

การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งจากจีเอ็นเอสเอสในการถ่ายทอดเวลาด้วยวิธีการรังวัดจุดเดียว  
ความละเอียดสูง



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

Evaluation of GNSS positioning accuracy in time transfer using

Precise Point Positioning Technique

Mr. Pawit Tirawanichakul



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

การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งจากจีเอ็นเอสเอสในการถ่ายถอดเวลาด้วยวิธีการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง

โดย

นายปวิตร ภูริระวิชย์กุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรเพชญ์ ชี้อินธิไพศาล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน)

ปวิตร ภูริระวณิชกุล : การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งจากจีเอ็นเอสเอสในการถ่ายทอดเวลาด้วยวิธีการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Evaluation of GNSS positioning accuracy in time transfer using Precise Point Positioning Technique) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 106 หน้า.

ดาวเทียมนำทางแต่ละเครื่องจะมีระบบเวลาเป็นส่วนของตัวเอง ส่วนของการประมวลผลค่าความแตกต่างพิกัดและเวลาความถูกต้องสูงของเวลาระบบและเวลาที่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนำทาง ใช้การประมวลผลที่ตัวเครื่องรับสัญญาณ งานวิจัยนี้เป็นการตรวจรับสัญญาณเวลาจากระบบดาวเทียมนำทางหลายระบบด้วยเครื่องรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับมาตรเวลาที่รักษาเป็นอย่างดีด้วยนาฬิกาอะตอมซีเซียมสมรรถนะสูงและเครื่องรับสัญญาณที่ใช้งานจากนาฬิกาที่อยู่ภายในเครื่อง การประมวลผลครั้งนี้เป็นการหาค่าพิกัดและค่าความแตกต่างของเวลาที่เครื่องรับสัญญาณเทียบกับเวลาระบบ อันประกอบด้วย เวลาระบบของระบบดาวเทียมนำทาง จีพีเอส โกลนาส และ เปย์โต่ว กระบวนการประมวลผลเป็นการกำหนดพิกัดรังวัดจุดเดี่ยวความแม่นยำสูงแบบสถิติ ด้วยโปรแกรมประมวลผลชื่อ แพนด้า ที่พัฒนาโดยศูนย์วิจัยระบบดาวเทียมนำทาง ของมหาวิทยาลัยวูฮั่น

การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหาค่าความแตกต่างของเวลาของระบบดาวเทียมนำทางแต่ละระบบ รวมถึง การหาจุดซ้ำซ้อนในระบบที่มีอยู่หลายแง่มุม วัตถุประสงค์คือการหาค่าพิกัดและค่าเวลาที่เครื่องรับสัญญาณเวลาภาคพื้นดิน โดยทำการวัดอย่างมีคุณภาพในเชิงสถิติ ทั้งในแง่ ค่าความถูกต้อง และ ค่าความแม่นยำ ผลจากการวิจัยครั้งนี้พบว่าค่าความถูกต้องของค่าพิกัดของข้อมูลการตรวจรับสัญญาณจากเครื่องรับสัญญาณที่อาศัยนาฬิกาภายในเครื่องรับและนอกเครื่องรับสัญญาณไม่ได้แสดงผลที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (2 ถึง 5 เซนติเมตร) แม้เมื่อเปลี่ยนเวลาระบบอ้างอิงเป็น เวลาของระบบดาวเทียมนำทาง จีพีเอส โกลนาส หรือ เปย์โต่ว ค่าเวลาของเวลาระบบดาวเทียม เปย์โต่ว มีค่าดีที่สุด ( $-1.76 \times 10^{-8}$  วินาที) ทั้งนี้เป็นเพราะระบบดาวเทียม เปย์โต่ว ติดตั้งนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ที่มีความแม่นยำ ( $1 \times 10^{-15}$  วินาทีต่อวินาที) และมีเสถียรภาพสูง ( $1 \times 10^{-16}$  ที่ 1 วัน) . ในด้านความถูกต้องแม่นยำ ระบบจีพีเอสมีค่าความแม่นยำสูง (0.25 ถึง 0.40 มิลลิเมตร) ซึ่งระบบดาวเทียมนำทาง โกลนาสและ เปย์โต่วไม่สามารถบ่งชี้จุดแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในขณะทำการวิจัย (0.3 ถึง 1 มิลลิเมตร) จุดนี้สามารถนำมาวิจัยเพิ่มเติมในระบบอ้างอิงเวลาของสถานีภาคพื้นดิน

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5770577321 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: SYSTEM TIME / TIME TRANSFER / CLOCK COMPARISON / PPP

PAWIT TIRAWANICHAKUL: Evaluation of GNSS positioning accuracy in time transfer using Precise Point Positioning Technique. ADVISOR: PROF. DR.CHALERMCHON SATIRAPOD, 106 pp.

Each navigation satellite operates its own system time. In precise positioning and timing determination, the time differences between each system time shall be determined at the receiver end. This research observed multi-GNSS signals from a receiver equipped with a well-kept time scale using a high performance caesium frequency standard and a receiver operated based on its internal oscillator. The positioning and receiver clock offsets are determined varied on difference time scales including GPS, GLONASS and BeiDou system time. The computation concept is static Precise Point Positioning (PPP) using PANDA software developed by GNSS research centre Wuhan University.

This research is aimed to determine the time offsets of each satellite constellations as well as its system redundancy in many aspects. Objectives are to determine positioning and timing results at the ground receivers, where their qualities are measured statistically in terms of accuracy and precision. The results show that the positioning accuracy of observation data based on its internal oscillator and external clock do not show a significant (2 to 5 millimeter) differences when thereference time scales are altered to GPS, GLONASS nor BeiDou system times. It was found that the BeiDou system time were the most accurate ( $-1.76 \times 10^{-8}$  second), in comparison to GPS or GLONASS system time scales. This is because of BeiDou satellite contains a high accuracy ( $1 \times 10^{-15}$  second) and stability ( $1 \times 10^{-16}$  at 1 day) of the satellite clocks, hydrogen maser. In term of precisions, the GPS system is highly precise where GLONASS and BeiDou system time could not distinguish the differences significantly during this experiment.

Department: Survey Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจากหลายบุคคล โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวคิด ความรู้ รวมไปถึงคำปรึกษาที่มีประโยชน์ในการทำงานวิจัย รวมไปถึงจัดหาเครื่องรับสัญญาณ GNSS และโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA (Position and Navigation Data Analyst) จนสามารถทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่สนับสนุนร่างกาย แรงใจ และแรงทรัพย์ ซึ่งทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จจนด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สรรเพชญ์ ชื่อนิติไพศาล ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำติชม รวมไปถึงแนวคิดที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ได้สละเวลาเป็นกรรมการภายนอก คอยชี้แนะแนวทาง คอยช่วยเหลือ และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่เพื่อทำการติดตั้งเครื่องมือ และสามารถดำเนินงานได้ตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ กรมที่ดิน ที่อนุเคราะห์เครื่องมือรับสัญญาณ GNSS จำนวน 2 เครื่อง เพื่อนำมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจที่คอยเป็นกำลังใจในการดำเนินงานให้บรรลุตามเป้าหมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายชัยพร กิจประชา และขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอก นายชัยยุทธ เจริญผล ที่คอยช่วยเหลือ แนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาอย่างสุดความสามารถ จนวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
คำย่อ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.3.1 ขอบเขตของเนื้อหาที่ศึกษา.....	3
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ที่ศึกษา.....	3
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	4
1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2.1 ระบบดาวเทียมนำทาง Global Navigation Satellite System (GNSS).....	18
2.2.2 มาตรฐานความถี่ (Frequency Standards).....	18
2.2.3 เวลาระบบ (System Time).....	21
2.2.4 การประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP).....	23

2.2.5 เวลาระบบของดาวเทียม .....	24
ดาวเทียมแต่ละดวงในระบบ GNSS มีเวลาระบบ .....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	26
3.1 การรับสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS .....	26
3.2 รายละเอียดการประมวลผล .....	26
3.3 การใช้งานโปรแกรม Convert to RINEX .....	27
3.4 รายละเอียดข้อมูลข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง .....	27
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	28
บทที่ 4 ผลการศึกษา .....	30
4.1 ค่าพิกักระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou .....	31
4.1.1 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ GLONASS .....	31
4.1.1.1 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	31
4.1.1.2 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ .....	34
4.1.2 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ BeiDou .....	36
4.1.2.1 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	36
4.1.2.2 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ .....	38
4.1.3 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GLONASS และ BeiDou .....	41
4.1.3.1 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	41
4.1.3.2 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ .....	43
4.1.4 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou .....	46
4.1.4.1 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	46
4.1.4.2 ข้อมูลค่าพิกักระหว่างเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน .....	49
4.2 ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกักระหว่างเวลา .....	52



4.2.1	เวลาระบบ GPS.....	52
4.2.1.1	เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม.....	52
4.2.1.2	เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ.....	53
4.2.2	เวลาระบบ GLONASS .....	54
4.2.2.1	เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม.....	54
4.2.2.2	เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน.....	55
4.2.3	เวลาระบบ BeiDou.....	56
4.2.3.1	เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม.....	56
4.2.3.2	เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ.....	57
4.3	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิคัดของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou.....	58
4.3.1	ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ GLONASS .....	58
4.3.1.1	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม.....	58
4.3.1.2	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน.....	61
4.3.2	ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ BeiDou.....	63
4.3.2.1	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม.....	63
4.3.2.2	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน.....	66
4.3.3	ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GLONASS และ BeiDou.....	69
4.3.3.1	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม.....	69
4.3.3.2	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน.....	72
4.3.4	ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou.....	75

4.3.4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอม ซีเซียม .....	75
4.3.4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน ....	79
4.4 ค่าเวลาของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou .....	85
4.4.1 ข้อมูลค่าเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	85
4.4.2 ข้อมูลค่าเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน .....	86
4.5 ค่าความถูกต้องของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou.....	88
4.5.1 เวลาระบบ GPS.....	88
4.5.1.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	88
4.5.1.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน.....	89
4.5.2 เวลาระบบ GLONASS .....	90
4.5.2.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	90
4.5.2.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน.....	90
4.5.3 เวลาระบบ BeiDou.....	91
4.6.3.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม .....	91
4.6.3.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน.....	92
4.6 ค่าต่างระหว่างเวลาของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกา ภายในเครื่องรับสัญญาณ.....	93
4.7 ค่าเวลาของสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ และค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วย โปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA .....	94
4.7.1 เวลาระบบ GPS.....	94
4.7.1.1 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับ สัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียมเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่ง ตวงวัดระหว่างประเทศ.....	94

4.7.1.2 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับ สัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัด ระหว่างประเทศ .....	96
4.7.2 เวลาระบบ GLONASS .....	97
4.7.2.1 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับ สัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่ง ตวงวัดระหว่างประเทศ.....	97
4.7.1.2 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับ สัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัด ระหว่างประเทศ .....	98
บทที่ 5 สรุปการศึกษา.....	99
5.1 อภิปรายผลการดำเนินงาน.....	99
5.1.1 ผลการศึกษาค่าพิกัระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูล จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายในเครื่องรับ สัญญาณ.....	99
5.1.2 ผลการศึกษาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และ นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ.....	100
5.1.3 ผลการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และ นาฬิกาภายใน.....	100
5.1.4 ผลการศึกษาค่าเวลา ความถูกต้องของค่าเวลาระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และ นาฬิกาภายใน.....	101
5.1.5 ผลการศึกษาค่าเวลา เทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ ระหว่างเวลาระบบ GPS และ GLONASS ด้วยข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับ นาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายใน .....	101

5.2 สรุปผล .....	101
5.3 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ .....	102
5.4 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	102
รายการอ้างอิง.....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	106



## คำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
BDT	BeiDou system time	เวลาระบบ BeiDou
BIPM	International Bureau of Weights and Measures	สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ
CDDIS	The Crustal Dynamics Data Information System	สถานีให้บริการข้อมูลดาวเทียมทั่วโลก
CODE	Center for Orbit Determination in Europe	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
ECEF	Earth Center Earth Fixed Coordinates	ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ 3 มิติ
EMR	Natural Resources Canada	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
ESOC	European Space Operations Center	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
GNSS	Global Navigation Satellite Systems	ระบบดาวเทียมนำทาง
GOP-RIGTC	Geodetic Observatory Pecny	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
GPST	GPS system time	เวลาระบบ GPS
GRG	Space geodesy team of the CNES	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
IGS	International GNSS Service	หน่วยงานให้บริการข้อมูลการประมวลผลค่าวงโคจร และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
JPL	Jet Propulsion Laboratory	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
MIT	Massachusetts Institute of Technology	หนึ่งในสถานีให้บริการข้อมูลจากหน่วยงาน IGS ที่ให้บริการข้อมูลวงโคจรและค่าเวลาที่ความถูกต้องสูง
NGS	NOAA/National Geodetic Survey	หนึ่งในสถานีข้อมูลสถานีจากหน่วยงาน IGS ที่บริการข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง
NTSC	The National Time Service Center	สถานีจากหน่วยงาน IGS ที่บริการข้อมูลวงโคจร และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง
PANDA	Position and Navigation Data Analyst	โปรแกรมประยุกต์สำหรับประมวลผล GNSS แบบ PPP เชิงวิจัย ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยวู่ฮั่น ประเทศจีน
PPP	Precise Point Positioning	ค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง
RINEX	Receiver Independent Exchange Format	รูปแบบไฟล์มาตรฐานที่แปลงจากข้อมูลดิบที่รับวัดได้
RMS	Root Mean Square	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง
SD	Standard Deviation	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
TAI	Time International Atomic	เวลาอะตอมสากล
UTC	Coordinated Universal Time	เวลาสากลเชิงพิกัด
UTC(NIMT)	Coordinated Universal Time (National Institute of Metrology (Thailand))	เวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
UTM	Universal Transvers Mercator	ระบบพิกัดฉาก

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบดาวเทียมนำทาง (Global Navigation Satellite System, GNSS) เป็นระบบที่ให้ข้อมูลเพื่อหาค่าพิกัดบนพื้นผิวโลก โดยมีความสามารถในบ่งชี้สถานที่หรือนำทาง GNSS ทำหน้าที่ให้ข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียม ค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม (Satellite clock correction) ค่าแก้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าพิกัดบนพื้นผิวโลก โดยใช้อุปกรณ์ตัวรับสัญญาณเพื่อคำนวณและแสดงพิกัดตำแหน่ง ณ จุดที่ตัวรับสัญญาณตั้งอยู่บนพื้นผิวโลก (ArthitOnline, 2012) ระบบ GNSS นั้นมีหลายระบบตามแต่การพัฒนาขึ้นมา ยกตัวอย่างเช่น สหรัฐอเมริกา คือ ระบบ Global Positioning System (GPS) หรือที่เรียกทับศัพท์ว่าระบบ จีพีเอส (GPS) ระบบ Global Navigation Satellite System (GLONASS) ของสหภาพโซเวียตเดิมหรือรัสเซียในปัจจุบัน ระบบดาวเทียม Galileo ที่จัดทำโดยสหภาพยุโรป (European Union) และระบบดาวเทียมนำทางของจีนที่ชื่อว่า BeiDou

หนึ่งในส่วนประกอบหลักของ GNSS คือ ส่วนอวกาศ (Space segment) การระบุตำแหน่งทำได้โดยการรับสัญญาณจากดาวเทียม สัญญาณดาวเทียมที่ส่งมา เมื่อส่งกลับมายังตัวรับสัญญาณภาคพื้นดินจะทำการประมวลผลด้วยการเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลาที่ได้รับข้อมูลกับเวลาจริง โดยที่ในตัวดาวเทียมแต่ละดวงจะมีนาฬิกาที่ใช้ระบุเวลานั้นก็คือ นาฬิกาอะตอม นาฬิกาอะตอมที่ใช้ในตัวดาวเทียมประกอบไปด้วยนาฬิกาอะตอมซีเซียม นาฬิกาอะตอมรูบิเดียม และนาฬิกาไฮโดรเจนเมเซอร์ในดาวเทียมแต่ละดวงจะมีจำนวนของนาฬิกาอะตอมไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับการออกแบบและพัฒนาขึ้นมา เวลาในการส่งสัญญาณจากดาวเทียมจะมีความสัมพันธ์กับเวลาระบบ เวลาระบบมีหลายรูปแบบ ไม่ได้มีเพียงเวลาระบบของ GPS เท่านั้น แต่ยังมีเวลาระบบอื่นๆ ได้แก่ เวลาระบบของ GLONASS เวลาระบบของ Galileo และเวลาระบบของ BeiDou เป็นต้น แต่ถึงจะมีหลากหลายเวลาระบบ ก็ยังต้องยึดเวลาระบบ GPS เป็นหลัก เนื่องจากเวลาระบบของ GPS เป็นเวลาระบบสากล (Universal Time) ในทุกๆ อุปกรณ์ หรือแม้กระทั่งโปรแกรมที่นำข้อมูลเข้าเพื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่รับข้อมูลจากภาคสนาม อย่างไรก็ตามหากคิดว่าในอนาคตข้างหน้า เวลาระบบของ GPS ปิดตัวลงหรือเกิดความผิดพลาดจนไม่สามารถใช้งานได้อย่างเสถียรที่เพียงพอ จะมีอะไรมาทดแทนเวลาระบบของ GPS ซึ่งเป็นเสมือนหัวใจหลักของการหาตำแหน่งบนพื้นผิวโลก ซึ่งประเด็นปัญหาเหล่านี้เป็นเรื่องที่น่าสนใจและควรมีการพัฒนาเวลาระบบของระบบนำทางอื่น ๆ เข้ามาทดแทน

ข้อมูลที่ได้รับจากสัญญาณดาวเทียมที่ส่งมา ปกติมักมีหน่วยของเวลาเป็นหน่วยเทียบเท่ากับหน่วยเวลาสากลตามโซนหรือกลุ่มละติจูดของตำแหน่งบนพื้นผิวโลก หรือที่เรียกว่า เวลา UTC (Coordinated Universal Time, UTC) ซึ่ง UTC หมายถึงเวลาที่ท้องถิ่นของพื้นที่นั้นๆ และยังเป็นตัวกลางในการแปลงเวลาให้อยู่ในรูปของเวลาระบบต่าง ๆ (HS7WMMU, 2012) UTC เป็นหน่วยเวลาที่

พัฒนามาจากหน่วยเวลา TAI (International Atomic Time) ด้วยวิธีการที่เพิ่ม-ลดวินาที (Leap second) ซึ่ง TAI ได้กำเนิดมาจากนาฬิกาอะตอมที่มีความถูกต้องสูง (ระดับนาโนวินาที) โดยมีการใช้ข้อมูลจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมมากกว่า 400 เครื่อง

เวลาที่ใช้ในปัจจุบันเป็นระบบ UTC ไม่ว่าจะในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในคอมพิวเตอร์ หรือแม้กระทั่งในระบบนำทางต่าง ซึ่งในแต่ละด้านต้องการความถูกต้อง และความแม่นยำต่างกัน เช่น ในด้านการนำทาง (ค่าความถูกต้อง 5-10 เมตร) การตรวจสอบตำแหน่งที่อยู่บนพื้นโลก (ความถูกต้อง 2 เซนติเมตร) รวมไปถึงการตรวจสอบสถานที่โดยทั่วไปต้องการความถูกต้องและแม่นยำระดับ 20-30 เมตร แต่สำหรับงานด้านวิศวกรรมสำรวจหรือในด้านที่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูง (ความถูกต้องระดับ 5 มิลลิเมตร) จำเป็นต้องรู้ค่าความละเอียดที่แน่นอนกว่าการใช้งานทั่วไป ดังนั้น การหาค่าพิกัดในเวลาระบบอื่นๆ นอกจากเวลาระบบของ GPS จะให้ค่าความถูกต้อง และความแม่นยำมาน้อยแค่ไหนในการใช้อ้างอิงแทนเวลาระบบของ GPS และค่าเวลาจะมีความแตกต่างกันอย่างไรเป็นสิ่งที่น่าสนใจและท้าทายการทำงานวิจัยด้านนี้

สำหรับการเปรียบเทียบเวลาระหว่างเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่องทำได้โดยการถ่ายโอนเวลา หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า time transfer มีความหมายดังนี้ คือ การเปรียบเทียบนาฬิกาที่ให้ข้อมูลในการคำนวณเวลาของเวลามาตรฐานสากล (International Atomic Time : TAI) โดยใช้ระบบดาวเทียม GNSS และ TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) โดยระบบ GNSS ใช้ระบบดาวเทียมนำทาง แต่ TWSTFT ใช้ระบบดาวเทียมสื่อสารซึ่งมีข้อเสียเปรียบคือต้องเข้าช่องสัญญาณ มีราคาแพง และมีความครอบคลุมน้อย แต่ดาวเทียมนำทางมีความครอบคลุม และไม่ต้องเข้าช่องสัญญาณ จึงทำให้เลือกใช้ระบบดาวเทียม GNSS ความจำเป็นสำหรับการเปรียบเทียบเวลาระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และเครื่องรับสัญญาณที่ไม่ได้อ่านนาฬิกาอะตอมซีเซียม เนื่องจากการอ่านนาฬิกาอะตอมจะได้ค่าความถูกต้องอยู่ในระดับ  $\pm 5 \times 10^{-13}$  เมตร และความเสถียรอยู่ในระดับ  $\leq 5 \times 10^{-15}$  เมตร

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประมวลผลเวลาระบบของ ดาวเทียมในระบบ GNSS เปรียบเทียบกับเวลาระบบ GPS ว่ามีค่าความแตกต่างระหว่างเวลา (Clock Offset) ความถูกต้อง (Accuracy) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของเวลาระบบ GPS GLONASS และเวลาระบบ BeiDou อย่างไร ซึ่งแบ่งออกเป็นเวลาของดาวเทียมทั้ง 3 ระบบ และค่าเวลาของเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 เครื่อง มีความแตกต่างกันมากแค่ไหน แล้วนำมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ได้แก่ ค่าพิกัด ค่าเวลา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียม มีผลต่องานด้านวิศวกรรมสำรวจอย่างไรบ้าง ซึ่งใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบ Geodetic ซึ่งให้ค่าความถูกต้องระดับ  $\pm 5 \times 10^{-13}$  เมตร และความเสถียรอยู่ในระดับ  $\leq 5 \times 10^{-15}$  เมตร โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่มาตรฐานจากภายนอก (External frequency standard) คือสัญญาณความถี่ 10 MHz จากนาฬิกาอะตอมซีเซียม (Cesium Frequency standard) โดยใช้วิธีการรังวัดด้วยจุดเดียวความ



ละเอียดสูงแบบสถิตย์ (Static PPP) โดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัยที่ชื่อ Position and Navigation Data Analyst (PANDA) ของ GNSS research center ของมหาวิทยาลัยวู่ฮั่น ประเทศจีน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบค่าพิกัด ค่าเวลา ค่าความถูกต้องเวลาระบบต่างๆ ในเวลาระบบของ GNSS ได้แก่ เวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเวลาระบบต่างๆ จากการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (Static PPP) ได้แก่ ค่าพิกัดของแต่ละเวลาระบบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่เวลาระบบต่างๆ ค่าต่างระหว่างเวลา (clock offset)

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

### 1.3.1 ขอบเขตของเนื้อหาที่ศึกษา

1.3.1.1 การวิเคราะห์ความแตกต่างของเวลาระบบ GPS GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ทั้งหมด 3 ระบบ โดยหาค่าพิกัดในแนวแกน  $x y z$  ค่าเวลา ค่าต่างระหว่างนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ ค่าเวลาของเวลาระบบทั้ง 3 เวลาระบบ

1.3.1.2 ข้อมูลประเภทนาฬิกาอะตอมที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้จะเป็นนาฬิกาอะตอมแบบซีเซียม (Caesium atomic clock) ที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และนาฬิกาอะตอมบนดาวเทียมทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ เวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ซึ่งแต่ละดาวเทียมจะมีนาฬิกาอะตอมที่แตกต่างกันออกไป แต่นาฬิกาอะตอมมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ นาฬิกาอะตอมซีเซียม นาฬิกาอะตอมรูบิเดียม และนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ จากที่กล่าวมา ดาวเทียมในระบบ GNSS จะประกอบไปด้วยนาฬิกาอะตอมเหล่านี้แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ขึ้นอยู่กับประเทศที่ทำการส่งดาวเทียมขึ้นไปว่าดาวเทียมแต่ละดวงนั้นมีนาฬิกาอะตอมชนิดใดอยู่บ้าง

1.3.1.3 การประมวลผลทางตำแหน่งจะทำการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงโดยรังวัดแบบสถิตย์ (Static PPP)

1.3.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของเวลาระบบทั้ง 3 เวลาระบบ ได้แก่ เวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ความแตกต่างระหว่างค่าพิกัด ค่าความแตกต่างระหว่างเวลา และค่าความถูกต้องของค่าพิกัดสำหรับเวลาระบบทั้ง 3 ระบบ

### 1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ที่ศึกษา

ในการวิจัยครั้งนี้จะทำการรับสัญญาณในระบบ GNSS โดยการรังวัดเก็บข้อมูลที่ดาดฟ้าของอาคารผดุงมาตรฐาน สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เป็นระยะเวลา 27 วัน ตั้งแต่วันที่ 27 มกราคม 2559 ถึง 23 กุมภาพันธ์ 2559

### 1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.3.3.1 งานวิจัยชิ้นนี้ใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS รุ่น Trimble NetR9 จำนวน 2 เครื่อง ที่ทำการรับสัญญาณที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ทำการรับสัญญาณเป็นระยะเวลา 1 เดือน ซึ่งจะให้ข้อมูลออกมาอยู่ในรูปแบบไฟล์ RINEX มาตรฐาน (.t02)

1.3.3.2 ข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง IGS (International GNSS Service) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ของ CDDIS (The Crustal Dynamics Data Information System) ซึ่งมีสถานีประมวลผล (Analysis Center) ทั้งหมด 12 สถานีประมวลผล ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายชื่อศูนย์ประมวลผลที่ให้บริการข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงของ IGS (IGS, 2016)

สถาบัน	อักษรย่อ	ประเทศ
Natural Resources Canada	EMR	Canada
Wuhan University	WHU	China
Geodetic Observatory Pecny	GOP-RIGTC	Czech Republic
Space geodesy team of the CNES	GRG	France
European Space Operations Center	ESOC	Germany
GeoForschungsZentrum Potsdam	GFZ	Germany
Center for Orbit Determination in Europe	CODE	Switzerland
Jet Propulsion Laboratory	JPL	USA
Massachusetts Institute of Technology	MIT	USA
NOAA/National Geodetic Survey	NGS	USA
Scripps Institution of Oceanography	SIO	USA
U.S. Naval Observatory	USNO	USA

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้สามารถใช้ข้อมูลจากศูนย์ประมวลผลทั้งหมด 3 ศูนย์ประมวลผล ได้แก่ CODE, GFZ และ WHU โดยทางผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงของ IGS จากศูนย์ประมวลผล CODE เหตุผลที่เลือกใช้ข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงของสถานี CODE เนื่องจากข้อมูลศูนย์ประมวลผล WHU ไม่สามารถนำมาประมวลผลให้ตรงกับข้อมูลที่ทำการรังวัดมาได้ จึงได้เลือกใช้ข้อมูล CODE แทนข้อมูลจากศูนย์ประมวลผล WHU

### 1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย

1.3.4.1 โปรแกรม Convert to RINEX เป็นโปรแกรมแปลงไฟล์จากข้อมูลดิบที่ทำการรังวัดมาจากภาคสนามไปเป็นไฟล์มาตรฐานพร้อมใช้งาน ซึ่งโปรแกรม Convert to RINEX สามารถแปลงไฟล์ข้อมูลให้ออกมาในรูปแบบไฟล์ Observation รวมไปถึงข้อมูลของไฟล์ broadcast ที่รังวัดมาจากภาคสนามได้อีกด้วย

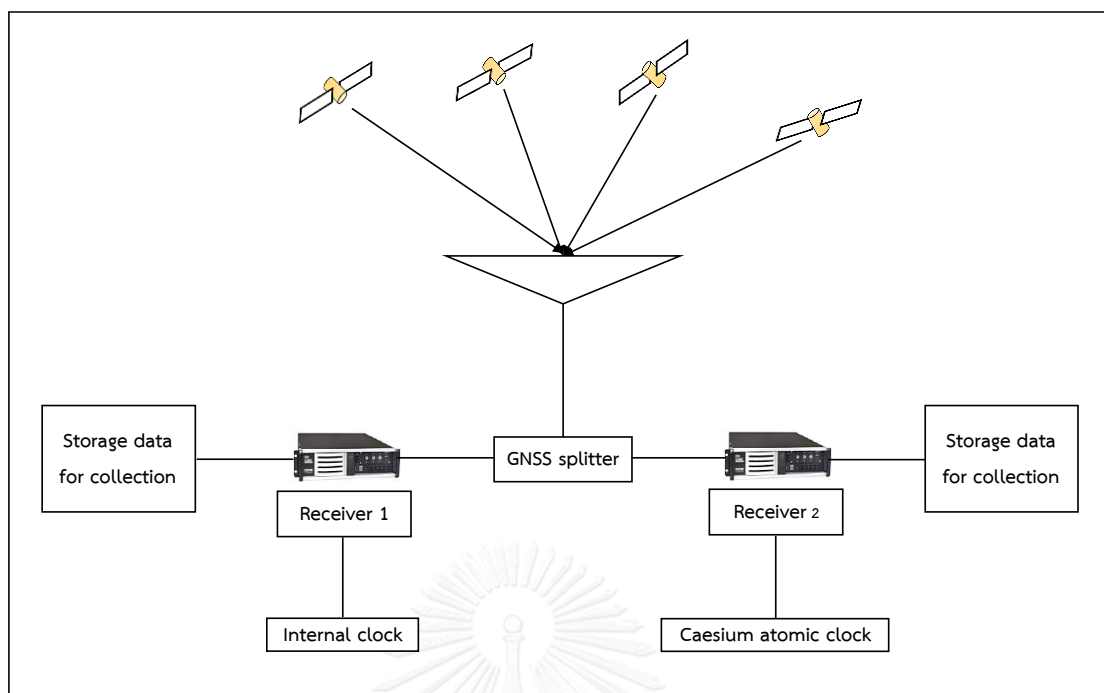
1.3.4.2 โปรแกรมประยุกต์สำหรับประมวลผล GNSS แบบ PPP เชิงวิจัย Position and Navigation Data Analyst (PANDA) เป็นโปรแกรมที่ทางมหาวิทยาลัยวูฮั่น ประเทศจีนสร้างขึ้น และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีการประมวลผลแบบการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูงที่สามารถทำได้ทั้งแบบสถิตย์ (Static PPP) และแบบจลน์ (Kinematic PPP) และโปรแกรมยังรองรับระบบดาวเทียม GNSS ได้อีกด้วย โปรแกรมจะให้ผลลัพธ์ที่มีค่าความละเอียดในระดับเซนติเมตร

## 1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมแปลงไฟล์ Convert to RINEX เวอร์ชัน 2.30 เพื่อให้ได้ซึ่งรูปแบบข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการประมวลผลหาค่าพิกัดทางตำแหน่ง และโปรแกรม PANDA .บนระบบปฏิบัติการ linux OS เพื่อใช้ในการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับมา

1.4.2 ศึกษาข้อมูลข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงของดาวเทียมที่มีในข้อมูลทำการรังวัดมาจากภาคสนาม โดยเลือกข้อมูลข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงดาวเทียมจากสถานีประมวลผลที่อยู่ในองค์กร IGS ดังตารางที่ 1 โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกข้อมูลจากสถานีประมวลผล Wuhan University แต่สถานีประมวลผลของ Wuhan University ไม่มีข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงครบทั้ง 27 วัน จึงได้เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีประมวลผล Center for Orbit Determination in Europe (CODE) แทน ซึ่งมีข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงครบตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดาวน์โหลดจาก [cddis.gsfc.nasa.gov/pub/](http://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/)

1.4.3 ทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น NetR9 จำนวน 2 เครื่อง โดยใช้ Antenna รุ่นเดียวกันจำนวน 1 ตัวก็คือ Trimble Zephyr Geodetic พร้อมทั้งต่อ Antenna Splitter รุ่น S12-A ภายในห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ



รูปที่ 1 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส Trimble รุ่น Net R9 จำนวน 2 เครื่อง

1.4.4 นำข้อมูลที่ได้จากการรับสัญญาณมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน ข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง นาฬิกาของดาวเทียม และข้อมูลบรอดคาสของระบบ GNSS เพื่อนำมาใช้สำหรับการประมวลผลทางตำแหน่งโดยใช้โปรแกรม PANDA การประมวลผลข้อมูลเป็นแต่ละเวลาระบบทั้งหมด 3 เวลาระบบ ได้แก่ เวลาระบบ GPS (GPST) เวลาระบบ GLONASS (GLONASST) และเวลาระบบ BeiDou (BDT)

1.4.5 นำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม PANDA เปรียบเทียบวิเคราะห์ผลลัพธ์ ค่าพิกัดทางตำแหน่ง ค่าต่างระหว่างเวลา (clock offset) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อเปรียบเทียบกับเวลาระบบ GPS

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.4.7 นำเสนองานวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงประโยชน์ และข้อจำกัดของข้อมูลที่ได้รับด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS

1.5.2 ทราบถึงความแตกต่างของค่าพิกัด และค่าเวลาที่ใช้เวลาระบบที่แตกต่างกัน

1.5.3 สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ในอนาคต หากเกิดปัญหาเกี่ยวกับเวลาระบบ GPS จะสามารถนำเวลาระบบใดมาทดแทนเวลาระบบ GPS ได้

1.5.4 สามารถนำไปใช้งานในส่วนของการถ่ายโอนเวลาระหว่างระบบ GNSS และการเปรียบเทียบเวลาระหว่างเวลาสากลเชิงพิกัดกับเวลาของระบบ GNSS (GPST GLONASST BDT)



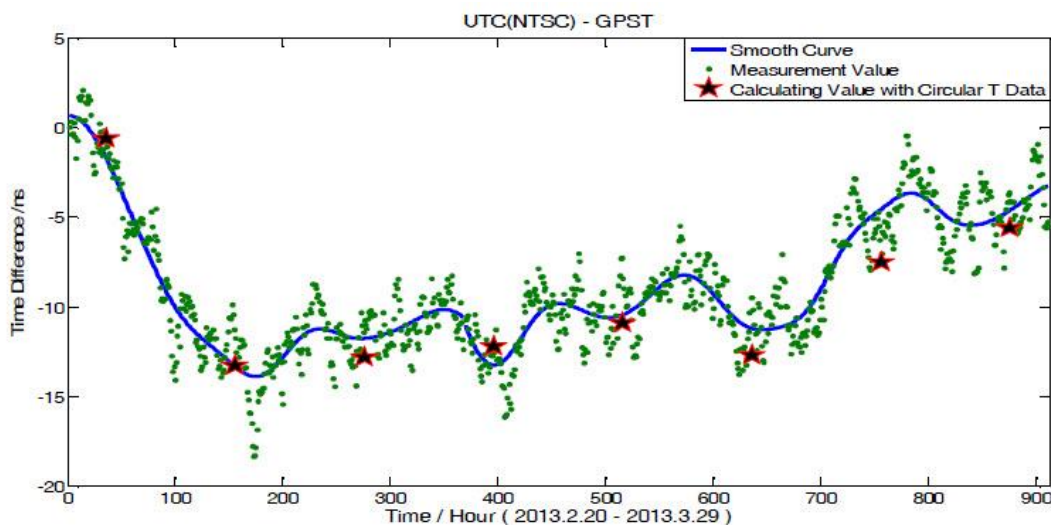
## บทที่ 2

### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

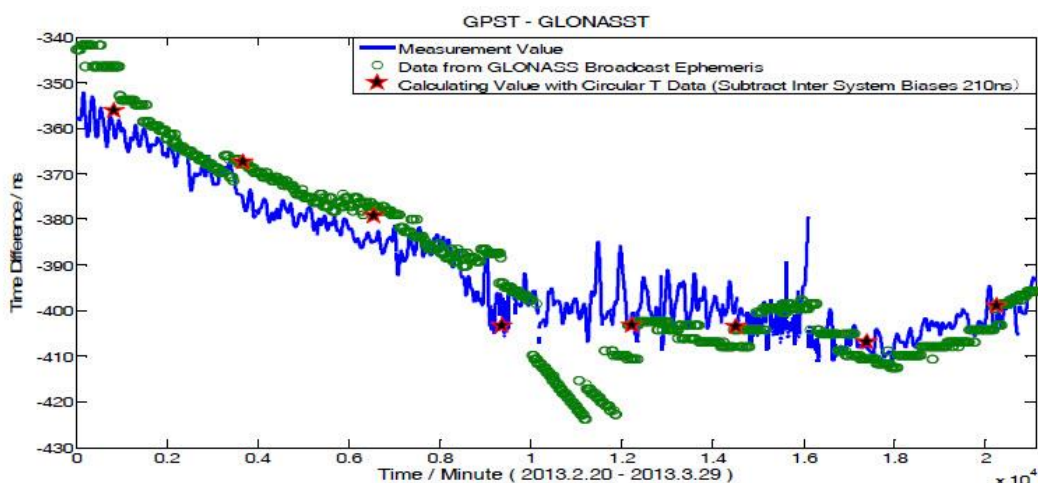
#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเรื่องค่าความต่างของค่าพิกัด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ค่าต่างระหว่างนาฬิกา โดยอ้างอิงเวลาระบบ GNSS ระบบอื่นๆนอกจากเวลาระบบ GPS (GLONASS BDT) ดังนั้นการกำหนดแนวคิดและกระบวนการทำงานวิจัยทั้งการศึกษาการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยเทคนิคครั่งวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ และการหาค่าพิกัดบนพื้นผิวโลก โดยการอ้างอิงเวลาระบบ จะต้องศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเวลาระบบทั้ง 4 ชนิดที่อยู่ใน GNSS และการประมวลผลทางตำแหน่งด้วยเทคนิคครั่งวัดจุดเดียวความละเอียดสูง โดยสามารถสรุปประเด็นที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

จากการศึกษางานวิจัยบางส่วน พบเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ คือ การศึกษาความสัมพันธ์ของเวลาระบบ GNSS ทั้ง 4 ระบบ ประกอบไปด้วยเวลาระบบ GPS GLONASS Galileo และ BeiDou ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาวิธีการสำหรับการตรวจสอบหาค่าความแตกต่างระหว่างนาฬิกาของ GNSS โดยใช้วิธีที่เรียกว่า Signal-in-Space ซึ่งมีเหตุผลสนับสนุนดังนี้ 1. ในทุกๆ ระบบดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำสูงไม่เพียงแต่มีเวลาระบบเป็นของตัวเองเท่านั้น แต่ยังมีความสามารถที่สามารถถ่ายโอนระหว่างเวลาระบบไปยังผู้ใช้งานได้ด้วย 2. ประสิทธิภาพด้านการทำงานสำหรับเครื่องรับสัญญาณในปัจจุบันมีการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นโดยเฉพาะในด้านของเวลา และตำแหน่ง รวมไปถึงการทำงานร่วมกันของดาวเทียม GPS GLONASS Galileo และ BeiDou ซึ่งช่วยให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นหากมีการใช้การอ้างอิงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น 3. วิธีการตรวจสอบค่าต่างระหว่างเวลาระบบด้วยวิธี Signal-in-Space ซึ่งเป็นการรับสัญญาณที่ส่งมาจากอวกาศโดยไม่มีการคำนึงถึงข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์ และมีราคาต่ำกว่า โดยวิธีการ Signal-in-Space ในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่มาตรฐานที่สถานีประมวลผลรับสัญญาณภาคพื้นดิน NTSC (the National Time Service Center) เพื่อใช้ในการอ้างอิง หาค่าต่างเวลาระหว่าง UTC(NTSC) และเวลาระบบใน GNSS (GPST, GLONASS, BDT, GST) ผลที่ได้ดังรูปที่ 2 เป็นข้อมูลของ UTC(NTSC)-GPST เทียบกับ BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) ซึ่งคำนวณจาก UTC-UTC(NTSC) และ UTC-GPST เช่นเดียวกับ GPST-GLONASS เทียบกับข้อมูล BIPM คำนวณจาก UTC-GPST และ UTC-GLONASS ดังแสดงในรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามข้อมูลการตรวจสอบหาค่าต่างระหว่างเวลามีค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS อยู่ที่ 210 นาโนวินาที ระหว่างการคำนวณ GPST-GLONASS เทียบกับค่าที่ได้จาก circular T (Zhang et al., 2013)



รูปที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่รังวัดมา และข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วย circular T สำหรับ UTC(NTSC)-GPST (Zhang et al., 2013)



รูปที่ 3 ข้อมูลที่ได้จาก GPST-GLONASST (Zhang et al., 2013)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ออกมาว่า (Zhang et al., 2013) การรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์สามารถใช้กับระบบ GNSS ทั้ง 4 ระบบได้ เรียกว่า การรังวัดด้วยดาวเทียม 4 ระบบ (Precise Point Positioning with quad-constellation) มีการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของ PPP และระยะเวลาในการรับข้อมูลระหว่างการรังวัดด้วยดาวเทียม 2 ระบบ 3 ระบบ และ 4 ระบบ ว่ามีความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้อง และระยะเวลาในการรับข้อมูล มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMS : Root Mean Square) ของค่าพิกัดจากรับเฉพาะดาวเทียม BeiDou มีค่า PPP ออกมาเป็น 5.2 เซนติเมตร 2.7

เซนติเมตร และ 8.3 เซนติเมตร ในทางทิศตะวันออก ทิศเหนือ และความสูง (East, North, Height) ตามลำดับ แต่ถ้ารับข้อมูลจากดาวเทียม GPS เพียงอย่างเดียวจะให้ค่าออกมาได้ดีกว่า คือ 3.9 เซนติเมตร 1.6 เซนติเมตร และ 5.7 เซนติเมตร ในทางทิศตะวันออก ทิศเหนือ และความสูง (East, North, Height) ส่วนการรับข้อมูลโดยการใช้ดาวเทียมทั้ง 2 ระบบจะมีค่าเฉลี่ยกำลังสองออกมามีค่าที่ดีขึ้นร้อยละ 28 6 และ 7 ในทางทิศตะวันออก ทิศเหนือ และความสูง (East, North, Height) และสามารถลดระยะเวลาในการรับข้อมูลได้มากขึ้นร้อยละ 26 13 และ 14 ในทางทิศตะวันออก ทิศเหนือ และความสูง (East, North, Height) และการรับข้อมูลของดาวเทียม GPS และ GLONASS จะให้ค่าที่ดีกว่าการรับข้อมูลด้วยดาวเทียม GPS และ BeiDou นอกเหนือจากนั้น งานวิจัยชิ้นนี้ยังได้ศึกษาในหัวข้อ การวิเคราะห์เวลาระบบที่แตกต่างกันของ GNSS ระหว่างดาวเทียมแต่ละระบบ ผลจากการศึกษาพบว่า การรับข้อมูลที่มีดาวเทียม Galileo รวมอยู่ด้วยจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีขึ้นอยู่ที่ 176 -6 และ -10737 นาโนวินาที ถูกกำจัดออกจาก STDE (system time difference estimates) ในวันที่ 4 ของรับข้อมูล จากการใช้ค่าต่างนาฬิกาของ Galileo ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงจนถึงระดับ 1 นาโนวินาที (Cai et al., 2015)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกันของระบบดาวเทียม GNSS ตั้งแต่ 2 ระบบขึ้นไป จากบทความของ InsideGNSS เกี่ยวกับประสิทธิภาพของการทำงานร่วมกันระหว่างระบบ GNSS 2 ระบบ คือ GPS และ Galileo โดยวิธีการในการศึกษาจะใช้การอ้างอิงเวลาระบบแบบการหาค่าความแตกต่างของเวลาระหว่างระบบดาวเทียม GPS และ Galileo ในบทความนี้จะพิจารณาความแตกต่างของวิธีการแก้ปัญหาเมื่อใช้งานระบบนำทางทั้ง 2 ระบบ โดยจำลองจากพื้นที่จริง อ้างอิงจากพื้นที่ภูมิประเทศของเมืองตุลูลู ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งได้ผลสรุปว่าการรับข้อมูล psuedorange โดยการทำงานร่วมกันของดาวเทียม GPS และ Galileo ซึ่งได้ใช้การค่าต่างระหว่างเวลาที่เรียกว่า The GPS-Galileo Time Offset (GGTO) ในการพิจารณาเบื้องต้นเป็นการพิจารณาด้วยการทำนายค่าพิกัดเมื่อใช้ดาวเทียมนำทางด้วยการใช้สมการซูโดเรนจ์ ระหว่างผู้ใช้และดาวเทียม อย่างไรก็ตาม Galileo และ GPS ไม่ได้ใช้การอ้างอิงค่าต่างของเวลาเดียวกันในการทำงาน ในการอธิบาย GGTO สำหรับการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบ 3 กรณี ได้แก่ กรณีระดับผู้ใช้ กรณีระดับระบบ และทั้ง 2 กรณีรวมกัน โดยเป็นการประมาณการตำแหน่งเป็นเมื่อพิจารณาการนำทางด้วยดาวเทียมที่ได้จากการวัดซูโดเรนจ์ระหว่างผู้ใช้และดาวเทียมนำทาง สำหรับกรณีแรก ระดับผู้ใช้ งานแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความผิดพลาดของความแม่นยำไม่มีผลกับการเลือกเวลาระบบแบบ GGTO GPS และ Galileo ได้ส่งข้อมูลมาในข้อความของการนำทาง วิธีที่สองอยู่ในขั้นตอนการพิสูจน์ มีค่าความผิดพลาดในแนวราบ 42.7 เมตร เมื่อค่าความถูกต้องของ GGTO อยู่ที่ 2.5 นาโนวินาที และ 51.4 เมตรที่ 16 นาโนวินาที เมื่อใช้การจำลองแบบมีเงื่อนไขในวิธีเดียวกันจะได้ผลลัพธ์ค่าความผิดพลาดความแม่นยำของเวลาจะมีค่าที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ของวิธีการทั้งสองแบบได้อธิบายถึงค่าความผิดพลาดในแนวราบและแนวดิ่งเหมือนกับสภาพของพื้นที่จริง และวิธีการสุดท้ายที่เรียกว่า automatic determination of GGTO เป็นการรวมกันของทั้ง 2 วิธีก่อนหน้า เพื่อให้



ผู้ใช้งานเลือกสำหรับการคำนวณด้วยตัวของมันเอง แต่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่จำกัด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า GGTO ได้ค้นพบข้อผิดพลาดบนค่ารังวัดทุกค่าและเพราะมีดาวเทียมหลายดวง ซึ่งผลกระทบสำหรับการแก้ปัญหาในขั้นสุดท้ายเป็นปัญหาที่เล็กน้อยมาก (Inge et al., 2007)

ในด้านงานวิจัยที่เกี่ยวกับเวลาระบบ มีรายละเอียดดังนี้

สำหรับเวลาระบบ BeiDou (BeiDou System time : BDT) มีการศึกษาโดย Jun Lu (Jun et al., 2015) ได้ทำการทดสอบ การถ่ายโอนเวลาทั้งหมด 3 การทดสอบ ได้แก่ 1.การถ่ายโอนเวลาของดาวเทียม 2 ทาง 2.การเปรียบเทียบเวลาด้วยวิธี GPS Common-View และ BeiDou Common View และสุดท้ายการทดสอบเวลาระหว่างของสถานีประมวลผลรับสัญญาณ NTSC (National Time Service Center) และเวลาระบบ BeiDou ทั้งนี้ยังมีการดูค่าของความเสถียรและค่าความถูกต้องของเวลาระบบ BeiDou จากการทดสอบทั้ง 3 การทดสอบอีกด้วย ซึ่ง Jun Lu ได้ใช้วิธี RMS (Root Means Square) มาใช้ในการวัดครั้งนี้ สำหรับการทดสอบแรกจะเป็นการหาค่าความถูกต้องของ GPS Common-View โดยเลือกข้อมูลที่น่ามาหาค่าต่าง คือ เวลาระบบระหว่าง UTC(NTSC) และ BDT มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 211 วัน ค่าที่ออกมาสามารถยอมรับได้ การทดสอบที่สองเป็นการหาค่าความถูกต้องของ BeiDou Common-View เลือกใช้ข้อมูลเวลาระหว่าง UTC(NTSC) และ BDT มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 47 วัน ค่าที่ทำการทดสอบออกมาสามารถยอมรับได้ การทดสอบที่สามเป็นการหาค่าความถูกต้องของ TWSTFT เลือกใช้ข้อมูลระหว่าง UTC(NTSC) และ BDT มีจำนวนข้อมูล 34 วัน ได้ผลออกมาเป็นที่ยอมรับได้ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความถูกต้อง และค่าความเสถียรของวิธีการเปรียบเทียบแต่ละวิธี UTC(NTSC)-BDT (Jun et al., 2015)

Time Comparison Method	Accuracy (ns)	Daily stability
GPS common-view	1.8	2.1E-14
BeiDou common-view	1.3	1.5E-14
TWSTFT	0.5	5.8E-15

สำหรับประสิทธิภาพของเวลาระบบ BeiDou Jun Lu ได้ทำการหาค่าความถูกต้อง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ และค่าเสถียรภาพของความถี่ โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างเวลา UTC(NTSC)-BDT และ UTC-BDT แสดงได้ดังตารางที่ 3 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่าง BDT และ UTC/UTC(NTSC) (Jun et al., 2015)

	Mean (ns)	STD (ns)	Maximum (ns)	Minimum (ns)
UTC(NTSC)-BDT	7.9	37.3	78.8	-64.9
UTC-BDT	9.6	35.9	75.6	-64.8

ตารางที่ 4 ค่าทางสถิติของค่าเบี่ยงเบนความถี่ (Jun et al., 2015)

	Mean	STD	Maximum	Minimum
UTC(NTSC)-BDT	6.4e-17	4.6e-15	8.9e-15	-1.5e-14
UTC-BDT	7.0e-17	4.2e-15	8.1e-15	-9.9e-15

ตารางที่ 5 ค่าความเสถียรของความถี่ในช่วงเวลาต่างๆ ของ BDT (Jun et al., 2015)

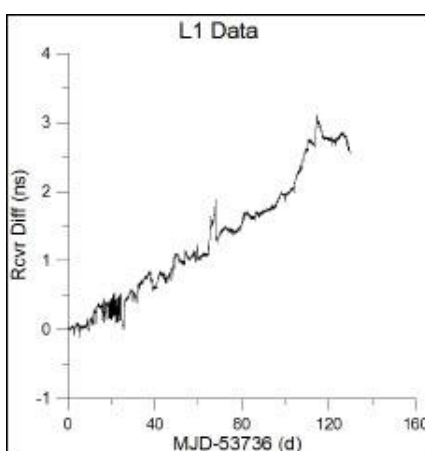
	Mean	STD	Maximum	Minimum
UTC(NTSC)-BDT	2.1e-14	1.2e-14	1.3e-14	1.0e-14
UTC-BDT		1.5e-14	1.5e-14	1.4e-14

จะเห็นได้ว่าค่าทางสถิติที่ออกมาจะให้ค่าสำหรับเวลาระบบ BeiDou ค่าความถูกต้องมีค่าน้อยกว่า 100 นาโนวินาที ส่วนค่าความถูกต้อง และค่าความเสถียรที่เวลามากกว่า 5 วันขึ้นไปอยู่ที่ระดับ  $1e-14$  (Jun et al., 2015)

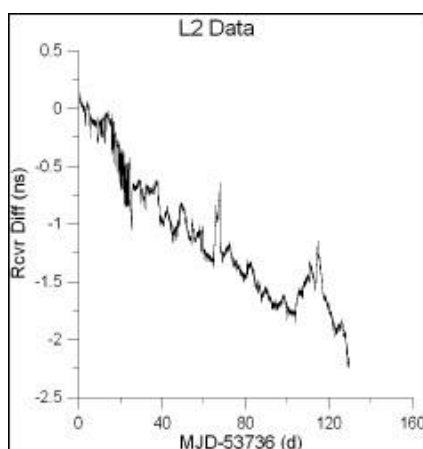
และอีก 1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเวลาระบบซึ่งใช้การรังวัดด้วยวิธีการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยการใช้ time offset ของดาวเทียม GPS และ GLONASS ร่วมกัน ศึกษาโดย G. Huang (Huang et al., 2015) ใช้วิธีการทดสอบนำข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง ที่ต่างกันมาใช้เพื่อหาข้อแตกต่าง อีกทั้งยังทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอุปกรณ์ของสถานีประมวลผลต่างๆทั้งหมด 13 สถานีประมวลผล โดยสถานีประมวลผลที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ไม่ได้อยู่ในกลุ่มสถานีประมวลผลของ MGEX ซึ่ง G.Huang ศึกษาโดยเน้นไปในเรื่องของค่าความเสถียร ความแม่นยำ และตัวแปรที่ทำให้ผลการทดสอบ ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องรับสัญญาณจำนวน 2 เครื่อง ที่มีการเก็บข้อมูลแตกต่างกันเครื่องแรกเป็น GPS และเครื่องที่สองเป็น GLONASS แต่มีกระบวนการทำงานเหมือนกันทำทั้งหมด 13 สถานีประมวลผลรับสัญญาณภาคพื้นดิน ผลปรากฏว่า มีค่าของ time offset มีค่าความแตกต่างระหว่างสถานีประมวลผลรับสัญญาณทั้งหมดเพียง 20 นาโนวินาที ซึ่งตัวรับสัญญาณที่เหมือนกันก็จะมีค่า time offset ที่คล้ายกัน แม้จะอยู่คนละสถานีประมวลผล แต่ในทางกลับกันค่าความต่างของ time offset ที่เครื่องรับสัญญาณคนละแบบกันจะให้ค่าของ time offset สูงถึง 130 นาโนวินาที ในเรื่องของความเสถียรจะไม่มีค่าความแตกต่างกันสำหรับการรับข้อมูล 1 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยกว่า 1.2 นาโนวินาที

และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.56 นาโนวินาที สำหรับความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของการร่วมกันในวิธี PPP time offset ให้ผลออกมาว่าความล่าช้าที่เกิดจากอุปกรณ์นั้นส่งผลต่อค่า time offset ของเครื่องรับสัญญาณในแต่ละสถานีประมวลผลจะให้ค่าที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับข้อมูล 30 วัน จะมีค่าที่น้อยกว่า 1 นาโนวินาที ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องสำหรับการใช้เพื่อการนำทาง จากผลที่กล่าวมาเป็นการร่วมกันในการทำ PPP เพื่อคำนวณค่า time offset ออกมา ต่อมาได้ทำการทดสอบนอกเหนือจากที่กล่าวมาคือสามารถนำมาใช้เพื่อให้ได้ inter-system time offset โดยการใช้วิธีการร่วมกันของวิธี PPP ใน user terminal ผลที่ได้คือ จะมีค่าที่เกิดจากความล่าช้าของเครื่องรับสัญญาณที่ไม่ต่างกัน เครื่องรับสัญญาณที่เหมือนกัน แต่จะมีค่าต่างมากในอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน เห็นได้จากค่า STD ที่ 0.52 นาโนวินาที ของความล่าช้าของอุปกรณ์ หลังจากทำการเอา inter-system time offset ออกก็จะมีค่าที่ต่ำกว่า user time offset สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างลำดับ inter-system offset มีค่าที่คล้ายกันสำหรับทุกสถานีประมวลผล เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบความเหมาะสมของค่าต่างนาฬิกาของผู้ใช้ และระหว่างค่าต่างนาฬิกาของระบบติดตามผลในการนำทางที่เกิดขึ้นจริง จึงได้ทำการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจริงของสถานีประมวลผล CAGZ จะได้ผลแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. ประมาณค่าพารามิเตอร์ของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ GPS และ GLONASS 2. ประมาณค่าพารามิเตอร์เฉพาะนาฬิกาของ GPS ที่มีพารามิเตอร์นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณของ GLONASS ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงสำหรับ user time offset มีค่า 436.354 นาโนวินาที ไปยังพารามิเตอร์นาฬิกาตัวรับสัญญาณของ GPS 3. ประมาณค่าพารามิเตอร์เฉพาะนาฬิกาของ GPS ที่มีพารามิเตอร์นาฬิกาเครื่องรับสัญญาณของ GLONASS ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงสำหรับ inter-system time offset มีค่า 2.19 นาโนวินาที ไปยังพารามิเตอร์นาฬิกาตัวรับสัญญาณของ GPS สุดท้ายแล้วผลสรุปที่ออกมาจากการทดสอบทั้งหมดแบ่งออกได้เป็น 5 ข้อ คือ 1. การประมาณค่าของ inter-system time offset ของค่า time offset GPS และ GLONASS สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของอุปกรณ์รับสัญญาณ คุณสมบัติ และผลต่างเวลาของค่าต่างระหว่างนาฬิกา 2. จากข้อมูลที่ออกมาจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับสัญญาณ และ inter-system time offset จะมีความเสถียรสูง ซึ่งเห็นได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยกว่า 1 นาโนวินาที 3. ความต่างของความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับสัญญาณ และค่าต่างนาฬิกาของผู้ใช้ที่มีความแตกต่างกันทำให้มีค่าต่างนาฬิกาที่มีค่าใหญ่เนื่องจากฮาร์ดแวร์รับที่แตกต่างกัน 4. ค่าต่างนาฬิกาของ Inter-system มีผลต่างที่คล้ายกัน และค่าต่างนาฬิกาของสถานีประมวลผลที่แตกต่างกันมีความคล้ายคลึงกันมาก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยเฉลี่ยรายวันอยู่ที่น้อยกว่า 0.5 นาโนวินาที ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบในเวลาระหว่างค่าต่างนาฬิกาใน terminal ผู้ใช้เป็นไปได้ และการตรวจสอบผลมีความแม่นยำสูง 5. การตรวจสอบและการคาดการณ์ครั้งที่ผู้ใช้มีค่าต่างนาฬิกาคุ้มค่าการปฏิบัติที่สำคัญในขณะที่เวลาระหว่างค่าต่างนาฬิกามีค่าจริงเล็ก ๆ น้อย ๆ ในการดำเนินการของการแก้ปัญหาการวางตำแหน่งของการนำทาง (Huang et al., 2015)

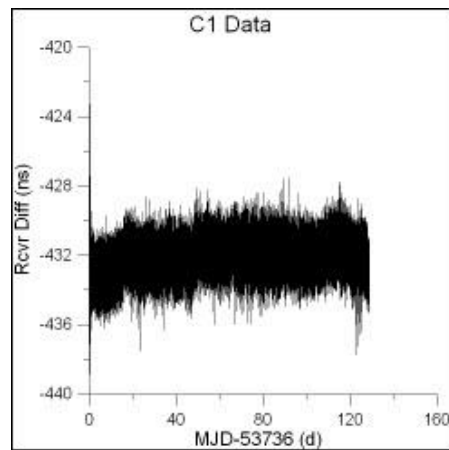
ในการตั้งเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่องเพื่อรับข้อมูลมีเรื่องที่ต้องคำนึงถึงคือ ความล่าช้าภายในเครื่องรับสัญญาณ (Internal Delay) ได้มีคนทำไว้ดังนี้ M. Hottovy และ M. Weiss ได้ทำเรื่องการศึกษาความต่างของความล่าช้าระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GPS สำหรับสัญญาณ L1 L2 และ carrier phase โดยกระบวนการทำงานจะไม่ใช้ geodetic processing software แต่จะเป็นการใช้เครื่องรับสัญญาณสองเครื่องต่อกับเสาอากาศตัวเดียวกัน แล้วเชื่อมต่อด้วย splitter เพื่อแยกออกเป็น 2 ช่องทางไปยังเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 เครื่อง ระยะเวลาในการรับสัญญาณ 128 วัน ข้อมูลที่รับมาจะมีการรับทุกๆ 30 วินาที ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4 แสดงผลของสัญญาณ L1 มีการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างของความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่อง ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีหน่วยเป็นนาโนวินาที โดยข้อมูลที่นำมาใช้จะเป็นข้อมูลทั้งหมด 128 วัน (Hottovy and Weiss, 2008)

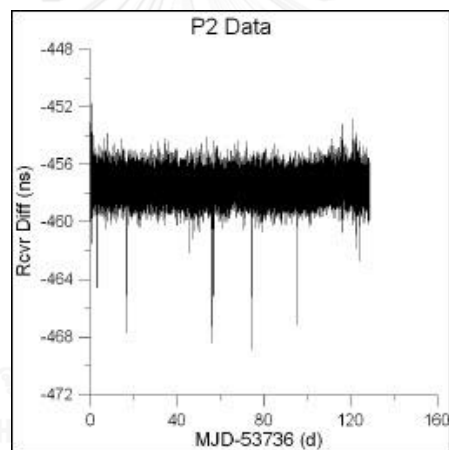


รูปที่ 5 เป็นการอธิบายสัญญาณ L2 ที่มีค่าต่างของความคลาดเคลื่อนลดลง (Hottovy and Weiss, 2008)



รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงผลของความล่าช้าที่แตกต่างกันสำหรับการคำนวณสัญญาณ C1

(Hottovy and Weiss, 2008)

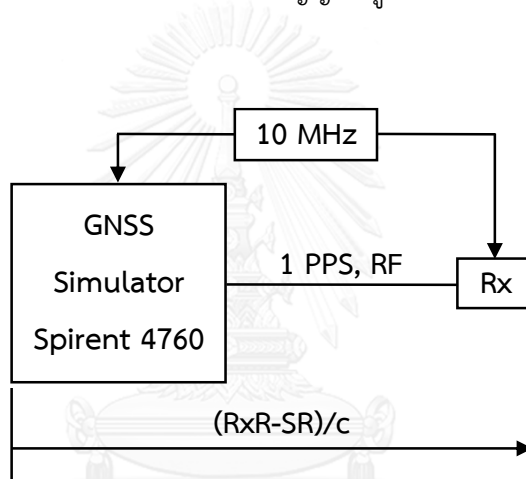


รูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงผลของความล่าช้าที่แตกต่างกันสำหรับการคำนวณสัญญาณ P2

(Hottovy and Weiss, 2008)

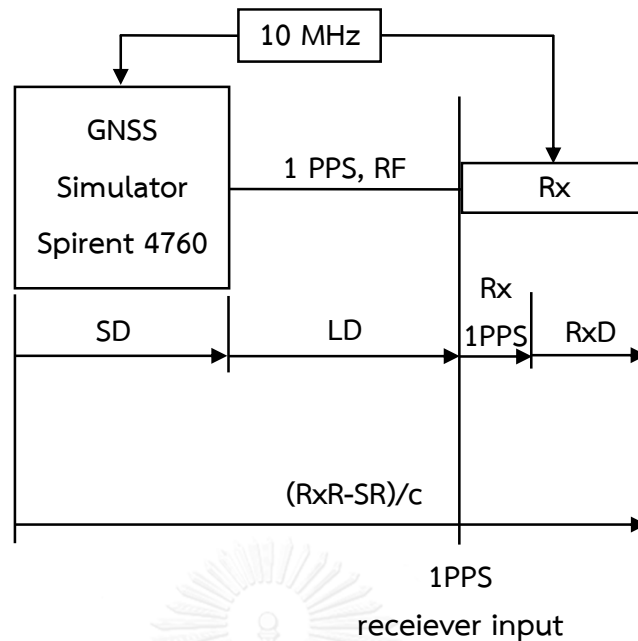
สรุปได้ว่า การหาค่าต่างระหว่างเครื่องรับสัญญาณ GPS geodetic 2 เครื่อง ณ NIST NISV และ NISA เห็นได้ถึงค่าต่างระหว่างเวลาของสัญญาณ C1 และ P2 สำหรับซูโดเรนจ์ และ L1 และ L2 สำหรับเฟสคลื่นส่ง ในข้อมูลที่มีจำนวน 100 วันขึ้นไปจะมีค่าต่างของ L1 และ L2 อยู่ที่ 2 นาโนวินาที สัญญาณ L1 จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น แต่ L2 จะมีค่าที่ลดลง อย่างไรก็ตาม มีค่ากระโดดของ C1 เฉลี่ยอยู่ที่ 0.2 นาโนวินาทีในบางวัน และมีค่าที่แปรในข้อมูล P2 (Hottovy and Weiss, 2008)

อีก 1 งานวิจัยจะเป็นการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้วิธี GNSS signal simulator (GSS) โดย A. Proia G. Cibiel1 และ L. Yaigre ซึ่งใช้เครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่ มีทั้งหมด 3 ยี่ห้อ ได้แก่ ยี่ห้อ ASHTECH Z12-T ยี่ห้อ SEPTENTRIO POLARX2 และ ยี่ห้อ DICOM รุ่น GTR50 สำหรับวิธีการในการปรับแก้ทำได้โดยการจำลองสัญญาณดังรูปที่ 8 โปรแกรม GNSS ใช้ Spirent STR4760 ทำให้เกิดสัญญาณซูโดเรนจ์ทั้ง 2 ความถี่ได้แก่ L1 และ L2



รูปที่ 8 แผนผังการทำงานของเครื่องจำลองสัญญาณ

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงแผนผังของการปรับแก้เครื่องรับสัญญาณ โยวิธีการนี้ได้มีการใช้ครั้งแรกโดย Colorado University และนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการ ณ Naval Research Laboratory ในปี 2005



รูปที่ 9 แผนผังการปรับแก้เครื่องรับสัญญาณ

ในเรื่องของ ความเสถียรของเครื่องรับสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า เครื่องรับสัญญาณ Septentrio มีค่าความเสถียรที่ดีที่สุด : ระหว่าง 40 ps และ 50 ps ในระยะสั้น และ ต่ำกว่า 3 ps ในระยะยาว ความเสถียรระยะสั้นของ P1 และ P2 สำหรับเครื่องรับสัญญาณ Septentrio และ Dicom มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ตรงกันข้ามกับเครื่องรับสัญญาณ Ashtech ซึ่งแสดงถึงค่าที่แตกต่างอยู่ที่ 300 พิโควินาที (picosecond)

ตารางที่ 6 ค่าความเสถียรทางเวลาของเครื่องรับสัญญาณ

Receiver	Short-term Stability 30s (ps)		Long-term Stability 1 day (ps)	
	L1	L2	L1	L2
Ashtech Z12-T	168.30	445.70	6.09	9.30
Septentrio PolaRx2	47.16	42.26	1.48	2.79
Dicom GTR50	118.30	121.80	5.42	6.08

สรุปได้ว่าวิธีการที่ใช้จำลองฮาร์ดแวร์ GNSS ได้รับการพิสูจน์ในขณะนี้ มันช่วยให้หนึ่งในการตรวจสอบความล่าช้าของความล่าช้าของเครื่องรับสัญญาณแบบ Geodetic ใช้ในห้องปฏิบัติการเวลา : ASHTECH Z12-T Septentrio PolaRx2 และ Dicom GTR50 กับความไม่แน่นอนของประมาณ 0.4 นาโนวินาที ข้อผิดพลาดนี้อาจจะลดลง ถ้าความไม่แน่นอนของการจำลองไม่เป็นสิ่งที่สำคัญ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณทั้ง 3 รุ่นพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อค่าที่ออกมา (0.4 นาโนวินาที/°C) เพื่อจำกัดปัญหานี้จึงได้นำเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่องที่เหมือนกันมาจำลองการรับสัญญาณ ผลที่ได้คือข้อมูลมีความแตกต่างกันช่วยให้ความผันผวนของระยะทางซูโดเรนจ์หายไป นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าความเสถียรเชิงเวลาของตัวรับสัญญาณซึ่งคำนวณโดยค่าเบี่ยงเบนทางเวลาของระยะทางซูโดเรนจ์ ได้ค่าความเสถียรของสัญญาณ L1 และ L2 ดังนี้

- Ashtech Z12-T: L1 = 6.09 ps, L2 = 9.30 ps

- Septentrio PolaRx2: L1 = 1.48 ps, L2 = 2.79 ps

- Dicom GRT50: L1 = 3 ps, L2 = 3 ps

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ระบบดาวเทียมนำทาง Global Navigation Satellite System (GNSS)

ระบบดาวเทียมนำทางในปัจจุบันมีหลายระบบนอกเหนือจากระบบ GPS ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ ระบบดาวเทียม GLONASS ของประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย ระบบดาวเทียม BeiDou ของสาธารณรัฐประชาชนจีน ระบบดาวเทียม Galileo ของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป นอกจากนี้ยังมี IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System) ของสาธารณรัฐอินเดีย DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite) ของฝรั่งเศส และ QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) ของญี่ปุ่นที่เป็นแบบ Regional Satellite Navigation Systems อีกด้วย ซึ่งระบบนำทาง GNSS ในปัจจุบันสามารถนำมาใช้ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มความแม่นยำ และความถูกต้องของการบอกตำแหน่งบนพื้นผิวโลก สำหรับนาฬิกาที่ใช้ในการทำงานเพื่อหาค่าพิกัดบนพื้นผิวโลกจำเป็นต้องใช้ แบ่งออกเป็นนาฬิกาบนดาวเทียม และนาฬิกาที่สถานีประมวลผลรับสัญญาณภาคพื้นดิน (Control Center)

### 2.2.2 มาตรฐานความถี่ (Frequency Standards)

มาตรฐานความถี่ของอุปกรณ์ต่างๆจะมีคลื่นความถี่ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงความเสถียรของอุปกรณ์ ซึ่งมาตรฐานความถี่แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.2.1 นาฬิกาคริสตัลควอทซ์ (Crystal Oscillators) มีการพัฒนาตั้งแต่การใช้งานที่ไม่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อความเสถียรภาพของคริสตัลไปจนถึงมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้คริสตัลมีค่าความเสถียรที่มากยิ่งขึ้น (Lewis, 1991)



2.2.2.2 นาฬิกาอะตอม (Atomic Oscillators) ใช้เป็นนาฬิกาที่มีความถูกต้อง และแม่นยำสูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการรับข้อมูลจากดาวเทียมที่อยู่บนอวกาศ และยังสามารถนำมาประยุกต์กับระบบนำทาง GNSS โดยหลักการทำงานของนาฬิกาอะตอมทำได้ กฎของกลศาสตร์ควอนตัมบอกว่าพลังงานของระบบที่ถูกผูกไว้เช่นอะตอมมีค่าที่ไม่ต่อเนื่อง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเพิ่มอะตอมจากระดับพลังงานหนึ่งไปยังระดับสูงขึ้นไป หรืออะตอมในระดับพลังงานสูงจะลดลงในระดับพลังงานลดลงด้วยการปล่อยพลังงานออกมาด้วยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ของออสซิลเลเตอร์อะตอมเป็นความแตกต่างระหว่างสองระดับพลังงานโดยแบ่งเป็นค่าคงที่ของพลังค์ สำหรับนาฬิกาอะตอมที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบ GNSS ในปัจจุบัน จะใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Caesium atomic clock) นาฬิกาอะตอมรูบิเดียม (Rubidium) และนาฬิกาไฮโดรเจนเมเซอร์ (Hydrogen maser) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (Lombardi and Brown, 2001)

(1) นาฬิกาอะตอมรูบิเดียม (Rubidium Oscillators) เป็นนาฬิกาที่มีราคาต่ำ มีประสิทธิภาพที่ดีกว่านาฬิกาควอทซ์ และมีราคาต่ำกว่านาฬิกาอะตอมซีเซียม นาฬิกาอะตอมรูบิเดียมมีค่าความถี่ของอะตอมรูบิเดียมอยู่ที่ 6 834 682 608 เฮิร์ตซ์ ความถี่นี้ถูกสังเคราะห์จากควอทซ์ที่มีความถี่ต่ำ (5 MHz) และความถี่ควอทซ์จะนำโดยการกำหนดของรูบิเดียม ผลที่ได้คือจะมีความถี่ที่เสถียรภาพมากที่มีความมั่นคงในระยะสั้นของควอทซ์ แต่ในระยะยาวจะให้ผลที่ดีมาก ความถี่ทั่วไปของค่าต่างนาฬิกาของออสซิลเลเตอร์จะอยู่ในช่วง  $5 \times 10^{-10}$  ถึง  $5 \times 10^{-12}$  แต่ค่าที่เสถียรจะอยู่ที่  $1 \times 10^{-12}$  ต่อวัน (Lombardi and Brown, 2001)

(2) นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Caesium Oscillators) เป็นความถี่มาตรฐานอันดับที่ 2 ในมาตรฐาน SI เพราะจะมีค่าความถี่ของซีเซียมอยู่ที่ 9 192 631 770 เฮิร์ตซ์ แต่การดูแลรักษาจะต้องให้อยู่ในสถานที่ที่ไม่ต้องการให้มีสิ่งใดมากระทบกระเทือนซึ่งมีผลต่อนาฬิกาอะตอมโดยตรง ค่าความถี่มาตรฐานของซีเซียมจะมีค่าไม่ดีกว่า  $\pm 5 \times 10^{-12}$  นาฬิกาอะตอมซีเซียมเหมาะสำหรับการใช้งานระยะยาว ซึ่งมีอายุการใช้งาน 3 ถึง 25 ปี แบบเต็มประสิทธิภาพ (Lombardi and Brown, 2001)



รูปที่ 10 นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Caesium Atomic Clock) รุ่น 5071A

ตารางที่ 7 ข้อมูลรายละเอียดนาฬิกาอะตอมซีเซียมที่เก็บรักษาเวลา UTC(NIMT) ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (Microsemi Corporation, 2014)

Characteristics	Electronic Specifications
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 $\Omega$
Accuracy	$\pm 5 \times 10^{-13}$
Stability (typical)	$\leq 5 \times 10^{-15}$

(3) นาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์ (Hydrogen Masers) เป็นนาฬิกาอะตอมที่มีราคา และคุณภาพสูงที่สุด สำหรับนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์มีการสร้างขึ้นมามีจำนวนไม่มาก เพราะฉะนั้นจะมีอยู่ไม่กี่แห่งที่ใช้นาฬิกาอะตอมตัวนี้ ซึ่งนาฬิกาอะตอมเมเซอร์ได้นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ มีความถี่มาตรฐานอยู่ที่ 1 420 405 752 เฮิร์ตซ์ นาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเมเซอร์มีทั้งหมด 2 แบบด้วยกัน ได้แก่ active maser และ passive maser ซึ่ง active maser จะให้ค่าสำหรับการทำงานในระยะเวลานั้นๆ ที่ดีกว่า passive maser แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจนเม

เซอร์ทัง 2 แบบมีความถี่ที่ให้ค่าสำหรับการทำงานที่ดีในระยะเวลาสั้นๆ มากกว่า นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Lombardi and Brown, 2001)

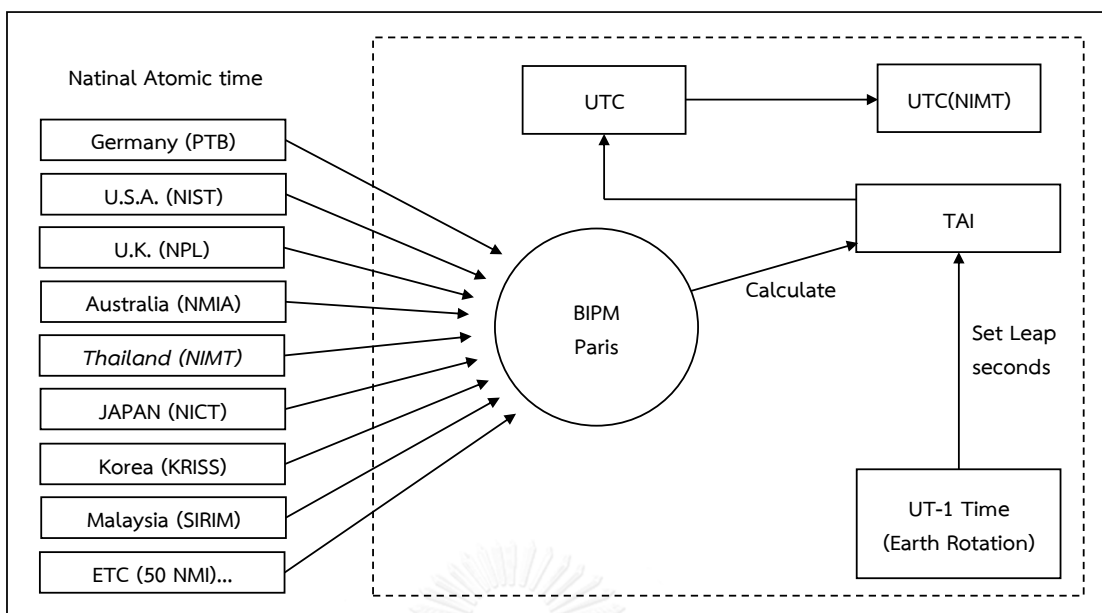
### 2.2.3 เวลาระบบ (System Time)

2.2.3.1 เวลาอะตอมสากล (International Atomic Time) หรือ TAI เป็นมาตรฐานเวลาที่เกิดจากการจับเวลาที่เกิดขึ้นซ้ำๆของนาฬิกาอะตอมที่มีความเสถียรสูง โดยนาฬิกาอะตอมที่มีความเสถียรสูง ได้แก่ นาฬิกาอะตอมซีเซียม (Caesium atomic frequency Standard), นาฬิกาไฮโดรเจนเมเซอร์ (H-Masers) และนาฬิกาที่ห้องปฏิบัติการออกแบบเอง จำนวนมากกว่า 250 เครื่อง โดยนาฬิกาเหล่านั้นตั้งอยู่ตามประเทศต่างๆทั่วโลก รวมไปถึงสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National metrology institute) ห้องปฏิบัติการเวลาและความถี่ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศไทย (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2016, BIPM, 2013.) และหน่วยเวลาที่ใช้ในการอ้างอิงการหมุนของโลกเรียกว่า เวลาสากลเชิงพิกัด (Coordinated universal Time) หรือ UTC เป็นการปรับเพิ่ม-ลดวินาที (Leap second) เพื่อให้สอดคล้องกับเวลาที่ได้จากการโคจรของโลก (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2016)

2.2.3.2 เวลาสากลเชิงพิกัด (Coordinated universal Time) หรือ UTC คือ หน่วยเวลาที่ใช้สำหรับการอ้างอิงการหมุนของโลก เป็นการปรับเพิ่ม-ลดวินาที (Leap second) เพื่อให้สอดคล้องกับเวลาที่ได้จากการโคจรของโลก (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2016)

2.2.3.3 เวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ หรือเรียกว่า UTC(NIMT) คือเวลาสากลเชิงพิกัดที่รักษาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เวลาดังกล่าวได้มาจากการคำนวณค่าความแตกต่างของเวลาจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมจำนวน 3 เครื่อง โดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศโดยเทียบกับเวลามาตรฐานอ้างอิงคือเวลาสากลเชิงพิกัด ซึ่งมีความไม่แน่นอน (Timing uncertainty) อยู่ที่ 20 นาโนวินาที จากรายงานเป็นประจำทุกเดือนในวารสารที่เรียกว่า เซอร์คูลาร์ ที ออกโดยสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (BIPM Circular T) (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2016)

2.2.3.4 เวลาตามการหมุนของโลก (Universal Time) หรือ UT-1 คือเวลาที่เกิดจากการโคจรของโลกซึ่งพัฒนามาจาก UT-0 และถูกแก้ค่า (correct) จากการเปลี่ยนแปลงทาง Longitude ของสถานีประมวลผลสังเกตการณ์ เนื่องจากการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงของขั้วโลก โดยนิยามข้างต้นจะสามารถอธิบายให้เข้าใจง่ายขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเวลามาตรฐานของประเทศต่างๆรวมทั้งประเทศไทยมีการสอบกลับได้ (Traceability) และส่งผลให้เวลาระบบของประเทศต่างมีความถูกต้องสอดคล้องกันทั่วโลก (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2016)



รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนในการคำนวณหาค่า TAI และ UTC (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2016)

2.2.3.5 เวลาระบบดาวเทียมนำทาง GPS (Global Positioning System Time) หรือ GPST คือเวลาระบบมาตรฐานจากสัญญาณดาวเทียม GPS ซึ่งมีค่าต่างกับค่าเวลา UTC อยู่ 17 วินาที (Naval Oceanography Portal, 2016) โดยเวลาระบบ GPS เริ่มต้นเมื่อวันที่ 5 มกราคม ค.ศ. 1980 อ้างอิงเวลาสากลเชิงพิกัด (UTC) ที่มีการดูแลรักษาโดย U.S. Naval Observatory หรือ UTC(USNO) สำหรับเวลาระบบ GPS เป็นเวลาระบบที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากเวลาสากลเชิงพิกัดเพราะเวลาวาสกาลเชิงพิกัดเป็นเวลาที่มีการปรับจำนวนวินาที (IS-GPS-200G, 2012)

2.2.3.6 เวลาระบบดาวเทียมนำทาง GLONASS (Global Navigation Satellite System) หรือ GLONASSST คือเวลาระบบที่มีพื้นฐานอยู่บน TAI ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลา TAI – GLONASSST อยู่ที่ 19 วินาที (A.Druzhin, 2009) โดยเวลาระบบ GLONASS ขึ้นอยู่กับ National Time Scale of Russian Federation ด้วยการปรับแก้วินาที นั่นหมายความว่าไม่มีความแตกต่างของเวลาระหว่างเวลาระบบ GLONASS และเวลา UTC(SU) ใดๆก็ตาม ในมาตรเวลาทั้ง 2 ระบบนี้มีความเสถียรของค่าต่างเวลาอยู่ที่ 3 ซม (GLONASS-ICD, 2008)

2.2.3.7 เวลาระบบดาวเทียมนำทาง Galileo หรือ GST คือ เวลาระบบที่อ้างอิงเวลา UTC เป็นหลัก ทำการเปิดใช้งานเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม ค.ศ. 1999 ณ ปัจจุบันเวลาระบบ Galileo มีค่าต่างระหว่าง UTC อยู่ที่ 15 วินาที (Delporte, 2009) เวลาระบบ Galileo ถูก

กำหนดโดยใช้ชุดการทำงานของนาฬิกาไฮโดรเจนเมเซอร์ที่ Galileo Precise Timing Facility เมือง Fucino ในประเทศอิตาลี (The European Space Agency, 2014)

2.2.3.8 เวลาาระบบดาวเทียมนำทาง BeiDou (BeiDou Navigation Satellite System) หรือ BDT คือ เวลาาระบบของดาวเทียมของจีน อ้างอิงเวลาจากเวลา UTC ในช่วงปี 2000 และมีความต่างของเวลาระหว่าง TAI อยู่ที่ 33 วินาที และระหว่าง UTC อยู่ที่ 2 วินาที (ITU News, 2013) ซึ่งเวลาาระบบ BeiDou เริ่มต้นวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2006 ของเวลาสากลเชิงพิกัด (UTC) โดยเวลาาระบบ BeiDou จะนับเป็นสัปดาห์ และวินาทีของสัปดาห์ (second of week : SOW) (BDS-ICD, 2013)

2.2.4 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)

การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงเป็นการหาตำแหน่งบนพื้นโลกอย่างแม่นยำ ซึ่งหาค่าพิกัดโดยใช้สมการค่ารังวัด และสมการแบบเฟสคลื่นส่งโดยใช้คลื่นความถี่แบบ 2 ความถี่ ทำให้ขจัดค่าความคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนหลักของการรังวัดด้วย GNSS ส่วนค่าความผิดพลาดอื่นๆในงานรังวัด ยกตัวอย่างเช่น ค่าความคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากดาวเทียมหรือตัวรับสัญญาณ ค่าความคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี อื่นๆ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการคำนวณด้วยวิธีการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงคือ (Reference frame) และเวลาาระบบ (System time)ที่ใช้ในการประมวลผล

โดยจากการที่ใช้ค่าที่รวมกันของไอโอโนสเฟียร์ฟรี สมการรังวัดสามารถแสดงได้ดังนี้ (GNSS Research Center, 2014)

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

$$(\varphi^j(i) \cdot \lambda)_{L3} = (\rho^j(i) + c(\delta t(i) - \delta T^j(i)) + ZTD(i) \cdot M(e^j(i)) + N^j(i) \cdot \lambda + \varepsilon_\varphi)_{L3} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1

$i$  คือ หมายเลขลำดับข้อมูลที่รับ (epoch)

$j$  คือ หมายเลขดาวเทียม

$P^j(i)_{L3}$  คือ ค่าของสมการค่ารังวัดแบบซูโดเรนจ์ (เมตร)

$\varphi^j(i)_{L3}$  คือ ค่าของสมการแบบเฟสคลื่นส่ง(เมตร)

$\rho^j(i)$	คือ ระยะทางเรขาคณิตจริงระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ (เมตร)
$\delta t(i)$	คือ ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
$\delta T^j(i)$	คือ ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบ Ionosphere Free (เมตร)
$ZTD(i)$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้ง (Zenith Total Delay) ของแต่ละข้อมูล
$M(e^j(i))$	คือ Mapping ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม
$N^j(i)$	คือ เลขปริศนาของข้อมูล Ionosphere Free
$\epsilon_p$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี และส่วนรบกวนของข้อมูล สำหรับข้อมูลแบบซูโดเรนจ์
$\epsilon_\phi$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี และส่วนรบกวนของข้อมูล สำหรับข้อมูลแบบเฟสคลื่นส่ง

### 2.2.5 เวลาของดาวเทียม

ดาวเทียมแต่ละดวงในระบบ GNSS มีเวลาระบบเป็นของตัวเอง ซึ่งข้อมูลที่ได้รับมาก็จะอ้างอิงเวลาของดาวเทียมเช่นเดียวกัน โดยข้อมูลที่ได้รับมาเรียกว่า ข้อมูลนำทาง หรือ Navigation messages มีข้อมูลที่บอกถึงตำแหน่งของดาวเทียม ค่าแก่นาฬิกาของดาวเทียม ค่าแก้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เวลา UTC Almanac และสถานีดาวเทียม สำหรับความสัมพันธ์ของเวลาระบบของดาวเทียมผู้ใช้ได้เวลาท้องถิ่นของระบบของดาวเทียมผ่านข้อมูลในการบอกเวลาอย่างไรก็ตาม ข้อมูลอื่นๆในข้อมูลนำทาง (Navigation message) ที่สัมพันธ์กับเวลาระบบ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาระบบและเวลาท้องถิ่น แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$t_{\text{sys}} = t^{\text{sat}} + dt_{\text{sys}}^{\text{sat}}(t_{\text{sys}}) \quad (2)$$

ค่าต่างระหว่างเวลาของดาวเทียม และเวลาระบบบนพื้นดิน ( $dt_{\text{sys}}^{\text{sat}}$ ) สามารถประมาณค่า คำนวณได้บนภาคพื้นดิน ซึ่งรวมอยู่ในข้อมูลนำทาง (Navigation message) โดยในสมการจะมีตัวแปรทั้งหมด 3 ชุด และค่าความแปรปรวนแบบสุ่มของนาฬิกา แสดงดังสมการที่ (3)

$$dt_{sys}^{sat}(t_{sys}) = a_0 + a_1(t_{sys} - t_{oc}) + a_2(t_{sys} - t_{oc})^2 \quad (3)$$

โดยกำหนดให้

$t_{oc}$  คือ เวลาของนาฬิกาหรือเวลาอ้างอิงของค่าแก่นาฬิกาที่แสดงในเวลาระบบ (วินาที)

$t_{sys}$  คือ เวลาระบบบนภาคพื้นดิน (วินาที)

$t^{sat}$  คือ เวลาของดาวเทียม (วินาที)

$a_0$  คือ ค่าต่างระหว่างเวลาของ  $t_{oc}$  (วินาที)

$a_1$  คือ ค่า fractional frequency offset ของเวลาระบบ (วินาที/วินาที)

$a_2$  คือ frequency drift ของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที/วินาที<sup>2</sup>)

#### 2.2.6 ค่าเฉลี่ยกำลังสอง

ค่าเฉลี่ยกำลังสองเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแม่นยำของข้อมูล ซึ่งค่าที่น้อยหมายถึงข้อมูลมีความแม่นยำสูง และค่าสูงหมายถึงข้อมูลมีความแม่นยำต่ำ

$$RMS = \mu - \sqrt{\frac{\sum_{i=m}^n x_i^2}{N}} \quad (4)$$

โดยกำหนดให้

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด (เมตร)

$x_i$  คือ ข้อมูลแต่ละวัน (เมตร)

$N$  คือ จำนวนข้อมูล

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การรับสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS

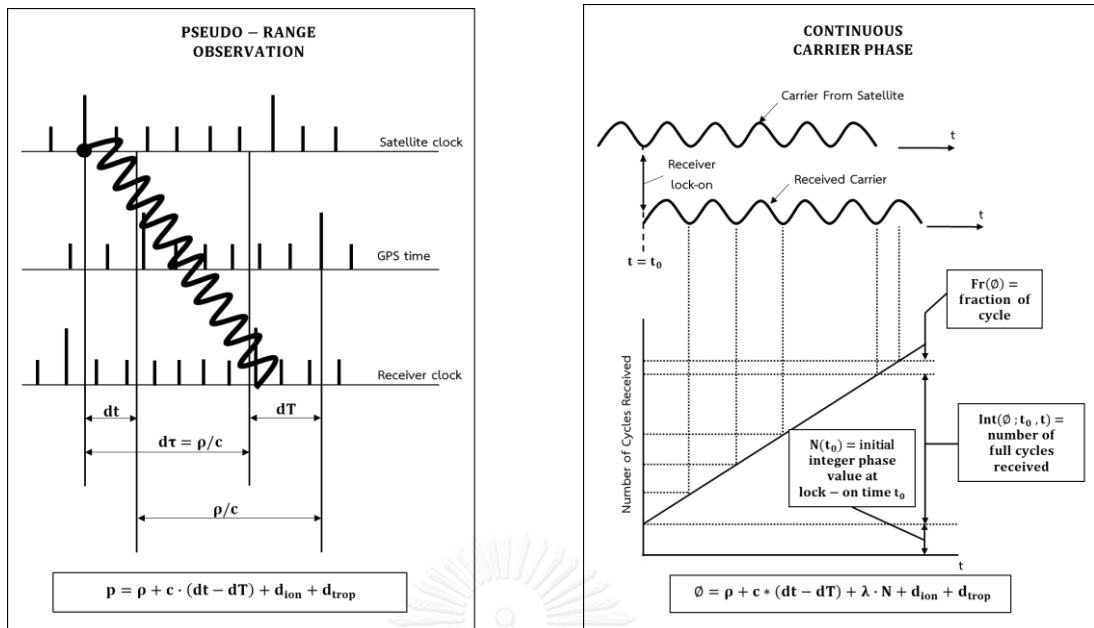
ในการรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ในงานวิจัยชิ้นนี้ ใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS รุ่น Trimble NetR9 จำนวน 2 เครื่อง โดยใช้เสาอากาศ (Antenna) 1 ตัว และใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Antenna Splitter เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณจากเสาอากาศไปยังเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 เครื่องพร้อมกันได้ ณ ตำแหน่งเดียวกัน โดยเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่องจะมีข้อแตกต่างกันคือ เครื่องที่ 1 จะติดตั้งเข้ากับนาฬิกาอะตอมซีเซียม ส่วนอีกเครื่องจะใช้นาฬิกาทั่วไปที่มีอยู่ในเครื่องรับสัญญาณ ทำการรังวัดรับสัญญาณที่อาคารผดุงมาตรฐาน สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยใช้ช่วงเวลาที่ได้รับสัญญาณ (epoch) ทุกๆ 1 วินาที ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งหมด 26 วัน ทำการรังวัดในวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2559 – 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดภาคสนาม แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่มีการเชื่อมต่อกับมาตรฐานความถี่ภายนอก (External Frequency Standard) และข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้สัญญาณเวลาจากนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณเดิม (Internal Oscillator)

#### 3.2 รายละเอียดการประมวลผล

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (PPP Static) โดยการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจะมีสมการที่สำคัญทั้งหมด 2 สมการ ได้แก่ สมการค่ารังวัดแบบซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และสมการเฟสคลื่นส่ง (Carrier Phase) โดยในสมการทั้งสองสมการมีตัวแปรสำคัญ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้ง ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถีและส่วนรบกวนของข้อมูล Mapping ฟังก์ชัน รวมไปถึงเลขปริศนาของข้อมูล ionosphere free ทั้งนี้ในการคำนวณของสมการดังกล่าวจะมีตัวแปรที่สำคัญสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้คือ ค่าต่างระหว่างเวลาของเครื่องรับสัญญาณและดาวเทียม ซึ่งในสมการค่ารังวัดแบบซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และสมการเฟสคลื่นส่ง (Carrier Phase) มีพจน์ของค่าต่างระหว่างความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับและค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม สามารถอธิบายได้ว่า ระยะทางจริงระหว่างเครื่องรับสัญญาณ และดาวเทียมบวกระยะทางที่ผิดไประหว่าง satellite กับ เวลาระบบ คือ clock offset ดังรูปที่ 12





รูปที่ 12 สมการค่ารังวัดแบบซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และสมการเฟสคลื่นส่ง (Carrier Phase)  
(Canadian GPS Associates, 1987)

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการประมวลผลด้วยวิธีการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตยมีการประมาณค่า และตัวแปรดังนี้

- ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ 3 มิติ (Earth Center Earth Fixed Coordinates: ECEF) ประกอบไปด้วยค่าพิกัดในแกน x y z โดยใช้จำนวนข้อมูลรังวัดทั้งหมดมาทำการประมาณพิกัด ทั้ง 3 ค่า

### 3.3 การใช้งานโปรแกรม Convert to RINEX

โปรแกรม Convert to RINEX เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการแปลงสกุลไฟล์ .t02 ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS รุ่น Trimble NetR9 โดยในการแปลงไฟล์ใช้โปรแกรม convert to RINEX เวอร์ชัน 2.30 โดยไฟล์ที่แปลงออกมาจะมีข้อมูลของค่ารังวัด ข้อมูลนำทาง (navigation message) ของดาวเทียมในระบบ GNSS ได้แก่ ไฟล์ navigation message ของดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

### 3.4 รายละเอียดข้อมูลข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง

Multi-GNSS Experiment (MGEX) ติดตั้งโดย International GNSS Service (IGS) เพื่อติดตาม ตรวจสอบ และวิเคราะห์สัญญาณของ GNSS ซึ่ง IGS มีสถานีฐานภาคพื้นดินกระจายอยู่ทั่ว

โลก ข้อมูล MGEX จะมีข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูง ถูกจัดเก็บเป็นรายวัน และแบ่งแยกไฟล์เดอร์ออกเป็นรายอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงจะประมวลผลด้วยสถานีประมวลผลทั้งหมด 5 สถานี ได้แก่ CNES/CLS CODE GFZ JAXA TUM และ Wuhan Univ. แต่ละสถานีประมวลผลจะมีข้อมูลของดาวเทียมแตกต่างกัน ดังตารางที่ 8 โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการประมวลผลโดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou เพราะฉะนั้นจึงมีเพียงศูนย์ประมวลผล CODE GFZ และ WHU ที่สามารถนำมาใช้ได้ แต่เมื่อทดสอบข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงจากศูนย์ประมวลผล WHU แล้ว ผลปรากฏว่าข้อมูลที่ดาวินโหลดมาไม่ครบตามจำนวนข้อมูลที่ทำการรังวัดจากภาคสนาม จึงได้มีการเปลี่ยนไปใช้ข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงจากศูนย์ประมวลผล CODE และ GFZ แทน ซึ่งทั้ง 2 ศูนย์ประมวลผลจะให้ผลออกมาเหมือนกัน โดยข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงที่นำมาใช้ในการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงจะใช้ข้อมูล Final Orbit จาก IGS ซึ่งเป็นพื้นฐาน ITRF2008

ตารางที่ 8 รายละเอียดของสถานีสถานีประมวลผลให้บริการข้อมูลตำแหน่ง และค่าเวลาที่มีความถูกต้องสูงทั้งหมด 6 สถานี

สถานีประมวลผล	รหัส	ดาวเทียม
CNES/CLS	grm	GPS+GLO+GAL
CODE	com	GPS+GLO+GAL+BDS+QZS
GFZ	gfm, gfb	GPS+GLO+GAL+BDS+QZS
JAXA	qzf	GPS+QZS
TUM	tum	GAL+QZS
Wuhan Univ.	wum	GPS+GLO+GAL+BDS+QZS

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลทำโดยวิธีการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิต โดยผลลัพธ์จะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ หาความแตกต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ความแม่นยำของค่าพิกัดแต่ละเวลาระบบ ค่าต่างระหว่างเวลาของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ และค่าของเวลา ณ เวลาระบบต่างๆ (GPST, GLONASST, BDT)

การที่จะได้มาซึ่งผลลัพธ์ทั้ง 5 ส่วนจำเป็นต้องนำข้อมูลนำทาง (Navigation message) ของดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากการแปลงไฟล์ด้วยโปรแกรม convert to RINEX ใช้ในการประมวลผลด้วยวิธีการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงในโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ใน

การประมวลผล โดยผลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA พิจารณาตาม การอ้างอิงฐานเวลาจากเวลาระบบของดาวเทียม GPS GLONASS BeiDou ตามลำดับ

กรณีที่ 1 เวลาระบบ GPS ประกอบไปด้วยการประมวลผลใช้ดาวเทียม 1 2 และ 3 ระบบ ได้แก่

- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS อย่างเดียว
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ร่วมกับดาวเทียมระบบ GLONASS
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ร่วมกับดาวเทียมระบบ BeiDou
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ร่วมกับดาวเทียมระบบ GLONASS และ ดาวเทียมระบบ BeiDou

กรณีที่ 2 เวลาระบบ GLONASS ประกอบไปด้วยการใช้ดาวเทียม 1 2 และ 3 ระบบ ได้แก่

- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GLONASS อย่างเดียว
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GLONASS ร่วมกับดาวเทียมระบบ GPS
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GLONASS ร่วมกับดาวเทียมระบบ BeiDou
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ร่วมกับดาวเทียมระบบ GLONASS และ ดาวเทียมระบบ BeiDou

กรณีที่ 3 เวลาระบบ BeiDou ประกอบไปด้วยการใช้ดาวเทียม 1 2 และ 3 ระบบ ได้แก่

- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม BeiDou อย่างเดียว
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม BeiDou ร่วมกับดาวเทียมระบบ GPS
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม BeiDou ร่วมกับดาวเทียมระบบ GLONASS
- ตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ร่วมกับดาวเทียมระบบ GLONASS และ ดาวเทียมระบบ BeiDou

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

หลังทำการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (Static Precise Point Positioning) โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับ โดยผลลัพธ์ค่าพิกัด (Coordinate) ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยเวลาระบบต่างๆ ค่าเวลา (Clock Offset) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ และนาฬิกาบนดาวเทียม จะแบ่งตามการใช้ข้อมูลดาวเทียม 4 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 ใช้ข้อมูลการตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

กรณีที่ 2 ใช้ข้อมูลการตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

กรณีที่ 3 ใช้ข้อมูลการตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

กรณีที่ 4 ใช้ข้อมูลการตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

สำหรับ 4 กรณีดังกล่าวจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou

ส่วนผลลัพธ์ของค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของค่าเวลา และค่าความถูกต้องของค่าพิกัดสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เวลาระบบ GPS

กรณีที่ 2 เวลาระบบ GLONASS

กรณีที่ 3 เวลาระบบ BeiDou

แต่ละกรณีประมวลผลด้วยการใช้ข้อมูลดาวเทียม 1 2 และ 3 ระบบ ประกอบไปด้วยข้อมูลการตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou สามารถอธิบายได้ดังนี้

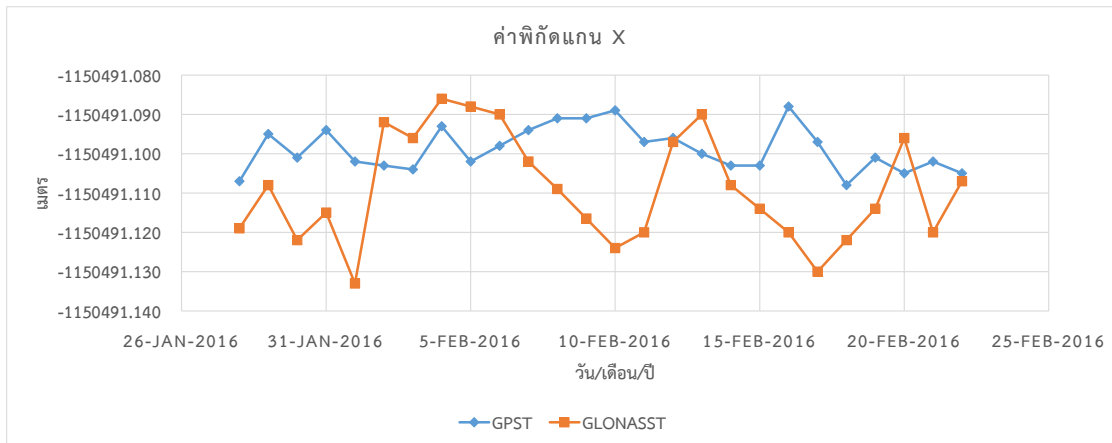
## 4.1 ค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou

### 4.1.1 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ GLONASS

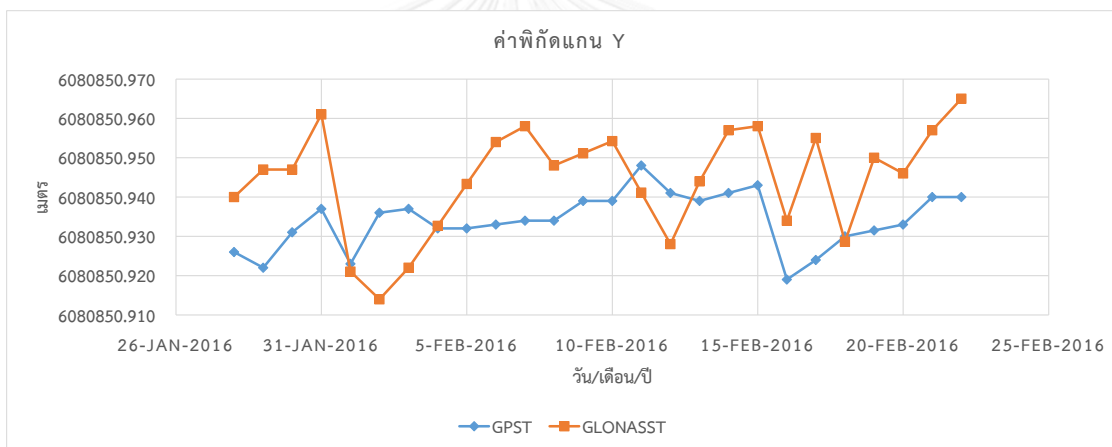
#### 4.1.1.1 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

จากรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS และ GLONASS ด้วยเวลาระบบ GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS และ GLONASS ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.088 -1150491.108 และ -1150491.099 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.948 6080850.919 และ 6080850.934 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.231 1537604.210 และ 1537604.219 เมตร ตามลำดับ

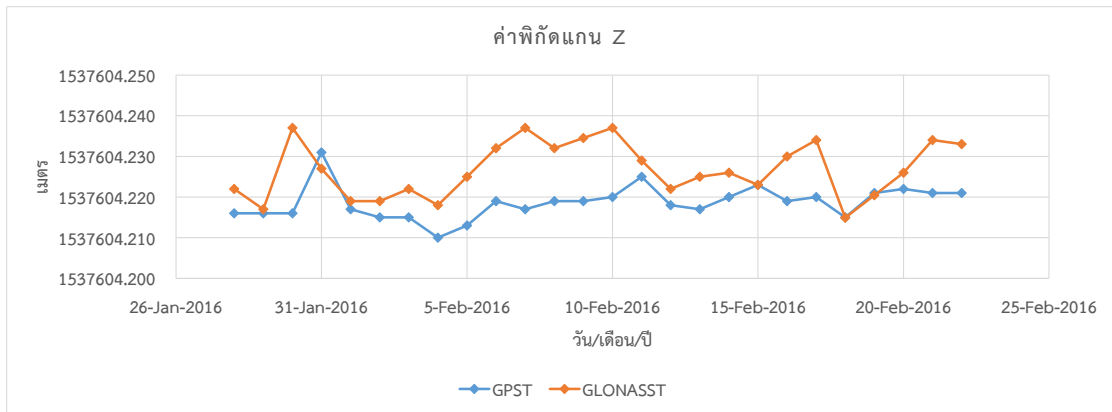
และค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS และ GLONASS เวลาระบบ GLONASS ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.086 -1150491.133 และ -1150491.109 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.965 6080850.914 และ 6080850.945 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.237 1537604.215 และ 1537604.227 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 9 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS และ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 4.2 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS และ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 4.3 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS และ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

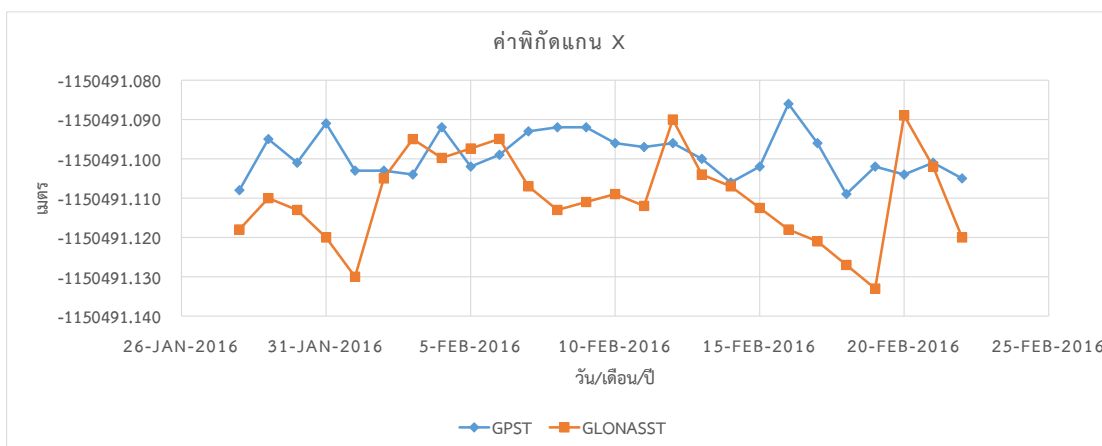
ตารางที่ 9 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูลต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GPS	x	-1150491.108	-1150491.088	-1150491.099	0.020
	y	6080850.919	6080850.948	6080850.934	0.029
	z	1537604.210	1537604.231	1537604.219	0.021
GLONASS	x	-1150491.133	-1150491.086	-1150491.109	0.047
	y	6080850.965	6080850.914	6080850.945	0.051
	z	1537604.215	1537604.237	1537604.227	0.022

#### 4.1.1.2 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ

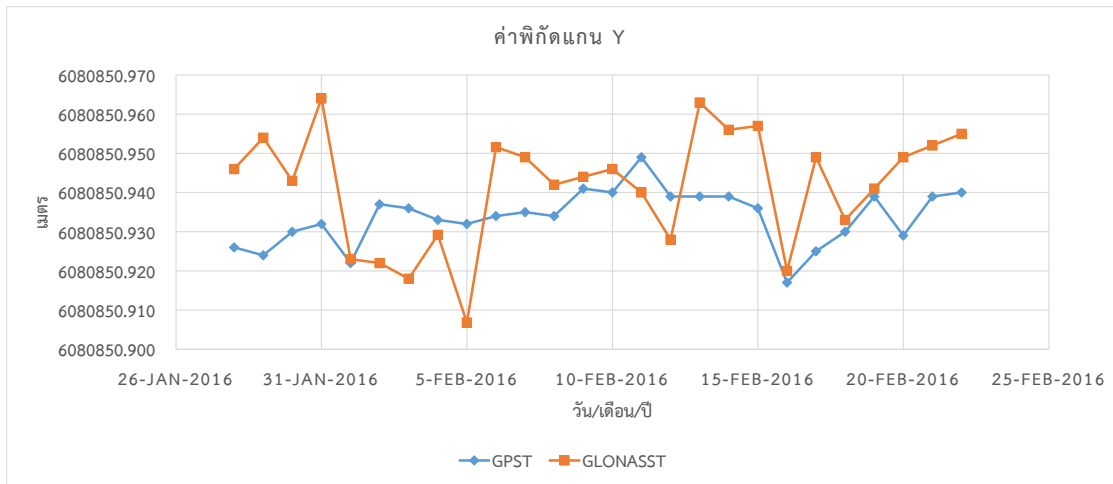
จากรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในของเวลาระบบ GPS และ GLONASS เวลาระบบ GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.086 -1150491.109 และ -1150491.099 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.949 6080850.917 และ 6080850.934 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.229 1537604.212 และ 1537604.219 เมตร ตามลำดับ

และค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS และ GLONASS เวลาระบบ GLONASS ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.089 -1150491.133 และ -1150491.110 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.964 6080850.907 และ 6080850.942 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.240 1537604.210 และ 1537604.226 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 10 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกัน

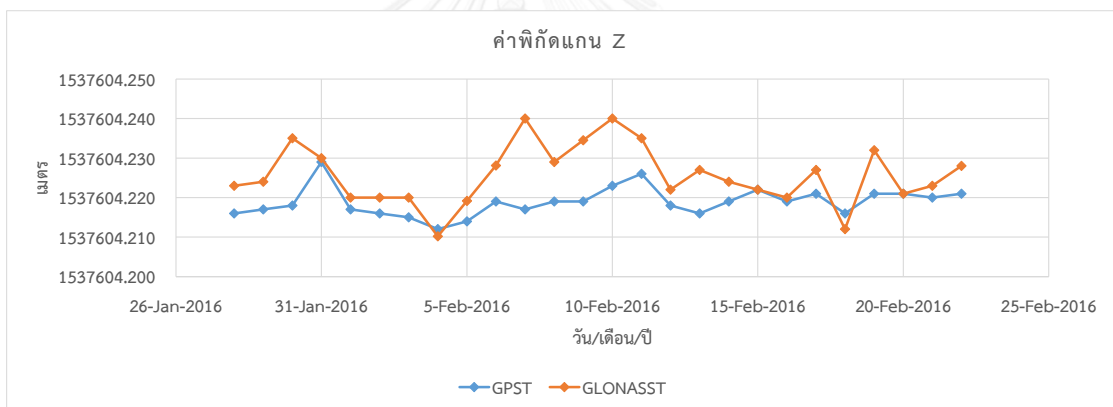


รูปที่ 4.4 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน เวลาระบบ GPS และ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS





รูปที่ 4.5 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในอากาศยานใน เวลา ระบบ GPS และ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 4.6 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในอากาศยานใน เวลา ระบบ GPS และ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

ตารางที่ 10 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูลที่ใช้ในนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GPS	x	-1150491.109	-1150491.086	-1150491.099	0.023
	y	6080850.917	6080850.949	6080850.934	0.032
	z	1537604.212	1537604.229	1537604.219	0.017
GLONASS	x	-1150491.133	-1150491.089	-1150491.110	0.044
	y	6080850.907	6080850.964	6080850.942	0.057
	z	1537604.210	1537604.240	1537604.226	0.030

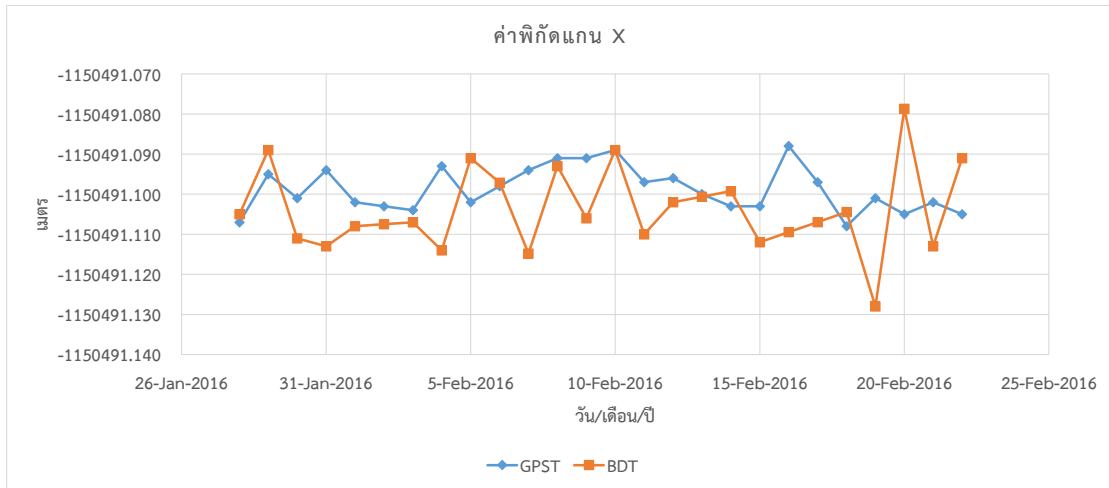
#### 4.1.2 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ BeiDou

##### 4.1.2.1 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

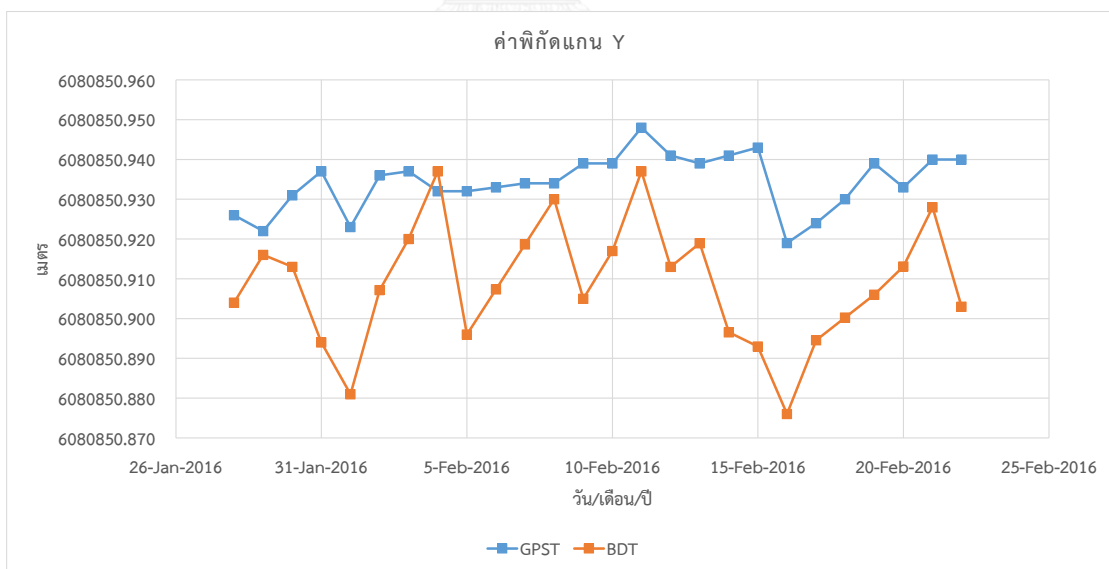
จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS และ BeiDou เวลา ระบบ GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.088 -1150491.108 และ -1150491.099 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.948 6080850.919 และ 6080850.934 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.231 1537604.213 และ 1537604.219 เมตร ตามลำดับ

และค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS และ BeiDou เวลา ระบบ BeiDou ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.079 -1150491.128 และ -1150491.104 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.937 6080850.876 และ 6080850.909 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.230 1537604.208 และ 1537604.219 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 11 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลา ระบบ GPS และเวลาระบบ

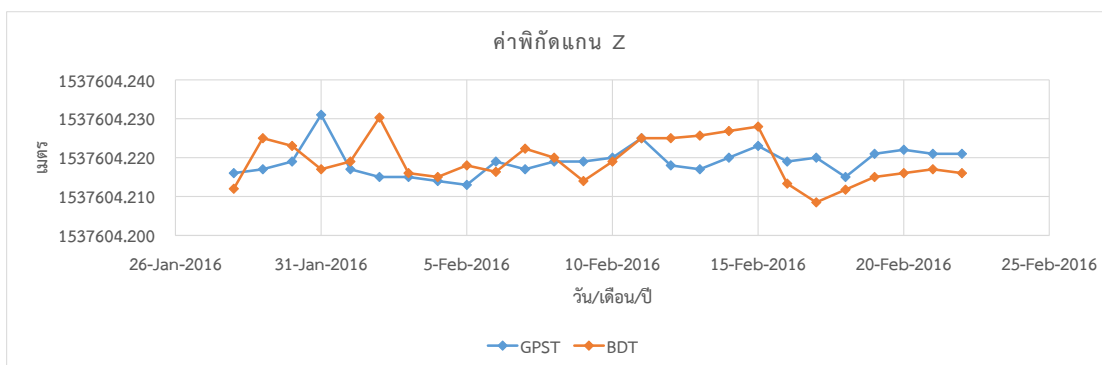
BeiDou ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS เหมือนกัน ไม่มี ความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.7 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลา ระบบ GPS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



รูปที่ 4.8 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลา ระบบ GPS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



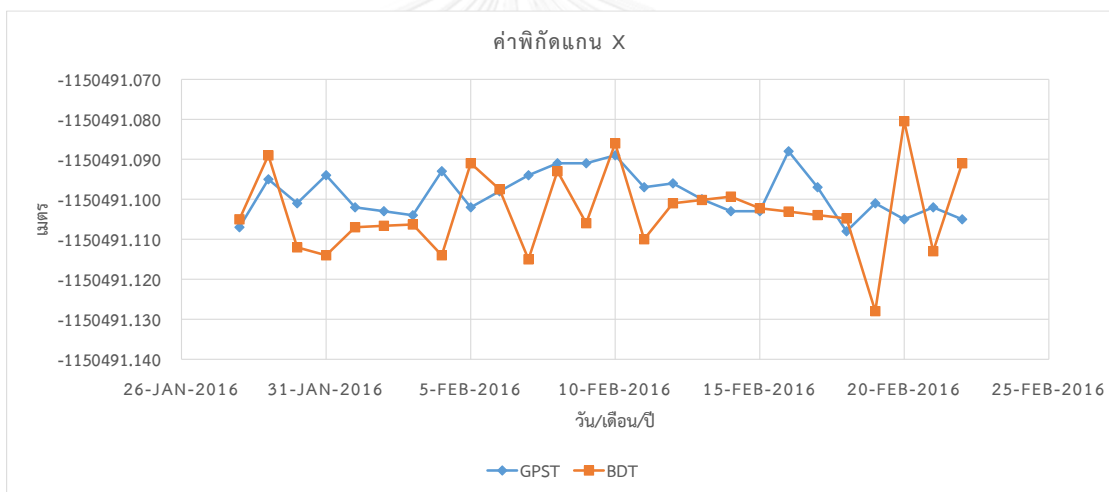
รูปที่ 4.9 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลา ระบบ GPS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

ตารางที่ 11 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูล ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

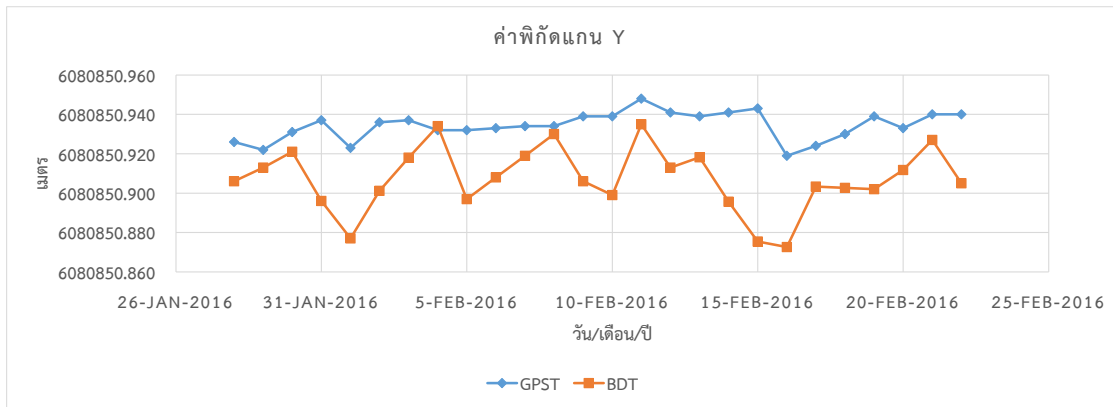
ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GPS	x	-1150491.108	-1150491.088	-1150491.099	0.020
	y	6080850.919	6080850.948	6080850.934	0.029
	z	1537604.213	1537604.231	1537604.219	0.018
BeiDou	x	-1150491.128	-1150491.079	-1150491.104	0.049
	y	6080850.876	6080850.937	6080850.909	0.061
	z	1537604.208	1537604.230	1537604.219	0.022

4.1.2.2 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ จากรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในของเวลาระบบ GPS และ BeiDou เวลาระบบ GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.088 -1150491.108 และ -1150491.099 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.948 6080850.919 และ 6080850.934 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.231 1537604.210 และ 1537604.219 เมตร ตามลำดับ

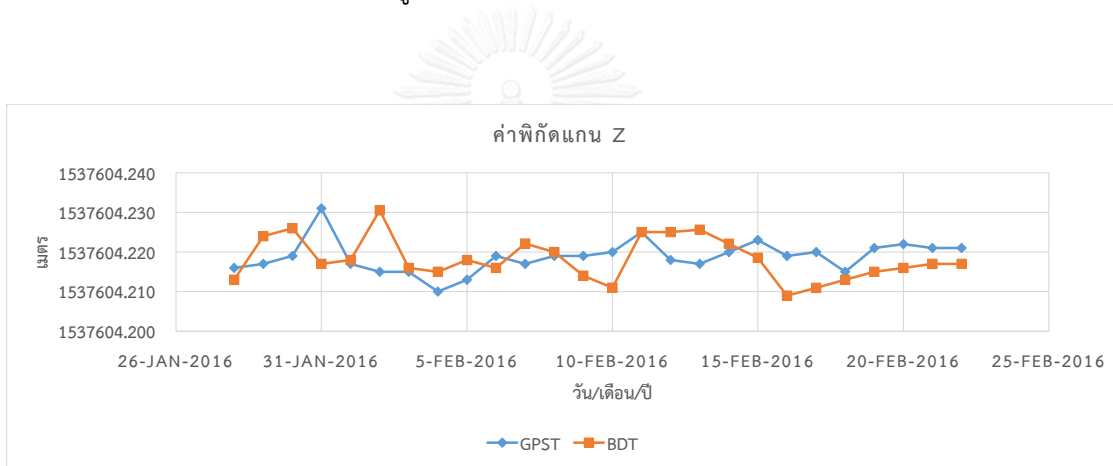
และค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกา ภายในของเวลาระบบ GPS และ BeiDou เวลาระบบ BeiDou ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.081 -1150491.128 และ -1150491.103 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.935 6080850.873 และ 6080850.907 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.231 1537604.209 และ 1537604.218 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 12 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาระบบ GPS และ เวลาระบบ BeiDou ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.10 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน เวลาระบบ GPS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



รูปที่ 4.11 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน เวลาในระบบ GPS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



รูปที่ 4.12 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน เวลาในระบบ GPS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

ตารางที่ 12 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูลที่ใช้ในนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GPS	x	-1150491.108	-1150491.088	-1150491.099	0.020
	y	6080850.919	6080850.948	6080850.934	0.029
	z	1537604.210	1537604.231	1537604.219	0.021
BeiDou	x	-1150491.128	-1150491.081	-1150491.103	0.047
	y	6080850.873	6080850.935	6080850.907	0.062
	z	1537604.209	1537604.231	1537604.218	0.022

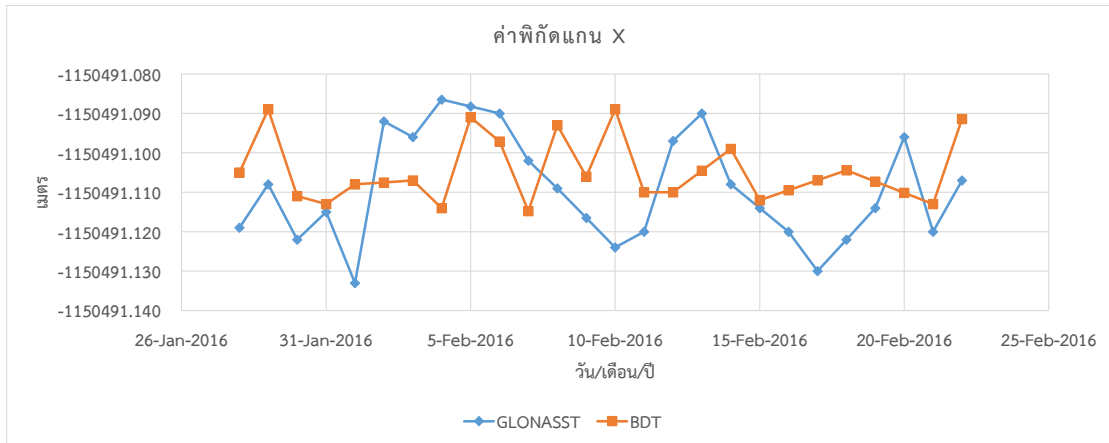
#### 4.1.3 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

##### 4.1.3.1 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

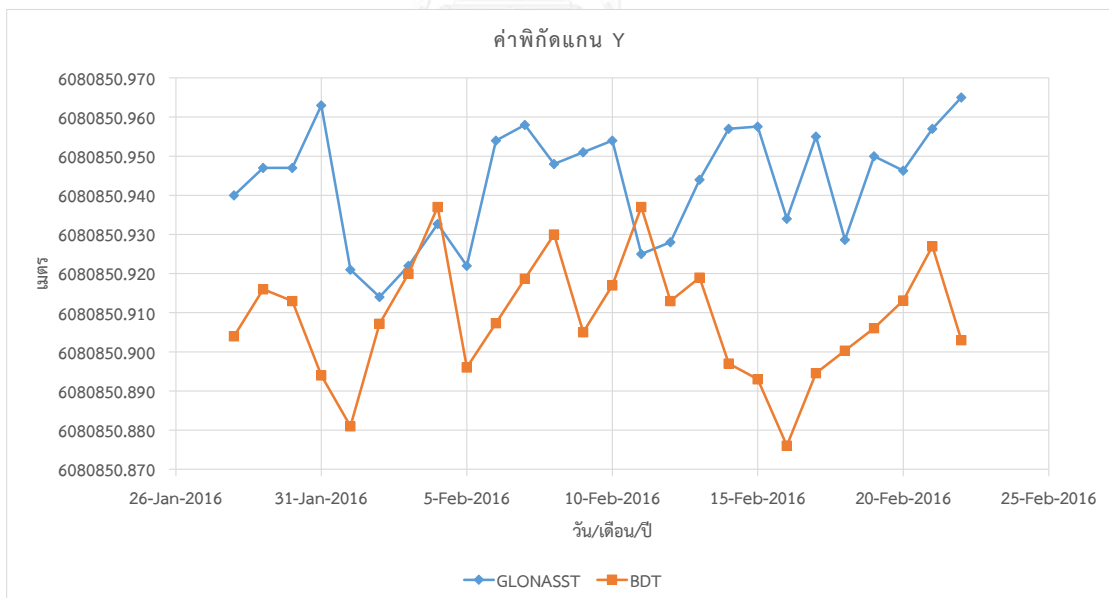
จากรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou เวลาระบบ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.086 -1150491.133 และ -1150491.109 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.965 6080850.914 และ 6080850.943 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.237 1537604.215 และ 1537604.227 เมตร ตามลำดับ

และค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou เวลาระบบ BeiDou ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.089 -1150491.115 และ -1150491.105 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.937 6080850.876 และ 6080850.909 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.228 1537604.202 และ 1537604.218 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 13 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GLONASS และ

เวลาระบบ BeiDou ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกัน

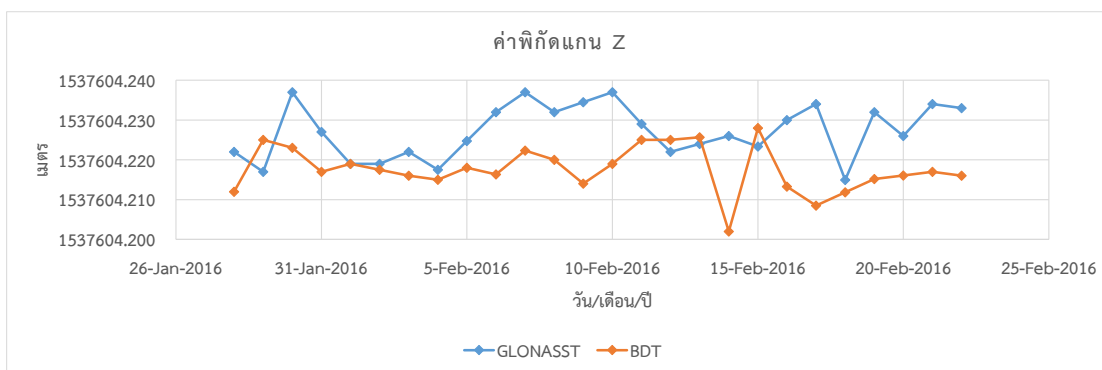


รูปที่ 4.13 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.14 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou





รูปที่ 4.15 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

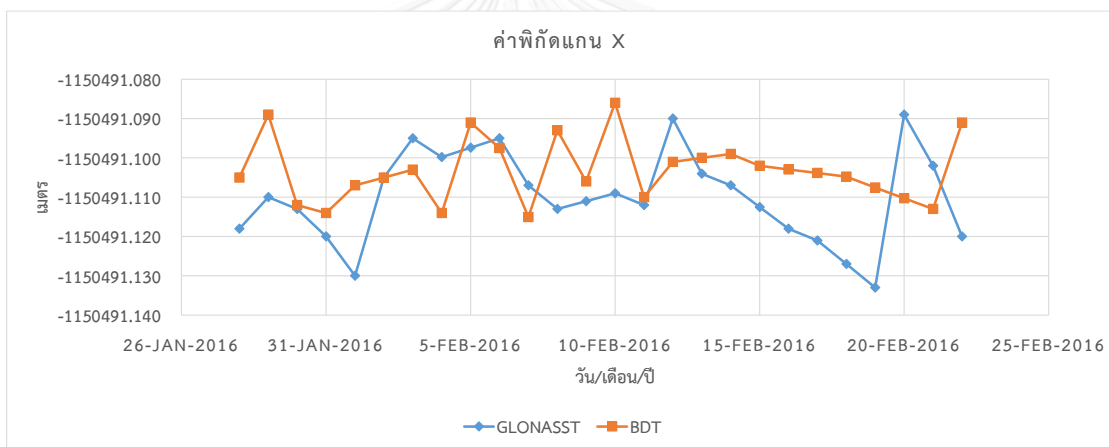
ตารางที่ 13 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูลต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GLONASS	x	-1150491.133	-1150491.086	-1150491.109	0.047
	y	6080850.914	6080850.965	6080850.943	0.051
	z	1537604.215	1537604.237	1537604.227	0.022
BeiDou	x	-1150491.115	-1150491.089	-1150491.105	0.026
	y	6080850.876	6080850.937	6080850.909	0.061
	z	1537604.202	1537604.228	1537604.218	0.026

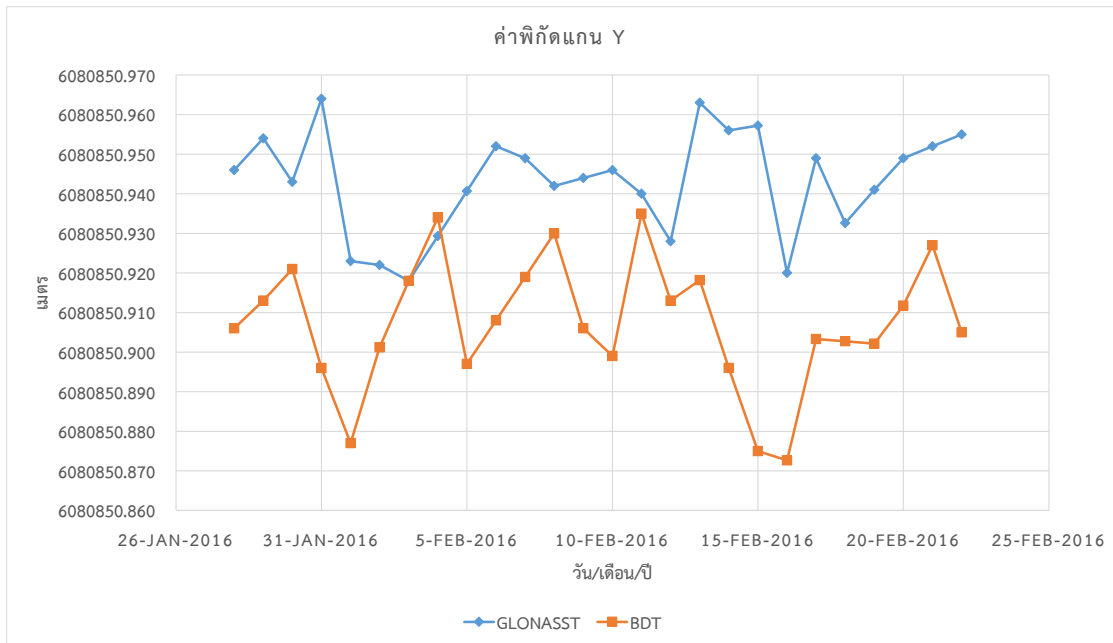
#### 4.1.3.2 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

จากรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในของเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou เวลา ระบบ GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.089 -1150491.133 และ -1150491.110 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.964 6080850.918 และ 6080850.943 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.240 1537604.210 และ 1537604.226 เมตร ตามลำดับ

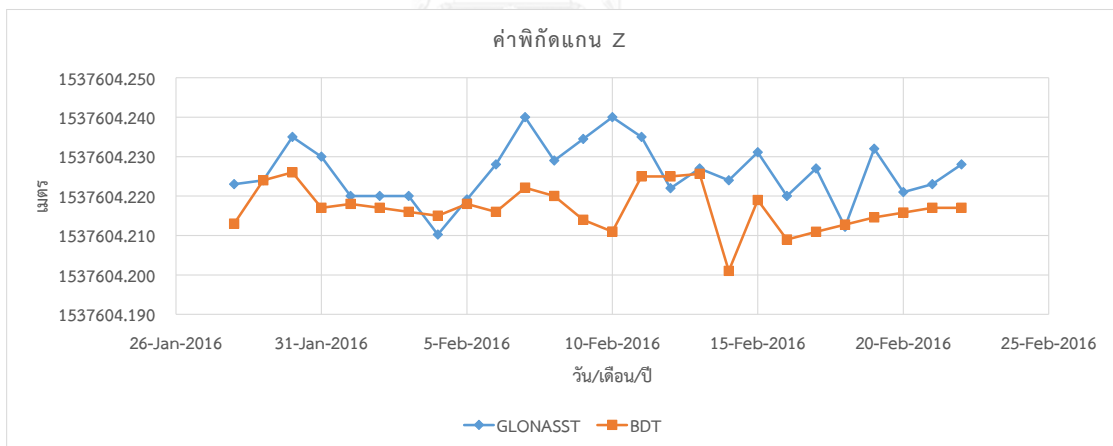
และค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกา ภายในของเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou เวลาระบบ BeiDou ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.086 -1150491.115 และ -1150491.103 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.935 6080850.873 และ 6080850.907 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.226 1537604.201 และ 1537604.217 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 14 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.17 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมใน เพลาระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.18 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมใน เพลาระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

ตารางที่ 14 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูลที่ใช้ในนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GLONASS	x	-1150491.133	-1150491.089	-1150491.110	0.044
	y	6080850.918	6080850.964	6080850.943	0.046
	z	1537604.210	1537604.240	1537604.226	0.030
BeiDou	x	-1150491.115	-1150491.086	-1150491.103	0.029
	y	6080850.873	6080850.935	6080850.907	0.062
	z	1537604.201	1537604.226	1537604.217	0.025

#### 4.1.4 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

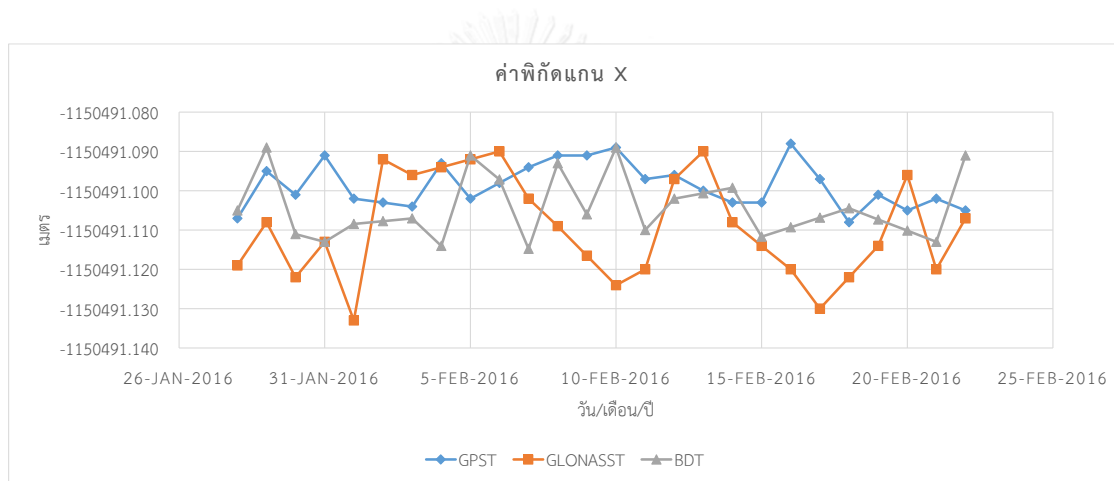
##### 4.1.4.1 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

จากรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou เวลาระบบ GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.088 - 1150491.108 และ -1150491.099 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.965 6080850.914 และ 6080850.943 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.231 1537604.210 และ 1537604.219 เมตร ตามลำดับ

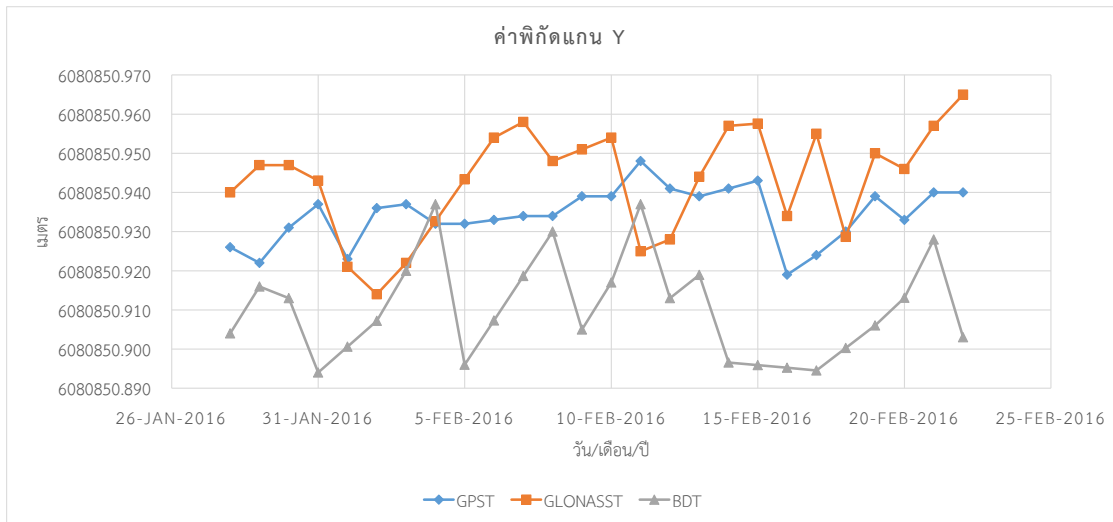
ค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou เวลาระบบ GLONASS ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.090 -1150491.133 และ -1150491.110 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.965 6080850.914 และ 6080850.943 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.237 1537604.215 และ 1537604.228 เมตร ตามลำดับ

ค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou เวลาระบบ BeiDou ค่าพิกัด

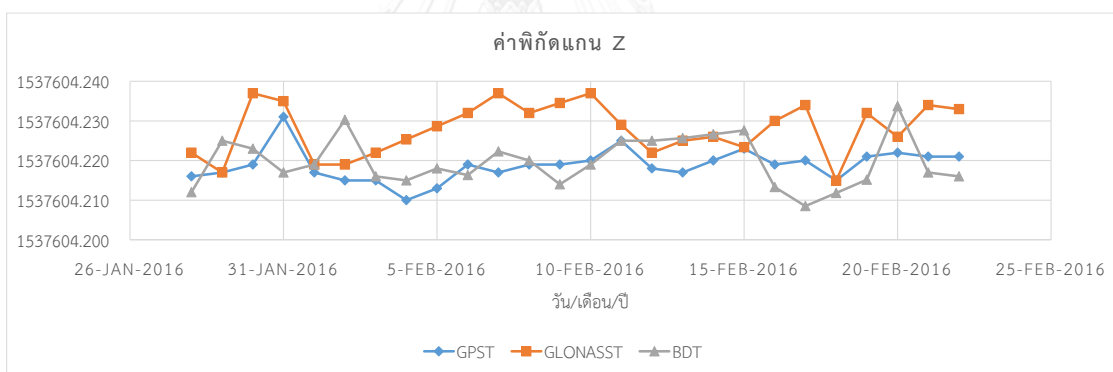
ในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.089 -1150491.115 และ -1150491.104 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.937 6080850.894 และ 6080850.910 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.234 1537604.208 และ 1537604.220 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 15 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อหน้าฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ GLONASS เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.19 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.20 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาในระบบ GPS GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.21 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาในระบบ GPS GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

ตารางที่ 15 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูล ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

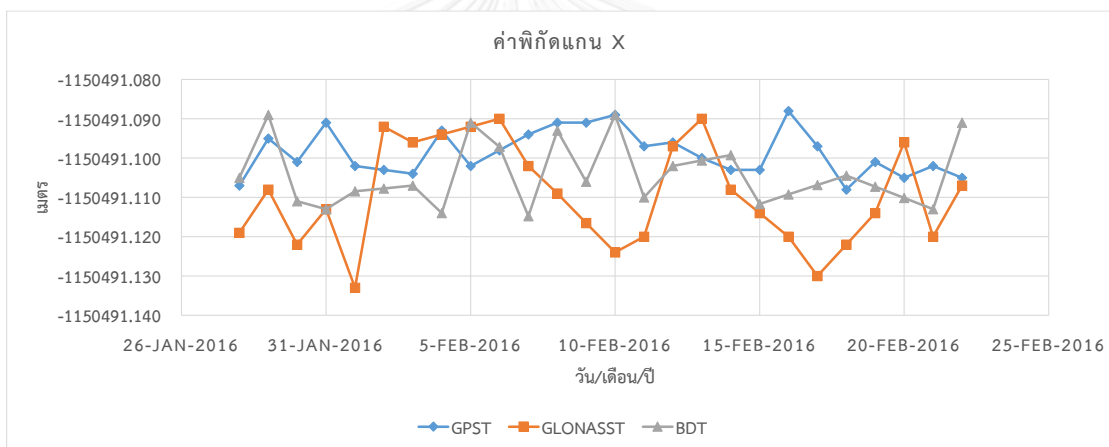
ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GPS	x	-1150491.108	-1150491.088	-1150491.099	0.020
	y	6080850.919	6080850.948	6080850.934	0.029
	z	1537604.210	1537604.231	1537604.219	0.021
GLONASS	x	-1150491.133	-1150491.090	-1150491.110	0.043
	y	6080850.914	6080850.965	6080850.943	0.051
	z	1537604.215	1537604.237	1537604.228	0.022
BeiDou	x	-1150491.115	-1150491.089	-1150491.104	0.026
	y	6080850.894	6080850.937	6080850.910	0.043
	z	1537604.208	1537604.234	1537604.220	0.025

#### 4.1.4.2 ข้อมูลค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน

จากรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou เวลา ระบบ GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ในการประมวลผล จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.088 -1150491.108 และ -1150491.099 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.948 6080850.919 และ 6080850.934 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.231 1537604.210 และ 1537604.219 เมตร ตามลำดับ

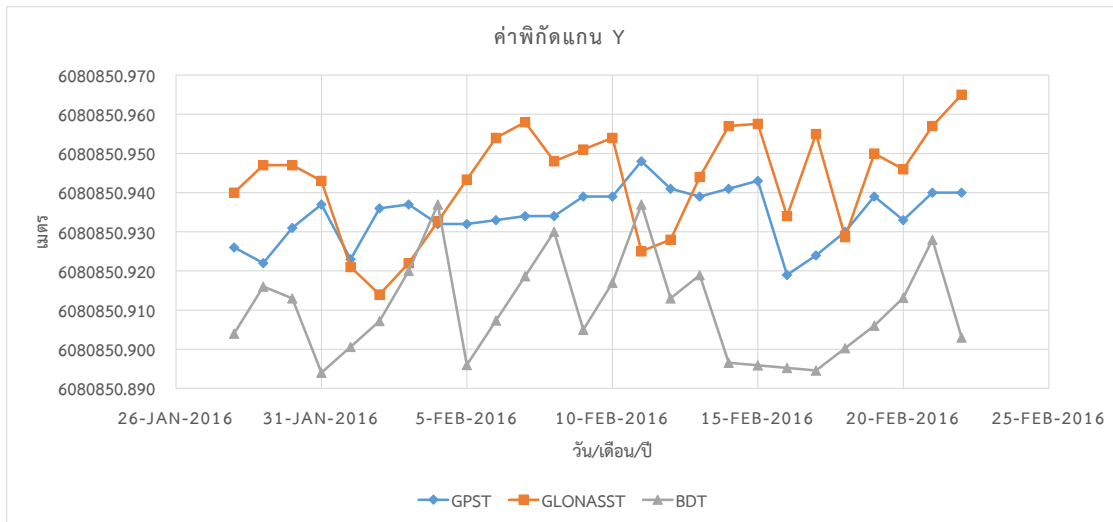
ค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou เวลา ระบบ GLONASS ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.090 -1150491.133 และ -1150491.110 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.965 6080850.914 และ 6080850.943 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.237 1537604.215 และ 1537604.228 เมตร ตามลำดับ

ค่าพิกัดในแนวแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาภายในของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou เวลาระบบ BeiDou ค่าพิกัดในแนวแกน X มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าต่างของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบอยู่ที่ -1150491.089 -1150491.115 และ -1150491.104 เมตร ตามลำดับ ค่าพิกัดในแนวแกน Y ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6080850.937 6080850.894 และ 6080850.910 เมตร ค่าพิกัดในแนวแกน Z มีค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1537604.234 1537604.208 และ 1537604.220 เมตร ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 16 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 จะแสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดแกน X Y Z จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ GLONASS เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกัน

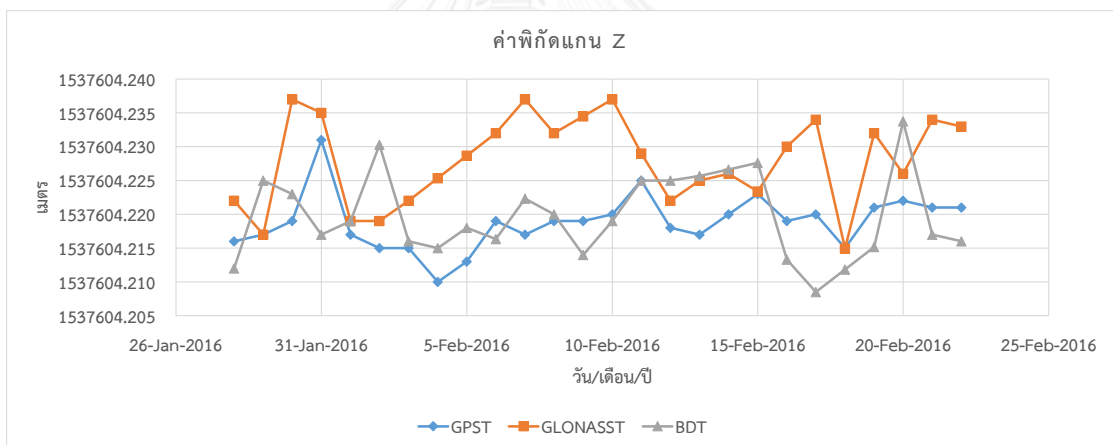


รูปที่ 4.16 ค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou





รูปที่ 4.17 ค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน เวลาในระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.18 ค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน เวลาในระบบ GLONASS และ BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

ตารางที่ 16 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าพิกัด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของข้อมูลที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลการรังวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou จากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ					
เวลาระบบ	พิกัด	ต่ำสุด (m)	มากที่สุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าต่าง (m)
GPS	x	-1150491.108	-1150491.088	-1150491.099	0.020
	y	6080850.919	6080850.948	6080850.934	0.029
	z	1537604.210	1537604.231	1537604.219	0.021
GLONASS	x	-1150491.133	-1150491.090	-1150491.110	0.043
	y	6080850.914	6080850.965	6080850.943	0.051
	z	1537604.215	1537604.237	1537604.228	0.022
BeiDou	x	-1150491.15	-1150491.089	-1150491.104	0.026
	y	6080850.894	6080850.937	6080850.910	0.051
	z	1537604.208	1537604.234	1537604.220	0.025

## 4.2 ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด

ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดเป็นค่าที่บ่งบอกค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการแปลงค่าพิกัดให้อยู่ในระบบ UTM เพื่อง่ายต่อการสังเกตค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด จึงได้ทำการแปลงค่าพิกัดให้อยู่ในระบบพิกัดแผนที่ และความสูง ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนจะรวมอยู่ในแกน U (Up) แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ เวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou แต่ละระบบเวลาประกอบไปด้วยการใช้ดาวเทียม 1 2 และ 3 ระบบแสดงได้ดังนี้

### 4.2.1 เวลาระบบ GPS

#### 4.2.1.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

จากตารางที่ 17 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS มีค่าอยู่ที่  $4.61 \times 10^{-3}$   $5.52 \times 10^{-3}$  และ 0.44 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS อยู่ที่  $4.66 \times 10^{-3}$   $5.56 \times 10^{-3}$  และ 0.44 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou อยู่ที่  $4.63 \times 10^{-3}$   $5.62 \times 10^{-3}$  และ 0.44 เมตร ตามลำดับ และค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูล

การตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $1.34 \times 10^{-1}$   $1.11 \times 10^{-1}$  และ 0.45 เมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 17 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณีนี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณีนี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม				
RMSE (m)	GPS (m)	GPS+GLONASS (m)	GPS+BeiDou (m)	GPS+GLONASS+BeiDou (m)
2D (E,N)	$4.16 \times 10^{-3}$	$4.66 \times 10^{-3}$	$4.63 \times 10^{-3}$	$1.34 \times 10^{-1}$
3D (E, N, U)	$5.52 \times 10^{-3}$	$5.56 \times 10^{-3}$	$5.62 \times 10^{-3}$	$1.11 \times 10^{-1}$
4D (E, N, U, t)	0.44	0.44	0.44	0.44

#### 4.2.1.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

จากตารางที่ 18 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS มีค่าอยู่ที่  $4.71 \times 10^{-3}$   $5.67 \times 10^{-3}$  และ 0.87 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS อยู่ที่  $3.90 \times 10^{-2}$   $9.37 \times 10^{-2}$  และ 0.87 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou อยู่ที่  $1.37 \times 10^{-2}$   $1.23 \times 10^{-2}$  และ 0.87 เมตร ตามลำดับ และค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $4.72 \times 10^{-3}$   $5.66 \times 10^{-3}$  และ 0.87 เมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 18 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณีนี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณีนี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ				
RMS (m)	GPS (m)	GPS+GLONASS (m)	GPS+BeiDou (m)	GPS+GLONASS+BeiDou (m)
2D (E,N)	$4.71 \times 10^{-3}$	$3.90 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-2}$	$4.72 \times 10^{-3}$
3D (E, N, U)	$5.67 \times 10^{-3}$	$9.37 \times 10^{-2}$	$1.23 \times 10^{-2}$	$5.66 \times 10^{-3}$
4D (E, N, U, t)	0.87	0.87	0.87	0.87

#### 4.2.2 เวลาระบบ GLONASS

##### 4.2.2.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

จากตารางที่ 19 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS มีค่าอยู่ที่  $8.89 \times 10^{-3}$   $1.48 \times 10^{-2}$  และ 0.68 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ GPS อยู่ที่  $9.11 \times 10^{-3}$   $1.09 \times 10^{-2}$  และ 0.69 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $3.48 \times 10^{-2}$   $3.00 \times 10^{-2}$  และ 0.70 เมตร ตามลำดับ และค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $1.91 \times 10^{-2}$   $4.83 \times 10^{-2}$  และ 0.70 เมตร ตามลำดับ

จากตารางที่ 19 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม				
RMS (m)	GLONASS (m)	GLONASS+GPS (m)	GLONASS+BeiDou (m)	GLONASS+GPS+BeiDou (m)
2D (E,N)	$8.89 \times 10^{-3}$	$9.11 \times 10^{-3}$	$3.48 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$
3D (E, N, U)	$1.48 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^{-2}$	$4.83 \times 10^{-2}$
4D (E, N, U, t)	0.68	0.69	0.70	0.70

#### 4.2.2.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในนาฬิกาภายใน

จากตารางที่ 20 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS มีค่าอยู่ที่  $1.16 \times 10^{-1}$   $9.61 \times 10^{-2}$  และ 0.92 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ GPS อยู่ที่  $4.08 \times 10^{-2}$   $3.33 \times 10^{-2}$  และ 0.94 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $1.69 \times 10^{-2}$   $1.65 \times 10^{-2}$  และ 0.94 เมตร ตามลำดับ และค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $9.49 \times 10^{-3}$   $1.15 \times 10^{-2}$  และ 0.94 เมตร ตามลำดับ

จากตารางที่ 20 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ				
RMS (m)	GLONASS (m)	GLONASS+GPS (m)	GLONASS+BeiDou (m)	GLONASS+GPS+BeiDou (m)
2D (E,N)	$1.16 \times 10^{-1}$	$4.08 \times 10^{-2}$	$1.69 \times 10^{-2}$	$9.49 \times 10^{-3}$
3D (E, N, U)	$9.61 \times 10^{-2}$	$3.33 \times 10^{-2}$	$1.65 \times 10^{-2}$	$1.15 \times 10^{-2}$
4D (E, N, U, t)	0.92	0.94	0.94	0.94

#### 4.2.3 เวลาระบบ BeiDou

##### 4.2.3.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

จากตารางที่ 21 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม BeiDou มีค่าอยู่ที่  $4.83 \times 10^{-1}$   $4.08 \times 10^{-1}$  และ 0.75 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม BeiDou และ GPS อยู่ที่  $8.35 \times 10^{-3}$   $1.20 \times 10^{-2}$  และ 0.71 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม BeiDou และ GLONASS อยู่ที่  $7.43 \times 10^{-3}$   $1.18 \times 10^{-2}$  และ 0.70 เมตร ตามลำดับ และค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $5.29 \times 10^{-1}$   $4.32 \times 10^{-1}$  และ 0.82 เมตร ตามลำดับ

จากตารางที่ 21 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม				
RMS (m)	BeiDou (m)	BeiDou+GPS (m)	BeiDou+GLONASS (m)	BeiDou+GPS+GLONASS (m)
2D (E,N)	$4.83 \times 10^{-1}$	$8.35 \times 10^{-3}$	$7.43 \times 10^{-3}$	$5.29 \times 10^{-1}$
3D (E, N, U)	$4.08 \times 10^{-1}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$4.32 \times 10^{-1}$
4D (E, N, U, t)	0.75	0.71	0.70	0.82

#### 4.2.3.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

จากตารางที่ 22 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม BeiDou มีค่าอยู่ที่  $7.83 \times 10^{-3}$   $1.10 \times 10^{-2}$  และ 1.80 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม BeiDou และ GPS อยู่ที่  $5.69 \times 10^{-3}$   $4.65 \times 10^{-3}$  และ 1.85 เมตร ตามลำดับ ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม BeiDou และ GLONASS อยู่ที่  $7.89 \times 10^{-3}$   $1.10 \times 10^{-2}$  และ 1.80 เมตร ตามลำดับ และค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 2 3 และ 4 มิติ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $7.09 \times 10^{-3}$   $9.82 \times 10^{-3}$  และ 1.98 เมตร ตามลำดับ

จากตารางที่ 22 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ				
RMS (m)	BeiDou (m)	BeiDou+GPS (m)	BeiDou+GLONASS (m)	BeiDou+GPS+GLONASS (m)
2D (E,N)	$7.83 \times 10^{-3}$	$5.69 \times 10^{-3}$	$7.89 \times 10^{-3}$	$7.09 \times 10^{-3}$
3D (E, N, U)	$1.10 \times 10^{-2}$	$4.65 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-2}$	$9.82 \times 10^{-3}$
4D (E, N, U, t)	1.80	1.85	1.80	1.98

#### 4.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou

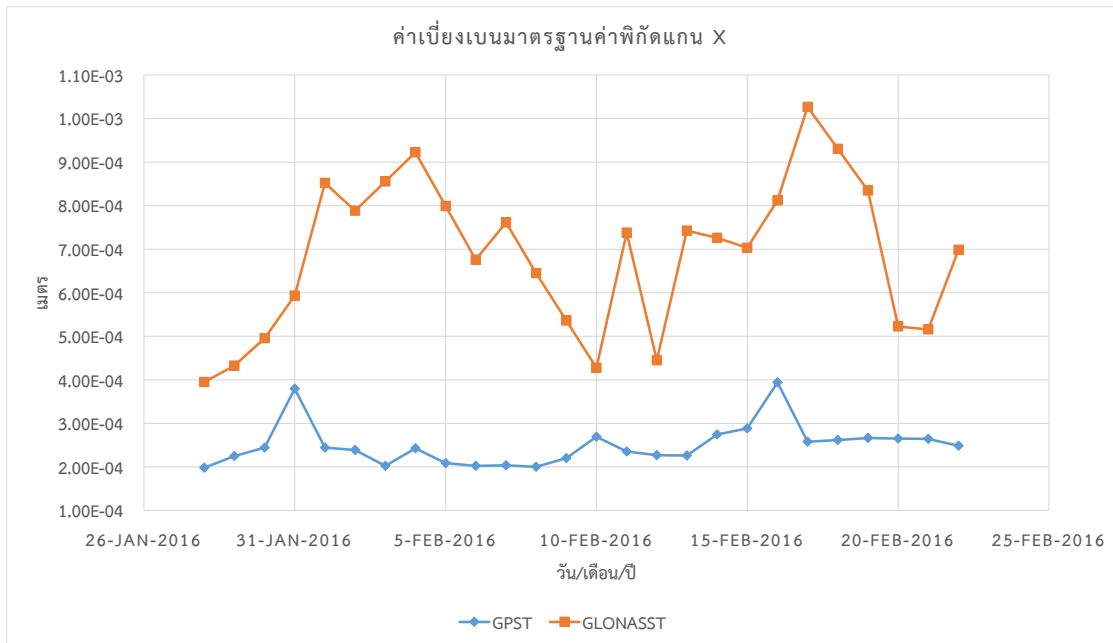
##### 4.3.1 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ GLONASS

##### 4.3.1.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม

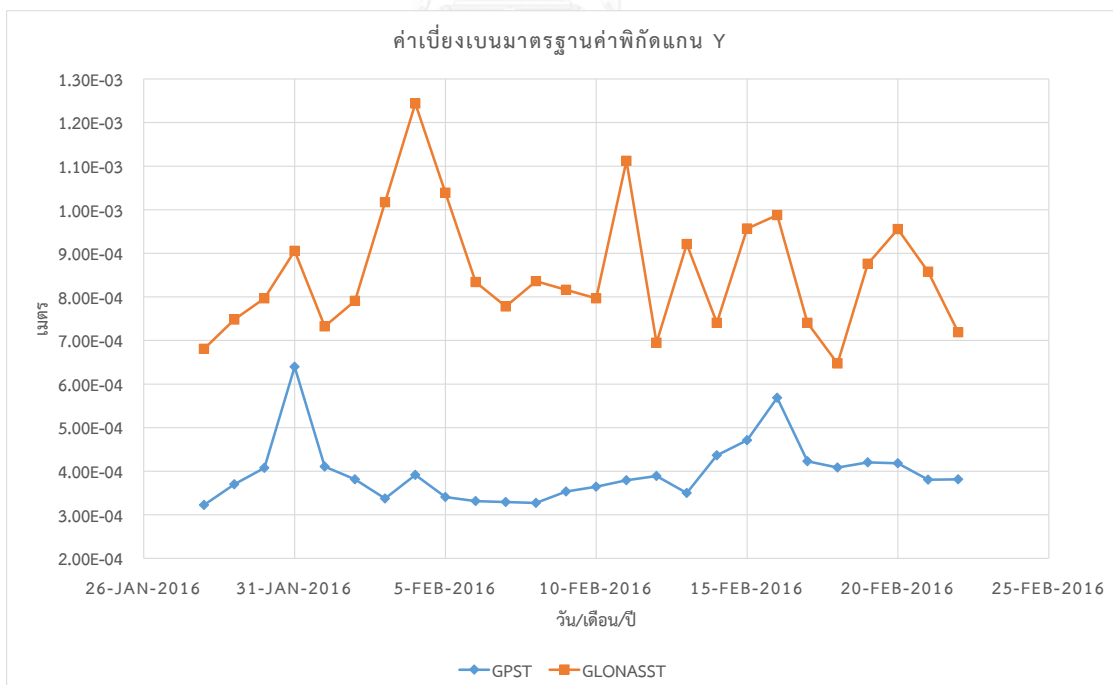
จากรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 และตารางที่ 23 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.98 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.94 \times 10^{-4}$  เมตร  $3.22 \times 10^{-4}$  ถึง  $6.39 \times 10^{-4}$  เมตร  $1.02 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.05 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS โดยใช้ดาวเทียม GPS และ GLONASS ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $3.95 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.03 \times 10^{-4}$  เมตร  $6.47 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.24 \times 10^{-3}$  เมตร  $2.21 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.66 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS มีค่าที่ต่ำกว่าเวลาระบบ GLONASS ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-4.38 \times 10^{-4}$   $-4.57 \times 10^{-4}$  และ  $-1.84 \times 10^{-4}$  เมตร

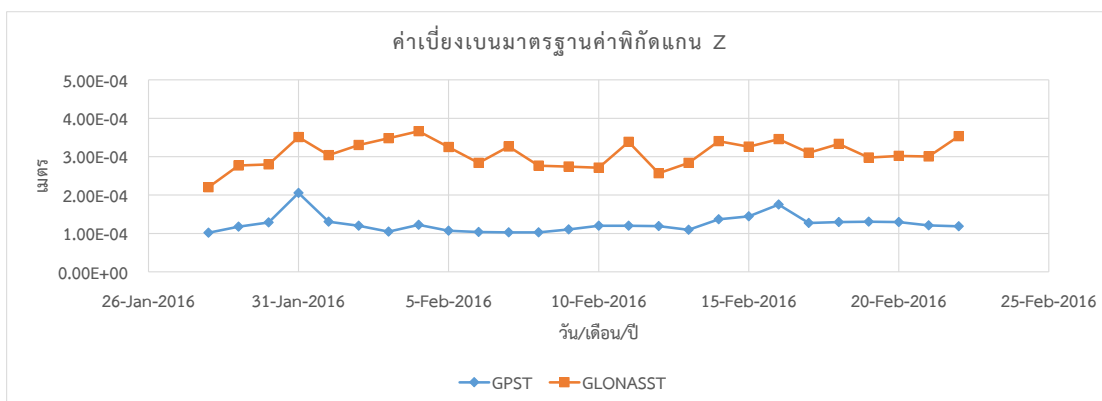




รูปที่ 4.19 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 4.20 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 4.21 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อ นาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

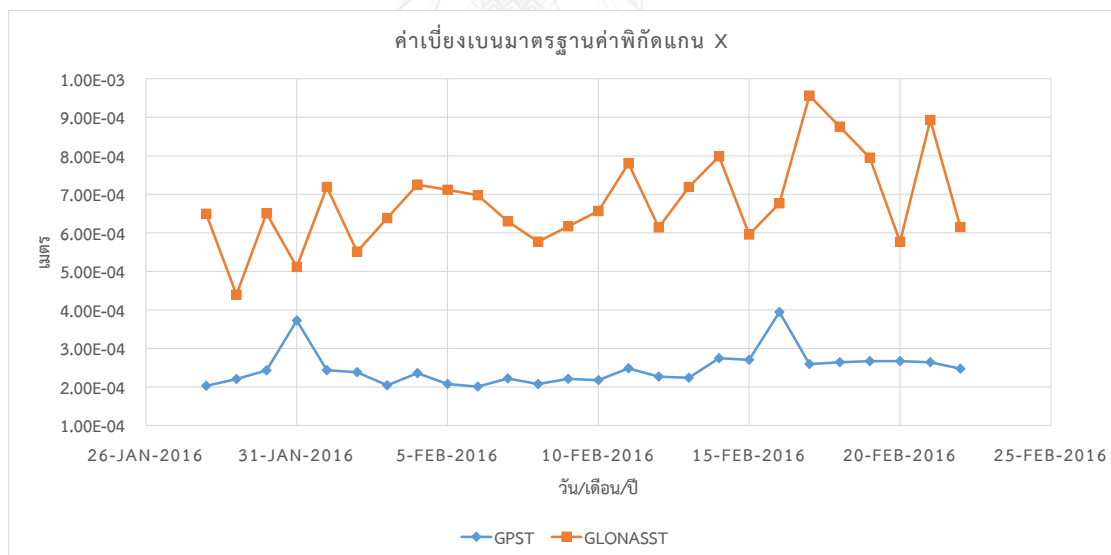
ตารางที่ 23 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อ นาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการ ตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับ สัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลาอ้างอิง GPS และ GLONASS			
เวลาระบบ GPS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.98 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-4}$	$2.50 \times 10^{-4}$
y	$3.22 \times 10^{-4}$	$6.39 \times 10^{-4}$	$3.97 \times 10^{-4}$
z	$1.02 \times 10^{-4}$	$2.05 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ GLONASS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$3.95 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-3}$	$6.87 \times 10^{-4}$
y	$6.47 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-3}$	$8.55 \times 10^{-4}$
z	$2.21 \times 10^{-4}$	$3.66 \times 10^{-4}$	$3.09 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ GLONASS (m)		
x	$-4.38 \times 10^{-4}$		
y	$-4.57 \times 10^{-4}$		
z	$-1.84 \times 10^{-4}$		

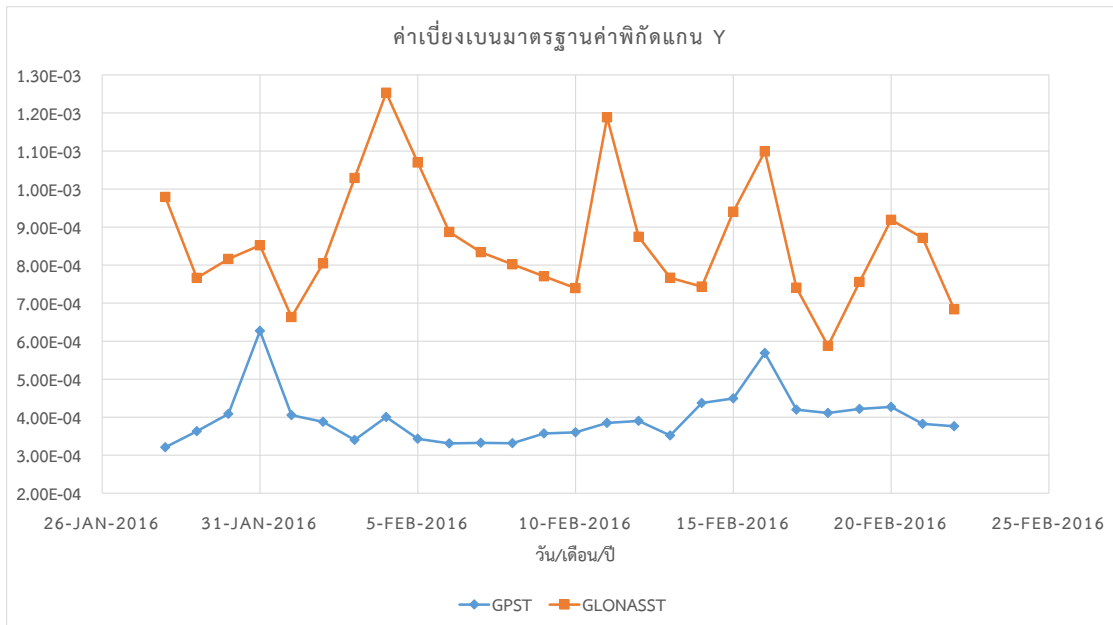
#### 4.3.1.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน

จากรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24 และตารางที่ 24 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ่างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $2.01 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.94 \times 10^{-4}$  เมตร  $3.21 \times 10^{-4}$  ถึง  $6.27 \times 10^{-4}$  เมตร  $1.03 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.01 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

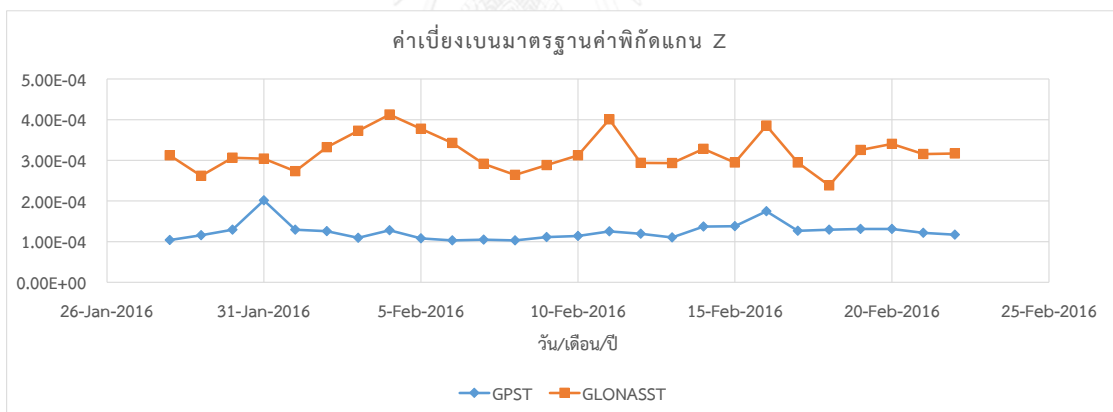
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ่างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS โดยใช้ดาวเทียม GPS และ GLONASS ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $4.40 \times 10^{-4}$  ถึง  $9.56 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.88 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.25 \times 10^{-3}$  เมตร  $2.38 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.13 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS มีค่าที่ต่ำกว่าเวลาระบบ GLONASS ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-4.32 \times 10^{-4}$  -  $4.66 \times 10^{-4}$  และ  $-1.93 \times 10^{-4}$  เมตร



รูปที่ 4.22 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 4.23 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิทักแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS



รูปที่ 4.24 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิทักแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

ตารางที่ 24 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณโดยใช้เวลาอ้างอิง GPS และ GLONASS			
เวลาระบบ GPS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$2.01 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-4}$	$2.48 \times 10^{-4}$
y	$3.21 \times 10^{-4}$	$6.27 \times 10^{-4}$	$3.97 \times 10^{-4}$
z	$1.03 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ GLONASS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$4.40 \times 10^{-4}$	$9.56 \times 10^{-4}$	$6.80 \times 10^{-4}$
y	$5.88 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$8.63 \times 10^{-4}$
z	$2.38 \times 10^{-4}$	$4.13 \times 10^{-4}$	$3.18 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ GLONASS (m)		
x	$-4.32 \times 10^{-4}$		
y	$-4.66 \times 10^{-4}$		
z	$-1.93 \times 10^{-4}$		

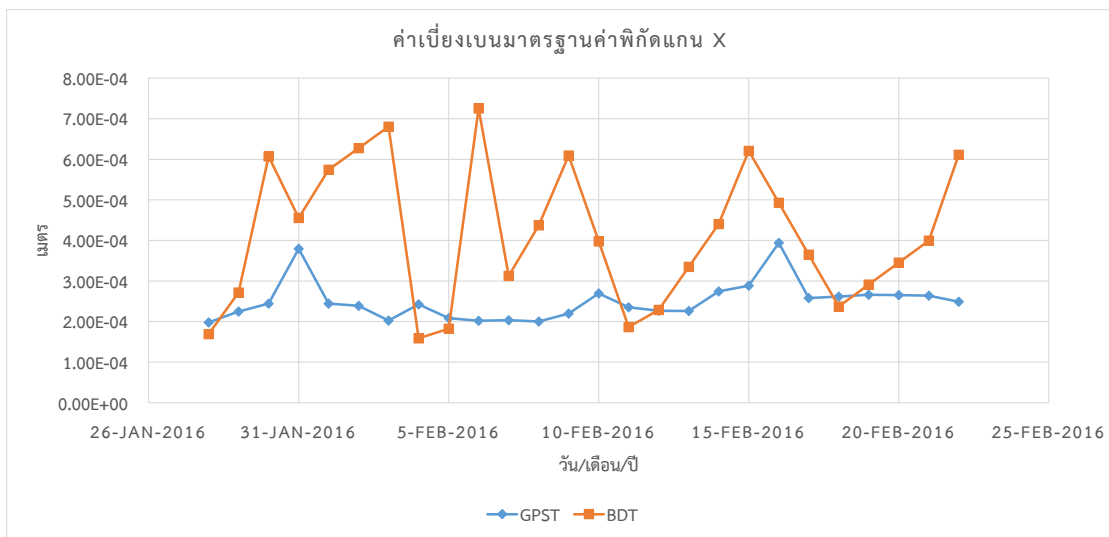
#### 4.3.2 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ BeiDou

##### 4.3.2.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมอะตอมซีเซียม

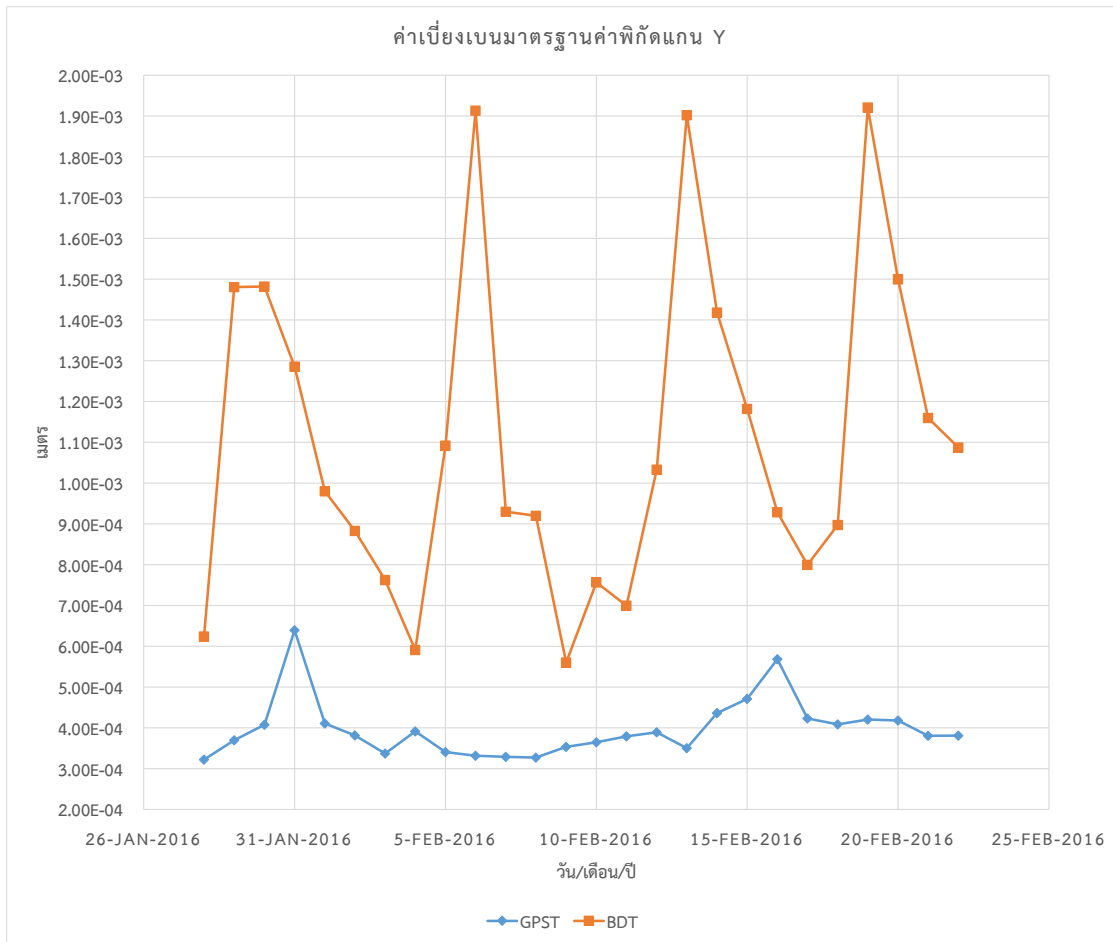
จากรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.27 และตารางที่ 25 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมอะตอมซีเซียม มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.98 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.94 \times 10^{-4}$  เมตร  $3.22 \times 10^{-4}$  ถึง  $6.39 \times 10^{-4}$  เมตร  $1.02 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.05 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou โดยใช้ดาวเทียม GPS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมอะตอมซีเซียม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.59 \times 10^{-4}$  ถึง

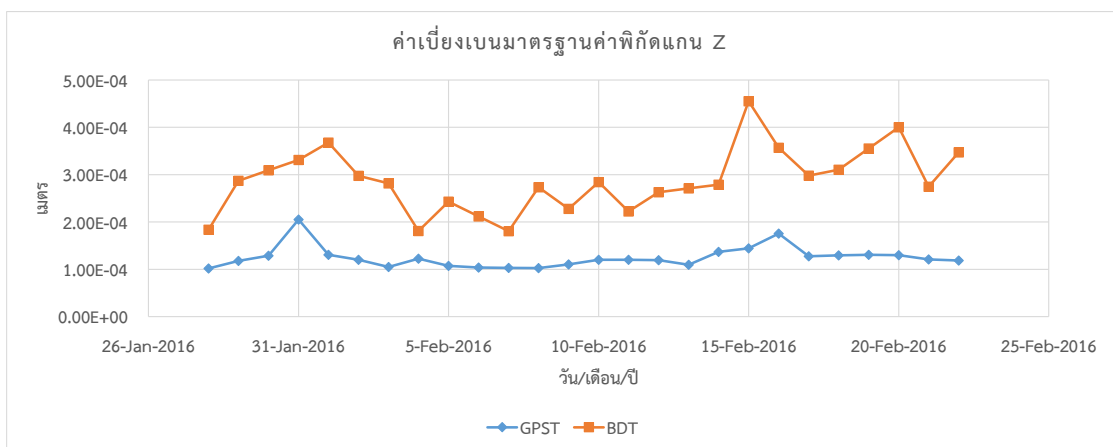
$7.26 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.60 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.92 \times 10^{-3}$  เมตร  $1.81 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.55 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS มีค่าที่ดีกว่าเวลาระบบ BeiDou ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-1.64 \times 10^{-4}$  -  $7.10 \times 10^{-4}$  และ  $-1.61 \times 10^{-4}$  เมตร



รูปที่ 4.25 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



รูปที่ 4.26 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิทักแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



รูปที่ 4.27 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิทักแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

ตารางที่ 25 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

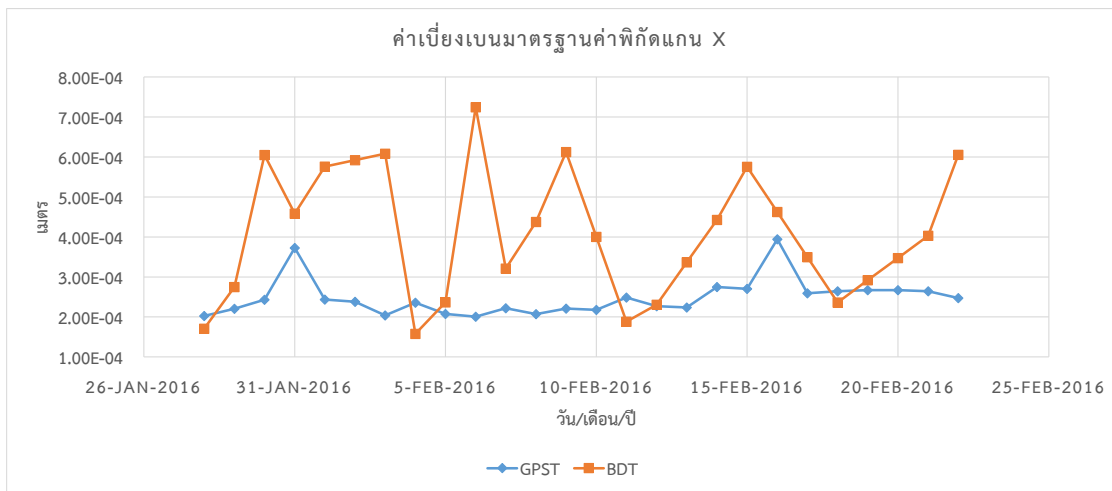
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลาอ้างอิง GPS และ BeiDou			
เวลาระบบ GPS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.98 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-4}$	$2.50 \times 10^{-4}$
y	$3.22 \times 10^{-4}$	$6.39 \times 10^{-4}$	$3.98 \times 10^{-4}$
z	$1.02 \times 10^{-4}$	$2.05 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ BeiDou			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย
x	$1.59 \times 10^{-4}$	$7.26 \times 10^{-4}$	$4.14 \times 10^{-4}$
y	$5.60 \times 10^{-4}$	$1.92 \times 10^{-3}$	$1.11 \times 10^{-3}$
z	$1.81 \times 10^{-4}$	$4.55 \times 10^{-4}$	$2.86 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ BeiDou (m)		
x	$-1.64 \times 10^{-4}$		
y	$-7.10 \times 10^{-4}$		
z	$-1.61 \times 10^{-4}$		

4.3.2.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน จากรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.30 และตารางที่ 26 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $2.01 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.94 \times 10^{-4}$  เมตร  $3.21 \times 10^{-4}$  ถึง  $6.27 \times 10^{-4}$  เมตร  $1.03 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.01 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

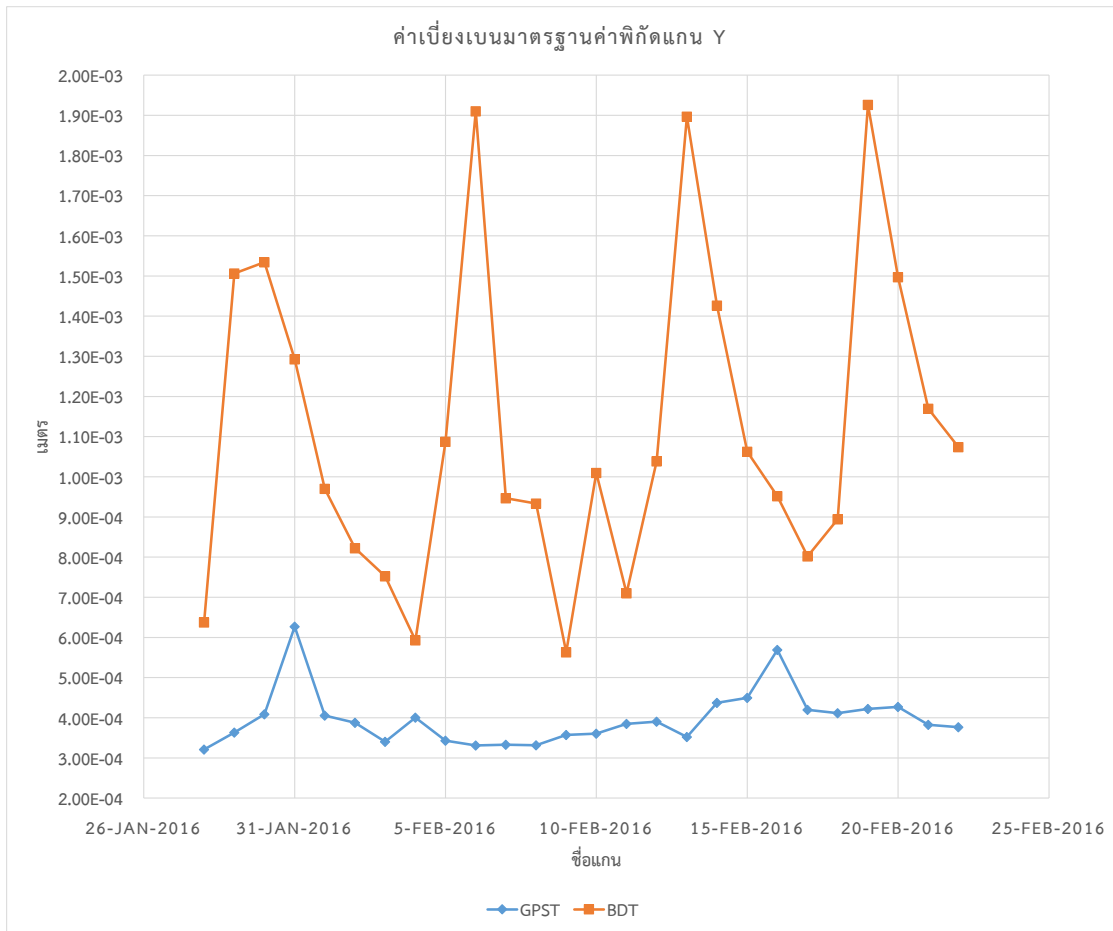
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou โดยใช้ดาวเทียม GPS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.58 \times 10^{-4}$  ถึง  $7.24 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.63 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.93 \times 10^{-3}$  เมตร  $1.79 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.99 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกัน



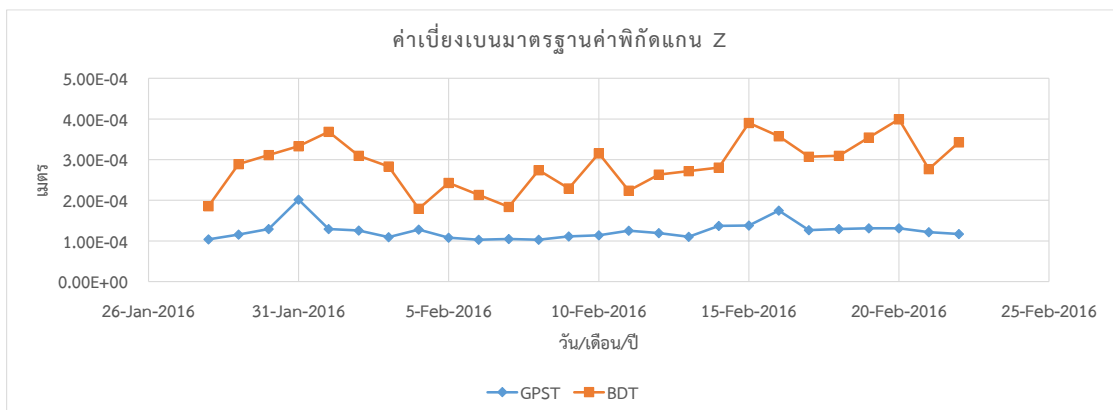
อย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS มีค่าที่ดีกว่าเวลาระบบ BeiDou ซึ่ง  
มีค่าต่างระหว่างเวลาระบบในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-1.62 \times 10^{-4}$   $-7.19 \times 10^{-4}$  และ  $-$   
 $1.61 \times 10^{-4}$  เมตร



รูปที่ 4.28 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้  
นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



รูปที่ 4.29 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ านาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou



รูปที่ 4.30 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ านาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

ตารางที่ 26 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ BeiDou

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณโดยใช้เวลาอ้างอิง GPS และ BeiDou			
เวลาระบบ GPS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$2.01 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-4}$	$2.48 \times 10^{-4}$
y	$3.21 \times 10^{-4}$	$6.27 \times 10^{-4}$	$3.98 \times 10^{-4}$
z	$1.03 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ BeiDou			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.58 \times 10^{-4}$	$7.24 \times 10^{-4}$	$4.09 \times 10^{-4}$
y	$5.63 \times 10^{-4}$	$1.93 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-3}$
z	$1.79 \times 10^{-4}$	$3.99 \times 10^{-4}$	$2.86 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ BeiDou (m)		
x	$-1.62 \times 10^{-4}$		
y	$-7.19 \times 10^{-4}$		
z	$-1.61 \times 10^{-4}$		

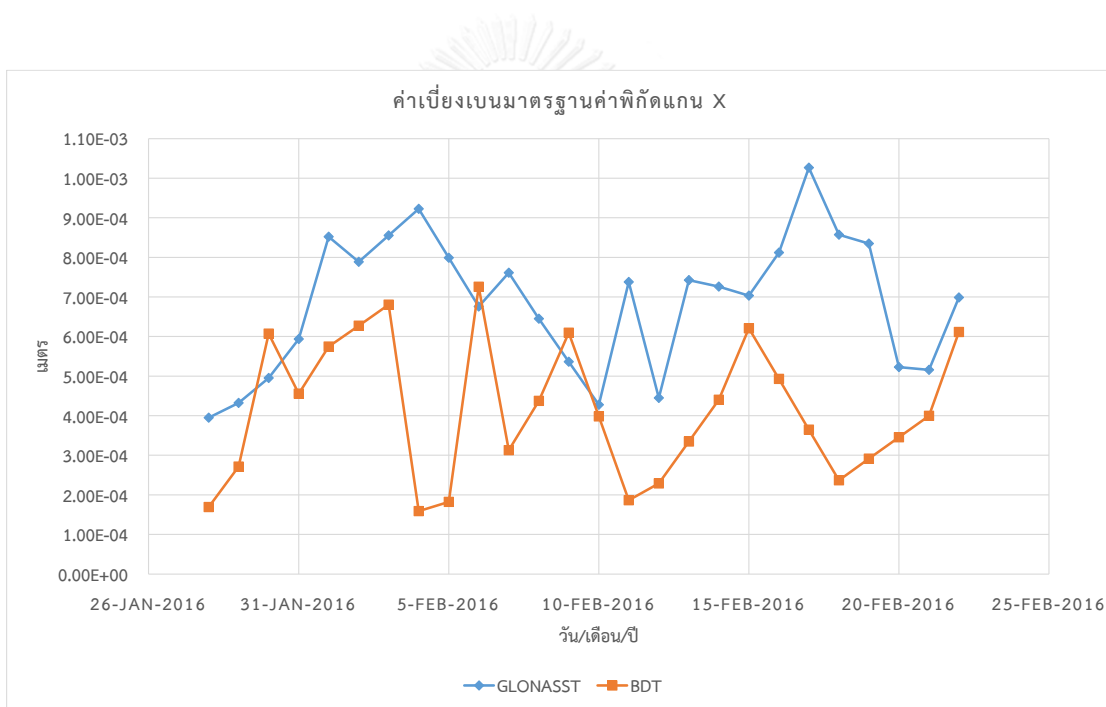
#### 4.3.3 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

##### 4.3.3.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม

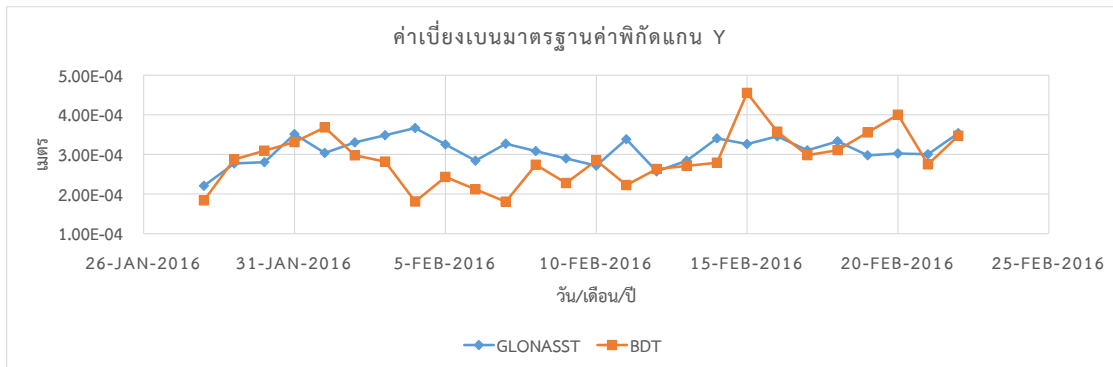
จากรูปที่ 4.31 ถึงรูปที่ 4.33 และตารางที่ 27 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS และดาวเทียม BeiDou โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $3.95 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.03 \times 10^{-4}$  เมตร  $6.47 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.24 \times 10^{-4}$  เมตร  $2.21 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.66 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou โดยใช้ดาวเทียม GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูล

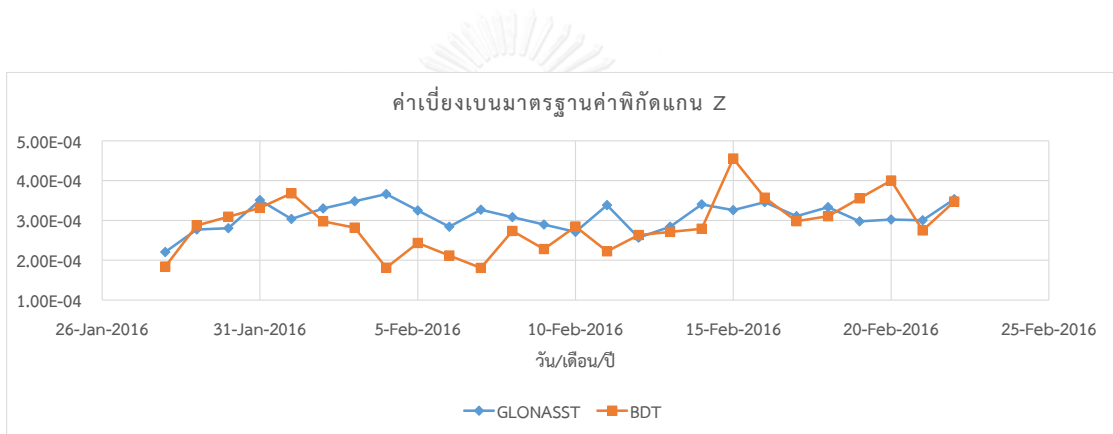
เครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.59 \times 10^{-4}$  ถึง  $7.26 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.60 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.29 \times 10^{-3}$  เมตร  $1.81 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.55 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GLONASS มีค่าที่อยู่ในระดับเดียวกับเวลาระบบ BeiDou ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-2.71 \times 10^{-4}$   $-8.24 \times 10^{-5}$  และ  $-2.21 \times 10^{-5}$  เมตร โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ BeiDou มีค่าที่ดีกว่าเวลาระบบ GLONASS ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-2.71 \times 10^{-4}$   $8.24 \times 10^{-5}$  และ  $-2.21 \times 10^{-5}$  เมตร



รูปที่ 4.31 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.32 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.33 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

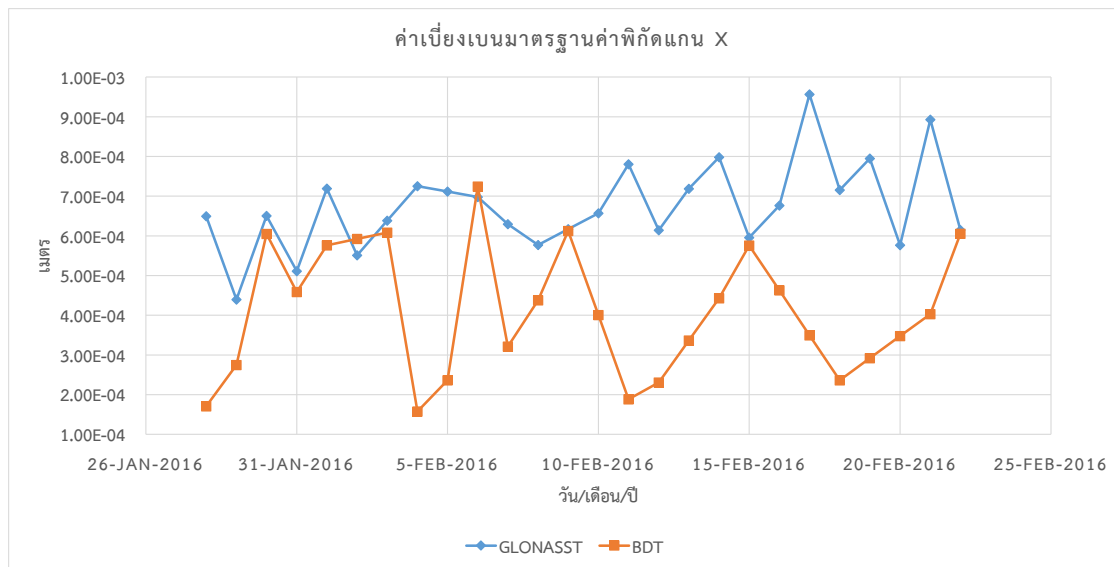
ตารางที่ 27 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลาอ้างอิง GLONASS และ BeiDou			
เวลาระบบ GLONASS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$3.95 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-3}$	$6.85 \times 10^{-4}$
y	$6.47 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-3}$	$8.55 \times 10^{-4}$
z	$2.21 \times 10^{-4}$	$3.66 \times 10^{-4}$	$3.10 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ BeiDou			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.59 \times 10^{-4}$	$7.26 \times 10^{-4}$	$4.14 \times 10^{-4}$
y	$5.60 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$9.37 \times 10^{-4}$
z	$1.81 \times 10^{-4}$	$4.55 \times 10^{-4}$	$2.88 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou (m)		
x	$-2.71 \times 10^{-4}$		
y	$8.24 \times 10^{-5}$		
z	$-2.21 \times 10^{-5}$		

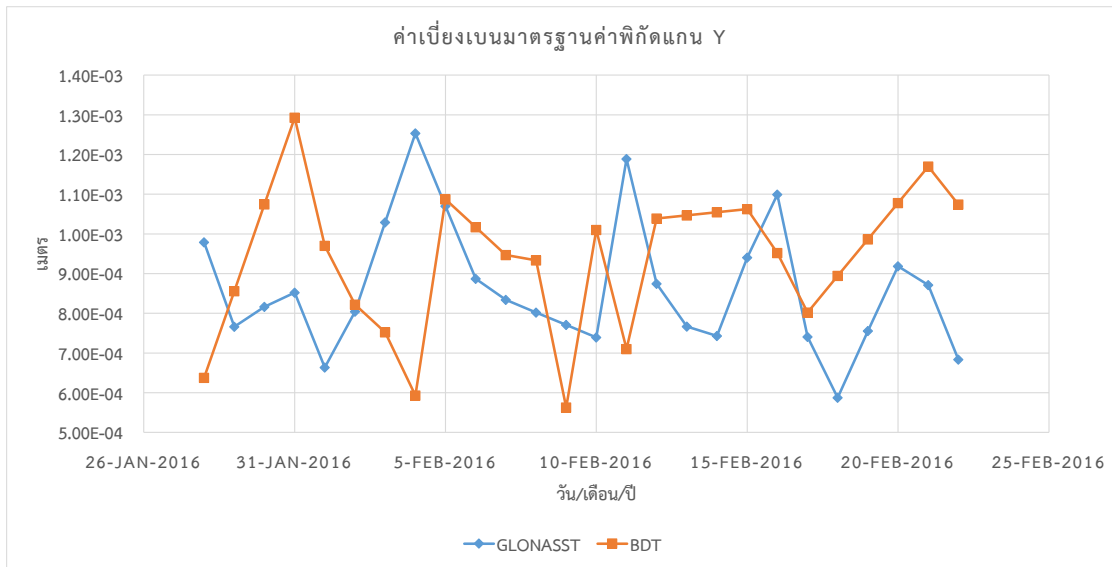
4.3.3.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในจากรูปที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.36 และตารางที่ 28 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $4.40 \times 10^{-4}$  ถึง  $9.56 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.88 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.25 \times 10^{-4}$  เมตร  $2.38 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.13 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z เวลาระบบ BeiDou โดยใช้ดาวเทียม GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.58 \times 10^{-4}$  ถึง  $7.24 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.63 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.29 \times 10^{-3}$  เมตร  $1.79 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.99 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่ง

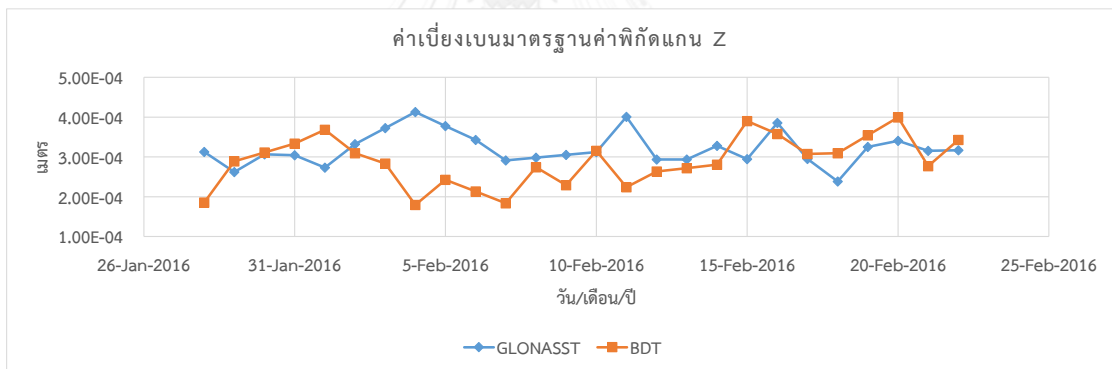
จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ BeiDou มีค่าที่ดีกว่าเวลาระบบ GLONASS ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-2.64 \times 10^{-4}$   $7.64 \times 10^{-5}$  และ  $-3.21 \times 10^{-5}$  เมตร



รูปที่ 4.34 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.35 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.36 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou



ตารางที่ 28 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมในเครื่องรับสัญญาณโดยใช้เวลาอ้างอิง GLONASS และ BeiDou			
เวลาระบบ GLONASS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$4.40 \times 10^{-4}$	$9.56 \times 10^{-4}$	$6.73 \times 10^{-4}$
y	$5.88 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$8.63 \times 10^{-4}$
z	$2.38 \times 10^{-4}$	$4.13 \times 10^{-4}$	$3.20 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ BeiDou			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.58 \times 10^{-4}$	$7.24 \times 10^{-4}$	$4.09 \times 10^{-4}$
y	$5.63 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$9.39 \times 10^{-4}$
z	$1.79 \times 10^{-4}$	$3.99 \times 10^{-4}$	$2.88 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou (m)		
x	$-2.64 \times 10^{-4}$		
y	$7.64 \times 10^{-4}$		
z	$-3.21 \times 10^{-4}$		

#### 4.3.4 ประมวลผลโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

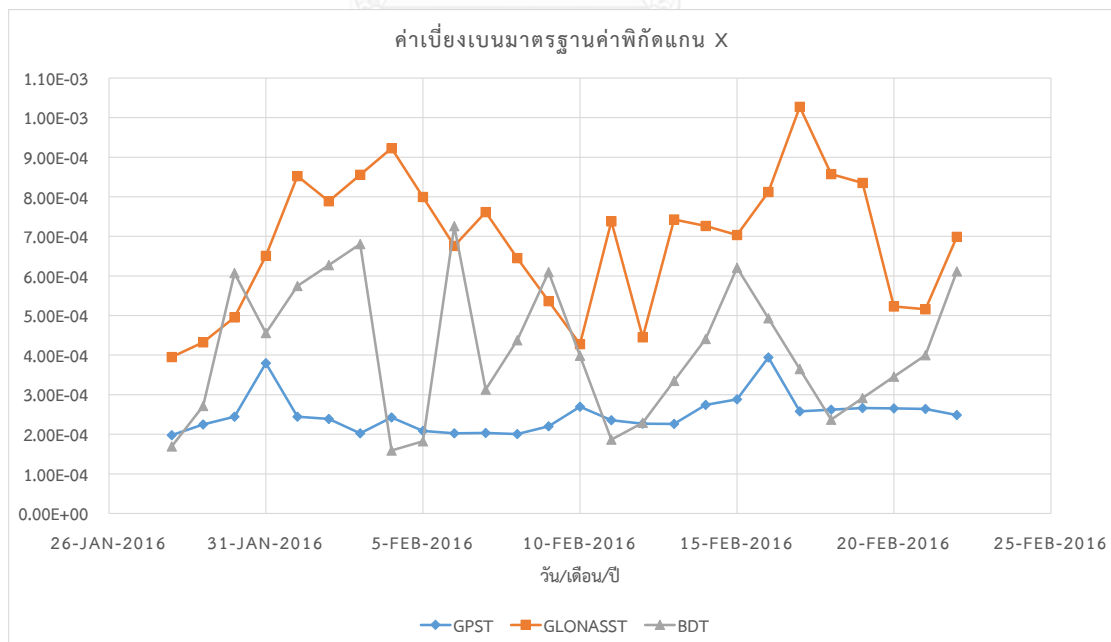
##### 4.3.4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมอะตอมซีเซียม

จากรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.39 และตารางที่ 28 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมอะตอมซีเซียม มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.98 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.94 \times 10^{-4}$  เมตร  $3.22 \times 10^{-4}$  ถึง  $6.39 \times 10^{-4}$  เมตร  $1.02 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.05 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

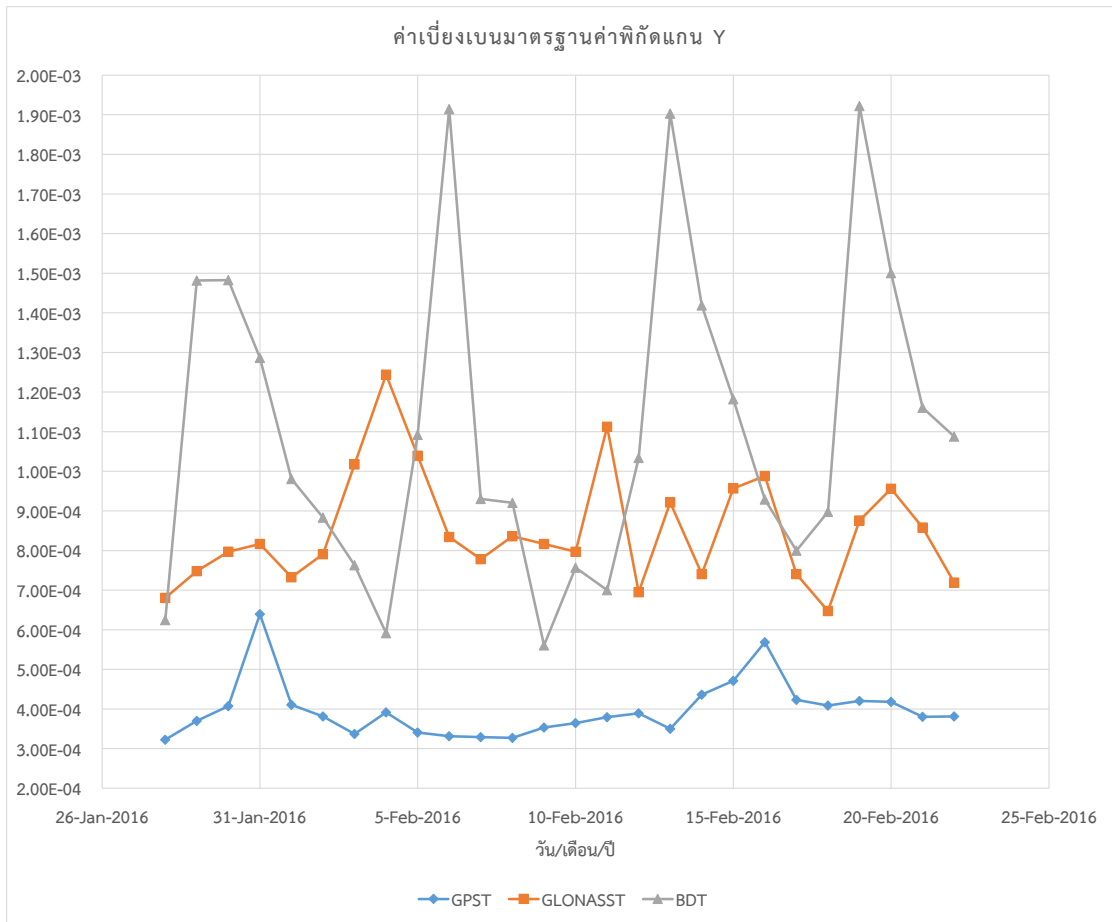
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS โดยใช้ดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จาก

ข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $3.95 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.03 \times 10^{-3}$  เมตร  $6.47 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.24 \times 10^{-3}$  เมตร  $2.21 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.66 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

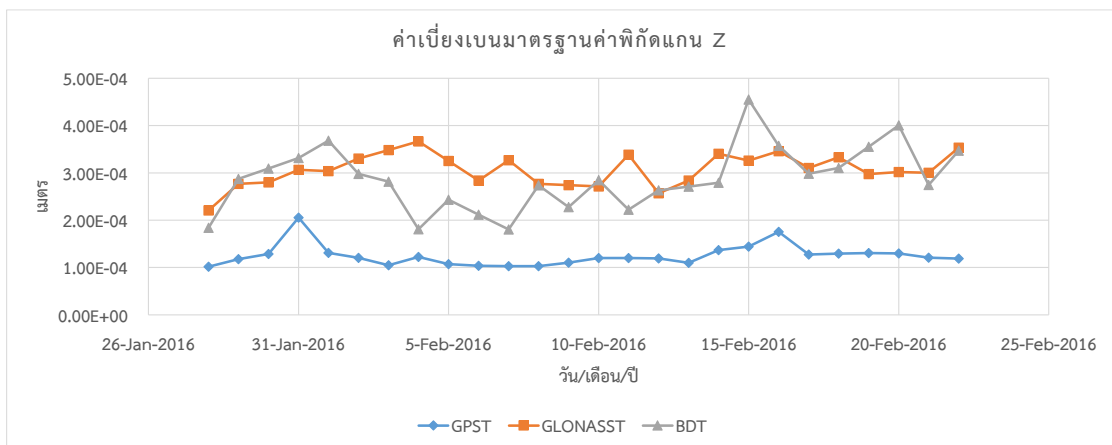
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou โดยใช้ดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.59 \times 10^{-4}$  ถึง  $7.26 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.61 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.92 \times 10^{-3}$  เมตร  $1.81 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.55 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS จะมีค่าที่เสถียรและถูกต้องกว่า GLONASS และ เวลาระบบ BeiDou โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS มีค่าที่ต่ำกว่าเวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบ GPS และ GLONASS ในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-4.38 \times 10^{-4}$   $-4.54 \times 10^{-4}$  และ  $-1.82 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ GPS และ BeiDou ในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-1.65 \times 10^{-4}$   $-7.10 \times 10^{-4}$  และ  $-1.64 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou ในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-2.73 \times 10^{-4}$   $-2.56 \times 10^{-4}$  และ  $-1.86 \times 10^{-5}$  เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.38 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิทักแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou



รูปที่ 4.39 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิทักแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

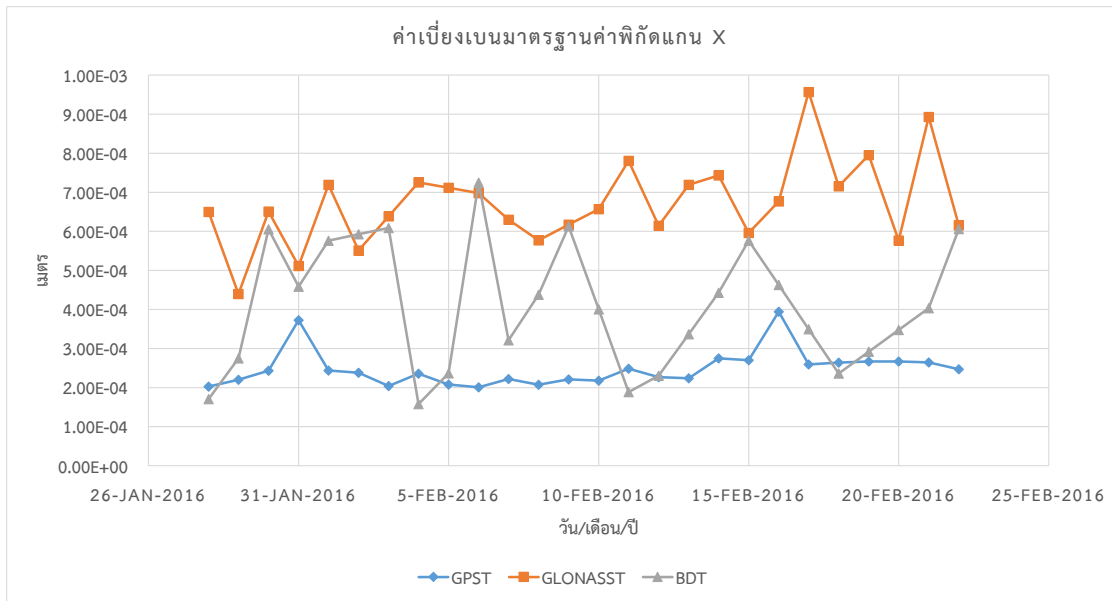
ตารางที่ 28 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลาอ้างอิง GPS GLONASS และ BeiDou			
เวลาระบบ GPS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.98 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-4}$
y	$3.22 \times 10^{-4}$	$6.39 \times 10^{-3}$	$3.97 \times 10^{-4}$
z	$1.02 \times 10^{-4}$	$2.05 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ GLONASS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$3.95 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-3}$	$6.87 \times 10^{-4}$
y	$6.47 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-3}$	$8.52 \times 10^{-4}$
z	$2.21 \times 10^{-4}$	$3.66 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ BeiDou			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.59 \times 10^{-4}$	$7.26 \times 10^{-4}$	$4.14 \times 10^{-4}$
y	$5.61 \times 10^{-4}$	$1.92 \times 10^{-3}$	$1.11 \times 10^{-3}$
z	$1.81 \times 10^{-4}$	$4.55 \times 10^{-4}$	$2.88 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ GLONASS (m)		
x	$-4.38 \times 10^{-4}$		
y	$-4.54 \times 10^{-4}$		
z	$-1.82 \times 10^{-4}$		
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ BeiDou (m)		
x	$-1.65 \times 10^{-4}$		
y	$-7.10 \times 10^{-4}$		
z	$-1.64 \times 10^{-4}$		
พิกัด	เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou (m)		
x	$2.73 \times 10^{-4}$		
y	$-2.56 \times 10^{-4}$		
z	$1.86 \times 10^{-5}$		

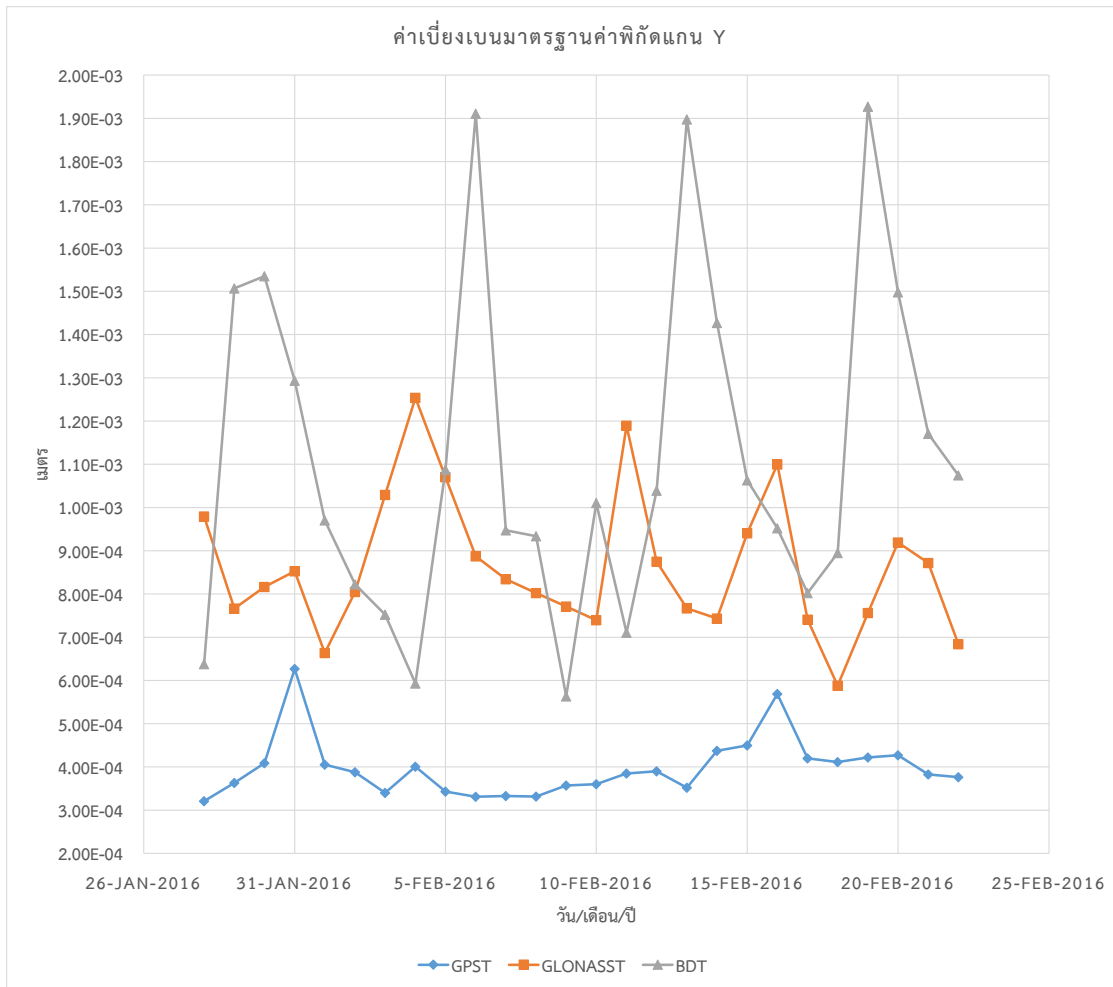
4.3.4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน จากรูปที่ 4.40 ถึงรูปที่ 4.42 และตารางที่ 29 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GPS โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $2.01 \times 10^{-4}$  ถึง  $3.94 \times 10^{-4}$  เมตร  $3.21 \times 10^{-4}$  ถึง  $6.27 \times 10^{-4}$  เมตร  $1.03 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.02 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS โดยใช้ดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $4.04 \times 10^{-4}$  ถึง  $9.57 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.88 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.25 \times 10^{-3}$  เมตร  $2.38 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.13 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ

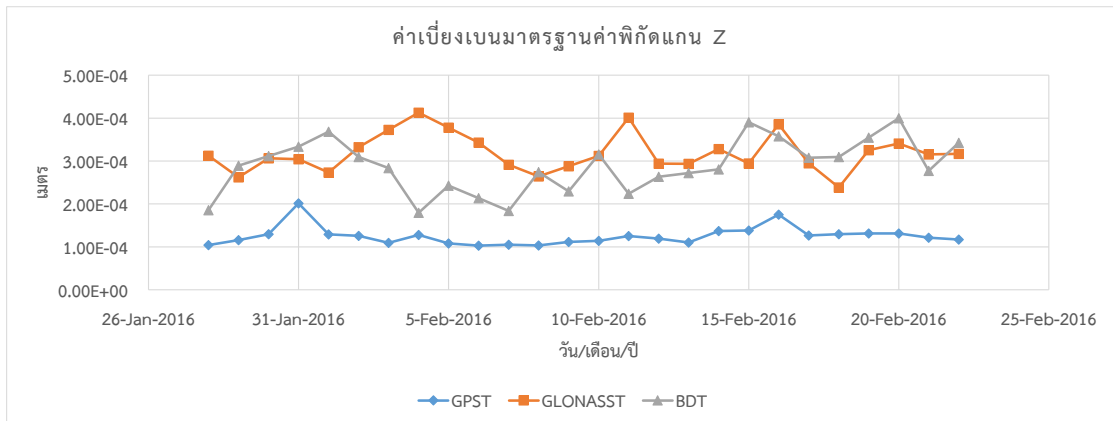
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X Y Z อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม BeiDou โดยใช้ดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่  $1.58 \times 10^{-4}$  ถึง  $7.25 \times 10^{-4}$  เมตร  $5.63 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.93 \times 10^{-3}$  เมตร  $1.79 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.00 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดของทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS จะมีค่าที่เสถียรและถูกต้องกว่า GLONASS และ เวลาระบบ BeiDou โดยค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS มีค่าที่ดีกว่าเวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ซึ่งมีค่าต่างระหว่างเวลาระบบ GPS และ GLONASS ในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-4.24 \times 10^{-4}$  -  $4.66 \times 10^{-4}$  และ  $-1.93 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ GPS และ BeiDou ในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-1.62 \times 10^{-4}$  -  $-7.19 \times 10^{-4}$  และ  $-1.63 \times 10^{-4}$  เมตร ตามลำดับ ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou ในแนวแกน x y z เฉลี่ย  $-2.62 \times 10^{-4}$  -  $-2.53 \times 10^{-4}$  และ  $3.00 \times 10^{-5}$  เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.40 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน X ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้  
นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ  
BeiDou



รูปที่ 4.41 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Y ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้  
 นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ  
 BeiDou



รูปที่ 4.42 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดแกน Z ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นานาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou





ตารางที่ 29 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่างระหว่างค่าสูงสุด ต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัด ประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณโดยใช้เวลาอ้างอิง GPS GLONASS และ BeiDou			
เวลาระบบ GPS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$2.01 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-4}$	$2.48 \times 10^{-4}$
y	$3.21 \times 10^{-4}$	$6.27 \times 10^{-4}$	$3.97 \times 10^{-4}$
z	$1.03 \times 10^{-4}$	$2.02 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ GLONASS			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$4.40 \times 10^{-4}$	$9.57 \times 10^{-4}$	$6.71 \times 10^{-4}$
y	$5.88 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$8.63 \times 10^{-4}$
z	$2.38 \times 10^{-4}$	$4.13 \times 10^{-4}$	$3.19 \times 10^{-4}$
เวลาระบบ BeiDou			
พิกัด	ค่าต่ำสุด (m)	ค่าสูงสุด (m)	ค่าเฉลี่ย (m)
x	$1.58 \times 10^{-4}$	$7.25 \times 10^{-4}$	$4.10 \times 10^{-4}$
y	$5.63 \times 10^{-4}$	$1.93 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-3}$
z	$1.79 \times 10^{-4}$	$4.00 \times 10^{-4}$	$2.88 \times 10^{-4}$
ค่าต่างระหว่างเวลาระบบ			
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ GLONASS (m)		
x	$-4.24 \times 10^{-4}$		
y	$-4.66 \times 10^{-4}$		
z	$-1.93 \times 10^{-4}$		
พิกัด	เวลาระบบ GPS และ BeiDou (m)		
x	$-1.62 \times 10^{-4}$		
y	$-7.19 \times 10^{-4}$		
z	$-1.63 \times 10^{-4}$		
พิกัด	เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou (m)		
x	$2.62 \times 10^{-4}$		
y	$-2.53 \times 10^{-4}$		
z	$3.00 \times 10^{-5}$		

จากผลการศึกษาค่าพิกัด ค่าเฉลี่ยกำลังสอง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถอธิบายได้ว่า ค่าพิกัดในแต่ละเวลาระบบ ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนส่งผลออกมาเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าพิกัด เพราะค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดแสดงค่าออกมาในแนว 2 3 และ 4 มิติของข้อมูลที่อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS และดาวเทียม BeiDou ไม่แตกต่างกัน แต่ในเวลาระบบ GPS มีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 4 มิติที่แตกต่างออกไป เนื่องจากค่าเวลา (t) ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA มีค่าอยู่ที่ 0.62 เมตร ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด 4 มิติมีค่า 0.44 เมตร ซึ่งน้อยกว่าค่าที่อ้างอิงเวลาระบบจากดาวเทียม GLONASS และ BeiDou สำหรับเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และสำหรับค่าที่ได้จากข้อมูลเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนค่าเวลาของเวลาระบบ BeiDou ที่แตกต่างออกไปเป็นค่าปกติของเวลาระบบ BeiDou โดยการตรวจสอบค่าต่างระหว่างเวลาของเวลาระบบ GPS และ BeiDou ที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Chunhao Han (Chunhao et al., 2011) โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบดาวเทียม BeiDou และเวลาระบบ BeiDou เมื่อดูผลการศึกษาค่าต่างของเวลาของเวลาระบบ GPS และ BeiDou พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA และผลลัพธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทั้ง 3 เวลาระบบพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาระบบ GPS ให้ความเสถียร และความถูกต้องมากกว่าเวลาระบบอื่นๆ โดยพิจารณาจากค่าที่เข้าใกล้ 0 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบทั้ง 3 เวลาระบบ จะเห็นได้ว่าเวลาระบบ GPS ดีที่สุด รองลงมาคือเวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ตามลำดับ สามารถเห็นได้ชัดเจนว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาระบบ BeiDou ในแนวแกน x และ y มีค่าแกว่งมากเมื่อเทียบกับแนวแกน z ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าพิกัดจากเวลาระบบ BeiDou ควรจะให้ค่าออกมาไม่ดี แต่เมื่อดูค่าพิกัดที่ออกมาในหัวข้อ 4.1 กลับไม่มีความแตกต่างกับเวลาระบบอื่นๆ

#### 4.4 ค่าเวลาของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou

ค่าเวลาเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงเวลาของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณ และเวลาของนาฬิกา ดาวเทียมมีความคลาดเคลื่อน ยิ่งค่าเวลามีค่าน้อยก็จะทำให้ได้ค่าพิกัดที่ดีขึ้นด้วย โดยสามารถแบ่ง ออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

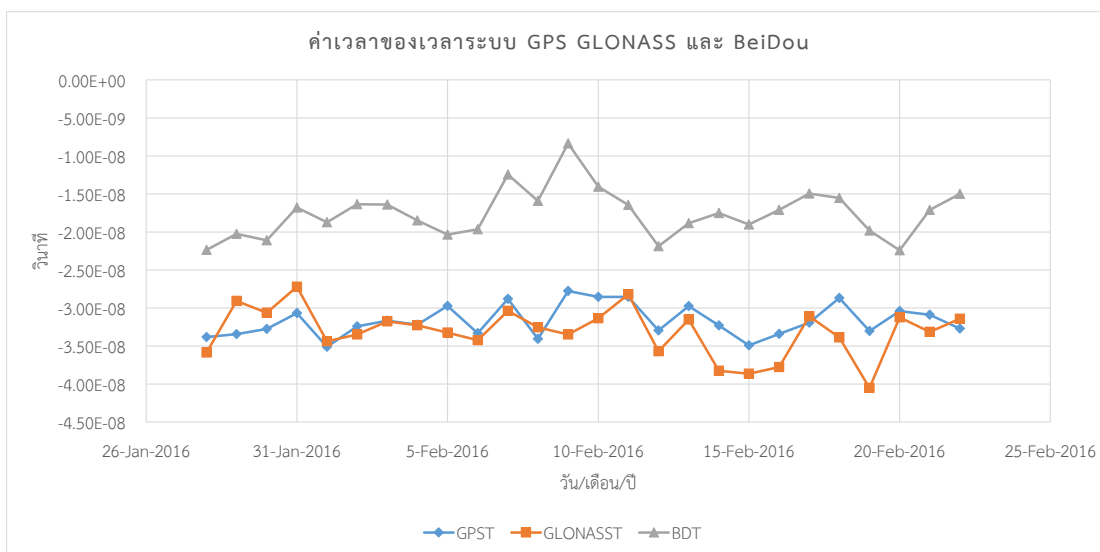
กรณีที่ 1 ค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกา อะตอมซีเซียม

กรณีที่ 2 ค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน

##### 4.4.1 ข้อมูลค่าเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

จากรูปที่ 4.43 แสดงค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลของข้อมูลจาก เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou จะเห็นได้ว่า ค่าเวลาของเวลาระบบ GPS และ GLONASS มีความ ใกล้เคียงกัน แต่ในเวลาระบบ BeiDou มีค่าที่แตกต่างออกไป ค่าต่ำสุด ของเวลา ระบบ GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $-3.51 \times 10^{-8}$   $-4.05 \times 10^{-8}$  และ  $-2.24 \times 10^{-8}$  วินาที และค่าสูงสุดอยู่ที่  $-2.78 \times 10^{-8}$   $-2.72 \times 10^{-8}$  และ  $-8.34 \times 10^{-9}$  วินาที

ดังแสดงในตารางที่ 30 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.43 จะแสดงให้เห็นว่าค่าเวลา จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS และเวลา ระบบ GLONASS ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS เหมือนกัน มีค่าที่แยกว่าเวลาระบบ BeiDou



รูปที่ 4.43 ค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม

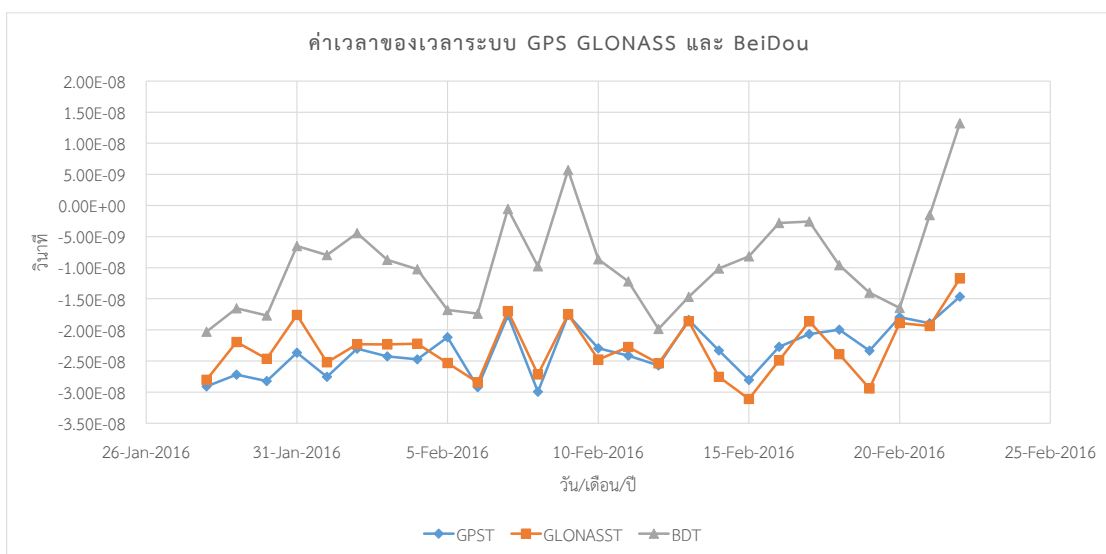
ตารางที่ 30 ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าเวลา เวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียม

ค่าเวลาประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนานาฬิกาอะตอมซีเซียมโดยใช้เวลาอ้างอิง GPS GLONASS และ BeiDou			
เวลาระบบ GPS			
ค่าต่ำสุด (s)	ค่าสูงสุด (s)	ค่าเฉลี่ย (s)	ค่าต่าง (s)
$-3.51 \times 10^{-8}$	$-2.78 \times 10^{-8}$	$-3.17 \times 10^{-8}$	$7.32 \times 10^{-9}$
เวลาระบบ GLONASS			
ค่าต่ำสุด (s)	ค่าสูงสุด (s)	ค่าเฉลี่ย (s)	ค่าต่าง (s)
$-4.05 \times 10^{-8}$	$-2.72 \times 10^{-8}$	$-3.31 \times 10^{-8}$	$1.33 \times 10^{-8}$
เวลาระบบ BeiDou			
ค่าต่ำสุด (s)	ค่าสูงสุด (s)	ค่าเฉลี่ย (s)	ค่าต่าง (s)
$-2.24 \times 10^{-8}$	$-8.34 \times 10^{-9}$	$-1.76 \times 10^{-8}$	$1.41 \times 10^{-8}$

#### 4.4.2 ข้อมูลค่าเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน

จากรูปที่ 4.44 แสดงค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ ระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou จะเห็นได้ว่า ค่าเวลาของเวลาระบบ GPS และ GLONASS

มีความใกล้เคียงกัน แต่ในเวลาระบบ BeiDou มีค่าที่แตกต่างออกไป ค่าต่ำสุด ของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou อยู่ที่  $-2.99 \times 10^{-8}$   $-3.11 \times 10^{-8}$  และ  $-2.03 \times 10^{-8}$  วินาที และค่าสูงสุดอยู่ที่  $-1.47 \times 10^{-8}$   $-1.17 \times 10^{-8}$  และ  $-1.32 \times 10^{-8}$  วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 31 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.44 จะแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้เสาอากาศภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS ที่ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม GPS และ GLONASS เหมือนกัน มีค่าที่ต่ำกว่าเวลาระบบ BeiDou



รูปที่ 4.44 ค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้เสาอากาศภายในเครื่องรับสัญญาณ

ตารางที่ 31 ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าเวลา เวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ

ค่าเวลาประมวลผลจากข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณเวลา อ้างอิง GPS GLONASS และ BeiDou			
เวลาระบบ GPS			
ค่าต่ำสุด (s)	ค่าสูงสุด (s)	ค่าเฉลี่ย (s)	ค่าต่าง (s)
$-2.99 \times 10^{-8}$	$-1.47 \times 10^{-8}$	$-2.32 \times 10^{-8}$	$1.53 \times 10^{-8}$
เวลาระบบ GLONASS			
ค่าต่ำสุด (s)	ค่าสูงสุด (s)	ค่าเฉลี่ย (s)	ค่าต่าง (s)
$-3.11 \times 10^{-8}$	$-1.17 \times 10^{-8}$	$-2.29 \times 10^{-8}$	$1.94 \times 10^{-8}$
เวลาระบบ BeiDou			
ค่าต่ำสุด (s)	ค่าสูงสุด (s)	ค่าเฉลี่ย (s)	ค่าต่าง (s)
$-2.03 \times 10^{-8}$	$1.32 \times 10^{-8}$	$-9.18 \times 10^{-9}$	$3.35 \times 10^{-8}$

#### 4.5 ค่าความถูกต้องของเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou

การตรวจสอบค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA สามารถบอกได้ด้วยค่าความถูกต้องของเวลาระบบ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ เวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou ซึ่งแต่ละเวลาระบบจะมีข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมซีซีเอ็ม และเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน สามารถแสดงได้ดังนี้

##### 4.5.1 เวลาระบบ GPS

###### 4.5.1.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมซีซีเอ็ม

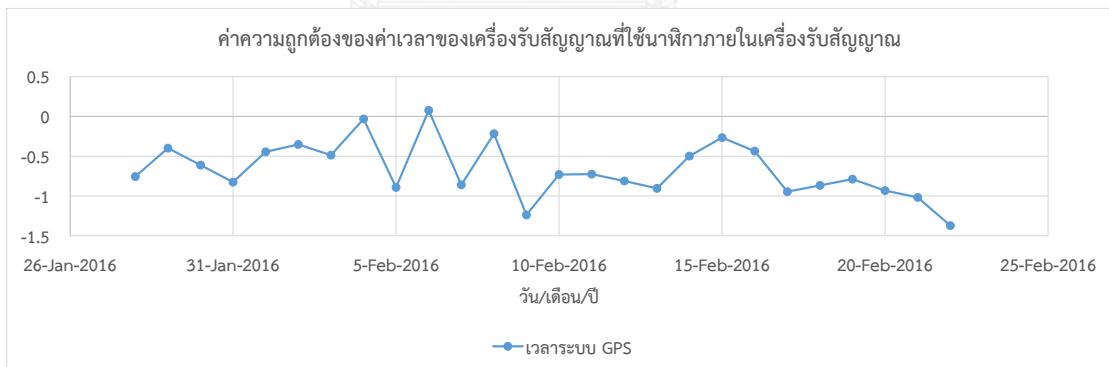
จากรูปที่ 4.45 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เวลาระบบ GPS ของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมซีซีเอ็ม มีข้อมูลของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมซีซีเอ็มอยู่ที่  $-0.5$  ถึง  $0$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA มีความถูกต้อง



รูปที่ 4.45 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA แบบต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS

#### 4.5.1.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน

จากรูปที่ 4.46 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เวลาระบบ GPS ของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ มีข้อมูลของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม อยู่ที่ -1.5 ถึง 0 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA มีความถูกต้อง

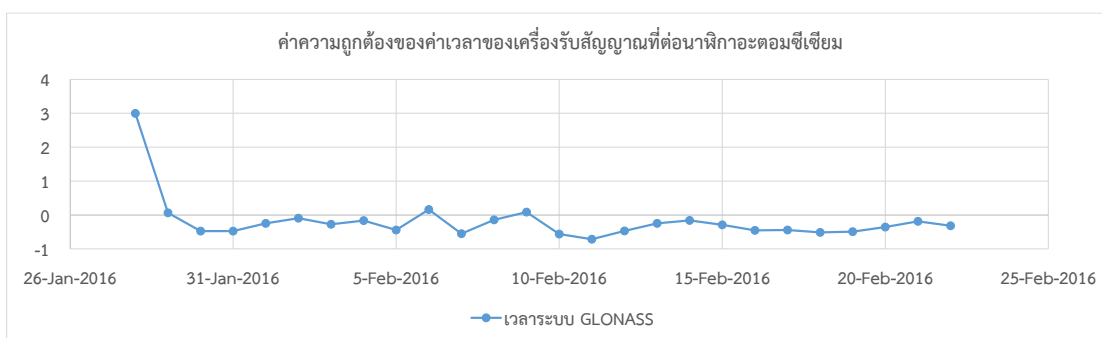


รูปที่ 4.46 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA แบบใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาระบบ GPS

#### 4.5.2 เพลาระบบ GLONASS

##### 4.5.2.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม

จากรูปที่ 4.47 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เพลาระบบ GLONASS ของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีข้อมูลอยู่ที่ -1 ถึง 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA มีความเสถียร

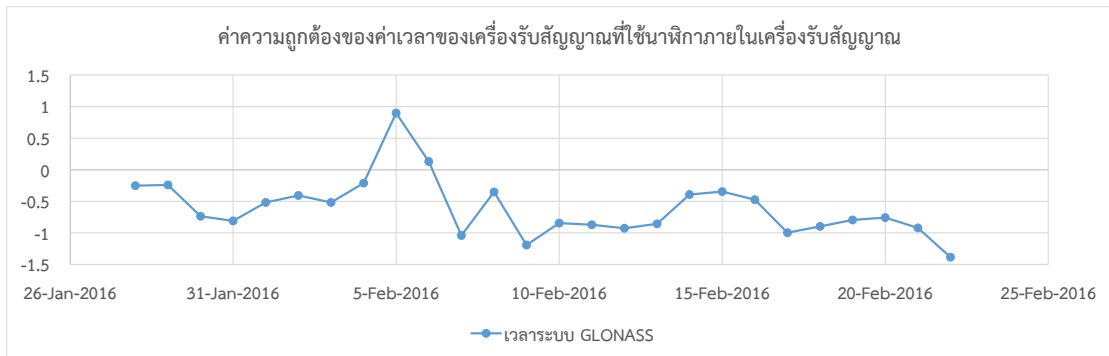


รูปที่ 4.47 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA แบบต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม เพลาระบบ GLONASS

##### 4.5.2.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน

จากรูปที่ 4.48 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เพลาระบบ GLONASS ของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ นาฬิกาภายใน มีข้อมูลของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียมอยู่ที่ -1.5 ถึง 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA มีความเสถียรน้อยกว่าค่าความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อนาฬิกาอะตอมซีเซียม



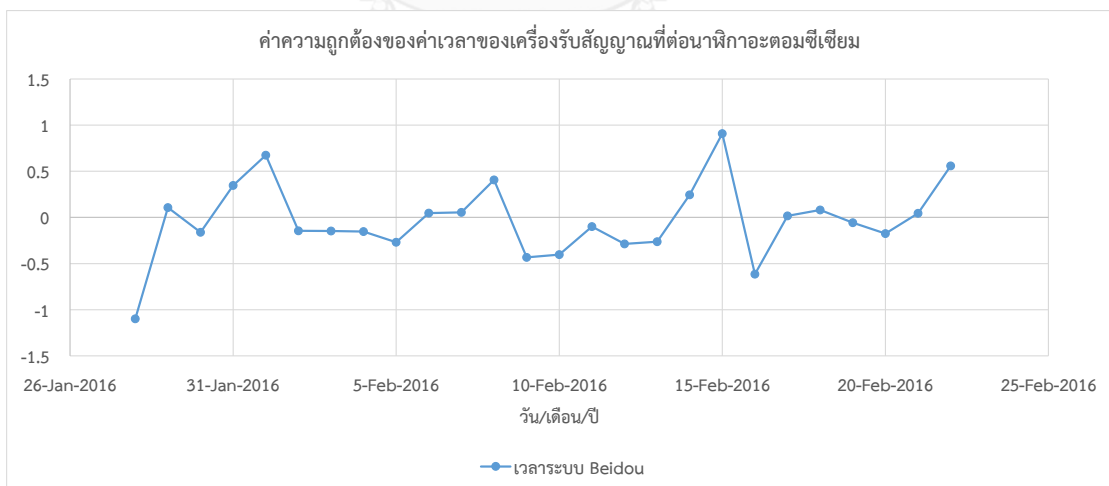


รูปที่ 4.48 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA แบบใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาในระบบ GLONASS

#### 4.5.3 เวลาในระบบ BeiDou

##### 4.6.3.1 เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับดาวเทียมเอเชีย

จากรูปที่ 4.49 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เวลาในระบบ BeiDou ของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมเอเชีย มีข้อมูลอยู่ที่ -1 ถึง 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA มีความเสถียร



รูปที่ 4.49 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA แบบต่อดาวเทียมเอเชีย เวลาในระบบ BeiDou

#### 4.6.3.2 เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายใน

จากรูปที่ 4.50 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เวลาในระบบ GLONASS ของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ มีข้อมูลอยู่ที่ -1.5 ถึง 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA มีความเสถียรน้อยกว่าค่าความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมซีเซียม



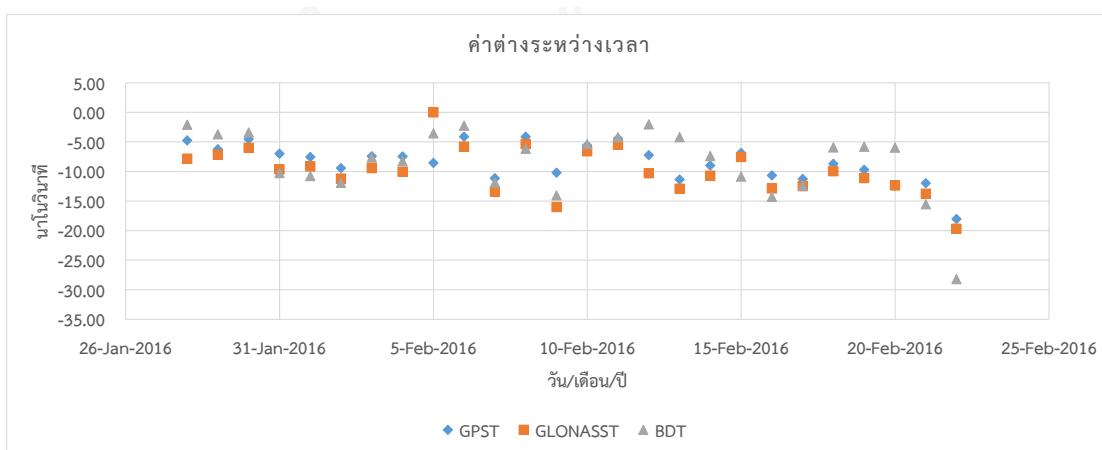
รูปที่ 4.50 ค่าความถูกต้องของค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA แบบใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ เวลาในระบบ BeiDou

จากผลการศึกษาค่าเวลาของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ชุด และค่าความถูกต้องของเวลาระบบทั้ง 3 เวลาระบบ ในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าค่าเวลาของเวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ค่าเวลาของเวลาระบบ BeiDou มีค่าที่แตกต่างออกไปเห็นได้จากเส้นกราฟของค่าเวลาของเวลาระบบ BeiDou มีค่าเข้าใกล้ 0 มากกว่า ซึ่งหมายความว่าดาวเทียม เครื่องรับสัญญาณ และนาฬิกาดาวเทียมมีความต่างน้อยกว่าค่าต่างของนาฬิกาที่เครื่องรับสัญญาณและนาฬิกาดาวเทียมที่ได้จากเวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS ทั้งชุดข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อดาวเทียมซีเซียม และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA มีค่าอยู่ไม่เกิน 100 นาโนวินาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chunhao Han (Chunhao et al., 2011) โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบดาวเทียม BeiDou และเวลาระบบ BeiDou ผลการศึกษาจะได้ว่า ค่าต่างของเวลาของเวลาสากลเชิงพิกัด (UTC) และเวลาระบบ BeiDou พบว่ามีค่าต่างไม่เกิน 100 นาโนวินาที และจากกราฟค่าเวลาจะเห็นได้ว่าเวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS มีค่า

เวลาอยู่ในระดับเดียวกัน สังเกตได้จากเส้นกราฟเกือบจะทับกัน ส่วนค่าความถูกต้องของค่าเวลาจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีตามเวลาระบบ (GPST GLONASS และ BDT) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่าเวลาที่ได้จากข้อมูลของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม มีค่าที่กระจัดกระจายน้อยกว่าค่าที่ได้จากข้อมูลของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ สำหรับเวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS ส่วนเวลาระบบ BeiDou เมื่อพิจารณารูปที่ 4.49 และรูปที่ 4.50 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในด้านความถูกต้องของค่าเวลา โดยค่าที่แสดงในหัวข้อที่ 4.5 เป็นค่าความชันของค่าเวลา ทั้งหมด 26 วัน

#### 4.6 ค่าต่างระหว่างเวลาของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

สำหรับผลของค่าต่างระหว่างเวลาเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA ที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ ประกอบไปด้วยเวลาระบบ GPS เวลาระบบ GLONASS และเวลาระบบ BeiDou โดยในแต่ละเวลาระบบประกอบไปด้วยการประมวลผลด้วยดาวเทียม 1 ระบบ 2 ระบบ และ 3 ระบบ ซึ่งไม่ส่งผลให้ค่าต่างระหว่างเวลามีค่าที่แตกต่างกัน แสดงได้รูปที่ 4.51 เห็นได้ว่าข้อมูลค่าต่างระหว่างเวลาของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมของเวลาระบบ GPS อยู่ในช่วง  $-18.04$  ถึง  $-4.11$  นาโนวินาที เวลาระบบ GLONASS อยู่ที่  $-3.11E-08$  ถึง  $-1.17E-08$  นาโนวินาที และเวลาระบบ BeiDou อยู่ที่  $-28.21$  ถึง  $-2.03$  นาโนวินาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.51 ค่าต่างระหว่างเวลาของเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou

#### 4.7 ค่าเวลาของสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ และค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ สามารถแสดงได้ดังนี้

##### 4.7.1 เวลาระบบ GPS

4.7.1.1 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ

จากตารางที่ 32 ค่าที่ได้จากสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศมีความแตกต่างกับค่าที่ประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA อยู่ที่ -32.0 ถึง -15.5 นาโนวินาที มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ -24.5 นาโนวินาที

ตารางที่ 32 แสดงค่าเวลาของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ เวลา ระบบ GPS

Day	UTC(NIMT)-GPST BIPM (ns)	UTC(NIMT)- GPST PANDA (ns)	Day	UTC(NIMT)-GPST BIPM (ns)	UTC(NIMT)-GPST PANDA (ns)
28-Jan-16	60.7	88.6	10-Feb-16	38.3	64.1
29-Jan-16	57.4	85.6	11-Feb-16	37.6	65.5
30-Jan-16	51.3	77.0	12-Feb-16	32.6	53.9
31-Jan-16	46.4	76.8	13-Feb-16	30.2	54.6
01-Feb-16	43.3	68.3	14-Feb-16	26.1	55.0
02-Feb-16	42.4	68.6	15-Feb-16	20.9	45.5
03-Feb-16	41.4	68.2	16-Feb-16	16.9	39.2
04-Feb-16	40.5	63.7	17-Feb-16	14.9	35.4
05-Feb-16	39.7	70.8	18-Feb-16	11.4	35.5
06-Feb-16	38.6	58.4	19-Feb-16	6.3	27.1
07-Feb-16	38.4	70.4	20-Feb-16	2.6	24.8
08-Feb-16	38.5	57.9	21-Feb-16	0.9	17.5
09-Feb-16	37.2	63.2	22-Feb-16	-2.5	13.0

4.7.1.2 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมในเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ

จากตารางที่ 33 ค่าที่ได้จากสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศมีความแตกต่างกับค่าที่ประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA อยู่ที่ -287.0 ถึง -209.9 นาโนวินาที มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ -238.9 นาโนวินาที

ตารางที่ 33 แสดงค่าเวลาของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมในเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ เวลาระบบ GPS

Day	UTC(NIMT)- GLONASST BIPM (ns)	UTC(NIMT)- GLONASST PANDA (ns)	Day	UTC(NIMT)- GLONASST BIPM (ns)	UTC(NIMT)- GLONASST PANDA (ns)
28-Jan-16	-182.7	83.3	10-Feb-16	-168.8	62.7
29-Jan-16	-184.9	82.0	11-Feb-16	-172.8	65.2
30-Jan-16	-185.9	70.9	12-Feb-16	-179.0	54.1
31-Jan-16	-186.1	74.5	13-Feb-16	-183.7	58.9
01-Feb-16	-183.3	67.6	14-Feb-16	-186.5	58.1
02-Feb-16	-172.4	66.7	15-Feb-16	-186.9	47.7
03-Feb-16	-162.9	65.7	16-Feb-16	-191.0	37.1
04-Feb-16	-156.3	130.7	17-Feb-16	-195.5	39.3
05-Feb-16	-151.4	70.0	18-Feb-16	-199.4	41.6
06-Feb-16	-152.2	57.7	19-Feb-16	-203.3	28.0
07-Feb-16	-156.0	67.7	20-Feb-16	-208.2	25.3
08-Feb-16	-160.4	57.8	21-Feb-16	-213.8	14.5
09-Feb-16	-164.4	65.0	22-Feb-16	-217.9	14.1

#### 4.7.2 เวลาระบบ GLONASS

4.7.2.1 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ จากตารางที่ 59 ค่าที่ได้จากสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศมีความแตกต่างกับค่าที่ประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA อยู่ที่ 29.2 ถึง -38.0 นาโนวินาที มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 33.4 นาโนวินาที

ตารางที่ 34 แสดงค่าเวลาของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ เวลา ระบบ GLONASS

Day	UTC-GPST BIPM (ns)	UTC-GPST PANDA (ns)	Day	UTC-GPST BIPM (ns)	UTC(NIMT)-GPST PANDA (ns)
28-Jan-16	3.5	-33.8	10-Feb-16	3.0	-28.5
29-Jan-16	0.7	-33.4	11-Feb-16	1.7	-28.5
30-Jan-16	0.0	-32.8	12-Feb-16	2.2	-33.0
31-Jan-16	2.0	-30.7	13-Feb-16	2.9	-29.8
01-Feb-16	2.9	-35.1	14-Feb-16	1.1	-32.3
02-Feb-16	2.0	-32.4	15-Feb-16	0.9	-34.9
03-Feb-16	2.0	-31.7	16-Feb-16	1.9	-33.4
04-Feb-16	2.1	-32.2	17-Feb-16	1.6	-31.9
05-Feb-16	2.0	-29.7	18-Feb-16	0.5	-28.7
06-Feb-16	1.9	-33.3	19-Feb-16	0.8	-33.0
07-Feb-16	2.1	-28.8	20-Feb-16	2.8	-30.4
08-Feb-16	2.1	-34.1	21-Feb-16	3.3	-30.9
09-Feb-16	1.8	-27.8	22-Feb-16	1.9	-32.7

4.7.1.2 ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมในเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ

จากตารางที่ 60 ค่าที่ได้จากสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศมีความแตกต่างกับค่าที่ประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA อยู่ที่ 223.3 ถึง 273.2 นาโนวินาที มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 247.1 นาโนวินาที

ตารางที่ 35 แสดงค่าเวลาของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ PANDA เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ดาวเทียมในเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ เวลา ระบบ GLONASS

Day	UTC- GLONASS BIPM (ns)	UTC- GLONASS PANDA (ns)	Day	UTC- GLONASS BIPM (ns)	UTC- GLONASS PANDA (ns)
28-Jan-16	244.8	-35.9	10-Feb-16	204.6	-31.4
29-Jan-16	244.1	-29.1	11-Feb-16	208.8	-28.2
30-Jan-16	242.3	-30.6	12-Feb-16	212.6	-35.7
31-Jan-16	239.2	-27.2	13-Feb-16	214.5	-31.5
01-Feb-16	235.4	-34.4	14-Feb-16	215.0	-38.3
02-Feb-16	228.6	-33.5	15-Feb-16	213.5	-38.7
03-Feb-16	216.8	-31.8	16-Feb-16	209.7	-37.8
04-Feb-16	206.4	-32.3	17-Feb-16	209.5	-31.1
05-Feb-16	198.8	-32.8	18-Feb-16	210.9	-33.9
06-Feb-16	193.0	-34.2	19-Feb-16	211.6	-40.5
07-Feb-16	192.9	-30.4	20-Feb-16	212.4	-31.2
08-Feb-16	196.5	-32.5	21-Feb-16	214.1	-33.1
09-Feb-16	200.7	-33.5	22-Feb-16	216.6	-31.4



## บทที่ 5

### สรุปการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยหรือเทคนิควิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

#### 5.1 อภิปรายผลการดำเนินงาน

จากผลการวิจัยของค่าพิกัด และค่าเวลาที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA เป็นข้อมูลที่ทำกรรับสัญญาณทั้งหมด 26 วัน ตลอด 24 ชั่วโมง ได้แก่ ค่าพิกัด ค่าเวลา ค่าความแม่นยำ ค่าความถูกต้องในแนวราบ และแนวตั้ง รวมไปถึงหาค่าต่างระหว่างเวลาระบบ ซึ่งการหาค่าต่างเป็นการเปรียบเทียบ 3 เวลาระบบ โดยในแต่ละเวลาระบบจะแยกการประมวลผลโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียมในระบบ GNSS ประกอบไปด้วยการใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียม 1 ระบบ 2 ระบบ และ 3 ระบบร่วมกันในการประมวลผล โดยการประมวลผลเป็นการใช้วิธีการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (Static PPP) แบ่งออกเป็นข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

จากผลการวิเคราะห์ค่าพิกัด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวมไปถึงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดจำนวน 26 วัน ผลที่ได้คือ ค่าพิกัดจะเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้เวลาระบบที่เปลี่ยนไป ยกตัวอย่างข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมเช่น เมื่อใช้เวลาระบบ GPS ค่าพิกัดที่ใช้ข้อมูลการตรวจรับจากดาวเทียม GPS และ GLONASS ประมวลผลจะมีค่าคงที่ และมีความเสถียร แกน  $x y z$  อยู่ที่ -1150491.108 ถึง -1150491.088 เมตร 6080850.919 ถึง 6080850.948 เมตร 1537604.210 ถึง 1537604.231 เมตร ตามลำดับ แต่เมื่อใช้เวลาระบบ GLONASS ค่าพิกัดที่ใช้ดาวเทียม GPS และ GLONASS ประมวลผลจะมีค่าพิกัดที่ค่อนข้างกว้าง และไม่เสถียร แกน  $x y z$  อยู่ที่ -1150491.133 ถึง -1150491.086 เมตร 6080850.914 ถึง 6080850.965 เมตร 1537604.215 ถึง 1537604.237 เมตร ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลด้วยดาวเทียม GPS และ BeiDou เวลาระบบ GPS ค่าพิกัดจะมีค่าคงที่ และมีความเสถียร แกน  $x y z$  อยู่ที่ -1150491.133 ถึง -1150491.086 เมตร 6080850.914 ถึง 6080850.965 เมตร 1537604.215 ถึง 1537604.237 เมตร ตามลำดับ ส่วนเวลาระบบ BeiDou จะมีค่าพิกัดอยู่ในช่วงกว้าง แกน  $x y z$  อยู่ที่ -1150491.115 ถึง -1150491.089 เมตร 6080850.876 ถึง 6080850.937 เมตร 1537604.202 ถึง 1537604.228 เมตร ตามลำดับ สังเกตได้จากกราฟแสดงค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบในบทที่ 4 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการประมวลผลด้วยดาวเทียม GPS GLONASS และ BeiDou แสดงให้เห็น

ความแตกต่างของค่าพิกัดของเวลาระบบทั้ง 3 เวลาระบบได้ชัดเจน โดยข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ชุดไม่มีความแตกต่างกัน

5.1.2 ผลการศึกษาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ

ผลการศึกษาจากการประมวลผลด้วยวิธีการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงกรณีใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ GLONASS และกรณีใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ BeiDou จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาระบบ GPS ให้ค่าที่เสถียร อยู่ที่  $2.50 \times 10^{-4}$   $3.97 \times 10^{-4}$   $1.25 \times 10^{-4}$  ในแนวแกน x y z และมีความถูกต้องมากกว่าเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou สำหรับข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ชุด โดยเวลาระบบ GPS จะมีค่าต่างกับเวลาระบบ GLONASS ในแกน x y z โดยมีค่าอยู่ที่ 0.4 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีค่าต่างกับเวลาระบบ BeiDou 0.2 0.7 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเวลาระบบ GLONASS มีค่าต่างกับเวลาระบบ BeiDou ในแกน x y z อยู่ที่ 0.3 0.08 และ 0.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ชุดไม่มีความแตกต่างกัน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแม่นยำของค่าพิกัดที่รับข้อมูลมา จะเห็นได้ว่า ข้อมูลที่ใช้เวลาระบบ GPS จะมีความเสถียร และดีกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ใช้เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou

5.1.3 ผลการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายใน

ผลการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่ประมวลผลได้จากโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ค่าในแนว 4 มิติของระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบ GPS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมมีค่าอยู่ที่ 0.44 เมตร และรองลงมาคือเวลาระบบ GLONASS และ BeiDou ส่วนค่าในแนว 4 มิติของระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณี โดยอ้างอิงเวลาระบบ GPS และ GLONASS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณมีค่าอยู่ที่ 0.87 ถึง 0.92 เมตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างกัน และค่าใน 2 และ 3 มิติของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ชุด อ้างอิงเวลาระบบ GPS อยู่ในระดับ 4 ถึง 5 มิลลิเมตรทุกกรณี ยกเว้นกรณีที่มีการตรวจรับสัญญาณจากดาวเทียม BeiDou ที่มีค่าอยู่ในระดับเดซิเมตร ส่วนข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ชุด อ้างอิงเวลาระบบ GLONASS อยู่ในระดับ 1 เดซิเมตร ถึง 9 มิลลิเมตร และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ชุด อ้างอิงเวลาระบบ BeiDou อยู่ในระดับ 4 เดซิเมตร ถึง 9 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากเวลาระบบ GPS จะมีค่าดีที่สุด

5.1.4 ผลการศึกษาค่าเวลา ความถูกต้องของค่าเวลาระหว่างเวลาระบบ GPS GLONASS และ BeiDou ของข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายใน

สำหรับค่าเวลาของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA ทั้ง 2 ชุด เมื่อนำมาแสดงในรูปของกราฟเส้นจะเห็นได้ว่า ค่าเวลาของเวลาระบบ GPS และ GLONASS จะมีเส้นที่ใกล้เคียงกัน แต่เวลาระบบ BeiDou มีเส้นที่แตกต่างออกไป ซึ่งมีความต่างอยู่ที่  $1.3 \times 10^{-8}$  ถึง  $1.5 \times 10^{-8}$  วินาที โดยเฉลี่ย เมื่อนำมาคูณด้วยความเร็วแสงจะได้ระยะทางที่คลาดเคลื่อนไปเท่ากับ 4.13 ถึง 4.66 เมตร และความถูกต้องของค่าเวลาจะเห็นได้ว่ามีความแม่นยำต่ำ โดยสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟมีความการแกว่งอย่างไม่เป็นระบบ

5.1.5 ผลการศึกษาค่าเวลา เทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันซึ่งตวงวัดระหว่างประเทศระหว่างเวลาระบบ GPS และ GLONASS ด้วยข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายใน

ผลที่ได้จากการศึกษาเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันซึ่งตวงวัดระหว่างประเทศ ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ จะเห็นได้ว่า เวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS มีความแตกต่างอยู่ในที่ 24.5 และ 33.6 นาโนวินาที โดยเฉลี่ย และเวลาข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายใน มีความต่างอยู่ที่ 238.9 และ 248.2 นาโนวินาที

## 5.2 สรุปผล

จากการอภิปรายผลข้างต้น สรุปได้ว่า ในการประมวลผลข้อมูลในระบบ GNSS ด้วยการเปลี่ยนเวลาระบบ และใช้ข้อมูลดาวเทียม และนาฬิกาที่มีความถูกต้องสูงของสถานีประมวลผล IGS โดยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ด้วยโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA เพื่อหาค่าพิกัด และค่าเวลา ทั้งหมด 26 วัน พบว่า ค่าพิกัด เวลาระบบ GLONASS และ BeiDou มีค่าพิกัดที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด ใน 2 และ 3 มิติไม่มีความแตกต่างกัน ( แต่ใน 4 มิติ ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลทั้ง 4 กรณีย โดยอ้างอิงเวลาระบบ GPS ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ใช้นาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ มีค่าที่ดีที่สุด อยู่ที่ 0.44 เมตร และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS และ GLONASS มีค่าที่ใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 0.87 และ 0.94 เมตร ส่วนค่าเวลาของเวลาระบบทั้ง 3 เวลาระบบ ปรากฏว่า ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียม เวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับค่าเวลาของเวลาระบบ BeiDou ที่มีการแกว่ง และไม่มีความเสถียร ( $-8.34 \times 10^{-9}$  ถึง  $-2.24 \times 10^{-8}$  วินาที) และข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อกับนาฬิกาอะตอมซีเซียมค่าเวลาของเวลาระบบ BeiDou ที่มีการแกว่ง และไม่มีความเสถียรเช่นเดียวกัน ( $-2.03 \times 10^{-8}$  ถึง  $-1.32 \times 10^{-8}$  วินาที) โดยข้อมูลที่ได้จากการรังวัด เวลาระบบ GPS และเวลาระบบ GLONASS เมื่อนำมา

ตรวจสอบกับข้อมูลที่วัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ พบว่า ค่าที่ได้จากกรวิเคราะห์เป็นไปตามสมมติฐาน โดยค่าเวลาของเวลาระบบ GPS มีค่าแตกต่างกับข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยสถาบันชั่งตวงวัดระหว่างประเทศที่ 20 นาโนวินาทีโดยเฉลี่ยและเวลาระบบ GLONASS มีค่าต่างถึง 200 นาโนวินาทีซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยที่เคยมีมาก่อนหน้านี้ที่อยู่ในระดับ 200 นาโนวินาที (Bogdanov et al., 2014)

จากผลการศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า เวลาระบบที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้ค่าพิกัดแตกต่างกัน (2 ถึง 5 เซนติเมตร) และไม่ส่งผลต่อผู้ใช้ในงานด้านการหาค่าพิกัด โดยค่าพิกัดในงานวิจัยชิ้นนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับเซนติเมตร และในด้านค่าเวลามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับนาโนวินาที

### 5.3 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยในครั้งต่อไปอาจจะมีการเก็บข้อมูลที่ยาวนานขึ้นเพื่อสามารถเห็นความแตกต่างของเวลาระบบทั้ง 3 เวลาระบบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

5.3.2 ควรมีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องรับสัญญาณว่าส่งผลอย่างไรต่อค่าพิกัด และค่าเวลา

5.3.3 งานวิจัยในครั้งต่อไปจำเป็นต้องมีการสลับเครื่องรับสัญญาณ เพื่อใช้ในการตรวจสอบข้อมูลที่รับวัด และเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการตั้งค่า

### 5.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

5.4.1 ทราบถึงประโยชน์ และข้อจำกัดของข้อมูลที่รับด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบยี่ห้ออเดติก

5.4.2 ค่าเวลาที่ประมวลผลได้จากโปรแกรมประยุกต์เชิงวิจัย PANDA โดยใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียม และนาฬิกาภายในเครื่องรับสัญญาณ มีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อผู้ใช้งานด้านเวลา เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าพิกัดได้แม่นยำ และถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5.4.3 สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ในอนาคต หากเกิดปัญหาเกี่ยวกับเวลาระบบ GPS จะสามารถนำเวลาระบบใดมาทดแทนเวลาระบบ GPS ได้

5.4.4 สามารถนำไปใช้งานในส่วนของการถ่ายโอนเวลาระหว่างระบบ GNSS และการเปรียบเทียบเวลาระหว่างเวลาสากลเชิงพิกัดกับเวลาของระบบ GNSS (GPST GLONASS BDT)

5.4.5 สามารถประเมินความคุ้มค่าในการติดตั้งนาฬิกาอะตอมพร้อมกับการสร้างสถานีฐานอ้างอิงทางานต่อเนื่อง (Continuous Operating Reference System :CORS) สำหรับงานเชิงยื่ออเดติก (Geodetic) หรืองานอื่นๆที่ต้องการความถูกต้องสูง



## รายการอ้างอิง

- A.DRUZHIN, A. T., A.POKHAZNIKOV 2009. GLONASS TIME AND UTC(SU).
- ARTHITONLINE 2012. GNSS – ระบบนำทางด้วยดาวเทียม. 16 February 2012 ed.
- BDS-ICD 2013. BeiDou navigation satellite system signal. *Space Interface Control Document. Open Service Signal.*
- BIPM. 2013. *International Atomic Time* [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/bipm/tai/tai.html> [Accessed].
- BOGDANOV, P., DRUZHIN, A., TIULIAKOV, A. & FEOKTISTOV, A. GLONASS time and UTC (SU). General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI, 2014. IEEE, 1-3.
- CAI, C., GAO, Y., PAN, L. & ZHU, J. 2015. Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. *Advances in Space Research*, 56, 133-143.
- CANADIAN GPS ASSOCIATES 1987.
- CHUNHAO, H., YUANXI, Y. & ZHIWU, C. 2011. BeiDou Navigation Satellite System and its time scales. *Metrologia*, 48, S213.
- DELPORTE, J. 2009. The definition and implementation of Galileo system time (GST). *ICG-4 WG-D on GNSS time scales.*
- GLONASS-ICD 2008. Glonass interface control document. *Russian Institute of Space Device Engineering: Moscow, Russia.*
- GNSS RESEARCH CENTER, W. U., CHINA 2014. Precise Point Positioning Using PANDA Software Package.
- HOTTOVY, M. & WEISS, M. Differential delay between two geodetic gps receivers for L1 and L2 code and carrier signals. 2008 IEEE International Frequency Control Symposium, 19-21 May 2008 2008. 496-500.
- HS7WMU 2012. UTC : Universal Time Coordinated. 7 March 2012 ed.
- HUANG, G., ZHANG, Q., FU, W. & GUO, H. 2015. GPS/GLONASS time offset monitoring based on combined Precise Point Positioning (PPP) approach. *Advances in Space Research*, 55, 2950-2960.
- IGS. 2016. *IGS Analysis Center* [Online]. Available: <http://www.igs.org/about/analysis-centers> [Accessed 11/08/2016 2016].
- INGE, V., BERNARD, B., MARCO, B. & JEROME, L. 2007. GNSS Time Offset.
- IS-GPS-200G 2012. Systems engineering and integration Interface Specification IS-GPS-200G.

- ITU NEWS. 2013. *Global navigation satellite systems and their system times* [Online]. Available: <https://itunews.itu.int/En/4272-Global-navigation-satellite-systems-and-their-system-times.note.aspx> [Accessed 12/09/2016 2016].
- JUN, YE, XIAOHUI, YA & SHOUGANG. Analysis of system time performance in BeiDou satellite navigation system. 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, 12-16 April 2015 2015. 297-299.
- LEWIS, L. L. 1991. An introduction to frequency standards. *Proceedings of the IEEE*, 79, 927-935.
- LOMBARDI, M. A. & BROWN, K. H. 2001. NIST Frequency Measurement and Analysis System: Operator's Manual.
- MICROSEMI COPORATION 2014. 5071A Cesium Primary Frequency Standard.
- NAVAL OCEANOGRAPHY PORTAL. 2016. *USNO GPS Time Transfer* [Online]. Available: <http://www.usno.navy.mil/USNO/time/gps/usno-gps-time-transfer> [Accessed 12/9/2016 2016].
- THE EUROPEAN SPACE AGENCY 2014. GALILEO: IT'S ALL ABOUT THE TIME.
- ZHANG, H., ZHU, L., LI, X. & ZHANG, X. A method of GNSS system time offset monitoring. European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), 2013 Joint, 2013. IEEE, 838-842.
- สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ. 2016. เวลามาตรฐาน [Online]. Available: [http://www.nimt.or.th/?page\\_id=356](http://www.nimt.or.th/?page_id=356) [Accessed 23/04/2016 2016].

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ: นายปวิตร ฐิระวณิชกุล

วันเดือนปีเกิด: 4 ธันวาคม 2534

คุณวุฒิทางการศึกษา:

พ.ศ. 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผลงานทางวิชาการ:

ปวิตร ฐิระวณิชกุล, ทยาทิพย์ ทองตัน และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2560) “การประมาณค่าความแตกต่างของเวลาระบบด้วยวิธีการรังวัดจีเอ็นเอสเอสจุดเดียวความละเอียดสูง” งานประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ Geoinfotech 2017, 9-10 กุมภาพันธ์ 2560