การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยใช้ค่าแก้ MADOCA ด้วยการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตในประเทศไทย

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

ศุภณัฐ ศรีจันทร์[1,*] ปวัน ภิรมย์ทอง[2] เฉลิมชนม์ สถิระพจน์[3] และ ธีทัต เจริญกาลัญญตา[4]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

** Corresponding author address: 6370436021@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA) จากระบบดาวเทียม Quasi-Zenith (QZSS) เป็นเทคโนโลยีที่ให้บริการข้อมูลสำหรับการปรับแก้การรังวัดดาวเทียม GNSS โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตอบสนองความต้องการที่จะให้บริการการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์ (PPP-Realtime) ซึ่งในประเทศไทยจะสามารถมองเห็นดาวเทียม QZSS ในช่วงมุม 15 – 60 องศา ทำให้สามารถรับสัญญาณค่าแก้จากระบบดาวเทียม QZSS ได้โดยตรง การศึกษานี้มุ่งเน้นเรื่องการวิเคราะห์ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลการรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงด้วยข้อมูล GNSS ร่วมกับข้อมูลค่าแก้จากระบบ MADOCA ที่ได้รับในพื้นที่ประเทศไทยโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูก เพื่อตรวจสอบถึงประสิทธิภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของระบบค่าแก้ MADOCA สำหรับการให้บริการเชิงตำแหน่งแบบ Real-time ของค่าแก้นี้ งานวิจัยจึงเน้นไปที่การประมวลผลในรูปแบบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต โดยผลลัพธ์การทดสอบจุดสถิตได้ค่าความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งในระดับเซนติเมตร ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีสำหรับการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้ MADOCA ในพื้นที่ประเทศไทย

คำสำคัญ: การประมวลผลการรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง, MADOCA, เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูก

Abstract

Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis (MADOCA) from the Quasi-Zenith satellite system (QZSS) is a technology that provides corrective data used in GNSS measurement processing in order to improve a spatial accuracy. The system has an aim to meet the requirements for providing more accurate and precise real-time positioning services (PPP-Realtime). In Thailand, the satellite QZSS can be seen in a range of 15 - 60 degrees. As a result, a GNSS antenna can receive correction signals from the QZSS satellite system directly. This research evaluates the performance of a low-cost GNSS receiver using the MADOCA corrections with the Precise Point Positioning (PPP) mode in Thailand. To demonstrate the efficiency and positional accuracy of the MADOCA correction system for real-time positioning services, this study focuses on a correction of a GNSS processing with the PPP-static mode. The Root Mean Square Errors (RMSE) of horizontal and vertical coordinates from the processing are in centimeters based on the validation in this study. This demonstrates good performance for Low-cost receivers combined with the MADOCA correction in Thailand area.

Keywords: Precise Point Positioning (PPP), MADOCA corrections, Low-cost GNSS receiver

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบดาวเทียมนำหน GNSS ได้ถูกประยุกต์ใช้ในการทำงานหลากหลายด้าน เช่น การสำรวจ การทำแผนที่ การนำทาง และงานด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการระบุข้อมูลเชิงตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามค่าความถูกต้องและความแม่นยำทางตำแหน่งจาก GNSS ยังไม่เพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานบางประเภท

ระบบค่าปรับแก้จาก MADOCA (Multi - GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) จากระบบดาวเทียม Quasi-Zenith (QZSS) ที่ครอบคลุมพื้นที่บริเวณเอเชียให้บริการค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมของระบบ GNSS แบบ เรียลไทม์ซึ่งค่าปรับแก้เหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องในการระบุตำแหน่งได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ได้ระบบที่มีวัตถุประสงค์สอดคล้องกับความต้องการที่จะให้บริการการระบุตำแหน่งจุดแบบเรียลไทม์ (PPP-Realtime) [2] ได้อย่างถูกต้องมากขึ้น โดยผู้ใช้

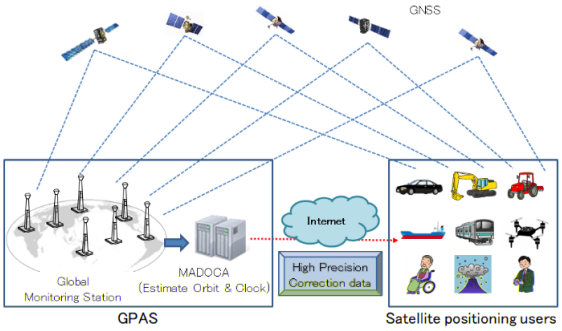
สามารถรับค่าแก้ผ่านสัญญาณดาวเทียม QZSS โดยตรงจาก MADOCA-LEX Broadcast หรือ รับค่าแก้ผ่านทางอินเตอร์เน็ต ทาง NTrip login [3] และนำไปประมวลผลแบบการรังวัดตำแหน่งจุดเดี่ยวโดยใช้ค่าแก้ที่รับได้จากระบบ MADOCA (MADOCA-PPP)

ทั้งนี้ประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะสามารถมองเห็นดาวเทียม QZSS ในช่วงมุม 15 – 60 องศา ทำให้สามารถรับสัญญาณค่าแก้จากระบบดาวเทียม QZSS ได้โดยตรง ประเทศไทยจึงสามารถนำค่าแก้จากระบบ MADOCA มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นได้ อีกทั้งระบบค่าแก้นี้ยังมีการสตรีมข้อมูลของสถานีฐานที่ประเทศไทยอีกด้วย (สถานีรังวัดถาวรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, CUUT) ทำให้เกิดความน่าสนใจในการทดสอบประสิทธิภาพของค่าแก้ MADOCA นี้เพราะหากสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับประเทศไทยได้จะทำให้เกิดการพัฒนาด้านต่างๆ เช่น การนำทาง การเดินเรือ การบินถ่ายภาพ เป็นต้น สำหรับค่าแก้ MADOCA นี้มีความถูกต้องอยู่ที่ระดับเซนติเมตรในประเทศญี่ปุ่น เพราะฉะนั้นการนำไปประยุกต์ใช้จึงเหมาะกับการนำไปใช้กับการรังวัดที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูงมาก ซึ่งหากจะนำไปใช้กับเครื่องรับสัญญาดาวเทียมแบบ Survey grade จะทำให้มีต้นทุนค่อนข้างสูงในการดำเนินงาน ทำให้ในปัจจุบันความต้องการเครื่องรับสัญญาณระบบดาวเทียมนำหนแบบประหยัดมีความต้องการมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถเข้าถึงได้ง่าย ผู้คนทั่วไปสามารถใช้ได้เพราะมีราคาที่ถูก เมื่อนำไปใช้ร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA คาดว่าจะให้ความถูกต้องที่อยู่ในระดับเหมาะสมเพียงพอกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายประเภท

ดังนั้นในโครงการนี้จะเน้นศึกษาไปที่การวิเคราะห์ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลการรังวัดแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูล GNSS ร่วมกับข้อมูลค่าแก้ที่ได้จากระบบ MADOCA ที่ได้รับในพื้นประเทศไทยโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูก เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของระบบค่าแก้ MADOCA สำหรับการให้บริการเชิงตำแหน่งแบบ เรียลไทม์ของค่าแก้นี้ งานวิจัยเน้นไปที่การประมวลผลในรูปแบบการหาตำแหน่งของจุดเดี่ยวแบบความละเอียดสูงแบบสถิต โดยอาศัยข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS) ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CUUT สำหรับการทดสอบจุดแบบสถิต ทั้งนี้สำหรับการประมวลผลนี้ ทำเพื่อทดสอบความถูกต้องและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกร่วมกับค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะวิธีการรับสัญญาณค่าแก้จากดาวเทียมโดยตรงในช่วงคลื่น L6 (MADOCA-LEX) วิธีนี้มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องอาศัยการเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตและไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐาน (Base station) สำหรับความถูกต้องและประสิทธิภาพที่ได้ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัด เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตสำหรับประเทศไทย

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

ระบบค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม ที่ได้รับการพัฒนาโดยองค์การสำรวจอวกาศญี่ปุ่น (Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA) [5] ในปัจจุบันให้บริการสำหรับระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, QZSS ซึ่งระบบดาวเทียม Galileo และ BeiDou กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา [1] และจะเปิดให้บริการในอนาคต โดยค่าแก้จะถูกส่งในรูปแบบ RTCM SSR Format ในแต่ละดาวเทียมมีรายละเอียดดังตารางที่ 1 [4] โดยข้อมูลค่าแก้จากระบบ MADOCA จะสามารถรับได้จาก 3 ช่องทาง คือ ค่าแก้แบบเรียลไทม์ที่รับจากดาวเทียมโดยตรงจากระบบดาวเทียม QZSS ในรูปแบบสัญญาณ L6E, ค่าแก้แบบเรียลไทม์ที่รับผ่านทางอินเตอร์เน็ต ในรูปแบบ N-trip และค่าแก้แบบออฟไลน์ ใช้สำหรับการประมวลผลภายหลังโดยมีความแม่นยำที่ต่ำกว่า 10 เซนติเมตร โดยรูปแบบของค่าแก้จะอยู่ในลักษณะ RTCM SSR และไฟล์ค่าพิกัดแบบ .NMEA ซึ่งค่าปรับแก้ MADOCA นี้จะประกอบไปด้วย Orbit correction Clock correction High Rate-clock correction และ User Range Accuracy (URA) โดยค่าปรับแก้เหล่านี้จะให้ในทุกๆ 1 วินาทีดังตารางที่ 1 สำหรับ 3 กลุ่มดาวเทียม คือ GPS GLONASS และ QZSS



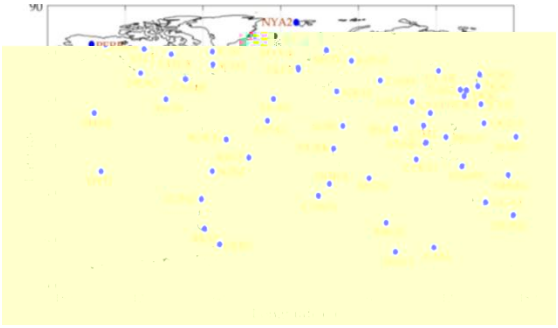
รูปที่ 1 กระบวนการได้มาซึ่งค่าแก้มาโดก้า (MADOCA correction) [1]

ตารางที่ 1 ผลิตภัณฑ์ของระบบ MADOCA ในแต่ละกลุ่มดาวเทียม [4]

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

ตารางที่ 2 ข้อมูลความถูกต้องของการประมาณปรับแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมของระบบ MADOCA [5]

ผลิตภัณฑ์	แบบออฟไลน์			แบบเรียลไทม์		
	GPS	GLO	QZS	GPS	GLO	QZS
วงโคจรดาวเทียม	3 ซม.	7 ซม.	7 ซม.	6 ซม.	9 ซม.	9 ซม.
นาฬิกาดาวเทียม	0.1ns	0.25ns		0.1ns	0.25ns	



รูปที่ 2 ตำแหน่งของสถานีฐาน (IGS) ที่นำมาใช้ทำค่าแก้จากระบบ MADOCA [5]

ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถรับค่าปรับแก้เหล่านี้จากสัญญาณดาวเทียม QZSS โดยตรง หรือผ่านทางอินเตอร์เน็ต ซึ่งจะสตรีมข้อมูลแบบเรียลไทม์จาก 53 สถานี CORS ทั่วโลก จนได้ระบบค่าแก้ที่มีชื่อว่า MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) เพื่อตอบสนองความต้องการที่จะให้บริการการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์ (PPP)

3. ทฤษฎีเกี่ยวข้องและวิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกโดยร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ในพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูกนำไปเปรียบเทียบกับการรับสัญญาณผ่านสถานีรับสัญญาณแบบต่อเนื่อง (CORS) ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในงานสำรวจ โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาไปที่จุดเด่นของค่าแก้จากระบบ MADOCA ซึ่งเป็นค่าแก้นาฬิกาและวงโคจรดาวเทียมแบบเรียลไทม์และใช้รูปแบบการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP-Static)

3.1 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)

เป็นรูปแบบการประมวลผลที่อาศัยเครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวในการหาตำแหน่งโดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับเดซิเมตรถึงเซนติเมตรทั้งในรูปแบบการประมวลผลแบบสถิตและแบบจลน์ โดยจะอาศัยค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียมซึ่งใช้สมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้ [6]

$$L_i^k - \varrho_i^k - c(\Delta_i - \Delta t^k) - \alpha_i^k T_i + I_i^k - \lambda B_i^k - \varepsilon = 0 \quad (1)$$

$$P_i^k - \varrho_i^k - c\left(\Delta_i - \Delta t^k\right) - \alpha_i^k T_i + I_i^k - c(b^k + b_i) - \varepsilon = 0 \quad (2)$$

L_i^k คือค่ารังวัดเฟสคลื่นส่ง (carrier phase) (เมตร) P_i^k คือค่ารังวัดซูโดเรนจ์ (Pseudo range) (เมตร) ρ_i^k คือระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร) B_i^k คือจำนวนของเฟสคลื่นส่ง (carrier phase bias) Δ_i คือค่าความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาเครื่องรับ Δt^k คือค่าความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม T_i คือค่าความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ α_i^k คือ Mapping ฟังก์ชันของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ I_i^k คือค่าความคลาดเคลื่อนจากความเอียงของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ b_iคือรหัสของเครื่องรับ b^k คือรหัสของดาวเทียม λ คือค่าความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (carrier wavelength) c คือความเร็วแสง ε คือความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มหรือค่าเศษเหลือ

3.2 รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (ROOT MEAN SQUARE ERROR: RMSE)

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าทางสถิติเป็นตัวชี้วัดความถูกต้องแม่นยำทางตำแหน่งโดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (ROOT MEAN SQUARE ERROR : RMSE) ซึ่งจะแบ่งเป็นทางราบดังสมการที่ 3

$$RMSE_{hol} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(E_{obs} - E_{true}\right)^2 + \left(N_{obs} - N_{true}\right)^2\right)}{n}} \quad (3)$$

โดยสำหรับ $RMSE_{hol}$ คือค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (เมตร) E_{true},N_{true} คือค่าพิกัดจริงทางราบของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (เมตร) E_{obs},N_{obs} คือค่าค่าพิกัดอ้างอิงทางราบจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงจากเครื่องรับสัญญาณที่รังวัดได้ i คือข้อมูลแต่ละ Epoch ที่ 1 วินาที และ n คือจำนวน Epoch และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (ROOT MEAN SQUARE ERROR : RMSE) ทางดิ่งดังสมการที่ 4

$$RMSE_{Ver} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(H_{obs} - H_{true}\right)^2\right)}{n}} \quad (4)$$

ซึ่ง $RMSE_{Ver}$ คือค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (เมตร) H_{true} คือค่าพิกัดจริงทางดิ่งของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (เมตร) H_{obs}คือค่าค่าพิกัดอ้างอิงทางทางดิ่งจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงจากเครื่องรับสัญญาณที่รังวัดได้ i คือข้อมูลแต่ละ Epoch ที่ 1 วินาที และ n คือจำนวน Epoch

3.3 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Vertical Standard Deviation)

สำหรับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าทางสถิติที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูลทางตำแหน่งโดยในการศึกษาวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ในทางราบ (Horizontal Standard Deviation) ดังสมการที่ 5 และ ทางดิ่ง (Vertical Standard Deviation) ดังสมการที่ 6

$$SD_{hol} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(E_i - \overline{E}\right)^2 + \left(N_i - \overline{N}\right)^2\right)}{n}} \quad (5)$$

โดยสำหรับ SD_{Hor} คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางราบ (เมตร) E_i,N_i คือค่าพิกัดทางราบของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (เมตร) $\overline{E}$,$\overline{N}$ คือค่าเฉลี่ยพิกัดทางราบจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงจากเครื่องรับสัญญาณที่รังวัดได้ i คือข้อมูลแต่ละ Epoch ที่ 1 วินาที และ n คือจำนวน Epoch

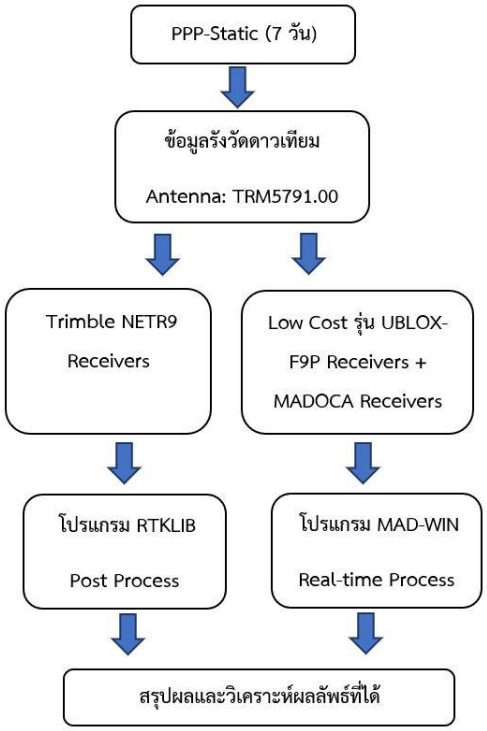
$$SD_{Ver} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(H_i - \overline{H}\right)^2}{n}} \quad (6)$$

โดยสำหรับ SD_{Ver} คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางดิ่ง (เมตร) H_i คือค่าพิกัดทางดิ่งของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (เมตร) $\overline{H}$ คือค่าเฉลี่ยพิกัดทางดิ่งจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงจากเครื่องรับสัญญาณที่รังวัดได้ i คือข้อมูลแต่ละ Epoch ที่ 1 วินาที และ n คือจำนวน Epoch

3.4 วิธีการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบที่สถานีรับสัญญาณดาวเทียม CORS CUUT บนดาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากบริเวณโดยรอบสถานีโล่งไม่มีอาคารบดบัง ทำให้ได้การทดสอบในลักษณะ

เกือบอุดมคติ โดยจะคำนวณค่าพิกัดอ้างอิงของตำแหน่งจุดที่นำมาเปรียบเทียบจากการประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) จากข้อมูลรังวัดทุกๆวินาทีเป็นเวลา 7 วัน และทำการทดสอบการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต (PPP-Static test) โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ตำแหน่งจาก Survey Receiver Trimble NETR9 ของสถานีฐาน CUUT (ประมวลผลแบบ Post-Processing PPP Static) ด้วยโปรแกรม RTKLIB และผลลัพธ์ตำแหน่งจาก Low Cost Receiver UBLOX F9P (L1/L2/E5B) โดยอาศัยค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากระบบ MADOCA ซึ่งประมวลผลแบบ Real-Time PPP Static ด้วยโปรแกรม MAD-WIN โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน โดยรูปภาพที่ 3 แสดงถึงแผนผังขั้นตอนการทำงาน



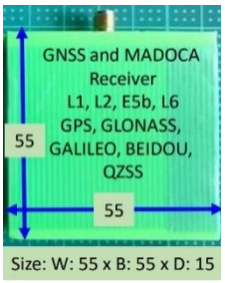
รูปที่ 3 แผนผังขั้นตอนการทำการทดสอบรังวัดสัญญาณดาวเทียม

3.5 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา



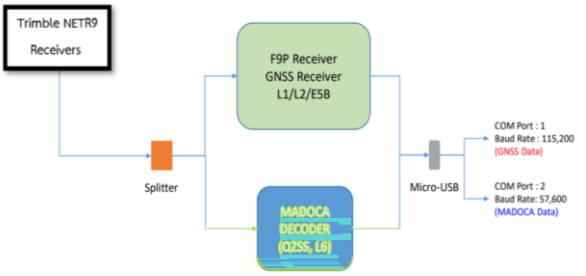
รูปที่ 4 พื้นที่การศึกษากรณีบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open Area) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถานีฐาน CUUT

3.6 เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูก (Low-Cost Receiver)



รูปที่ 5 เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียมราคาถูก U-BLOX F9P

เครื่องมือจะรับสัญญาณโดยใช้สัญญาณ GNSS จากเสาอากาศ ของสถานี CUUT โดยต่อจากตัวแยกสัญญาณแบบเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันกับสัญญาณที่เข้าเครื่องรับ Trimble NETR9 แต่จะผ่านตัวรับสัญญาณราคาถูก ซึ่งจะมี 2 เครื่องรับสัญญาณ คือ U-BLOX F9P เป็น GNSS Receiver (ในรูปแบบไฟล์ .UBX) และ U-BLOX D9 ในรูปแบบไฟล์ .UBX



รูปที่ 6 การรับสัญญาเของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ราคาถูก

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) โดยใช้โปรแกรม IDLE (ซึ่งเป็นชุดคำสั่งของภาษา Python 3.9)

3.7 ขอบเขตข้อมูลที่ศึกษา

เพื่อได้มาซึ่งค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีอ้างอิง งานวิจัยใช้การประมวลผลรังวัดหาตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วัน จากสถานี CORS ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งจะส่งประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) โดยความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้จะอยู่ในระดับเซนติเมตร จากนั้นทำการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตในภายหลังหรือ Precise Point Positioning Static (PPP-Static) ของสถานี CORS CUUT โดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วย

โปรแกรมเชิงวิจัย RTKLIB [7] สำหรับใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลผลลัพธ์จากการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตของสถานี CORS CUUT ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดที่ใช้ค่าปรับแก้จากระบบ MADOCA ซึ่งใช้ข้อมูลระบบดาวเทียมนำหนเป็นระยะเวลา 7 วันเช่นกัน โดยมีการประมวลผลด้วยโปรแกรม MAD-WIN

4. ผลการศึกษา

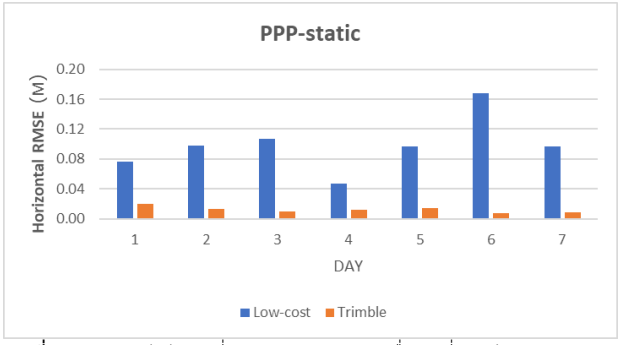
จากการทำประมวลผลค่าพิกัดโดยใช้การประมวลผลรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP) แบบสถิต โดยใช้ข้อมูลรังวัดจากสถานีฐานของจุฬาลงกรณ์ ทุกๆวินาที ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA จะใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย Root Mean Square Error (RMSE) ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความถูกต้องระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงกับค่าพิกัดที่ประมวลผลได้

โดยจากผลลัพธ์พบว่าค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองจาก เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA โดยการประมวลผลแบบเรียลไทม์ผ่านโปรแกรม MAD-WIN และ ค่าคลาดเคลื่อนทางราบจากเครื่องรับ Trimble NetR9 โดยการประมวลผลภายหลังผ่านโปรแกรม RTKLIB ในทางราบคือ 0.099 และ 0.012 เมตรตามลำดับและในทางดิ่งคือ 0.133 และ 0.085 เมตรตามลำดับ

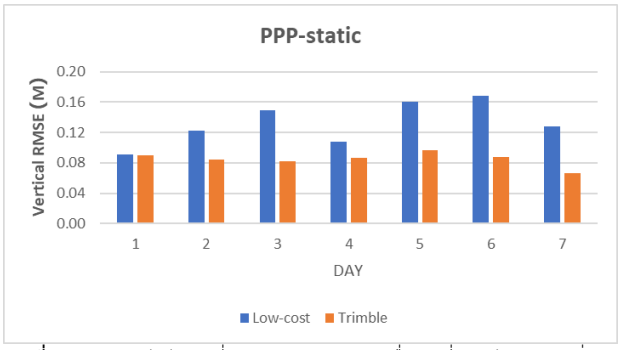
ตารางที่ 3 รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของทางราบและทางดิ่งของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต

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

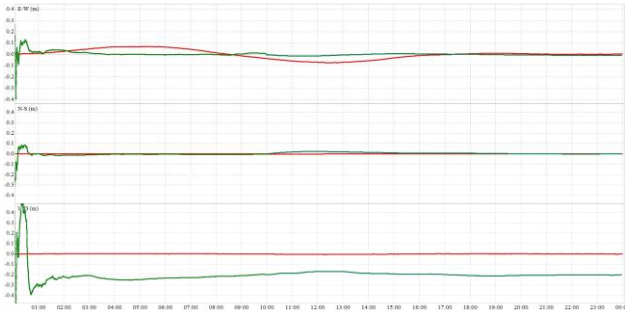
จากข้อมูลในตารางที่ 3 สามารถแสดงในแผนภูมิแท่งรูปที่ 7 สำหรับค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางราบ (Horizontal RMSE) และรูปที่ 8 สำหรับค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางดิ่ง (Vertical RMSE)



รูปที่ 7 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางราบ (Horizontal RMSE)



รูปที่ 8 แผนภูมิแท่งค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทาง ดิ่ง (Vertical RMSE)



รูปที่ 9 ผลลัพธ์การประมวลผลประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตวันที่ 29 สิงหาคม 2564 เส้นสีแดงคือ TrimbleNetR9 และสีเขียวคือเครื่องรับสัญญาณราคาถูก (Low-cost receiver)

เมื่อสังเกตตัวอย่างกราฟของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งกับเวลาดังรูปที่ 9 ของช่วงเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าในทางราบแนวตะวันออก-ตะวันตกและแนวเหนือ-ใต้ เส้นกราฟของเครื่องสัญญาณดาวเทียมราคาถูกกับเครื่องรับสัญญาณ Trimble NetR9 มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกันยกเว้นในทางดิ่งที่เครื่องรับสัญญาณราคาถูกให้ความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าเครื่องรับชนิด Trimble NetR9 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลดังตารางที่ 3

ในตารางที่ 4 แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบและทางดิ่งของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตในเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 ประเภทคือ เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA (Ublox-F9P) และเครื่องรับ Trimble NetR9 คือ 0.132 และ 0.067 เมตรตามลำดับและทางดิ่งคือ 0.091 และ 0.001 เมตรตามลำดับ แสดงให้ทราบถึงการกระจายของค่าทางตำแหน่งที่ประมวลผลได้ในแต่ละ Epoch จากเครื่องสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ

MADOCA อยู่ในระดับเซนติเมตรทั้งทางราบและทางดิ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade พบว่ามีความใกล้เคียงกันในระดับเซนติเมตรสำหรับทางราบ ส่วนทางดิ่งยังมีความแตกต่างกันโดยคาดว่ามาจากค่าคลาดเคลื่อนต่างๆที่ระบบ MADOCA ยังไม่ได้มีบริการให้ค่าปรับแก้

ตารางที่ 4 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทางราบและทางดิ่งของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิต

Day	PPP-static			
	Horizontal SD (m)		Vertical SD(m)	
	Low-cost	Trimble	Low-cost	Trimble
1	0.063	0.157	0.052	0.002
2	0.081	0.028	0.082	0.001
3	0.172	0.035	0.105	0.001
4	0.118	0.159	0.084	0.001
5	0.197	0.025	0.159	0.001
6	0.111	0.030	0.054	0.001
7	0.180	0.032	0.104	0.001
MEAN	0.132	0.067	0.091	0.001

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลรังวัดหาตำแหนจุดเดี่ยวด้วยข้อมูลจากระบบดาวเทียมนำหน ร่วมกับการใช้ข้อมูล ค่าแก้นาฬิกาดาวเทียมและค่าแก้วงโคจรดาวเทียมจากระบบ MADOCA ในพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT COSR Station) ในการศึกษาได้ทำการหาค่าพิกัดอ้างอิงสถานีโดยการซึ่งจะส่งประมวลผลออนไลน์ผ่าน Civil Service Retirement System (CSRS) แล้วมาเปรียบเทียบกับแต่ละกรณีของการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง 2 กรณีคือ

1. ค่าพิกัดอ้างอิง เปรียบเทียบกับ ค่าพิกัดทางตำแหน่งของการประมวลผลจุดเดี่ยวแบบสถิตด้วยเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA

2. ค่าพิกัดอ้างอิง เปรียบเทียบกับ ค่าพิกัดทางตำแหน่งของการประมวลผลจุดเดี่ยวแบบสถิตด้วยเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade ด้วยการประมวลผลภายหลังด้วยโปรแกรม RTKLIB

ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละกรณีโดยการใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) จากผลการประมวลผลค่าพิกัดทั้งสองกรณี พบว่าค่าความถูกต้องทางตำแหน่งโดยสังเกตจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง การประมวลผลด้วยเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งแนวราบ 9.9 เซนติเมตรและความถูกต้องทางตำแหน่งแนวดิ่ง 13.3 เซนติเมตร โดยเฉลี่ย ส่วนการประมวลผลจุดเดี่ยวแบบสถิตด้วยเครื่องรับสัญญาณชนิด Survey Grade ด้วยการประมวลผลภายหลังด้วยโปรแกรม RTKLIB ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งแนวราบ 1.2 เซนติเมตรและความถูกต้องทางตำแหน่งแนวดิ่ง 8.5 เซนติเมตร โดยเฉลี่ย เมื่อสังเกตค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในทางราบ 13.2 เซนติเมตรทางดิ่ง 9.1 เซนติเมตร ซึ่งจากผลลัพธ์สามารถสรุปได้ว่าการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยใช้ค่าแก้ MADOCA ด้วยการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในประเทศไทย สามารถให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่เหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ประเทศไทยได้ เนื่องจากให้ความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงค่าใกล้เคียงกับการทดสอบในลักษณะเดียวกันด้วยเครื่องรับสัญญาณราคาถูกร่วมกันค่าแก้จากระบบ MADACA ในพื้นที่ประเทศออสเตรเลีย [2] ที่มีค่าความถูกต้องทางราบ 6.0 เซนติเมตรและทางดิ่ง 9.6 เซนติเมตร ส่วนในพื้นที่ประเทศญี่ปุ่นให้ความถูกต้องทางราบ 6.0 เซนติเมตร ทางดิ่ง 9.4 เซนติเมตร [3] ซึ่งทั้งสองประเทศนี้ได้มีการนำค่าปรับแก้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆของประเทศเป็นที่สำเร็จผลในหลายๆด้าน อาทิเช่นการใช้งานในหุ่นยนต์ การคมนาคม การทำฟาร์มรูปแบบอัจฉริยะ และการนำทางบนรถยนต์เป็นต้น โดยจากผลลัพธ์การทดสอบข้างต้นจากหลายๆประเทศที่มีการนำค่าปรับแก้นี้ไปประยุกต์ใช้งานได้จริงแล้ว ในงานวิจัยนี้ที่ทำการทดสอบการประมวลผลในลักษณะเดียวกันกับบริเวณพื้นที่ประเทศไทย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ให้ค่าความถูกต้องที่ดีใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยอาศัยค่าแก้จาก MADOCA มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะสามารถนำมาใช้ ประโยชน์ในด้านต่างๆในพื้นที่ประเทศไทยเช่นกัน

6. ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการศึกษาพบว่าการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ราคาถูกโดยใช้ค่าแก้ MADOCA ด้วยการรังวัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในประเทศไทยมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำไปประยุกต์พัฒนาใช้งานต่อในประเทศไทยสำหรับการประมวลผลค่าเชิงตำแหน่งแบบ Real time เช่น การใช้ในด้านการนำทางรถยนต์, การรับสัญญาณเพื่อหาค่าพิกัดพื้นที่ห่างไกลและไม่มีอินเตอร์เน็ตเข้าถึง เป็นต้น

2. กรณีการรับสัญญาณควรทำการทดสอบให้มีความหลากหลายเชิงพื้นที่มากขึ้นเช่น ทำการทดสอบในหลายๆจังหวัดมากขึ้น เพื่อสังเกตความครอบคลุมของพื้นที่รับสัญญาณ

3. ควรเพิ่มสถานีที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบ Fixed point test ให้มีการเปรียบเทียบในทุกพื้นที่ว่ามีความครอบคลุมมากน้อยเพียงใด

4. จากผลการศึกษาพบว่าเครื่องรับสัญญาณราคถูกร่วมกับค่าแก้จากระบบ MADOCA มีประสิทธิภาพในประเทศไทยดังนั้นควรมีการศึกษาต่อเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆให้มากขึ้นและกระตุ้นการใช้ค่าปรับแก้นี้ให้กว้างขวางมากขึ้นในประเทศไทย

5. ช่วงเปรียบเทียบผลการศึกษาควรตรวจเช็คกรอบอ้างอิงของค่าพิกัดที่ประมวลผลได้ ทั้งสองเครื่องรับสัญญาณคือเครื่องรับสัญญาณราคาถูก

ร่วมกับค่าแก้ MADOCA และเครื่องรับสัญญาชนิด Survey Grade ให้เป็นพื้นหลักฐานเดียวกัน

6. เนื่องจากค่าแก้ MADOCA สามารถรับค่าปรับแก้ได้หลายช่องทาง อาทิเช่น การรับสัญญาณโดยตรงจากดาวเทียม QZSS ในคลื่น L6E ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัดว่าจะต้องเห็นดาวเทียมตลอดเวลาที่รับสัญญาณ ทำให้อาจจะมีการทำการทดสอบในรูปแบบการรับค่าแก้แบบ การรับค่าปรับแก้จากอินเทอร์เน็ต ซึ่งการรับค่าแก้วิธีนี้ จะค่อนข้างเสถียรกว่าเพราะไม่จำเป็นต้องเห็นดาวเทียมที่รับค่าปรับแก้ ขอเพียงแต่มีการเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตตลอดเวลา จึงน่าสนใจในการนำไปศึกษาต่อ

7. ประเทศไทยควรนำค่าปรับแก้นี้มาใช้ในรถยนต์เพื่อพัฒนาระบบขนส่งให้มีความแม่นยำที่สูงขึ้นและเหมาะกับการประยุกต์ใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

7.ปัญหาที่พบ

1. เนื่องจากข้อจำกัดในการรับสัญญาณ ของสถานี CUUT ซึ่งพบว่าบางวันข้อมูลมีการขาดหายไปบางช่วงอันเนื่องจากการหยุดรับสัญญาณของสถานี ทำให้ต้องตัดข้อมูลในบางวันและบางช่วง

2. เนื่องด้วยการรับสัญญาณวิธีนี้ใช้รูปแบบการรับสัญญาณผ่านคลื่น L6E ของดาวเทียมโดยตรง ดังนั้นเวลาตั้งรับสัญญาณควรทำในบริเวณโล่งและโปร่ง เพื่อให้รับสัญญาณได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

3. เนื่องจากการบันทึกข้อมูลค่ารังวัดเป็นการบันทึกค่าในทุก ๆ วินาที ทำให้ค่ารังวัดใน 1 วันมีข้อมูลจำนวนนมาก ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ข้อมูล อันเนื่องปัญหาด้วยความเร็วของคอมพิวเตอร์ที่ไม่เพียงพอ

8. ข้อจำกัดของงานวิจัย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการรับค่าปรับแก้จากระบบ MADOCA แบบรับโดยตรงจากดาวเทียมให้ต้องมีการใช้เครื่อง Receiver สำหรับ decoder สัญญาณที่จำเพาะ และจำเป็นต้องเป็นพื้นที่เปิดโล่งที่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้ ในส่วนของการรับสัญญาณค่าปรับแก้จะทำการรับได้อีกวิธีหนึ่งคือการรับผ่านอินเทอร์เน็ตที่จะต้องมีการเข้ารหัส username และ Password แต่ต้องมีการเสียค่าบริการในกรณีนี้แต่ข้อดีคือสามารถรับสัญญาณในบริเวณใดก็ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Zhang, S., et al. (2019). "Evaluation of the GPS precise orbit and clock corrections from MADOCA real-time products." Sensors 19(11): 2580. **(In case of Journal Article)**

[2] Fredeluces, E., et al. (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. **(In case of Journal Article)**

[3] Namie, H. and N. Kubo (2020). "Performance Evaluation of Centimetres-Level Augmentation Positioning L6-CLAS/MADOCA at the Beginning of Official Operation of QZSS." IEEJ Journal of Industry Applications: 20001080. **(In case of Journal Article)**

[4] Corporation, G. P. A. S. (2020). Interface Specification for GPAS-MADOCA Product. Aug 2020: 4. **(In case of Online Database)**

[5] Agency, J. A. E. (2014, 3 August 2020). "MADOCA Real-Time Products News." Retrieved 4, 2021, from https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html. **(In case of Web Page online)**

[6] Choy, S., and K. Harima (2019). "Satellite delivery of high-accuracy GNSS precise point positioning service: an overview for Australia." Journal of Spatial Science 64(2): 197-208. **(In case of Journal Article)**

[7] Takasu, T. (2013). RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning Manual. **(In case of Manual Book)**