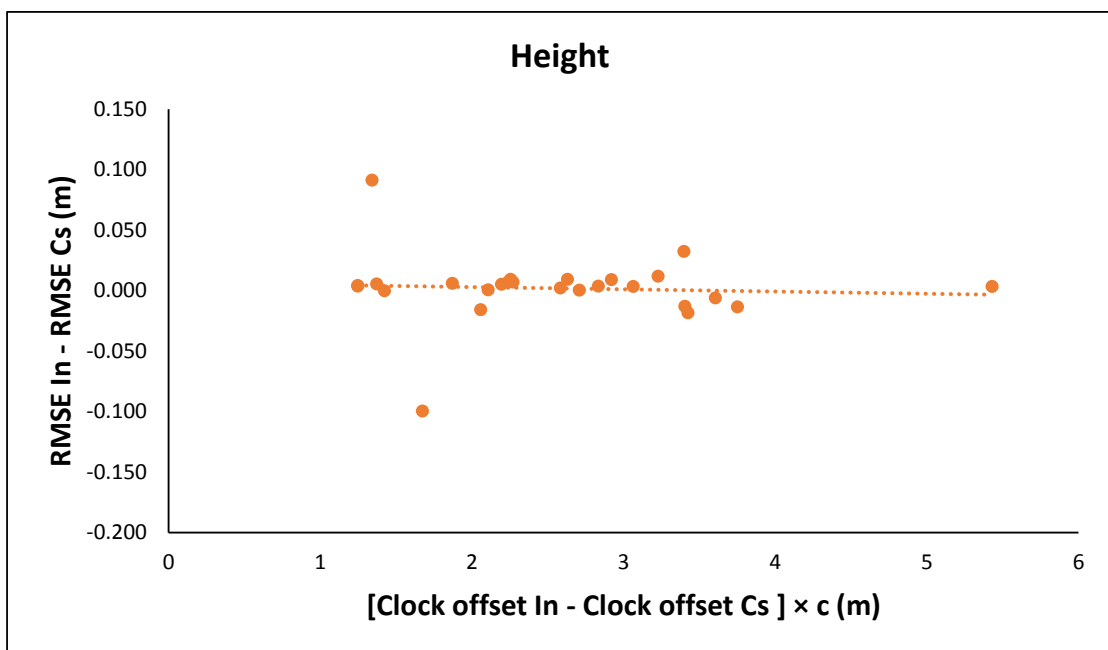
รูปที่ 4.14 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ ด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางทิศเหนือ (North) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ และค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ -0.180 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมากและไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศเหนือ (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคูณความเร็วแสง (แนวนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ ด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนค่าพิคตทางตั้ง (Height) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ และค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ -0.061 ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมากและไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.16



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.16 กราฟ cross correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิคตทางตั้ง (แกนตั้ง) กับค่าความแตกต่างของเวลาคุณความเร็วแสง (แกนนอน) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับด้วยข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการอภิปรายผลการดำเนินงาน สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ จากการศึกษาเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนกระบวนการดำเนินงานวิจัย รวมถึงผลลัพธ์ที่ได้

5.1 อภิปรายผลการดำเนินงาน

จากผลการดำเนินงานในหัวข้อเรื่องการประเมินสมรรถนะของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ติดตั้งนาฬิกาอะตอมความถูกต้องสูงในงานรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง ซึ่งมีจุดประสงค์หลัก 2 ส่วน คือในส่วนแรกจะทำการประเมินสมรรถนะของนาฬิการะหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่มีการเชื่อมต่อกับสัญญาณเวลาจากเครื่องกำเนิดความถี่มาตรฐานแบบซีซีเอ็มจากภายนอก กับประเมินสมรรถนะของนาฬิกาที่อยู่ภายในของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้สัญญาณเวลานาฬิกาหรือเครื่องกำเนิดความถี่ที่อยู่ภายใน (Internal Oscillator) ที่มากับเครื่องรับสัญญาณ GNSS และในส่วนที่สองจะทำการประเมินผลทางตำแหน่งจากการประมวลผลทางตำแหน่งโดยใช้การรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ Kinematic PPP) โดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย PANDA โดยสามารถแบ่งสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มและนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของนาฬิกาในด้านความถูกต้อง, เสถียรภาพเชิงความถี่, เสถียรภาพเชิงเวลา จำนวน 26 วัน ผลปรากฏคือ ค่าความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากนาฬิกาที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มจะให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่าข้อมูลที่ได้จากนาฬิกาภายในเครื่องรับทั้งการใช้เฉพาะข้อมูลระบบ GPS และข้อมูลระบบ GPS ร่วมกับระบบ GLONASS ค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ของข้อมูลที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มจะมีความเสถียรมากกว่าข้อมูลที่ได้จากนาฬิกาภายในเครื่องรับเมื่อมีช่วงการรับสัญญาณที่นานขึ้นทั้งการใช้เฉพาะข้อมูล GPS และข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ค่าเสถียรภาพเชิงเวลาของข้อมูลที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีซีเอ็มจะมีความเสถียรมากกว่าข้อมูลที่ได้จากนาฬิกาภายในเครื่องรับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในระหว่างวันที่ทำการวัดค่าเสถียรภาพเชิงเวลาจะมีค่าน้อยก็ต่อเมื่อใช้เวลานานในการรังวัด ทั้งการใช้เฉพาะข้อมูล GPS และข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

5.1.2 ผลการศึกษาจากการประมวลผลทางตำแหน่งโดยใช้การรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ Kinematic PPP) ด้วยโปรแกรม PANDA

จากการประมวลผลทางตำแหน่งโดยใช้การรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ Kinematic PPP) ด้วยโปรแกรม PANDA จะได้ข้อมูลค่าพิกัด X, Y, Z และข้อมูลค่าความต่างของเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ (clock offset) ออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกคือข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียมและชุดที่สองคือข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาภายในเครื่องรับ ซึ่งในการประมวลผลแบบจลน์จะแสดงค่าพิกัดออกมาเป็น epoch เช่นเดียวกับค่าความต่างของเวลาที่นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ (clock offset) หลังจากนั้นทำการแปลงรูปแบบค่าพิกัดให้อยู่ในรูปแบบ Easting, Northing, Height แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE) ของค่าพิกัดและนำค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE) มาใช้ในการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งตามมาตรฐานของ NSSDA รวมถึงดูความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อน (RMSE) ของค่าพิกัดกับค่าต่างของค่าความแตกต่างของเวลา (clock offset) ที่เครื่องรับสัญญาณ ซึ่งสามารถสรุปการศึกษาได้ดังนี้

5.1.2.1 ค่าคลาดเคลื่อน (RMSE) ของพิกัดที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับไม่มีความแตกต่างกัน กรณีการใช้เฉพาะข้อมูล GPS อย่างเดียวพบว่า ค่าคลาดเคลื่อน (RMSE) ของพิกัดทางทิศตะวันออกและทิศเหนืออยู่ในระดับ 5 ถึง 7 เซนติเมตร ส่วนทางด้านจะอยู่ในระดับ 12 เซนติเมตร กรณีการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS พบว่าค่าคลาดเคลื่อน (RMSE) ของพิกัดทางทิศตะวันออกและทิศเหนืออยู่ในระดับ 3 ถึง 5 เซนติเมตร ส่วนทางด้านจะอยู่ในระดับ 7 เซนติเมตร

5.1.2.2 เมื่อมีการใช้เฉพาะข้อมูล GPS ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาภายในเครื่องรับมีค่าความถูกต้องทางราบและทางด้านคือ 2.11 เซนติเมตร 2.03 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากนาฬิกาอะตอมซีเซียมมีค่าความถูกต้องทางราบและทางด้านคือ 1.78 เซนติเมตร 2.55 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อมีการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากนาฬิกาภายในเครื่องรับมีค่าความถูกต้องทางราบและทางด้านคือ 1.66 เซนติเมตร 2.03 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียมมีค่าความถูกต้องทางราบและทางด้านคือ 1.53 เซนติเมตร 1.49 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลลัพธ์จากการประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งตามมาตรฐาน NSSDA

ค่าความถูกต้องตำแหน่ง	เฉพาะข้อมูล GPS		ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS	
	ทางราบ (cm)	ทางตั้ง (cm)	ทางราบ (cm)	ทางตั้ง (cm)
นาฬิกาภายในเครื่องรับ	2.1	2.0	1.7	2.0
นาฬิกาอะตอมซีเซียม	1.8	2.6	1.5	1.5

5.1.2.3 จากการวิเคราะห์กราฟ Cross Correlation ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด Easting, Northing, Height กับค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกา (clock offset) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ รวมถึงหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด Easting, Northing, Height กับค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกา (clock offset) ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมกับต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ จากกราฟ cross correlation ปรากฏแนวโน้มของข้อมูลที่ไม่ชัดเจน และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ที่มีค่าใกล้ 0 ทุกกรณี ซึ่งหมายถึงค่าความแตกต่างของเวลาที่นาฬิกา (clock offset) ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าพิกัดในทุกทิศทางเลย ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลลัพธ์การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดกับค่าความแตกต่างของเวลา

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)					
กรณีการใช้เฉพาะข้อมูล GPS			กรณีการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS		
Easting	Northing	Height	Easting	Northing	Height
-0.152	0.203	0.197	0.097	-0.180	-0.061
ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ					

5.2 สรุปผลการศึกษา

จากการอภิปรายผลข้างต้นมานั้นสามารถสรุปได้ว่า จากการวิเคราะห์คุณลักษณะนาฬิกา จะส่งผลมายังการประมวลผลทางตำแหน่ง เนื่องจากผลลัพธ์จากการวิเคราะห์คุณลักษณะนาฬิกา ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ ปรากฏว่าเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมแสดงค่าความถูกต้อง ความเสถียรภาพทางความถี่และเสถียรภาพเชิงเวลา ได้ดีกว่าเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับอย่างชัดเจน ทั้งกรณีการใช้เฉพาะข้อมูล GPS และกรณีการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับทั้ง 2 เครื่องมาทำการประมวลผลทางตำแหน่งโดยใช้การรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP) ด้วยโปรแกรม PANDA ก็ปรากฏว่า ในกรณีการใช้เฉพาะข้อมูล GPS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมมีค่าคลาดเคลื่อนของพิกัดไม่แตกต่างกันกับเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ และกรณีการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมมีค่าคลาดเคลื่อนของพิกัดไม่แตกต่างกันกับเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ เช่นเดียวกัน และเมื่อประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งตามมาตรฐาน NSSDA ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจากนาฬิกาอะตอมซีเชื่อมไม่มีความแตกต่างกันกับนาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยสรุปแล้วการวิจัยในครั้งนี้มีทั้งเป็นไปตามตั้งสมมติฐานไว้และไม่เป็นไปตามตั้งสมมติฐานไว้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมที่ดิน และมีข้อจำกัดทางด้านเวลาทำให้ได้รับสัญญาณได้ในระยะเวลาที่สั้น อาจทำให้ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์คุณลักษณะที่ไม่ชัดเจนมากนัก หากเป็นไปได้ควรรับสัญญาณให้นานกว่านี้เพื่อที่คุณลักษณะได้อย่างชัดเจนขึ้น

5.3.2 ในอนาคตอาจมีการนำนาฬิกาอะตอมประเภทอื่นมาทดสอบร่วม เช่นนาฬิกาอะตอมรูบิเดียม (Rubidium oscillators) และไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-maser) เนื่องจากคุณสมบัติของแต่ละประเภทจะไม่เหมือนกันทั้งในด้านเสถียรภาพเชิงความถี่ ขนาด ราคา ความน่าเชื่อถือ ซึ่งอาจทำให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไปได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น

5.3.3 ผลลัพธ์ของข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นฐานของเครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 และใช้นาฬิกาอะตอมซีเชื่อม รุ่น 5017A เท่านั้น ซึ่งหากมีการทดสอบด้วยเครื่องรับสัญญาณหรือนาฬิกาแบบอื่นๆ จะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไป

5.3.4 ปัจจัยอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อเสาอากาศ สาย และตัวเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งเป็นแหล่งค่าคลาดเคลื่อนที่มีความสำคัญในการจำกัดเสถียรภาพความล่าช้าเล็กทรอนิกส์ในเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลลัพธ์จากการประมวลผลทางพิกัดตำแหน่งไม่มีความแตกต่างกัน



รายการอ้างอิง

- Andrei, C., Salazar, D., & Chen, R. (2010). Performance analysis of the precise point positioning technique at BUCU IGS station. *Journal of Geodesy and Cadastral*, 10, 9-20.
- CGGTTS. (2016). About the CGGTTS data format. Retrieved from <http://tycho.usno.navy.mil/cggtts.html>
- FGDC. (1999). Positional Accuracy Handbook: Using the National Standard for Spatial Data Accuracy to measure and report geographic data quality. Retrieved from <https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/index.html>
- Gonzalez Martinez, F. J. (2013). *Performance of new GNSS satellite clocks*: KIT Scientific Publishing.
- GPS.GOV. (2016). GPS Overview. Retrieved from <http://www.gps.gov/systems/gps/>
- Héroux, P., & Kouba, J. (2001). GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6), 573-578. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00103-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00103-X)
- Hinkle, D. E., Wiersma, W., & Jurs, S. G. (1998). Correlation: a measure of relationship. *Applied statistics for the behavioral sciences*, 4, 105-131.
- Jeffrey, C. (2010). An Introduction to GNSS GPS, GLONASS, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems. edn. *NovAtel Inc.*
- Lombardi, M. A. (2001). An introduction to frequency calibrations. *reprinted from NIST Frequency Measurement & Analysis System Operator's manual*, 29.
- microsemi. (2014). 5071A Primary Frequency Standard.
- NOVATEL. (2016). An Introduction to GNSS : GNSS satellite systems. Retrieved from <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/glonass/>
- Riley, W. (2008). *Handbook of Frequency*: NIST.
- Wang, F., Chen, X., & Guo, F. (2015). GPS/GLONASS Combined Precise Point Positioning with Receiver Clock Modeling. *Sensors*, 15(7), 15478-15493.

Wang, K., & Rothacher, M. (2013). Stochastic modeling of high-stability ground clocks in GPS analysis. *Journal of Geodesy*, 87(5), 427-437.

Weinbach, U., & Schön, S. (2011). GNSS receiver clock modeling when using high-precision oscillators and its impact on PPP. *Advances in Space Research*, 47(2), 229-238. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.031>

เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (พ.ศ. 2549). เอกสารประกอบคำสอนวิชาการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง.



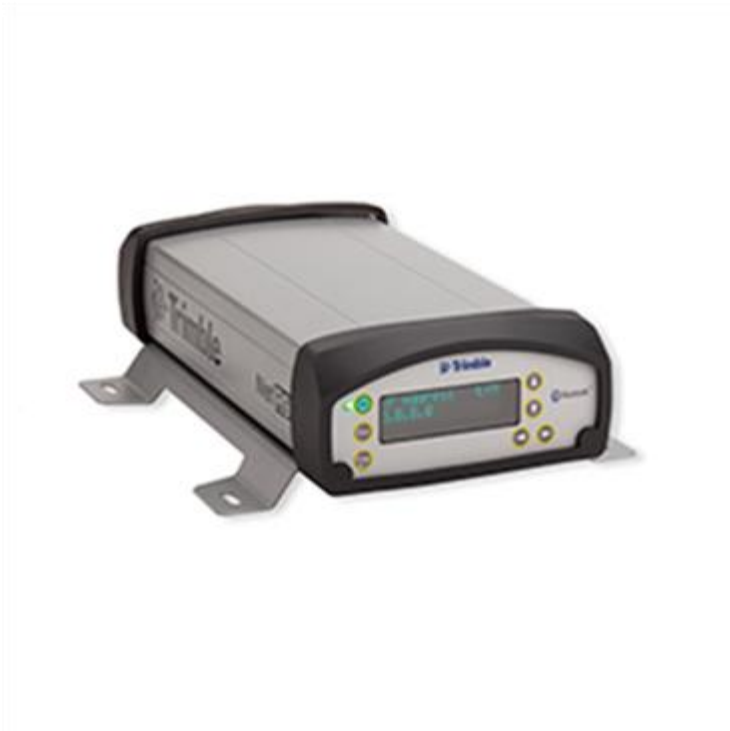


ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก อุปกรณ์ (Equipment) ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 GNSS Reference Receiver



รูปที่ ก.1 เครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 GNSS Reference Receiver ที่ใช้ในงานวิจัย

(http://www.trimble.com//media/Images/Infrastructure/Product%20Details_288x288/Hardware/Receivers.ashx)

เครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น NetR9 ได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำงานวิจัยจากกรมที่ดิน กระทรวงมหาดไทย ได้ติดตั้งไว้ในห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) จ.ปทุมธานี เพื่อตรวจรับสัญญาณ GNSS ขณะที่ทำการตรวจรับสัญญาณต่อเข้ากับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของมว.

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของเครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 GNSS Reference Receiver (http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-689228/022506-128G_NetR9_DS_4pnl_0815_LR.pdf)

Characteristics	
Receiver type	GNSS Reference Receiver
Manufacturer	Trimble
Model	NetR9
Satellite tracking	<ul style="list-style-type: none"> - Two advanced Trimble Maxwell 6 GNSS chipsets for a total of 440 channels - High precision multiple correlator for GNSS pseudorange measurements - Very low noise GNSS carrier phase measurements with <1 mm precision in a 1 Hz bandwidth
Satellite signals tracked simultaneously	<ul style="list-style-type: none"> - GPS: L1 C/A, L2C, L2E (Trimble method for tracking unencrypted L2P, L5 - GLONASS: L1 C/A and unencrypted P code, L2 C/A and unencrypted P code, L3 CDMA2 - Galileo3: L1 CBOC, E5A, E5B & E5AltBOC - Beidou4 - QZSS: L1 C/A, L1C, L1 SAIF, L2C, L5, LEX5 - SBAS: L1 C/A (EGNOS/MSAS), L1 C/A and L5 (WAAS/GAGAN) - L-Band: OmniSTAR VBS, HP and XP - Trimble RTX World Wide Corrections

2. เสาอากาศ Zephyr Geodetic Antennas



รูปที่ ก.2 เสาอากาศ Zephyr Geodetic Antennas

เสาอากาศ Zephyr Geodetic Antennas (TRM 41249.00) ได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำงานวิจัยจาก ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ โดยเสาอากาศ Zephyr Geodetic Antennas ถูกติดตั้งไว้ที่ สถานี NIMT บนดาวดฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของเสาอากาศ Zephyr Geodetic Antennas

Characteristics	
Antenna type	Zephyr Geodetic
Manufacturer	Trimble
Model	TRM 41249
Antenna phase center	L1, L2
Volt	3.5 V DC to 20 V DC



ภาคผนวก ข ตารางแสดงค่าเสถียรภาพทางความถี่ (Frequency Stability)

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability) ของข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST

MJD	Frequency Stability (second/second)								
	Interval time GPS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	1.98E-12	1.73E-12	1.49E-12	1.16E-12	9.83E-13	8.51E-13	7.87E-13	7.16E-13	6.25E-13
57416	3.50E-12	2.23E-12	1.90E-12	1.55E-12	1.27E-12	1.07E-12	8.85E-13	7.55E-13	6.02E-13
57417	1.95E-12	1.53E-12	1.31E-12	1.09E-12	9.16E-13	8.01E-13	7.33E-13	6.38E-13	5.85E-13
57418	2.64E-12	1.66E-12	1.36E-12	1.10E-12	9.78E-13	8.85E-13	7.85E-13	6.81E-13	6.01E-13
57419	2.14E-12	1.67E-12	1.23E-12	1.09E-12	1.05E-12	1.02E-12	9.72E-13	9.10E-13	8.34E-13
57420	2.67E-12	1.86E-12	1.54E-12	1.47E-12	1.33E-12	1.20E-12	1.04E-12	8.85E-13	7.67E-13
57421	2.34E-12	1.88E-12	1.42E-12	1.19E-12	1.00E-12	9.95E-13	9.27E-13	8.35E-13	8.22E-13
57422	2.42E-12	1.85E-12	1.49E-12	1.22E-12	9.86E-13	8.40E-13	8.02E-13	7.93E-13	7.64E-13
57423	2.11E-12	1.56E-12	1.34E-12	1.13E-12	1.03E-12	9.66E-13	8.90E-13	8.09E-13	7.45E-13
57424	1.77E-12	1.59E-12	1.42E-12	1.30E-12	1.17E-12	1.07E-12	9.61E-13	8.78E-13	8.56E-13
57425	2.90E-12	1.97E-12	1.60E-12	1.32E-12	1.11E-12	9.72E-13	8.73E-13	7.33E-13	6.27E-13
57426	1.90E-12	1.62E-12	1.18E-12	9.25E-13	8.75E-13	8.34E-13	8.22E-13	8.09E-13	7.61E-13
57427	3.02E-12	2.85E-12	2.17E-12	1.47E-12	1.18E-12	1.03E-12	9.77E-13	9.71E-13	8.81E-13
57428	2.39E-12	2.03E-12	1.70E-12	1.43E-12	1.16E-12	1.00E-12	8.73E-13	7.58E-13	7.00E-13
57429	2.55E-12	2.12E-12	1.70E-12	1.39E-12	1.18E-12	1.03E-12	8.78E-13	7.87E-13	7.67E-13
57430	2.40E-12	1.81E-12	1.57E-12	1.40E-12	1.21E-12	1.06E-12	9.15E-13	8.11E-13	7.53E-13
57431	2.52E-12	2.10E-12	1.58E-12	1.22E-12	9.89E-13	9.12E-13	8.50E-13	7.33E-13	6.98E-13
57432	3.17E-12	2.41E-12	1.75E-12	1.45E-12	1.36E-12	1.33E-12	1.20E-12	1.04E-12	9.28E-13
57433	2.65E-12	1.99E-12	1.43E-12	1.11E-12	9.45E-13	8.73E-13	8.68E-13	8.44E-13	7.57E-13
57434	2.36E-12	2.13E-12	1.70E-12	1.42E-12	1.31E-12	1.16E-12	1.00E-12	8.28E-13	6.63E-13
57435	2.74E-12	2.40E-12	1.89E-12	1.58E-12	1.42E-12	1.22E-12	1.05E-12	8.97E-13	7.65E-13
57436	6.68E-12	4.17E-12	2.98E-12	2.36E-12	1.97E-12	1.65E-12	1.46E-12	1.20E-12	1.02E-12
57437	2.94E-12	2.32E-12	1.81E-12	1.49E-12	1.29E-12	1.13E-12	9.66E-13	7.92E-13	7.21E-13
57438	3.15E-12	2.82E-12	2.12E-12	1.68E-12	1.40E-12	1.23E-12	1.15E-12	1.04E-12	9.71E-13
57439	3.30E-12	2.97E-12	2.22E-12	1.75E-12	1.55E-12	1.35E-12	1.20E-12	1.05E-12	9.11E-13
57440	2.79E-12	1.88E-12	1.55E-12	1.38E-12	1.20E-12	1.10E-12	1.04E-12	9.26E-13	8.36E-13

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability) ของข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

MJD	Frequency Stability (second/second)								
	Interval time GPS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	3.12E-12	3.19E-12	2.64E-12	2.03E-12	1.67E-12	1.46E-12	1.28E-12	1.14E-12	9.65E-13
57416	5.26E-12	3.33E-12	2.50E-12	1.73E-12	1.58E-12	1.42E-12	1.20E-12	1.06E-12	1.01E-12
57417	4.47E-12	4.04E-12	2.58E-12	1.81E-12	1.60E-12	1.65E-12	1.46E-12	1.34E-12	1.30E-12
57418	3.73E-12	2.62E-12	2.10E-12	1.95E-12	1.87E-12	1.68E-12	1.54E-12	1.37E-12	1.24E-12
57419	4.03E-12	2.66E-12	1.91E-12	1.78E-12	1.69E-12	1.56E-12	1.43E-12	1.34E-12	1.21E-12
57420	5.88E-12	5.02E-12	3.99E-12	3.20E-12	2.73E-12	2.25E-12	1.99E-12	1.92E-12	1.86E-12
57421	6.47E-12	4.92E-12	3.46E-12	2.68E-12	2.32E-12	2.12E-12	1.94E-12	2.03E-12	2.03E-12
57422	4.48E-12	3.57E-12	2.63E-12	2.21E-12	2.15E-12	2.03E-12	1.92E-12	1.83E-12	1.69E-12
57423	4.97E-12	3.80E-12	2.74E-12	2.09E-12	1.76E-12	1.57E-12	1.30E-12	1.21E-12	1.18E-12
57424	4.44E-12	3.57E-12	2.74E-12	2.31E-12	2.17E-12	2.03E-12	1.86E-12	1.71E-12	1.64E-12
57425	7.81E-12	5.57E-12	4.40E-12	3.58E-12	2.92E-12	2.59E-12	2.21E-12	2.00E-12	1.84E-12
57426	3.05E-12	2.63E-12	1.93E-12	1.59E-12	1.46E-12	1.31E-12	1.20E-12	1.22E-12	1.22E-12
57427	5.46E-12	3.93E-12	3.18E-12	2.53E-12	2.06E-12	1.71E-12	1.42E-12	1.42E-12	1.41E-12
57428	4.39E-12	3.49E-12	3.09E-12	2.54E-12	2.24E-12	2.18E-12	2.15E-12	2.09E-12	1.95E-12
57429	3.42E-12	2.36E-12	1.95E-12	1.72E-12	1.55E-12	1.43E-12	1.35E-12	1.28E-12	1.28E-12
57430	5.78E-12	4.53E-12	3.58E-12	2.87E-12	2.25E-12	1.91E-12	1.57E-12	1.43E-12	1.49E-12
57431	6.88E-12	5.07E-12	3.81E-12	2.98E-12	2.53E-12	2.31E-12	2.20E-12	2.11E-12	1.99E-12
57432	8.80E-12	6.40E-12	5.04E-12	3.98E-12	3.38E-12	2.95E-12	2.65E-12	2.39E-12	2.12E-12
57433	5.36E-12	3.38E-12	2.40E-12	2.31E-12	2.13E-12	1.76E-12	1.58E-12	1.38E-12	1.35E-12
57434	6.18E-12	4.83E-12	3.66E-12	3.41E-12	3.31E-12	2.80E-12	2.33E-12	2.00E-12	1.67E-12
57435	8.70E-12	6.76E-12	4.82E-12	4.23E-12	3.67E-12	3.18E-12	2.54E-12	2.21E-12	2.17E-12
57436	1.22E-11	8.58E-12	6.27E-12	4.80E-12	4.00E-12	3.32E-12	2.96E-12	2.49E-12	2.06E-12
57437	1.28E-11	6.81E-12	5.40E-12	4.10E-12	3.29E-12	3.03E-12	2.71E-12	2.25E-12	1.85E-12
57438	7.36E-12	5.71E-12	4.05E-12	2.81E-12	2.03E-12	1.86E-12	1.63E-12	1.60E-12	1.55E-12
57439	8.28E-12	7.37E-12	6.04E-12	4.54E-12	3.65E-12	2.79E-12	2.39E-12	2.16E-12	1.90E-12
57440	6.47E-12	4.64E-12	3.66E-12	2.62E-12	1.83E-12	1.66E-12	1.63E-12	1.63E-12	1.69E-12

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability) ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST

MJD	Frequency Stability (second/second)								
	Interval time GPS+GLONASS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	1.89E-12	1.88E-12	1.57E-12	1.17E-12	9.49E-13	8.36E-13	7.95E-13	7.46E-13	6.72E-13
57416	3.35E-12	2.23E-12	1.89E-12	1.56E-12	1.30E-12	1.11E-12	9.22E-13	7.61E-13	5.95E-13
57417	2.01E-12	1.59E-12	1.28E-12	1.03E-12	8.24E-13	7.34E-13	7.27E-13	6.79E-13	6.46E-13
57418	2.40E-12	1.68E-12	1.39E-12	1.11E-12	9.63E-13	8.53E-13	7.56E-13	6.50E-13	5.61E-13
57419	2.52E-12	1.75E-12	1.29E-12	1.10E-12	1.04E-12	1.03E-12	9.74E-13	9.06E-13	8.41E-13
57420	3.01E-12	1.95E-12	1.51E-12	1.40E-12	1.23E-12	1.12E-12	9.63E-13	8.03E-13	7.01E-13
57421	2.34E-12	1.87E-12	1.43E-12	1.21E-12	1.09E-12	1.11E-12	1.06E-12	9.80E-13	9.51E-13
57422	2.54E-12	1.81E-12	1.56E-12	1.31E-12	1.07E-12	9.04E-13	8.51E-13	8.03E-13	7.54E-13
57423	2.17E-12	1.63E-12	1.30E-12	1.07E-12	9.69E-13	9.24E-13	8.75E-13	8.03E-13	7.72E-13
57424	2.27E-12	1.61E-12	1.45E-12	1.31E-12	1.17E-12	1.07E-12	9.63E-13	8.97E-13	8.81E-13
57425	3.02E-12	2.04E-12	1.72E-12	1.36E-12	1.11E-12	1.00E-12	9.23E-13	8.15E-13	7.34E-13
57426	2.12E-12	1.65E-12	1.21E-12	9.73E-13	9.59E-13	9.06E-13	8.66E-13	8.13E-13	7.38E-13
57427	3.07E-12	3.04E-12	2.27E-12	1.58E-12	1.29E-12	1.13E-12	1.05E-12	1.02E-12	9.20E-13
57428	2.72E-12	2.13E-12	1.86E-12	1.62E-12	1.37E-12	1.17E-12	9.97E-13	8.46E-13	7.57E-13
57429	9.06E-12	5.06E-12	3.61E-12	2.75E-12	2.13E-12	1.85E-12	1.55E-12	1.31E-12	1.24E-12
57430	2.65E-12	1.94E-12	1.60E-12	1.51E-12	1.38E-12	1.22E-12	1.05E-12	9.11E-13	8.41E-13
57431	2.81E-12	2.20E-12	1.69E-12	1.28E-12	1.05E-12	9.91E-13	9.14E-13	7.90E-13	7.60E-13
57432	3.58E-12	2.47E-12	1.86E-12	1.47E-12	1.35E-12	1.33E-12	1.22E-12	1.08E-12	9.72E-13
57433	3.14E-12	2.31E-12	1.66E-12	1.24E-12	1.04E-12	9.39E-13	9.39E-13	9.14E-13	8.46E-13
57434	2.57E-12	2.53E-12	1.89E-12	1.48E-12	1.36E-12	1.24E-12	1.09E-12	9.03E-13	7.34E-13
57435	3.25E-12	2.49E-12	1.90E-12	1.53E-12	1.41E-12	1.25E-12	1.10E-12	9.32E-13	8.07E-13
57436	6.81E-12	4.16E-12	2.97E-12	2.39E-12	2.06E-12	1.76E-12	1.55E-12	1.27E-12	1.05E-12
57437	3.46E-12	2.55E-12	1.76E-12	1.38E-12	1.22E-12	1.19E-12	1.05E-12	8.89E-13	8.23E-13
57438	3.93E-12	3.28E-12	2.44E-12	1.96E-12	1.64E-12	1.45E-12	1.34E-12	1.18E-12	1.05E-12
57439	3.64E-12	3.24E-12	2.34E-12	1.78E-12	1.55E-12	1.34E-12	1.19E-12	9.99E-13	8.01E-13
57440	3.46E-12	1.98E-12	1.60E-12	1.35E-12	1.20E-12	1.12E-12	1.07E-12	9.45E-13	8.58E-13

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงความถี่ (Frequency Stability) ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

MJD	Frequency Stability (second/second)								
	Interval time GPS+GLONASS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	3.00E-12	3.26E-12	2.69E-12	1.99E-12	1.60E-12	1.39E-12	1.25E-12	1.14E-12	9.97E-13
57416	5.08E-12	3.36E-12	2.55E-12	1.72E-12	1.51E-12	1.37E-12	1.15E-12	1.00E-12	9.55E-13
57417	4.42E-12	3.91E-12	2.54E-12	1.76E-12	1.56E-12	1.62E-12	1.47E-12	1.38E-12	1.32E-12
57418	3.51E-12	2.63E-12	2.08E-12	1.92E-12	1.82E-12	1.62E-12	1.45E-12	1.28E-12	1.14E-12
57419	4.20E-12	2.71E-12	1.94E-12	1.76E-12	1.64E-12	1.53E-12	1.42E-12	1.32E-12	1.21E-12
57420	6.09E-12	5.14E-12	4.00E-12	3.20E-12	2.75E-12	2.28E-12	2.01E-12	1.92E-12	1.86E-12
57421	6.47E-12	4.80E-12	3.42E-12	2.69E-12	2.35E-12	2.18E-12	2.02E-12	2.10E-12	2.09E-12
57422	4.70E-12	3.47E-12	2.64E-12	2.25E-12	2.15E-12	2.02E-12	1.92E-12	1.82E-12	1.67E-12
57423	4.94E-12	3.78E-12	2.66E-12	2.00E-12	1.67E-12	1.49E-12	1.28E-12	1.21E-12	1.21E-12
57424	4.55E-12	3.78E-12	2.90E-12	2.38E-12	2.19E-12	2.05E-12	1.90E-12	1.76E-12	1.69E-12
57425	7.69E-12	5.56E-12	4.44E-12	3.59E-12	2.91E-12	2.60E-12	2.25E-12	2.08E-12	1.94E-12
57426	2.99E-12	2.62E-12	1.94E-12	1.61E-12	1.50E-12	1.36E-12	1.23E-12	1.21E-12	1.19E-12
57427	5.59E-12	3.98E-12	3.16E-12	2.51E-12	2.05E-12	1.68E-12	1.39E-12	1.39E-12	1.40E-12
57428	4.60E-12	3.58E-12	3.20E-12	2.65E-12	2.25E-12	2.18E-12	2.14E-12	2.07E-12	1.95E-12
57429	3.50E-12	2.35E-12	2.01E-12	1.75E-12	1.54E-12	1.45E-12	1.38E-12	1.33E-12	1.33E-12
57430	5.71E-12	4.53E-12	3.59E-12	2.94E-12	2.38E-12	2.04E-12	1.71E-12	1.53E-12	1.55E-12
57431	7.19E-12	5.11E-12	3.88E-12	3.06E-12	2.61E-12	2.41E-12	2.25E-12	2.18E-12	2.06E-12
57432	8.96E-12	6.36E-12	5.05E-12	3.90E-12	3.31E-12	2.94E-12	2.68E-12	2.45E-12	2.20E-12
57433	5.47E-12	3.27E-12	2.47E-12	2.31E-12	2.12E-12	1.77E-12	1.60E-12	1.43E-12	1.41E-12
57434	6.04E-12	4.81E-12	3.63E-12	3.37E-12	3.27E-12	2.77E-12	2.33E-12	2.02E-12	1.72E-12
57435	8.72E-12	6.84E-12	4.85E-12	4.18E-12	3.59E-12	3.07E-12	2.44E-12	2.12E-12	2.10E-12
57436	1.23E-11	8.55E-12	6.21E-12	4.79E-12	4.05E-12	3.42E-12	3.00E-12	2.52E-12	2.07E-12
57437	1.27E-11	6.73E-12	5.34E-12	4.06E-12	3.25E-12	3.00E-12	2.69E-12	2.25E-12	1.84E-12
57438	7.74E-12	5.81E-12	4.24E-12	3.00E-12	2.19E-12	1.98E-12	1.73E-12	1.66E-12	1.56E-12
57439	8.38E-12	7.52E-12	6.12E-12	4.64E-12	3.65E-12	2.75E-12	2.33E-12	2.09E-12	1.81E-12
57440	6.56E-12	4.70E-12	3.70E-12	2.59E-12	1.79E-12	1.63E-12	1.59E-12	1.62E-12	1.68E-12

ภาคผนวก ค ตารางแสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability)

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability) ของข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST

MJD	Time Stability (nanosecond)								
	Average time GPS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	1.09	0.96	0.82	0.64	0.55	0.47	0.44	0.40	0.35
57416	1.94	1.24	1.05	0.86	0.71	0.59	0.49	0.42	0.33
57417	1.08	0.85	0.73	0.61	0.51	0.44	0.41	0.35	0.32
57418	1.46	0.92	0.75	0.61	0.54	0.49	0.43	0.38	0.33
57419	1.18	0.92	0.68	0.60	0.58	0.57	0.54	0.50	0.46
57420	1.48	1.03	0.85	0.81	0.74	0.66	0.58	0.49	0.42
57421	1.30	1.04	0.79	0.66	0.56	0.55	0.51	0.46	0.46
57422	1.34	1.03	0.83	0.68	0.55	0.47	0.44	0.44	0.42
57423	1.17	0.87	0.74	0.62	0.57	0.54	0.49	0.45	0.41
57424	0.98	0.88	0.78	0.72	0.65	0.59	0.53	0.49	0.47
57425	1.61	1.09	0.89	0.73	0.61	0.54	0.48	0.41	0.35
57426	1.05	0.90	0.65	0.51	0.49	0.46	0.46	0.45	0.42
57427	1.68	1.58	1.20	0.81	0.65	0.57	0.54	0.54	0.49
57428	1.32	1.12	0.94	0.79	0.64	0.56	0.48	0.42	0.39
57429	1.41	1.18	0.94	0.77	0.65	0.57	0.49	0.44	0.42
57430	1.33	1.00	0.87	0.77	0.67	0.59	0.51	0.45	0.42
57431	1.40	1.16	0.88	0.68	0.55	0.51	0.47	0.41	0.39
57432	1.76	1.34	0.97	0.80	0.76	0.74	0.67	0.58	0.51
57433	1.47	1.10	0.79	0.62	0.52	0.48	0.48	0.47	0.42
57434	1.31	1.18	0.94	0.79	0.73	0.64	0.55	0.46	0.37
57435	1.52	1.33	1.05	0.88	0.78	0.68	0.58	0.50	0.42
57436	3.70	2.31	1.65	1.31	1.09	0.91	0.81	0.67	0.56
57437	1.63	1.29	1.00	0.83	0.72	0.62	0.54	0.44	0.40
57438	1.75	1.56	1.17	0.93	0.78	0.68	0.64	0.58	0.54
57439	1.83	1.64	1.23	0.97	0.86	0.75	0.66	0.58	0.51
57440	1.55	1.04	0.86	0.77	0.66	0.61	0.58	0.51	0.46

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability) ของข้อมูล GPS โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

MJD	Time Stability (nanosecond)								
	Average time GPS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	1.73	1.77	1.47	1.12	0.92	0.81	0.71	0.63	0.54
57416	2.92	1.84	1.39	0.96	0.87	0.79	0.67	0.59	0.56
57417	2.48	2.24	1.43	1.00	0.89	0.91	0.81	0.74	0.72
57418	2.07	1.45	1.16	1.08	1.04	0.93	0.85	0.76	0.69
57419	2.23	1.48	1.06	0.99	0.94	0.86	0.79	0.74	0.67
57420	3.26	2.78	2.21	1.77	1.51	1.25	1.11	1.07	1.03
57421	3.58	2.73	1.92	1.49	1.29	1.17	1.07	1.13	1.12
57422	2.48	1.98	1.46	1.23	1.19	1.12	1.06	1.02	0.94
57423	2.75	2.11	1.52	1.16	0.98	0.87	0.72	0.67	0.65
57424	2.46	1.98	1.52	1.28	1.20	1.13	1.03	0.95	0.91
57425	4.33	3.09	2.44	1.99	1.62	1.44	1.22	1.11	1.02
57426	1.69	1.46	1.07	0.88	0.81	0.73	0.67	0.68	0.68
57427	3.03	2.18	1.76	1.40	1.14	0.95	0.79	0.79	0.78
57428	2.43	1.93	1.71	1.41	1.24	1.21	1.19	1.16	1.08
57429	1.89	1.31	1.08	0.95	0.86	0.79	0.75	0.71	0.71
57430	3.20	2.51	1.99	1.59	1.25	1.06	0.87	0.79	0.83
57431	3.81	2.81	2.11	1.65	1.40	1.28	1.22	1.17	1.10
57432	4.88	3.54	2.79	2.20	1.87	1.64	1.47	1.32	1.17
57433	2.97	1.88	1.33	1.28	1.18	0.98	0.87	0.76	0.75
57434	3.43	2.68	2.03	1.89	1.84	1.55	1.29	1.11	0.93
57435	4.82	3.75	2.67	2.35	2.04	1.76	1.41	1.23	1.20
57436	6.79	4.75	3.48	2.66	2.22	1.84	1.64	1.38	1.14
57437	7.09	3.77	2.99	2.27	1.82	1.68	1.50	1.25	1.02
57438	4.08	3.16	2.25	1.56	1.13	1.03	0.90	0.89	0.86
57439	4.59	4.09	3.35	2.52	2.02	1.55	1.33	1.20	1.05
57440	3.59	2.57	2.03	1.45	1.02	0.92	0.90	0.90	0.94

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability) ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS โดยใช้เวลา UTC(NIMT) เทียบกับ GPST

MJD	Time Stability (nanosecond)								
	Average time GPS+GLONASS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	1.05	1.04	0.87	0.65	0.53	0.46	0.44	0.41	0.37
57416	1.86	1.24	1.05	0.87	0.72	0.61	0.51	0.42	0.33
57417	1.11	0.88	0.71	0.57	0.46	0.41	0.40	0.38	0.36
57418	1.33	0.93	0.77	0.62	0.53	0.47	0.42	0.36	0.31
57419	1.40	0.97	0.72	0.61	0.58	0.57	0.54	0.50	0.47
57420	1.67	1.08	0.84	0.78	0.68	0.62	0.53	0.45	0.39
57421	1.30	1.04	0.79	0.67	0.60	0.61	0.59	0.54	0.53
57422	1.41	1.00	0.86	0.72	0.59	0.50	0.47	0.44	0.42
57423	1.21	0.90	0.72	0.59	0.54	0.51	0.48	0.44	0.43
57424	1.26	0.89	0.81	0.73	0.65	0.59	0.53	0.50	0.49
57425	1.68	1.13	0.95	0.75	0.62	0.56	0.51	0.45	0.41
57426	1.17	0.92	0.67	0.54	0.53	0.50	0.48	0.45	0.41
57427	1.70	1.69	1.26	0.88	0.71	0.63	0.58	0.56	0.51
57428	1.51	1.18	1.03	0.90	0.76	0.65	0.55	0.47	0.42
57429	5.02	2.80	2.00	1.52	1.18	1.02	0.86	0.73	0.69
57430	1.47	1.07	0.88	0.84	0.77	0.68	0.58	0.51	0.47
57431	1.56	1.22	0.94	0.71	0.58	0.55	0.51	0.44	0.42
57432	1.98	1.37	1.03	0.81	0.75	0.74	0.67	0.60	0.54
57433	1.74	1.28	0.92	0.69	0.58	0.52	0.52	0.51	0.47
57434	1.43	1.40	1.05	0.82	0.75	0.69	0.61	0.50	0.41
57435	1.80	1.38	1.05	0.85	0.78	0.69	0.61	0.52	0.45
57436	3.77	2.31	1.65	1.33	1.14	0.98	0.86	0.70	0.58
57437	1.92	1.41	0.97	0.77	0.68	0.66	0.58	0.49	0.46
57438	2.18	1.82	1.35	1.09	0.91	0.80	0.75	0.66	0.58
57439	2.02	1.80	1.30	0.99	0.86	0.75	0.66	0.55	0.44
57440	1.92	1.10	0.89	0.75	0.67	0.62	0.59	0.52	0.48

ตารางที่ ค.4 แสดงค่าเสถียรภาพเชิงเวลา (Time Stability) ของข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS โดยใช้เวลา UTC เทียบกับ GPST

MJD	Time Stability (nanosecond)								
	Average time GPS+GLONASS (minute)								
	16	32	48	64	80	96	112	128	144
57415	1.66	1.81	1.49	1.10	0.89	0.77	0.69	0.63	0.55
57416	2.82	1.86	1.41	0.95	0.84	0.76	0.64	0.56	0.53
57417	2.45	2.17	1.41	0.98	0.87	0.90	0.81	0.76	0.73
57418	1.95	1.46	1.15	1.06	1.01	0.90	0.81	0.71	0.63
57419	2.33	1.50	1.08	0.98	0.91	0.85	0.79	0.73	0.67
57420	3.38	2.85	2.22	1.77	1.53	1.27	1.11	1.07	1.03
57421	3.58	2.66	1.90	1.49	1.30	1.21	1.12	1.16	1.16
57422	2.60	1.92	1.46	1.25	1.19	1.12	1.07	1.01	0.92
57423	2.74	2.10	1.47	1.11	0.92	0.83	0.71	0.67	0.67
57424	2.52	2.09	1.60	1.32	1.21	1.14	1.05	0.98	0.94
57425	4.26	3.08	2.46	1.99	1.61	1.44	1.25	1.15	1.08
57426	1.66	1.45	1.08	0.89	0.83	0.75	0.68	0.67	0.66
57427	3.10	2.21	1.75	1.39	1.14	0.93	0.77	0.77	0.77
57428	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
57429	1.94	1.30	1.11	0.97	0.86	0.80	0.77	0.74	0.74
57430	3.16	2.51	1.99	1.63	1.32	1.13	0.95	0.85	0.86
57431	3.98	2.83	2.15	1.70	1.45	1.33	1.25	1.21	1.14
57432	4.97	3.52	2.80	2.16	1.84	1.63	1.49	1.36	1.22
57433	3.03	1.81	1.37	1.28	1.17	0.98	0.89	0.79	0.78
57434	3.35	2.67	2.01	1.87	1.81	1.54	1.29	1.12	0.95
57435	4.83	3.79	2.69	2.31	1.99	1.70	1.35	1.18	1.17
57436	6.81	4.74	3.44	2.66	2.25	1.90	1.66	1.40	1.15
57437	7.04	3.73	2.96	2.25	1.80	1.66	1.49	1.25	1.02
57438	4.29	3.22	2.35	1.67	1.22	1.09	0.96	0.92	0.86
57439	4.65	4.17	3.39	2.57	2.02	1.52	1.29	1.16	1.00
57440	3.63	2.61	2.05	1.44	0.99	0.90	0.88	0.90	0.93

ภาคผนวก ง ตารางแสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด (RMSE)

ตารางที่ ง.1 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (Easting), ทิศเหนือ (Northing) และทางตั้ง (Height) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมและเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ ด้วยการใช้ข้อมูล GPS

DOY	นาฬิกาอะตอมซีเซียม (เมตร)			นาฬิกาภายในเครื่องรับ (เมตร)		
	ตะวันออก	เหนือ	ตั้ง	ตะวันออก	เหนือ	ตั้ง
028	0.047	0.041	0.264	0.043	0.041	0.262
029	0.077	0.023	0.088	0.099	0.026	0.061
030	0.030	0.033	0.107	0.043	0.051	0.117
031	0.094	0.045	0.182	0.091	0.048	0.180
032	0.046	0.072	0.135	0.048	0.073	0.132
033	0.033	0.035	0.040	0.026	0.040	0.045
034	0.124	0.099	0.115	0.135	0.088	0.167
035	0.032	0.081	0.143	0.101	0.120	0.141
036	0.110	0.119	0.142	0.101	0.120	0.141
037	0.100	0.025	0.047	0.107	0.030	0.049
038	0.112	0.019	0.038	0.121	0.032	0.051
039	0.050	0.046	0.068	0.042	0.047	0.077
040	0.071	0.043	0.143	0.073	0.043	0.139
041	0.074	0.069	0.306	0.062	0.045	0.160
042	0.112	0.041	0.077	0.172	0.058	0.087
043	0.047	0.052	0.058	0.050	0.054	0.059
044	0.056	0.029	0.079	0.056	0.029	0.078
045	0.048	0.023	0.059	0.049	0.018	0.055
046	0.064	0.052	0.150	0.035	0.047	0.146
047	0.050	0.088	0.289	0.050	0.086	0.284
048	0.061	0.017	0.085	0.059	0.023	0.104
049	0.038	0.034	0.073	0.054	0.047	0.157
050	0.057	0.048	0.083	0.038	0.049	0.073
051	0.069	0.040	0.178	0.084	0.055	0.231
052	0.071	0.037	0.141	0.070	0.054	0.132
053	0.039	0.042	0.081	0.041	0.056	0.087

ตารางที่ ง.2 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางทิศตะวันออก (Easting), ทิศเหนือ (Northing) และทางตั้ง (Height) จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมและเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาภายในเครื่องรับ ด้วยการใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS

DOY	นาฬิกาอะตอมซีเซียม (เมตร)			นาฬิกาภายในเครื่องรับ (เมตร)		
	ตะวันออก	เหนือ	ตั้ง	ตะวันออก	เหนือ	ตั้ง
028	0.094	0.029	0.029	0.088	0.032	0.029
029	0.109	0.033	0.036	0.103	0.031	0.042
030	0.052	0.026	0.073	0.044	0.028	0.079
031	0.088	0.039	0.100	0.087	0.035	0.101
032	0.048	0.041	0.045	0.053	0.048	0.052
033	0.032	0.014	0.029	0.028	0.015	0.033
034	0.084	0.034	0.058	0.124	0.076	0.067
035	0.048	0.032	0.068	0.042	0.036	0.075
036	0.043	0.048	0.096	0.037	0.053	0.098
037	0.042	0.026	0.031	0.051	0.024	0.035
038	0.078	0.013	0.034	0.077	0.014	0.067
039	0.041	0.015	0.033	0.036	0.029	0.036
040	0.044	0.021	0.053	0.035	0.026	0.056
041	0.081	0.054	0.185	0.058	0.040	0.086
042	0.051	0.040	0.073	0.050	0.043	0.165
043	0.032	0.035	0.106	0.031	0.042	0.112
044	0.033	0.039	0.062	0.036	0.028	0.044
045	0.023	0.021	0.047	0.031	0.026	0.048
046	0.083	0.041	0.081	0.031	0.044	0.066
047	0.025	0.053	0.078	0.028	0.058	0.090
048	0.035	0.021	0.110	0.036	0.019	0.097
049	0.044	0.016	0.078	0.044	0.014	0.087
050	0.055	0.053	0.083	0.062	0.060	0.092
051	0.014	0.039	0.082	0.014	0.054	0.069
052	0.030	0.061	0.072	0.034	0.019	0.066
053	0.036	0.031	0.085	0.028	0.030	0.088

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ: นางสาวพรชนิตร์ มูลอักษร

วันเดือนปีเกิด: 31 กรกฎาคม 2534

คุณวุฒิทางการศึกษา:

พ.ศ. 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผลงานทางวิชาการ:

พรชนิตร์ มูลอักษร, ทยาทิพย์ ทองตัน และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2559) “การประเมิน
สมรรถนะและการประเมินผลของเวลามาตรฐานประเทศไทย” การประชุมวิชาการเทคโนโลยี
อวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ Geoinfotech 2016 ครั้งที่ 17, 3-5 กุมภาพันธ์ 2559