

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยใช้ค่าแก้ MADOCA
ด้วยการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูงในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Performance evaluation of low-cost GNSS receiver using MADOCA corrections with
the Precise Point Positioning (PPP) mode in Thailand



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

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

ศุภณัฐ ศรีจันทร์ : การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยใช้ค่าแก้ MADOCA ด้วยการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในประเทศไทย. (Performance evaluation of low-cost GNSS receiver using MADOCA corrections with the Precise Point Positioning (PPP) mode in Thailand) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. ธีทัต เจริญกาลัญญูตา

ในปัจจุบันระบบดาวเทียมนำหน GNSS ได้ประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการทำงานหลายๆด้าน เช่น การสำรวจ การทำแผนที่ การนำทาง และงานด้านอื่นๆ เพราะฉะนั้น ค่าความถูกต้องและความแม่นยำทางตำแหน่งจาก GNSS ยังไม่เพียงพอสำหรับงานบางประเภท ระบบค่าแก้จาก MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) จากระบบดาวเทียม Quasi-Zenith (QZSS) มีวัตถุประสงค์ตอบสนองความต้องการที่จะให้บริการการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์ (PPP-Realtime) ในประเทศไทยจะสามารถใช้งานดาวเทียม QZSS ในช่วงมุม 15 – 60 องศา ทำให้สามารถรับสัญญาณค่าแก้จากระบบดาวเทียม QZSS ได้โดยตรง การศึกษานี้มุ่งเน้นเรื่องการวิเคราะห์ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลการรังวัดแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูล GNSS ร่วมกับข้อมูลค่าแก้ที่ได้จากระบบ MADOCA ที่ได้รับในพื้นที่ประเทศไทยโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของระบบค่าแก้ MADOCA สำหรับการให้บริการเชิงตำแหน่งแบบ Real-time ของค่าแก้ นี้ จะทำให้เน้นไปที่การประมวลผลในรูปแบบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวแบบความละเอียดสูงแบบสถิติ และการประมวลผลหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (GNSS CORS) ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ติดตั้งบนรถยนต์ จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการใช้เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA สำหรับการทดสอบแบบสถิติให้ค่าความถูกต้อง ทางราบและทางตั้ง 0.09 และ 0.13 เมตรตามลำดับ และ สำหรับการทดสอบบนรถยนต์ที่มีการเคลื่อนที่ ให้ความถูกต้องทางราบและทางตั้ง 1.24 และ 2.22 เมตรตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370436021 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: MADOCA corrections Low-cost GNSS receiver

Supanat Srijun : Performance evaluation of low-cost GNSS receiver using MADOCA corrections with the Precise Point Positioning (PPP) mode in Thailand. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. TEETAT CHAROENKALUNYUTA, Ph.D.

At present, Global navigation satellite system is applied in various applications such as mapping, navigation etc. Therefore, the accuracy and robustness of GNSS are not enough for some work. The Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA) from the Quasi-Zenith satellite system. It aims to meet the need to provide real-time positioning services. In Thailand, QZSS satellites can be seen at an angle of 15 - 60 degrees, enabling them to receive correction signals from the QZSS satellite system directly. The purpose of this study Performance evaluation of low-cost GNSS receiver using MADOCA corrections with the Precise Point Positioning (PPP) mode in Thailand. To prove the performance and accuracy of this ancient real-time service MADOCA corrections. MADOCA for real-time positioning services of this solution focuses on processing in a Precise Point Positioning static and kinetic mode. Using data from the Continuous Satellite Survey Station of Chulalongkorn University and Vehicle test. Results showed the performance of using a low-cost receiver in combination with the correction from the MADOCA system for static point testing horizontal and vertical is 0.09 and 0.13 meters and for testing on moving vehicles Provides horizontal and vertical accuracy is 1.24 and 2.22 meters .

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศ.ดร. เฉลิมชมน์ สติรพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ. ดร. ธีทัต เจริญกาลัญญูตา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่คอยแนะนำการใช้งานระบบ MADOCA และชี้แนะช่องทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณที่ให้แนวคิด ความรู้ ตลอดจนคำปรึกษาต่างๆ ในการทำงานวิจัยจนกระทั่งสามารถทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอบพระคุณ ดร. ชัยโชค ไวกาษา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อเสนอแนะสำหรับทำงานวิจัย

ขอบพระคุณ Project Associate Professor Mr. Dinesh Manandhar ที่สนับสนุนเครื่องที่ใช้ในการทดสอบและช่วยแนะนำการติดตั้งอุปกรณ์ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่างๆ เกิดขึ้น ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอบพระคุณ รศ. ดร. ชาติชาย ไวยสุระสิงห์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ช่วยชี้แนะและให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์

ขอบพระคุณ ดร.ชัยยุทธ เจริญผล ที่ให้ความช่วยเหลือ ในด้านการอำนวยความสะดวก การแก้ปัญหาด้านซอฟต์แวร์ และให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่คอยกรุณาให้ความรู้ เพื่อนและพี่ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยมิตรภาพที่ดี และคำปรึกษาต่างๆ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจและสนับสนุนทุก ๆ ด้านตลอดมา ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา ขอขอบคุณสมาชิกในกลุ่มที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำโครงการครั้งนี้จนกระทั่งประสบความสำเร็จด้วยดี และขอขอบพระคุณผู้ที่ผู้วิจัยได้ขอความร่วมมือแต่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ศุภณัฐ ศรีจันทร์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	4
1.3.2 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา.....	6
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	7
1.3.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษา.....	8
1.3.5 เครื่องมือสำหรับการศึกษาวิจัย.....	8
1.3.6 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีสำคัญ	10
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง	10

2.1.1	เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมบูรณ์ (Absolute Positioning).....	10
2.1.2	การประมวลผลแบบจุดเดี่ยว(Single Point Position: SPP).....	11
2.1.3	การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Position: PPP).....	12
2.1.4	โครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network	13
2.1.5	Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)	15
2.1.6	Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA)	17
2.2	เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา	20
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1	ศึกษาศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3.2	ศึกษาการใช้งานซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง.....	24
3.3	วางแผนแบบออกแบบการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ	25
3.3.1	การทดสอบความถูกต้องพิกัดจุดถาวร (Fixed Point Test).....	25
3.3.1.1	บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open Area).....	25
3.3.1.2	บริเวณที่มีคลื่นหลายวิถี (Multipath Area).....	26
3.3.2	การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test).....	27
3.3.2.1	การทดสอบบนยานพาหนะบริเวณเขตเมือง (Vehicle Urban Area Test)	27
3.3.2.2	การทดสอบบนยานพาหนะบริเวณเขตชนบท (Vehicle Rural Area Test)....	28
3.4	ขั้นตอนวิธีการประมวลผลและเปรียบเทียบผลการทดสอบ	28
3.4.1	วิธีการประมวลผลและเปรียบเทียบพิกัดจุดถาวรจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตและ แบบจลน์.....	28
3.4.2	การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test).....	31
3.5	แผนผังแสดงขั้นตอนการทำวิจัย	33
3.6	แผนผังแสดงขั้นตอนการประมวลผล	34

3.6.1	แผนภาพการทดสอบสำหรับการรังวัดแบบจุดคงที่ (Fixed Point Test).....	34
3.6.2	แผนภาพการทดสอบสำหรับการรังวัดบนรถยนต์ (Vehicle Test)	35
บทที่ 4	ผลการศึกษา.....	36
4.1	การทดสอบจุดแบบสถิต (Fixed Point Test).....	37
4.1.1	บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง	37
4.1.1.1	Precise Point Positioning Static (PPP-Static)	37
4.1.1.2	Precise Point Positioning Kinematic (PPP- Kinematic)	39
4.1.1.3	แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าทางสถิติของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP-Static).....	42
4.1.1.4	แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าทางสถิติของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP-Kinematic).....	44
4.1.2	บริเวณพื้นที่มี Multipath.....	46
4.1.2.2	Precise Point Positioning kinematic (PPP- kinematic).....	47
4.2.1	การทดสอบในเขตเมือง (Urban Area).....	49
4.2.2	การทดสอบในเขตชนบท (Rural Area).....	51
บทที่ 5	อภิปราย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	55
5.1	อภิปรายผล.....	55
5.1.1	ค่าความถูกต้องกรณีการทดสอบจุดแบบสถิต (Fixed Point Test).....	55
5.1.2	การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test).....	58
5.2	สรุปผลการวิจัย.....	65
5.3	ปัญหาที่พบ	66
5.4	ข้อเสนอแนะ	67
ภาคผนวก.....		68
ภาคผนวก ก.	การประมวลผลของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จาก MADOCA.....	69

ภาคผนวก ข. การประมวลของเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade บนสถานี CORS CUUT
 โดยการประมวลแบบ PPP Static และ PPP-kinematic โดยใช้ Final Product เทียบกับค่า
 อ้างอิงของสถานี CORS CUUT ด้วยโปรแกรม RIKLIB 71

ภาคผนวก ค. ชุดคำสั่งแปลงค่าพิกัดระหว่างพื้นหลักฐานบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF แปลงค่า
 พิกัด UTM บนพื้นหลักฐาน WGS84 บนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ไปสู่ ITRF2014
 77

บรรณานุกรม..... 81

ประวัติผู้เขียน..... 84



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 พื้นที่การศึกษาระดับบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open Area) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถานีฐาน CUUT Google Earth).....	4
รูปที่ 2 พื้นที่การศึกษาระดับบริเวณพื้นที่มีคลื่นหลุด (Multipath Area) อาคารภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	4
รูปที่ 3 พื้นที่การศึกษาแสดงเส้นทางรถยนต์ในเขตชนบท (Rural Area) สำหรับการทดสอบ PPP-kinematicบนทางหลวง หมายเลข 333 จังหวัดอุทัยธานี (Google Earth).....	5
รูปที่ 4 พื้นที่การศึกษาแสดงเส้นทางรถยนต์ในเขตเมือง (Urban Area) สำหรับการทดสอบ PPP-kinematic ถนนในอำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี (Google Earth).....	5
รูปที่ 5 การรับสัญญาณแบบจุดเดี่ยว.....	10
รูปที่ 6 การรับสัญญาณแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง.....	13
รูปที่ 7 วิธีการทำงานของระบบ Virtual Reference Station (VRS).....	15
รูปที่ 8 วงโคจรของดาวเทียม Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) ทั้ง 7 ดวง.....	15
รูปที่ 9 ตำแหน่งของระบบดาวเทียม Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร (GNSS View).....	16
รูปที่ 10 กระบวนการได้มาซึ่งค่าแก้ไขในระบบมาโดก้า (MADOCA).....	18
รูปที่ 11 ตำแหน่งของสถานีฐาน (IGS) ที่นำมาใช้ทำค่าแก้ไขจากระบบมาโดก้า(MADOCA).....	19
รูปที่ 12 การรับสัญญาณของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกลง.....	29
รูปที่ 13 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมบนหลังคารถยนต์ ซ้าย(Tallysman antenna),ขวา(CHC -i80).....	31
รูปที่ 14 ผลลัพธ์การประมวลผลประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิติวันที่ 29 สิงหาคม 2564 เส้นสีแดงคือ TrimbleNetR9 และสีเขียวคือเครื่องรับ สัญญาณราคาถูกลง (Low-cost receiver).....	37
รูปที่ 15 ผลลัพธ์การประมวลผลประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิติวันที่ 4 กันยายน 2564 เส้นสีแดงคือ TrimbleNetR9 และสีเขียวคือเครื่องรับสัญญาณราคาถูกลง (Low-cost receiver).....	39

รูปที่ 16	แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางราบ	42
รูปที่ 17	แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางตั้ง (Vertical RMSE)..	42
รูปที่ 18	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ(Horizontal.....	43
รูปที่ 19	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางตั้ง(Vertical Standard Deviation).....	43
รูปที่ 20	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ(Horizontal.....	44
รูปที่ 21	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางตั้ง(Vertical Standard Deviation).....	44
รูปที่ 22	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ(Horizontal Standard Deviation)	45
รูปที่ 23	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางตั้ง(Vertical Standard Deviation).....	45
รูปที่ 24	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD)และทางตั้ง (Vertical SD).....	47
รูปที่ 25	แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง	47
รูปที่ 26	แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง	48
รูปที่ 27	แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD)และทางตั้ง (Vertical SD) ของการประมวลแบบ PPP-Kinematic.....	48
รูปที่ 28	การเปรียบเทียบค่าต่างทางตำแหน่งในทางราบ (Difference Horizontal Coordinate) ของการทดสอบในเขตเมือง(Urban Area)และเขตชนบท(Rural Area)ที่อัตราเร็วต่างๆ.....	52
รูปที่ 29	การเปรียบเทียบค่าต่างทางตำแหน่งในทางตั้ง (Difference Vertical Coordinate) ของการทดสอบในเขตเมือง(Urban Area)และเขตชนบท(Rural Area)ที่อัตราเร็วต่างๆ.....	52
รูปที่ 30	ผลลัพธ์สำหรับการทดสอบติดตั้งเครื่องรับสัญญาณบนรถยนต์บริเวณเขตพื้นที่ชนบท หมุดสีเหลืองแทน Survey Grade Receiver และหมุดสีแดงแทน Low-Cost-Receiver	54
รูปที่ 31	ผลลัพธ์สำหรับการทดสอบติดตั้งเครื่องรับสัญญาณบนรถยนต์บริเวณเขตพื้นที่เมือง หมุดสีเหลืองแทน Survey Grade Receiver และหมุดสีแดงแทน Low-Cost-Receiver	54

รูปที่ 32 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ของค่าพิกัดทั้งในแนวราบและแนวตั้งระหว่างค่าพิกัดที่ได้จากบริเวณ(Open Area) พื้นที่เปิดโล่งและบริเวณที่มี Multipath เปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง 61

รูปที่ 33 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ของค่าพิกัดทั้งในแนวราบและแนวตั้งระหว่างค่าพิกัดที่ได้จากบริเวณ(Open Area) พื้นที่เปิดโล่งและบริเวณที่มี Multipath เปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง 62

รูปที่ 34 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าต่างของค่าพิกัดจากพิกัดอ้างอิง (Difference Coordinate) ในทางราบและทางตั้งสำหรับพื้นที่ศึกษาบริเวณเขตเมือง (Urban Area)และเขตชนบท (Rural Area) ที่อัตราเร็วต่างกัน 63

รูปที่ 35 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าต่างของค่าพิกัดจากพิกัดอ้างอิง (Difference Coordinate) ในทางราบและทางตั้งสำหรับพื้นที่ศึกษาบริเวณเขตเมือง (Urban Area)และเขตชนบท (Rural Area) ที่อัตราเร็วต่างกัน 63

รูปที่ 36 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย Root Mean Square Error (RMSE) ในทางราบและทางตั้งสำหรับพื้นที่ศึกษาบริเวณเขตเมือง (Urban Area)และเขตชนบท (Rural Area) ที่อัตราเร็วต่างกัน 64

รูปที่ 37 แผนผังการรับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกลำผ่านทางคอมพิวเตอร์ 69

รูปที่ 38 การตั้งค่าโปรแกรม MAD-WIN เพื่อรับสัญญาณดาวเทียม 69

รูปที่ 39 ชุดคำสั่งแปลงไฟล์ NMEA เป็นระบบพิกัดแบบ Universal Transverse Mercator..... 71

รูปที่ 40 การใช้ โปรแกรม FileZilla จากนั้น connect เข้าไปยัง Server ของ IGS..... 72

รูปที่ 41 การดาวน์โหลดข้อมูลค่าแกว่งโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม 73

รูปที่ 42 การประมวลผลด้วยโปรแกรม RTKLIB..... 74

รูปที่ 43 การตั้งค่าเพื่อประมวลผล 74

รูปที่ 44 การเพิ่มค่าปรับแก้เสาอากาศและค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นมหาสมุทร 75

รูปที่ 45 ตัวอย่างไฟล์ .pos ที่ประมวลผลเรียบร้อยแล้ว..... 75

รูปที่ 46 คำสั่งสำหรับแปลงไฟล์ .pos ให้อยู่ในระบบพิกัด UTM 76

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ผลิตภัณฑ์ของระบบ MADOCA ในแต่ละกลุ่มดาวเทียม	17
ตารางที่ 2	แสดงข้อมูลความถูกต้องของการประมาณปรับแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมของระบบ MADOCA	18
ตารางที่ 3	ความเร็วของการทดสอบในรถยนต์	27
ตารางที่ 4	แสดงความเร็วของการทดสอบในรถยนต์ ใน 3 การทดสอบ	32
ตารางที่ 5	รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบและทางตั้งของการ	38
ตารางที่ 6	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบและทางตั้งของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิติ	38
ตารางที่ 7	รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบและทางตั้งของการ	39
ตารางที่ 8	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบและทางตั้งของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์	40
ตารางที่ 9	ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิติและแบบจลน์	40
ตารางที่ 10	ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิติกรณีบริเวณมีคลื่นหลุด(Multipass)	46
ตารางที่ 11	ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์กรณีบริเวณมีคลื่นหลุด(Multipath).....	48
ตารางที่ 12	ผลของค่าต่างจากค่าอ้างอิง(Mean difference) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ทางราบและทางตั้ง ในแต่ละระดับความเร็วบริเวณเขตเมือง(Urban Area)	50

ตารางที่ 13 ผลของค่าต่างจากค่าอ้างอิง(Mean difference) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อน
เฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ทางราบและทางตั้ง ในแต่ละระดับความเร็วบริเวณ
เขตชนบท (Rural Area) 51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากระบบดาวเทียม Quasi-Zenith (QZSS) ที่ครอบคลุมพื้นที่บริเวณเอเชีย-โอเชียเนียโดยกำเนิดขึ้นเมื่อ 11 ตุลาคม 2010 และถูกควบคุมดูแลโดย Japan Aerospace Exploration Agency (หน่วยงานการบินและการสำรวจอวกาศญี่ปุ่น) เดิมทีดาวเทียมเพียงดวงเดียวต่อมารัฐบาลญี่ปุ่นได้พัฒนาระบบดาวเทียมจนมีดาวเทียมเพิ่มอีกสามดวง และเพิ่มเป็นเจ็ดดวงในเวลาต่อมาจนครอบคลุมทั่วทั้งประเทศญี่ปุ่นโดยระบบดาวเทียม QZSS Zhang et al. (2019) มีระบบนำหนทางใกล้เคียงกับระบบดาวเทียม GPS มีสัญญาณ L1-C/A, L1C, L2C, and L5 แต่มีบางพื้นที่ที่ห่างไกลที่ไม่มีสถานีฐานการจะเข้าถึงระบบระบุตำแหน่งที่มีความถูกต้องสูงจึงเป็นไปได้ยากทำให้ระบบดาวเทียม QZSS ได้มีการออกแบบสัญญาณ L-BAND EXPERIMENTAL (LEX) ที่ประกอบด้วยข้อมูลค่าแกว่งโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม ที่มีความสำคัญต่อการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวแบบแบบเรียลไทม์ (Real Time precise point positioning) Fredeluces et al. (2020) ทำให้ได้ระบบที่มีวัตถุประสงค์ตอบสนองความต้องการที่จะให้บริการการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์ (PPP) ในปัจจุบันมีในหลายๆประเทศมีบริการนี้และถูกเรียกกันในด้านชื่อต่างระบบดาวเทียมที่ให้บริการเช่น US wide area augmentation system (WAAS) ของอเมริกา, European geostationary navigation overlay system (EGNOS) ของยุโรป เป็นต้นแต่อย่างไรก็ตามระบบที่กล่าวมาข้างต้นยังสามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับเมตร Tavasci et al. (2021) ทำให้หน่วยงานการบินและการสำรวจอวกาศญี่ปุ่นมีการปรับปรุงสัญญาณในรูปแบบ L6 มี 2 รูปแบบ สัญญาณคือ L6 centimeter level augmentation (L6D-CLAS) และ L6 Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA) Namie and Kubo (2020) โดยในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่ค่าแก้ในระบบ MADOCA ที่เป็นค่าแก้จากนาฬิกาดาวเทียมและวงโคจรดาวเทียมซึ่งจะสตรีมข้อมูลแบบเรียลไทม์จาก 53 สถานี CORS ทั่วโลก สามารถรับสัญญาณค่าแก้ MADOCA จาก 3 ช่องทาง ดังนี้แบบแรกคือการรับสัญญาณ L6E โดยตรงจากดาวเทียม แบบที่สองคือการรับค่าแก้โดยผ่านอินเทอร์เน็ต และแบบสุดท้าย คือการรับค่าแก้แบบออฟไลน์โดยใช้ไฟล์ค่าแก้ในรูปแบบ RTCM3 SSR สำหรับการประมวลผลภายหลัง Zhang (2020)

ระบบ MADOCA ไม่ได้มีการเปิดให้บริการอย่างเป็นทางการในประเทศไทย ซึ่งอยู่ในระหว่างการทดสอบและปรับปรุงแก้ไขโดยระบบนี้จะรองรับหลายระบบ GNSS คือ GPS, GLONASS,

Galileo, BeiDou และ QZSS แต่ปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถใช้ได้เพียง 3 ระบบ ดาวเทียม คือ GPS, GLONASS และ QZSS ส่วน Galileo และ BeiDou กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา

ในปัจจุบันระบบดาวเทียมนำหน GNSS ได้ประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการทำงานหลายๆด้าน เช่น การสำรวจ การทำแผนที่ การนำทาง และงานด้านอื่นๆ เพราะฉะนั้น ค่าความถูกต้องและความแม่นยำทางตำแหน่งจาก GNSS ยังไม่เพียงพอสำหรับงานบางประเภท ระบบค่าแก้จาก MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) จากระบบดาวเทียม Quasi-Zenith (QZSS) ที่ครอบคลุมพื้นที่บริเวณเอเชีย และถูกควบคุมดูแลโดย JAXA ทำให้ได้ระบบที่มีวัตถุประสงค์ตอบสนองความต้องการที่จะให้บริการการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์ (PPP-Realtime) ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม QZSS โดยตรงผ่านทาง MADOCA-LEX Broadcast หรือ รับค่าแก้ผ่านทางอินเทอร์เน็ต ทาง Ntrip login สำหรับการรับค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมแบบ Real-time ประมวลผลรังวัดตำแหน่งจุดเดียวโดยใช้ค่าแก้จากมาโดก้า (MADOCA-PPP) ทั้งนี้ประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะสามารถใช้งานดาวเทียม QZSS ในช่วงมุม 15 – 60 องศา ทำให้สามารถรับสัญญาณค่าแก้จากระบบดาวเทียม QZSS ได้โดยตรง ประเทศไทยจึงน่าจะสามารถนำค่าแก้จากระบบ MADOCA มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นได้ อีกทั้งระบบค่าแก้ก็ยังมีการใช้ข้อมูลของสถานีฐานที่ประเทศไทยเข้าร่วมในการปรับแก้ คือสถานีรังวัดถาวรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับประเทศไทยจะตามความถูกต้องที่ได้ เช่น อย่างเช่น การนำทาง การเดินเรือ การบินถ่ายภาพทางอากาศ เป็นต้น สำหรับค่าแก้ MADOCA นี้จะมีความถูกต้องอยู่ที่ระดับเซนติเมตรในประเทศญี่ปุ่น Fredeluces et al. (2020) จึงน่าจะเหมาะกับการไปใช้ในการรังวัดที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูงมาก ซึ่งถ้าจะนำไปใช้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ Survey grade จะทำให้มีต้นทุนค่อนข้างสูงในการดำเนินการ ทำให้ความต้องการเครื่องรับสัญญาณระบบดาวเทียมแบบประหยัดมีความต้องการมากขึ้นในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถเข้าถึงได้ง่าย ผู้คนทั่วไปสามารถใช้ได้เพราะมีราคาที่ถูกลง เมื่อนำไปใช้ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA คาดว่าจะให้ความถูกต้องที่อยู่ในระดับเหมาะสมกับการใช้งานได้

ดังนั้นในการศึกษานี้จะเน้นศึกษาไปที่การวิเคราะห์ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลการรังวัดแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูล GNSS ร่วมกับข้อมูลค่าแก้ที่ได้จากระบบ MADOCA ที่ได้รับในพื้นที่ประเทศไทยโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของระบบค่าแก้ MADOCA สำหรับการให้บริการเชิงตำแหน่งแบบ Real-time ของค่าแก้ นี้ โดยเป็นการประมวลผลในรูปแบบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวแบบความ

ละเอียดสูงแบบสถิต และการประมวลผลหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ โดยอาศัยข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS) ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CU สำหรับการทดสอบจุดแบบสถิต และ ติดตั้งบนรถยนต์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในกรณีที่จุดทดสอบมีการเคลื่อนที่ ทั้งนี้สำหรับการประมวลผลทั้งสองแบบนี้ ทำเพื่อทดสอบความถูกต้องและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก๊วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะวิธีการรับสัญญาณค่าแก๊งจากดาวเทียมโดยตรงในช่วงคลื่น L6 (MADUCA-LEX) วิธีนี้มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องอาศัยอินเทอร์เน็ต และไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐาน (Base station) สำหรับความถูกต้องและประสิทธิภาพที่ได้ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด เพื่อการเป็นแนวทางสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตสำหรับประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลรังวัดหาตำแหน่งของจุดเดียว โดยข้อมูลของระบบดาวเทียม GNSS ร่วมกับการใช้ค่าแก๊งข้อมูลนาฬิกาดาวเทียมและวงโคจร ดาวเทียม(MADUCA) โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูก ในพื้นที่ประเทศไทย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

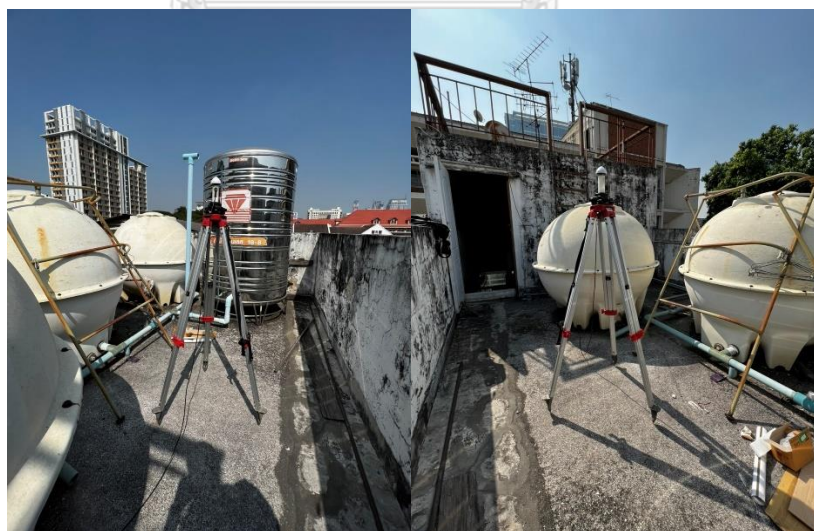
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

พื้นที่เก็บข้อมูลกรณีบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open Area) บริเวณสถานีรับสัญญาณดาวเทียม สถานี CORS CUUT บนดาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4)



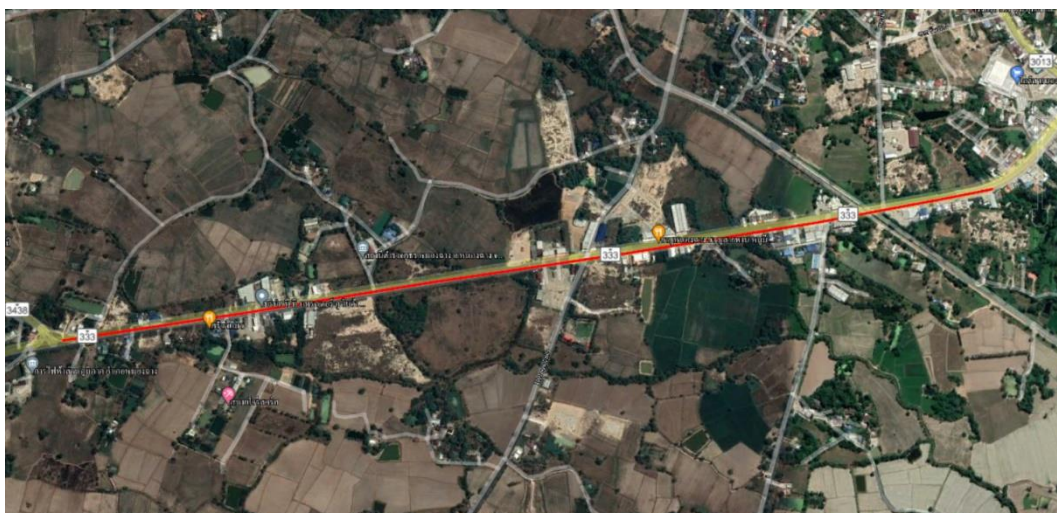
รูปที่ 1 พื้นที่การศึกษกรณีบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open Area) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สถานีฐาน CUUT (Google Earth)

พื้นที่เก็บข้อมูลกรณีบริเวณพื้นที่มีคลื่นหลุด (Multipath Area) อาคารภาควิชา
วิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



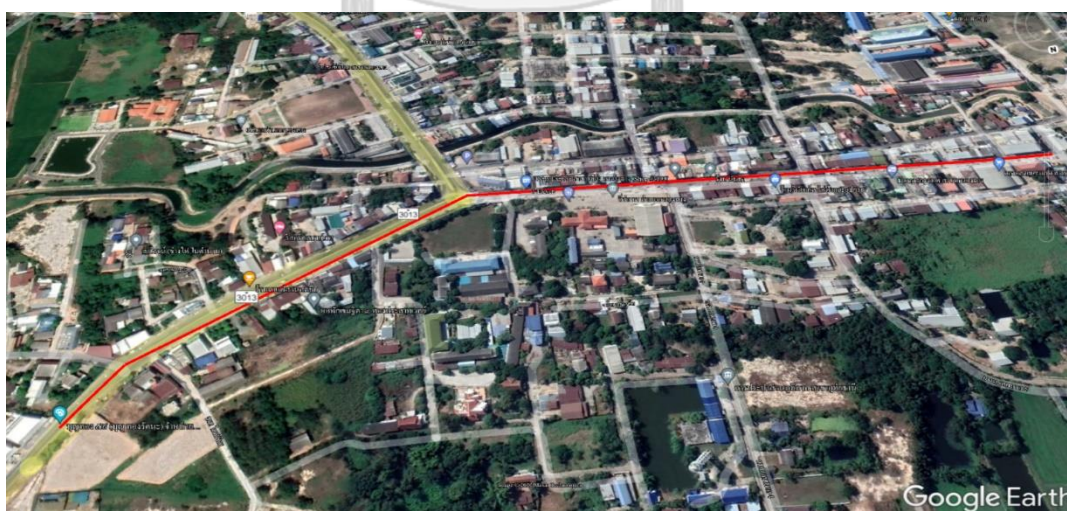
รูปที่ 2 พื้นที่การศึกษกรณีบริเวณพื้นที่มีคลื่นหลุด (Multipath Area) อาคารภาควิชา
วิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พื้นที่เก็บข้อมูลกรณีนำเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าปรับแก้จากระบบ MADOCA ติดตั้งบนรถยนต์ในเขตชนบท (Rural Area) สำหรับการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ในทุกๆวินาที



รูปที่ 3 พื้นที่การศึกษาแสดงเส้นทางรถยนต์ในเขตชนบท (Rural Area) สำหรับการทดสอบ PPP-kinematic บนทางหลวง หมายเลข 333 จังหวัดอุทัยธานี (Google Earth)

พื้นที่เก็บข้อมูลกรณีนำเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าปรับแก้จากระบบ MADOCA ติดตั้งบนรถยนต์ในเขตเมือง (Urban Area) สำหรับการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ในทุกๆวินาที



รูปที่ 4 พื้นที่การศึกษาแสดงเส้นทางรถยนต์ในเขตเมือง (Urban Area) สำหรับการทดสอบ PPP-kinematic ถนนในอำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี (Google Earth)

1.3.2 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

การศึกษาความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดและเพื่อประเมินความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ทำการแบ่งกรณีศึกษาสำหรับทดสอบจุดสถิติเป็น 2 กรณีคือ บริเวณพื้นที่เปิดโล่งและบริเวณพื้นที่มี Multipath สำหรับบริเวณพื้นที่เปิดโล่งเพื่อให้ได้มาซึ่งตำแหน่งอ้างอิงของสถานีอ้างอิงจำเป็นต้องทำการประมวลผลรังวัดหาตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อนำค่าพิกัดอ้างอิงโดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยความถูกต้องจะอยู่ในระดับเซนติเมตร จากสถานี CORS ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งจะส่งประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) จากนั้นทำการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตในภายหลัง หรือ Precise Point Positioning Static (PPP-Static) ของสถานี CORS CUUT โดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยโปรแกรมเชิงวิจัย RTKLIB Takasu (2013) สำหรับใช้เปรียบเทียบข้อมูลกับการทำการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตของสถานี CORS CUUT ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด อาศัยค่าแก้จากระบบ MADOCA ใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยโปรแกรม MAD-WIN ลำดับถัดไปทำการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ในภายหลัง หรือ Precise Point Positioning kinematic (PPP-kinematic) ของสถานี CORS CUUT โดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยโปรแกรมเชิงวิจัย RTKLIB สำหรับใช้เปรียบเทียบข้อมูลกับการทำการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ของสถานี CORS CUUT ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด อาศัยค่าแก้จากระบบ MADOCA ใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยโปรแกรม MAD-WIN และได้เพิ่มเติมการรับสัญญาณโดยใช้เครื่องรับสัญญาณ Magellan System Japan ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณที่ประมวลผลค่าพิกัดของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ ในวันและเวลาเดียวกัน เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA โดยทำการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตและแบบจลน์ตามลำดับซึ่งในเครื่องรับสัญญาณ CHC-i80 จะทำการประมวลผลภายหลังผ่านโปรแกรม RTKLIB และในเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA จะทำการประมวลผลผ่านโปรแกรม MAD-WIN สำหรับการศึกษาการหาค่าพิกัดของจุดเดี่ยวแบบเคลื่อนที่โดยทำการรังวัดทำบนรถยนต์ทำการรังวัดด้วยวิธี Network RTK ด้วยเทคนิค VRS และบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที สำหรับเครื่องรับสัญญาณแบบ

Survey Grade เพื่อเป็นค่าพิกัดอ้างอิงและทำการเปรียบเทียบกับการรังวัดด้วยวิธีการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ หรือ Precise Point Positioning Kinematic (PPP-Kinematic) ผ่านเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด อาศัยค่าแก้จากระบบ MADOCA และบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ด้วยโปรแกรม MAD-WIN โดยแบ่งเป็น 2 พื้นที่ที่ทำการทดสอบคือบริเวณเมืองและชนบท

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

- 1.3.3.1 ข้อมูลสถานีฐาน (Base Station) ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระยะเวลาข้อมูล 1 เดือน (สิงหาคม พ.ศ.2564) บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ในรูปแบบไฟล์ RINEX
- 1.3.3.2 ข้อมูลรับสัญญาณ โดยใช้ตัวรับสัญญาณราคาถูกลง (Low Cost Receiver รุ่น UBLOX-F9P) บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ในรูปแบบไฟล์ UBX (.ubx)
- 1.3.3.3 ข้อมูลค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม โดยใช้ตัวรับสัญญาณราคาถูกลง (Low Cost Receiver รุ่น UBLOX-D9) รับสัญญาณค่าแก้แบบ Broadcast ผ่านดาวเทียม (QZSS) โดยตรง
- 1.3.3.4 ข้อมูลค่าพิกัดที่ประมวลผลแบบเรียลไทม์ บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ในรูปแบบไฟล์ NMEA (.nmea)
- 1.3.3.5 ข้อมูลค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม, วงโคจรดาวเทียม, ค่าแก้จากชั้นบรรยากาศและค่าแก้เสาอากาศ สำหรับการประมวลผลภายหลัง จาก The International GNSS Service (IGS)
- 1.3.3.6 ข้อมูลรับสัญญาณ โดยใช้เครื่องรับชนิด Survey Grade (CHC-i80) บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ในรูปแบบไฟล์ Observation (.O)
- 1.3.3.7 ข้อมูลค่าพิกัดที่ประมวลผลแบบเรียลไทม์ โดยใช้เครื่องรับชนิด Survey Grade (MSJ-3008-GM 4-QZS) ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ในรูปแบบไฟล์ NMEA (.nmea)

1.3.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษา

1. ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงจากค่าที่รังวัดได้จากค่า Mean Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Standard Deviation (SD) ดังนี้
 - PPP Static เทียบระหว่าง Survey Grade Receiver กับ Low-Cost Receiver ร่วมกับค่าแก้ MADOCA
 - PPP Kinematic ระหว่าง Survey Grade Receiver กับ Low-Cost Receiver ร่วมกับค่าแก้ MADOCA

เพื่อเปรียบเทียบค่า Accuracy ที่บ่งบอกว่าค่าพิกัดที่รังวัดจากเครื่องสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้จาก MADOCA มีความใกล้เคียงกับค่าจริงมากน้อยเพียงใดและเพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับ Survey Grade GNSS ว่ามีความแตกต่างกันเพียงใด

2. ทำการเปรียบเทียบข้อมูลทดสอบใน 2 บริเวณ คือบริเวณพื้นที่เปิดโล่งและบริเวณพื้นที่ที่มีคลื่นหลุด (Multipath)
3. ทำการเปรียบเทียบเส้นทางรถยนต์ที่รังวัดแบบ RTK Network โดยวิธี VRS ของกรมที่ดิน โดย Survey Grade GNSS กับรังวัดแบบ PPP Kinematic โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้จาก MADOCA
4. ทำการเปรียบเทียบข้อมูลค่าพิกัดและความถูกต้องทางตำแหน่งที่รังวัดโดยการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณบนรถยนต์ใน 2 บริเวณคือเขตเมืองและเขตชนบท

1.3.5 เครื่องมือสำหรับการศึกษาวิจัย

1. การทดสอบการรับสัญญาณดาวเทียมจุดเดี่ยวแบบสถิตและแบบจลน์
 - เครื่องมือสำรวจรังวัดดาวเทียม ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 (ของภาควิชาสำรวจจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
 - เสารับสัญญาณดาวเทียม Trimble (TRM57971.00) ของสถานีฐาน CUUT
 - ตัวแยกสัญญาณดาวเทียม (GNSS splitter)
 - Receiver Trimble NetR9
 - Low-cost receiver (u-blox ZED F9P) ชนิดหลายความถี่
2. การทดสอบการรับสัญญาณดาวเทียมจุดเดี่ยวแบบจลน์กรณีติดตั้งบนรถยนต์

- เครื่องมือสำรวจรังวัดดาวเทียม ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 (ของภาควิชาสำรวจจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- Low-cost receiver (u-blox ZED F9P) ชนิดหลายความถี่
- Low cost Multiband GNSS Antenna (ยี่ห้อ Tallysman รุ่นTW3972XF)

1.3.6 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.IDEL (PYTHON 3.9)
- 2.RTKLIB เวอร์ชัน 2.4.3.b34
- 3.Notepad++
- 4.Excel
- 5.MAD-WIN
- 6.FileZilla
- 7.Landstar7

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลรังวัดทางตำแหน่งของจุดเดียว โดยข้อมูลของระบบดาวเทียม GNSS ร่วมกับการใช้ค่าแก้ไขข้อมูลนาฬิกา ดาวเทียมและวงโคจรดาวเทียม (MADCOCA) โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูก ในพื้นที่ประเทศไทย
- 1.4.2 ทำให้ทราบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยอาศัยค่าแก้ไขจาก MADCOCA ในพื้นที่ประเทศไทย
- 1.4.3 สามารถประยุกต์ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยอาศัยค่าแก้ไขจาก MADCOCA ประโยชน์ในด้านต่างๆในพื้นที่ประเทศไทย เช่น การใช้ในด้านการนำทางรถยนต์, การรับสัญญาณ เพื่อหาค่าพิกัดพื้นที่ห่างไกลและไม่มีอินเทอร์เน็ตเข้าถึง เป็นต้น

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีสำคัญ

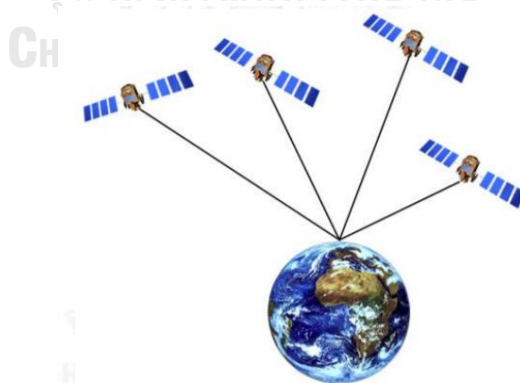
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

2.1.1 เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมบูรณ์ (Absolute Positioning)

การหาดำแหน่งแบบสัมบูรณ์ (Absolute Positioning) หรือเรียกอีกอย่างว่าการหาดำแหน่งแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning: SPP) โดยการรังวัดแบบสัมบูรณ์จะอาศัยเครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียว โดยนำไปติดตั้งในบริเวณที่ต้องการทราบค่าพิกัดทางตำแหน่ง เนื่องจากสามารถหาค่าพิกัดของจุดได้ทันทีจึงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานหลายด้านเช่น การนำหน (บนบกในรถยนต์ ทะเลในเรือ และอากาศในเครื่องบิน) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ทำให้การรังวัดได้ต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ตัวเพื่อที่จะสามารถทำการคำนวณหาค่าพิกัดทั้ง X,Y และ Z ได้เนื่องจากมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ 4 ตัวด้วยกัน คือ ค่าจุดพิกัด (X,Y,Z) และ ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกา โดยการหาระยะจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ก็จะได้ตำแหน่งของเครื่องรับเทคนิคนี้แบ่งออกได้เป็นสองแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ใช้

- การหาดำแหน่งจุดเดี่ยวโดยใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) คำนวณได้จากข้อมูลรหัส P หรือ C/A มีความละเอียดในระดับเมตร : สามารถคำนวณได้ง่าย

- การหาดำแหน่งจุดเดี่ยวโดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase) คำนวณได้จากคลื่นส่ง L1 และ/หรือ L2 มีความละเอียดในระดับมิลลิเมตร : ไม่สามารถคำนวณได้ง่าย ต้องใช้เครื่องรับและซอฟต์แวร์ชนิดจำเพาะ พวงเพ็ชร (2560)



รูปที่ 5 การรับสัญญาณแบบจุดเดี่ยว

2.1.2 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยว(Single Point Position: SPP)

การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวเป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณแบบ Geodetic ซึ่งเป็นการรวบกันของตำแหน่งดาวเทียมที่มีความเอียงสูงกับนาฬิกาดาวเทียมด้วยเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่ เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (2560) เฟียร์ แต่จะมีค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงในการประมวลผลแบบนี้ ความถูกต้องของวิธีการนี้จะอยู่ที่ประมาณ 20 เมตรที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์เมื่อรับด้วยเครื่องมือรับสัญญาณแบบนำหนหรือแบบพกพา โดยมีการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้ดังสมการที่ 1 พวงเพ็ชร (2560)

- ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรดาวเทียม
- ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม
- ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ
- คลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ
- คลาดเคลื่อนที่เกิดจากคลื่นหลายวิถี

$$R = \rho + \Delta r + d_{ion} + d_{trop} + c(dt - dT) + ep + \varepsilon_R \quad (1)$$

R = สมการค่ารังวัดซูโดเรนจ์ (Pseudo range) (เมตร)

ρ = ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร)

Δr = ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)

d_{ion} = ค่าความคลาดเคลื่อนจากความเอียงของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)

d_{trop} = ค่าความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

c = ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

dt = ค่าความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

dT = ค่าความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

ep = ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)

ε_R = ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในซูโดเรนจ์ที่วัดได้ของรหัส(เมตร)

2.1.3 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Position: PPP)

การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เป็นเทคนิคการเสริมสัญญาณที่ช่วยขจัดข้อผิดพลาดของระบบ GNSS เพื่อให้ระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูงโดยใช้เครื่องรับเพียงเครื่องเดียว โดยจะอาศัยค่าแกว่งโคจรดาวเทียมและค่าแกว่งนาฬิกาดาวเทียมโดยค่าปรับแก้ที่สร้างขึ้นจากเครือข่าย CORS ทั่วโลก จะถูกส่งไปยังผู้ใช้ผ่านทางดาวเทียมโดยตรงหรือผ่านทางอินเทอร์เน็ต ส่งผลให้ได้ตำแหน่งแบบเรียลไทม์ในระดับเดซิเมตรโดยทั่วไปแล้ว การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ต้องใช้เวลา 5-30 นาทีในการบรรจบกันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อน เช่น สภาวะบรรยากาศ คลื่นหลายวิถี (Multipath) และเรขาคณิตของดาวเทียม ข้อจำกัดหลักของการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง คือไม่สามารถแก้ไขความกำกวมของข้อผิดพลาดเฟสพาหะ และใช้การประมาณค่าเหล่านี้ใช้เวลายาวนาน ซึ่งต้องมีการเริ่มต้นใหม่โดยสมบูรณ์หากสัญญาณหายไป โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ Choy and Harima (2019)

$$L_i^k - \rho_i^k - c(\Delta_i - \Delta t^k) - \alpha_i^k T_i + I_i^k - \lambda B_i^k - \varepsilon = 0 \quad (2)$$

$$P_i^k - \rho_i^k - c(\Delta_i - \Delta t^k) - \alpha_i^k T_i + I_i^k - c(b^k + b_i) - \varepsilon = 0 \quad (3)$$

L_i^k = ค่ารังวัดเฟสคลื่นส่ง (carrier phase) (เมตร)

P_i^k = ค่ารังวัดซูโดเรนจ์ (Pseudo range) (เมตร)

ρ_i^k = ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร)

B_i^k = จำนวนของเฟสคลื่นส่ง (carrier phase bias)

Δ_i = ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

Δt^k = ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

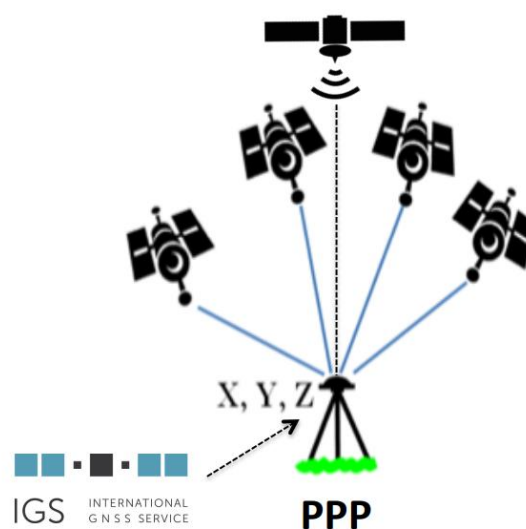
T_i = ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)

α_i^k = Mapping ฟังก์ชันของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)

I_i^k = ความคลาดเคลื่อนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)

b_i = รหัสของเครื่องรับ

- b^k = รหัสของดาวเทียม
- λ = ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (carrier wavelength) (เมตร)
- c = ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)
- ϵ = ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มหรือค่าเศษเหลือ (เมตร)



รูปที่ 6 การรับสัญญาณแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

(แหล่งที่มา: https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/16_PPP.pdf)

2.1.4 โครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ กรมที่ดิน (2563) คือ

1) สถานีควบคุม (control station)

คือ สถานีซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (server) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียม ที่ส่งมาจากสถานีรับสัญญาณอ้างอิง หรือ Cors และตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งาน สำรองข้อมูล ตลอดจนให้บริการดาวน์โหลดข้อมูลสัญญาณดาวเทียมสำหรับใช้คำนวณค่าพิกัด (Post Process) ซึ่งสถานีควบคุมของระบบโครงข่ายฯ ของกรมที่ดิน

2) สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (Continuously Operating Reference Station: CORS)

เป็นสถานีรับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งแบบถาวร ซึ่งสถานีฐานจะทำการรับสัญญาณดาวเทียมตลอดเวลา 24 ชั่วโมง และส่งสัญญาณค่าที่รังวัดได้ไปยังสถานีควบคุม (control station) ผ่านทางระบบสื่อสาร

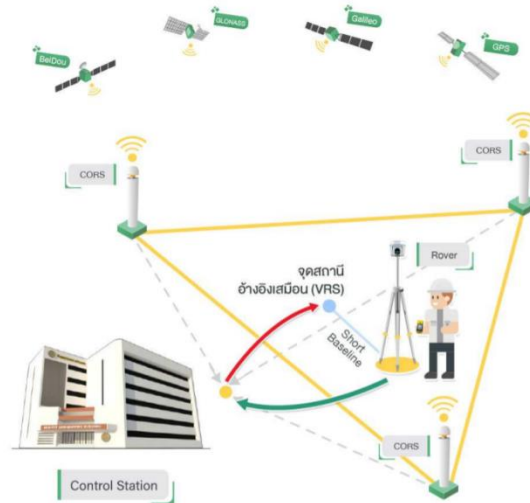
3) ระบบสื่อสาร (Communication System)

เป็นระบบที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (CORS) กับ สถานีควบคุม (control station) โดยปกติจะใช้ระบบอินเทอร์เน็ต เช่น ระบบ ADSL หรือ Leased Line เพราะความต้องการความเร็วของระบบที่ค่อนข้างสูง และสถานีอ้างอิงจะต้องมีการทำงานตลอดเวลา ทำให้ต้องมีการสำรองข้อมูลอยู่ตลอดเวลาอีกด้วย ส่วนการติดต่อระหว่างผู้ใช้กับสถานีควบคุมสามารถใช้ อินเทอร์เน็ตมือถือได้ เพราะไม่ได้ต้องการความมั่นคงของระบบมากนัก

หลักการทำงานรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์(RTK GNSS Network)

ที่ใช้แบบระบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS) ซึ่งหลักการทำงานของระบบ มีดังนี้

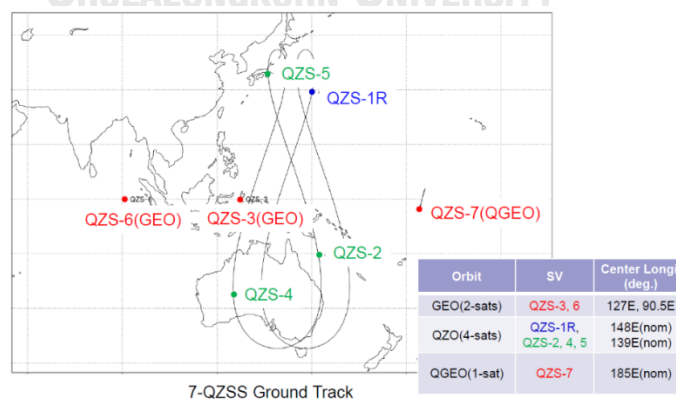
- **สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (CORS)** จะรับสัญญาณดาวเทียมและบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที ตลอด 24 ชั่วโมง จากนั้นจะส่งข้อมูลเหล่านั้นไปยังสถานีควบคุม (Control Station)
- **เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบเคลื่อนที่ (Rover)** จะทำการรับสัญญาณดาวเทียมในจุดที่จะรังวัด หรือตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด จากนั้นผู้ใช้จะเชื่อมต่อกับ สถานีควบคุมผ่านทางอินเทอร์เน็ต จากนั้นระบบประมวลผลของสถานีควบคุม (Control Station) จะสร้างตำแหน่งสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ใกล้เคียงกับตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมของผู้ใช้งาน (Rover)



รูปที่ 7 วิธีการทำงานของระบบ Virtual Reference Station (VRS)
(แหล่งที่มา: คู่มือแนวทางรังวัด RTK GNSS Network กรมที่ดิน)

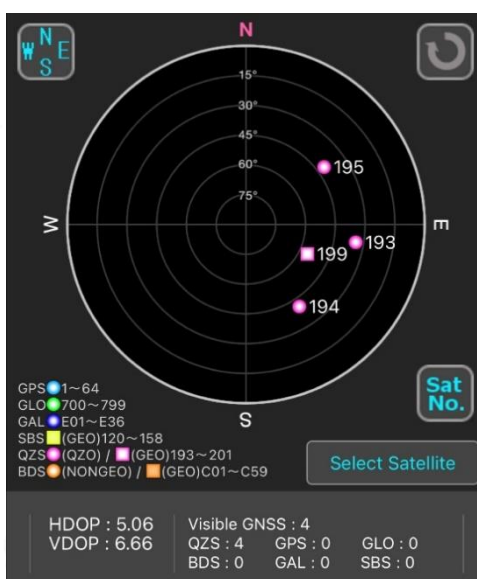
2.1.5 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)

ระบบดาวเทียม Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) หรือมีชื่อเล่นว่า “MICHIBIKI” โดยดวงแรกถูกส่งขึ้นไปในปี 2010 และปัจจุบันมีดาวเทียมทั้งสิ้น 4 ดวง วงโคจรถูกออกแบบมาให้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ตำแหน่งที่ดีและออกแบบมาให้ใช้งานร่วมกับระบบดาวเทียม GPS ได้ ให้บริการค่าแก้ไขในระบบ MADOCA, CLAS และ DCR อีกทั้งยังประกาศให้ใช้งานในเดือน พฤศจิกายน ปี 2018 ในอนาคตจะมีการติดตั้งเพิ่มอีก 3 ดวง รวมกับของเดิม รวมทั้งสิ้น 7 ดวง คาดว่าจะแล้วเสร็จในปี 2023 Office (2018)



รูปที่ 8 วงโคจรของดาวเทียม Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) ทั้ง 7 ดวง
(แหล่งที่มา: Cabinet Office, Quasi-Zenith Satellite System)

ระบบดาวเทียมนี้ ออกแบบมาให้สามารถทำงานร่วมกับระบบดาวเทียมนำหน GPS อีกทั้งดาวเทียมนี้ยังสามารถเห็นบริเวณมุมที่สูง ทำให้มีการมองเห็นที่ดีและค่า DOP ที่ดีในทั้งเขตเมืองที่มีตึกสูงและเขตชนบท ที่เป็นพื้นที่เปิดโล่ง และยังให้บริการข้อมูลทางตำแหน่งในระดับต่ำกว่าเมตรและระดับเซนติเมตร อีกทั้งยังให้บริการแจ้งเตือนเมื่อเกิดภัยพิบัติ



รูปที่ 9 ตำแหน่งของระบบดาวเทียม Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร (GNSS View)

สำหรับในประเทศไทยจะสังเกตเห็นระบบดาวเทียม Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) ในช่วงมุมเงย 15-60 องศาโดยอ้างอิงที่กรุงเทพฯ ซึ่งค่าที่สูงให้ค่า DOP และการรับสัญญาณที่ดีทั้งในเมืองและต่างจังหวัด

2.1.6 Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA)

เป็นระบบค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้नाฬิกาดาวเทียม Agency (2014) ที่ถูกพัฒนาโดยองค์การสำรวจอวกาศญี่ปุ่น (Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA) ในปัจจุบันให้บริการสำหรับระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, QZSS โดยค่าแก้จะถูกส่งในรูปแบบ RTCM SSR Format ในแต่ละดาวเทียมมีรายละเอียดดังตาราง Corporation (2020)

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ของระบบ MADOCA ในแต่ละกลุ่มดาวเทียม

Product	Interval		RTCM		
	Estimation	Provide	GPS	GLONASS	QZSS
Orbit correction	30	1	1057	1063	1246
Clock correction	1	1	1058	1064	1247
HR-clock correction	1	1	1062	1068	1251
URA	1	1	1061	1067	1250

โดยรหัส SSR message แต่ละตัวเลขจะมีหมายความดังนี้

- 1057 หมายถึง SSR GPS Orbit Correction
- 1058 หมายถึง SSR GPS Clock Correction
- 1059 หมายถึง SSR GPS Code Bias
- 1060 หมายถึง SSR GPS Combined Orbit Correction and Clock Correction
- 1061 หมายถึง SSR GPS URA
- 1062 หมายถึง SSR GPS High Rate Clock Correction
- 1063 หมายถึง SSR GLONASS Orbit Correction
- 1064 หมายถึง SSR GLONASS Clock Correction
- 1065 หมายถึง SSR GLONASS Code Bias
- 1066 หมายถึง SSR GLONASS Combined Orbit Correction and Clock Correction
- 1067 หมายถึง SSR GLONASS URA
- 1068 หมายถึง SSR GLONASS High Rate Clock Correction

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลความถูกต้องของการประมาณปรับแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมของระบบ

MADOCA

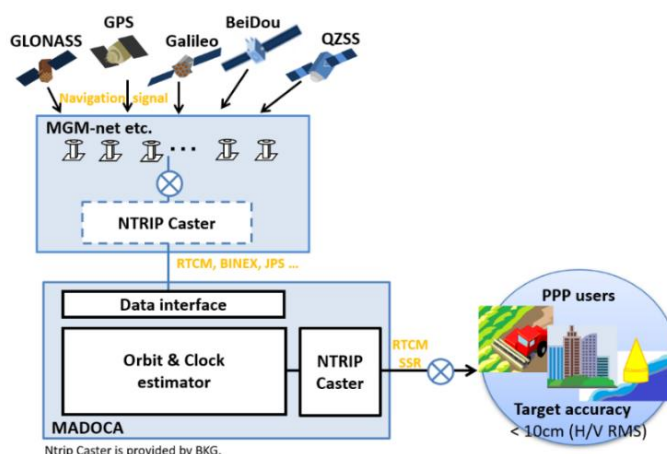
ผลิตภัณฑ์	แบบออฟไลน์			แบบเรียลไทม์		
	GPS	GLO	QZS	GPS	GLO	QZS
วงโคจรดาวเทียม	3 ชม.	7 ชม.	7 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	9 ชม.
นาฬิกาดาวเทียม	0.1นาโนวินาที	0.25นาโนวินาที	0.1นาโนวินาที	0.1นาโนวินาที	0.25นาโนวินาที	0.25นาโนวินาที

(แหล่งที่มา : https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html)

โดยข้อมูลค่าแก้ระบบ MADOCA จะสามารถรับได้จาก 3 ช่องทาง

- 1) ค่าแก้แบบเรียลไทม์ที่รับจากดาวเทียมโดยตรงจากระบบดาวเทียม QZSS ในรูปแบบสัญญาณ L6E การรับวิธีนี้จะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณจำเพาะและต้องเป็นพื้นที่เปิดโล่งที่สามารถมองเห็นดาวเทียม QZSS ได้ ส่วนใหญ่จะเป็นประเทศในเขตเอเชีย-โอเชียเนีย
- 2) ค่าแก้แบบเรียลไทม์ที่รับผ่านทางอินเทอร์เน็ต ในรูปแบบ Ntrip ซึ่งจำเป็นมีชื่อผู้ใช้และรหัสสำหรับเข้าใช้งาน การรับค่าแก้วิธีนี้สามารถรับได้ทั่วโลกแต่จำเป็นต้องมีอินเทอร์เน็ต
- 3) ค่าแก้แบบออฟไลน์ ใช้สำหรับการประมวลผลภายหลังในรูปแบบไฟล์ RTCM SSR ซึ่งสามารถให้ค่าแก้แบบเรียลไทม์ของผู้ใช้งาน

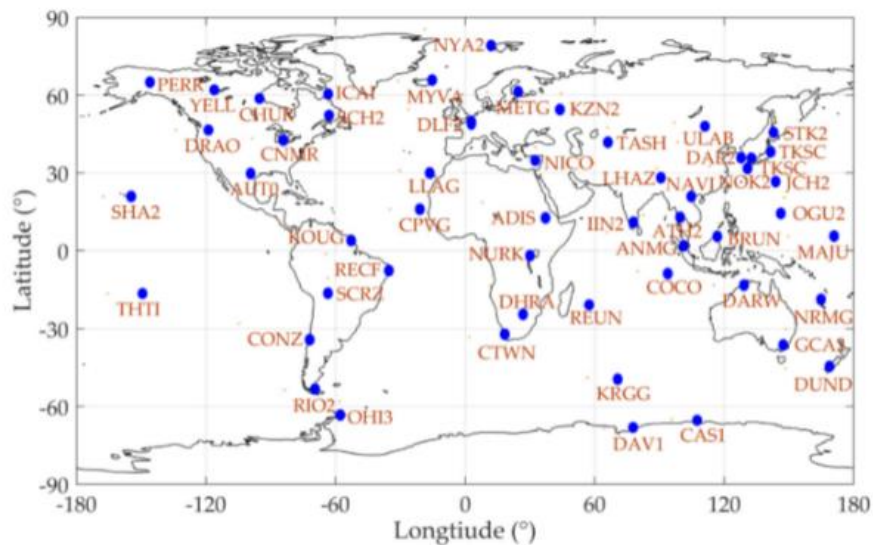
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 10 กระบวนการได้มาซึ่งค่าแก้ในระบบมาโดก้า (MADOCA)

(แหล่งที่มา: https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html)

โดยมีความแม่นยำที่ต่ำกว่า 10 เซนติเมตร โดยรูปแบบของงค่าแก้จะอยู่ลักษณะ RTCM SSR และไฟล์ค่าพิกัดแบบ .nmea มีวัตถุประสงค์ตอบสนองความต้องการที่จะให้บริการการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์(PPP) ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม QZSS โดยตรง หรือรับค่าแก้ผ่านทางอินเทอร์เน็ต ซึ่งจะสตรีมข้อมูลแบบเรียลไทม์จาก 53 สถานี CORS ทั่วโลก จนได้ระบบค่าแก้ที่มีชื่อว่า MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis)



รูปที่ 11 ตำแหน่งของสถานีฐาน (IGS) ที่นำมาใช้ทำค่าแก้จากระบบมาโดก้า(MADOCA)
(แหล่งที่มา: https://ssl.tksk.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html)

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา

Ken HARIMA and Suelynn CHOY Harima et al. (2014) ศึกษา Performance of Real-Time Precise Point Positioning Using MADOCA-LEX Augmentation Messages โดยมีวัตถุประสงค์ที่ทดสอบประสิทธิภาพของสัญญาณ LEX และค่าแก้จากระบบ MADOCA ในออสเตรียในรูปแบบการให้บริการค่าแก้แบบ Real time โดยการทดสอบ Real time PPP เพื่อหาประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบ Real time และคุณภาพของค่าแก้ดาวเทียมและวงโคจรดาวเทียม ที่รับจากระบบ MADOCA สำหรับการศึกษานี้จะแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ การทดสอบแบบ Fixed Point ทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงของสถานี CORS RJAP ที่ประเทศออสเตรีย บนกรอบอ้างอิง ITRF08 พบว่าความถูกต้องของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (Static PPP test) ให้ความถูกต้องให้ความถูกต้องทางตะวันออก-ตก 2.9 เซนติเมตร ทางเหนือ-ใต้ 1.2 เซนติเมตร และทางตั้ง 2.6 เซนติเมตรสำหรับค่าแก้โดยรับสัญญาณ MADOCA-LEX และให้ความถูกต้องให้ความถูกต้องทางตะวันออก-ตก 1.9 เซนติเมตร ทางเหนือ-ใต้ 1.5 เซนติเมตร และทางตั้ง 2.2 เซนติเมตรสำหรับการประมวลผลโดยใช้ผลิตภัณฑ์ จาก IGS สำหรับการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic PPP test) ให้ความถูกต้องให้ความถูกต้องทางตะวันออก-ตก 8.1 เซนติเมตร ทางเหนือ-ใต้ 3.6 เซนติเมตร และทางตั้ง 11.5 เซนติเมตรสำหรับค่าแก้โดยรับสัญญาณ MADOCA-LEX และให้ความถูกต้องให้ความถูกต้องทางตะวันออก-ตก 6.0 เซนติเมตร ทางเหนือ-ใต้ 3.7 เซนติเมตร และทางตั้ง 10.1 เซนติเมตรสำหรับการประมวลผลโดยใช้ผลิตภัณฑ์ จาก IGS ยังมีอีกการทดสอบคือ Vehicle Tests โดยการติดตั้งเสารับสัญญาณบนหลังคาของรถยนต์

จากนั้นเครื่องรับสัญญาณคือ Leica GX1200 สำหรับ RTK Network เป็นจุดอ้างอิงเปรียบเทียบกับ MADOCA-LEX และ MADOCA-NTRIP สำหรับค่าความถูกต้องที่ได้ในสามมิติ ในกรณีของ MADOCA-LEX เป็น 5.0 2.7 และ 9.8 เซนติเมตรตามลำดับ MADOCA-NTRIP เป็น 1.8 1.3 และ 9.5 เซนติเมตรตามลำดับ และ IGS-RT CLK11 เป็น 8.8 3.9 7.3 เซนติเมตรตามลำดับสำหรับบทสรุปของบทความนี้ พบว่าสำหรับการประมวลผลแบบ PPP static ความถูกต้องในสามมิติอยู่ที่ 0.041 เมตร ที่เวลาบรรจบสองชั่วโมงขึ้นไป และมีความใกล้เคียงกับการประมวลผลภายหลังของ IGS-RT ที่ 0.033 เมตร สำหรับ PPP- Kinematic ความถูกต้องในสามมิติ อยู่ที่ 0.200 เมตร ที่เวลาบรรจบสองชั่วโมงขึ้นไป และมีความใกล้เคียงกับการประมวลผลภายหลังของ IGS-RT ที่ 0.145 เมตรซึ่งได้รับความแม่นยำอยู่ในระดับเดซิเมตร และสำหรับการทดสอบยานพาหนะด้วยความเร็วประมาณ 10

เมตรต่อวินาที ผลลัพธ์มีความใกล้เคียงกันระหว่าง MADOCA และ RTK network โดยทั้งหมดนี้ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขสถานะท้องฟ้าเปิด สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการดำเนินการขึ้นเพื่อพัฒนา ระบบค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม (MADOCA-LEX) โดยความร่วมมือระหว่าง Australian Cooperative Research Centre for Spatial Information (CRCSI) และ The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

Namie and Kubo (2020) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบดาวเทียม Quasi-Zenith (QZSS) ในพื้นที่ประเทศญี่ปุ่น ในระยะเริ่มต้นหลังจากที่ได้มีการส่งดาวเทียมขึ้นไปครบทั้งสี่ดวง และ Micchibiki ได้เริ่มให้บริการทางตำแหน่งแบบสถิตและบนยานพาหนะที่กำลังเคลื่อนที่ ในบริการ L6D-CLAS (centimeter-Level Augmentation Service) และ L6E-MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) ซึ่งเป็นการให้บริการค่าแก้แบบ Real – time โดยการประเมินนี้จะสนใจความเชื่อมั่นที่ 95 % โดยจะพิจารณา 2 ส่วน คือ การประเมินความถูกต้องของตำแหน่งจุดคงที่ สืบเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) และอีกส่วนจะเป็นการทดสอบยานพาหนะแบบเคลื่อนที่ 2 คัน คันแรกเป็นการประเมินความแตกต่างของค่า RMS ของบริการ L6D-CLAS และ L6E-MADOCA คันที่สอง จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง RTK-GNSS กับ L6D-CLAS และ L6E-MADOCA ต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบทางตำแหน่งของจุดคงที่ (Fixed-point Positioning Experiment) ในการทดสอบแบ่งเป็นสองแบบ คือ แบบท้องฟ้าเปิดโล่ง ทดสอบบริเวณลาดฟ้าของอาคาร ที่ระดับความสูงประมาณ 80 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล ทำการทดสอบแบบ PPP-static รับสัญญาณน้อยกว่า 7 ชั่วโมงพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางละจุด 3.52 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 4.87 เซนติเมตร ทางดิ่ง 9.41 เซนติเมตร สำหรับบริการ CLAS และ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางละจุด 6.08 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 6.64 เซนติเมตร ทางดิ่ง 11.1 เซนติเมตรสำหรับบริการ MADOCA

และแบบที่สอง คือการทดสอบสัญญาณในเมือง ให้เครื่องรับสัญญาณอยู่ที่ระดับ 10 เมตรระหว่างตึกสูง โดยรับสัญญาณน้อยกว่า 24 ชั่วโมง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางละจุด 16.4 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 17.0 เซนติเมตร ทางดิ่ง 44.6 เซนติเมตร สำหรับบริการ CLAS และ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางละจุด 37.2 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 83.3 เซนติเมตร ทางดิ่ง 65.7 เซนติเมตรสำหรับบริการ MADOCA ส่วนการทดสอบแบบติดตามยนต์ประมวลผลแบบ PPP-kinematic ในกรณีแรกประเมินประสิทธิภาพบริการ L6D-CLAS และ L6E-MADOCA เปรียบเทียบกันของค่าต่าง RMS Error ที่ความเร็วรถยนต์ต่ำกว่า 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที บริเวณชนบท พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางละจตุจุด 31.5 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 35.8 เซนติเมตร ทางดิ่ง 156 เซนติเมตร ในกรณีที่สองทดสอบในบริเวณเมือง โดยการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กับ RTK-GNSS ให้ยึดเป็นจุดอ้างอิง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางละจตุจุด 124 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 58 เซนติเมตร ทางดิ่ง 224 เซนติเมตร สำหรับบริการ CLAS และ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางละจตุจุด 129 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 200 เซนติเมตร ทางดิ่ง 3.99 เซนติเมตรสำหรับบริการ MADOCA สรุปผลการทดสอบได้ว่า กรณีจุดคงที่ (Fixed point test) ค่าความถูกต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์(ทางราบไม่เกิน 6 เซนติเมตร และทางดิ่ง ไม่เกิน 12 เซนติเมตร) ส่วนกรณีทดสอบบนรถยนต์ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนยังเกินมาตรฐานความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ (ทางราบไม่เกิน 12 เซนติเมตร และทางดิ่ง ไม่เกิน 24 เซนติเมตร)

Fredeluces et al. (2020) ได้ศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ Low-cost Receiver ร่วมกับการใช้ค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม (Multi-GNSS Advanced Demonstration Tool for Orbit and Clock Analysis : MADOCA) ในพื้นที่ประเทศฟิลิปปินส์ ที่มหาวิทยาลัยฟิลิปปินส์ โดยต้องการค่าความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ อาทิ เช่น การขนส่ง การเดินเรือ การทำเกษตรกรรม และใช้ในการควบคุมจักรกลที่ต้องใช้ GNSS ในการควบคุม จากบทความนี้ได้กล่าวประสิทธิภาพของค่าแก้ MADOCA จะมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เช่น ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ ฟิลิปปินส์ เวียดนาม เป็นต้น ในปัจจุบันความต้องการเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกมีความต้องการเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความแม่นยำและความถูกต้องที่สูงขึ้น สำหรับการศึกษานี้จะทดสอบประสิทธิภาพของจุดเดียวความละเอียดสูงแบบเรียลไทม์โดย MADOCA-LEX ทำการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 โดยทำการประมวลผลภายหลัง เครื่องรับ MSJ-3008-GM 4-QZS โดยทำการเปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณราคาถูก UBLOX ZED-F9P ร่วมกับค่าแก้จาก MADOCA ทั้งนี้เครื่องสัญญาณราคาประหยัดยังเริ่มที่จะมาแทนที่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมในงานสำรวจโดยระบบค่าแก้สามารถให้ความถูกต้องในระดับเซนติเมตรด้วยราคาที่ถูกลงมาก

ในการศึกษานี้จะจำกัดเขตการศึกษาในรูปแบบการรังวัดแบบสถิต สำหรับการรังวัดทำในพื้นที่เปิดโล่ง โดยใช้สองเครื่องรับสัญญาณแต่เสาอากาศเดียว รับสัญญาณระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, QZSS เท่านั้นเพราะว่า MADOCA ถูกออกแบบมาสำหรับสามระบบนี้เท่านั้น ในตอนนี้สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบจะเปรียบเทียบกับค่าพิกัดจริงของสถานีฐาน จากผล

การทดสอบการค่าตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงทั้งสามเครื่องรับสัญญาณแสดงค่าความถูกต้องดังนี้ โดยเครื่องรับสัญญาณ ZED-F9P ให้ความถูกต้องทางตะวันออก-ตก 5.28 เซนติเมตร ทางเหนือ-ใต้ 2.89 เซนติเมตร และทางตั้ง 9.55 เซนติเมตร ส่วนเครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 ให้ความถูกต้องทางตะวันออก-ตก 3.54 เซนติเมตร ทางเหนือ-ใต้ 2.55 เซนติเมตร และทางตั้ง 8.74 เซนติเมตร และเครื่องรับ MSJ-3008-GM 4-QZS ให้ความถูกต้องทางตะวันออก-ตก 7.17 เซนติเมตร ทางเหนือ-ใต้ 3.58 เซนติเมตร และทางตั้ง 22.32 เซนติเมตร พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกเมื่อนำไปใช้ร่วมกับค่าแก้ MADOCA มีความถูกต้องใกล้เคียงกับเครื่องรับสัญญาณแบบ Survey Grade ส่วนการมองเห็นดาวเทียมในบริเวณประเทศฟิลิปปินส์ สามารถมองเห็นได้ตลอดเวลาทำให้สามารถรับค่าแก้ในรูปแบบสัญญาณ Broadcast LEX ได้และมีคุณภาพดีนั้นหมายความว่า ประเทศฟิลิปปินส์สามารถใช้บริการของ MADOCA ได้



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ในพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมไปเปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในงานสำรวจ โดยจะแบ่งศึกษาเป็น 2 กรณีศึกษาคือความถูกต้องพิกัดจุดถาวร (Fixed Point Test) แบ่งเป็นบริเวณพื้นที่โล่งแจ้งและพื้นที่มีคลื่นหลุดหลายวิถี (Multipath) และการทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test) แบ่งเป็นบริเวณเมืองและชนบท โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาไปที่จุดเด่นของค่าแก้จากระบบ MADOCA ซึ่งเป็นค่าแก้ทางพิกัดและวงโคจรดาวเทียมแบบเรียลไทม์ ทำให้ใช้รูปแบบการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงทั้งแบบสถิต PPP-Static และแบบจลน์ (PPP-Kinematic)

3.1 ศึกษาศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาเทคนิคการสำรวจจริงวัดด้วยระบบดาวเทียม GNSS คือเทคนิคการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) แบบสถิตและแบบจลน์และวิธี Network RTK โดยเทคนิค Virtual Reference Station เป็นต้นอีกทั้งยังศึกษาเกี่ยวกับระบบค่าแก้มาโดก้าของระบบดาวเทียม QZSS

3.2 ศึกษาการใช้งานซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง

- RTKLIB: ใช้สำหรับประมวลผลภายหลังสำหรับเทคนิคการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (แบบสถิตและแบบจลน์)
- MAD-Win: ใช้สำหรับประมวลผลสำหรับเทคนิคการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวแบบเรียลไทม์ด้วยค่าแก้จากระบบมาโดก้า
- FileZilla: ใช้สำหรับดาวโหลดค่าแก้ต่างๆที่จำเป็นสำหรับการประมวลผลภายหลัง
- IDLE (Python3.9): ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมแปลงไฟล์ค่าพิกัด
- Google Earth Pro: ใช้สำหรับเปรียบเทียบเส้นทางและค่าพิกัดของการทดสอบบนยานพาหนะ

3.3 วางแผนแบบออกแบบการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ

การทดสอบประสิทธิภาพของ Low-Cost Receiver โดยอาศัยค่าแก้ MADOCA (Real Time PPP Using MADOCA) ตามงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นการทดสอบ 2 แบบ คือ การทดสอบความถูกต้องพิกัดจุดถาวร (Fixed Point Test) และการทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test)

3.3.1 การทดสอบความถูกต้องพิกัดจุดถาวร (Fixed Point Test)

การทดสอบของจุดถาวร (Fixed Point Test) จะแบบพื้นที่ที่ศึกษาออกเป็น 2 กรณีศึกษาคือ บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง(Open Area) และบริเวณที่มีคลื่นหลายวิถี (Multipath Area)

3.3.1.1 บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open Area)

การทดสอบในรูปแบบนี้จะทำการทดสอบที่บริเวณสถานีรับสัญญาณดาวเทียม สถานี CORS CUUT บนตาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) เพราะบริเวณโดยรอบโล่งไม่มีอาคาร บดบัง ทำให้ได้ การทดสอบในอุดมคติ โดยจะคำนวณค่าพิกัดอ้างอิงจากตำแหน่งของจุดที่นำมาเปรียบเทียบกับได้ จากการประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) จากข้อมูลรังวัดทุก ทุกวินาทีเป็นเวลา 7 วัน

1. การทดสอบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP Static test)

เปรียบเทียบระหว่าง Survey Receiver Trimble NETR9 ของสถานีฐาน CUUT(ประมวลผลแบบ Post Process PPP Static) ด้วยโปรแกรม RTKLIB และ Low Cost Receiver UBLOX F9P(L1/L2/E5B) โดยอาศัยค่าแก้วงโคจร และนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA ซึ่งประมวลผลแบบ Real Time PPP Static ด้วยโปรแกรม MAD-WIN โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลการรับ สัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน

2. การทดสอบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์(PPP Kinematic test)

เปรียบเทียบระหว่าง Survey Receiver Trimble NETR9 ของสถานีฐาน CUUT(ประมวลผลแบบ Post Process PPP Kinematic)ด้วยโปรแกรม RTKLIB และ Low Cost Receiver UBLOX F9P(L1/L2/E5B) โดยอาศัยค่า แก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA ซึ่งประมวลผลแบบ

Real Time PPP Kinematic ด้วยโปรแกรม MAD-WIN และเพิ่มเติม Survey Receiver Magellan Systems Japan(MSJ) ประมวลผลด้วยโปรแกรม RTKLIB ร่วมกับค่าปรับแก้ระบบ MADOCA โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน

3. การหาค่าพิกัดของตำแหน่งอ้างอิง

ใช้พิกัดอ้างอิงเป็นของสถานีรับสัญญาณแบบถาวร CUUT โดยได้จากการประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) จากข้อมูลรังวัด 7 วัน

3.3.1.2 บริเวณที่มีคลื่นหลายวิถี (Multipath Area)

การทดสอบในรูปแบบนี้จะทำการทดสอบที่บริเวณตาดฟ้าอาคารภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์ เพราะมีสิ่งสะท้อนให้เกิดคลื่นหลายวิถีเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น อาคารที่ล้อมรอบตึกแห่งนี้ และกำแพงเป็นต้น โดยจะคำนวณค่าพิกัดอ้างอิงจากตำแหน่งของจุดที่นำมาเปรียบเทียบกับได้จากการประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) จากข้อมูลรังวัด 24 ชั่วโมง

1. การทดสอบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP Static test)

เปรียบเทียบระหว่าง Survey Receiver CHC-i80 (ประมวลผลแบบ Post Process PPP Static ด้วยโปรแกรม RTKLIB และ Low Cost Receiver UBLOX F9P(L1/L2/E5B) โดยอาศัยค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA ซึ่งประมวลผลแบบ Real Time PPP Static ด้วยโปรแกรม MAD-WIN โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง

2. การทดสอบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์(PPP Kinematic test)

เปรียบเทียบระหว่าง Survey Receiver CHC-i80 (ประมวลผลแบบ Post Process PPP Static ด้วยโปรแกรม RTKLIB และ Low Cost Receiver UBLOX F9P(L1/L2/E5B) โดยอาศัยค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจาก

ระบบ MADOCA ซึ่งประมวลผลแบบ Real Time PPP Kinematic ด้วยโปรแกรม MAD-WIN โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง

3. การหาค่าพิกัดของตำแหน่งอ้างอิง

หาค่าพิกัดอ้างอิงทางตำแหน่งโดยใช้การรับสัญญาณผ่านเครื่องรับสัญญาณ Survey Grade (CHC-i80) โดยได้จากการประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) จากข้อมูลรังวัด 24 ชั่วโมง

3.3.2 การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test)

การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test) จะแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือบริเวณเขตเมือง (Urban Area) และบริเวณเขตชนบท (Rural Area)

3.3.2.1 การทดสอบบนยานพาหนะบริเวณเขตเมือง (Vehicle Urban Area Test)

การทดสอบในรูปแบบนี้จะทำการทดสอบที่ ถนนในอำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี เพราะบริเวณโดยตลอดเส้นทางมีอาคารตลอดสองข้างทาง และสิ่งบดบังสัญญาณเป็นจำนวนมากจึงเหมาะสำหรับเป็นกรณีศึกษาในเขตพื้นที่เมืองโดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง Survey Receiver CHC i80 ทำการประมวลผลโดยวิธี Network RTK ของกรมที่ดิน และ Low Cost Receiver UBLOX F9P(L1/L2/E5B) โดยอาศัยค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA โดยนำ Receiver ทั้งสอง ติดตั้งกับรถยนต์แล้วทำการรับสัญญาณแบบ PPP Kinematic โดยจะทดสอบที่ความเร็วแตกต่างกัน เพื่อดูค่าทางสถิติโดยจะยึดค่าอ้างอิงเป็นพิกัดของการประมวลที่ได้จาก Network RTK ของกรมที่ดิน ของทั้งสอง Receiver ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเร็วของการทดสอบในรถยนต์

ลำดับ	ความเร็วรถยนต์
1	< 20 km/hr.
2	21-50 km/hr.
3	51-80 km/hr.

3.3.2.2 การทดสอบบนยานพาหนะบริเวณเขตชนบท (Vehicle Rural Area Test)

การทดสอบในรูปแบบนี้จะทำการทดสอบที่ บนทางหลวง หมายเลข 333 จังหวัดอุทัยธานี เพราะบริเวณโดยตลอดเส้นทางโค้งและสองข้างทางไม่มีอาคารบ้านเรือน มีเพียงต้นไม้ขนาดเล็กเท่านั้น อีกทั้งถนนมีความกว้างหลายเส้นทาง ทำให้เหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวอย่างในการทดสอบสำหรับบริเวณชนบท โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง Survey Receiver CHC i80 ทำการประมวลผลโดยวิธี Network RTK ของกรมที่ดิน และ Low Cost Receiver UBLOX F9P(L1/L2/E5B) โดยอาศัยค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA โดยนำ Receiver ทั้งสอง ติดตั้งกับรถยนต์แล้วทำการรับสัญญาณแบบ PPP Kinematic โดยจะทดสอบที่ความเร็วแตกต่างกัน เพื่อดูค่าทางสถิติโดยจะยึดค่าอ้างอิงเป็นพิกัดของการประมวลที่ได้จาก Network RTK ของกรมที่ดิน ของทั้งสอง Receiver ดังตารางที่ 3

3.4 ขั้นตอนวิธีการประมวลผลและเปรียบเทียบผลการทดสอบ

3.4.1 วิธีการประมวลผลและเปรียบเทียบพิกัดจุดถาวรจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตและแบบจลน์

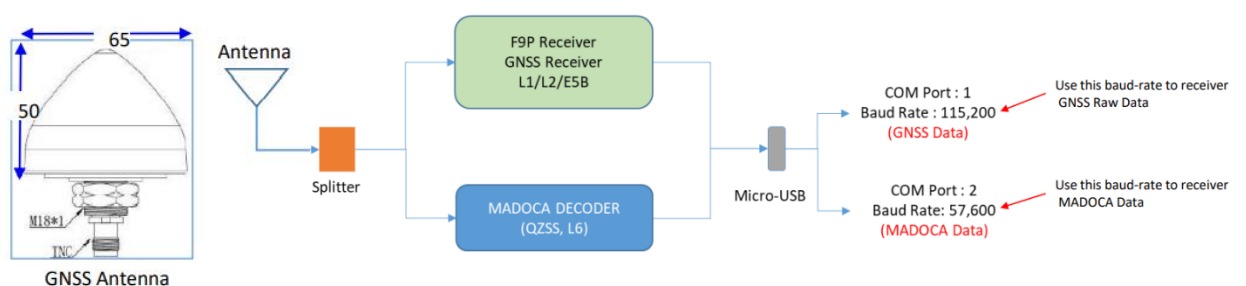
1. การประมวลผลในโปรแกรม RTKLIB แบบประมวลผลภายหลังใช้สำหรับประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับ Trimble NETR9

- ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล GPS จาก สถานีฐาน CUUT ในรูปแบบไฟล์ RINEX โดยทำการดาวน์โหลดจากเครื่องรับ Trimble NETR9 โดยตรง ข้อมูลทุกๆ 1 วินาที 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 วัน
- ทำการดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง (IGS Final Product) (*.sp3 และ *.clk) ซึ่งจะต้องดาวน์โหลดไฟล์ให้สอดคล้องกับวันที่ทำการประมวลผล สามารถดาวน์โหลดโดยตรงจากเว็บไซต์ ของ IGS ที่ให้บริการ โดยใช้โปรแกรม FileZilla จากนั้น connect เข้าไป ยัง Server ของ IGS
- ทำการประมวลผลรังวัดหาค่าตำแหน่งของจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตด้วยโปรแกรม RTKLIB

- ทำการแปลงค่าพิกัดในรูปแบบไฟล์ .pos ที่มีค่าพิกัดแบบ latitude, longitude แปลงให้เป็นระบบ พิกัดแบบ UTM (Universal Transverse Mercator) โดยใช้โปรแกรม IDLE (PYTHON 3.9)
- ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าพิกัดอ้างอิงกับค่าที่ได้ออกจากการใช้เครื่องรับสัญญาณ Trimble NETR9 ที่ประมวลผลโดยใช้โปรแกรม RTKLIB โดยดูความถูกต้องทางราบและทางตั้งซึ่งสังเกตจากค่า Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Standard Deviation (SD) จากนั้นแบบเดียวกับข้างต้นแต่เปลี่ยนเป็นทำการประมวลผลแบบจลน์

2. การประมวลผลในโปรแกรม MAN-WIN สำหรับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกลง

- ทำการประมวลผลรับสัญญาณโดยใช้สัญญาณ GNSS จากเสาอากาศ ของสถานี CUUT โดยต่อจากตัวแยกสัญญาณแบบเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกับกับสัญญาณที่เข้าเครื่องรับ Trimble NETR9 แต่จะผ่านตัวรับสัญญาณราคาถูกลง จะมี 2 เครื่องรับสัญญาณ คือ U-BLOX F9P เป็น GNSS Receiver (ในรูปแบบไฟล์ .UBX) และ U-BLOX D9 ในรูปแบบไฟล์ .UBX



รูปที่ 12 การรับสัญญาณของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกลง

แหล่งที่มา: Introduction to QZSS Positioning Methods Dinesh Manandhar, CSIS, Tokyo University)

- ทำการประมวลผลด้วยวิธีหาค่าตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP-Static) และการหาค่าตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์

(PPP-kinematic) จะทำการรับสัญญาณดาวเทียมและค่าแก้จาก MADOCA แบบเรียลไทม์ทุกๆ 1 วินาที ทำการรับสัญญาณ 7 วัน ในการประมวลผลทั้งสองแบบ

- จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม MAD-WIN จะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบไฟล์ 3 แบบ คือ ไฟล์ค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม(.UBX), ไฟล์ค่าพิกัดที่ประมวลผลแล้ว (.NMEA) และ ไฟล์ค่ารังวัด (.UBX) ต่อมาทำการแปลงไฟล์ (.NMEA) ที่มีการบันทึกค่าพิกัดแบบ Geographic coordinate (Lat, Lon, height) เป็นพิกัดฉาก (Universal Transverse Mercator: UTM) ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ (.CSV) โดยใช้โปรแกรมIDLE (PHYTHON 3.9)

- ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าพิกัดอ้างอิงกับค่าที่ได้ออกจากเครื่องรับสัญญาณราคาถูกที่ประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MAD-WIN โดยดูความถูกต้องทางราบและทางตั้งซึ่งสังเกตจากค่า Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Standard Deviation (SD)

3. การประมวลผลในโปรแกรม RTKLIB แบบประมวลผลภายหลังใช้สำหรับประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับ CHC-i80 (บริเวณพื้นที่มี Multipath)

- ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล GPS จากพื้นที่มีคลื่นหลายวิถี (Multipath)ในรูปแบบไฟล์ RINEX โดยทำการรังวัดข้อมูล ข้อมูลทุกๆ 1 วินาที 24 ชั่วโมง
- ทำการดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง (IGS Final Product) (*.sp3 และ *.clk) ซึ่งจะต้องดาวน์โหลด ไฟล์ให้สอดคล้องกับวันที่ทำการประมวลผล สามารถดาวน์โหลดโดยตรงจาก เว็บไซต์ ของ IGS ที่ให้บริการ โดยใช้โปรแกรม FileZilla จากนั้น connect เข้าไป ยัง Server ของ IGS
- ทำการประมวลผลรังวัดหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตด้วยโปรแกรม RTKLIB
- ทำการแบบแปลงค่าพิกัดในรูปแบบไฟล์. pos ที่มีค่าพิกัดแบบ latitude, longitude แปลงให้เป็นระบบ พิกัดแบบ UTM (Universal Transverse Mercator) โดยใช้โปรแกรมIDLE (PHYTHON 3.9)

- ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าพิกัดอ้างอิงกับค่ากับค่าที่ได้จากการใช้เครื่องรับสัญญาณ CHC-i80 ที่ประมวลผลโดยใช้โปรแกรม RTKLIB โดยดูความถูกต้องทางราบและทางตั้งซึ่งสังเกตจากค่า Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Standard Deviation (SD) จากนั้นแบบเดียวกับข้างต้นแต่เปลี่ยนเป็นทำการประมวลผลแบบจลน์

3.4.2 การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test)

ติดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกลง และ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมสำหรับงานสำรวจบนหลังคาของรถยนต์ดังรูปโดยด้านซ้ายจะเป็นเสารับสัญญาณราคาถูกลง (Tallysman antenna) ส่วนด้านขวาเป็นเครื่องสัญญาณที่ใช้ในงานสำรวจ (CHC -i80) แล้วทำการเชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณราคาถูกลงโดยสายสัญญาณ TNC TYPE



รูปที่ 13 ตัวอย่างการติดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมบนหลังคารถยนต์ ซ้าย(Tallysman antenna),ขวา(CHC -i80)

สำหรับเครื่องรับสัญญาณราคาถูกลงจะใช้โปรแกรม MAD-WIN ในการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP-kinematic) รับสัญญาณทุกๆ วินาที โดยอาศัยค่าแก้แบบเรียลไทม์จาก MADOCA ส่วนเครื่องรับสัญญาณแบบ Geodetic receiver ใช้ controller และโปรแกรม Landstar7 ในการประมวลผลและรับค่าแก้แบบเรียลไทม์จาก RTK Network ของกรมที่ดินโดยรับค่าแก้เทคนิค Virtual Reference Station (VRS) ในรูปแบบระบบค่าแก้ RTCM3.2

ทำการรับสัญญาณบริเวณเขตเมือง (Vehicle Urban Area Test) ถนนในอำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี เพราะบริเวณโดยตลอดเส้นทางมีอาคารตลอดสองข้างทาง และสิ่งบดบังสัญญาณเป็นจำนวนมากจึงเหมาะสำหรับเป็นกรณีศึกษาในเขตพื้นที่เมืองและทำการรับสัญญาณแบบเดิมแต่เปลี่ยนบริเวณทดสอบการทดสอบโดยจะทำการทดสอบที่ บนทางหลวง หมายเลข 333

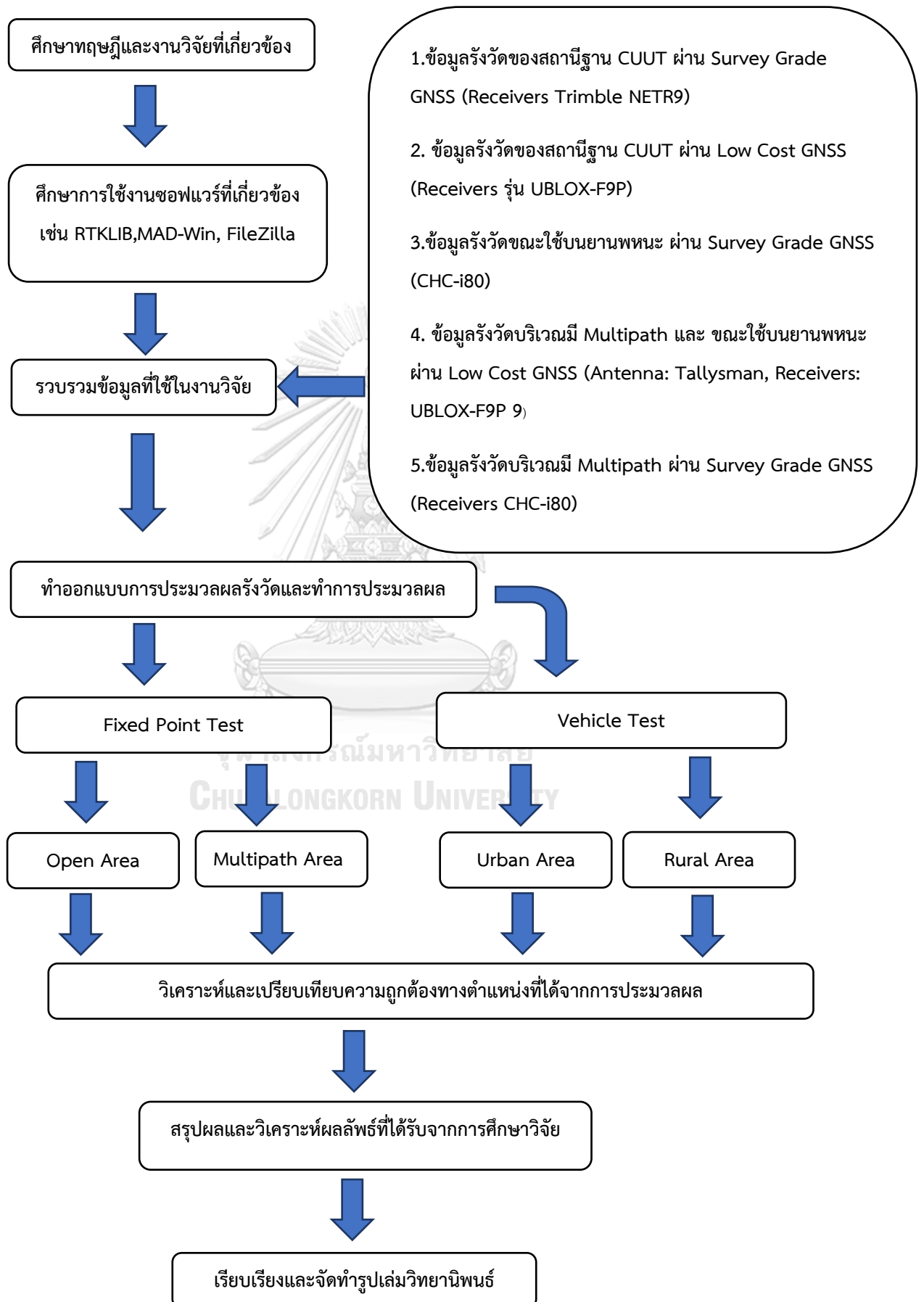
จังหวัดอุทัยธานี เพราะบริเวณโดยตลอดเส้นทางโล่งและสองข้างทางไม่มีอาคารบ้านเรือน มีเพียงต้นไม้ขนาดเล็กเท่านั้น อีกทั้งถนนมีความกว้างหลายเส้นทาง ทำให้เหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวอย่างในการทดสอบสำหรับบริเวณชนบท

ตารางที่ 4 แสดงความเร็วของการทดสอบในรถยนต์ ใน 3 การทดสอบ

ลำดับ	ความเร็วรถยนต์
1	< 20 km/hr.
2	21-50 km/hr.
3	51-80 km/hr.

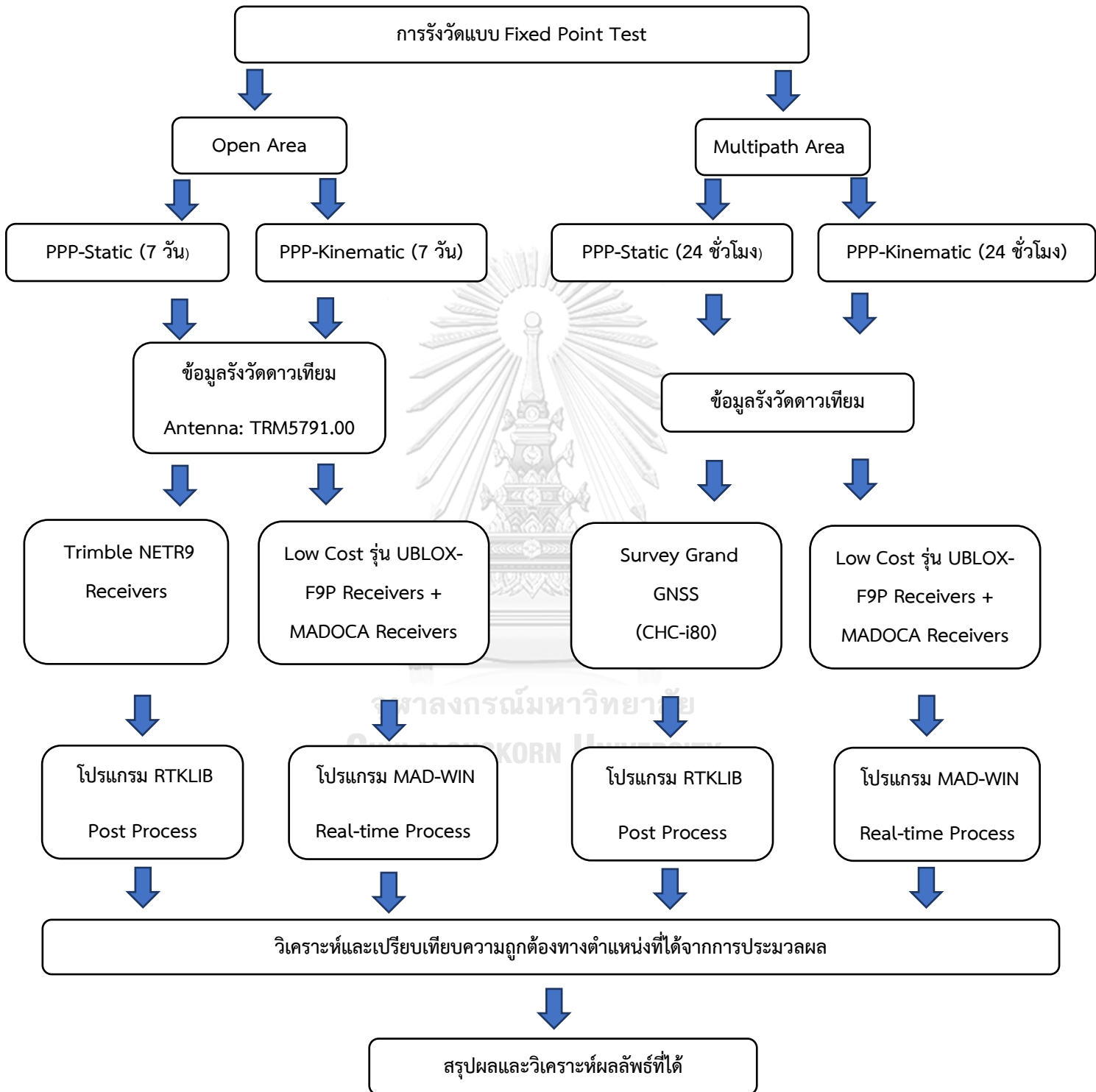
สำหรับเครื่องรับสัญญาณแบบ Geodetic receiver รับค่าแก่แบบเรียลไทม์จาก RTK Network ของกรมที่ดินโดยรับค่าแก่เทคนิค Virtual Reference Station (VRS) ผลลัพธ์ค่าพิกัดที่ได้รับจะอยู่ในระบบพิกัดฉาก UTM ในกรอบอ้างอิง ITRF 2005 ทำให้ต้องมีการแปลงให้พื้นหลักฐานด้วยกันกับเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก่ MADOCA ที่ได้มีการปรับแก้บนพื้นหลักฐาน ITRF2014 เพื่อให้การเปรียบเทียบค่าพิกัดอยู่บนพื้นหลักฐานชนิดเดียวกันซึ่งได้มีการกล่าวถึงไว้ในภาคผนวก ค. โดยใช้แปลงในระบบพิกัด UTM จาก ITRF2005 ไปยัง 2014 โดยการคำนวณในโปรแกรม PYTHON 3.0 โดยชุดคำสั่งที่แสดงในภาคผนวก ค. แล้วทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการรังวัดในทั้งสองเครื่องรับสัญญาณ โดยเปรียบเทียบในแต่ละจุดตลอดเส้นทางที่รถเคลื่อนที่ เพื่อดูค่าต่างของค่าพิกัดจากทั้งสองสังเกตจากค่า Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Standard Deviation (SD) โดยใช้ค่าที่รังวัดได้จากเครื่องรับสัญญาณแบบ Survey Grade เป็นค่าพิกัดอ้างอิงทางตำแหน่ง

3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำวิจัย

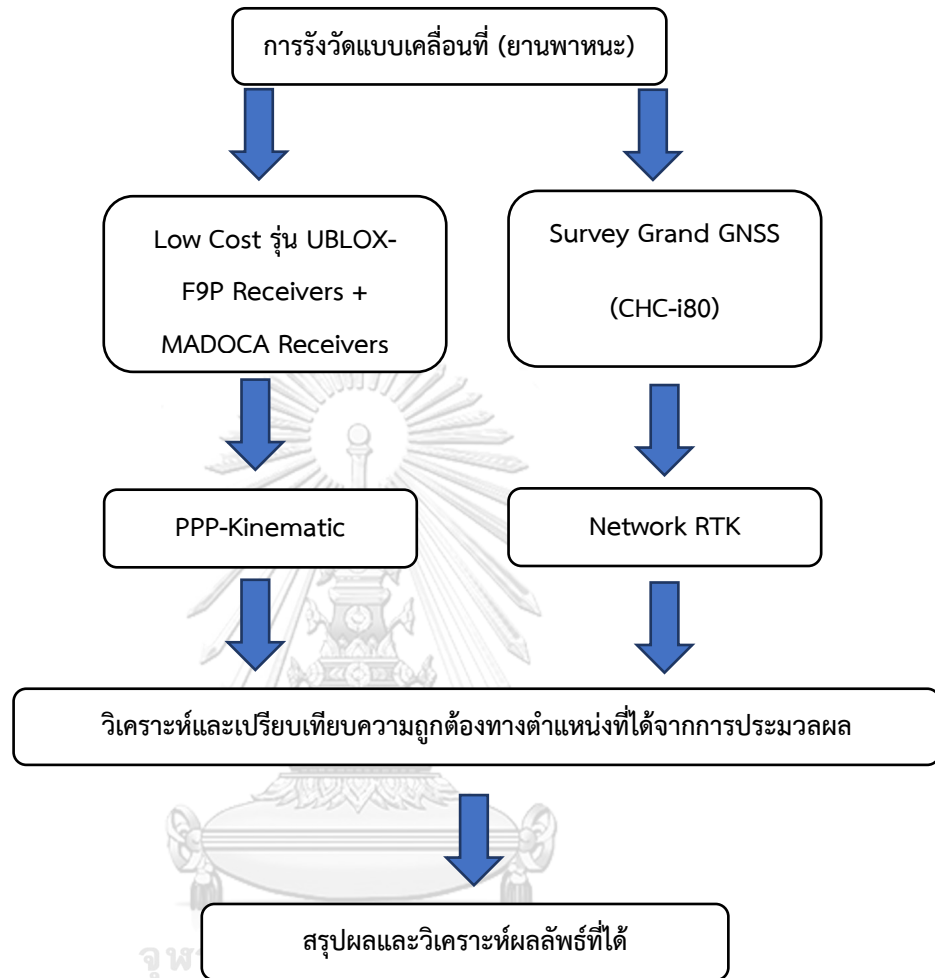


3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการประมวลผล

3.6.1 แผนภาพการทดสอบสำหรับการรังวัดแบบจุดคงที่ (Fixed Point Test)



3.6.2 แผนภาพการทดสอบสำหรับการวิ่งวัดบนรถยนต์ (Vehicle Test)



บทที่ 4 ผลการศึกษา

หลังจากการทำประมวลผลค่าพิกัดโดยใช้การประมวลผลรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP) แบบสถิตและแบบจลน์ ใน สองกรณีศึกษา สำหรับกรณีแรกคือ ตำแหน่งของจุดสถิต(แบบนิ่ง) ในบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง ณ บริเวณตาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม โดยใช้ ข้อมูลรังวัดจากสถานีฐานของจุฬาลงกรณ์ ทุกๆวินาที เป็นเวลา 7 วันและบริเวณพื้นที่มีคลื่นหลุด (Multipath) ณ บริเวณตาดฟ้าตึกภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนอีกกรณีศึกษาหนึ่งคือ ตำแหน่งของจุดแบบเคลื่อนที่โดยติดตั้งกับรถยนต์ แล้วทำการประมวลผลรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP-kinematic) ในเขตเมือง และบริเวณนอกเมือง สำหรับการประมวลผลในแต่ละกรณีจะทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ราคาถูกกับเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ทั่วไปในงานสำรวจ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณ ราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบมาโดก้า (MADCOA correction) โดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Standard Deviation (SD) ในการวิเคราะห์ เปรียบเทียบค่าความถูกต้องระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงกับค่าพิกัดที่ได้ในแต่ละวิธี

ผลการทดสอบในแต่ละกรณีดังนี้

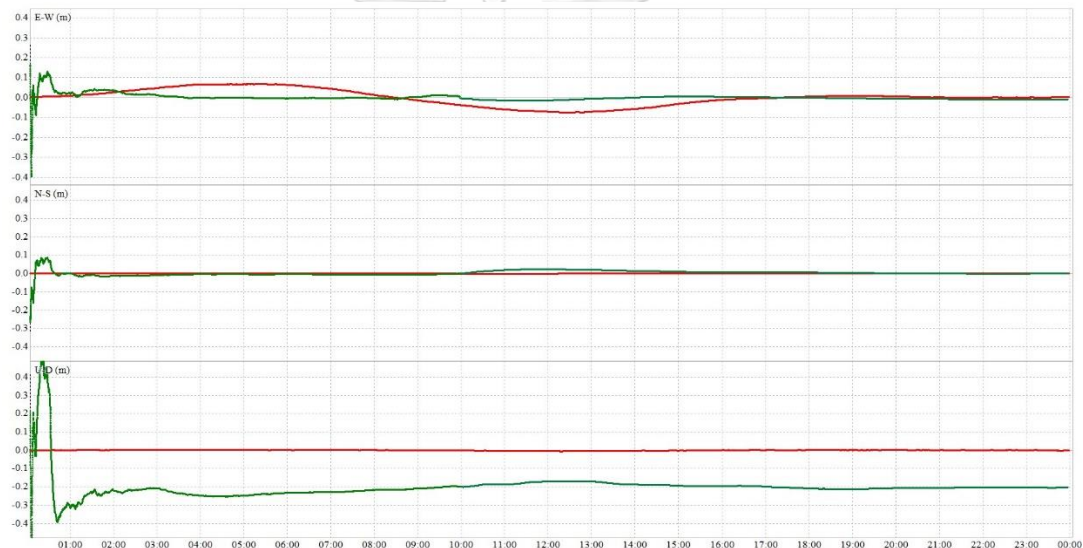
1. การทดสอบจุดแบบสถิต (Fixed Point Test)
 - 1.1 บริเวณเปิดโล่ง
 - 1.1.1 การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต
 - 1.2.1 การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์
 - 1.2 บริเวณมีคลื่นหลุด (Multipath)
 - 1.2.1 การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต
 - 1.2.2 การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์
2. จุดเคลื่อนที่บนรถยนต์ (Vehicle Test)
 - 1.1 บริเวณเมือง
 - 1.1.1 การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์
 - 1.2 บริเวณชนบท
 - 1.2.1 การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์

4.1 การทดสอบจุดแบบสถิต (Fixed Point Test)

เป็นผลการทดสอบรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP) แบบสถิตและแบบจลน์ของจุดสถิตที่อยู่นิ่ง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการรับสัญญาณแบบเรียลไทม์ (Real-time) ร่วมกับค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA ในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูก จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษาคือบริเวณบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง(ตาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)และบริเวณที่มี Multipath(ตาดฟ้าตึกภาควิชาสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

4.1.1 บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง

4.1.1.1 Precise Point Positioning Static (PPP-Static)



รูปที่ 14 ผลลัพธ์การประมวลผลประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตวันที่ 29 สิงหาคม 2564 เส้นสีแดงคือ TrimbleNetR9 และสีเขียวคือเครื่องรับ สัญญาณราคาถูก (Low-cost receiver)

ตารางที่ 5 รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบและทางตั้งของการ
ประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิต

Day	PPP-static			
	Horizontal RMSE (m.)		Vertical RMSE (m.)	
	Low-cost	Trimble	Low-cost	Trimble
1	0.077	0.020	0.092	0.090
2	0.098	0.013	0.123	0.085
3	0.107	0.010	0.149	0.082
4	0.047	0.013	0.108	0.087
5	0.097	0.014	0.161	0.097
6	0.168	0.008	0.169	0.088
7	0.097	0.009	0.128	0.067
MEAN	0.099	0.012	0.133	0.085

ตารางที่ 6 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบและทางตั้งของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียด
สูงแบบสถิต

Day	PPP-static			
	Horizontal SD(m)		Vertical SD(m)	
	Low-cost	Trimble	Low-cost	Trimble
1	0.047	0.011	0.052	0.002
2	0.076	0.007	0.082	0.001
3	0.104	0.007	0.105	0.001
4	0.042	0.007	0.084	0.001
5	0.087	0.007	0.159	0.001
6	0.098	0.007	0.054	0.001
7	0.090	0.006	0.104	0.001
MEAN	0.078	0.007	0.091	0.001

4.1.1.2 Precise Point Positioning Kinematic (PPP- Kinematic)



รูปที่ 15 ผลลัพธ์การประมวลผลประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตวันที่ 4 กันยายน 2564 เส้นสีแดงคือ TrimbleNetR9 และสีเขียวคือเครื่องรับสัญญาณราคาถูก (Low-cost receiver)

ตารางที่ 7 รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบและทางตั้งของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์

Day	PPP-Kinematic					
	Horizontal RMSE(m)			Vertical RMSE(m)		
	Low-cost	Trimble	MSJ	Low-cost	Trimble	MSJ
1	0.136	0.164	0.077	0.161	0.221	0.166
2	0.093	0.030	0.076	0.129	0.100	0.181
3	0.183	0.038	0.061	0.252	0.096	0.179
4	0.122	0.164	0.099	0.269	0.251	0.177
5	0.226	0.030	0.064	0.505	0.089	0.180
6	0.134	0.036	0.096	0.159	0.082	0.222
7	0.225	0.037	0.132	0.345	0.114	0.205
MEAN	0.160	0.071	0.086	0.260	0.136	0.187

ตารางที่ 8 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบและทางตั้งของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์

Day	PPP-Kinematic					
	Horizontal SD(m)			Vertical SD(m)		
	Low-cost	Trimble	MSJ	Low-cost	Trimble	MSJ
1	0.063	0.157	0.060	0.125	0.181	0.103
2	0.081	0.028	0.053	0.118	0.030	0.107
3	0.172	0.035	0.049	0.243	0.040	0.103
4	0.118	0.159	0.081	0.267	0.218	0.123
5	0.197	0.025	0.046	0.481	0.034	0.099
6	0.111	0.030	0.058	0.139	0.041	0.123
7	0.180	0.032	0.083	0.345	0.052	0.116
MEAN	0.132	0.067	0.061	0.245	0.085	0.111

ตารางที่ 9 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตและแบบจลน์

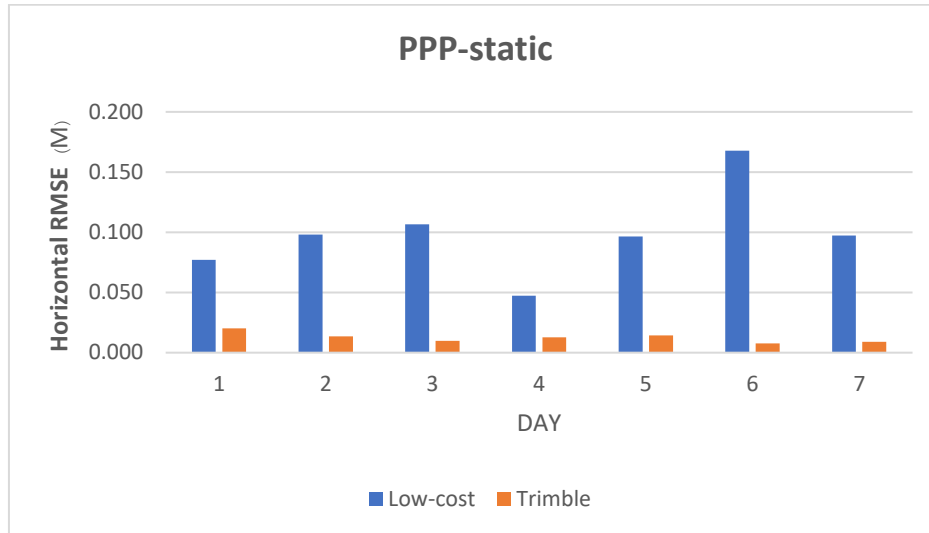
		RMSE (m.)		SD		SD (95%)	
		Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.
PPP-static	Low-cost	0.099	0.133	0.078	0.091	0.128	0.150
	Trimble	0.012	0.085	0.007	0.001	0.012	0.002
PPP-Kinematic	Low-cost	0.158	0.260	0.132	0.245	0.217	0.404
	Trimble	0.069	0.136	0.067	0.085	0.109	0.140
	MJS	0.086	0.187	0.061	0.111	0.101	0.182

จากการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิต(PPP-Static) รั้ววัดทุกๆวินาทีเป็นเวลา 7 วัน แสดงการเปรียบเทียบดังตารางที่ 9 โดยทำการเปรียบเทียบทั้ง 2 เครื่องสัญญาณ คือ เครื่องสัญญาณดาวเทียมราคาถูก(U-BloxF9P)ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA พบว่ารากที่สองของความ

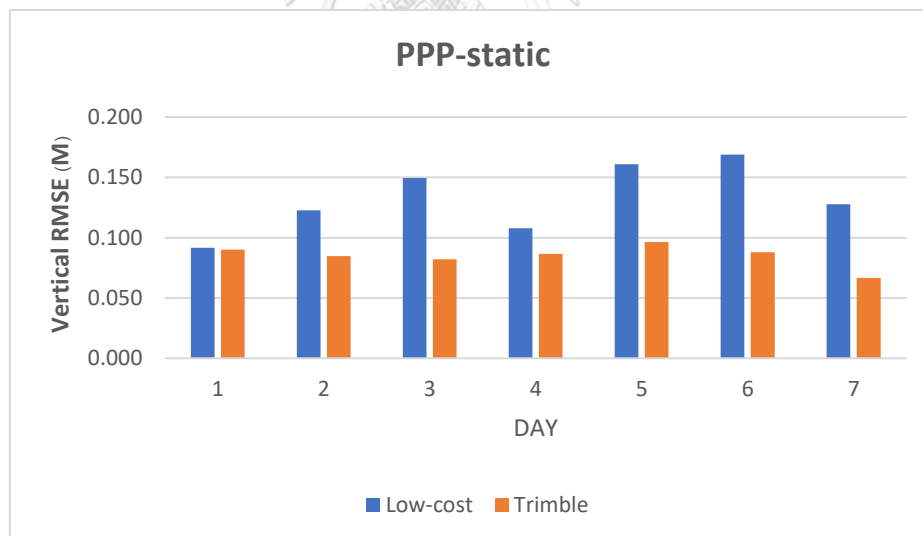
คลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง (Vertical RMSE) คือ 0.099 และ 0.133 เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD) และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.078และ 0.091 เมตรตามลำดับ เครื่องรับ Survey Grade (Trimble NetR9) ร่วมกับการประมวลผลภายหลัง พบว่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ (Horizontal RMSE)และทางตั้ง (Vertical RMSE) คือ 0.012 และ 0.085 เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD) และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.007 และ 0.001 เมตรตามลำดับ

อีกส่วนหนึ่งจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์(PPP- Kinematic) โดยทำการเปรียบเทียบทั้งสามเครื่องสัญญาณ คือ เครื่องสัญญาณดาวเทียมราคาถูก(U-Blox-F9P)ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA พบว่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง (Vertical RMSE)คือ 0.158 และ 0.260 เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD) และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.132 และ 0.245เมตรตามลำดับ ส่วนเครื่องรับ Survey Grade (Trimble NetR9)ร่วมกับการประมวลผลภายหลังพบว่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง (Vertical RMSE)คือ 0.069 และ 0.136เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD) และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.067 และ 0.085 เมตรตามลำดับและเครื่องรับ MSJ-3008-GM4-QZS ที่ประมวลแบบ Real-time ร่วมกับค่าแก้ MADOCA พบว่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง (Vertical RMSE)คือ 0.086 และ 0.187เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD) และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.061 และ 0.111 เมตรตามลำดับ

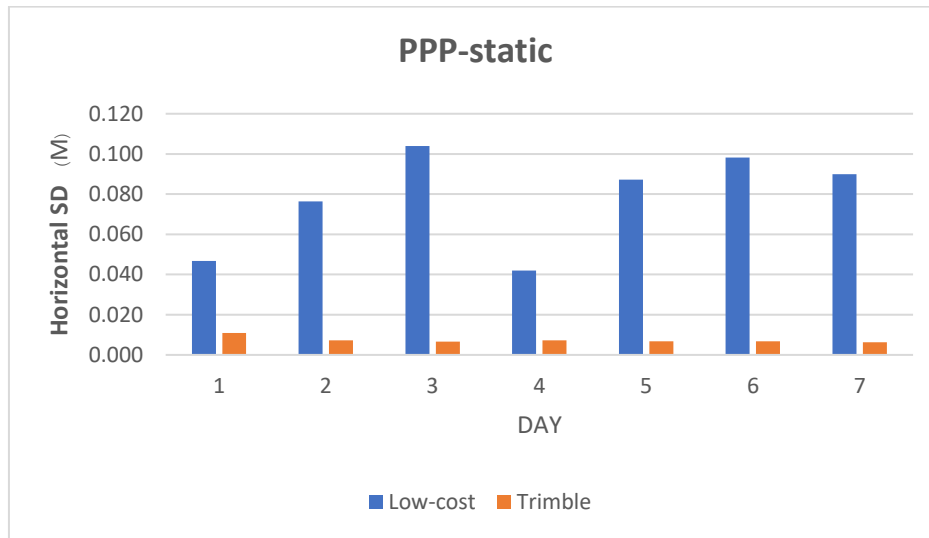
4.1.1.3 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าทางสถิติของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP-Static)



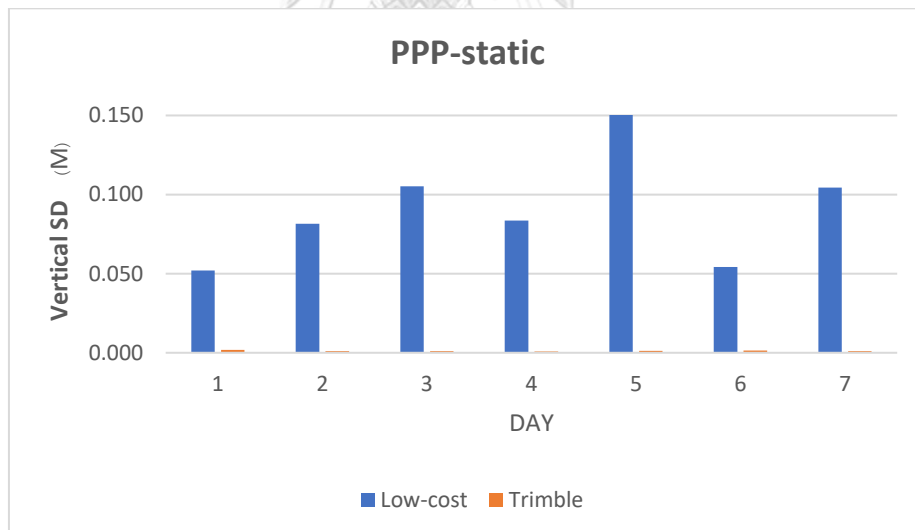
รูปที่ 16 แผนภูมิแท่งค่าราคาสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางราบ (Horizontal RMSE)



รูปที่ 17 แผนภูมิแท่งค่าราคาสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางตั้ง (Vertical RMSE)

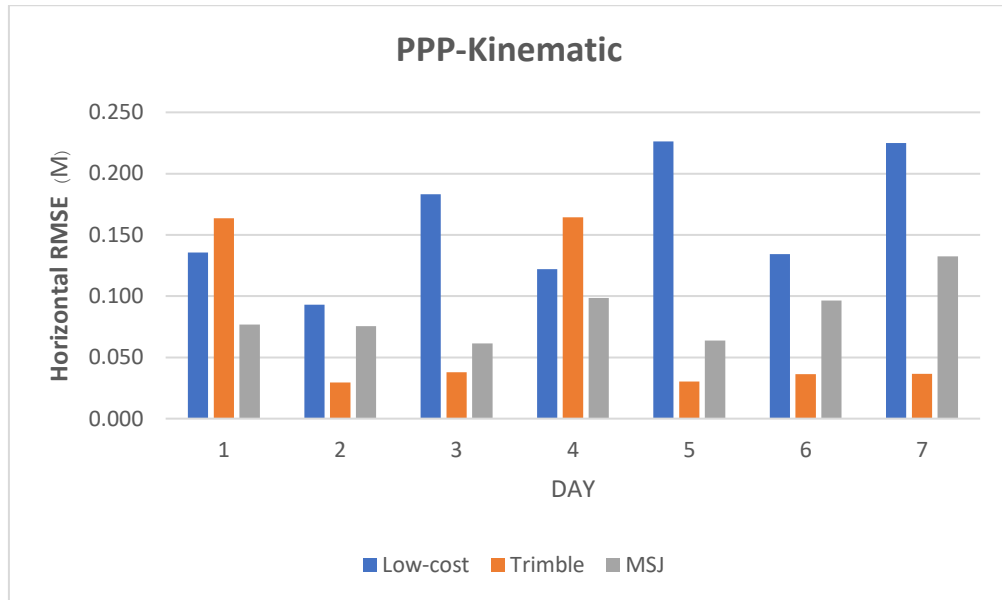


รูปที่ 18 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ(Horizontal Standard Deviation)

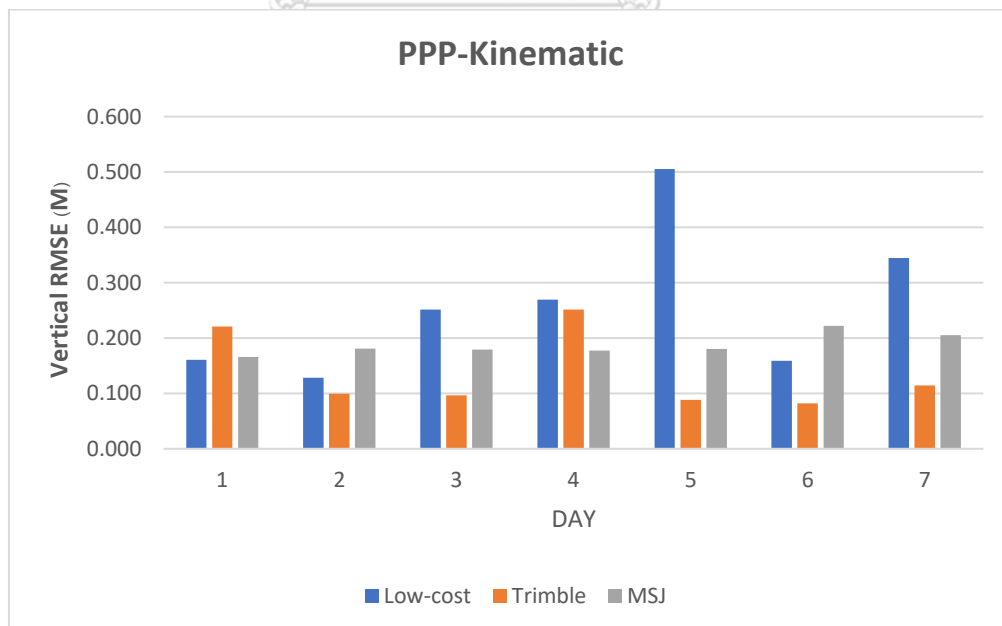


รูปที่ 19 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางตั้ง(Vertical Standard Deviation)

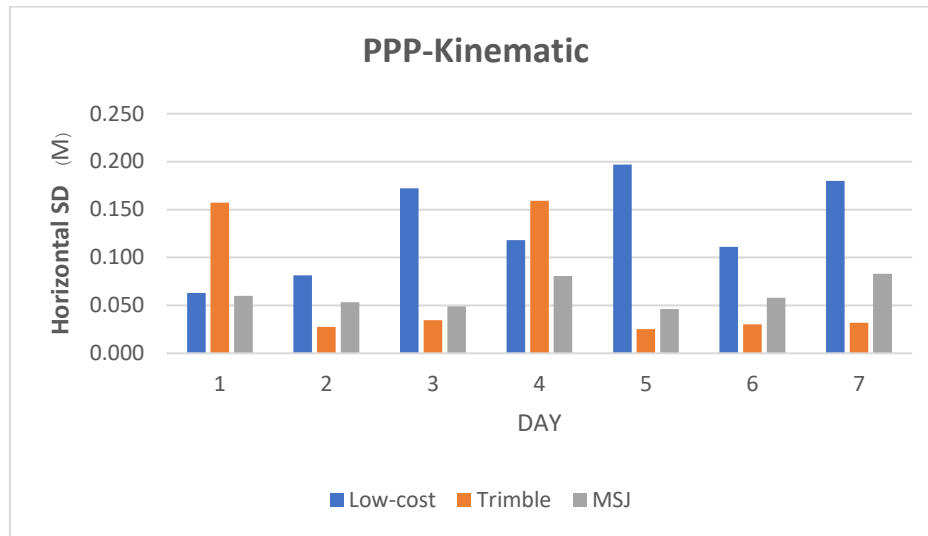
4.1.1.4 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าทางสถิติของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP-Kinematic)



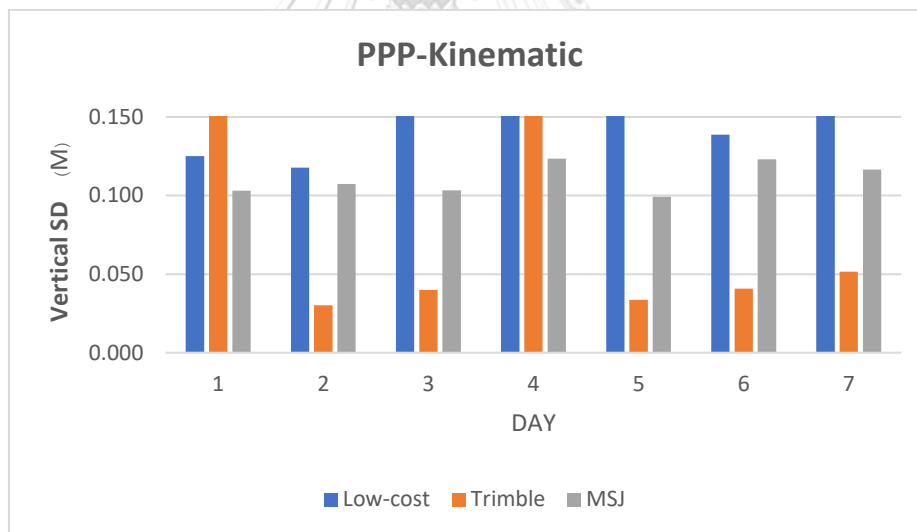
รูปที่ 20 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ(Horizontal Standard Deviation)



รูปที่ 21 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางตั้ง(Vertical Standard Deviation)



รูปที่ 22 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ(Horizontal Standard Deviation)



รูปที่ 23 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางตั้ง(Vertical Standard Deviation)

4.1.2 บริเวณพื้นที่มี Multipath

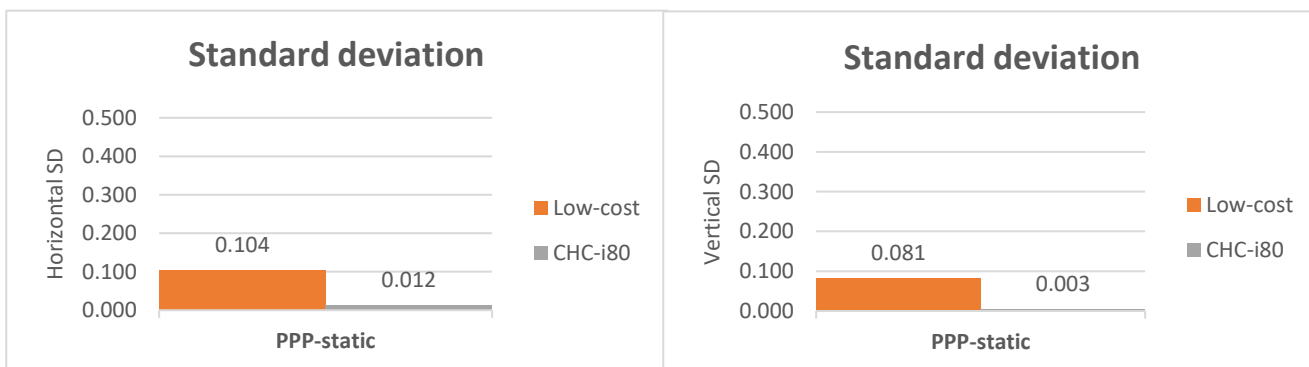
สำหรับในกรณีศึกษานี้เพื่อทดสอบคลื่นหลุดที่มีผลค่าปรับแก้จากระบบMADDOCA โดยทำการรับสัญญาณเป็นเวลา 24 ชั่วโมงบริเวณตาดฟ้าอาคารภาควิชาสำรวจจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแบบเป็น 2 รูปแบบการประมวลผล คือ การประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิต(Static Precise Point Positioning Static) และการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning) โดยเปรียบเทียบในสองเครื่องรับสัญญาณ ได้แก่ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกลง(U-BloxF9P)ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADDOCA,เครื่องรับ Survey Grade (CHC-i80) ร่วมกับการประมวลผลภายหลัง

4.1.2.1 Precise Point Positioning Static (PPP-Static)

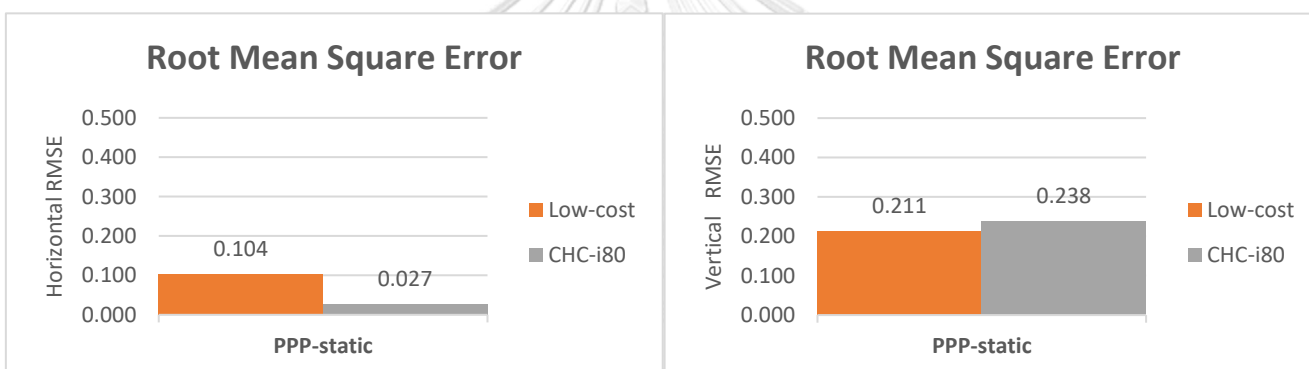
ตารางที่ 10 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิตกรณีบริเวณมีคลื่นหลุด(Multipass)

Process	SD				RMSE			
	Low-cost		CHC-i80		Low-cost		CHC-i80	
	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง
PPP-static	0.104	0.081	0.012	0.003	0.104	0.211	0.027	0.238

พบว่าจากตารางที่10 สำหรับการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิต(Static Precise Point Positioning Static) ในเครื่องรับสัญญาณราคาถูกลงให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง(Vertical RMSE) คือ0.104 และ 0.211 เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD)และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.104 และ 0.081เมตรตามลำดับ และในเครื่องรับสัญญาณ CHC-i80 ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง(Vertical RMSE) คือ0.027 และ 0.238เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD)และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.012 และ 0.003เมตรตามลำดับ



รูปที่ 24 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD)และทางตั้ง (Vertical SD)



รูปที่ 25 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง (Vertical RMSE)

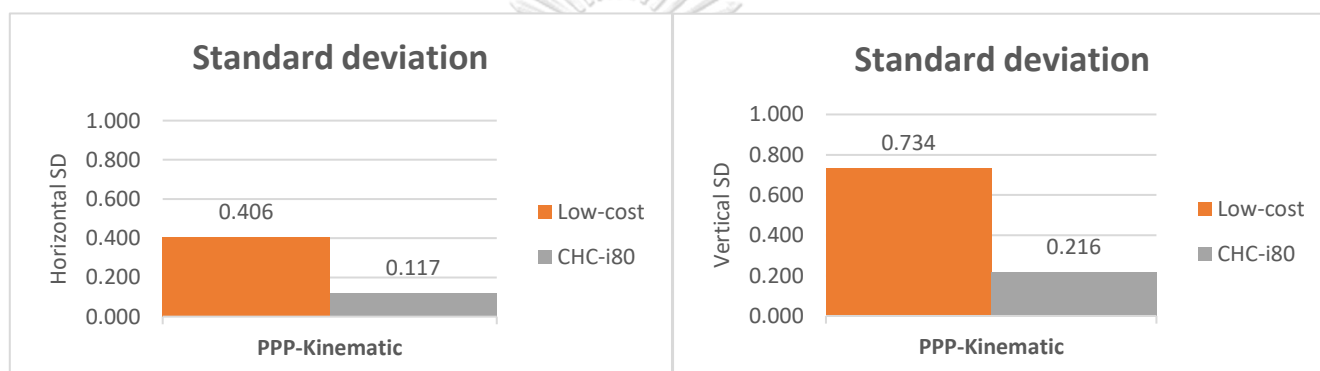
4.1.2.2 Precise Point Positioning kinematic (PPP- kinematic)

พบว่าจากตารางที่ 11 สำหรับการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์(Kinematic Precise Point Positioning) ในเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง(Vertical RMSE) คือ 0.408 และ 0.738 เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD)และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.406 และ 0.734 เมตรตามลำดับ และในเครื่องรับสัญญาณ CHC-i80 ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง(Vertical RMSE) คือ 0.120 และ 0.312 เมตรตามลำดับและค่าส่วนเบี่ยงเบน

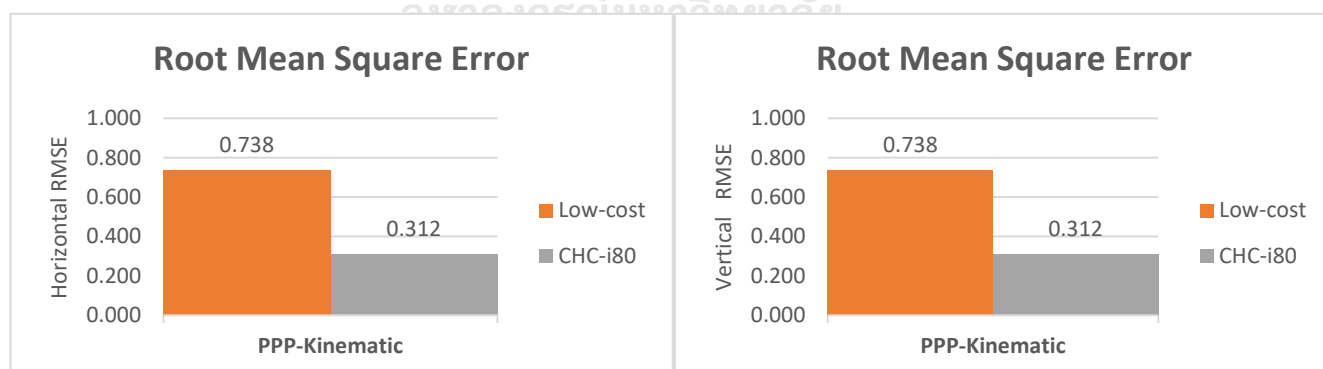
มาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD) และทางตั้ง (Vertical SD) คือ 0.117 และ 0.216 เมตรตามลำดับ

ตารางที่ 11 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์กรณีบริเวณมีคลื่นหลายทาง(Multipath)

Process	SD				RMSE			
	Low-cost		CHC-i80		Low-cost		CHC-i80	
	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง	ทางราบ	ทางตั้ง
PPP-Kinematic	0.406	0.734	0.117	0.216	0.408	0.738	0.120	0.312



รูปที่ 27 แผนภูมิแท่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบ (Horizontal SD)และทางตั้ง (Vertical SD) ของการประมวลผลแบบ PPP-Kinematic



รูปที่ 26 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบ(Horizontal RMSE)และทางตั้ง (Vertical RMSE) ของการประมวลผลแบบ PPP-Kinematic

4.2 การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test)

สำหรับการทดสอบแบบเคลื่อนที่บนรถยนต์ จะทำการวิ่งวัดในสองเครื่องรับสัญญาณคือ เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA โดยรูปแบบการประมวลผลจุดเดียว ความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning) และ เครื่องรับ Survey Grade (CHC-i80) ด้วยค่าปรับแก้ผ่านระบบรับค่าแก้แบบเรียลไทม์จาก RTK Network ของกรมที่ดิน โดยรับค่าแก้เทคนิค Virtual Reference Station (VRS) ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบในแต่ละ Epoch กับ Low-cost Receiver ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือบริเวณเขตเมือง และบริเวณชนบท ในแต่ละกรณีจะแบ่งการทดสอบที่ระดับความเร็วต่างๆ 3 ระดับได้แก่ 0-20, 21-50 และ 50-80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ

4.2.1 การทดสอบในเขตเมือง (Urban Area)

การทดสอบในเขตเมืองทำให้ได้ผลของค่าต่างจากค่าอ้างอิงและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยสำหรับความเร็ว 0-20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทางราบคือ 1.536 และ 1.843 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 2.157 และ 2.444 เมตรตามลำดับ สำหรับความเร็ว 21-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทางราบคือ 1.478 และ 1.592 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 1.652 และ 1.740 เมตรตามลำดับ สำหรับความเร็ว 51- 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทางราบคือ 0.377 และ 0.446 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 4.622 และ 4.629 เมตรตามลำดับ ถ้าเฉลี่ยในทุกระดับความเร็วทำให้ได้ค่าต่างจากค่าอ้างอิงและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย ทางราบคือ 1.130 และ 1.294 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 2.810 และ 2.938 เมตรตามลำดับ

ตารางที่ 12 ผลของค่าต่างจากค่าอ้างอิง(Mean difference) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ทางราบและทางตั้ง ในแต่ละระดับความเร็วบริเวณเขตเมือง(Urban Area)

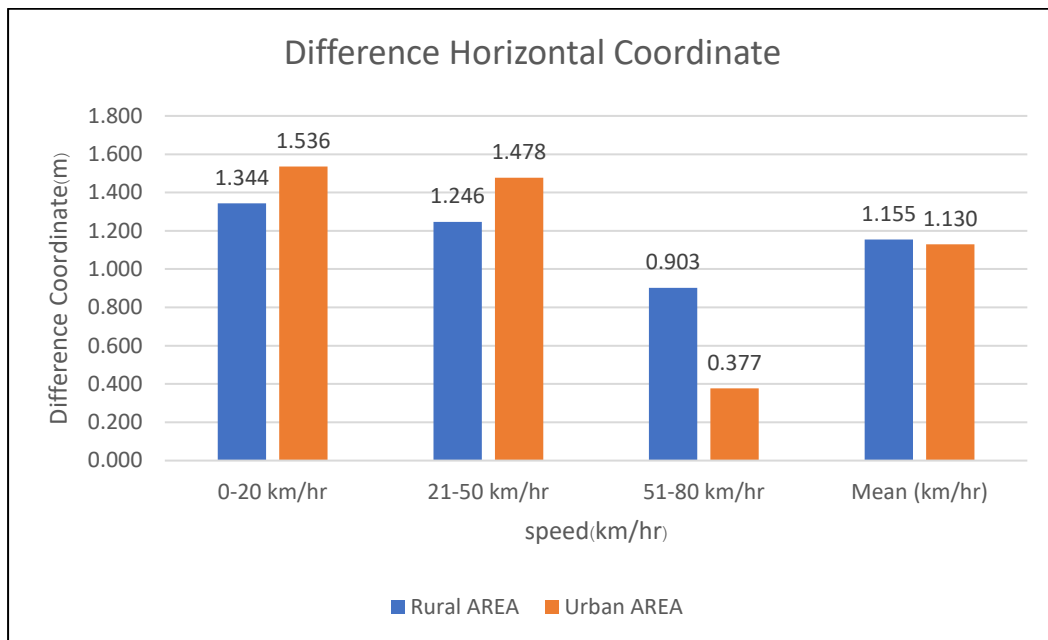
Speed Interval (KM/HR)	Order	Urban AREA			
		MEAN diff Hor.(m)	RMSE diff Hor.(m)	MEAN diff ver.(m)	RMSE diff ver.(m)
0-20	1	2.370	2.609	2.892	2.960
	2	0.699	1.013	1.121	1.772
	3	1.539	1.906	2.456	2.600
	Average	1.536	1.843	2.157	2.444
21-50	1	0.453	0.691	2.841	2.882
	2	2.450	2.548	0.973	1.179
	3	1.531	1.536	1.142	1.161
	Average	1.478	1.592	1.652	1.740
51-80	1	0.456	0.468	5.323	5.326
	2	0.249	0.256	4.330	4.333
	3	0.426	0.615	4.212	4.227
	Average	0.377	0.446	4.622	4.629
Average Total		1.130	1.294	2.810	2.938

4.2.2 การทดสอบในเขตชนบท (Rural Area)

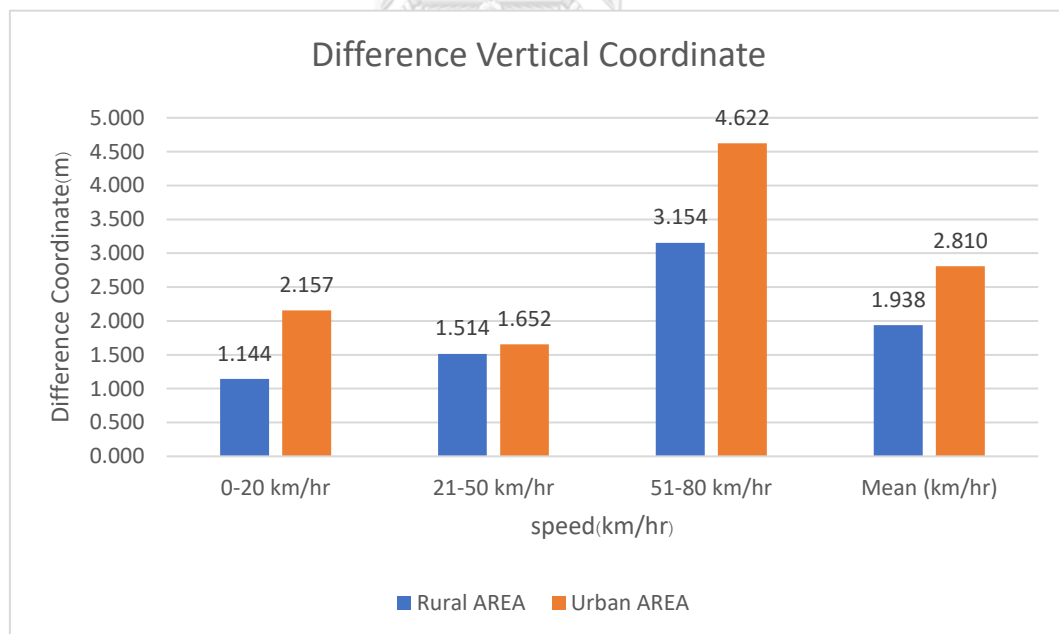
การทดสอบในเขตชนบท (Rural Area) ทำให้ได้ผลของค่าต่างจากค่าพิกัดอ้างอิงและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยสำหรับความเร็ว 0-20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทางราบคือ 1.344 และ 1.160 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 1.144 และ 1.396 เมตรตามลำดับ สำหรับที่ความเร็ว 21-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทางราบคือ 1.246 และ 1.651 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 1.514 และ 2.077 เมตรตามลำดับ สำหรับความเร็ว 51- 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทางราบคือ 0.875 และ 0.903 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 3.154 และ 3.171 เมตรตามลำดับ ถ้าเฉลี่ยในทุกระดับความเร็วทำให้ได้ค่าต่างจากค่าอ้างอิงและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย ทางราบคือ 1.155 และ 1.238 เมตรตามลำดับ ทางตั้งคือ 1.938 และ 2.215 เมตรตามลำดับ

ตารางที่ 13 ผลของค่าต่างจากค่าอ้างอิง(Mean difference) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ทางราบและทางตั้ง ในแต่ละระดับความเร็วบริเวณเขตชนบท (Rural Area)

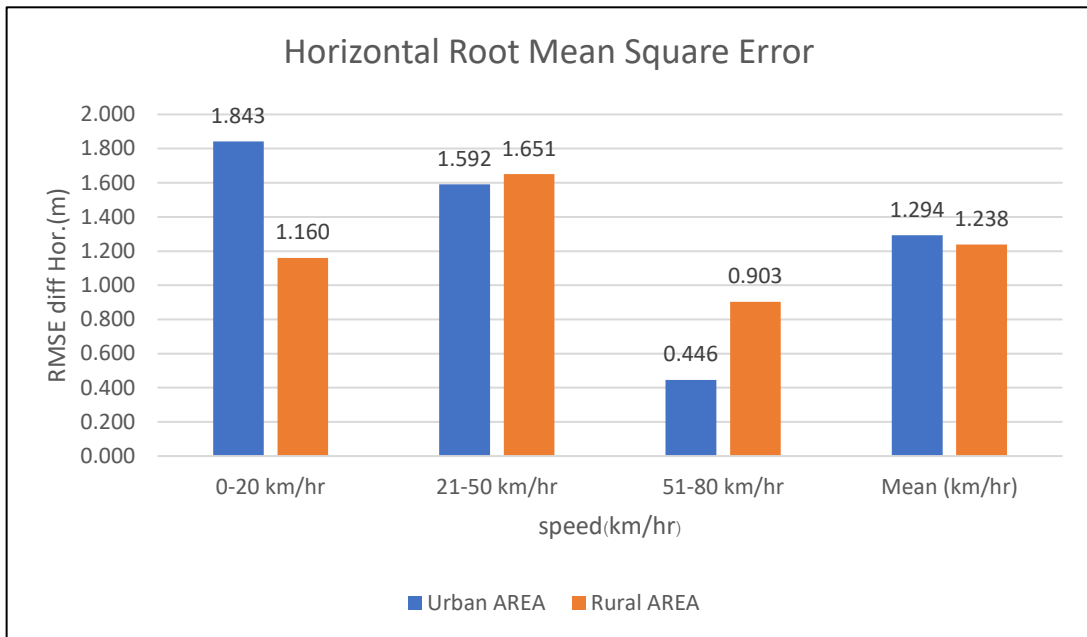
Speed Interval (KM/HR)	Order	Rural AREA			
		MEAN diff Hor.(m)	RMSE diff Hor.(m)	MEAN diff ver.(m)	RMSE diff ver.(m)
0-20	1	1.362	1.185	1.764	1.860
	2	1.140	0.955	1.051	1.213
	3	1.531	1.339	0.616	1.115
	Average	1.344	1.160	1.144	1.396
21-50	1	1.096	1.170	2.172	2.320
	2	0.897	1.463	1.177	1.572
	3	1.745	2.320	1.194	2.340
	Average	1.246	1.651	1.514	2.077
51-80	1	0.849	0.856	3.538	3.547
	2	1.363	1.386	2.990	2.998
	3	0.414	0.466	2.935	2.967
	Average	0.875	0.903	3.154	3.171
Average Total		1.155	1.238	1.938	2.215



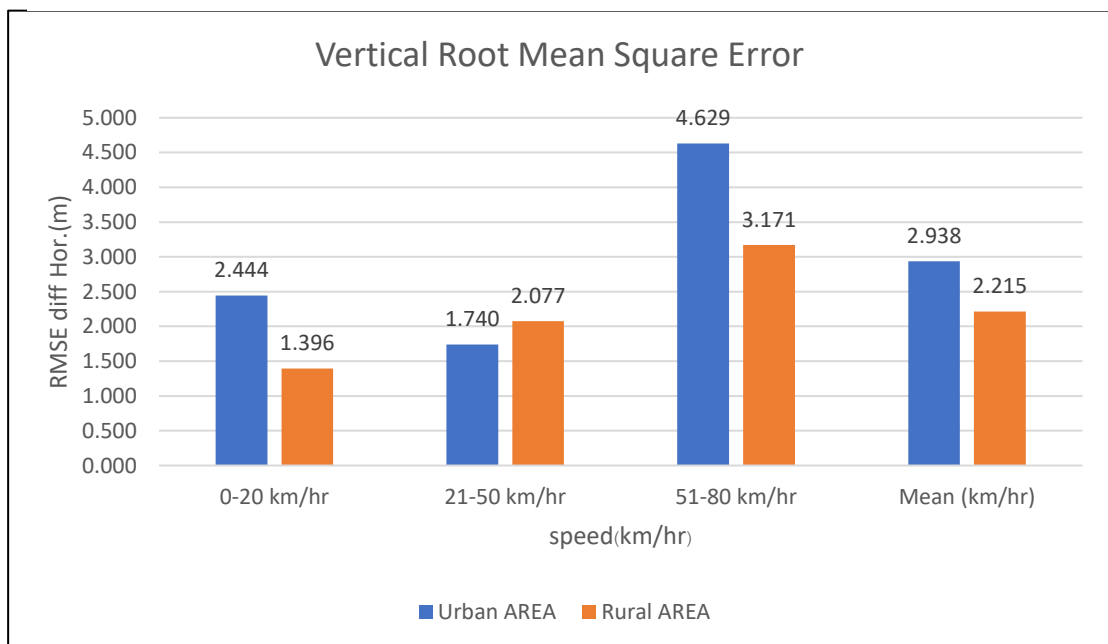
รูปที่ 28 การเปรียบเทียบค่าต่างทางตำแหน่งในทางราบ (Difference Horizontal Coordinate) ของการทดสอบในเขตเมือง(Urban Area)และเขตชนบท(Rural Area)ที่อัตราเร็วต่างๆ



รูปที่ 29 การเปรียบเทียบค่าต่างทางตำแหน่งในทางตั้ง (Difference Vertical Coordinate) ของการทดสอบในเขตเมือง(Urban Area)และเขตชนบท(Rural Area)ที่อัตราเร็วต่างๆ



รูปที่ 28 การเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ทางราบของการทดสอบในเขตเมือง(Urban Area)และเขตชนบท(Rural Area) ที่อัตราเร็วต่างๆ



รูปที่ 29 การเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ทางตั้งของการทดสอบในเขตเมือง (Urban Area) และเขตชนบท (Rural Area) ที่อัตราเร็วต่างๆ



รูปที่ 30 ผลลัพธ์สำหรับการทดสอบติดตั้งเครื่องรับสัญญาณบนรถยนต์บริเวณเขตพื้นที่ชนบท หมุดสีเหลืองแทน Survey Grade Receiver และหมุดสีแดงแทน Low-Cost-Receiver



รูปที่ 31 ผลลัพธ์สำหรับการทดสอบติดตั้งเครื่องรับสัญญาณบนรถยนต์บริเวณเขตพื้นที่เมือง หมุดสีเหลืองแทน Survey Grade Receiver และหมุดสีแดงแทน Low-Cost-Receiver

บทที่ 5

อภิปราย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ได้เพื่อศึกษาค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลรังวัดหาตำแหน่งของจุดเดี่ยว โดยข้อมูลของระบบดาวเทียม GNSS ร่วมกับการใช้ค่าแก้ข้อมูลนาฬิกา ดาวเทียมและวงโคจร ดาวเทียม(MADDOCA) โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูก ในพื้นที่ประเทศไทย โดยบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลงานวิจัย สรุปผลงานวิจัย ในประเด็นที่ศึกษาในกรณีต่างๆ และข้อจำกัดในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะในการนำผลงานวิจัยหรือเทคนิควิธีการที่ใช้ในงานวิจัยไปปรับใช้ในอนาคต

5.1 อภิปรายผล

5.1.1 ค่าความถูกต้องกรณีการทดสอบจุดแบบสถิต (Fixed Point Test)

กรณีพื้นที่เปิดโล่งจากการประมวลผลรังวัดตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP-Static) โดยรับสัญญาณทุกๆวินาที เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADDOCA ทำการประมวลผลแบบเรียลไทม์ผ่านโปรแกรม MAN-WIN ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย ในระดับ ต่ำกว่า 10 เซนติเมตรในทางราบและในทางตั้งต่ำกว่า 15 เซนติเมตรและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % ในทางราบและทางตั้งต่ำกว่า 15 เซนติเมตร ส่วนเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade (Trimble NetR9) ด้วยการประมวลผลภายหลังผ่านโปรแกรม RTKLIB (Ver.2.4.3) ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย ในระดับ ต่ำกว่า 2 เซนติเมตรในทางราบและในทางตั้งต่ำกว่า 10 เซนติเมตรและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % ในทางราบและทางตั้งต่ำกว่า 2 เซนติเมตรโดยการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตเครื่องรับสัญญาณราคาถูกให้ค่าความถูกต้องในระดับที่ดีเมื่อเทียบกับเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade ที่มีราคาสูงกว่ามาก ส่วนในรูปแบบการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์จะมีการเปรียบเทียบเพิ่มเติมโดยเพิ่มเครื่องรับสัญญาณ Survey Grade (MSJ-3008-GM4-QZS) ที่ประมวลผลค่าพิกัดแบบเรียลไทม์ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADDOCA ผ่านโปรแกรม RTKLIB โดยผลลัพธ์ที่ได้ในเครื่องรับสัญญาณราคาถูก ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย ในระดับ ต่ำกว่า 20 เซนติเมตรในทางราบและในทางตั้งต่ำกว่า 30 เซนติเมตรและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % ในทางราบและทางตั้งต่ำกว่า 25 และ 50 เซนติเมตรตามลำดับ ส่วนเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade (Trimble NetR9) ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย ในระดับ ต่ำกว่า 10

เซนติเมตรในทางราบและในทางตั้งต่ำกว่า 15 เซนติเมตรและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % ในทางราบและทางตั้งต่ำกว่า 15 เซนติเมตร ส่วนเครื่องรับสัญญาณ Survey Grade (MSJ-3008-GM4-QZS) ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย ในระดับ ต่ำกว่า 10 เซนติเมตรในทางราบและในทางตั้งต่ำกว่า 20 เซนติเมตรและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % ในทางราบและทางตั้งต่ำกว่า 15 และ 20 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งการประมวลผลวิธีนี้ทำให้ทราบว่าการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์ เครื่องรับสัญญาณราคาถูกให้ความถูกต้องในทางราบและทางตั้งที่ใกล้เคียงกับเครื่องรับสัญญาณ Survey Grade ทั้งสองรุ่นมากในราคาที่ประหยัดกว่ามาก และเครื่องสัญญาณ Survey Grade ทั้งสองรุ่นโดย Trimble NetR9 ที่ใช้การประมวลผลภายหลัง และรุ่น MSJ-3008-GM4-QZS ที่ใช้ค่าปรับแก้แบบเรียลไทม์ผ่านระบบ MADOCA ให้ความถูกต้องทางราบและทางตั้งที่ใกล้เคียงกันมากโดยสังเกตจากรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของ ค่าแก้จากระบบ MADOCA ที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าแก้จากระบบ The International GNSS Service (IGS) และยังพบว่าให้ความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงค่าใกล้เคียงกับการทดสอบในลักษณะเดียวกันด้วยเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกันค่าแก้จากระบบ MADOCA ในพื้นที่ประเทศออสเตรเลีย Fredeluces et al. (2020) ที่มีค่าความถูกต้องทางราบ 6.0 เซนติเมตร และทางตั้ง 9.6 เซนติเมตร ส่วนในพื้นที่ประเทศญี่ปุ่นให้ความถูกต้องทางราบ 6.0 เซนติเมตร ทางตั้ง 9.4 เซนติเมตร Namie and Kubo (2020) ซึ่งทั้งสองประเทศนี้ได้มีการนำค่าปรับแก้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆของประเทศเป็นที่สำเร็จผลในหลายๆด้าน อาทิเช่นการใช้งานในหุ่นยนต์ การคมนาคม การทำฟาร์มรูปแบบอัจฉริยะ และการนำทางบนรถยนต์ เป็นต้น โดยจากผลลัพธ์การทดสอบข้างต้นจากหลายๆประเทศที่มีการนำค่าปรับแก้ไปประยุกต์ใช้งานได้จริงแล้ว

กรณีพื้นที่มีคลื่นหลุด (Multipath) จะการทดสอบในกรณีนี้ต้องการจะทราบถึงประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ที่มีผลต่อคลื่นหลุดพบว่าผลการทดสอบด้วยการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP-Static) ในเครื่องรับสัญญาณราคาถูก (U-blox F9P) ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % (SD) เพิ่มขึ้นจากบริเวณพื้นที่เปิดโล่งตั้งนี้ โดยค่า RMSE ทางราบจาก 9.9 เซนติเมตรเป็น 10.40 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 13.30 เซนติเมตรเป็น 21.10 เซนติเมตร ส่วนค่า SD ทางราบจาก 12.80 เซนติเมตรเป็น 17.0 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 15.0 เซนติเมตรเป็น 13.40 เซนติเมตร ส่วนในเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey grade พบว่าค่า

RMSE ทางราบจาก 1.20 เซนติเมตรเป็น 2.70 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 8.50 เซนติเมตรเป็น 23.8 เซนติเมตร ส่วนค่า SD ทางราบจาก 1.20 เซนติเมตรเป็น 1.90 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 0.20 เซนติเมตรเป็น 23.8 เซนติเมตร จากค่า RMSE และ ค่า SD สำหรับรูปแบบการประมวลผลจุดเดี่ยว ความละเอียดสูงแบบสถิต พบว่าเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA บริเวณที่มี Multipath ส่งผลต่อความถูกต้องส่งผลกับความถูกต้องในทางราบและทางตั้งค่อนข้างมาก และเครื่องรับชนิด Survey grade ส่งผลต่อความถูกต้องส่งผลกับความถูกต้องในทางราบเพียงเล็กน้อย และทางตั้งค่อนข้างมาก

ส่วนผลการทดสอบด้วยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (PPP-kinematic) ในเครื่องรับสัญญาณราคาถูก (U-blox F9P) ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % (SD) เพิ่มขึ้นจากบริเวณพื้นที่เปิดโล่งดังนี้ โดยค่า RMSE ทางราบจาก 15.8 เซนติเมตรเป็น 40.8 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 26.0 เซนติเมตรเป็น 73.8 เซนติเมตร ส่วนค่า SD ทางราบจาก 21.7 เซนติเมตรเป็น 66.7 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 40.4 เซนติเมตรเป็น 120.8 เซนติเมตร ส่วนในเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey grade พบว่าค่า RMSE ทางราบจาก 6.9 เซนติเมตรเป็น 12.0 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 13.6 เซนติเมตรเป็น 31.2 เซนติเมตร ส่วนค่า SD ทางราบจาก 10.9 เซนติเมตรเป็น 19.3 เซนติเมตร และทางตั้งจาก 14.0 เซนติเมตรเป็น 35.5 เซนติเมตร ทั้งนี้พบว่าบริเวณที่มี Multipath มีผลกระทบต่อ การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ค่อนข้างมากโดยสังเกตจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น 95 % (SD) ที่มีความแตกต่างกันในสองบริเวณคือ พื้นที่เปิดโล่งและพื้นที่มีคลื่นหลุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า RMSE ทางตั้งที่ได้รับผลกระทบอย่างมากซึ่งค่าความถูกต้องมีค่าลดลงหลายเท่าส่วนทางราบคลื่นหลุดก็มีผลกระทบทำให้ค่าความถูกต้องลดลงเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกันสองชนิดเครื่องรับสัญญาณคือ เครื่องรับสัญญาณราคาถูกและ เครื่องรับสัญญาณแบบ Survey Grade พบว่าค่าความถูกต้องในทางราบมีความแตกต่างกันพอสมควรในสองเครื่องรับแต่ก็ยังคงมีความถูกต้องที่ต่ำกว่า 50 เซนติเมตรและทางตั้งมีความถูกต้องที่ต่ำกว่า 80 เซนติเมตรในเครื่องรับสัญญาณราคาถูกในบริเวณที่มีคลื่นหลุดทั้งนี้ยังมีความถูกต้องเช่นเดียวกับการศึกษาที่ได้มีการทดสอบในประเทศใกล้เคียงที่ได้มีการประยุกต์ใช้ค่าแก้พื้นที่ประเทศญี่ปุ่นให้ความถูกต้องทางละติจูด 37.2 เซนติเมตร ทางลองจิจูด 83.8 เซนติเมตร (Namie & Kubo, 2020) ทำให้แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีในระดับหนึ่งของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA เมื่อคำนึงถึงราคาของเครื่องมือและความสะดวกรวดเร็วในการ

ประมวลผล นับว่ามีความสมเหตุสมผลกันเลยทีเดียวเมื่อเทียบกับเครื่องรับสัญญาณแบบ Survey Grade ที่มีราคาค่อนข้างสูงในท้องตลาด

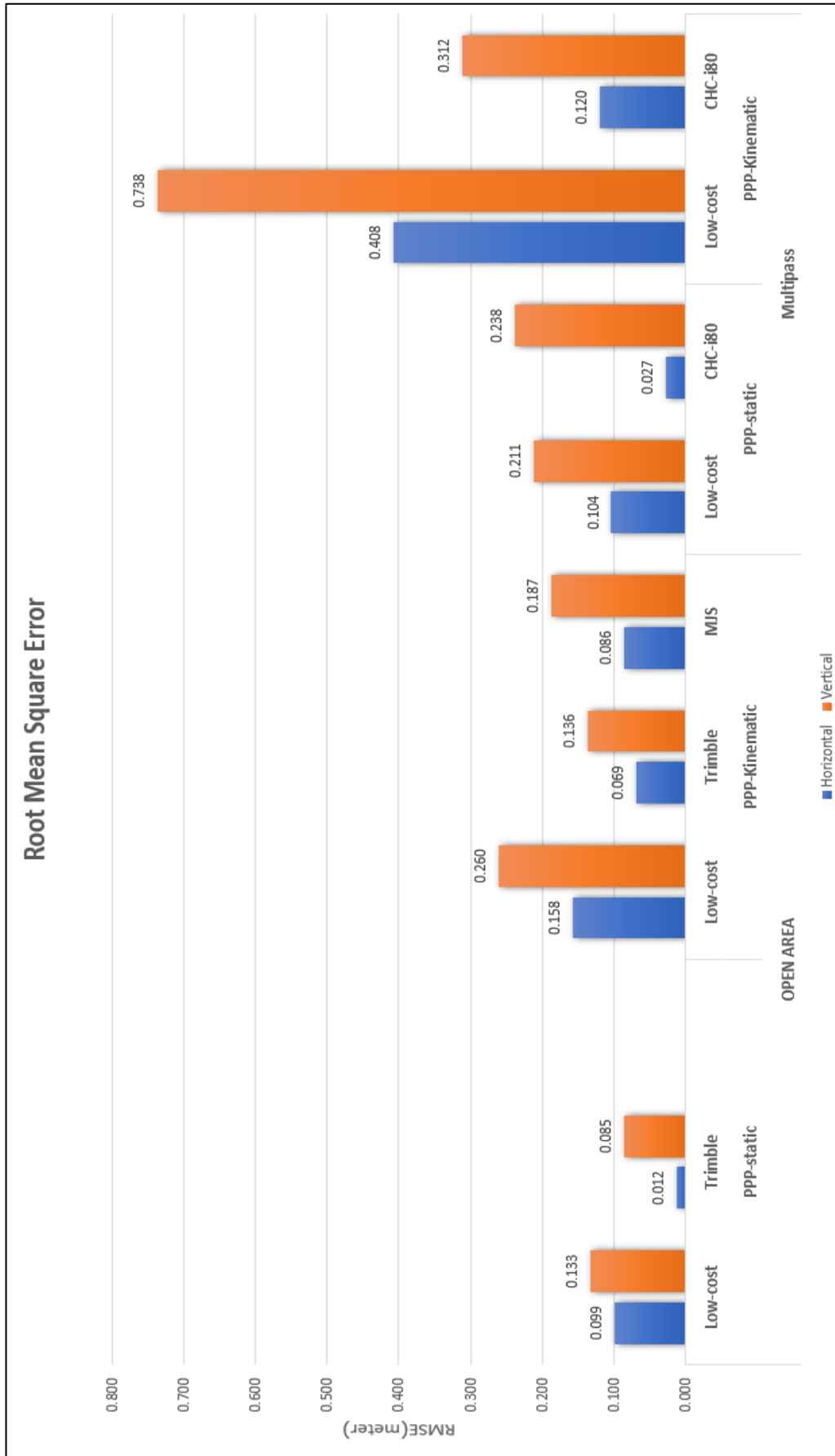
5.1.2 การทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test)

สำหรับการทดลองติดตั้งเครื่องรับสัญญาณราคาถูกรถยนต์ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA โดยใช้การรับสัญญาณจากเครื่องรับชนิด Survey Grade (CHC-i80) โดยรับค่าแก้จากระบบ RTK Network สำหรับเป็นค่าพิกัดอ้างอิงในทุกๆ Epoch ทั้งนี้จะพิจารณาจากค่าต่างของค่าพิกัดจากพิกัดอ้างอิง (Difference Coordinate) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย Root Mean Square Error (RMSE) โดยแบ่งทดสอบใน 2 พื้นที่ คือบริเวณเขตเมือง (Urban Area) และเขตชนบท (Rural Area) พบว่าผลที่ได้ของค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยของการเฉลี่ยที่อัตราเร็วต่างๆ ทางราบของบริเวณเมือง อยู่ที่ระดับเมตรคือ 1.130 เมตรและทางตั้ง 2.810 เมตร ส่วนบริเวณชนบท (Rural Area) มีค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยของการเฉลี่ยที่อัตราเร็วต่างๆ ทางราบอยู่ที่ระดับเมตรคือ 1.150 เมตรและทางตั้ง 1.938 เมตร เมื่อพิจารณาค่าต่างพบว่าในทางราบอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกันใน 2 พื้นที่ ส่วนในทางตั้งค่าต่างในบริเวณชนบทมีค่าน้อยกว่าในบริเวณเขตเมือง อาจเป็นผลมาจากคลื่นหลุดในบริเวณเขตเมืองที่สะท้อนจากตึกและสิ่งปลูกสร้างสองข้างทางทำให้ได้ค่าต่างทางตั้งที่สูงกว่า และผลลัพธ์ค่าต่างค่าพิกัดกับค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบที่อัตราเร็วต่างๆ ของบริเวณเมือง มีค่า 1.294 เมตรและทางตั้งต่ำกว่า 2.938 เมตร ส่วนบริเวณชนบทมีค่าต่างค่าพิกัดกับค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบมีค่า 1.238 เมตรและทางตั้ง 2.215 เมตร พบว่าเมื่อพิจารณาค่า RMSE ในทางราบในเขตเมืองและชนบทมีค่าไม่แตกต่างกันมากและในทางตั้งในเขตชนบทให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่าเขตเมือง แต่เมื่อแยกการทดสอบออกเป็นที่ระดับอัตราเร็วต่างๆ แล้วทำการเปรียบเทียบใน 2 พื้นที่ศึกษา ทำให้ทราบว่าที่อัตราเร็ว 0-20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผลลัพธ์ค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยทางราบของบริเวณเมือง 1.478 เมตรและทางตั้งต่ำ 2.157 เมตร ส่วนบริเวณชนบทมีค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยทางราบ ต่ำกว่า 1.344 เมตรและทางตั้งต่ำกว่า 1.144 เมตร เมื่อพิจารณาในเขตเมืองค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบ 1.843 เมตรและทางตั้ง 2.444 เมตร แต่ในเขตชนบทให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบ 1.160 เมตรและทางตั้ง 1.396 เมตร ทำให้ทราบว่าสำหรับอัตราเร็วที่ 0-20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงค่าความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกรถยนต์ในบริเวณเขตชนบทมีความถูกต้องสูงกว่าในเขตเมืองโดยสังเกตจากค่าต่างของค่าพิกัดและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและยังอยู่ในระดับ

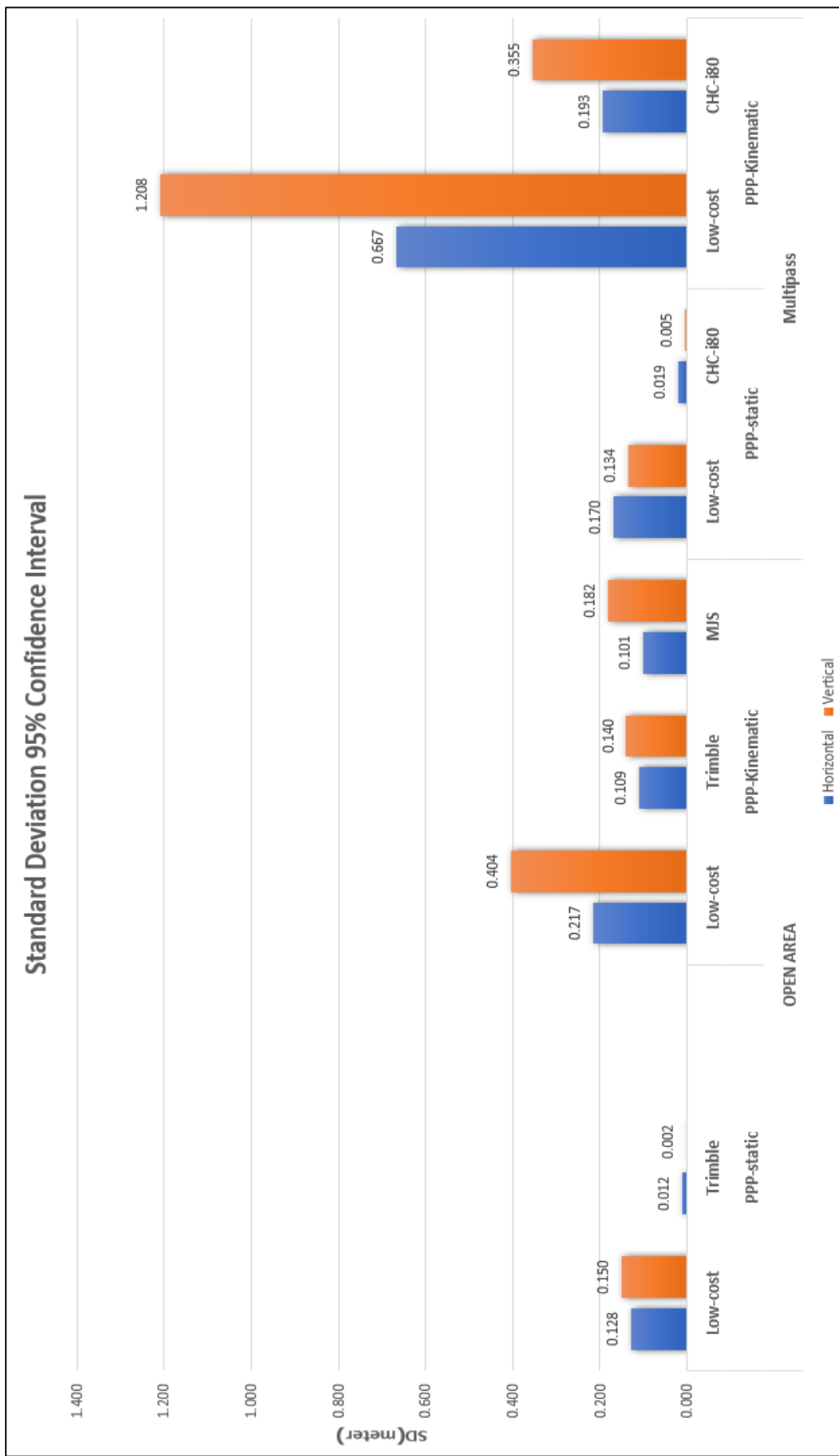
เมตรในทั้งสองบริเวณ ที่อัตราเร็ว 21-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผลลัพธ์ค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยทางราบของบริเวณเมืองเป็น 1.478 เมตรและทางตั้ง 1.652 เมตรส่วนบริเวณชนบทมีค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยทางราบ 1.246 เมตรและทางตั้ง 1.514 เมตร เมื่อพิจารณาในเขตเมืองค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบ 1.592 เมตรและทางตั้งต่ำกว่า 1.740 เมตรแต่ในเขตชนบทให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบ 1.651 เมตรและทางตั้ง 2.077 เมตร ทำให้ทราบว่าสำหรับอัตราที่ 21-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงค่าความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกในบริเวณเขตชบทมีความถูกต้องพอกๆกับในเขตเมืองในทางราบแต่ไม่ได้มีความแตกต่างกันจนเกินไปเพราะว่าค่ามีความใกล้เคียงกันในระดับต่ำกว่า 0.1 เมตร ส่วนทางตั้งค่าความถูกต้องในเขตเมืองมีค่าสูงกว่าในเขตชนบทโดยสังเกตจากค่าต่างของค่าพิกัดและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยเมื่อพิจารณาความถูกต้องทางตำแหน่งของรถยนต์ในทั้งสองพื้นที่ที่ความเร็วนี้มีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ส่วนที่อัตราเร็ว 51-80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผลลัพธ์ค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยทางราบของบริเวณเมือง 0.377 เมตรและทางตั้ง 4.622 เมตรส่วนบริเวณชนบทมีค่าต่างค่าพิกัดกับค่าอ้างอิงเฉลี่ยทางราบ 0.903 เมตรและทางตั้งต่ำกว่า 3.154 เมตร เมื่อพิจารณาในเขตเมืองค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบ 0.446 เมตรและทางตั้ง 4.629 เมตรแต่ในเขตชนบทให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยทางราบ 0.903 เมตรและทางตั้ง 3.171 เมตร ทำให้ทราบว่าสำหรับอัตราที่ 51-80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงค่าความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกในบริเวณเขตชบทมีความถูกต้องต่ำกว่าในเขตเมืองในทางราบ ส่วนทางตั้งค่าความถูกต้องในเขตชนบทมีค่าสูงกว่าในเขตเมืองโดยสังเกตจากค่าต่างของค่าพิกัดและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ยและที่อัตราเร็วนี้ให้ความถูกต้องทางตั้งต่ำที่สุดในทุกกรณี แต่ความถูกต้องในทางราบกลับสูงที่สุดในทุกกรณีน่าจะเป็นผลมาจากรณีความเร็วสูงทำให้จำนวนจุดที่เก็บบันทึกค่าน้อยทำให้ได้ความถูกต้องที่สูง

จากการทดสอบเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA บนรถยนต์พบว่าบริเวณเขตชนบทให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งสูงกว่าเขตเมืองโดยสังเกตจากค่า RMSE ที่อัตราเร็วต่างๆ และค่าเฉลี่ยของทุกอัตราเร็ว ทั้งนี้อาจจะเกิดเนื่องจากคลื่นหลุด (Multipath) ที่ในบริเวณมีตึกและบ้านเรือนตลอดเส้นทางที่ทำการทดลองส่วนบริเวณชนบทเป็นถนนโล่งกว้างและขนาดกว้างกว่าในเขตเมือง แต่เมื่อดูค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดของสองบริเวณก็ไม่ได้มีความแตกต่างกันมากเกินไปนับว่าในสองบริเวณนี้แทบจะไม่นับสำคัญต่อกันสำหรับความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบ เพราะทั้งสองบริเวณค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในแนวราบที่ต่ำกว่า 1.6 เมตร

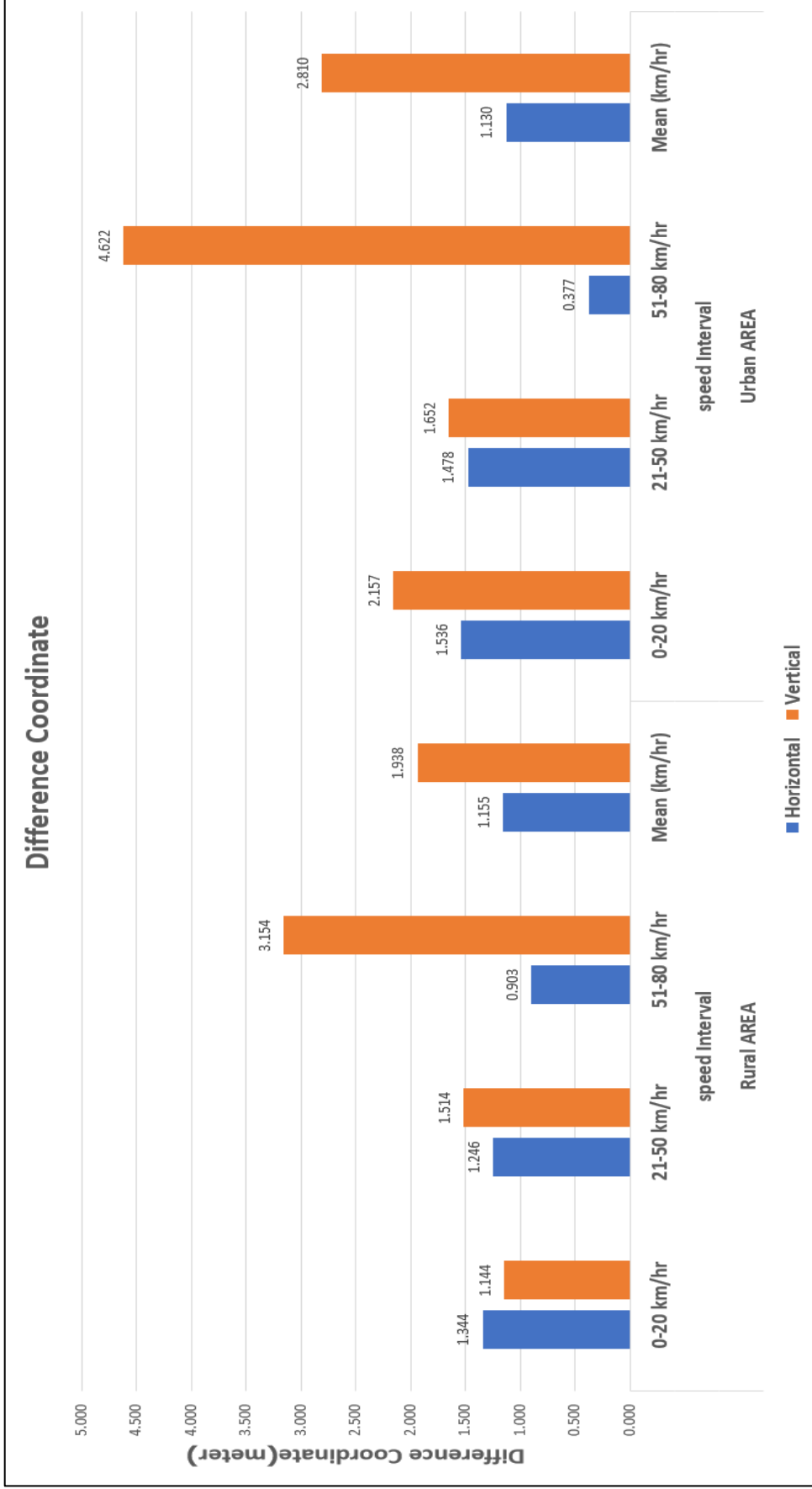
ในกรณีที่แย่ที่สุดส่วนในกรณีปกติทั่วไปจะอยู่ในช่วงถูกต้องทางราบที่ 0.5 -1.3 เมตร และเมื่อพิจารณาถึงความถูกต้องทางตำแหน่งในแนวตั้งพบว่าในบริเวณเขตชนบทก็ให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีกว่าในบริเวณพื้นที่เขตเมือง คาดว่าน่าจะมาจากสาเหตุเดียวกันในเรื่องของคลื่นหลุดที่มีผลต่อการปรับแก้ในเครื่องรับสัญญาณราคาถูกเพราะในระบบค่าแก้ MADOCA ยังมีได้รับการปรับแก้ผลอันเนื่องมาจากคลื่นหลุด แต่สำหรับค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของทั้งสองบริเวณก็ยังคงอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 3.0 เมตรในกรณีที่แย่ที่สุด ส่วนในกรณีที่ได้อัตราเร็วต่ำสุดจะอยู่ในช่วงความถูกต้องที่ 1.0 – 2.0 เมตร นับว่าเป็นค่าความถูกต้องที่อยู่ในระดับสมควรสำหรับเครื่องรับสัญญาณราคาถูกที่ประมวลแบบ Real-time ในทุกๆวินาที เมื่อมีการเปรียบเทียบกับทดสอบในรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในประเทศญี่ปุ่น กรณีของการรับค่าปรับแก้ของ CLAS และ MADOCA ผ่านทาง MSJ onboard แล้วติดตั้งบนรถยนต์ทดสอบวิ่งในพื้นที่เปิดโล่งที่อัตราเร็วต่ำกว่า 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงให้ค่า RMSE ที่ 31.5 เซนติเมตร ถึง 4.67 เมตร และพื้นที่บริเวณเขตเมืองที่ปรับแก้ด้วยค่าแก้ MADOCA ผ่านทางเครื่องรับสัญญาณ MSJ onboard ให้ค่า RMSE ที่ 1.29 เมตรถึง 3.99 เมตร Namie and Kubo (2020) ซึ่งผลลัพธ์ให้ใกล้เคียงกับการทดสอบในพื้นที่ประเทศไทยด้วยเครื่องรับสัญญาณราคาถูกและอีกหนึ่งเหตุผลคือเครื่องรับสัญญาณราคาร่วมกับค่าแก้ MADOCA ในพื้นที่ประเทศไทยความถูกต้องสูงกว่า GPS ดิจิตอลและเครื่องสัญญาณดาวเทียมในระบบ Smart Phone จึงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นกับประเทศไทย



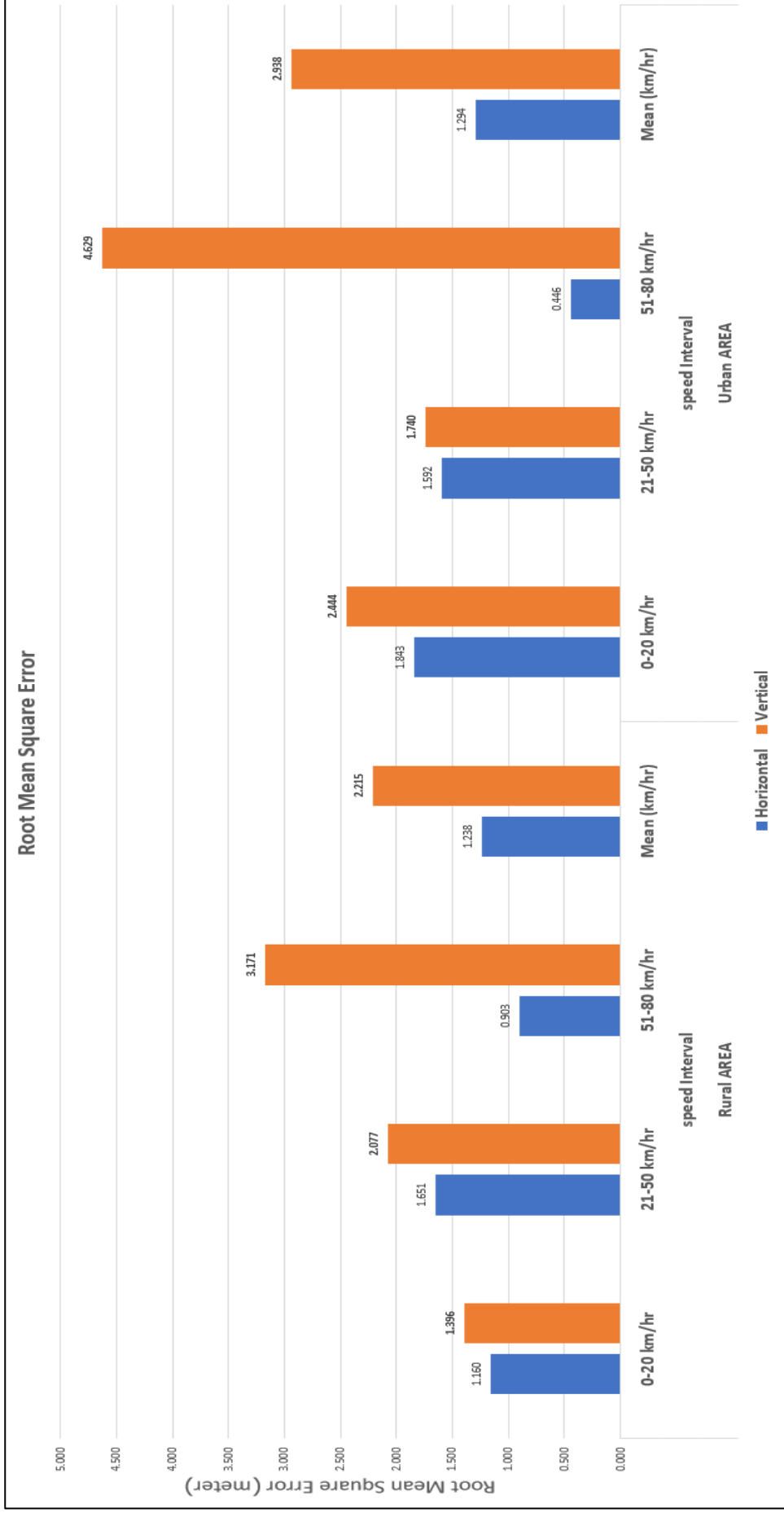
รูปที่ 32 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ของค่าพิกัดทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ระหว่างค่าพิกัดที่ได้จากบริเวณ(Open Area)พื้นที่เปิดโล่งและบริเวณที่มี Multipath เปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง



รูปที่ 33 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าราคาที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square Error) ของค่าที่ก่ดทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ระหว่างค่าที่ก่ดที่ได้จากบริเวณ(Open Area)พื้นที่เปิดโล่งและบริเวณที่มี Multipath เปรียบเทียบกับค่าที่ก่ดอ้างอิง



รูปที่ 34 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าต่างของค่าพิกัดจากพิกัดอ้างอิง (Difference Coordinate) ในทางราบและทางตั้งสำหรับพื้นที่ภายในเขตเมือง (Urban Area)และเขตชนบท (Rural Area) ที่อัตราเร็วต่างกัน



รูปที่ 36 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย Root Mean Square Error (RMSE) ในทางราบและทางตั้งสำหรับพื้นที่ศึกษา บริเวณเขตเมือง (Urban Area)และเขตชนบท (Rural Area) ที่อัตราเร็วต่างกัน

5.2 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ในพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA นำไปเปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในงานสำรวจ โดยจะแบ่งศึกษาเป็น 2 กรณีศึกษาคือความถูกต้องพิกัดจุดถาวร (Fixed Point Test) แบ่งเป็นบริเวณพื้นที่โล่งและพื้นที่มีคลื่นหลุดหลายวิถี (Multipath) และการทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test) แบ่งเป็นบริเวณเมืองและชนบท

โดยแสดงผลค่าความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละกรณีศึกษาโดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Standard Deviation (SD) พบว่าสำหรับกรณีทดสอบกับจุดคงที่ (Fixed point test) ในบริเวณพื้นที่โล่ง เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA สำหรับรูปแบบการประมวลผลจุดเดี่ยวแบบสถิติให้ความถูกต้องทางราบประมาณ 15 เซนติเมตร และทางตั้งประมาณ 20 เซนติเมตร ส่วนการประมวลผลจุดเดี่ยวแบบจลน์ให้ความถูกต้องทางราบประมาณ 20 เซนติเมตรละทางตั้งประมาณ 40 เซนติเมตร แต่ในบริเวณพื้นที่มี Multipath สำหรับรูปแบบการประมวลผลจุดเดี่ยวแบบสถิติให้ความถูกต้องทางราบประมาณ 20 เซนติเมตร และทางตั้งประมาณต่ำกว่า 30 เซนติเมตร ส่วนการประมวลผลจุดเดี่ยวแบบจลน์ให้ความถูกต้องทางราบประมาณต่ำกว่า 70 เซนติเมตรละทางตั้งประมาณ 1.2 เมตร เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ในบริเวณพื้นที่โล่งและมี Multipath พบว่าบริเวณมีพื้นที่โล่งให้ค่าความถูกต้องที่สูงกว่าและทำให้ทราบว่าค่าความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ให้ค่าความถูกต้องที่สูงในระดับต่ำกว่าเมตรได้ ส่วนในกรณีการทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test) พบว่าที่ความเร็วต่างกันให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบและทางตั้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการทดสอบกรณีนี้ในบริเวณชนบททำให้ได้ค่าความถูกต้องทางราบต่ำกว่า 1.3 เมตรและทางตั้งต่ำกว่า 2.3 เมตรส่วนบริเวณพื้นที่ในเขตเมืองเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ให้ความถูกต้องทางราบต่ำกว่า 1.3 เมตร และทางตั้งเฉลี่ยต่ำกว่า 3.0 เมตร ซึ่งนับว่าในสองพื้นที่ทั้งเขตเมืองและชนบทค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบไม่แตกต่างกันในกรณีของค่าเฉลี่ยและในทางตั้งในเขตเมืองให้ความถูกต้องที่ต่ำกว่าเขตชนบท

จากผลลัพธ์ทำให้สรุปได้ว่าการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกร่วมกับค่าแก้ MADOCA ด้วยการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในประเทศไทย

ทำให้ทราบความถูกต้องทางตำแหน่งที่เหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ประเทศไทยได้ และสามารถประยุกต์ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยอาศัยค่าแก้จาก MADOCA ประโยชน์ในด้านต่างๆในพื้นที่ประเทศไทย เช่น การใช้ในด้านการนำทางรถยนต์, การรับสัญญาณเพื่อหาค่าพิกัดพื้นที่ทางไกลและไม่มีอินเทอร์เน็ตเข้าถึง เป็นต้น แต่ทั้งประเด็นสำคัญที่น่าจะเป็นประโยชน์ต้องการใช้งานมากที่สุดน่าจะเป็นด้านการติดตั้งบนรถยนต์เพราะให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่งต่ำกว่า 5 เมตรซึ่งมากกว่าเครื่องรับ GNSS ที่เรามักใช้ในการนำทางรถยนต์และสมาร์ตโฟนใช้สัญญาณ L1 C/A เท่านั้น ความแม่นยำของตำแหน่งอยู่ที่ประมาณ 5 - 10 เมตร

5.3 ปัญหาที่พบ

5.3.1 เนื่องจากข้อจำกัดในการรับสัญญาณ ของสถานี CUUT ซึ่งพบว่าบางวันข้อมูลมีการขาดหายไปบางช่วงอันเนื่องจากการหยุดรับสัญญาณของสถานี ทำให้ต้องตัดข้อมูลในบางวันและบางช่วงทิ้งไป

5.3.2 เนื่องด้วยดาวฟ้าตึกเจริญวิศวกรรมชอบเกิดเหตุติดขัดทางไฟฟ้า เช่น ไฟดับ เป็นต้น ส่งผลให้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม MADOCA หยุดรับสัญญาณ และต้องติดต่อต้นสังกัดให้เข้ามา รีเซตเครื่องรับและตั้งค่าเครื่องรับสัญญาณใหม่

5.3.3 เนื่องจากการบันทึกข้อมูลค่ารังวัดเป็นการบันทึกค่าในทุก ๆ วินาที ทำให้ค่ารังวัดใน 1 วันมีค่าจำนวนมาก ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ข้อมูล อันเนื่องปัญหาด้วยความเร็วของคอมพิวเตอร์ที่ไม่เพียงพอ ทำให้คอมพิวเตอร์ค้างและช้า

5.3.4 การทดสอบการรับสัญญาณกรณีการทดสอบบนยานพาหนะ (Vehicle Test) ในเขตเมืองจำเป็นต้องรอเวลาที่รถสัญจรบนท้องถนนน้อยทำให้มีความยุ่งยากในการรับสัญญาณทำให้ต้องรับสัญญาณในเวลากลางคืนบ้าง อีกทั้งการกำหนดความเร็วต่างๆทำให้ยากต่อการควบคุมเพราะมีรถคันอื่นสัญจรบนท้องถนนด้วย

5.3.5 การเชื่อมต่อเครื่องรับสัญญาณราคาถูกกับดาวเทียมในบริเวณเขตเมืองทำได้ไม่ดีเท่าที่ควรเพราะมีการขาดหายของสัญญาณบ่อยในกรณีที่มีตึกบังสัญญาณ

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 จากผลการศึกษาพบว่า การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยใช้ค่าแก้ MADOCA ด้วยการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดสูงในประเทศไทยมีความถูกต้องเพียงพอที่จะใช้งานในประเทศไทยสำหรับการประมวลผลค่าเชิงตำแหน่งแบบ Real time เช่น การใช้ในด้านการนำทางรถยนต์, การรับสัญญาณเพื่อหาค่าพิกัดพื้นที่ห่างไกล และไม่มีอินเทอร์เน็ตเข้าถึง เป็นต้น

5.4.2 กรณีการรับสัญญาณควรทำการทดสอบให้มีความหลากหลายเชิงพื้นที่มากขึ้น เช่น ทำการทดสอบในหลายๆจังหวัดมากขึ้น เพื่อสังเกตความครอบคลุมของพื้นที่รับสัญญาณ

5.4.3 ควรเพิ่มสถานีที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบ Fixed point test ให้มีการเปรียบเทียบในทุกพื้นที่ว่ามีความครอบคลุมมากน้อยเพียงใด

5.4.4 จากผลการศึกษาพบว่าเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA มีประสิทธิภาพในประเทศไทยดังนั้นควรมีการศึกษาต่อเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆให้มากขึ้น และกระตุ้นการใช้ค่าปรับแก้ให้กว้างขวางมากขึ้นในประเทศไทย

5.5.5 ช่วงเปรียบเทียบผลการศึกษาควรตรวจเช็คครอบคลุมอ้างอิงของค่าพิกัดที่ประมวลผลได้ ทั้งสองเครื่องรับสัญญาณคือเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้ MADOCA และเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade ว่าเป็นพื้นฐานเดียวกัน

5.5.6 เนื่องจากค่าแก้ MADOCA สามารถรับค่าปรับแก้ได้หลายช่องทางอาทิเช่น การรับสัญญาณโดยตรงจากดาวเทียม QZSS ในคลื่น L6E ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัดว่าจะต้องเห็นดาวเทียมตลอดเวลาที่รับสัญญาณ ทำให้อาจจะมีการทำการทดสอบในรูปแบบการรับค่าแก้แบบ การรับค่าปรับแก้จากอินเทอร์เน็ต ซึ่งการรับค่าแก้วิธีนี้ จะค่อนข้างเสถียรกว่าเพราะไม่จำเป็นต้องเห็นดาวเทียมที่รับค่าแก้ ขอเพียงแต่มีอินเทอร์เน็ตตลอดเวลา จึงน่าสนใจในการนำไปศึกษาต่อ

5.5.7 ประเทศไทยน่าจะค่าปรับแก้มาใช้ในรถยนต์เพื่อพัฒนาระบบขนส่งให้มีความแม่นยำที่สูงขึ้นและเหมาะกับการประยุกต์ใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ



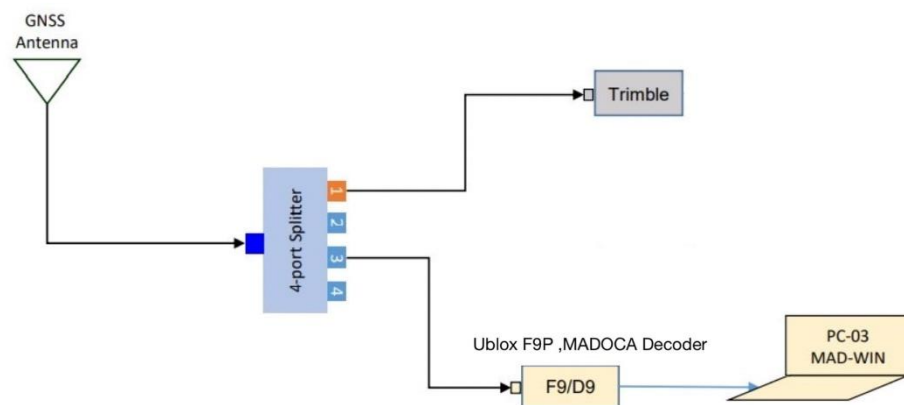
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก. การประมวลผลของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จาก MADOCA

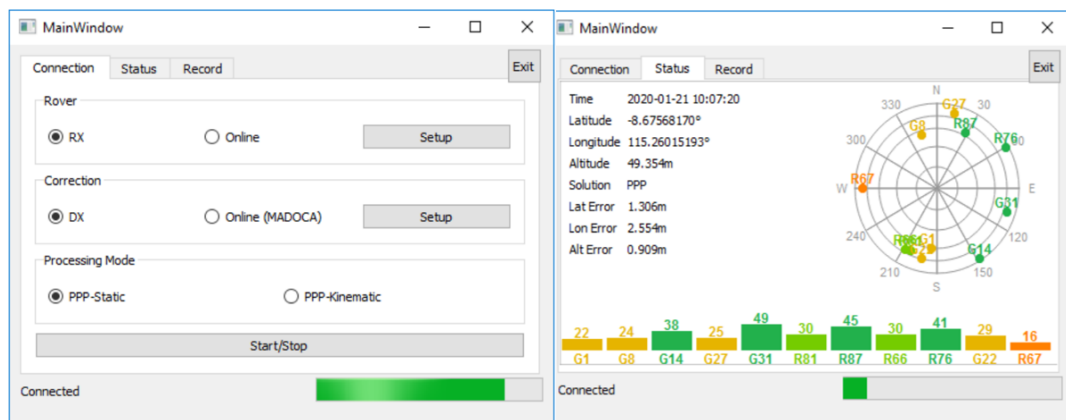
การรับสัญญาณดาวเทียมโดยรับจากดาวเทียมโดยตรงในบริเวณศึกษาพื้นที่เปิดโล่งและการติดตั้งบนรถยนต์ผ่านทางเครื่องรับสัญญาณราคาถูก ทำได้โดยการต่อสัญญาณดาวเทียมจะเสาสอากาศรับสัญญาณเข้ากับเครื่องมือรับสัญญาณราคาถูก Ublox F9P จากนั้นต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ดังรูปที่

33



รูปที่ 37 แผนผังการรับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้จาก MADOCA

1. เปิดโปรแกรม MAD-WIN เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณดาวเทียม จากนั้นทำการตั้งค่าโปรแกรมโดยเลือกโหมด Rover เป็น Rx และ Baud rate 115200 ส่วน Correction เป็น Dx และ Baud rate 57600 เลือกโหมดของการประมวลผลว่าจะเป็นแบบ Static หรือ Kinematic แล้วทำการเชื่อมต่อโดยกด Start ถ้าทำการเชื่อมต่อสำเร็จจะปรากฏดาวเทียมในหน้าของ Status ดังรูปที่ 34



รูปที่ 38 การตั้งค่าโปรแกรม MAD-WIN เพื่อรับสัญญาณดาวเทียม

2. ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลแบบ Real time จะถูกบันทึกเป็น 3 ไฟล์ คือ Correction ในรูปแบบ .UBX, NMEA (ไฟล์ค่าพิกัดทางตำแหน่งที่ถูกประมวลผลแล้ว) ในรูปแบบ .nmea และ Rover (เป็นไฟล์ค่ารังวัด) ในรูปแบบ .UBX ดังภาพ

ชื่อ	วันที่ปรับเปลี่ยน	ชนิด
Correction	12/8/2564 13:54	ไฟล์เดอร์เพิ่ม
NMEA	13/8/2564 12:56	ไฟล์เดอร์เพิ่ม
Rover	1/10/2564 10:18	ไฟล์เดอร์เพิ่ม

3. การไฟล์ NMEA ซึ่งเป็นค่าพิกัดแบบละจิจูด, ลองจิจูด แปลงให้เป็นระบบ พิกัดแบบ UTM (Universal Transverse Mercator) โดยใช้ PYTHON 3.0 ด้วยชุดคำสั่งดังรูปที่ 35 ผลลัพธ์ที่ได้จะออกในรูปแบบไฟล์ EXCEL ที่เป็นระบบพิกัดแบบ Universal Transverse Mercator

```

NMEA_TO_UTM_NEW.py
1  import pyproj
2  import os
3  import datetime
4
5  def lla2utm(lat, lon, ell_h, zone):
6      # Input lat, lon in degreee
7      # Check Zone 47 or 48
8      utm = "EPSG:32647" if zone==47 else "EPSG:32648"
9      lla = "EPSG:5332" # WGS84 Geodetic
10     transproj = pyproj.Transformer.from_crs(lla,utm,always_xy=True) # always_xy หมายถึงให้เรียง lon,lat
11     E,N,h = transproj.transform(lon,lat,ell_h,radians=False)
12     return (E,N,h)
13
14     def date2doy(date='%Y-%m-%d %H:%M:%S'):
15         # input y,m,d,hh,mm,ss : integer
16         # output doy decimal : float
17         datetimeformat = '%Y-%m-%d %H:%M:%S'
18         dd = datetime.datetime.strptime(date, datetimeformat)
19         doy = dd.strftime('%j')
20         dec = (dd.hour + dd.minute/60.0 + dd.second/3600.0)/24.0
21         doydec = int(doy) + dec
22         DOY = doydec
23         return DOY
24
25     # Reference Coordinate of CUUT Station
26     o_e = 665856.036
27     o_n = 1519055.763
28     h_ell = 74.302
29
30     #+++++
31     nmea_dir = r'C:\Users\BK\Desktop\GNSS_data\NMEA_to_UTM'
32     outfld = r'C:\Users\BK\Desktop\GNSS_data\NMEA_to_UTM'
33     #+++++
34     for root, dirs, files in os.walk(nmea_dir, topdown=True):
35         for fname in files:
36             if '.nmea' in fname:
37                 print(fname);
38                 ymd = fname.split('_')[0]
39                 outfile = open(os.path.join(outfld, fname.replace('nmea','csv')),'w')
40                 for line in open(os.path.join(nmea_dir, fname)):
41                     if '$GPGGA' in line:
42                         #try:
43                         data =line.split(',')
44                         hms = data[1][0:2] + ':' + data[1][2:4] + ':' + data[1][4:6]
45                         doy = date2doy(ymd + ' ' + hms)
46                         lat = float(data[2][0:2]) + float(data[2][2:])/60.0;

```

```

33 for root, dirs, files in os.walk(nmea_dir, topdown=True):
34     for fname in files:
35         if '.nmea' in fname:
36             print(fname);
37             ymd = fname.split('_')[0]
38             outfile = open(os.path.join(outfld, fname.replace('nmea', 'csv')), 'w')
39             for line in open(os.path.join(nmea_dir, fname)):
40                 if '$GPGGA' in line:
41                     #try:
42                     data = line.split(',')
43                     hms = data[1][0:2] + ':' + data[1][2:4] + ':' + data[1][4:6]
44                     doy = date2doy(ymd + ' ' + hms)
45                     lat = float(data[2][0:2]) + float(data[2][2:])/60.0;
46                     lon = float(data[4][0:3]) + float(data[4][3:])/60.0;
47                     h_msl = float(data[9])
48                     N = float(data[11])
49                     h = h_msl+N;
50                     zone = 47 if lon < 102 else 48
51                     utm_e,utm_n,h = lla2utm(lat, lon, h, zone) # input : Degree
52                     #dE=abs(utm_e-o_e)
53                     #dN=abs(utm_n-o_n)
54                     #dU=abs(h-h_ell)
55                     result = '{:.6f}'.format(doy) + ','
56                     result += '{:.3f}'.format(utm_e) + ',' + '{:.3f}'.format(utm_n) + ','
57                     #result += '{:.3f}'.format(dE) + ',' + '{:.3f}'.format(dN) + ','
58                     outfile.write(result+'\n')
59                     print(result)
60                 #except:
61                     #print(line)
62             outfile.close()
63             print('Process success')
64
65 # Reference Coordinate of CUUT Station
66 o_e = 665856.036
67 o_n = 1519055.763
68 h_ell = 74.302

```

รูปที่ 39 ชุดคำสั่งแปลงไฟล์ NMEA เป็นระบบพิกัดแบบ Universal Transverse Mercator

ภาคผนวก ข. การประมวลผลของเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade บนสถานี CORS CUUT โดยการประมวลผลแบบ PPP Static และ PPP-kinematic โดยใช้ Final Product เทียบกับค่าอ้างอิงของสถานี CORS CUUT ด้วยโปรแกรม RIKLIB

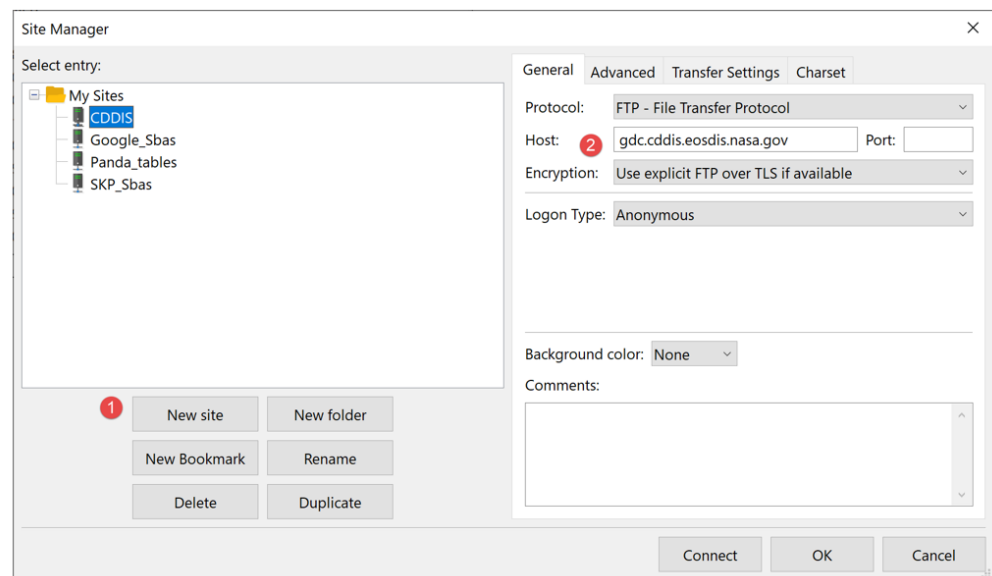
ประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดถูกต้องสูงโดยใช้ข้อมูล > 2 ความถี่ (L1+L2) หรือ (L1+L2+L5) เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เรียกว่า Ionosphere linear code and phase combination ในการประมวลผลจำเป็นต้องเตรียมข้อมูลค่าแกว่งโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง ทำได้ดังนี้

- 1) ข้อมูลตำแหน่งวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง แบบ Final orbit (มี 3 ระดับ Final, Rapid, Ultra Rapid)
- 2) โดยใช้โปรแกรม FileZilla จากนั้น connect เข้าไปยัง Server ของ IGS เพื่อดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรและค่าแกว่งนาฬิกา ดาวเทียม (<https://filezilla-project.org/download.php?platform=win64>)
 - a. ติดตั้งโปรแกรม FileZilla

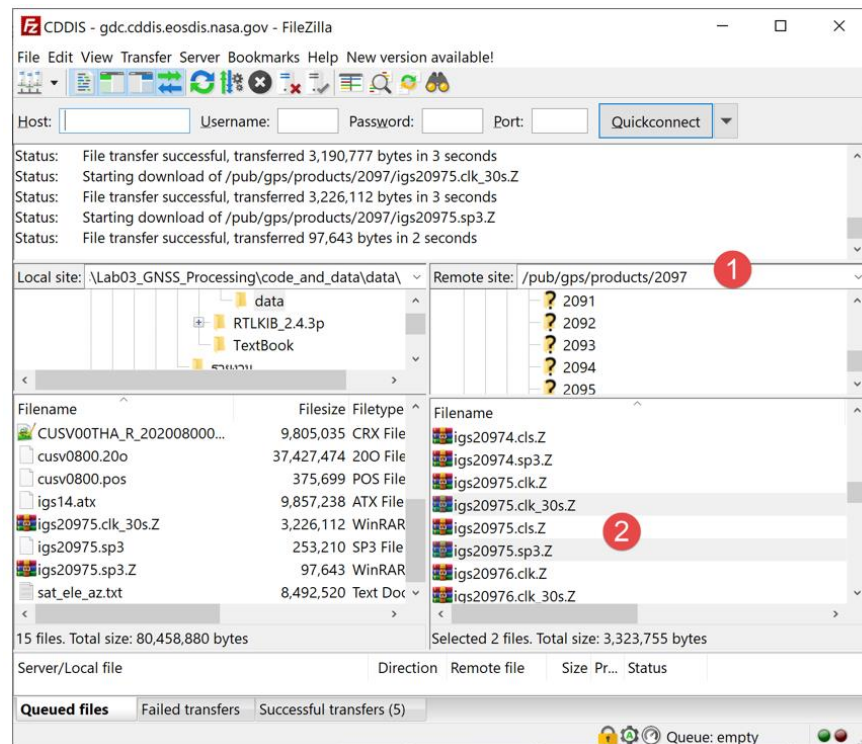
b. หลังจัดติดตั้งโปรแกรมให้เพิ่ม Site ที่จะโดยโหลดดังนี้ คลิกที่เมนูเลือก File-> Site Manager กำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

- คลิกปุ่ม New site ตั้งชื่อ CDDIS
- Protocol: FTP- File Transfer Protocol - Host: gdc.cddis.eosdis.nasa.gov
- Encryption: User exp.... - Logon Type: Anonymous

คลิกปุ่ม Connect

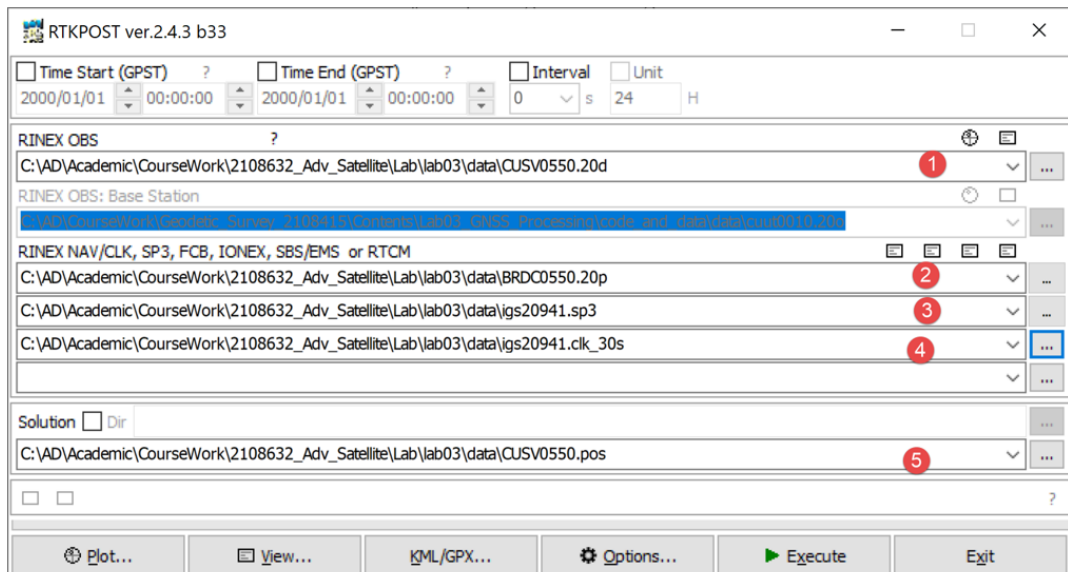


รูปที่ 40 การใช้ โปรแกรม FileZilla จากนั้น connect เข้าไปยัง Server ของ IGS



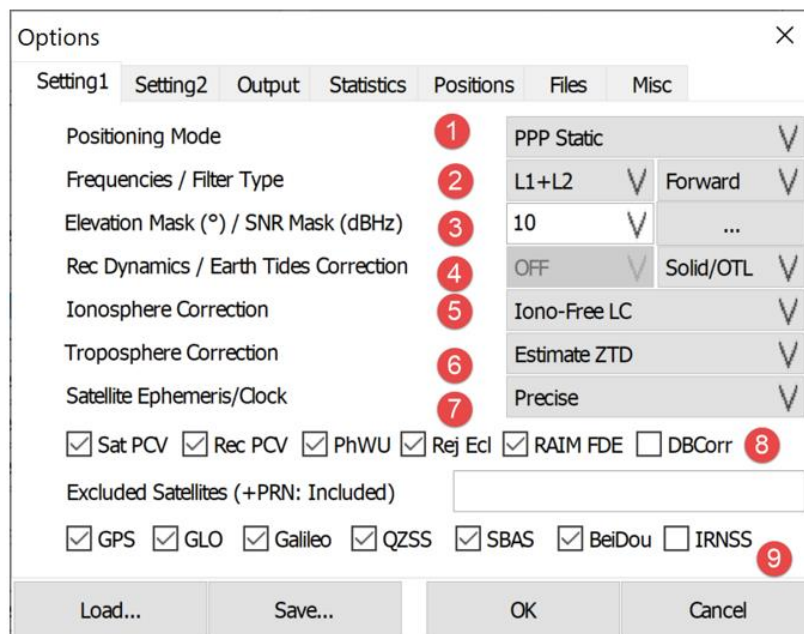
รูปที่ 41 การดาวน์โหลดข้อมูลค่าแกว่งโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม

- 3) เข้าไปยัง Path ที่เก็บไฟล์ /pub/gps/products/2094 เพื่อดาวน์โหลดข้อมูลค่าแกว่งโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมที่ตรงข้อมูล **CUSV0550.20d** หรือ DOY 55 หรือคือวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 การแปลงวันที่ให้เป็น DOY, GPS Week ดูได้จากเว็บไซต์ <http://navigation.services.agi.com/GNSSWeb/>
- 4) ดาวน์โหลดไฟล์ **igs20941.clk_30s.Z** (ไฟล์ค่าแก่นาฬิกาดาวเทียม) และ **igs20941.sp3.Z** (ไฟล์ตำแหน่งดาวเทียม) ความละเอียดสูง (2094 คือ GPS week นับมาตั้งแต่ระบบดาวเทียม GPS เริ่มให้บริการ, 1 คือวันที่ 1 ในสัปดาห์หรือคือวันจันทร์ โดยมีค่าที่เป็นไปได้คือ 0-6)
- 5) จากนั้นทำการแตกไฟล์ และจัดเก็บไว้ในโฟลเดอร์ data หรือโฟลเดอร์อื่นที่เหมาะสมสำหรับไฟล์ **igs20941.clk_30s** ให้แก่ชื่อเป็น **igs20941.clk**
- 6) ประมวลผลข้อมูล PPP โดยเปิดโปรแกรม rtkpost_win64.exe กำหนดค่าต่างๆ ดังนี้
 - RINEX ระบุเป็นไฟล์ **CUSV0550.20d** จัดเก็บอยู่ใน โฟลเดอร์ data ของปฏิบัติการนี้
 - RINEX NAV/CLK.... กำหนดเป็นไฟล์ ที่ได้ดาวน์โหลดมาในขั้นตอนก่อนหน้านี้
 - **BRDC0550.20p**: คำนวณตำแหน่งดาวเทียมจากหลายกลุ่มดาวเทียม
 - **igs20941.sp3**: ตำแหน่งดาวเทียมความละเอียดสูง
 - **igs20941.clk**: ค่าแก่นาฬิกาดาวเทียม



รูปที่ 42 การประมวลผลด้วยโปรแกรม RTKLIB

- 7) คลิกที่ปุ่ม Options เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการประมวลผลดังนี้
- 8) การตั้งค่า Setting 1



รูปที่ 43 การตั้งค่าเพื่อประมวลผล

9) Files กำหนดค่าดังนี้

10) กดปุ่ม Ok เพื่อบันทึกการแก้ไขและกดปุ่ม Execute เพื่อประมวลผลข้อมูล

รูปที่ 44 การเพิ่มค่าปรับแก้เสาอากาศและค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นมหาสมุทร

```

rtklibPos_to_UTM.py  CUUT9307.pos
1 % program : RTKPOST ver.2.4.2
2 % inp file : C:\Users\BK\Desktop\Madoca_covert\3-11-2019\CUUT9307.19o
3 % inp file : C:\Users\BR\Desktop\Madoca_covert\3-11-2019\brdm3070.19p
4 % inp file : C:\Users\BR\Desktop\Madoca_covert\3-11-2019\igs20780.clk
5 % inp file : C:\Users\BR\Desktop\Madoca_covert\3-11-2019\igs20780.sp3
6 % obs start : 2019/11/03 00:00:00.0 GPST (week2078 0.0s)
7 % obs end : 2019/11/03 23:59:30.0 GPST (week2078 86370.0s)
8 %
9 % (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
10 % GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdun(m) age(s) ratio
11 2019/11/03 00:00:00.000 13.735990551 100.533935821 74.3661 6 9 0.0186 0.0233 0.0683 0.0082 0.0231 0.0086 0.00 0.0
12 2019/11/03 00:00:30.000 13.735990393 100.533935863 74.3843 6 9 0.0279 0.0326 0.0928 0.0037 0.0333 -0.0175 0.00 0.0
13 2019/11/03 00:01:00.000 13.735990292 100.533935871 74.3705 6 9 0.0441 0.0517 0.1416 -0.0122 0.0537 -0.0383 0.00 0.0
14 2019/11/03 00:01:30.000 13.735990158 100.533935695 74.3642 6 9 0.0626 0.0730 0.2005 -0.0198 0.0763 -0.0579 0.00 0.0
15 2019/11/03 00:02:00.000 13.735990051 100.533935645 74.4162 6 9 0.0854 0.0951 0.2803 -0.0222 0.0982 -0.0788 0.00 0.0
16 2019/11/03 00:02:30.000 13.735990074 100.533935078 74.4069 6 7 0.1048 0.1166 0.3436 -0.0275 0.1217 -0.0963 0.00 0.0
17 2019/11/03 00:03:00.000 13.735990257 100.533935232 74.3707 6 7 0.0852 0.0952 0.2805 -0.0215 0.1000 -0.0773 0.00 0.0
18 2019/11/03 00:03:30.000 13.735990403 100.533935584 74.3645 6 7 0.0656 0.0737 0.2170 -0.0151 0.0778 -0.0578 0.00 0.0
19 2019/11/03 00:04:00.000 13.735990353 100.533935570 74.4140 6 7 0.0465 0.0525 0.1549 -0.0075 0.0558 -0.0377 0.00 0.0
20 2019/11/03 00:04:30.000 13.735990454 100.533935735 74.3702 6 7 0.0292 0.0333 0.0988 0.0067 0.0356 -0.0155 0.00 0.0
21 2019/11/03 00:05:00.000 13.735990616 100.533935836 74.3634 6 7 0.0202 0.0234 0.0692 0.0080 0.0250 0.0120 0.00 0.0
22 2019/11/03 00:05:30.000 13.735990551 100.533935966 74.4135 6 7 0.0291 0.0335 0.0985 0.0068 0.0360 -0.0153 0.00 0.0
23 2019/11/03 00:06:00.000 13.735990365 100.533935821 74.3966 6 7 0.0460 0.0527 0.1547 -0.0073 0.0575 -0.0364 0.00 0.0
24 2019/11/03 00:06:30.000 13.735990135 100.533935733 74.3906 6 7 0.0642 0.0739 0.2168 -0.0146 0.0817 -0.0539 0.00 0.0

```

รูปที่ 45 ตัวอย่างไฟล์ .pos ที่ประมวลผลเรียบร้อยแล้ว

11) ผลลัพธ์การประมวลผลจะออกมาในรูปแบบไฟล์ .POS

12) นำไฟล์ .pos ซึ่งเป็นค่าพิกัดแบบ latitude, longitude แปลงให้เป็นระบบ พิกัดแบบ UTM (Universal Transverse Mercator) โดยใช้ PYTHON 3.0 ดังรูปที่ 42

```

1  import os, sys
2  import datetime
3  import pyproj
4  from math import pi
5  #def ecef2lla(x, y, z, ellps):
6  # Output : radian unit
7  # 'GRS80'
8  #ecef = pyproj.Proj(proj='geocent', ellps=ellps)
9  #lla = pyproj.Proj(proj='latlong', ellps=ellps)
10 #lon, lat, alt = pyproj.transform(ecef, lla, x, y, z, radians=True)
11 #return (lat, lon, alt)
12 def lla2utm(lat,lon,ell_h,zone):
13 # Input lat, lon in degreee
14 # Check Zone 47 or 48
15 utm = "EPSG:32647" if zone==47 else "EPSG:32648"
16 lla = "EPSG:7912" # WGS84 Geodetic
17 transproj = pyproj.Transformer.from_crs(lla,utm,always_xy=True) # always_xy หมายถึง lon,lat
18 E,N,h = transproj.transform(lon,lat,ell_h,radians=False)
19 return (E,N,h)
20
21 #def ecef2utm(x,y,z,zone, ellps):
22 #ecef = pyproj.Proj(proj='geocent', ellps=ellps)
23 #utm = pyproj.Proj(proj="utm",zone=zone,ellps=ellps)
24 #utm_e, utm_n, alt = pyproj.transform(ecef, utm, x, y, z)
25 #return (utm_e,utm_n, alt)
26 def date2doy(date='%Y-%m-%d %H:%M:%S'):
27 # input y,m,d,hh,mm,ss : integer
28 # output doy decimal : float
29 datetimeformat = '%Y-%m-%d %H:%M:%S'
30
31 dd = datetime.datetime.strptime(date.replace('.000','').replace('/','-'), datetimeformat)
32 doy = dd.strftime('%j')
33 dec = (dd.hour + dd.minute/60.0 + dd.second/3600.0)/24.0
34 doymdec = int(doy) + dec
35 DOY = doymdec
36 return DOY
37
38 def pos2UTM(workdir,outdir):
39 #+++++
40 #olat, olon, o_ell = ecef2lla(ox, oy, oz, ellps) # output lat,lon = radian unit
41 #zone = 47 if olon*180/pi < 102.0 else 48.0
42 #o_e,o_n = lla2utm(olat*180/pi, olon*180/pi,zone,ellps)
43 #+++++
44 for root, dirs, files in os.walk(workdir, topdown=True):
45     for fname in files:
46         if '.pos' in fname or '.log' in fname:
47             posfile = os.path.join(root, fname)
48             print(posfile)
49             with open(posfile) as f:
50                 fw = open(os.path.join(outdir, fname.replace('pos','csv')),'w')
51                 #fw = open(os.path.join(outdir, fname + '.csv'),'w')
52                 fw.write('decdoy,utm_e,utm_n,h_ell,dE,dN,dh\n')
53                 for line in f:
54                     if not '%' in line:
55                         pos = line.split()
56                         decdoy = date2doy(pos[0] + ' ' + pos[1])
57                         lat,lon,ell_h = float(pos[2]), float(pos[3]), float(pos[4])
58                         zone = 47 if lon < 102 else 48
59                         utm_e,utm_n,h = lla2utm(lat,lon,ell_h,zone)
60                         #utm_e,utm_n, h_ell = ecef2utm(x,y,z,zone,ellp)
61                         dE=abs(utm_e-o_e)
62                         dN=abs(utm_n-o_n)
63                         dU=abs(h-h_ell)
64                         #dU,dE,dN = utm_e-o_e, utm_n-o_n, h-h_ell
65                         output = '{:.6f}'.format(decdoy) + ','
66                         output += '{:.3f}'.format(utm_e) + ',' + '{:.3f}'.format(utm_n) + ',' + '{:.3f}'.format(ell_h) + ','
67                         output += '{:.3f}'.format(dE) + ',' + '{:.3f}'.format(dN) + ',' + '{:.3f}'.format(dU)
68                         fw.write(output+'\n')
69                         print(output)
70
71                 fw.close()
72             print('Process success')
73
74 # Reference Coordinate of CUUT Station
75 o_e = 665856.036
76 o_n = 1519055.763
77 h_ell = 74.302
78 ellps = 'GRS80'
79 # input directory
80 workdir = r'C:\Users\BK\Desktop\GNSS_data\Pos_to_UTM'
81 #output directory
82 outdir = r'C:\Users\BK\Desktop\GNSS_data\Pos_to_UTM'
83
84 pos2UTM(workdir, outdir)
85

```

รูปที่ 46 คำสั่งสำหรับแปลงไฟล์ .pos ให้อยู่ในระบบพิกัด UTM

ภาคผนวก ค. ชุดคำสั่งแปลงค่าพิกัดระหว่างพื้นหลักฐานบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF แปลงค่าพิกัด UTM บนพื้นหลักฐาน WGS84 บนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ไปสู่ ITRF2014

เนื่องจากการรับสัญญาณด้วยเครื่องรับ Survey Grade ชนิด CHC-i80 ซึ่งรับค่าปรับแก้จากระบบ RTK Network ที่อ้างอิงกับพื้นหลักฐาน ITRF2005 ทำให้ต้องมีการแปลงให้พื้นหลักฐานเดียวกันกับเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้ MADOCA ที่ได้มีการปรับแก้บนพื้นหลักฐาน ITRF2014 เพื่อให้การเปรียบเทียบค่าพิกัดอยู่บนพื้นหลักฐานชนิดเดียวกัน Kriengkraisasin et al. (2021)

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Mon Jan 11 01:45:08 2021
4 @author: Chaiyut Charoenphon
5 Surveying Engineering, Chulalongkorn University
6 @email : chaiyut.c@chula.ac.th
7 Modified on Wed Mar 24 2021
8 """
9 import os
10 import sys
11 import pyproj
12 import numpy as np
13 from math import radians
14 import pandas as pd
15 #pyproj.datadir.get_data_dir()
16 #pyproj.datadir.set_data_dir(r'C:\Anaconda3\Lib\site-packages\pyproj')
17 import subprocess
18
19 def Indian_To_WGS84_ITRF2014(input_file,output_file):
20     print("Please wait....")
21     try:
22         cwd = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
23         Kriging = os.path.join(cwd,r'residual_grids\2005-2014\grid\Kriging.csv')
24         df_corr = pd.read_csv(Kriging)
25
26         df = pd.read_csv(input_file)
27         with open(output_file,'w') as f:
28             f.write('No, X, Y, Z, Lat, Lon, h, E47, N47, E48, N48\n')
29             i = 0;
30             for index, row in df.iterrows():
31                 i +=1
32                 east, north, h, zone = row['E'], row['N'],row['h'], row['Zone']
33                 Xi,Yi,Zi = utm2xyz_INDIAN(east, north, h, zone) # แปลงพิกัด UTM เป็น ECEF
34                 X05,Y05,Z05 = IndianToWGS84_ITRF2005(Xi, Yi, Zi) # แปลงพื้นหลักฐาน Indian 1975 ไปสู่ WGS84 บนกรอบ ITRF2005 ด้วย 3 พารามิเตอร์ (dx,dY,dZ)
35                 Xt,Yt,Zt = molodensky_trans(X05, Y05, Z05, '05-14') # แปลงพื้นหลักฐาน WGS84 บนกรอบ ITRF2005 ไปสู่ ITRF2014
36                 lat,lon,h = xyz2lla(Xt,Yt,Zt) # แปลงพิกัด ECEF เป็น Geodetic (lat,lon,h)
37
38                 lat_corr, lon_corr= getCorr(df_corr,lat,lon) # กรัดเขตเขตค่าเศษเหลือ
39                 nlat,nlon = lat + lat_corr, lon + lon_corr # ปรับแก้ค่าพิกัดจากกรัดเขตเขตค่าเศษเหลือ
40                 Xn,Yn,Zn = lla2xyz(nlat, lon, h) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น ECEF
41                 E47,N47,h = lla2utm(nlat, nlon, h, 47) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น UTM ZONE 47
42                 E48,N48,h = lla2utm(nlat, nlon, h, 48) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น UTM ZONE 48
43
44                 # เขียนผลลัพธ์ลงในไฟล์ output_file ในรูปแบบ csv (ใช่ , คั่น)
45                 result = str(i)
46                 result += ',' + '{:.4f}'.format(Xn) + ',' + '{:.4f}'.format(Yn) + ',' + '{:.4f}'.format(Zn)
47                 result += ',' + DectoDMS(nlat,'lat') + ',' + DectoDMS(nlon,'lon') + ',' + '{:.3E}'.format(h)
48                 #result += ',' + '{:.10f}'.format(nlat)+ ',' + '{:.10f}'.format(nlon)+ ',' + '{:.3f}'.format(h)
49                 result += ',' + '{:.3f}'.format(E47)+ ',' + '{:.3f}'.format(N47)
50                 result += ',' + '{:.3f}'.format(E48)+ ',' + '{:.3f}'.format(N48)
51                 print(result + '\n')
52                 f.write(result + '\n')
53
54                 path = os.path.dirname(output_file)
55                 subprocess.Popen('explorer ' + path) # เปิดโฟลเดอร์ที่เขียนไฟล์ผลลัพธ์
56                 print("Processing Complete.")
57     except :
58         print("Unexpected error:", sys.exc_info()[0])
59         raise
60     return True
61
62 def WGS84_ITRF2005_To_ITRF2014(input_file,output_file):
63     try:
64         cwd = os.path.abspath(os.getcwd())
65         Kriging = os.path.join(cwd,r'residual_grids\2005-2014\grid\Kriging.csv')
66         df_corr = pd.read_csv(Kriging)
67
68         df = pd.read_csv(input_file)
69         with open(output_file,'w') as f:
70             f.write('No, X, Y, Z, Lat, Lon, h, E47, N47, E48, N48\n')
71             i = 0;
72             for index, row in df.iterrows():
73                 i +=1
74                 east, north, h, zone = row['E'], row['N'],row['h'], row['Zone']
75                 Xi,Yi,Zi = utm2xyz(east, north, h, zone) # แปลงพิกัด UTM เป็น ECEF
76                 Xt,Yt,Zt = molodensky_trans(Xi,Yi,Zi, '05-14') # แปลงพื้นหลักฐาน WGS84 บนกรอบ ITRF2005 ไปสู่ ITRF2014
77                 lat,lon,h = xyz2lla(Xt,Yt,Zt) # แปลงพิกัด ECEF เป็น Geodetic (lat,lon,h)
78
79                 lat_corr, lon_corr= getCorr(df_corr,lat,lon) # กรัดเขตเขตค่าเศษเหลือ
80                 nlat,nlon = lat + lat_corr, lon + lon_corr # ปรับแก้ค่าพิกัดจากกรัดเขตเขตค่าเศษเหลือ
81                 Xn,Yn,Zn = lla2xyz(nlat, lon, h) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น ECEF
82                 E47,N47,h = lla2utm(nlat, nlon, h, 47) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น UTM ZONE 47
83                 E48,N48,h = lla2utm(nlat, nlon, h, 48) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น UTM ZONE 48
84
85                 # เขียนผลลัพธ์ลงในไฟล์ output_file ในรูปแบบ csv (ใช่ , คั่น)
86                 result = str(i)
87                 result += ',' + '{:.4f}'.format(Xn) + ',' + '{:.4f}'.format(Yn) + ',' + '{:.4f}'.format(Zn)
88                 result += ',' + DectoDMS(nlat,'lat') + ',' + DectoDMS(nlon,'lon') + ',' + '{:.3E}'.format(h)
89                 #result += ',' + '{:.10f}'.format(nlat)+ ',' + '{:.10f}'.format(nlon)+ ',' + '{:.3f}'.format(h)
90                 result += ',' + '{:.3f}'.format(E47)+ ',' + '{:.3f}'.format(N47)

```

```

91         result += ',' + '{:.3f}'.format(E48) + ',' + '{:.3f}'.format(N48)
92         f.write(result + '\n')
93
94         path = os.path.dirname(output_file)
95         subprocess.Popen('explorer ' + path) # เปิดไฟล์เดสก์ทอปที่เขียนไฟล์ผลลัพธ์
96         print('Processing Complete.')
97     except :
98         print("Unexpected error:", sys.exc_info()[0])
99         raise
100     return True
101
102 def WGS84_ITRF2008_To_ITRF2014(input_file,output_file):
103     try:
104         df = pd.read_csv(input_file)
105         with open(output_file,'w') as f:
106             f.write('No, X, Y, Z, Lat, Lon, h, E47, N47, E48, N48\n')
107             i = 0;
108             for index, row in df.iterrows():
109                 i +=1
110                 east, north, h, zone = row['E'], row['N'],row['h'], row['Zone']
111                 Xi,Yi,Zi = utm2xyz(east, north, h, zone) # แปลงพิกัด UTM เป็น ECEF
112                 Xn,Yn,Zn = molodensky_trans(Xi,Yi,Zi, '08-14') # แปลงพิกัดฐาน WGS84 บนกรอบ ITRF2008 ไปสู่ ITRF2014
113                 nlat,nlon,h = xyz2lla(Xn,Yn,Zn) # แปลงพิกัด ECEF เป็น Geodetic (lat,lon,h)
114                 E47,N47,h = lla2utm(nlat, nlon, h, 47) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น UTM ZONE 47
115                 E48,N48,h = lla2utm(nlat, nlon, h, 48) # แปลงพิกัด Geodetic (lat,lon,h) ไปเป็น UTM ZONE 48
116
117                 # เขียนผลลัพธ์ไฟล์ output_file ในรูปแบบ csv (ใช้ , คั่น)
118                 result = str(i)
119                 result += ',' + '{:.4f}'.format(Xn) + ',' + '{:.4f}'.format(Yn) + ',' + '{:.4f}'.format(Zn)
120                 result += ',' + DectodMS(nlat,'lat') + ',' + DectodMS(nlon,'lon') + ',' + '{:.3f}'.format(h)
121                 #result += ',' + '{:.10f}'.format(nlat) + ',' + '{:.10f}'.format(nlon) + ',' + '{:.3f}'.format(h)
122                 result += ',' + '{:.3f}'.format(E47) + ',' + '{:.3f}'.format(N47)
123                 result += ',' + '{:.3f}'.format(E48) + ',' + '{:.3f}'.format(N48)
124                 f.write(result + '\n')
125
126                 path = os.path.dirname(output_file)
127                 subprocess.Popen('explorer ' + path) # เปิดไฟล์เดสก์ทอปที่เขียนไฟล์ผลลัพธ์
128                 print('Processing Complete.')
129     except :
130         print("Unexpected error:", sys.exc_info()[0])
131         raise
132     return True
133
134 def molodensky_trans(x,y,z,chk):
135     pars = getParameters(chk);
136
137     xyz_before = np.array([[x],[y],[z]])
138     tx,ty,tz = pars['tx'],pars['ty'],pars['tz']
139     rx,ry,rz = radians(pars['rx']/3600.0),radians(pars['ry']/3600.0),radians(pars['rz']/3600.0)
140     sc = pars['sc']*1e-6
141     x0,y0,z0 = pars['X0'],pars['Y0'],pars['Z0']
142     origin = np.array([[x0],[y0],[z0]])
143     translation = np.array([[tx],[ty],[tz]])
144     rotation = np.array([[1, rz, -ry],
145                          [-rz, 1, rx],
146                          [ry, -rx, 1]])
147     # Molodensky Transform Eq
148     xyz_after = translation + origin + (1+sc)*(np.dot(rotation, xyz_before-origin))
149     # Convert Vector to Separate Variables
150     xtrans = float(xyz_after[0])
151     ytrans = float(xyz_after[1])
152     ztrans = float(xyz_after[2])
153     return xtrans, ytrans, ztrans
154
155 def getParameters(chk):
156     '''
157     Input
158     chk = ?
159     '05-08' เมื่อต้องการแปลงค่าพิกัด ITRF2005 ไปสู่ ITRF 2008
160     '05-14' เมื่อต้องการแปลงค่าพิกัด ITRF2008 ไปสู่ ITRF 2014
161     '08-14' เมื่อต้องการแปลงค่าพิกัด ITRF2008 ไปสู่ ITRF 2014
162     ตัวอย่าง chk = '05-08'
163     '''
164     pars = {}
165     if chk in '05-08': #ITRF2005 to ITRF2008
166         pars = {
167             'tx': -0.2582, # Unit
168             'ty': 0.5405, # meter
169             'tz': 0.0999, # meter
170             'rx': 0.0, # arcsec
171             'ry': 0.0, # arcsec
172             'rz': 0.06529, # arcsec
173             'sc': 0.1069, # ppm
174             'X0': -1198142.3550, # meter
175             'Y0': 6042212.6473, # meter
176             'Z0': 1592438.3497 # meter
177         }
178     elif chk in '05-14': #ITRF2005 to ITRF2014
179         pars = {
180             'tx': -0.4020,
181             'ty': 0.5289,

```

```

180         'ty': 0.5289,
181         'tz': 0.0462,
182         'rx': 0.0,
183         'ry': 0.0,
184         'rz': 0.06113,
185         'sc': 0.1069,
186         'X0': -1198142.3550,
187         'Y0': 6042212.6473,
188         'Z0': 1592438.3497
189     }
190     elif chk in '08-14': #ITRF2008 to ITRF2014
191         pars = {
192             'tx': -0.1438,
193             'ty': -0.0116,
194             'tz': -0.0537,
195             'rx': 0.00127,
196             'ry': 0.00321,
197             'rz': -0.00417,
198             'sc': 0.0,
199             'X0': -1198142.6113,
200             'Y0': 6042213.1878,
201             'Z0': 1592438.4496
202         }
203     return pars
204
205 def getCorr(df, lat, lon):
206     '''
207     Input
208     df : Kriging dataframe
209     lat, lon in degree
210     output
211     ... lat_corr, lon_corr in Degree
212     ...
213     cell_size = 0.019
214     lat_corr, lon_corr = 0.0, 0.0
215     up, down, left, right = lat + cell_size, lat - cell_size, lon - cell_size, lon + cell_size
216     df_filter = df[(df['lat']>down) & (df['lat']<up) & (df['lon']>left) & (df['lon']<right) & (df['lat_corr']!= -9999) & (df['lon_corr']!= -9999)]
217     if df_filter['lat'].size == 4:
218         points = (df_filter[['lon', 'lat', 'lat_corr']]).to_numpy()
219         p = [tuple(points[0]), tuple(points[1]), tuple(points[2]), tuple(points[3])]
220         lat_corr = bilinear_interpolation(lon, lat, p)
221
222         points = (df_filter[['lon', 'lat', 'lon_corr']]).to_numpy()
223         p = [tuple(points[0]), tuple(points[1]), tuple(points[2]), tuple(points[3])]
224         lon_corr = bilinear_interpolation(lon, lat, p)
225     return (lat_corr/3600.0, lon_corr/3600.0)
226
227 def IndianToWGS84_ITRF2005(X, Y, Z):
228     #ระบบค่าพิกัดที่ใช้ในราชการกรมที่ดินเรียกว่า "ค่าพิกัดดลาคม 2552"
229     #Ref: "แนวทางการสำรวจรังวัดแปลงที่ดินโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์.
230     #Link -> https://alro.go.th/ewtdadmin/ewtd/alro_th/download/Knowledge/2562/Knowledge/Knowledge62-05.pdf
231     return (X+204.5, Y+837.9, Z+294.8)
232
233 def WGS84_ITRF2005ToIndian(X, Y, Z):
234     #ระบบค่าพิกัดที่ใช้ในราชการกรมที่ดินเรียกว่า "ค่าพิกัดดลาคม 2552"
235     #Ref: "แนวทางการสำรวจรังวัดแปลงที่ดินโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์.
236     #Link -> https://alro.go.th/ewtdadmin/ewtd/alro_th/download/Knowledge/2562/Knowledge/Knowledge62-05.pdf
237     return (X-204.5, Y-837.9, Z-294.8)
238
239 def xyz2lla(x, y, z):
240     # return degree
241     ecef = {"proj": "geocent", "ellps": "WGS84", "datum": "WGS84"} # Cartisian
242     lla = "EPSG:4326" # WGS84 Geodetic
243     transproj = pyproj.Transformer.from_crs(ecef, lla)
244     lat, lon, ell_h = transproj.transform(x, y, z, radians=False)
245     return lat, lon, ell_h
246
247 def DectoDMS(Decimal, latlon):
248     d = int(Decimal)
249     temp = (Decimal - d) * 60.0
250     m = int(temp)
251     s = (temp - m) * 60.0
252     if latlon == 'lat':
253         return '{:.0f}'.format(d) + ' ' + ('0'+ '{:.0f}'.format(m))[-2:3] + ' ' + '{:.5f}'.format(s) + ' " N'
254     else:
255         return '{:.0f}'.format(d) + ' ' + ('0'+ '{:.0f}'.format(m))[-2:3] + ' ' + '{:.5f}'.format(s) + ' " E'
256
257 def lla2xyz(lat, lon, ell_h):
258     # Input lat, lon in degree
259     ecef = {"proj": "geocent", "ellps": "WGS84", "datum": "WGS84"} # Cartisian
260     lla = "EPSG:4326" # WGS84 Geodetic
261     transproj = pyproj.Transformer.from_crs(lla, ecef, always_xy=True)
262     x, y, z = transproj.transform(lon, lat, ell_h, radians=False)
263     return x, y, z
264
265 def lla2utm(lat, lon, ell_h, zone):
266     # Input lat, lon in degree
267     # Check Zone 47 or 48
268     utm = "EPSG:32647" if zone == 47 else "EPSG:32648"
269     lla = "EPSG:4326" # WGS84 Geodetic
270     transproj = pyproj.Transformer.from_crs(lla, utm, always_xy=True) # always_xy หมายถึงให้เรียง lon, lat

```

```

271     E,N,h = transproj.transform(lon,lat,ell_h,radians=False)
272     return (E,N,h)
273
274 def xyz2utm(x,y,z,zone):
275     ecef = {"proj":'geocent', "ellps":'WGS84', "datum":'WGS84'} # Cartesian
276     utm = "EPSG:32647" if zone==47 else "EPSG:32648"
277     transproj = pyproj.Transformer.from_crs(ecef,utm)
278     E,N,h = transproj.transform(x,y,z)
279     return E,N,h
280
281 def utm2xyz(east,north,h,zone):
282     ecef = {"proj":'geocent', "ellps":'WGS84', "datum":'WGS84'} # Cartesian
283     utm = "EPSG:32647" if zone==47 else "EPSG:32648"
284     transproj = pyproj.Transformer.from_crs(utm,ecef,always_xy=True)
285     x,y,z = transproj.transform(east,north,h)
286     return x,y,z
287
288 def utm2xyz_INDIAN(east,north,h,zone):
289     # Ref : https://georepository.com/datum_6240/Indian-1975.html
290     ecef = {"proj":'geocent', 'a':6377276.345,'f':300.8017} # Cartesian Everest 1830 (1937 Adjustment)
291     utm = "EPSG:24047" if zone==47 else "EPSG:24048"
292     transproj = pyproj.Transformer.from_crs(utm,ecef,always_xy=True)
293     x,y,z = transproj.transform(east,north,h)
294     return x,y,z
295
296 def bilinear_interpolation(x, y, points):
297     '''Interpolate (x,y) from values associated with four points.
298     The four points are a list of four triplets: (x, y, value).
299     The four points can be in any order. They should form a rectangle.
300
301     >>> bilinear_interpolation(12, 5.5,
302     ...                        [(10, 4, 100),
303     ...                        (20, 4, 200),
304     ...                        (10, 6, 150),
305     ...                        (20, 6, 300)])
306     '''
307     # See formula at: http://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear_interpolation
308
309     points = sorted(points) # order points by x, then by y
310     (x1, y1, q11), (_x1, y2, q12), (x2, _y1, q21), (_x2, _y2, q22) = points
311
312     if x1 != _x1 or x2 != _x2 or y1 != _y1 or y2 != _y2:
313         raise ValueError('points do not form a rectangle')
314     if not x1 <= x <= x2 or not y1 <= y <= y2:
315         raise ValueError('(x, y) not within the rectangle')
316
317     return (q11 * (x2 - x) * (y2 - y) +
318           q21 * (x - x1) * (y2 - y) +
319           q12 * (x2 - x) * (y - y1) +
320           q22 * (x - x1) * (y - y1)
321           ) / ((x2 - x1) * (y2 - y1) + 0.0)

```


บรรณานุกรม

- Agency, J. A. E. (2014, 3 August 2020). *MADOCA Real-Time Products News*. Retrieved 4 from https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html
- Choy, S., & Harima, K. (2019). Satellite delivery of high-accuracy GNSS precise point positioning service: an overview for Australia. *Journal of Spatial Science*, 64(2), 197-208. <https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1427155>
- Corporation, G. P. A. S. (2020). *Interface Specification for GPAS-MADOCA Product* https://www.gpas.co.jp/data/GPAS-MADOCA_Interface_Specification_en.pdf
- Fredeluces, E., Lagura, A. R., Reyes, R., & Kubo, N. (2020). Performance Evaluation of Low-Cost and Real-Time Multi-GNSS Advanced Demonstration Tool for Orbit and Clock Analysis-Precise Point Positioning (MADOCA-PPP) Receiver Systems. *Asian Journal of Engineering and Technology*, Vol. 8, 2321-2462. <https://doi.org/10.24203/ajet.v8i3.6357>
- Harima, K., CHOY, S., LI, Y., GRINTER, T., Choudhury, M., Rizos, C., Wakabayashi, Y., & Satoshi, K. (2014). Performance of real-time precise point positioning using MADOCA-LEX augmentation messages. FIG Congress,
- Kriengkraiwasin, S., Charoenphon, C., Butwong, K., Kovitpongkajorn, V., Yomwan, P., Thongtan, T., & Satirapod, C. (2021). Unification of GNSS CORS coordinates in Thailand. *Survey Review*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/00396265.2021.1987002>
- Namie, H., & Kubo, N. (2020). Performance Evaluation of Centimeter-Level Augmentation Positioning L6-CLAS/MADOCA at the Beginning of Official Operation of QZSS. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 20001080.
- Office, C. (2018). *Quasi-Zenith Satellite System "QZSS"* Nov.01,2018. Retrieved 06 October 2021 from https://qzss.go.jp/en/overview/downloads/movie_qzss.html
- Takasu, T. (2013). *RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning Manual*. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf
- Tavasci, L., Vecchi, E., & Gandolfi, S. (2021). Performance of Atlas GNSS Global Correction Service for High-Accuracy Positioning. *Journal of Surveying Engineering*, 147(4), 05021005.

Zhang, S., Du, S., Li, W., & Wang, G. (2019). Evaluation of the GPS precise orbit and clock corrections from MADOCA real-time products. *Sensors*, 19(11), 2580.

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s19112580>

Zhang, Y. (2020). *MADOCA PPP Introduction* [https://home.csis.u-](https://home.csis.u-tokyo.ac.jp/~dinesh/WEBINAR_files/MADOCA_Webinar_Introduction.pdf)

[tokyo.ac.jp/~dinesh/WEBINAR_files/MADOCA_Webinar_Introduction.pdf](https://home.csis.u-tokyo.ac.jp/~dinesh/WEBINAR_files/MADOCA_Webinar_Introduction.pdf)

กรมที่ดิน, ก. ก. (2563). แนวทางการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network). <https://dol-rtknetwork.com/index.php/npage/view/11>

พวงเพ็ชร, ป. (2560). การวิเคราะห์ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งโดยการใช้ค่าแก้จากระบบดาวเทียม GAGAN สำหรับการประมวลผลการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดียวด้วยระบบดาวเทียมนำหน GPS ในพื้นที่ประเทศไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/59624>





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสุภณัฐ ศรีจันทร์
วัน เดือน ปี เกิด	22 มิถุนายน 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลราชวิถี กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2554 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนหนองฉางวิทยา จังหวัดอุทัยธานี พ.ศ.2557 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนหนองฉาง วิทยา จังหวัดอุทัยธานี พ.ศ.2563 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	Regent Home Bangson ถนนกรุงเทพ-นนทบุรี แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร