

การหาค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ด้วยวิธีการประมวลผล
แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

นายณัชปณณ์ โปธิกุลคุปตรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย



Estimation of GNSS receiver internal delay using Precise Point Positioning algorithm

Mr. Natchapan Pothikunkuppararak

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

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University



1717917101

CU Thesisis 5970154721 thesis / recv: 22072562 19:19:15 / seq: 12

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ด้วย
	วิธีการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง
โดย	นายณัฐปภัณ โปธิกูรคุปตรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนก วีรวงศ์)

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

ณัฏฐ์ โปธิกรคุปตรักษ์ : การหาค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง. (Estimation of GNSS receiver internal delay using Precise Point Positioning algorithm) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

ขีดความสามารถของการบอกเวลาและการซิงโครไนส์เวลาเป็นส่วนสำคัญในอุตสาหกรรมสมัยใหม่และโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นที่สุด ตั้งแต่ การสื่อสารโทรคมนาคม การทำธุรกรรมทางการเงิน รวมไปถึง โครงข่ายการผลิตไฟฟ้าอัจฉริยะ GNSS ให้ข้อมูลเวลาที่แม่นยำและเสถียรทั่วโลก ซึ่งสัญญาณ GNSS เป็นแหล่งข้อมูลสำคัญและสนับสนุนเทคโนโลยีการประมวลผลข้อมูลสมรรถนะสูงและในเวลาจริง การประยุกต์ใช้งานดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการวัดที่ถูกต้องสำหรับค่าพิกัดและเวลาที่ได้จากเครื่องรับ ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางโดยวัดจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับนั้นมีความล่าช้าที่เพิ่มเข้ามาเนื่องจาก การสร้างสัญญาณ การเดินทางของสัญญาณ และการรับสัญญาณ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มและตามระบบ ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ได้แทนค่าด้วยแบบจำลองและหาค่าโดยใช้วิธีการหาค่าพิกัดจุดเดี่ยวความแม่นยำสูงและวิเคราะห์ผลเพิ่มเติมจากค่าความไม่แน่นอนจากการวัด การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การหาค่าความล่าช้าที่เกิดขึ้นภายในเครื่องรับซึ่งเกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องรับ การบ่งชี้คุณลักษณะของความล่าช้าที่เกิดขึ้นภายในเครื่องรับนี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเพิ่มความแม่นยำของการเทียบสัญญาณเวลาด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบฮืออเดติก เนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งของการประมวลผลในขั้นตอนการหาค่าความสมบูรณ์ของการรับสัญญาณ โดยที่การวัดเรื่องความเชื่อถือได้นั้นจะทำให้การปรับแก้ค่าของค่าพิกัดและเวลาที่ได้จากผลการประมวลผลที่เครื่องรับสัญญาณ การทดลองทำโดยการรับสัญญาณ GNSS ในเวลาเดียวกันสำหรับเครื่องรับสัญญาณ GPS และ GNSS โดยใช้เสาอากาศคนละตัวสำหรับแต่ละเครื่องรับโดยรับสัญญาณที่เสถียรขึ้น เครื่องรับทั้งสองเครื่องนั้นต่อเข้ากับนาฬิกาอะตอมซีเซียมเครื่องเดียวกัน เครื่องรับสัญญาณ GPS นั้น ได้รับการบ่งชี้ค่าความล่าช้าที่เกิดขึ้นภายในเครื่องรับสำหรับการวัดระยะแบบซูโดเรนจ์จากข้อมูล C1 ผ่านกระบวนการเปรียบเทียบผลด้วยวิธีการที่เป็นที่ยอมรับระหว่างประเทศ ในขณะที่การบ่งชี้ค่าความล่าช้าที่เกิดขึ้นภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบฮืออเดติกจะทำดำเนินการในการศึกษาครั้งนี้ การรับสัญญาณในการทดลองนี้เริ่มตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม 2560 ถึง 17 มกราคม 2561 ที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ตัวแปรที่ทำการหาค่าประกอบด้วย ค่าพิกัดของเครื่องรับ ค่าความแตกต่างระหว่างเวลาของเครื่องรับ ค่าความคลาดเคลื่อนในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ ด้วยการประมวลผลค่าที่ได้จากการรังวัดแบบสถิตด้วยโปรแกรม Bernese GNSS เวอร์ชัน 5.2 แล้วจึงคำนวณและวิเคราะห์ผลจากค่าความล่าช้าที่เกิดขึ้นภายในเครื่องรับ โดยค่าความล่าช้าที่เกิดขึ้นภายในเครื่องรับที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 316.07 นาโนวินาที ผลที่ได้จากการประมวลผลครั้งนี้ สามารถนำไปใช้ได้กับเครื่องรับเพื่อการเทียบสัญญาณเวลาความแม่นยำสูง

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970154721 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: GNSS receiver internal delay, PPP

Natchapan Pothikunkupatarak : Estimation of GNSS receiver internal delay using Precise Point Positioning algorithm. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D.

Timing and synchronisation capability is at the core of many modern industries and most vital infrastructures from telecommunications, financial transactions to future smart electricity grids. GNSS provides accurate and stable timing information worldwide. It is essential sources and supports for high-performance and real-time data processing technologies. These applications require the precise measurement of position and time provided by the receiver. The measured travelled time from the satellite to the receiver include additional delays during signal generations, propagations and receptions classified as random and systematic errors. They are precisely modelled and estimated using the geodetic precise point positioning determination and further analyses in terms of measurement uncertainties. The research focus is on the GNSS receiver internal delay determinations caused by the receiver's electronic circuits. It is essential to characterise this geodetic receiver internal delay to enhance the accuracy of GNSS geodetic time transfer as part of GNSS integrity chain determinations; where the measure of trust is made in the correctness of the estimated position and time at the receiver. The experiments are simultaneously observed GNSS satellites by one GPS and one GNSS receiver and two separate antennas with short baseline. Both receivers are connected to the identical external caesium frequency standard. The GPS receiver is well-defined for its receiver internal delay on the pseudo-range observation of C1, through comparisons using an internationally recognised method, while the geodetic GNSS receiver is to be defined on its receiver internal delay. These experiment observations are from 26 December 2017 to 17 January 2018 at National Institute of Metrology (NIMT). The determined unknowns are receiver position, receiver clock offset, tropospheric delay through the geodetic technique of static Precise Point Positioning observations with Bernese GNSS software version 5.2. Later the receiver internal delay is computed and analysed. The receiver internal delay results as 316.07 nanoseconds as of this experiment. This computed result could be applied in precise time transfer at the computed receiver.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature



1717917101

CD :Thesis 5970154721 thesis / recv: 22072562 19:19:15 / seq: 12

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลากร
หลายๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศ. ดร. เฉลิมชนม์ สติรพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวคิด
ความรู้ ให้คำปรึกษา รวมไปถึงเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี
ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมาใน ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ชัยโชค ไวกาษา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. กนก
วีรวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำติชม เพื่อนำไปปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้
มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณ ดร. ทยาทิพย์ ทองตัน จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กรรมการภายนอก
มหาวิทยาลัย ผู้ซึ่งสละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำแนวทาง และช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆให้แก่
ผู้วิจัย

ขอบพระคุณนายชัยพร กิจประชา ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลในงานวิจัย
ครั้งนี้ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอบพระคุณ นายวัชรโรตม์ พันโยธา ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆด้านใน
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้และอำนวยความสะดวกต่างๆในทุกๆเรื่อง และขอบพระคุณ เพื่อนๆและพี่ๆ น้องๆ
ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือและความห่วงใยต่อผู้วิจัย

ณัชปณณ์ โพธิ์กูรคุปตรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	3
1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	4
1.3.3 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา.....	4
1.3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	4
1.3.5 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
บทที่ 2 แนวเหตุผลและทฤษฎีสำคัญ	13
2.1 ระบบนำหนด้วยการรังวัดสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากล (Global Navigation Satellite System, GNSS).....	13
2.2 การประมวลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP)	13
2.3 มาตรฐานความถี่ (Frequency Standard).....	14



1717917101

CD IThesis 5970154721 thesis / rev: 22072562 19:19:15 / seq: 12

2.4 GPS Common view 15

2.5 การหาค่า Receiver Internal Delay 16

2.6 ความไม่แน่นอน (Uncertainty) 20

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา 21

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 25

3.1 การเตรียมข้อมูล 25

3.2 การประมวลผลและหาค่า Receiver Internal Delay 26

3.3 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล 31

บทที่ 4 ผลการศึกษา 32

4.1 ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่าง
เครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับ
สัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน 32

4.2 ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT 33

4.3 ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี MTTO 34

4.4 ค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบ, ค่า
ต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับ
สัญญาณ GNSS 35

4.5 ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) 39

4.6 ความเสถียรภาพ (Stability) 47

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา 48

5.1 สรุปผลการวิจัย 48

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ 49

5.3 ข้อเสนอแนะ 49

บรรณานุกรม 50

ประวัติผู้เขียน 53

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	21
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า Receiver Internal Delay และ Uncertainty ของแต่ละวิธี.....	23
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิล ระหว่างเครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับ สัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน ของสถานี NOVT และ MTTO	33
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ของสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบระหว่างสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่า คลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO และค่าคลาดเคลื่อน ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี NOVT จากการใช้ข้อมูลทั้งหมด 23 วัน	37
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ของสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบระหว่างสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่า คลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO และค่าคลาดเคลื่อน ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี NOVT ในแต่ละวัน	38
ตารางที่ 4.4 ค่า Uncertainty ทั้ง 12 ชนิดที่เกิดขึ้นในงานวิจัย	46



1717977101

CD iThesis 5970154721 thesis / rev: 22072562 19:19:15 / seq: 12

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงตำแหน่งพื้นที่ที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS.....	3
รูปที่ 1.2 เสาร์ับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel รุ่น GPS-703-GGG.....	4
รูปที่ 1.3 เสาร์ับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Javad L1/L2	5
รูปที่ 1.4 สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) ชนิด Outdoor ยี่ห้อ LMR รุ่น LMR-400	5
รูปที่ 1.5 เครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT).....	6
รูปที่ 1.6 เครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO).....	6
รูปที่ 1.7 เครื่องนับเวลา (Universal Counter) รุ่น 53132A	7
รูปที่ 1.8 นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Cesium Atomic Clock) รุ่น 5071A-001	7
รูปที่ 1.9 เครื่องกระจายความถี่ (RF Distribution Amplifier)	8
รูปที่ 1.10 เครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ (Micro Stepper) ยี่ห้อ SDI รุ่น HROG-10RM	8
รูปที่ 1.11 ตัวขยายความถี่ (Frequency Doubling).....	9
รูปที่ 1.12 แสดงการเชื่อมต่อของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT).....	10
รูปที่ 1.13 แสดงการเชื่อมต่อของเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO)	11
รูปที่ 1.14 แสดงโปรแกรม Bernese GNSS Software เวอร์ชัน 5.2.....	12
รูปที่ 2.1 แสดงวิธีการถ่ายทอดเวลาโดยวิธี GPS Common view.....	15
รูปที่ 2.2 แสดงถึงค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ของค่า clock offset.....	18
รูปที่ 3.1 แสดงไฟล์ RINEX มาตรฐานจากข้อ 3.1.1 ที่นำมาใช้	26
รูปที่ 3.2 แสดงไฟล์ CCTF จากข้อ 3.1.2 ที่นำมาใช้.....	26
รูปที่ 3.3 แสดงไฟล์สกุล CLK ที่ได้รับจากการประมวลผล	27
รูปที่ 3.4 ข้อมูลค่า clock offset ในไฟล์สกุล CLK ที่ได้รับจากการประมวลผล.....	27
รูปที่ 3.5 ข้อมูลค่า clock offset ในไฟล์ CCTF	28



1717917101

CD IThesis 5970154721 thesis / rev: 22072562 19:19:15 / seq: 12

รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการประมวลผลและหาค่า Receiver Internal Delay ตามข้อ 3.2	30
รูปที่ 3.7 แสดงการวิเคราะห์ผลตามข้อ 3.3	31
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT.....	34
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี MTTO.....	35
รูปที่ 4.3 แสดงค่า Stability ของค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT ...	47



1717917101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การถ่ายทอดเวลา (Time Transfer) มีประโยชน์อย่างมากในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น การรักษาเวลาให้ตรงกันภายในบริษัทต่างๆ การรักษาเวลาภายในท้องถิ่น การรักษาเวลาระหว่างประเทศ เพื่อประโยชน์ในการสื่อสารระหว่างองค์กรต่างๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ หรือการรักษาเวลาในตลาดหุ้นทั่วโลก เป็นต้น ในการถ่ายทอดเวลานั้นจะต้องอาศัยการเทียบเวลา (Time Comparison) ระหว่างองค์กรโดยผ่านทางนาฬิกาอะตอมของแต่ละองค์กรในแต่ละประเทศ โดยมีการอ้างอิงด้วยระบบเวลาร่วมสากล (Coordinated Universal Time: UTC) เป็นเวลาอ้างอิง ซึ่งควบคุมโดย The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) ในการเทียบเวลานั้นมีหลายวิธี ได้แก่ การเทียบเวลาผ่านเครื่องมือสื่อสาร ตัวอย่างเช่น โมเด็ม โพรท็อกซ์ โพรคัพท์ (MODEMS) เป็นต้น การเทียบเวลาผ่านทางวิทยุกระจายเสียง (WWV และ WWVH) การเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมนำหน Global Positioning System (GPS) หรือ Global Navigation Satellite System (GNSS) เป็นต้น และการเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมสื่อสาร เช่น วิธี two-way satellite frequency transfer (TWSFT) (Lewandowski et al., 1999)

การเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมสื่อสาร (TWSFT) เป็นวิธีการเทียบเวลาที่มีความถูกต้องที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ ภายใต้ปัจจัยและสภาพแวดล้อมเดียวกัน แต่เป็นวิธีที่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงมาก ดังนั้นการเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมนำหน GPS หรือ GNSS จึงเป็นวิธีการเทียบเวลาที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับองค์กรที่ทำการรักษาเวลาตามประเทศต่างๆ (Lewandowski et al., 1999) การเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมนำหน GPS หรือ GNSS จะเทียบเวลาจากเครื่องรับสัญญาณ GPS หรือ GNSS จำนวน 2 เครื่อง ทำการรังวัดข้อมูลโดยอาศัยการเดินทางของคลื่นไมโครเวฟในช่วงคลื่น L-band จากดาวเทียมนำหนมายังเครื่องรับสัญญาณ GPS หรือ GNSS ของแต่ละเครื่อง แล้วนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณแต่ละเครื่องมาคำนวณเทียบเวลากัน ซึ่งระหว่างที่คลื่นเดินทางนั้นย่อมเกิดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ เริ่มตั้งแต่ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม วงโคจรดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ชั้นบรรยากาศ



1717917101

CD :Thesis 5970154721 thesis / rev: 22072562 19:19:15 / seq: 12

โทรโพสเฟียร์ (Troposphere) และค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องรับสัญญาณ GPS หรือ GNSS โดยการขจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองหรือค่าแก้ต่างๆ เช่น ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม วงโคจรดาวเทียม สามารถลดและขจัดได้โดยใช้ค่าแก้จากนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงและค่าแก้ข้อมูลวงโคจรความละเอียดสูง ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความล่าช้าในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถขจัดได้โดยวิธีแบบจำลองเชิงเส้นของข้อมูลสองความถี่ (Ionosphere-free-combination) ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความล่าช้าในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ สามารถลดโดยใช้โมเดลแบบจำลองได้ เหลือเพียงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องรับสัญญาณ GPS หรือ GNSS ที่ไม่สามารถใช้แบบจำลองหรือค่าแก้ต่างๆ ขจัดได้

ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องรับสัญญาณ GPS หรือ GNSS เกิดจากแฝงอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องรับสัญญาณนั้นๆ เรียกว่า Receiver Internal Delay ซึ่งในการหาค่า Receiver Internal Delay ไม่สามารถคำนวณหาได้โดยตรง ต้องอาศัยการเทียบเวลาจากเครื่องรับสัญญาณ GPS หรือ GNSS ที่ทราบค่า Receiver Internal Delay อยู่แล้ว ปัจจุบันมีองค์กรที่ทำการรักษาเวลาหลายประเทศได้ทำการหาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GPS หรือ GNSS ที่ใช้ในการเทียบเวลา หรือใช้งานด้านเวลาในประเทศนั้นๆ การหาค่า Receiver Internal Delay จะช่วยลดค่าความไม่แน่นอนของเวลา (Uncertainty) ลงจาก 10-20 ns เหลือต่ำกว่า 5 ns (Yan Ying, 2015) ซึ่งทำให้งานด้านการถ่ายทอดเวลาที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สำหรับองค์กรที่ทำการรักษาเวลาในประเทศไทย (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ) ได้ทำการคำนวณหาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GPS ความถี่เดียวที่ใช้ทำการเทียบเวลาภายในประเทศแล้ว ซึ่งทำให้ค่า Uncertainty ลดลงจาก 20 ns เหลือเพียง 3.8 ns (Huang, 2017) แต่ในอนาคตสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติจะมีการนำเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่เป็นเครื่องรับสัญญาณยี่ห้อเดคติกส์แบบสองความถี่มาใช้เทียบเวลาภายในประเทศแทนเครื่องรับสัญญาณ GPS เดิม และปัจจุบันวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) ได้รับความนิยมมากขึ้นสำหรับการเทียบเวลาด้วยระบบดาวเทียมนำหน เนื่องจากได้มีการใช้คลื่นสองความถี่ มีค่าใช้ค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง มีการใช้แบบจำลองเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และอื่นๆ จึงทำให้ผลที่ได้รับจากการประมวลผลด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) มีความถูกต้องสูงขึ้น (Gertsvolf, 2017)



1717917101

CU Thesisis 5970154721
thesis / recv: 22072562 19:19:15 / seq: 12

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การหาค่า Receiver Internal Delay ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) ที่เป็นเครื่องรับสัญญาณยี่ห้อเดติกส์แบบสองความถี่ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP)

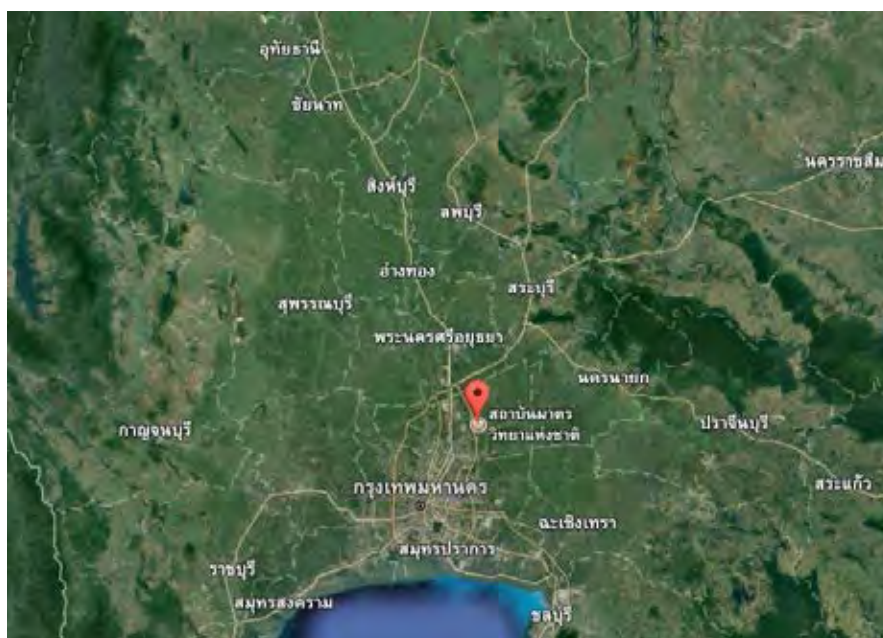
1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) โดยใช้โปรแกรม Bernese GNSS Software

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาวิจัยใช้ข้อมูลในพื้นที่ ที่ตั้งสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องในระบบ GNSS ซึ่งตั้งอยู่บนตาดฟ้าอาคารผดุงมาตรฐาน สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เป็นระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 (MJD 58113 to 58135) พื้นที่ที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS แสดงตามรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงตำแหน่งพื้นที่ที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS

1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.3.2.1 ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลรูปแบบ RINEX มาตรฐาน จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) โดยใช้เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novate รุ่น GPS-703-GGG ทำการรังวัดทุกๆ 30 วินาที ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561

1.3.2.2 ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลรูปแบบ CCTF จากเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO) โดยใช้เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Javad L1/L2 ทำการรังวัด เป็นระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561

1.3.2.3 ค่าแก้नाฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง, ค่าแก้วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง, Difference Code Bias จาก CODE

1.3.3 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

ศึกษาข้อมูลการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) เพื่อหาค่า Receiver Internal Delay จากข้อมูลรูปแบบ RINEX มาตรฐาน ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT)

1.3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.3.4.1 เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel รุ่น GPS-703-GGG



รูปที่ 1.2 เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel รุ่น GPS-703-GGG

1.3.4.2 เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Javad L1/L2



รูปที่ 1.3 เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Javad L1/L2

1.3.4.3 สายโคแอกเซียล (Coaxial Cable) ชนิด Outdoor ยี่ห้อ LMR รุ่น LMR-400 ที่มีความต้านทานไฟฟ้า (Impedance) ที่ 50 โอห์ม (Ohm)



รูปที่ 1.4 สายโคแอกเซียล (Coaxial Cable) ชนิด Outdoor ยี่ห้อ LMR รุ่น LMR-400



1717917101

CU Thesisis 5970154721 thesisis / rev: 22072562 19:19:15 / seq: 12

1.3.4.4 เครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT)



รูปที่ 1.5 เครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT)

1.3.4.5 เครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO)



รูปที่ 1.6 เครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO)



1.3.4.6 เครื่องนับเวลา (Universal Counter) รุ่น 53132A



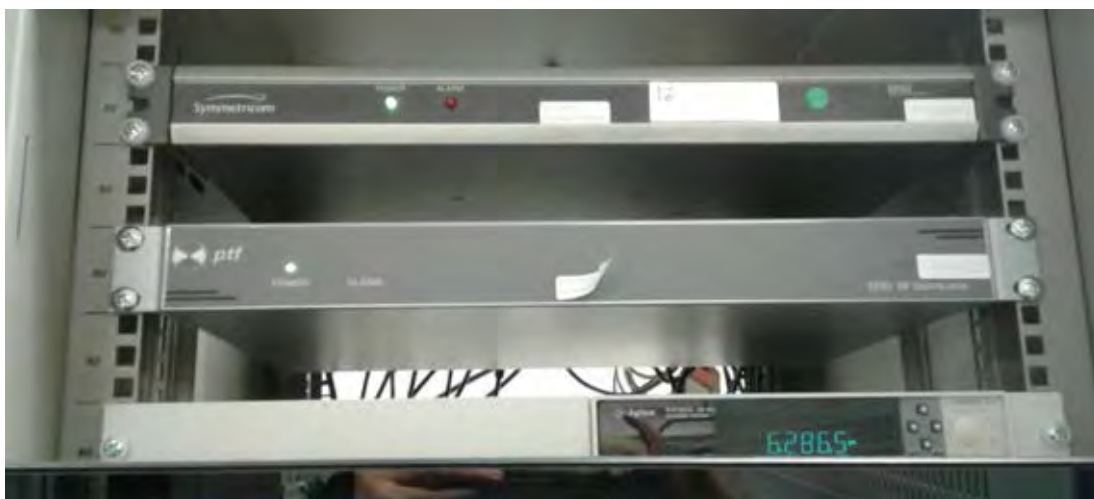
รูปที่ 1.7 เครื่องนับเวลา (Universal Counter) รุ่น 53132A

1.3.4.7 นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Cesium Atomic Clock) รุ่น 5071A-001



รูปที่ 1.8 นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Cesium Atomic Clock) รุ่น 5071A-001

1.3.4.8 เครื่องกระจายความถี่ (RF Distribution Amplifier)



รูปที่ 1.9 เครื่องกระจายความถี่ (RF Distribution Amplifier)

1.3.4.9 เครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ (Micro Stepper) ยี่ห้อ SDI รุ่น HROG-10RM ที่มีความละเอียดที่ $5.00E-19$



รูปที่ 1.10 เครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ (Micro Stepper) ยี่ห้อ SDI รุ่น HROG-10RM



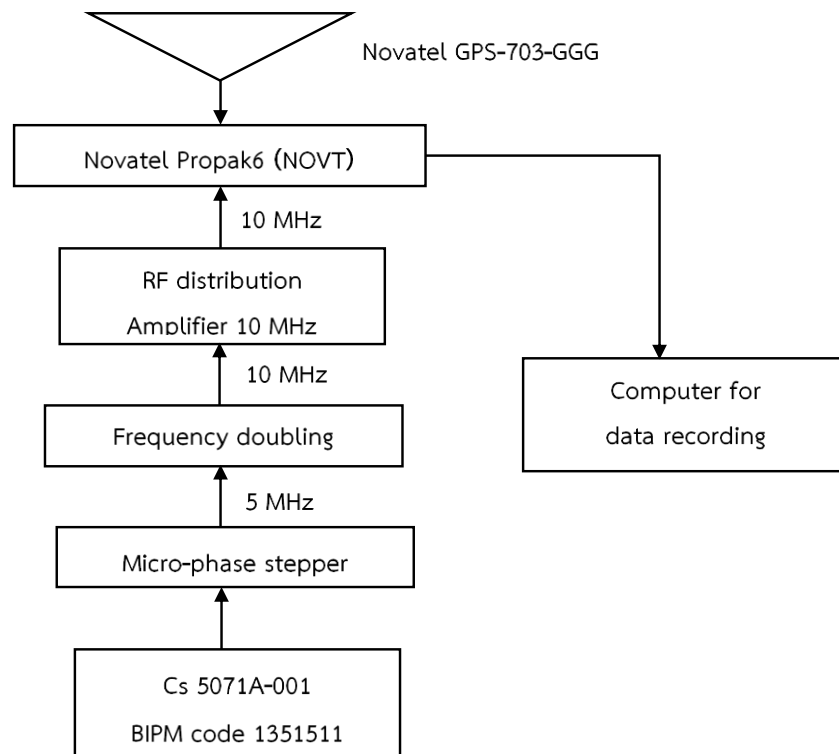
1717917101

1.3.4.10 ตัวขยายความถี่ (Frequency Doubling)



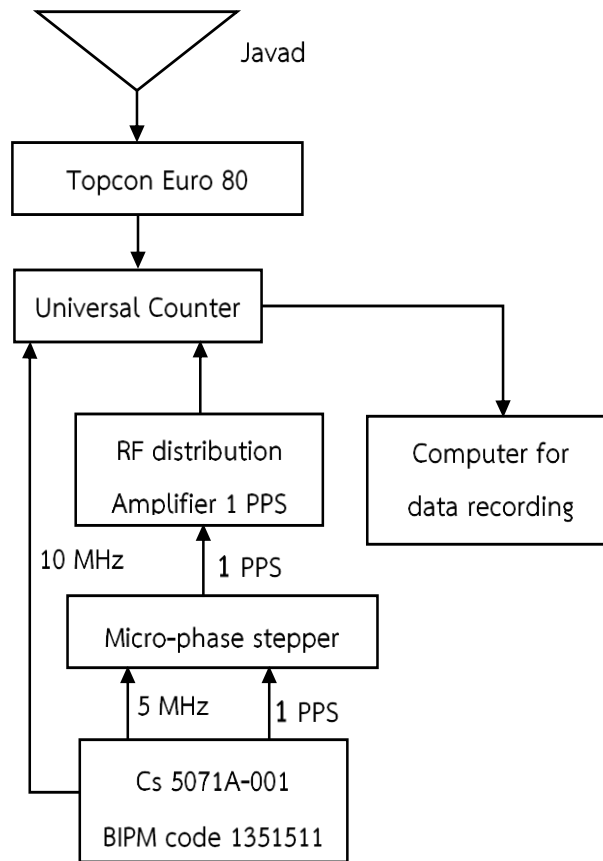
รูปที่ 1.11 ตัวขยายความถี่ (Frequency Doubling)

การเชื่อมต่อเครื่องมือจะแบ่งเป็น 2 ชุด ตามที่ใช้ในการประมวลผลในการศึกษาวิจัย สำหรับเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 ให้สถานีนี้ชื่อว่าสถานี NOVT การเชื่อมต่อเครื่องมือจะเริ่มตั้งแต่เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel รุ่น GPS-703-GGG ตามข้อ 1.3.4.1 เครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 ตามข้อ 1.3.4.4 เครื่องกระจายความถี่ ตามข้อ 1.3.4.8 ตัวขยายความถี่ ตามข้อ 1.3.4.10 เครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ ตามข้อ 1.3.4.9 จนถึงนาฬิกาอะตอมซีเซียม รุ่น 5071A-001 ตามข้อ 1.3.4.7 การเชื่อมต่อจะแสดงตามรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 แสดงการเชื่อมต่อของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT)

สำหรับเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 ให้สถานีนี้ชื่อว่าสถานี MTTO การเชื่อมต่อเครื่องมือจะเริ่มตั้งแต่เสารับสัญญาณ เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Javad L1/L2 ตามข้อ 1.3.4.2 เครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 ตามข้อ 1.3.4.5 เครื่องนับเวลา รุ่น 53132A ตามข้อ 1.3.4.6 เครื่องกระจายความถี่ ตามข้อ 1.3.4.8 เครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ ตามข้อ 1.3.4.9 จนถึงนาฬิกาอะตอมซีเซียม รุ่น 5071A-001 ตามข้อ 1.3.4.7 ซึ่งจำเป็นต้องใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมตัวเดียวกัน เนื่องจากในงานวิจัยต้องเทียบเวลาจากนาฬิกาเครื่องเดียวกัน การเชื่อมต่อจะแสดงตามรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 แสดงการเชื่อมต่อของเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO)

1.3.5 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

3.5.1 โปรแกรม Bernese GNSS Software เวอร์ชัน 5.2 ซึ่งเป็นโปรแกรมทางด้านวิทยาศาสตร์ใช้สำหรับการประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS ที่พัฒนาโดย Astronomical Institute of the University of Bern (AIUB)



รูปที่ 1.14 แสดงโปรแกรม Bernese GNSS Software เวอร์ชัน 5.2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่า Receiver Internal Delay ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณประเภทยี่ห้ออเดติกส์ ทำให้สามารถใช้เป็นตัวอ้างอิงในงานเทียบเวลาโดยใช้เครื่องรับสัญญาณประเภทยี่ห้ออเดติกส์ให้มีความแม่นยำขึ้น บ่งบอกถึงขีดความสามารถในการใช้งานด้านการถ่ายทอดเวลา และเทียบเวลา ตัวอย่างเช่น การเทียบเวลาภายในบริษัทต่างๆ การเทียบเวลาในตลาดหุ้นทั่วโลก การสื่อสารโทรคมนาคม การถ่ายทอดเวลาภายในประเทศผ่านทางระบบสื่อสาร เช่น คอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น และเป็นตัวอย่างสำหรับการหาค่า Receiver Internal Delay ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งใช้ในงานเทียบเวลาภายในประเทศไทย

บทที่ 2

แนวเหตุผลและทฤษฎีสำคัญ

2.1 ระบบนำหน้ด้วยการรังวัดสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากล (Global Navigation Satellite System, GNSS)

ระบบนำหน้ด้วยการรังวัดสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) ปัจจุบันมีระบบนำหน้ด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียมหลักๆ 4 ระบบด้วยกัน ได้แก่ ระบบดาวเทียม GPS ระบบดาวเทียม GLONASS ระบบดาวเทียม BeiDou และระบบดาวเทียม Galileo ซึ่งแต่ละระบบดาวเทียม จะมีเวลาของแต่ละระบบที่เป็นของตัวเอง ซึ่งสามารถเทียบเวลากันได้ และในงานวิจัยนี้ จะใช้ระบบดาวเทียม GPS เนื่องจากเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 สามารถรับข้อมูลดาวเทียมได้เฉพาะระบบดาวเทียม GPS เท่านั้น

2.2 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP)

ในงานวิจัยนี้ จะใช้การประมวลผลไฟล์ RINEX แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าพิกัดบนพื้นโลกที่มีความแม่นยำกว่าการหาดำแหน่งแบบจุดเดี่ยว Single Point Positioning (SPP) เนื่องจากมีการใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบ 2 ความถี่ ซึ่งจะสามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความล่าช้าในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ ใช้ค่าแก้งโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง และค่าแก้เวลานาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง เพื่อให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (Kouba & Héroux, 2001) โดยมีสมการคือ

$$P_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + \epsilon\rho)_{L3} \quad (1)$$

$$\phi_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + N\lambda + \epsilon\phi)_{L3} \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2)

P_{L3} คือ สมการค่ารังวัดซูโดเรนจ์ (Pseudo range) (เมตร)

ϕ_{L3} คือ สมการค่ารังวัดเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase) (เมตร)

ρ คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร)

c คือ ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

dt คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

dT คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

M คือ Mapping ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม (เมตร)

ZTD คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความล่าช้าชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

Zenith Total Delay (เมตร)

N คือ เลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี (หน่วยนับ)

λ คือ ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

ep และ $\epsilon\phi$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) และสัญญาณรบกวนของข้อมูล (Observation noise) (เมตร)

การประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง หรือ PPP ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการลดและขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้น ด้วยวิธีการดังนี้

- ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม และค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม จะใช้ค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงและค่าแก๊วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง ซึ่งมีความถูกต้องของค่าแก๊วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงในระดับต่ำกว่า 2.5 เซนติเมตร และมีความถูกต้องของค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงต่ำกว่า 20 พิโควินาที (John et al., 2009)

- ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความล่าช้าในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จะใช้แบบจำลองความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์แบบ Dry Global Mapping Function (Dach Rolf, 2015)

- ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความล่าช้าในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่งจะใช้แบบจำลองข้อมูลเชิงเส้นสองความถี่ของ (Ionosphere-Free Combination) จากการผสมกันระหว่างข้อมูล L1 และ L2

2.3 มาตรฐานความถี่ (Frequency Standard)

มาตรฐานความถี่จะอยู่ในนาฬิกา (Oscillators) ของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งถูกขับเคลื่อนโดยแหล่งพลังงาน ในแต่ละอุปกรณ์ก็จะมีมาตรฐานความถี่ที่ต่างกัน ซึ่งมีด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ นาฬิกาควอทซ์ (Quartz Oscillators) และนาฬิกาอะตอม (Atomic Oscillators) ซึ่งมาตรฐานความถี่ที่ใช้ในสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เป็นนาฬิกาอะตอมซีเซียม (Caesium Oscillators) ซึ่งเป็นนาฬิกาอะตอม (Atomic Oscillators) มีความถี่มาตรฐานอันดับที่ 2 ในมาตรฐาน SI เพราะจะมีค่าความสั้นพ้องของซีเซียมอยู่ที่ 9,192,631,770 เฮิรตซ์ แต่การดูแลรักษาจะต้องให้อยู่ในสถานที่ที่ไม่มีสิ่งใดมา



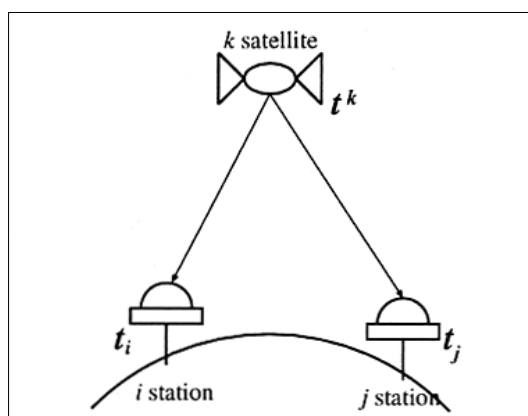
1717917101

CD :Thesis 5970154721 thesis / rev: 22072562 19:19:15 / seq: 12

กระทบกระเทือนต่อนาฬิกาอะตอมโดยตรง ค่าความถี่มาตรฐานของซีเซียมจะมีค่าประมาณ $\pm 5 \times 10^{-12}$ เฮิร์ตซ์ นาฬิกาอะตอมซีเซียมเหมาะสำหรับการใช้งานระยะยาว ซึ่งมีอายุการใช้งาน 3 ถึง 25 ปี แบบเต็มประสิทธิภาพ (Lombardi & Lombardi, 2001)

2.4 GPS Common view

วิธีการเทียบเวลาโดยวิธี GPS Common view เป็นวิธีการหาค่าต่างเวลา (clock offset) ระหว่างสถานี 2 สถานี ซึ่งถูกนำเสนอในปี ค.ศ.1980 โดย D. W. Allan of the former NBS (National Bureau of Standards; presently the National Institute of Standards and Technology, or NIST) (Gotho et al., 2003) และเป็นวิธีการเทียบเวลาที่นิยมใช้มากกว่า 20 ปี การเปรียบเทียบเวลาที่ได้มาจากข้อมูล C/A มีความแม่นยำของการเทียบเวลาจะอยู่ที่ประมาณ 10^{-14} วินาที หลักการของ วิธีการเทียบเวลาโดย GPS Common view จะแสดงตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.15 แสดงวิธีการถ่ายทอดเวลาโดยวิธี GPS Common view

จากรูปที่ 2.1 สถานี i และ j คือสถานีสำหรับการเทียบเวลา ซึ่งรับสัญญาณเวลา (t_k) จากดาวเทียมนำหนพร้อมกัน ก่อนที่จะได้ค่า clock offset ระหว่างสถานี i และ j จะต้องหาค่า clock offset ของแต่ละสถานีก่อน โดยค่า clock offset ของสถานี i (δt_i^k) จะหาได้จาก การนำค่าเวลาที่สถานี i ลบด้วยเวลาที่ดาวเทียมนำหน ตามสมการที่ 3 และค่า clock offset ของสถานี j (δt_j^k) จะหาได้จาก การนำค่าเวลาที่สถานี j ลบด้วยเวลาที่ดาวเทียมนำหน ตามสมการที่ 4

$$\delta t_i^k = t_i - t^k \quad (3)$$

$$\delta t_j^k = t_j - t^k \quad (4)$$

จากสมการที่ (3) และ (4)

δt_i^k คือ ค่า clock offset ของสถานี i (วินาที)

δt_j^k คือ ค่า clock offset ของสถานี j (วินาที)

t_i คือ เวลาที่รับข้อมูลของสถานี i (วินาที)

t_j คือ เวลาที่รับข้อมูลของสถานี j (วินาที)

t^k คือ เวลาที่ส่งข้อมูลของดาวเทียม k (วินาที)

เมื่อได้ค่า clock offset ของสถานี i (δt_i^k) และค่า clock offset ของสถานี j (δt_j^k) แล้ว สามารถหาค่า clock offset ระหว่างสถานี i และ j (δt_{ij}) โดยนำค่า clock offset ของสถานี i ลบด้วยค่า clock offset ของสถานี j ตามสมการที่ (5)

$$\begin{aligned}\delta t_{ij} &= \delta t_i^k - \delta t_j^k \\ \delta t_{ij} &= (t_i - t^k) - (t_j - t^k) \\ \delta t_{ij} &= t_i - t_j\end{aligned}\quad (5)$$

จากสมการที่ (5)

δt_{ij} คือ ค่า clock offset ระหว่างสถานี i และ j (วินาที)

2.5 การหาค่า Receiver Internal Delay

ค่า Receiver Internal Delay คือ ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS โดยปกติแล้ว ค่า Receiver Internal Delay จะหมายถึง ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS รวมกับค่าคลาดเคลื่อนภายในเสารับสัญญาณ GNSS เนื่องจากว่าในทางปฏิบัติยังไม่สามารถแยกค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ออกจากค่าคลาดเคลื่อนภายในเสารับสัญญาณ GNSS ได้ และในงานทางด้านการศึกษาหรือถ่ายทอดเวลาจะใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS และเสารับสัญญาณ GNSS ที่เป็นชุดเดิมเสมอ หากมีการเปลี่ยนเครื่องรับสัญญาณ GNSS หรือเสารับสัญญาณ GNSS จะมีการคำนวณค่า Receiver Internal Delay ใหม่เสมอ ดังนั้น ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS หรือ Receiver Internal Delay จะหมายรวมถึงค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS รวมกับค่าคลาดเคลื่อนภายในเสารับสัญญาณ GNSS

BIPM ได้เสนอการหาค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS (Internal Receiver Delay) ดังนี้ (Huang, 2017)

การหาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS จำเป็นต้องใช้เวลาเทียบเวลาจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ทราบค่า Receiver Internal Delay แล้ว โดยการหาค่า

Receiver Internal Delay จำเป็นต้องทราบค่า clock offset ของแต่ละสถานีก่อน ซึ่งตัวแปรที่ใช้เรียกค่า clock offset ในงานทางด้านเวลานั้นจะแตกต่างกับงานของ GPS positioning เนื่องจากในงานทางด้านเวลาจะใช้นาฬิกาอะตอมที่มีคุณภาพสูงกว่านาฬิกาควอตซ์ที่ใช้ในงานของ GPS positioning ทำให้สามารถอธิบายถึงค่าคลาดเคลื่อนที่อยู่ในค่า clock offset ได้ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวมี 3 อย่างได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS รวมกับค่าคลาดเคลื่อนภายในเสารับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน ดังนั้นงานทางด้านเวลาจะแบ่งค่า clock offset ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อน และค่า clock offset ที่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้ว

ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อน ในงานทางด้านเวลาจะใช้ตัวแปร $REFGPS_{(RAW)}$ ซึ่งเป็นผลของค่า clock offset ที่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้ว ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวแปร $REFGPS$ รวมกับค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS รวมกับค่าคลาดเคลื่อนภายในเสารับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน เขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ (6)

$$REFGPS_{(RAW)} = REFGPS + CAB DLY + INT DLY - REF DLY \quad (6)$$

จากสมการที่ (6)

$REFGPS_{(RAW)}$ คือ ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานีใดๆ (วินาที)

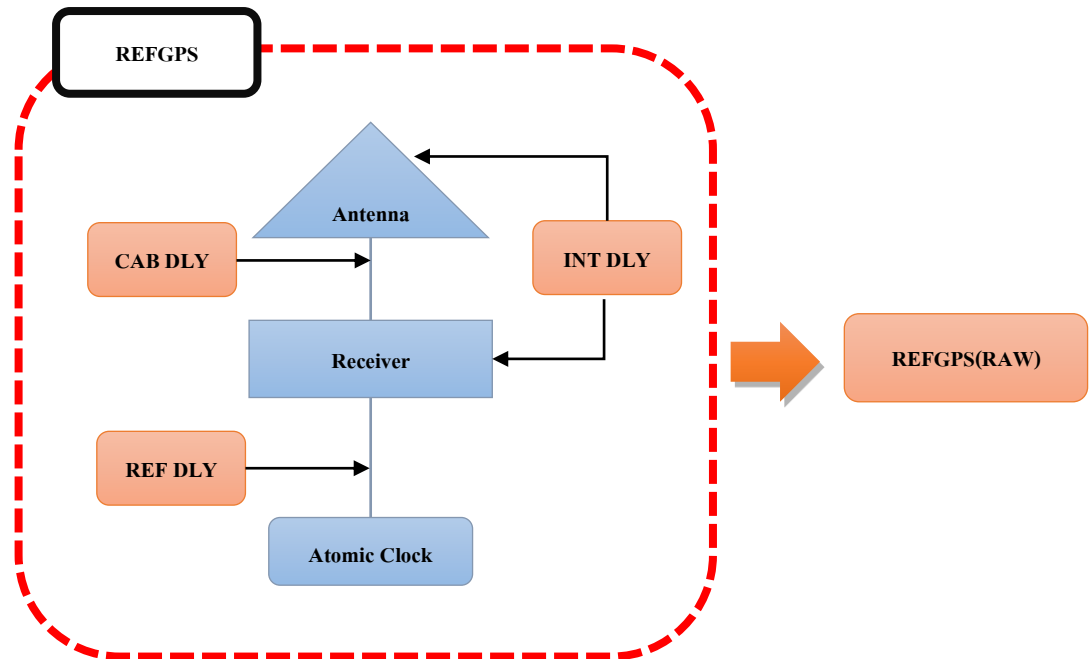
$REFGPS$ คือ ค่า clock offset ที่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้วของสถานีใดๆ (วินาที)

$CAB DLY$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS (วินาที)

$INT DLY$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS รวมกับค่าคลาดเคลื่อนภายในเสารับสัญญาณ GNSS (วินาที)

$REF DLY$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน (วินาที)

จากสมการที่ (6) ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานีใดๆ, ค่า clock offset ที่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้วของสถานีใดๆ และค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ของค่า clock offset สามารถแสดงเป็นภาพได้ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.16 แสดงถึงค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ของค่า clock offset

เมื่อได้ค่า $REFGPS_{(RAW)}$ หรือ ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานีใดๆแล้ว จะทำการหาค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนระหว่างสถานี 2 สถานี ตามวิธีการเทียบเวลาโดยวิธี GPS Common view โดยการเทียบเวลานั้น จะใช้ค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานีที่ยังไม่ทราบค่า Receiver Internal Delay ลบด้วยค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานีที่ทราบค่า Receiver Internal Delay แล้ว โดยใช้ข้อมูลในระยะเวลา (epoch) ที่ตรงกันของทั้ง 2 สถานี $(REFGPS_{(i)} - REFGPS_{(j)})$ ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี 2 สถานีที่คำนวณได้ จะมีจำนวนข้อมูลตามจำนวน epoch ที่ใช้ ซึ่งค่าที่นำมาใช้คำนวณต่อไปจะใช้ค่าที่เป็นตัวแทนของค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี 2 สถานี การเลือกตัวแทนของข้อมูลจะใช้ค่าตำแหน่งกึ่งกลางของข้อมูล หรือค่า *median* การคำนวณค่าตำแหน่งกึ่งกลางของข้อมูลของค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานีที่ยังไม่ทราบค่า Receiver Internal Delay และค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานีที่ทราบค่า Receiver Internal Delay แล้วเป็นไปตามสมการที่ (7)

$$RAWDIF = \text{median} (REFGPS_{(i)} - REFGPS_{(j)}) \quad (7)$$

จากสมการที่ (7)

i คือ สถานีของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ยังไม่ทราบค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ

j คือ สถานีของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ทราบค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณแล้ว

$RAWDIF$ คือ ค่ากึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ของสถานี i และสถานี j (วินาที)

เมื่อได้ค่า $RAWDIF$ ระหว่าง เครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี i และสถานี j แล้ว จะหาค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี i และสถานี j โดยนำค่า $RAWDIF$ บวกกับค่า $REF DLY$ ของสถานี i และลบค่า $REF DLY$ ของ สถานี j ตามสมการที่ (8)

$$\Delta SYS DLY_{(ij)} = RAWDIF_{(ij)} + REF DLY_{(i)} - REF DLY_{(j)} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8)

$\Delta SYS DLY_{(ij)}$ คือ ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี i และสถานี j (วินาที)

เมื่อได้ค่า $\Delta SYS DLY_{(ij)}$ แล้ว จะหาค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี i และสถานี j โดยนำค่า $\Delta SYS DLY_{(ij)}$ ลบกับค่า $CAB DLY$ ของสถานี i และบวกด้วย $CAB DLY$ ของสถานี j ตามสมการที่ (9)

$$\Delta INT DLY_{(ij)} = \Delta SYS DLY_{(ij)} - CAB DLY_{(i)} + CAB DLY_{(j)} \quad (9)$$

จากสมการที่ (9)

$\Delta INT DLY_{(ij)}$ คือ ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี i และสถานี j (วินาที)

เมื่อได้ค่า $\Delta INT DLY_{(ij)}$ แล้ว จากนั้นหาค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี i โดยนำค่า $\Delta INT DLY_{(ij)}$ บวกกับค่า $INT DLY$ ของสถานี j ตามสมการที่ (10)

$$INT DLY_{(i)} = \Delta INT DLY_{(ij)} + INT DLY_{(j)} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10)

$INT DLY_{(i)}$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี i (วินาที)

2.6 ความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ในการหาค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS สามารถตรวจสอบความแม่นยำได้ โดยดูจากค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของข้อมูล (Taylor & Kuyatt, 1994) โดยค่า Uncertainty จะประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ ซึ่งแยกออกเป็น 2 กลุ่มตามวิธีที่ใช้ประมาณค่าทางตัวเลข ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนประเภท A (Uncertainty Type A) และ ค่าความไม่แน่นอนประเภท B (Uncertainty Type B) โดยที่ Uncertainty Type A เกิดจากวิธีการคำนวณทางสถิติทุกชนิด เปรียบเสมือนค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (random error) เช่น ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากระบบเวลาร่วมสากล (Uncertainty from UTC time) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Uncertainty from carrier phase) หรือค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากข้อมูลชูโดเรนจ์ (Uncertainty from pseudo range) เป็นต้น ส่วน Uncertainty Type B เกิดจากวิธีการอื่นๆ เปรียบเสมือนค่าคลาดเคลื่อนอย่างมีระบบ (Systematic error) เช่น ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม (Uncertainty from ephemeris error) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากคลื่นหลายวิถี (Uncertainty from Multipath) ความไม่แน่นอนที่เกิดจากความล่าช้าในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Uncertainty from delay error of Ionosphere) ความไม่แน่นอนที่เกิดจากความล่าช้าในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Uncertainty from delay error of Troposphere) เป็นต้น

ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) หาได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีรากที่สองของผลรวมกำลังสอง (root-sum-of-squares: RSS) ขององค์ประกอบแต่ละตัวของ Uncertainty Type A และ Uncertainty Type B เหมือนกับการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามสมการที่ (11)

$$u_{(cal)} = \sqrt{(u_{a1})^2 + (u_{a2})^2 + \dots + (u_{am})^2 + (u_{b1})^2 + (u_{b2})^2 + \dots + (u_{bn})^2} \quad (11)$$

โดยที่ $u_{(cal)}$ คือ ค่าความไม่แน่นอน (วินาที)

$u_{a1}, u_{a2}, \dots, u_{am}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนทางเวลาประเภท A แต่ละตัวตั้งแต่ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ m (วินาที)

$u_{b1}, u_{b2}, \dots, u_{bn}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนทางเวลาประเภท B แต่ละตัวตั้งแต่ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ n (วินาที)



1717917101

CU Thesisis 5970154721 thesisis / revv: 22072562 19:19:15 / seq: 12

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา

Yan Ying (2015) ได้ทำงานวิจัยเรื่อง GNSS Based Time Transfer โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษา คือ ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายทอดเวลาโดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียมต่างๆ ได้แก่ สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ C/A code (GPS C/A), Ionosphere-Free-Combination ของข้อมูลซูโดเรนจ์ (GPS P3), การรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว ความละเอียดสูงแบบสถิติ (GPS PPP) และสัญญาณระบบดาวเทียม GLONASS ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ C/A code (GLONASS C/A) ในการศึกษาได้ใช้สถาบันวิจัยทางเวลาทั้งหมด 4 ประเทศ โดยใช้สถาบันวิจัยของประเทศสิงคโปร์เป็นสถาบันวิจัยอ้างอิงถ่ายทอดเวลากับประเทศญี่ปุ่น ประเทศไต้หวัน และประเทศเยอรมัน มีเส้นฐานระหว่างประเทศประมาณ 3000 กิโลเมตร ถึง 10000 กิโลเมตร มีการใช้นาฬิกาอะตอม 2 ประเภท คือ นาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้แสดงในตารางที่ 2.1

Lab TAI Acronym /Country	Receivers Type	Time Source & Reference Clock Type	Time Links Involved	Baseline between SG and Lab (km)
SG Singapore	PolaRx2eTR	UTC (SG)	GPS PPP/P3	-
	AOS TTS-3	H-maser	GPS C/A code GLONASS C/A code	
NICT Japan	PolaRx2 TR	UTC (NICT) H-maser	GPS PPP/P3	5310
TL Taiwan	Ashtech Z- XII3T	UTC (TL) H-maser	GPS PPP/P3	3060
PTB Germany	Ashtech Z-12T	UTC (PTB)	GPS PPP/P3	10120
	AOS TTS-3	Cs	GPS C/A code GLONASS C/A code	

ตารางที่ *Error! No text of specified style in document.*1 รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ในการรังวัดใช้ข้อมูลในการรังวัดอย่างน้อย 1 เดือน ผลการทดลองสรุปได้เป็น 3 กรณี

กรณีที่ 1 การถ่ายทอเวลาโดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่ใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ C/A code (GPS C/A) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการถ่ายทอเวลาซึ่งใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GLONASS ที่ใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณแบบ C/A code (GLONASS C/A)

กรณีที่ 2 การถ่ายทอเวลาโดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่ใช้ Ionosphere-Free-Combination (GPS P3) และการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิติ (GPS PPP) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการถ่ายทอเวลาซึ่งใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่ใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ C/A code (GPS C/A)

กรณีที่ 3 การถ่ายทอเวลาโดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่ใช้การรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิติ (GPS PPP) ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากที่สุด

Elwischger (2013) ได้ทำงานวิจัยเรื่อง Absolute Calibration of Dual Frequency Timing Receivers for Galileo โดยในงานวิจัยได้ศึกษาการหาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ PolaRx4 TR PRO และค่า Uncertainty โดยใช้เครื่องจำลอง (HW Simulator) จำลองวงโคจรดาวเทียมเป็น 2 แบบ ได้แก่ วงโคจรค้างฟ้า (Geostationary Earth Orbit: GEO) และวงโคจรปานกลาง (Medium Earth Orbit: MEO) และจำลองคลื่นสัญญาณระบบดาวเทียม 3 แบบ ได้แก่ สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่ใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ C/A code (GPS L1 C/A) สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่ใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณแบบ P code (GPS L1 P) และสัญญาณระบบดาวเทียม Galileo ที่ใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ E1 code (GLONASS E1) ผลการทดลองได้นำเสนอการหาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ PolaRx4 และค่า Uncertainty แยกตามรูปแบบวงโคจรดาวเทียม และคลื่นสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ตามตารางที่ 2.2

Signal	Delay (ns)	RSS error (ns)
Galileo E1 (GEO)	36.52	0.87
Galileo E1 (MEO)	36.48	0.52
GPS L1 C/A (GEO)	35.61	0.77
GPS L1 C/A (MEO)	35.65	0.52
GPS L1 P (GEO)	35.63	0.53
GPS L1 P (MEO)	35.65	0.52

ตารางที่ *Error! No text of specified style in document.* แสดงค่า Receiver Internal Delay และ Uncertainty ของแต่ละวิธี

จากตารางที่ 2.2 สรุปการค่า Receiver Internal Delay และ Uncertainty ของแต่ละวิธีได้ ดังนี้

- ค่า Receiver Internal Delay โดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม Galileo ที่เป็นวงโคจรค้างฟ้า ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ E1 code (Galileo E1 GEO) มีค่าเท่ากับ 36.52 ns และมีค่า Uncertainty เท่ากับ 0.87 ns

- ค่า Receiver Internal Delay โดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม Galileo ที่เป็นวงโคจรปานกลาง ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ E1 code (Galileo E1 MEO) มีค่าเท่ากับ 36.48 ns และมีค่า Uncertainty เท่ากับ 0.52 ns

- ค่า Receiver Internal Delay โดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่เป็นวงโคจรค้างฟ้า ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ C/A code (GPS L1 C/A GEO) มีค่าเท่ากับ 35.61 ns และมีค่า Uncertainty เท่ากับ 0.77 ns

- ค่า Receiver Internal Delay โดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่เป็นวงโคจรปานกลาง ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ C/A code (GPS L1 C/A MEO) มีค่าเท่ากับ 35.65 ns และมีค่า Uncertainty เท่ากับ 0.52 ns

- ค่า Receiver Internal Delay โดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่เป็นวงโคจรค้างฟ้า ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ P code (GPS L1 P GEO) มีค่าเท่ากับ 35.63 ns และมีค่า Uncertainty เท่ากับ 0.53 ns

- ค่า Receiver Internal Delay โดยใช้สัญญาณระบบดาวเทียม GPS ที่เป็นวงโคจรปานกลาง ซึ่งใช้ข้อมูลคลื่นสัญญาณ P code (GPS L1 P MEO) มีค่าเท่ากับ 35.65 ns และมีค่า Uncertainty เท่ากับ 0.52 ns

Niessner (2008) ได้ทำงานวิจัยเรื่อง CALIBRATION OF THE BEV GPS RECEIVER BY USING TWSTFT โดยในงานวิจัยได้ศึกษาการหาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ TTS-2 No.55 ของสถาบันมาตรวิทยาในประเทศออสเตรีย (The Bundesamt für Eich-und Vermessungswesen: BEV) ที่เชื่อมต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม ด้วยวิธีการเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมสื่อสาร (TWSTFT) ใช้ข้อมูลจำนวน 2 วัน ตั้งแต่วันที่ 10-11 ตุลาคม พ.ศ. 2550 ซึ่งได้ค่า Receiver Internal Delay เท่ากับ 29.0 ns และมีค่า Uncertainty ลดลงจากเดิม 5.3 เหลือเพียง 3.6 ns อย่างไรก็ตามวิธีการเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมสื่อสารเป็นวิธีที่มีความถูกต้องสูง แต่สิ้นเปลืองกว่าวิธีการเทียบเวลาผ่านระบบดาวเทียมนำหน GPS เนื่องจากเป็นวิธีที่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงมาก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

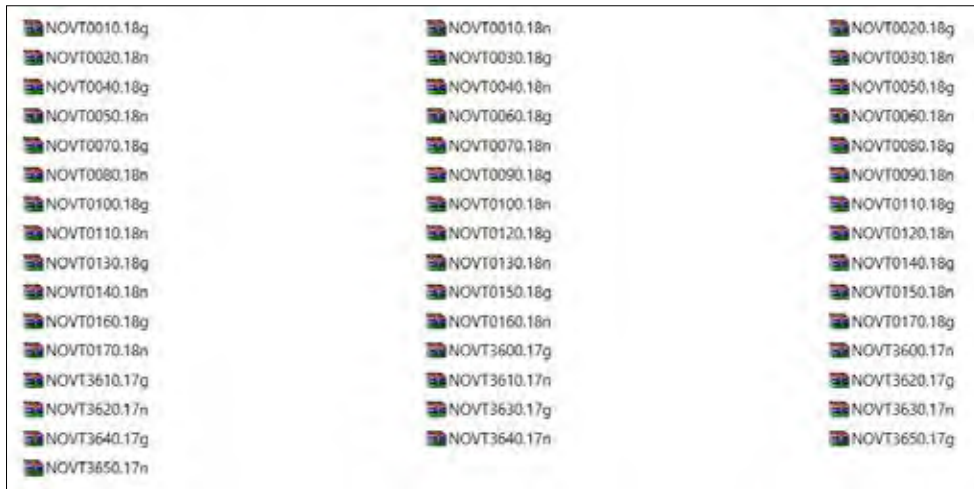
งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาค่า Receiver Internal Delay ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) ซึ่งตั้งอยู่บนตาดฟ้าอาคารผดุงมาตร สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เป็นระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 (MJD 58113 to 58135) ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) โดยใช้โปรแกรม Bernese GNSS Software ในบทนี้จะอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ 1) การเตรียมข้อมูล 2) การประมวลผลและหาค่า Receiver Internal Delay 3) การวิเคราะห์ผลและสรุปผล

3.1 การเตรียมข้อมูล

ในการทำงานวิจัยจะทำการตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS เป็น 2 สถานีด้วยกัน ได้แก่ สถานี NOVT และสถานี MTTO และมีการใช้ข้อมูลค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง, ค่าแกว่งโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง, Difference Code Bias จาก CODE โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ใช้ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT)

โดยใช้เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novate รุ่น GPS-703-GGG ทำการรังวัดทุกๆ 30 วินาที ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง ซึ่งตั้งอยู่บนตาดฟ้าอาคารผดุงมาตร สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เป็นระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 โดยข้อมูลที่ได้รับจะถูกจัดเก็บเป็นไฟล์รูปแบบ RINEX มาตรฐานแบบรายวัน ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.17 แสดงไฟล์ RINEX มาตรฐานจากข้อ 3.1.1 ที่นำมาใช้

3.1.2 ใช้ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO) โดยใช้เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Javad L1/L2 ซึ่งตั้งอยู่บนตาดฟ้าอาคารผดุงมาตร สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เป็นระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 โดยข้อมูลจะถูกจัดเก็บเป็นไฟล์รูปแบบ CCTF เป็นรายวัน ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.18 แสดงไฟล์ CCTF จากข้อ 3.1.2 ที่นำมาใช้

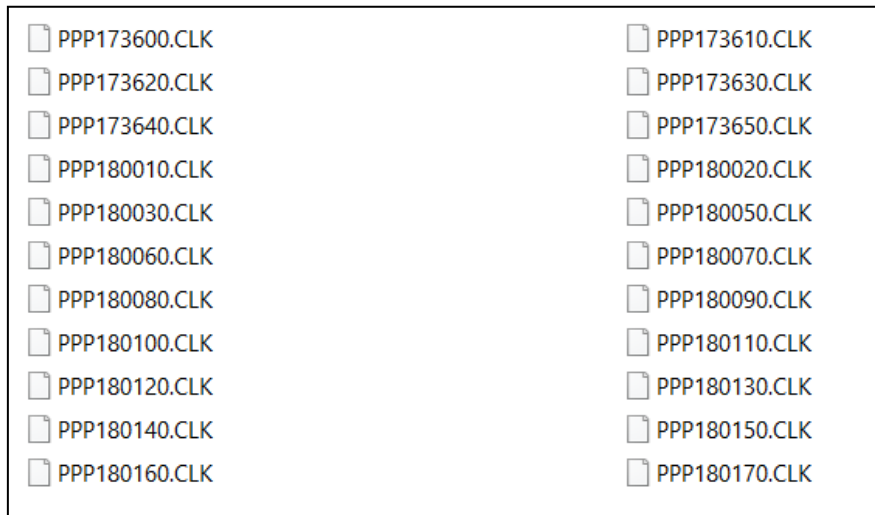
3.1.3 ใช้ข้อมูลค่าแก๊นนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง, ค่าแก๊วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง, Difference Code Bias จาก CODE ซึ่งดาวน์โหลดมาจาก <ftp://ftp.igs.org/> และ <http://ftp.aiub.unibe.ch/>

3.2 การประมวลผลและหาค่า Receiver Internal Delay

การประมวลผลและหาค่า Receiver Internal Delay ในงานวิจัยนี้ จะเป็นไปตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.2.1 นำไฟล์ RINEX มาตรฐานจากข้อ 3.1.1 มาประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้โปรแกรม Bernese GNSS Software เวอร์ชัน 5.2 และใช้ค่าแก๊นนาฬิกาดาวเทียมความ

ละเอียดสูง, ค่าแกว่งโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง, Difference Code Bias จากข้อ 3.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จะได้ข้อมูลของค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT ในแต่ละ epoch ซึ่งอยู่ไฟล์สกุล CLK ที่แสดงเป็นรายวัน ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.19 แสดงไฟล์สกุล CLK ที่ได้รับการประมวลผล

แสดงตัวอย่างของค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT ในไฟล์สกุล CLK ในวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 มีค่าเท่ากับ $-0.956410187937E-9$ วินาทีใน epoch แรก โดยสังเกตจากบรรทัดที่ 19 และมีค่าเท่ากับ $-0.958230017994E-9$ ใน epoch ที่สอง โดยสังเกตจากบรรทัดที่ 30 ตามรูปที่ 3.4

11	NOVT																			0.000000000000E+00	ANALYSIS CLK REF				
12		1	IGS14																		# OF SOLN STA / TRF				
13	NOVT																				SOLN STA NAME / NUM				
14		31																			# OF SOLN SATS				
15	G01	G02	G03	G05	G06	G07	G08	G09	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16							PRN LIST			
16	G17	G18	G19	G20	G21	G22	G23	G24	G25	G26	G27	G28	G29	G30	G31							PRN LIST			
17	G32																					PRN LIST			
18																						END OF HEADER			
19	AR	NOVT	2017	12	26	00	00			0.000000	2											-0.956410187937E-09	0.350830167638E-10		
20	AS	G02	2017	12	26	00	00			0.000000	1												0.245675990879E-03		
21	AS	G05	2017	12	26	00	00			0.000000	1												-0.187503298206E-04		
22	AS	G06	2017	12	26	00	00			0.000000	1												0.413961495879E-03		
23	AS	G12	2017	12	26	00	00			0.000000	1												0.358642447879E-03		
24	AS	G13	2017	12	26	00	00			0.000000	1												-0.950007016206E-04		
25	AS	G15	2017	12	26	00	00			0.000000	1												-0.357420840121E-03		
26	AS	G19	2017	12	26	00	00			0.000000	1												-0.467747127121E-03		
27	AS	G20	2017	12	26	00	00			0.000000	1												0.496555907879E-03		
28	AS	G25	2017	12	26	00	00			0.000000	1												-0.511750981121E-03		
29	AS	G29	2017	12	26	00	00			0.000000	1												0.520166506879E-03		
30	AR	NOVT	2017	12	26	00	01			0.000000	2													-0.958230017994E-09	0.350538596935E-10
31	AS	G02	2017	12	26	00	01			0.000000	1													0.245675391007E-03	
32	AS	G05	2017	12	26	00	01			0.000000	1													-0.187501141933E-04	

รูปที่ 3.20 ข้อมูลค่า clock offset ในไฟล์สกุล CLK ที่ได้รับการประมวลผล

3.2.2 นำค่า *REFGPS* ของสถานี MTTO จากไฟล์รูปแบบ CCTF ที่ได้จากข้อ 3.1.2 มาทำการหาค่า *REFGPS*_(RAW) ของสถานี MTTO โดยนำ *REFGPS* ของสถานี MTTO รวมกับค่า *CAB DLY* และค่า *INT DLY* และลบกับค่า *REF DLY* ตามสมการที่ (6)

ค่า *REFGPS* ของสถานี MTTO ใน epoch เดียวกันจะมีหลายค่า ขึ้นอยู่กับดาวเทียมนำหนที่รับสัญญาณได้ ค่าที่ใช้เป็นตัวแทนใน epoch นั้นจะใช้ค่าเฉลี่ยของค่า *REFGPS* ใน epoch เดียวกัน จากรูปที่ 3.5 จะแสดงตัวอย่างค่า *REFGPS* ใน epoch เดียวกันในกรอบสีแดง ซึ่งมีอยู่ 10 ค่า ได้แก่ -266.4 ns, -266.0 ns, -265.9 ns, -268.6 ns, -264.7 ns, -265.1 ns, -258.3 ns, -268.5 ns, -262.2 ns และ -269.0 ns ซึ่งคำนวณค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ -265.5 ns ใช้เป็นค่า *REFGPS* ใน epoch นั้น เพื่อใช้ในการคำนวณหา *REFGPS*_(RAW) ต่อไป

PRN	CL	MJD	STTIME	TRKL	ELV	AETH	REFSV	SRSV	REFGPS	SRGPS
			hhmmss	s	.ldg	.ldg	.lns	.lps/s	.lns	.lps/s
25	FF	58113	000600	780	255	2736	+5114864	+113	-2664	+51
5	FF	58113	000600	780	492	1182	+184760	+29	-2660	+38
6	FF	58113	000600	780	182	771	-4142307	+10	-2659	+17
15	FF	58113	000600	780	402	1940	+3571474	-17	-2686	-17
2	FF	58113	000600	780	400	432	-2459391	+116	-2647	+15
20	FF	58113	000600	780	405	2763	-4968230	-3	-2651	+7
19	FF	58113	000600	780	190	1370	+4674809	+55	-2583	+78
12	FF	58113	000600	780	359	2302	-3589148	+10	-2695	-8
13	FF	58113	000600	780	555	1427	+947359	-14	-2622	-16
29	FF	58113	000600	780	257	3280	-5204375	+62	-2690	+10
25	FF	58113	002200	780	246	2654	+5114928	+51	-2659	-12
5	FF	58113	002200	780	438	80	+184754	-16	-2656	-6
6	FF	58113	002200	780	164	844	-4142308	+38	-2654	+45
15	FF	58113	002200	780	479	1940	+3571491	+25	-2669	+25

รูปที่ 3.21 ข้อมูลค่า clock offset ในไฟล์ CCTF

3.2.3 นำค่า *REFGPS*_(RAW) ของสถานี NOVT ที่ได้ไฟล์ RINEX ในข้อ 3.2.1 และค่า *REFGPS*_(RAW) ของสถานี MTTO ที่ได้จากการคำนวณในข้อ 3.2.2 มาหาค่า *RAWDIF* ระหว่างสถานี NOVT และสถานี MTTO โดยนำค่า *REFGPS*_(RAW) ของสถานี NOVT ลบด้วยค่า *REFGPS*_(RAW) ของสถานี MTTO ในแต่ละ epoch จากนั้นนำค่าที่ได้ในแต่ละ epoch มาหาค่าตำแหน่งกึ่งกลาง จะได้ค่า *RAWDIF* ตามสมการที่ (7)

3.2.4 ทำการหาค่า $\Delta SYS DLY$ ระหว่างสถานี NOVT และสถานี MTTO โดยนำค่า *RAWDIF* ที่ได้จากข้อ 3.2.3 บวกกับค่า *REF DLY* ของสถานี NOVT และลบกับค่า *REF DLY* ของสถานี MTTO ตามสมการที่ (8)

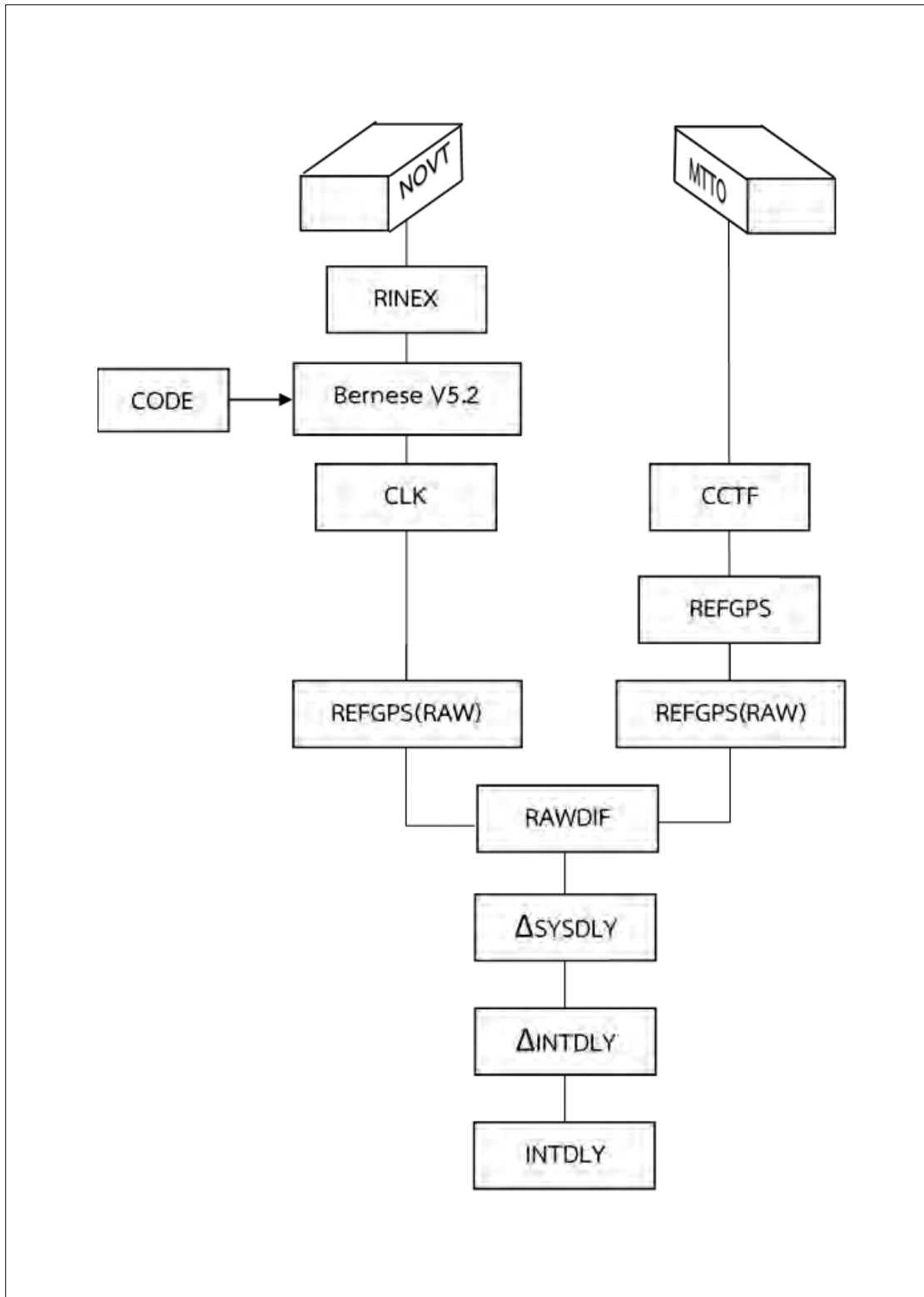
3.2.5 ทำการหาค่า $\Delta INT DLY$ ระหว่างสถานี NOVT และสถานี MTTO โดยนำค่า $\Delta SYS DLY$ จากข้อ 3.2.4 ลบกับค่า $CAB DLY$ ของสถานี NOVT และบวกกับค่า $CAB DLY$ ของสถานี MTTO ตามสมการที่ (9)

3.2.6 ทำการหาค่า $INT DLY$ ของสถานี NOVT โดยนำค่า $\Delta INT DLY$ จากข้อ 3.2.5 บวกด้วยค่า $INT DLY$ ของสถานี MTTO ตามสมการที่ (10)

ขั้นตอนการประมวลผลและหาค่า Receiver Internal Delay ในข้อ 3.2 สามารถแสดงเป็นแผนผังได้ตามรูปที่ 3.6



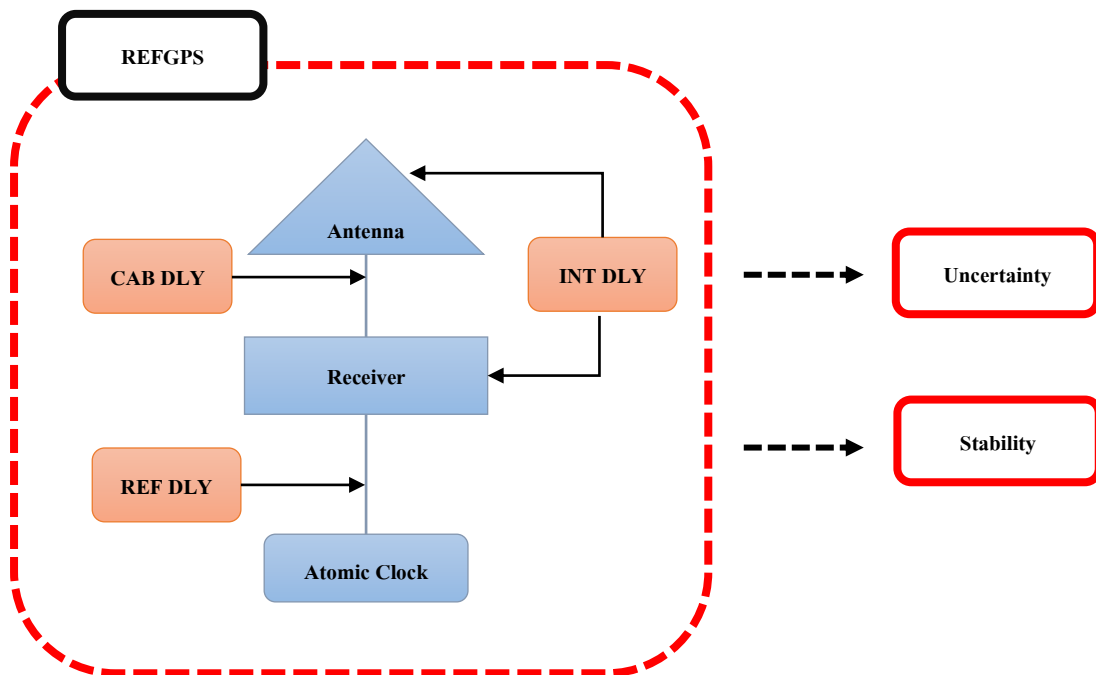
1717917101



รูปที่ 3.22 แสดงขั้นตอนการประมวลผลและหาค่า Receiver Internal Delay ตามข้อ 3.2

3.3 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล

เมื่อประมวลผลตามข้อ 3.2 เรียบร้อยแล้ว จะวิเคราะห์ผลโดยการคำนวณค่า Uncertainty และค่า Stability ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) โดยใช้เสารับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novate รุ่น GPS-703-GGG ที่เชื่อมต่อเข้ากับนาฬิกาอะตอมซีเซียม ตามรูปที่ 3.7



รูปที่ Error! No text of specified style in document.23 แสดงการวิเคราะห์ผลตามข้อ 3.3

บทที่ 4

ผลการศึกษา

จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) จากข้อมูลรูปแบบ RINEX มาตรฐาน จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) และ ข้อมูลรูปแบบ CCTF จากเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO) เป็นระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 (MJD 58113 to 58135) ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน

ในการหาค่า Receiver Internal Delay ของสถานี NOVT จำเป็นต้องทราบค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่อยู่ในค่า clock offset ก่อน ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน

ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS (*CAB DLY*) และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน (*REF DLY*) เป็นค่าคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากสายเคเบิล สามารถหาได้จากการเวลาโดยปล่อยสัญญาณ 1 PPS เข้าไปในสายเคเบิล และจับเวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึงปลายสาย ค่าเวลาที่วัดได้คือความล่าช้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ในงานวิจัยนี้รังวัดค่า *CAB DLY* และ *REF DLY* ของสถานี NOVT ได้เท่ากับ 150.00 ns และ 13.00 ns ตามลำดับ ส่วนค่า *CAB DLY* และ *REF DLY* ของสถานี MTTO มีค่าเท่ากับ 174.00 ns และ 7.07 ns ตามลำดับ

ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS (*INT DLY*) ของสถานี MTTO ได้จากการคำนวณหาค่า Receiver Internal Delay เครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (Huang, 2017) ซึ่งได้ค่า Receiver Internal Delay บนสัญญาณซูโดเรนจ์เท่ากับ 31.20 ns

ค่า *INT DLY* ของสถานี NOVT เป็นค่าที่ยังไม่ทราบและต้องการหา จึงทำการประมาณค่าเริ่มต้นก่อนการคำนวณ ให้เท่ากับ 0.00 ns

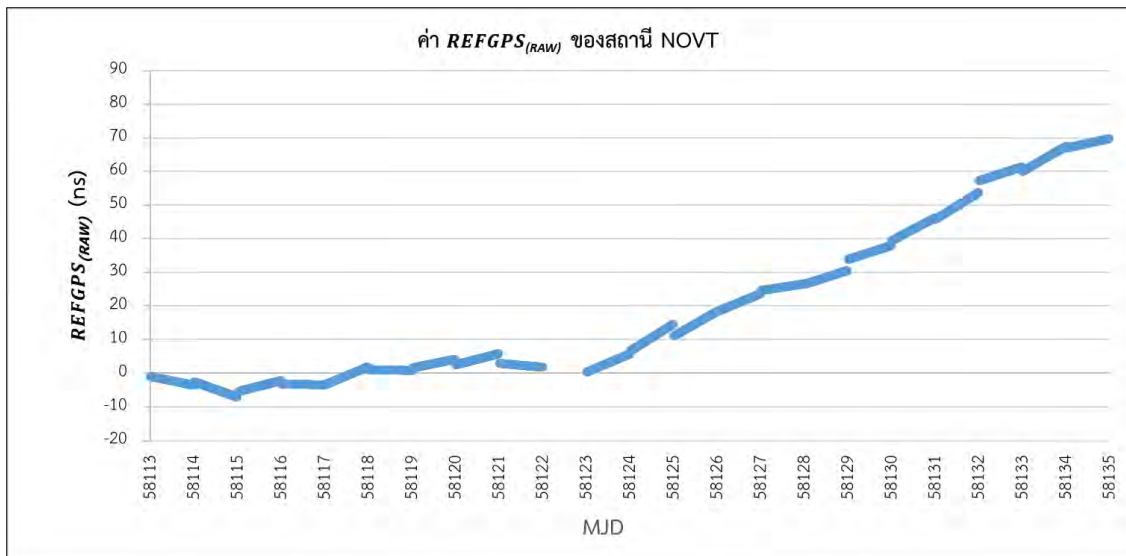
ค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน ของสถานี NOVT และ MTTO แสดงเป็นภาพรวมตามตารางที่ 4.1

สถานี	<i>CAB DLY</i> (ns)	<i>REF DLY</i> (ns)	<i>INT DLY</i> (ns)
NOVT	150.00	13.00	0.00
MTTO	174.00	7.07	31.20

ตารางที่ *Error! No text of specified style in document.*3 แสดงค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS, ค่าคลาดเคลื่อนภายในสายเคเบิลระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับเสารับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS กับนาฬิกามาตรฐาน ของสถานี NOVT และ MTTO

4.2 ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT

ในการคำนวณหาค่า Receiver Internal Delay จำเป็นต้องทราบค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี 2 สถานี เพื่อนำมาเทียบเวลากัน สำหรับการประมวลผลข้อมูลรูปแบบ RINEX มาตรฐานแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงของสถานี NOVT โดยใช้โปรแกรม Bernese GNSS Software เวอร์ชัน 5.2 และใช้ค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง, ค่าแกว่งโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง, Difference Code Bias เป็นระยะเวลา 23 วันคือระหว่างวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึง วันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 ได้ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT (*REFGPS_(RAW)*) ในแต่ละ epoch ตามรูปที่ 4.1 ค่า *REFGPS_(RAW)* ของสถานี NOVT มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ -7.08344 ns และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 79.74827 ns



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT

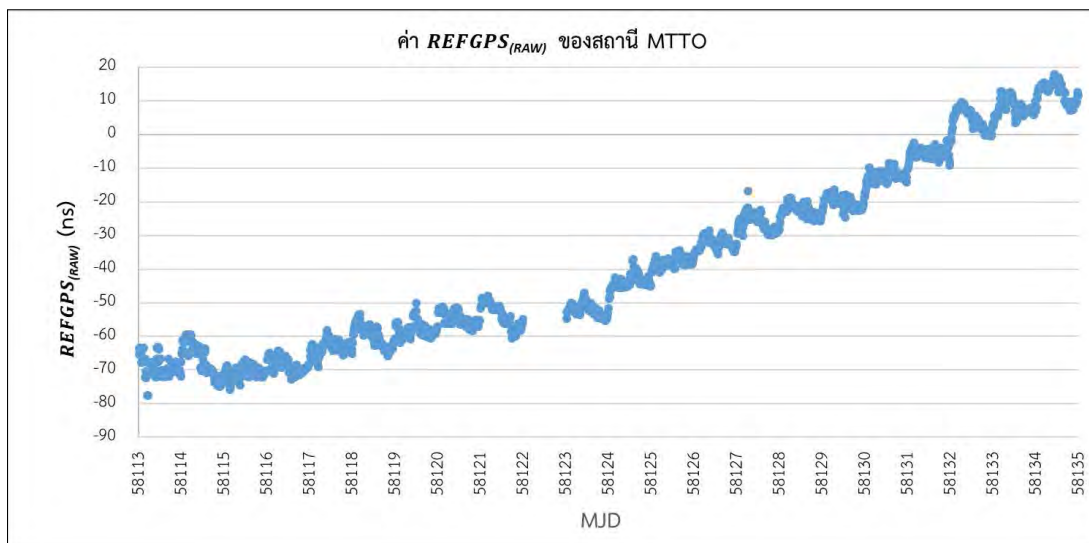
จากรูปที่ 4.1 ที่แสดงถึงค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี NOVT ซึ่งหมายถึงค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆของสถานี NOVT จะเห็นได้ว่ามีช่วงเวลาที่ข้อมูลขาดไปในวันที่ 4 มกราคม พ.ศ.2561 เนื่องจากข้อมูลในรูปแบบ RINEX จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS เกิดปัญหาขัดข้องไม่สามารถนำข้อมูลมาประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงได้ แต่ความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลนั้นไม่ส่งผลต่อการคำนวณหาค่า Receiver Internal Delay

4.3 ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี MTTO

จากข้อมูลในรูปแบบไฟล์ CCTF ของสถานี MTTO ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 เป็นระยะเวลา 23 วัน ค่าที่ได้ในรูปแบบไฟล์ CCTF จะนำค่า $REFGPS$ ซึ่งคือค่า clock offset ที่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้วของสถานี MTTO คำนวณหาค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี MTTO ($REFGPS_{(RAW)}$) โดยนำค่า $REFGPS$ ที่ได้จากไฟล์ CCTF รวมกับค่า $CAB DLY$ ของสถานี MTTO และค่า $INT DLY$ ของสถานี MTTO และลบกับค่า $REF DLY$ ของสถานี MTTO ที่ได้จากข้อ 4.1 ตามสมการที่ (6) ค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี MTTO ที่ได้สามารถแสดงค่าเป็นแต่ละ epoch ตามรูปที่ 4.2 โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ -77.47 ns และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 25.13 ns



1717917101



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี MTTO จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ามีช่วงเวลาที่ข้อมูลขาดไปในวันที่ 4 มกราคม พ.ศ.2561

เช่นเดียวกับค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี NOVT เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบข้อมูลในช่วงเวลาที่ตรงกันในการหา *INT DLY* ดังนั้นจึงไม่ได้นำข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวของสถานี MTTO มาประมวลผลเช่นเดียวกับสถานี NOVT

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่าค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี NOVT และสถานี MTTO มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากมีค่าคลาดเคลื่อนในระบบของเครื่องรับสัญญาณ GNSS แฝงอยู่ในแต่ละเครื่อง แต่ลักษณะกราฟของค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี NOVT และสถานี MTTO เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงการรบกวนข้อมูลมีความถูกต้อง ค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ที่เป็นค่าบวก หมายถึง เวลาที่สถานีช้ากว่าเวลาที่ดาวเทียมนำหน ค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ที่เป็นค่าลบ หมายถึง เวลาที่สถานีเร็วกว่าเวลาที่ดาวเทียมนำหน

ค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี MTTO มีการแกว่งของข้อมูลมากกว่าค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี NOVT เนื่องจากสถานี MTTO เป็นการรบกวนโดยใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ แต่สถานี NOVT ใช้วิธีประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ทำให้มีความแม่นยำมากกว่า

4.4 ค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบ, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS และค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS

เมื่อได้ค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT และ MTTO แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการหาค่า ค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ของสถานี

NOVT และ MTTO (*RAWDIF*), ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบระหว่างสถานี NOVT และ MTTO ($\Delta SYS DLY$), ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO ($\Delta INT DLY$) และค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี NOVT (*INT DLY*)

ในการหาค่า *RAWDIF*, $\Delta SYS DLY$, $\Delta INT DLY$ และค่า *INT DLY* ในงานวิจัยนี้ จะใช้ข้อมูลชุดเดียวกันคำนวณแยกเป็น 2 กรณี ดังนี้ 1) คำนวณจากการใช้ข้อมูลทั้งหมด 23 วัน 2) คำนวณจากการใช้ข้อมูลเป็นรายวัน

4.4.1 กรณีที่ 1 คำนวณจากการใช้ข้อมูลทั้งหมด 23 วัน

4.4.1.1 ค่า *RAWDIF* หรือค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) และเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO) คำนวณตามสมการที่ (7) โดยใช้ค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของแต่ละสถานีจากข้อ 4.2 และ 4.3 ในช่วงเวลาที่ตรงกันมาลบกัน แล้วหาค่าตำแหน่งกึ่งกลาง ได้ค่า *RAWDIF* เท่ากับ 254.94 ns

4.4.1.2 ค่า $\Delta SYS DLY$ หรือค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) และเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO) คำนวณตามสมการที่ (8) โดยใช้ค่า *RAWDIF* จากข้อ 4.4.1.1 และค่า *REF DLY* ของสถานี NOVT และ MTTO จากข้อ 4.1 ได้ค่า $\Delta SYS DLY$ เท่ากับ 260.87 ns

4.4.1.3 ค่า $\Delta INT DLY$ หรือค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ ระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) และเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Topcon รุ่น Euro 80 (MTTO) คำนวณตามสมการที่ (9) โดยใช้ค่า $\Delta SYS DLY$ จากข้อ 4.4.1.2 และค่า *CAB DLY* ของสถานี NOVT และ MTTO จากข้อ 4.1 ได้ค่า $\Delta INT DLY$ เท่ากับ 284.87 ns

4.4.1.4 ค่า *INT DLY* ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) คำนวณตามสมการที่ (10) โดยใช้ค่า $\Delta INT DLY$ จากข้อ 4.4.1.3 และค่า *INT DLY* ของสถานี MTTO จากข้อ 4.1 ได้ค่า *INT DLY* ของสถานี NOVT เท่ากับ 316.07 ns

ค่า *RAWDIF*, $\Delta SYS DLY$, $\Delta INT DLY$ และค่า *INT DLY* แสดงเป็นภาพรวมในตารางที่ 4.2

PARAMETERS	(ns)
<i>RAWDIF</i>	254.94
Δ <i>SYS DLY</i>	260.87
Δ <i>INT DLY</i>	284.87
<i>INT DLY</i>	316.07

ตารางที่ *Error! No text of specified style in document.* แสดงค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ของสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบระหว่างสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO และค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี NOVT จากการใช้ข้อมูลทั้งหมด 23 วัน

4.4.2 กรณีที่ 2 คำนวณจากการใช้ข้อมูลเป็นรายวัน

ค่า *RAWDIF*, Δ *SYS DLY*, Δ *INT DLY* และค่า *INT DLY* ที่ได้จากการคำนวณเป็นรายวันจำนวน 23 วัน จะได้ค่าทั้งหมด 22 ค่า เนื่องจากมีการตัดข้อมูลในการคำนวณออกไป 1 วัน ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.4.2.1 ค่า *RAWDIF* ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 265.29 ns และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 248.74 ns

4.4.2.2 ค่า Δ *SYS DLY* ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 271.22 ns และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 254.67 ns

4.4.2.3 ค่า Δ *INT DLY* ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 295.22 ns และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 278.67 ns

4.4.2.3 ค่า *INT DLY* ของสถานี NOVT มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 326.42 ns และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 309.87 ns

ค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ของสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบระหว่างสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO และค่าคลาดเคลื่อน

ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี NOVT ที่ได้จากการคำนวณเป็นรายวันจำนวน 23 วัน แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.3

MJD	<i>RAWDIF</i> _(ns)	Δ <i>SYS DLY</i> _(ns)	Δ <i>INT DLY</i> _(ns)	<i>INT DLY</i> _(ns)
58113	265.07	271.00	295.00	326.20
58114	262.01	267.94	291.94	323.14
58115	265.29	271.22	295.22	326.42
58116	263.72	269.65	293.65	324.85
58117	260.57	266.50	290.50	321.70
58118	258.95	264.88	288.88	320.08
58119	259.42	265.35	289.35	320.55
58120	257.76	263.69	287.69	318.89
58121	254.36	260.29	284.29	315.49
58123	252.88	258.81	282.81	314.01
58124	251.91	257.84	281.84	313.04
58125	250.17	256.10	280.10	311.30
58126	251.46	257.39	281.39	312.59
58127	249.78	255.71	279.71	310.91
58128	248.74	254.67	278.67	309.87
58129	254.09	260.02	284.02	315.22
58130	252.98	258.91	282.91	314.11
58131	253.24	259.17	283.17	314.37
58132	252.87	258.80	282.80	314.00
58133	254.46	260.39	284.39	315.59
58134	252.63	258.56	282.56	313.76
58135	253.25	259.18	283.18	314.38

ตารางที่ *Error! No text of specified style in document.*5 แสดงค่าตำแหน่งกึ่งกลางของค่าต่างระหว่าง clock offset ของสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนในระบบระหว่างสถานี NOVT และ MTTO, ค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ระหว่างสถานี NOVT และ MTTO และค่าคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี NOVT ในแต่ละวัน

4.5 ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) เป็นค่าที่ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยค่า Uncertainty จะประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ ซึ่งแยกออกเป็น 2 กลุ่มตามวิธีที่ใช้ประมาณค่าทางตัวเลข ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนทางเวลาประเภท A (Uncertainty Type A) และ ค่าความไม่แน่นอนทางเวลาประเภท B (Uncertainty Type B) ค่าความไม่แน่นอนนั้นเกิดขึ้นจากหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน เริ่มตั้งแต่สัญญาณข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ตำแหน่งของดาวเทียม ตำแหน่งของเสารับสัญญาณ คลื่นหลายวิถี ระบบเวลาต่างๆ รวมถึงไปเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด จากการประมวลผลครั้งนี้สามารถจำแนกองค์ประกอบของค่า Uncertainty ทั้ง Type A และ Type B จากงานวิจัยได้ทั้งหมด 12 รายการ (NICT, 2011, 2012) ดังนี้

4.5.1 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase Uncertainty, $u_{(Carrier Phase)}$)

สัญญาณที่เดินทางจากดาวเทียมนำหนถึงเครื่องรับสัญญาณนั้น ย่อมมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดค่าความไม่แน่นอน เนื่องจากงานวิจัยนี้ ใช้การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงซึ่งมีการใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง จึงจำเป็นต้องคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเฟสของคลื่นส่งที่เกิดขึ้น โดยคำนวณจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $REFGPS_{(RAW)}$ ของสถานี NOVT ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมด 23 วัน มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ $25.95137E-9$ วินาที การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเฟสของคลื่นส่งจะเป็นไปตามสมการที่ (12)

$$u_{(Carrier Phase)} = \frac{(Receiver\ noise\ and\ Resolution)}{86400} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{23}} \quad (12)$$

โดยที่ *Receiver noise and Resolution* คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ทำการรังวัด (วินาที)

$$u_{(Carrier Phase)} = \frac{(25.95137E-9)}{86400} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{23}}$$

$$u_{(Carrier\ Phase)} = 8.85722E - 14 \text{ วินาที}$$

4.5.2 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียม (Ephemeris error Uncertainty, $u_{(Ephemeris)}$)

ในการระบุตำแหน่งของดาวเทียม ย่อมมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียม โดยคำนวณจากค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรดาวเทียม งานวิจัยนี้มีการใช้ค่าวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง ซึ่งมีความละเอียดระดับต่ำกว่า 2.5 เซนติเมตร (Dow et al., 2009) การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียมเป็นไปตามสมการที่ (13)

$$u_{(Ephemeris)} = \frac{(Ephemeris\ error)}{c \cdot 86400} \cdot \sqrt{2} \quad (13)$$

โดยที่ *Ephemeris error* คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)

C คือ ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

$$u_{(Ephemeris)} = \frac{(0.025)}{(2.9979E+8) \cdot 86400} \cdot \sqrt{2}$$

$$u_{(Ephemeris)} = 1.36497E - 15 \text{ วินาที}$$

4.5.3 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเสาอากาศ (Antenna Coordinate Error Uncertainty, $u_{(Antenna)}$)

ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของเสาอากาศเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอน เนื่องจากการรังวัดจะได้พิกัดที่ไม่คงที่ ดังนั้นจึงใช้ค่าพิกัดเป็นตัวหาค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเสาอากาศ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.22 เมตร การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเสาอากาศเป็นไปตามสมการที่ (14)

$$u_{(Antenna)} = \frac{(Antenna\ Coordinate\ error)}{c \cdot 86400} \cdot \sqrt{2} \quad (14)$$

โดยที่ *Antenna Coordinate error* คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเสาอากาศ (เมตร)

$$u_{(Antenna)} = \frac{(0.022)}{(2.9979E+8) \cdot 86400} \cdot \sqrt{2}$$

$$u_{(Antenna)} = 1.21155E - 15 \text{ วินาที}$$

4.5.4 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากคลื่นหลายวิถี (Multipath Uncertainty,

$u_{(Multipath)}$)

คลื่นหลายวิถีเป็นค่าคลาดเคลื่อนอีกชนิดที่ไม่สามารถจัดออกได้ และไม่สามารถทราบค่าได้ ค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้สามารถทำให้น้อยลงได้โดยตั้งเสารับสัญญาณบนพื้นที่โล่ง อย่างไรก็ตามคลื่นหลายวิถีก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอน โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคลื่นหลายวิถีของข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมีค่าอยู่ที่ 0.43 เมตร การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากคลื่นหลายวิถีเป็นไปตามสมการที่ (15)

$$u_{(Multipath)} = \frac{(Multipath)}{c \cdot 86400} \cdot \sqrt{2}$$

(15)

โดยที่ *Multipath* คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคลื่นหลายวิถี (เมตร)

$$u_{(Multipath)} = \frac{(0.43)}{(2.9979E+8) \cdot 86400} \cdot \sqrt{2}$$

$$u_{(Multipath)} = 2.34775E - 14 \text{ วินาที}$$

4.5.5 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากระบบเวลาของ UTC (UTC uncertainty, $u_{(UTC)}$)

ระบบเวลาของ UTC เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากระบบเวลาของ UTC จะคิดจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบเวลา UTC และค่าความไม่แน่นอนของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบเวลา UTC ซึ่งในช่วงเวลาที่ทำการรังวัดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบเวลา UTC มีค่าเท่ากับ 0.00E-15 วินาที และค่าความไม่แน่นอนของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบเวลา UTC มีค่าเท่ากับ 0.26E-15 วินาที ซึ่งสามารถดูข้อมูลได้จาก Circular T การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากระบบเวลาของ UTC เป็นไปตามสมการที่ (16)

$$u_{(UTC)} = \sqrt{(fractional\ deviation)^2 + (standard\ uncertainty)^2}$$

(16)

โดยที่ *fractional deviation* คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบเวลา UTC (วินาที)

standard uncertainty คือ ค่าความไม่แน่นอนของ *fractional deviation* (วินาที)

$$u_{(UTC)} = \sqrt{(0.00E - 15)^2 + (0.26E - 15)^2}$$

$$u_{(UTC)} = 0.26E - 15 \text{ วินาที}$$

4.5.6 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเชื่อมต่อ (Link Uncertainty, $u_{(Link)}$)

เนื่องจากการเชื่อมต่อของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT) ย่อมมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอน ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเชื่อมต่อจะคำนวณจากค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT) เนื่องจากระบบเวลาที่ใช้เป็นระบบเวลา UTC(NIMT) ซึ่งค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT) ในช่วงที่ทำการวิจัย มีค่าอยู่ที่ $3E-10$ วินาที ซึ่งสามารถดูข้อมูลได้จาก Circular T การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเชื่อมต่อเป็นไปตามสมการที่ (17)

$$u_{(Link)} = \frac{(UTC-UTC(NMIT) \text{ Link uncertainty})}{5.86400} \cdot \sqrt{2} \quad (17)$$

โดยที่ $UTC - UTC(NMIT) \text{ Link uncertainty}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT)

$$u_{(Link)} = \frac{3E-10}{5.86400} \cdot \sqrt{2}$$

$$u_{(Link)} = 9.82093E - 16 \text{ วินาที}$$

4.5.7 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากระบบเวลาของ UTC(NMIT) (UTC(NMIT) Uncertainty, $u_{(UTC(NMIT))}$)

ระบบเวลาของ UTC(NMIT) เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความไม่แน่นอนของระบบเวลาของ UTC(NMIT) จะคำนวณจากการใช้ค่าเฉลี่ยค่าต่างเวลาของของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT) ระยะเวลา 5 วัน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ $-4.41425E-14$ วินาที และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยค่าต่างเวลาของของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT) ระยะเวลา 5 วัน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ $2.53259E-14$ วินาที ค่าดังกล่าวสามารถดูได้จาก Circular T การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากระบบเวลาของ UTC(NMIT) เป็นไปตามสมการที่ (18)

$$u_{(UTC(NMIT))} = \sqrt{(\text{average of } dF)^2 + (\text{standard deviation of } dF)^2} \quad (18)$$

โดยที่ $\text{average of } dF$ คือ ค่าเฉลี่ยค่าต่างเวลาของของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT) ระยะเวลา 5 วัน (วินาที)

standard deviation of dF คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยค่าต่างเวลาของของระบบเวลา UTC และ UTC(NIMT) ระยะเวลา 5 วัน (วินาที)

$$u_{(UTC(NIMT))} = \sqrt{(-4.41425E - 14)^2 + (2.53259E - 14)^2}$$

$$u_{(UTC(NIMT))} = 5.08917E - 14 \text{ วินาที}$$

4.5.8 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากนาฬิกาอะตอมซีเซียม (Interpolation Uncertainty, $u_{(Interpolation)}$)

เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยย่อมค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ นาฬิกาอะตอมซีเซียมเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ทำให้การหาค่า receiver internal delay มีค่าความไม่แน่นอนเกิดขึ้น โดยค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากนาฬิกาอะตอมซีเซียม จะสามารถหาได้จากค่าเสถียรภาพความถี่ของนาฬิกาอะตอมซีเซียมซึ่งมีค่าอยู่ $6.3E-15$ วินาที การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากนาฬิกาอะตอมซีเซียม

$$u_{(Interpolation)} = \text{frequency stability}$$

(19)

โดยที่ *frequency stability* คือค่าเสถียรภาพความถี่ของนาฬิกาอะตอมซีเซียม

$$u_{(Interpolation)} = 6.3E - 15 \text{ วินาที}$$

4.5.9 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดเครื่องกระจายความถี่ (Distribution amplifier Uncertainty, $u_{(Amp)}$)

เครื่องกระจายความถี่เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอน ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดเครื่องกระจายความถี่จะคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิ และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่า stability ของเครื่องกระจายความถี่ ตามสมการที่ (20) โดยค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิจะมีค่าเท่ากับ $9.60648E-18$ วินาที และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่า stability ของเครื่องกระจายความถี่มีค่าเท่ากับ $3.00E-11$ วินาที

$$u_{(Amp)} = \sqrt{u_{temperature}^2 + u_{stability}^2}$$

(20)

โดยที่ $u_{temperature}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิ (วินาที)

$u_{stability}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่า stability ของเครื่องกระจายความถี่ (วินาที)



171797701

$$u_{(Amp)} = \sqrt{(9.60648E - 18)^2 + (3.00E - 11)^2}$$

$$u_{(Amp)} = 3E - 11 \text{ วินาที}$$

4.5.10 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากสายเคเบิล (Cable Uncertainty, $u_{(cable)}$)

สายเคเบิลที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอน ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากสายเคเบิลจะคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ, ค่าเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความยาวของสายเคเบิล ตามสมการที่ (21) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมามีค่าเท่ากับ $0.083E-12$ วินาที/เมตร/องศาเซลเซียส ค่าเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมามีค่าเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส และความยาวของสายเคเบิลเท่ากับ 30 เมตร

$$u_{(Cable)} = \frac{(Temperature\ Coefficient) \cdot (Temperature\ Variation) \cdot (Cable\ length)}{43200} \quad (21)$$

โดยที่ *Temperature Coefficient* คือค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (วินาที/เมตร/องศาเซลเซียส)

Temperature Variation คือค่าเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

Cable length คือความยาวของสายเคเบิล (เมตร)

$$u_{(Cable)} = \frac{(0.083E-12) \cdot (5.0) \cdot (30)}{43200}$$

$$u_{(Cable)} = 2.88194E - 16 \text{ วินาที}$$

4.5.11 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องนับเวลา (Counter Uncertainty, $u_{(counter)}$)

เครื่องนับเวลาเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอน ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องนับเวลาจะคำนวณได้จากค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิ, ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความละเอียดของเครื่องนับเวลา, ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความถูกต้องของเครื่องนับเวลา และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าการทำซ้ำของเครื่องนับเวลาตามสมการ (22) โดยค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมามีค่าเท่ากับ $2.31E-10$ วินาที ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความละเอียดของเครื่องนับเวลามีค่าเท่ากับ $2.89E-13$ วินาที ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความถูกต้องของเครื่องนับเวลามีค่าเท่ากับ $5.77E-13$ วินาที และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าการทำซ้ำของเครื่องนับเวลามีค่าเท่ากับ $4.59E-12$ วินาที



$$u_{(counter)} = 2\sqrt{u_{temperature}^2 + u_{resolution}^2 + u_{accuracy}^2 + u_{repeatability}^2}$$

(22)

โดยที่ $u_{temperature}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิ (วินาที)

$u_{resolution}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความละเอียดของเครื่องนับเวลา (วินาที)

$u_{accuracy}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความถูกต้องของเครื่องนับเวลา (วินาที)

$u_{repeatability}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าการทำซ้ำของเครื่องนับเวลา (วินาที)

$$u_{(counter)} = 2\sqrt{(2.31E - 10)^2 + (2.89E - 13)^2 + (5.77E - 13)^2 + (4.59E - 12)^2}$$

$$u_{(counter)} = 4.62E - 10 \text{ วินาที}$$

4.5.12 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ (Micro Stepper Uncertainty, $u_{(micro\ stepper)}$)

เครื่องปรับแก้เวลาและความถี่เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอน ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องปรับแก้เวลาและความถี่สามารถคำนวณได้จากค่าความละเอียดของความถี่ของเครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ตามสมการที่ (23) โดยค่าความละเอียดของความถี่ของเครื่องปรับแก้เวลาและความถี่มีค่าเท่ากับ $5.00E-19$ วินาที

$$u_{(micro\ stepper)} = frequency\ resolution$$

(23)

โดยที่ $frequency\ resolution$ คือ ค่าความละเอียดของความถี่ของเครื่องปรับแก้เวลาและความถี่ (วินาที)

$$u_{(micro\ stepper)} = 5E - 19 \text{ วินาที}$$

ค่า Uncertainty ทั้ง 12 ชนิดที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จะสรุปรวมได้ตามตารางที่ 4.4

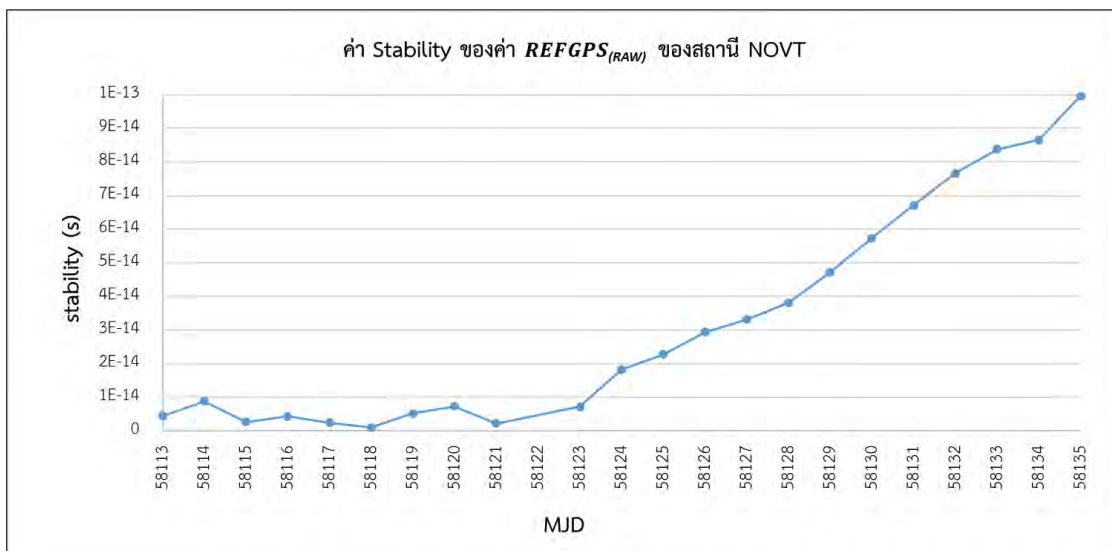
Source of Uncertainty	Value (sec)	Type
Carrier Phase Uncertainty	8.85722E-14	A
Ephemeris error Uncertainty	1.36497E-15	B
Antenna Coordinate Error Uncertainty	1.21155E-15	B
Multipath Uncertainty	2.34775E-14	B
UTC uncertainty	0.26E-15	B
Link Uncertainty	9.82093E-16	A
UTC(NMIT) Uncertainty	5.08917E-14	A
Interpolation Uncertainty	6.3E-15	A
Distribution amplifier Uncertainty	3E-11	B
Cable Uncertainty	2.88194E-16	B
Counter Uncertainty	4.62E-10	B
Micro Stepper Uncertainty	5.0E-19	B

ตารางที่ *Error! No text of specified style in document.* ค่า Uncertainty ทั้ง 12 ชนิดที่เกิดขึ้นในงานวิจัย

จากตารางที่ 4.4 สามารถค่าความไม่แน่นอนของเวลา (Uncertainty) ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีรากที่สองของผลรวมกำลังสอง (root-sum-of-squares: RSS) ขององค์ประกอบแต่ละชนิดจากตารางที่ 4.4 ตามสมการที่ (11) ได้ค่า Uncertainty เท่ากับ $4.63E-10$ วินาที หรือ 0.463 ns

4.6 ความเสถียรภาพ (Stability)

ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่า Stability ของค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT ($REFGPS_{(RAW)}$) ซึ่งแสดงถึงค่าความเสถียรภาพของนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยจะแสดงค่า Stability คำนวณเป็นรายวัน ตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.26 แสดงค่า Stability ของค่า clock offset ที่ยังไม่ขจัดค่าคลาดเคลื่อนของสถานี NOVT

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า กราฟมีความคงที่อยู่ในช่วง 11 วันแรก ซึ่งจะมีค่า ไม่เกิน 0.01 พิโควินาที จากนั้นจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่สุดท้ายของการรังวัด ซึ่งมีค่าต่ำสุดในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ.2560 (วันที่ 6) อยู่ที่ 0.00103 พิโควินาที และค่าสูงสุดในวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 (วันที่ 23) อยู่ที่ 0.0995928 พิโควินาที



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัย โดยแบ่งออกเป็นกรณี 3 กรณี ดังนี้ 1) สรุปผลการวิจัย 2) ประโยชน์ที่ได้รับ และ 3) ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่า *INT DLY* ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 (NOVT) ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) โดยใช้โปรแกรม Bernese GNSS Software ระยะเวลา 23 วัน ตั้งแต่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2560 ถึงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 จากการประมวลผล ได้ค่า *INT DLY* = 316.07 ns และทำการคำนวณเป็นรายวัน ได้ค่า *INT DLY* ต่ำสุดอยู่ที่ 309.87 ns ในวันที่ 10 มกราคม พ.ศ.2561 และค่าสูงสุดอยู่ที่ 326.42 ns ในวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ.2560

ในการคำนวณหาค่า Uncertainty ตามมาตรฐานแล้วการเทียบเวลาโดยวิธี GPS Common view จะทำให้ค่า Uncertainty น้อยกว่า 5 ns ซึ่งในการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่า Uncertainty ได้จากการหาค่า *INT DLY* แล้วมีค่าลดลงเหลือ 0.463 ns จากเดิมที่ยังไม่มีการหาค่า *INT DLY* ซึ่งมีค่า Uncertainty อยู่ที่ 20 ns ทำให้ผลที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน

จากความสัมพันธ์ของค่า *INT DLY* และค่า Stability ซึ่งแสดงผลเป็นรายวัน จะเห็นว่าไม่ได้มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญกัน แต่ในการคำนวณหาค่า Stability จะเห็นว่า *REFGPS*_(RAW) มีค่า Stability ต่ำกว่า 0.01 พิโควินาที ในช่วง 11 วันแรก โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ.2560 (วันที่ 6) อยู่ที่ 0.00103 พิโควินาที และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหลังจากวันที่ 11 โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2561 (วันที่ 23) อยู่ที่ 0.0995928 พิโควินาที แสดงให้เห็นถึงลักษณะของนาฬิกาอะตอมซีเซียมที่เป็นไปตามงานวิจัยของ (Lombardi & Lombardi, 2001) ว่าโดยทั่วไปแล้วนาฬิกาอะตอมซีเซียมจะให้ค่า Stability ในช่วงประมาณสัปดาห์แรกจะน้อยกว่า 0.01 พิโควินาที และจะเริ่มเพิ่มขึ้นหลังจากนั้น แต่จะไม่เกิน 5 พิโควินาที

จากการวิจัยในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่า Stability ของ $REFGPS_{(RAW)}$ ของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 ที่เชื่อมต่อเข้ากับนาฬิกาอะตอมซีเซียมจะมีค่าที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ สัปดาห์แรก สังเกตได้จากรูปที่ 4.4 ดังนั้นแล้วในการหาค่า Receiver Internal Delay สำหรับเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่เชื่อมต่อเข้ากับนาฬิกาอะตอมซีเซียมนั้น ไม่จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเป็นระยะเวลายาว การใช้ข้อมูลเพียง 1 สัปดาห์ก็เพียงพอต่อการหาค่า Receiver Internal Delay

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่า Receiver Internal Delay ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณประเภทฮิโอดเทติกส์ ทำให้สามารถใช้เป็นตัวอ้างอิงในงานเทียบเวลาโดยใช้เครื่องรับสัญญาณประเภทฮิโอดเทติกส์ให้มีความแม่นยำขึ้น บ่งบอกถึงขีดความสามารถในการใช้งานด้านการถ่ายทอดเวลา และเทียบเวลา ตัวอย่างเช่น การเทียบเวลาภายในบริษัทต่างๆ การเทียบเวลาในตลาดหุ้นทั่วโลก การสื่อสารโทรคมนาคม การถ่ายทอดเวลาภายในประเทศผ่านทางระบบสื่อสาร เช่น คอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น และเป็นตัวอย่างสำหรับการหาค่า Receiver Internal Delay ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งใช้ในงานเทียบเวลาภายในประเทศไทย

5.3 ข้อเสนอแนะ

ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือใช้เทียบเวลา สามารถรับข้อมูลได้จากข้อมูลชุดเดรนจ์เท่านั้น และจากงานวิจัยจะเห็นว่าการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงซึ่งใช้ข้อมูลจากเฟสของคลื่นสูงมีคุณภาพมากกว่าข้อมูลชุดเดรนจ์ ดังนั้นการศึกษาวิจัยควรใช้เครื่องรับสัญญาณประเภทฮิโอดเทติกส์แบบสองความถี่เป็นตัวที่ใช้เทียบเวลา


งานวิจัยทำการหาค่า Receiver Internal Delay ภายในเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Novatel ProPak6 ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงเท่านั้น ในงานวิจัยควรมีการศึกษาค่า Receiver Internal Delay บนสัญญาณที่แตกต่างกัน หรือใช้วิธีการที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ตัวเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบค่า Receiver Internal Delay และค่า Uncertainty ที่ได้รับ



1717917101

CU IThesis 5970154721 thesis / recv: 22072562 19:19:15 / seq: 12

บรรณานุกรม

 CT IThesis 5970154721 thesis / recv: 22072562 19:19:15 / seq: 12
1717917101

- Dach Rolf, W. P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Astronomical Institute, University of Bern.
- Dow, J. M., Neilan, R. E., & Rizos, C. (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83(3), 191-198. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3>. doi:10.1007/s00190-008-0300-3
- Elwischger, B., Thoelet, S., Suess, M., & Furthner, J. (2013). *Absolute calibration of dual frequency timing receivers for Galileo*. Paper presented at the European Navigation Conference (ENC), Vienna.
- Gertsvolf, M. (2017). Frequency Transfer Study using GPS and PPP from Multiple Receivers. *32nd URSI GASS, Montreal*.
- Gotho, T., Kaneko, A., Shibuya, Y., & Imae, M. (2003). 4-2 GPS Common View. *The National Institute of Information and Communications Technology* 50.
- Huang, Y. J. (2017). GPS calibration of NIMT, NMLS and VMI equipment with respect to TL G1 (1013-2017). *BIPM Report*, 1.
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS solutions*, 5(2), 12-28.
- Lewandowski, W., Azoubib, J., & Klepczynski, W. J. (1999). GPS: Primary tool for time transfer. *Proceedings of the IEEE*, 87(1), 163-172.
- Lombardi, M. A., & Lombardi, M. A. (2001). *NIST Frequency Measurement and Analysis System: Operator's Manual*: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- NICT. (2011). Guideline of Uncertainty Calculation Document Service category 2.1.1. Retrieved from http://www.apmpweb.org/fms/get_file.php?index=MTcxMw==
- NICT. (2012). Guideline of Uncertainty Calculation Document Service category 2.2.1. Retrieved from www.apmpweb.org/fms/get_file.php?index=MTcxOA==
- Niessner, A., Mache, W., Blanzano, B., Koudelka, O., Becker, J., Piester, D., . . . Arias, F. (2008). *Calibration of the BEV GPS receiver by using TWSTFT*. Retrieved from 40th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting
- NovAtel. (2011, April 2011). ProPak-V3TM. 5. Retrieved from <https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/ProPakV3.pdf>

- Precise Time and Frequency, I. (2000). Distribution Amplifiers with Remote Monitor/Control (ptf 1203C-MC, 1204A-MC, 1205A-MC) Operation and Maintenance Manual
- Taylor, B. N., & Kuyatt, C. E. (1994). Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results.
- TheBIPM. (2017). *BIPM Annual Report on Time Activities* (Vol. 12): Pavillon de Breteuil F-92312 SÈVRES Cedex France
- TheBIPM. (2018). *Explanatory supplement to BIPM Circular T* BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
- Yan Ying, L. (2015). GNSS based time transfer. *6th CSA-IAA Conference on Advanced Space Technology*(10-Nov-2015). Retrieved from <http://oar.a-star.edu.sg:80/jspui/handle/123456789/2126>.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ร้อยโท ณิชปัทม์ โพธิ์กูรคุปตรักษ์
วัน เดือน ปี เกิด	11 มีนาคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ที่อยู่ปัจจุบัน	610 ซ.ท่าดินแดง 16 ถ.ท่าดินแดง แขวงคลองสาน เขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร
ผลงานตีพิมพ์	Pothikunkupatarak, N., Thongtan, T., & Satirapod, C. (2018) Estimation of GNSS receiver internal delay using Precise Point Positioning algorithm. The 23rd National Convention on Civil Engineering, Nakhon Nayok, 2018.