

การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสโดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

ร้อยตรีธินพัทธ์ จงรักชอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Determination of precipitable water vapor from GNSS signal using local mean
temperature

Sub Lieutenant Thanaphat Jongrukchob



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

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียมจี
	เอ็นเอสเอสโดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น
โดย	ร้อยตรีธนพัทธ์ จงรักชอบ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตริสิริสัตยวงศ์)

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

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(พันโท ดร.สรวิศ สุภเวทย์)

ธนพัทธ์ จงรักชอบ : การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น (Determination of precipitable water vapor from GNSS signal using local mean temperature) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 69 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ Precipitable Water Vapor (PWV) ที่คำนวณจากข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Stations, CORS) โดยในประการแรก ได้ทำการเปรียบเทียบการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS ที่สถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดนครราชสีมา (NKRM) กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้จากเครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ Microwave Radiometer (MWR) ณ สถานีเรดาร์ฝนหลวง อำเภอนิคมาย จังหวัดนครราชสีมา อีกทั้งได้มีการใช้ค่าจากอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น มาใช้เพิ่มความถูกต้องให้กับผลการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในพื้นที่ประเทศไทย (พื้นที่ทดสอบ) ประการที่สอง ได้มีการใช้ข้อมูลรับวัดจากระบบดาวเทียม GNSS ที่สถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) มาทำการประเมินค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS ที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ คือ GPS, GLONASS, BEIDOU, GPS ร่วมกับ GLONASS และ แบบร่วมกันทั้ง 3 ระบบ (GPS, GLONASS, BEIDOU) โดยใช้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS เป็นตัวเปรียบเทียบ นอกจากนี้ อีกทั้งยังได้ทำการเปรียบเทียบ ผลการคำนวณการประมาณค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay, ZTD) ซึ่งได้จากสมการ Mapping Function ที่แตกต่างกันใน 2 รูปแบบ คือ Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF) จากผลการศึกษา พบว่าการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสามารถใช้ทดแทนเครื่อง Microwave Radiometer ในการพยากรณ์อุตุนิยมวิทยา นอกจากนี้สามารถใช้ระบบดาวเทียม GLONASS ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบดาวเทียม GPS แต่สำหรับ ระบบดาวเทียม BEIDOU ในเรื่องของวงโคจรยังไม่มี ความถูกต้องและยังไม่มีเสถียร อาจทำให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้ยังไม่มี ความถูกต้องเท่าที่ควร อีกทั้งการใช้สมการ Mapping Function ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสำหรับประเทศไทย

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5870161021 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS:

THANAPHAT JONGRUKCHOB: Determination of precipitable water vapor from GNSS signal using local mean temperature. ADVISOR: PROF. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D., 69 pp.

This thesis demonstrates a comparison of Precipitable Water Vapor (PWV) derived from GNSS Continuously Operating Reference Stations (CORS) in five different cases: GPS-only, GLONASS-only, BEIDOU-only, GPS combine with GLONASS and GPS combine with GLONASS BEIDOU. Firstly, the PWV derived from GPS CORS station of Department of Public Works and Town & Country Planning (NKRM) and Microwave Radiometer (MWR) of Bureau of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation (BRRAA) are compared. In addition, a previously derived local mean temperature (T_m) is used to improve the estimation of the GNSS-derived PWV in a vicinity of Thai region. Secondly, the GNSS observations from CORS station located at Chulalongkorn University (CUUT) is used to evaluate the GNSS-derived PWV in five different cases as previously mentioned. The PWV from GPS-only is used as a referenced PWV to compare with GLONASS-only, BEIDOU-only, GPS combine with GLONASS and GPS combine with GLONASS BEIDOU PWVs. Moreover, this thesis demonstrates a comparison of Zenith Total Delays (ZTD) which are calculated from two different mapping functions, namely Global Mapping Function (GMF) and Niell Mapping Function (NMF). According to the result, Deriving PWV from GPS with local Temperature Mean model is equivalent to Microwave Radiometer which is used in meteorology application. In addition, GLONASS system is nearly equal GPS system in Derivation of PWV but BEIDOU is less accurate than GPS and GLONASS due to its orbit's performance. Additionally, The different of Mapping function is not effect in PWV deriving in Thailand region.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวคิด ความรู้ รวมถึงคำปรึกษาต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ ในการทำวิจัย จนสามารถทำงานวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ ซึ่งถือเป็นประโยชน์และความรู้ที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอบพระคุณ พ.อ.ชัยวัฒน์ พรหมทอง นายทหารฝ่ายเทคนิค กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนและผลักดันให้ผู้วิจัยได้มาศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจนี้ รวมถึงได้ให้แนวทางในการปฏิบัติตน ทั้งในด้านการศึกษาและการทำงาน ซึ่งถือเป็นสิ่งที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.พ.อ.ดร.กนก วีรวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ พ.ท.ดร.สรวิศ สุภเวษย์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ พร้อมทั้งแนวความคิด รวมไปถึงคำติชมต่าง ๆ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ที่ให้ความรู้ในการศึกษา ปลูกฝังการทำงานทางด้านการสำรวจและงานวิจัย รวมไปถึงขอบคุณมิตรภาพดี ๆ จาก พี่ ๆ น้อง ๆ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกคนที่ คอยช่วยเหลือและคำปรึกษามาโดยตลอด

ขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งร่างกาย และกำลังใจซึ่งทำให้ผู้วิจัยมีสามารถทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1	10
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	10
1.2 วัตถุประสงค์.....	11
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	11
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา	11
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	12
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2	14
2.1 ระบบนำหนด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS).....	14
2.2 การประมวลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP)	16
2.3 ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay) และ การหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียม GNSS.....	18
2.4 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	22
2.4.1 ข้อมูล GPS.....	22
2.4.2 ข้อมูล GNSS	23
2.4.3 ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่อง Microwave Radiometer.....	23
2.4.4 ข้อมูลความกดอากาศพื้นผิว	27
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28

2.5.1 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS เปรียบเทียบกับ Microwave Radiometer	28
2.5.2 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ PANDA (Position And Navigation Data Analyst) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS	30
2.5.3 แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น (Local Mean Temperature).....	32
2.5.4 ผลกระทบจาก Mapping Function ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ.....	34
บทที่ 3	36
3.1 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS.....	38
3.1.1 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล	39
3.1.2 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น	40
ในการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น	40
3.1.3 การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยใช้สมการ Mapping Function	40
3.2 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GNSS.....	41
3.3 การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของสองประชากร (F – test Statistic)	42
3.3.1 การแจกแจงเอฟ (F - distribution).....	42
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน ความแปรปรวนของตัวอย่างที่สุ่มมาจากค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก 2 วิธีการ.....	42
บทที่ 4	43
4.1 การประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS เปรียบเทียบกับ Microwave Radiometer	43
4.2 ผลการประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS ปี 2016.....	48
4.2.1 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GLONASS.....	49

4.2.2 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ BEIDOU	50
4.2.3 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GPS+GLONASS ..	51
4.2.4 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GPS+GLONASS+BEIDOU	52
บทที่ 5	54
5.1 อภิปรายผล.....	54
5.2 สรุปผล.....	56
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก. รายละเอียดการประมวลผลและการจัดค่าความคลาดเคลื่อน	63
ภาคผนวก ข. ตารางคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือ	66
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ไอน้ำในบรรยากาศ ถือเป็นปัจจัยสำคัญในปรากฏการณ์ภาวะเรือนกระจก และทำให้ทราบถึงสภาพภูมิอากาศของโลก ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ Precipitable Water Vapor (PWV) คือ ปริมาณของไอน้ำในแนวตั้ง และสามารถนำมาแสดงในหน่วย Kg / m^2 หรือเป็นความสูงเทียบเท่ากับ น้ำในสถานะของเหลวในหน่วยมิลลิเมตร ซึ่งการกระจายตัวของไอน้ำในบรรยากาศ ถือเป็นสิ่งสำคัญในเรื่องอุทกวิทยา ดังนั้น PWV จึงได้ถูกใช้ในการเป็นตัวแปรในการศึกษาภูมิอากาศในระดับสากล ระดับภูมิภาค และระดับท้องถิ่น (Liang et al., 2015)

ตั้งแต่มีการพยากรณ์อุตุนิยมหาวิทยาลัย จากระบบดาวเทียม GPS โดย (Bevis et al., 1992) ซึ่งถือเป็นแนวทางสำหรับการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS ได้มีการสำรวจกันอย่างกว้างขวางและแพร่หลายมาตลอด 2 ทศวรรษ ซึ่งปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในบรรยากาศสามารถอนุมานได้ว่า มีค่าคลาดเคลื่อนในการแพร่กระจายของสัญญาณ GPS ที่ผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere delay) สำหรับงานที่ยืดหยุ่นได้ถือว่าค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ และจะถูกขจัดออกในกระบวนการของการประมาณค่าพิกัดของสถานีรังวัด ซึ่งการประมาณค่าของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในส่วน Wet part จากการวัดด้วย Very long baseline interferometry (VLBI) และการรังวัด GPS มีความใกล้เคียงกับการประมาณค่าจากเครื่องวิทยุห้วงอากาศ Radiosondes (RS) และ เครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ Microwave Radiometer (MWR) (Lu et al., 2015) อย่างไรก็ตาม ด้วยการใช้ Microwave Radiometer และ Radiosondes ต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมาก และได้ข้อมูลเพียงในบางพื้นที่ จึงทำให้มีการใช้ข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง Continuously Operating Reference Stations (CORS) ซึ่งยังมีการประเมินค่าความถูกต้องที่ไม่มากนักในปัจจุบัน

ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย Mean Tropospheric Temperature (T_m) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ และอุณหภูมิพื้นผิว Air Surface Temperature (T_s) ซึ่งจะวัดอุณหภูมิในบริเวณใกล้เคียงกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยจะถูกนำมาใช้สำหรับการคำนวณค่า PWV โดยจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล Global T_m ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม จะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น Local T_m ซึ่งจะทำให้ได้ค่า PWV ที่มีความถูกต้องมากกว่า ปกติค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นจะได้อาจมาจาก เครื่อง Radiosondes ซึ่งข้อมูลที่ได้อาจจะใช้งบประมาณจำนวนมาก และไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง แต่สำหรับในประเทศไทยได้ใช้ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จากดาวเทียม Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) และ Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) ในการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น Local T_m

การวิจัยครั้งนี้มุ่งหวังที่จะศึกษาวิเคราะห์ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ข้อมูลต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดคือที่สถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS แบบต่อเนื่อง ที่สถานี NKRM จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณที่สามารถรับสัญญาณ GPS ได้เพียงระบบเดียว ในการนำมาเปรียบเทียบกับเครื่อง Microwave Radiometer ซึ่งเป็นเครื่องวัดทางอุตุนิยมวิทยา หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากแต่ละระบบดาวเทียมที่สถานี CUUT ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณได้ทุกระบบในปัจจุบัน โดยใช้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GPS เพียงระบบเดียวเป็นตัวเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากแต่ละระบบดาวเทียม เนื่องจากปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการจัดตั้งสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง จากหลายหน่วยงานทำให้มีสถานีเพิ่มมากขึ้น นอกจากประโยชน์ในด้านการหาค่าพิกัดตำแหน่ง การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือ ในการศึกษาและวิจัยทางด้านอุตุนิยมวิทยา และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS แบบต่อเนื่อง Continuously Operating Reference Stations (CORS) โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่อง Microwave Radiometer

1.2.2 เปรียบเทียบและประเมินค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง Continuously Operating Reference Stations (CORS)

1.2.3 เปรียบเทียบการใช้ Mapping Function ที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ประเทศไทย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

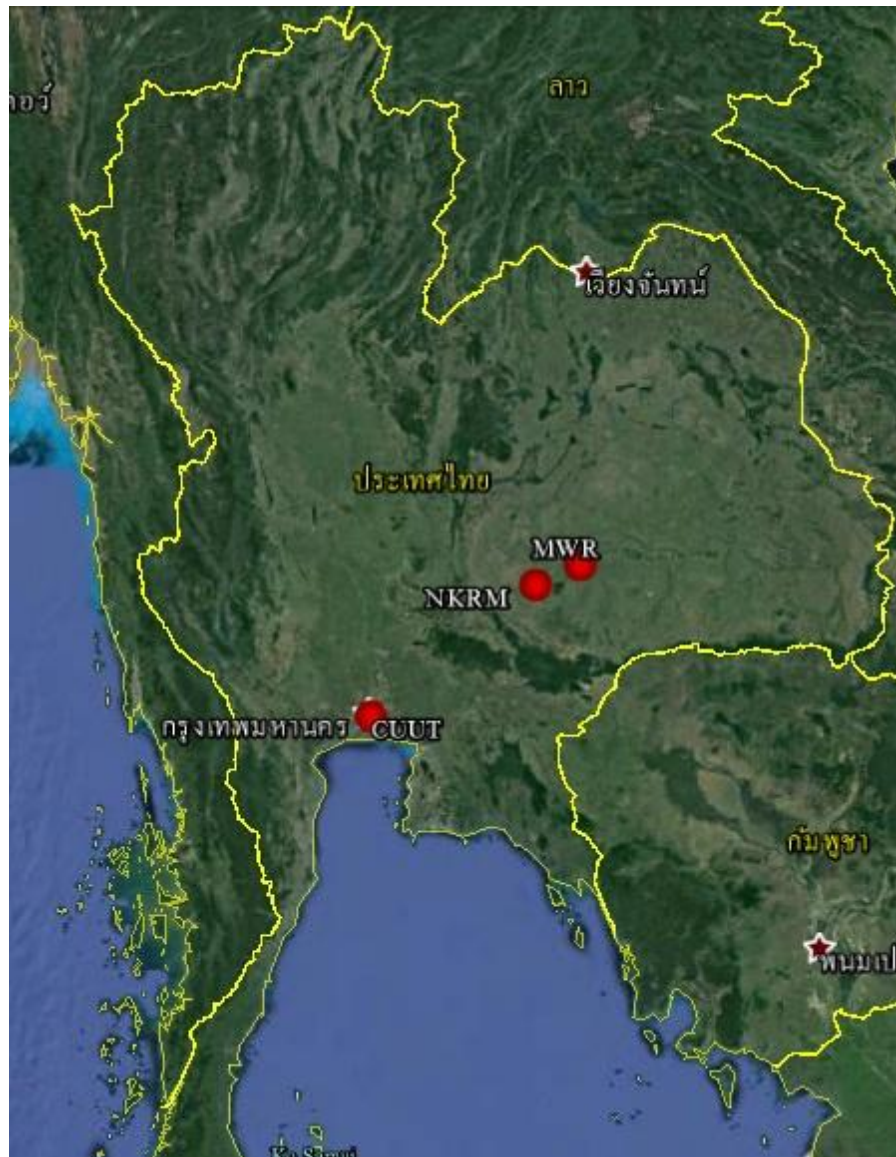
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

1.3.1.1 ศึกษาข้อมูลการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GPS ที่ได้จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง ณ จ.นครราชสีมา (NKRM) โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูล Microwave Radiometer อ.พิมาย จ.นครราชสีมา และทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณการประมาณค่าคลาดเคลื่อนในแนวตั้ง Zenith Total Delay (ZTD) ซึ่งได้จากสมการ Mapping Function ที่แตกต่างกันใน 2 รูปแบบ คือ Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF)

1.3.1.2 ศึกษาข้อมูลการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) ด้วยกัน 5 ชุด โดยชุดแรก จะใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS อย่างเดียว ชุดที่ 2 จะใช้ข้อมูล GLONASS อย่างเดียว ชุดที่ 3 จะใช้ข้อมูล BEIDOU อย่างเดียว ชุดที่ 4 จะใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ชุดที่ 5 จะใช้ข้อมูล GPS ร่วมกับ GLONASS ร่วมกับ BEIDOU โดยจะนำข้อมูล ชุดที่ 2 3 4 และ 5 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลชุดที่ 1

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาวิจัยใช้ข้อมูลในพื้นที่ ที่ตั้งจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ซึ่งตั้งอยู่บนตาดฟ้าตึก 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) (ละติจูด 13.7359 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.5339 องศาตะวันออก) และจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง (NKRM) ณ จ.นครราชสีมา (ละติจูด 14.9920 องศาเหนือ ลองจิจูด 102.1294 องศาตะวันออก) และ สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย หมู่ 11 เขตนิคมสร้างตนเอง เทศบาลรั้งกาใหญ่ อ.พิมาย จ.นครราชสีมา ซึ่งเป็นสถานที่ตั้ง Microwave Radiometer (ละติจูด 15.184 องศาเหนือ ลองจิจูด 102.564 องศาตะวันออก)



รูปที่ 1.1 แสดงพื้นที่ ที่ใช้ข้อมูลในการทำการศึกษ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง ทดแทนการใช้เครื่อง Microwave Radiometer ที่

1.4.2 สามารถใช้ประโยชน์จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบอัตโนมัติ โดยในแต่ละหน่วยงานที่มีการจัดตั้งสถานีเพื่อใช้ในการพยากรณ์ในด้านอุตุนิยมวิทยา นอกจากประโยชน์จากการหาค่าพิกัดตำแหน่ง

1.4.3 เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็น เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนและบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบนำหนด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS)

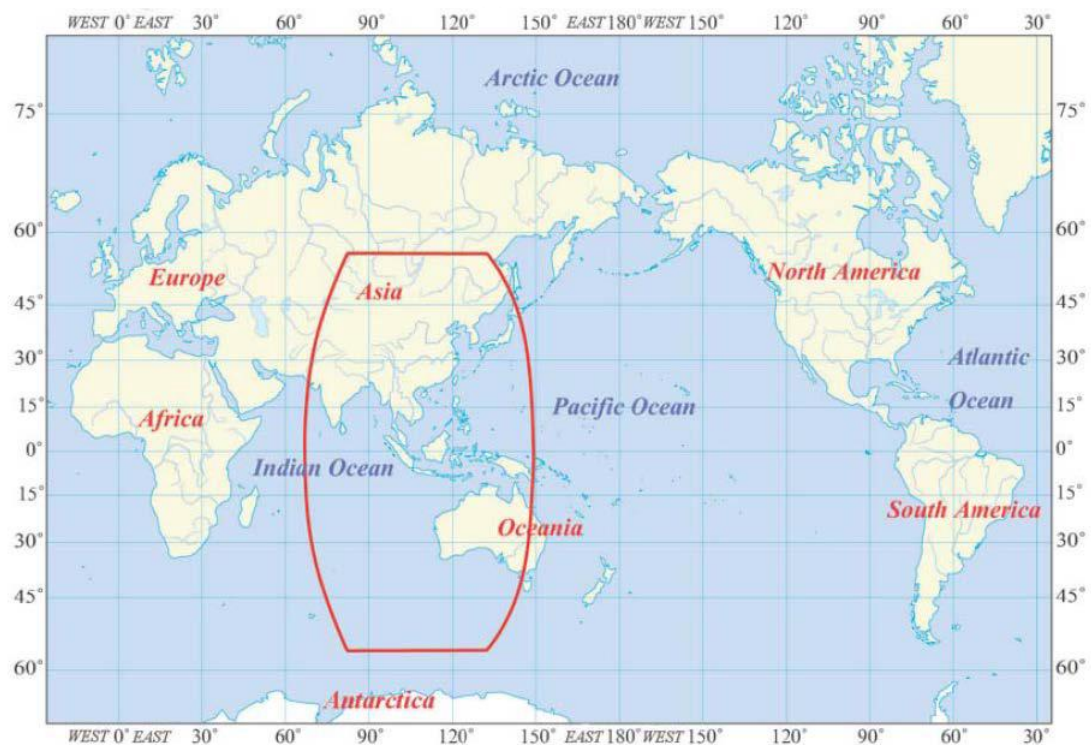
ดาวเทียม GPS นั้น จะมีแนวระนาบวงโคจรอยู่ 6 แนวรอบโลก ในแต่ละแนวจะมีดาวเทียม 4 ดวงโคจรห่างเท่า ๆ กัน เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเห็นดาวเทียมพร้อมกัน 4 ดวง ได้ทุกที่ทั่วโลก ดาวเทียม GPS จะโคจรที่วงโคจรระดับปานกลาง Medium Earth Orbit (MEO) ซึ่งมีความสูงที่ 20,200 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ทำมุม 55 องศา กับระนาบเส้นศูนย์สูตร คาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาที 2 วินาที ณ ปัจจุบัน สามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบ

สำหรับดาวเทียม GLONASS ประกอบไปด้วย ดาวเทียม 24 ดวง ในวงโคจรระดับปานกลาง โดยมี 3 ระนาบวงโคจร และในแต่ละวงโคจรจะมีดาวเทียมโคจรห่างเท่า ๆ กัน 8 ดวง โดยระนาบวงโคจรจะทำมุม Inclination ประมาณ 64.8 องศา ที่ความสูง 19,100 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก และมีคาบการโคจร 11 ชั่วโมง 15 นาที 44 วินาที ปัจจุบันสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบเช่นกัน

		GPS	GLONASS
Constellation	number of satellites	32	24
	number of orbit planes	6	3
	orbit inclination	55°	64.8°
	orbit altitude	20,200 km	19,100 km
	orbit period	11h 58 min	11h 15 min

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่าง GPS และ GLONASS

ระบบดาวเทียม BEIDOU ถูกพัฒนาโดย สาธารณรัฐประชาชนจีน ประกอบด้วยดาวเทียมทั้งหมด 35 ดวง ในกรณีที่ใช้กันอย่างเต็มระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย ดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้าจำนวน 5 ดวง Geostationary Orbit (GEO) ซึ่งจะโคจรสูงจากพื้นโลกประมาณ 35,786 กิโลเมตร โดยจะอยู่ที่ตำแหน่ง 58.75 องศาตะวันออก 80 องศาตะวันออก 110.5 องศาตะวันออก 140 องศาตะวันออก และ 160 องศาตะวันออก ตามลำดับ และวงโคจรอื่น ๆ 30 ดวง โดยประกอบไปด้วย ดาวเทียมวงโคจรแบบ Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) จำนวน 3 ดวง และดาวเทียมวงโคจรระดับปานกลาง Medium Earth Orbit (MEO) จำนวน 27 ดวง โดยโคจร 3 ระนาบวงโคจรทำมุม Inclination ประมาณ 55 องศา โคจรที่ความสูง 21,528 กิโลเมตร และมีคาบการโคจรประมาณ 12 ชั่วโมง 53 นาที และจะสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบประมาณปี 2020 เพื่อให้ครอบคลุมประเทศจีนและพื้นที่โดยรอบทั้งหมด และในอนาคตจะมีการเพิ่มจำนวนดาวเทียมเรื่อย ๆ จนสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบ



รูปที่ 2.1 พื้นที่ให้บริการของระบบดาวเทียม BEIDOU (China Satellite Navigation Office, 2013a)

2.2 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP)

ในการรังวัดสัญญาณดาวเทียม เพื่อต้องการทราบค่าพิกัดของตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณ และเพื่อให้ค่าพิกัดที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด จะต้องมีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ออกไป ซึ่งหนึ่งในค่าคลาดเคลื่อนเหล่านั้น คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ และเพื่อให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนที่มีความถูกต้องสูงนั้น จะต้องทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยการใช้ข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี Ionosphere free (L3) ลดค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมโดยใช้ข้อมูลวงโคจรความละเอียดสูง (Final Orbit) ลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) โดยใช้เสาอากาศที่มีคุณสมบัติป้องกันคลื่นหลายวิถี ผลลัพธ์ที่ได้ คือค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่มีความถูกต้องสูง ในการนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไป

งานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ PANDA (Position And Navigation Data Analyst) ในการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศ Zenith Total Delay (ZTD) เนื่องจากซอฟต์แวร์ PANDA เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง และที่สำคัญคือ สามารถประมวลผลข้อมูลได้ทั้ง 3 ระบบดาวเทียม โดยข้อมูลจะต้องแปลงให้เป็นรูปแบบ RINEX (Receiver-Independent Exchange Format) ก่อนที่จะทำการประมวลผล นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบละเอียดสูงชนิด Final ของหน่วยงาน German Research Centre for Geosciences (GFZ)

ซึ่งจะมีวิธีการประมาณค่าและพารามิเตอร์ในการประมาณค่าที่ต่างกันดังต่อไปนี้

- ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ 3 มิติ Earth Center Earth Fixed Coordinates (ECEF) ประกอบด้วยค่าพิกัดในแกน X, Y, Z 3 ค่า โดยใช้จำนวนข้อมูลรังวัดทั้งหมดมาทำการประมาณพิกัด ทั้ง 3 ค่า
- ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ (Receiver clock error) จะทำการประมาณค่าทุกช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล (Observation interval)
- ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) หลังจากทำการปรับแก้ขั้นต้นก็จะทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (SUBIRANA, 2013) โดยใช้ Mapping function เป็น Global mapping function (GMF) เพื่อทำการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแต่ละมุมสูงของดาวเทียมให้อยู่ในแนวตั้ง แล้วนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไปดังนั้น สมการการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงสามารถเขียนได้ ดังนี้ (Kouba & Héroux, 2001)

$$P_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + \epsilon\rho)_{L3} \quad (2.1)$$

$$\phi_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + N\lambda + \epsilon\phi)_{L3} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.1 และ 2.2

P = สมการค่ารังวัดซูดเรนจ์ (Pseudo range) (เมตร)

φ = สมการค่ารังวัดเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) (เมตร)

ρ = ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร)

c = ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

dt = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

dT = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

M = Mapping ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม (องศา)

ZTD = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ Zenith Total Delay (มิลลิเมตร)

N = เลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

λ = ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

ερ และ **εφ** = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก คลื่นหลายวิถี (Multipath) และ สัญญาณรบกวนของข้อมูล (Observation noise) (เมตร)

2.3 ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay) และการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียม GNSS

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกบริเวณพื้นผิวโลกตั้งแต่ 8 กิโลเมตรบริเวณขั้วโลก 17 กิโลเมตรบริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งเนื่องจากองค์ประกอบของชั้นบรรยากาศส่งผลให้สัญญาณ GNSS ที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนี้เกิดการหักเห ทำให้ระยะทางที่เดินทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับนั้นยาวเกินความเป็นจริง โดยค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศนี้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.3

$$Tr = \int (n - 1) dl = 10^{-6} \int N dl \quad (2.3)$$

โดยที่ n คือ ดัชนีหักเหของอากาศ และ $N = 10^6(n-1)$ ซึ่งเรียกว่า Refractivity ซึ่งค่านี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ Dry part และ Wet part ($N = N_{dry} + N_{wet}$) โดยที่ Tr คือ ระยะทางที่คลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้ง Zenith Total Delay (ZTD) โดยมีแบบจำลองที่สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้ ได้แก่ แบบจำลองของ Hopfield (1969) แบบจำลองของ Saastamonien (1972) เป็นต้น สำหรับพื้นที่ประเทศไทยแบบจำลองของ Saastamonien มีความเหมาะสมมากที่สุด (Satirapod, 2005) ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจึงเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการประมวลผล ซึ่งค่านี้จะประกอบไปด้วยสองส่วนที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อสัญญาณ GNSS ดังนี้

Dry part เกิดจากก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ (ตัวอย่าง N_2 78% O_2 21% Ar 0.9% เป็นต้น) โดยจะแปรผันตามอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ สำหรับ Dry part จะสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.4 (Bevis et al., 1992)

$$ZHD = \frac{2.2768 \times Ps}{1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00000028H} \quad (2.4)$$

Ps = ค่าความกดอากาศพื้นผิว ในหน่วย มิลลิบาร์

ϕ = ละติจูดที่สถานีรังวัดดาวเทียม ในหน่วย เรเดียน

H = ความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง MSL ในหน่วย เมตร

จะได้ค่า Zenith Hydrostatic Delay , ZHD ในหน่วย มิลลิเมตร

สำหรับ Wet part เกิดจากปริมาณไอน้ำที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ความแปรปรวนในส่วนนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศขณะทำการรับสัญญาณ แม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนนี้จะมีขนาดเล็ก แต่ทว่ามีความแปรปรวนสูงทำให้ยากต่อการสร้างแบบจำลอง ซึ่งในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงนั้นจำเป็นต้องมีการประมาณค่าพร้อมกับการหาพิคัดด้วย และสามารถเรียกส่วนนี้ได้ว่า Zenith Wet Delay (ZWD) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์กับงานอุตุนิยมวิทยา (Meteorology) โดยทำการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้ไปเป็นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) (Bevis et al., 1992)

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2.5)$$

จะได้ค่า Zenith Wet Delay, ZWD ในหน่วย มิลลิเมตร

ทั้งนี้ทั้งนั้นแบบจำลองข้างต้นเป็นการเป็นการประมาณค่าคลาดเคลื่อนในแนวตั้งเท่านั้น ในความเป็นจริงขณะรับสัญญาณนั้นดาวเทียมไม่ได้อยู่ในแนวตั้ง จึงต้องมีการใช้ Mapping Function เพื่อให้สามารถทำการหาคลาดเคลื่อนในแนวตั้งได้ โดย Mapping Function ที่มีในปัจจุบันและแพร่หลายได้แก่ Global Mapping Function (GMF) (Johannes Boehm, Werl, & Schuh, 2006) และ Niell Mapping Function (NMF) (Niell, 1996) เป็นต้น ซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไปพร้อมกับค่า ZHD และ ค่า ZWD เพื่อหาค่า ZTD ได้ดังสมการที่ 2.6 (Johannes Boehm & Schuh, 2007) (Niell, 1996)

$$ZTD \times E = ZHD \times M_{dry}(E) + ZWD \times M_{wet}(E) \quad (2.6)$$

โดยที่ E คือ ค่ามุมสูงของดาวเทียม (Elevation angle) (องศา)

สำหรับ Mapping Function ของ (Niell, 1996) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ Dry part และ Wet part สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ โดยที่ E คือมุมสูงของดาวเทียม และ H คือความสูงเหนือระดับทะเลในหน่วย กิโลเมตร (km)

$$M_{dry}(E,H) = m(E, a_d, b_d, c_d) + \left[\frac{1}{\sin E} - m(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right] H \quad (2.7)$$

$$M_{wet}(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin E + \frac{a}{\sin E + \frac{b}{\sin E + c}}} \quad (2.8)$$

ในส่วน Dry part โดย a_d, b_d, c_d คือ พารามิเตอร์ที่ประกอบไปด้วย เวลา (t) และ ละติจูด (φ) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\xi(\varphi, t) = \xi_{avg}(\varphi) - \xi_{amp}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (2.9)$$

โดย ที่ t คือเวลาจากเดือนมกราคมในหน่วย วัน และ T_0 กำหนดให้เป็น Day of Year ที่ 28 และสำหรับ $\xi_{avg}(\varphi)$ และ $\xi_{amp}(\varphi)$ หาได้จากการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (linear interpolated) จากตารางที่ 2.2 รวมทั้ง a_{ht}, b_{ht}, c_{ht} ก็สามารหหาได้จากตารางที่ 2.2 เช่นเดียวกัน

Coefficient ξ	Latitude (φ)				
	15°	30°	45°	60°	75°
Average					
a	1.2769934e-3	1.2683230e-3	1.2465397e-3	1.2196049e-3	1.2045996e-3
b	2.9153695e-3	2.9152299e-3	2.9288445e-3	2.9022565e-3	2.9024912e-3
c	62.610505e-3	62.837393e-3	63.721774e-3	63.824265e-3	64.258455e-3
Amplitude					
a	0.0	1.2709626e-5	2.6523662e-5	3.4000452e-5	4.1202191e-5
b	0.0	2.1414979e-5	3.0160779e-5	7.2562722e-5	11.723375e-5
c	0.0	9.0128400e-5	4.3497037e-5	84.795348e-5	170.37206e-5
Height correction					
a_{ht}	2.53e-5				
b_{ht}	5.49e-3				
c_{ht}	1.14e-3				

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ Dry part ของ Niell Mapping Function สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนของ Wet part a,b,c สามารถหาได้จากการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (linear interpolated) จากตารางที่ 2.3

Coefficient	Latitude (φ)				
	15°	30°	45°	60°	75°
ξ					
a	5.8021897e-4	5.6794847e-4	5.8118019e-4	5.9727542e-4	6.1641693e-4
b	1.4275268e-3	1.5138625e-3	1.4572752e-3	1.5007428e-3	1.7599082e-3
c	4.3472961e-2	4.6729510e-2	4.3908931e-2	4.4626982e-2	5.4736038e-2

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ Wet part ของ Niell mapping function

สำหรับ Global Mapping Function (GMF) Dry part และ Wet part ซึ่งค่าพารามิเตอร์ b กับ c นั้นจะใช้ค่าแก้ตามตารางแบบเดียวกันกับ Niell Mapping Function (NMF) แต่สำหรับพารามิเตอร์ a จะคำนวณจากอนุกรมฮาร์โมนิกเชิงพื้นผิว (Spherical Harmonic) ได้ตามสมการ 2.10 ดังนี้

$$a = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \varphi) [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] + A \cos\left(\frac{\text{doy} - 28}{365} \cdot 2\pi\right) \quad (2.10)$$

แล้วจะนำค่าพารามิเตอร์ a ที่ได้ไปคำนวณกับ Niell Mapping Function ต่อไป

โดยในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสามารถหาค่าได้จากค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า PWV และค่า ZWD ดังสมการ (Bevis et al., 1992)

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w \times R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2 \right)} \quad (2.11)$$

โดยที่ ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว (999.97 กก/ลบ.ม.)

R_v = ค่าคงที่ของไอน้ำ (461.525 จูล/กก.*เคลวิน)

k_2 = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (22.1 เคลวิน/มิลลิบาร์)

k_3 = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (3,739 เคลวิน²/มิลลิบาร์)

แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น สำหรับประเทศไทย จะมีสมการดังนี้ (Rata et al., 2016)

$$T_m = 0.6066 \times T_s + 113.2914 \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะได้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ในหน่วย เคลวิน

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 จะได้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ในหน่วย มิลลิเมตร (Bevis et al., 1992)

2.4 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

2.4.1 ข้อมูล GPS

ข้อมูล GPS ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน ของปี 2014 และปี 2015 ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ LEICA รุ่น GRX1200 PRO ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้เพียง GPS ระบบเดียว โดยใช้เสาอากาศ LEIAT504 แบบ Choke - Ring Antenna รับสัญญาณตลอด 24 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลทุก 5 วินาที และมุมก้นขอบฟ้า 10 องศา จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (NKRM) ณ จ.นครราชสีมา ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพตัวอย่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง

<http://www.dpt.go.th/>

2.4.2 ข้อมูล GNSS

ข้อมูล GNSS ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน ของปี 2015 ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ GNSS Trimble รุ่น NetR9 ดังรูปที่ 2.3 ข. ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณได้ทุกระบบที่มีในปัจจุบัน โดยใช้เสาอากาศ Trimble Zephyr Geodetic 2 Model 57971 ดังรูปที่ 2.3 ก. ซึ่งเป็นเสาอากาศระดับยี่ห้อเดติกส์สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้หลายระบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน รับสัญญาณตลอด 24 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลทุก 30 วินาที จากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ซึ่งตั้งอยู่บนดาดฟ้าตึก 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)



รูปที่ 2.3 ก.

รูปที่ 2.3 ข.

รูปที่ 2.3 สถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CUUT)

2.4.3 ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่อง Microwave Radiometer

ข้อมูลค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก Microwave Radiometer (MWR) อ.พิมาย จ.นครราชสีมา ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน ของปี 2014 และปี 2015 โดยที่เครื่อง Microwave Radiometer ที่ใช้เก็บข้อมูลเป็นเครื่องรุ่น WVR-1100 ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในประเทศไทยได้มีการติดตั้งเครื่องมือนี้เพียงแห่งเดียว ที่สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย อ.พิมาย จ.นครราชสีมา ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง ณ จ.นครราชสีมา ประมาณ 50 กิโลเมตร โดยข้อมูลที่นำมาใช้จะเป็นข้อมูลที่เก็บในช่วงเวลาเดียวกันกับข้อมูลจีพีเอส ความถี่ในการเก็บข้อมูล ทุกๆ 45 วินาที และจะเริ่มเก็บข้อมูลโดยทำมุมกับแนวราบ ตั้งแต่ 30 องศา 45, 60, 90, 120, 135 และ 150 ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อเปรียบเทียบ คือค่าที่ทำมุมกับแนวราบ 90 องศา ดังรูปที่ 2.6 เนื่องจาก ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้จากค่าการรังวัดจาก GPS เป็นค่าที่ได้ทางแนวตั้ง โดยข้อมูลจะแสดงวันและเวลาในการวัดค่าซึ่งค่าที่นำมาใช้เปรียบเทียบคือค่าที่ตรงกับแนว VapCM ซึ่งมีหน่วยเป็นเซนติเมตร และค่า ELact เท่ากับ 90 องศา รายละเอียดของเครื่อง Microwave Radiometer รุ่น WVR-1100 แสดงไว้ในภาคผนวก ง. ซึ่งโดยทั่วไปการวัดค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS มีความถูกต้องเท่ากับ 1-2 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จาก Radiosonde และ MWR (Coster, 1997)



รูปที่ 2.4 เครื่อง Microwave Radiometer รุ่น WWR – 1100



รูปที่ 2.5 สถานที่ตั้ง ณ สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย

mwr_water_phimai2015.txt
 2016-01-19
 Measured by CEReS, Chiba University
 Location: Phimai(15.184N,102.565E)
 Year: 2015

Month

Day

Hour

Liquid water(g/cm2)

Precipitable water(g/cm2)

Elevation angle(degrees)

Time is in UTC+7 hrs.

Note that data quality has not fully been understood yet.

It is recommended to contact Hitoshi Irie (hitoshi.irie@chiba-u.jp)

before use for publication. Please report a progress as often as possible.

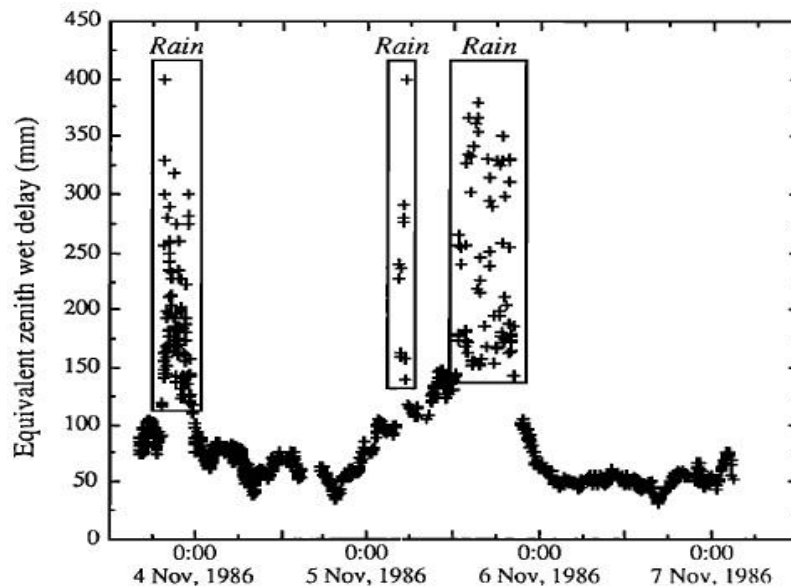
Month	Day	Hour	LiqCM(g/cm2)	VapCM(g/cm2)	ELact(degrees)
1	1	3.338889e+00	5.280000e-02	6.950000e+00	1.602000e+02
1	1	3.351667e+00	3.770000e-02	4.677000e+00	1.498000e+02
1	1	3.365000e+00	2.660000e-02	3.422000e+00	1.350000e+02
1	1	3.377778e+00	1.700000e-02	<u>2.609000e+00</u>	<u>9.000000e+01</u>
1	1	3.391389e+00	5.140000e-02	<u>6.658000e+00</u>	1.980000e+01
1	1	3.404444e+00	3.420000e-02	4.629000e+00	3.010000e+01
1	1	3.418333e+00	2.580000e-02	3.384000e+00	4.500000e+01

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างข้อมูลค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยการวัดด้วย Microwave Radiometer

รุ่น WVR-1100 (เส้นสีแดง คือ ค่าที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูล GPS)

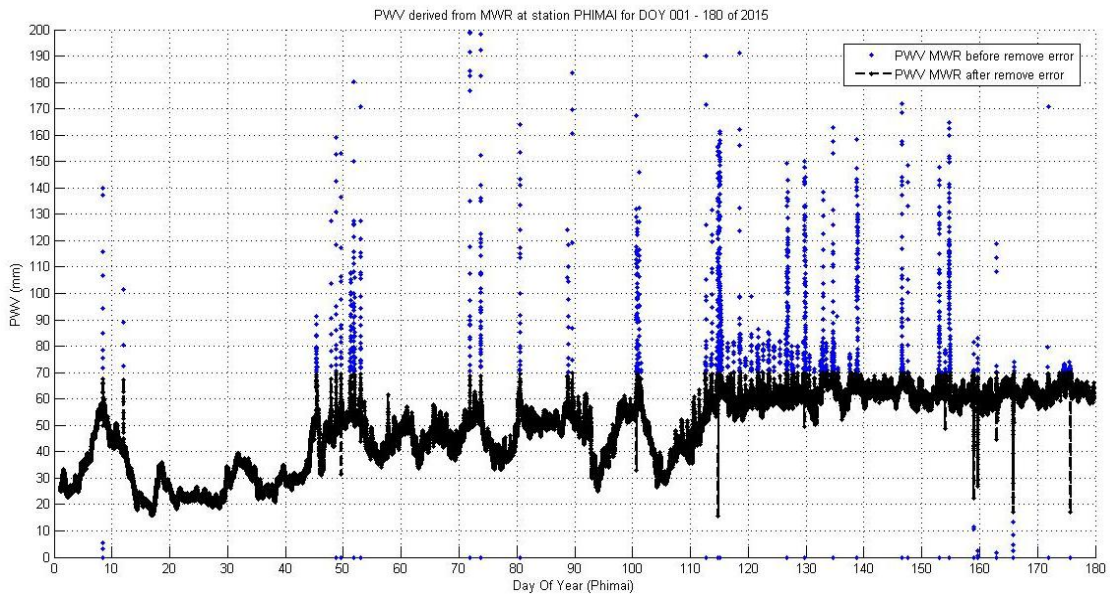
อย่างไรก็ดีค่า PWV ที่ได้จากเครื่อง Microwave Radiometer ยังมีค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่รวมอยู่ ทำให้ต้องทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ทิ้งออกไป ดังรูปที่ 2.7 สาเหตุของการเกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้มาจากการรับสัญญาณในช่วงที่มีฝนตกและเม็ดฝนมาเกาะอยู่บริเวณที่รับข้อมูล จึงทำให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด

Elgered (1992) พบว่า เกิดจากอัลกอริทึมที่มีความคลาดเคลื่อนของ MWR เนื่องจากสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณ รูปที่ 3.6 แสดงผลการเกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งมาจากการรับสัญญาณในช่วงที่มีฝนตกและเม็ดฝนมาเกาะอยู่บริเวณที่รับข้อมูล ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนประมาณ 4 - 6% ของ Zenith Wet Delay จะมีค่า 100 - 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.7 ค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ของข้อมูลจาก MWR ได้ถูกขจัดออก (Elgered, 1992)

ในงานวิจัยนี้ ได้แสดงการเปรียบเทียบค่า PWV ที่ได้จาก MWR ระหว่างค่าที่ไม่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อน (จุดสีน้ำเงินเข้ม) และค่าที่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้ว (จุดสีดำ) แกนราบแสดงข้อมูลตามเวลาในหน่วยของวันในปี 2015 และแกนตั้งแสดงค่า PWV หน่วยมิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ค่า PWV ที่ได้จาก MWR ระหว่างค่าที่ไม่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อน (จุดสีน้ำเงิน) และค่าที่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้ว (จุดสีดำ)

2.4.4 ข้อมูลความกดอากาศพื้นผิว

นอกจากข้อมูล GPS และ MWR แล้ว ยังได้ใช้ข้อมูลความกดอากาศพื้นผิวจากกรมอุตุนิยมวิทยาจากสถานีที่ตั้งอยู่ในจังหวัดนครราชสีมา ห่างจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง ที่ทำการเก็บข้อมูล GPS ประมาณ 4 กิโลเมตร มาช่วยในการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GPS ข้อมูลที่ได้จะมีหน่วยเป็น Hectopascal (hPa) โดยที่ 1 hPa จะเท่ากับ 1 มิลลิบาร์ รายละเอียดของข้อมูลความกดอากาศพื้นผิวในแต่ละเดือน ดูได้จากรูปที่ 2.9

Avg Pressure (hPa)[62. NAKHON RATCHASIMA / 2015]

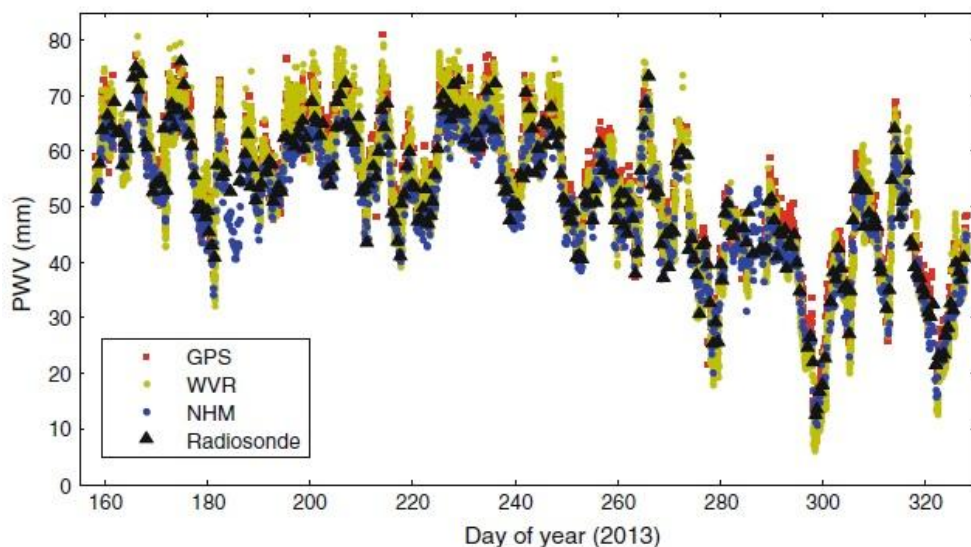
Date	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct
01D	994.4	993.4	988.5	985.9	985.3	983.5	984.6	987.2	985.2	989.0
02D	994.1	994.5	987.7	983.7	985.7	985.0	983.6	986.4	985.9	988.1
03D	991.8	994.2	985.7	982.4	986.1	986.2	982.1	985.6	987.9	988.0
04D	988.8	993.1	986.7	982.9	985.9	985.4	981.4	984.0	988.8	988.4
05D	987.4	993.0	987.4	984.3	984.4	984.4	981.0	982.1	988.7	988.8
06D	987.2	993.4	987.3	984.7	984.4	983.7	981.0	981.5	987.5	988.7
07D	989.3	992.3	987.6	985.8	984.9	984.8	980.7	982.2	986.2	988.7
08D	992.4	993.2	989.1	988.0	984.0	985.4	981.9	981.6	984.7	988.0
09D	991.7	993.9	989.7	988.0	984.7	984.6	982.0	980.8	985.5	987.4
10D	991.6	991.8	989.5	987.8	985.0	984.1	981.1	982.7	987.2	988.0
11D	992.8	989.7	990.4	990.5	985.3	984.6	980.4	984.7	986.5	991.2
12D	993.9	988.7	989.3	992.1	986.2	985.4	980.2	985.7	986.8	992.3
13D	994.1	988.1	989.9	991.3	986.7	984.6	980.0	985.6	987.2	992.0
14D	995.0	987.9	990.5	989.8	988.0	984.1	980.5	985.8	985.2	990.9
15D	994.1	988.8	989.5	989.3	987.4	984.4	981.4	987.1	982.4	990.6
16D	993.7	988.5	988.5	987.8	985.5	984.1	982.3	986.8	980.9	989.3
17D	994.2	988.6	986.4	985.3	985.4	983.0	983.5	986.5	983.4	989.1
18D	994.1	989.5	985.8	985.4	-	983.1	983.5	985.4	990.4	989.4
19D	993.9	990.5	986.2	985.5	-	983.4	983.5	984.3	989.1	987.9
20D	994.2	989.5	986.8	984.7	-	983.2	984.5	984.3	986.5	986.6
21D	994.6	989.0	989.3	984.2	-	982.9	987.2	983.7	985.2	987.2
22D	993.4	989.7	988.8	988.1	984.6	982.0	988.0	983.2	985.7	987.9
23D	990.2	989.1	988.1	990.0	984.7	982.3	988.4	983.6	985.6	988.4
24D	990.7	987.4	990.9	989.1	984.3	983.0	987.3	983.4	984.6	989.7
25D	991.1	986.3	991.7	989.1	984.2	983.5	986.1	983.3	983.7	990.5
26D	990.1	986.5	992.7	988.6	985.2	984.7	987.7	985.7	984.1	990.2
27D	988.6	987.2	991.6	987.6	984.7	987.0	988.2	986.5	984.9	990.0
28D	988.3	987.9	988.1	987.3	983.5	988.3	988.4	985.1	985.4	990.4
29D	989.3		988.4	986.7	984.4	987.2	988.0	984.9	986.3	990.9
30D	991.0		988.2	986.7	984.7	986.0	987.8	985.4	988.3	990.5
31D	992.9		987.4		983.7		987.5	985.8		991.3
Avg	991.9	990.2	988.6	987.1	985.2	984.5	984.0	984.5	986.0	989.3

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างข้อมูลความกดอากาศพื้นผิวจากกรมอุตุนิยมวิทยาที่สถานีนครราชสีมา

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS เปรียบเทียบกับ Microwave Radiometer

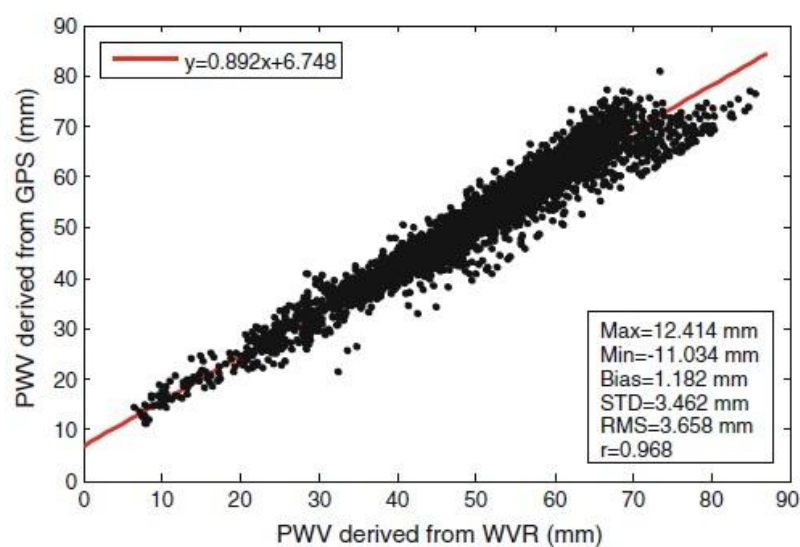
เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้พื้นที่ศึกษา อ.พิมาย และ อ.เมือง จ.นครราชสีมา โดยจะใช้ข้อมูล GPS จากกรมโยธาธิการและผังเมือง ทำการประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศทางอุตุนิยมวิทยา คือ Microwave radiometer ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาในต่างประเทศได้มีการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ ยกตัวอย่างเช่น (Biyen Chen & Liu, 2014) ได้ทำการศึกษาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ฮ่องกง จากแบบจำลองพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (NHM), Water Vapor Radiometer (WVR), Radiosonde และ GPS จากการประมวลผลด้วยการซอฟต์แวร์ BERNESE 5.0 โดยทำการศึกษาในช่วงเวลา 6 เดือน (มิถุนายน ถึง พฤศจิกายน 2013) ในรายละเอียดการประมวลผล ได้ใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลจาก Bevis Equation เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากหลายเทคนิค ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับการพยากรณ์อากาศระยะสั้นในฮ่องกง



รูปที่ 2.10 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GPS, WVR, NHM, และ Radiosonde ช่วงเวลา ระหว่างวันที่ 7 มิถุนายน 2013 ถึง 24 พฤศจิกายน 2013

Comparison	Mean error (mm)	STD (mm)	RMSE (mm)	Correlation coefficient r
GPS-WVR	1.182	3.462	3.658	0.968

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS กับ WVR ช่วงเวลาระหว่างวันที่ 7 มิถุนายน 2013 ถึง 24 พฤศจิกายน 2013



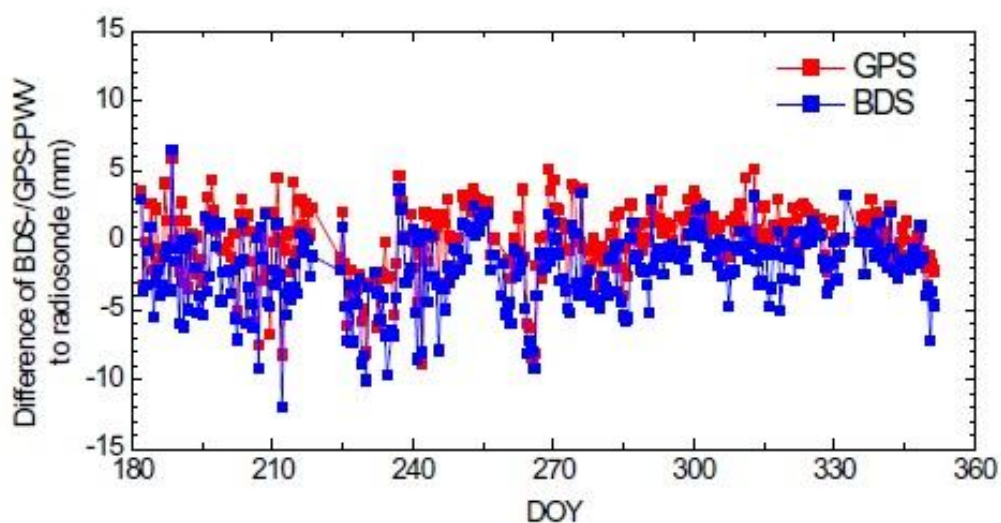
รูปที่ 2.11 กราฟ Cross Correlation เปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่าง GPS กับ WVR

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า GPS มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ Water Vapor Radiometer (WVR) ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ แต่ GPS สามารถให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ดี และมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า ทำให้มีบทบาทสำคัญในการพยากรณ์อากาศในระยะสั้น และการวิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระยะยาวในฮ่องกง

2.5.2 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ PANDA (Position And Navigation Data Analyst) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS

การวิจัยในครั้งนี้ได้มีการประเมินประสิทธิภาพของการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS ในแต่ละระบบดาวเทียมที่ต่างกันจึงได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ Position And Navigation Data Analyst (PANDA) ในการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ Zenith Total Delay (ZTD) เนื่องจากซอฟต์แวร์ PANDA เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง และที่สำคัญคือ สามารถประมวลผลข้อมูลได้ทั้ง 3 ระบบดาวเทียม โดยข้อมูลจะต้องแปลงให้เป็นรูปแบบ Receiver-Independent Exchange Format (RINEX) ก่อนที่จะทำการประมวลผล นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit จากหน่วยงาน GNSS Research Center, Wuhan University (WUM)

สำหรับที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ใช้ซอฟต์แวร์ PANDA ในการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ตัวอย่างเช่น (Li et al., 2015) ได้ทำการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS ซึ่งที่ผ่านมาได้รับการศึกษากันอย่างกว้างขวางในการใช้งานอุตุนิยมวิทยา อีกทั้งยังได้มีการใช้ระบบดาวเทียม BEIDOU ในการประมวลผลด้วย อย่างไรก็ตามการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม BEIDOU มีข้อจำกัดอย่างมากในเรื่องของวงโคจรดาวเทียมที่ยังไม่สามารถใช้งานได้เต็มระบบ ในงานวิจัยนี้ ได้มีการหาค่าประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศและการประเมินค่าความถูกต้อง ของระบบดาวเทียม BEIDOU โดยใช้วิธีการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง ซึ่งใช้ข้อมูลจากระบบดาวเทียม BEIDOU และ GPS จำนวน 10 สถานี ที่กระจายในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และทางด้านทิศตะวันตกของมหาสมุทรอินเดีย ช่วงเวลาปี 2013 โดยใช้ซอฟต์แวร์ PANDA ในการประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม BEIDOU และ GPS ที่สถานี HKTU (ฮ่องกง) ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสถานี Radiosonde ช่วงเวลา 6 เดือน ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จาก GPS มีความใกล้เคียงกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก Radiosonde โดยมีค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง 0.002 มิลลิเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.49 มิลลิเมตร ในขณะที่ ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จาก BEIDOU มีค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง - 2.04 มิลลิเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.68 มิลลิเมตร

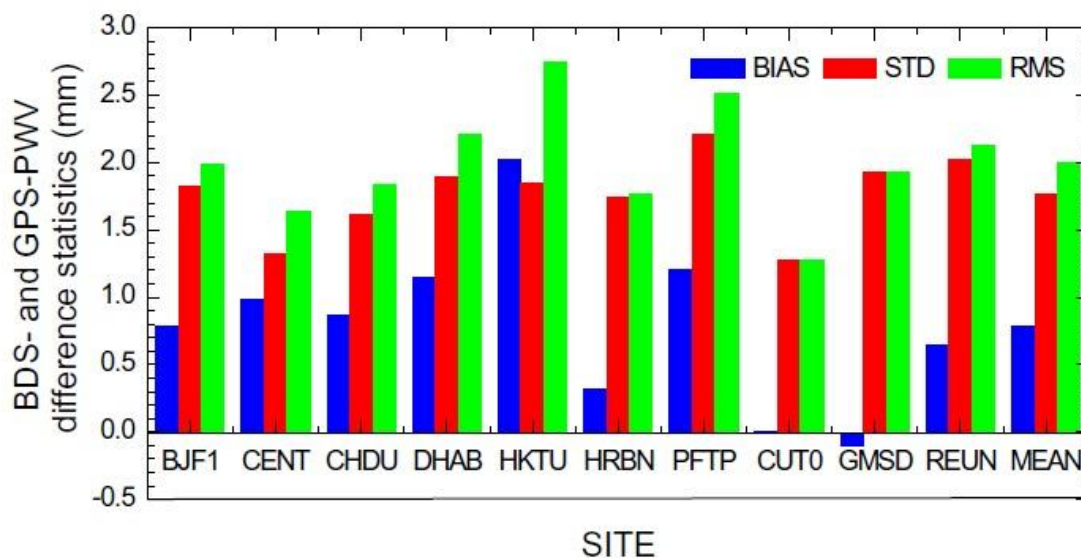


รูปที่ 2.12 ค่าความแตกต่างของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS และ BEIDOU เมื่อเปรียบเทียบกับ Radiosonde ช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่ กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2013

	Mean error (mm)	STD (mm)	RMSE (mm)
GPS-PWV	0.002	2.49	2.49
BDS-PWV	-2.04	2.68	3.37

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS และ BEIDOU เมื่อเปรียบเทียบกับ Radiosonde

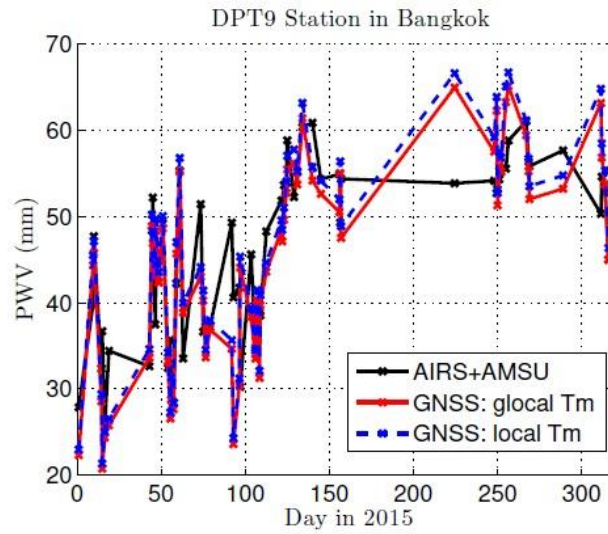
และเมื่อนำค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จาก BEIDOU จำนวน 10 สถานีมาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จาก GPS ได้ผลลัพธ์ โดยมีค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.78 มิลลิเมตร และ 1.77 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 2.00 มิลลิเมตร โดยใช้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS ในการอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จาก BEIDOU และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS มีความใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จาก BEIDOU สามารถใช้งานได้ในการศึกษาทางอุตุนิยมวิทยา ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และทางด้านตะวันตกของมหาสมุทรอินเดีย (Li et al., 2015)



รูปที่ 2.13 แสดงค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแต่ละสถานี โดยใช้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS ในการอ้างอิง

2.5.3 แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น (Local Mean Temperature)

ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม GPS นั้น ได้มาจากการหาค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และนำมาหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไป โดยจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ Mean Tropospheric Temperature (Tm) ในปัจจุบันที่ใช้กันในงานวิจัยกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ Global Mean Temperature และจาก Bevis Equation แต่สำหรับในประเทศไทย ได้มีงานวิจัยของ (Rata et al., 2016) ในการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ข้อมูลจากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS จะถูกใช้โดยทั่วไปในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ได้อย่างต่อเนื่อง ถูกต้องแม่นยำ ใช้ได้ทุกสภาพอากาศ และสามารถใช้ได้แบบเรียลไทม์ สำหรับงานวิจัยนี้ มีการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งเป็นรูปแบบฟังก์ชันเชิงเส้น โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิว พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ย จะได้มาโดยใช้ข้อมูล Radiosondes ซึ่งมีราคาแพง และครอบคลุมเฉพาะพื้นที่ขนาดเล็ก ในงานวิจัยนี้ ได้มีนำเสนอการใช้ข้อมูลอุณหภูมิและไอน้ำที่ได้ค่าจากดาวเทียม ซึ่งพารามิเตอร์ของแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยจะใช้ Extended Kalman Filter (EKF) ที่มีการใช้ข้อมูลพื้นผิวเป็นช่วง ๆ ข้อมูลดาวเทียมจะได้จาก The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) และ The Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) โดยองค์การ NASA และสามารถให้บริการได้ฟรี โดยดาวเทียมเคลื่อนที่ครอบคลุมอยู่เหนือผิวโลกผ่านวันละ 2 ครั้ง ในแต่ละพื้นที่บนโลก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นถึงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ลดลง เมื่อใช้แบบจำลองท้องถิ่นในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือนมกราคม 2015 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2015



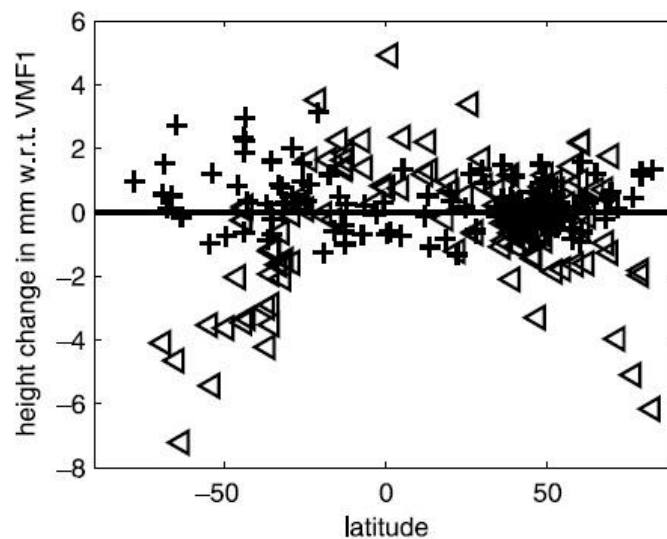
รูปที่ 2.14 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก AIRS และ AMSU

Tm model	Mean error (mm)	RMSE (mm)
Local	0.20	6.29
Global	-1.06	6.12

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณ ไอน้ำในบรรยากาศจาก AIRS และ AMSU

2.5.4 ผลกระทบจาก Mapping Function ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

ฟังก์ชันมุมสูงของดาวเทียม (Mapping Function) ที่เป็นที่นิยมคือ Niell Mapping Functions (NMF) โดยสัมประสิทธิ์จะถูกกำหนดจากค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและวันของปี (Day of Year) แต่ในงานวิจัยนี้จะแสดงถึง Global Mapping Function (GMF) โดยศูนย์กลางการพยากรณ์อากาศของยุโรป European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) เป็นตารางกริดสากลจากค่าเฉลี่ยรายเดือนของความดัน อุณหภูมิ และความชื้น มีขนาด 15×15 องศาต่อตารางกริด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของ GMF พัฒนามาจาก Vienna Mapping Function (VMF1) โดยใช้วิธี Spherical Harmonics เช่นเดียวกับ NMF (J. Boehm, 2006)



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าความสูงเฉลี่ยในหน่วยมิลลิเมตร เมื่อใช้ NMF (สามเหลี่ยม) และ GMF (เครื่องหมายบวก) เปรียบเทียบกับ VMF1

จากรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของความสูงที่สถานี GPS ระหว่าง NMF และ GMF เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ VMF1 จะเห็นว่าระหว่าง VMF1 กับ GMF มีความถูกต้องใกล้เคียงมากกว่า NMF ซึ่งความสูงของสถานีจะแตกต่างถึง 10 มม. ในซีกโลกใต้

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า GMF ให้ความถูกต้องดีกว่า NMF และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ VMF1 และสามารถใช้ได้ในซอฟต์แวร์ โดยการใส่ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและวันของปี (Day of Year) เช่นเดียวกับ NMF

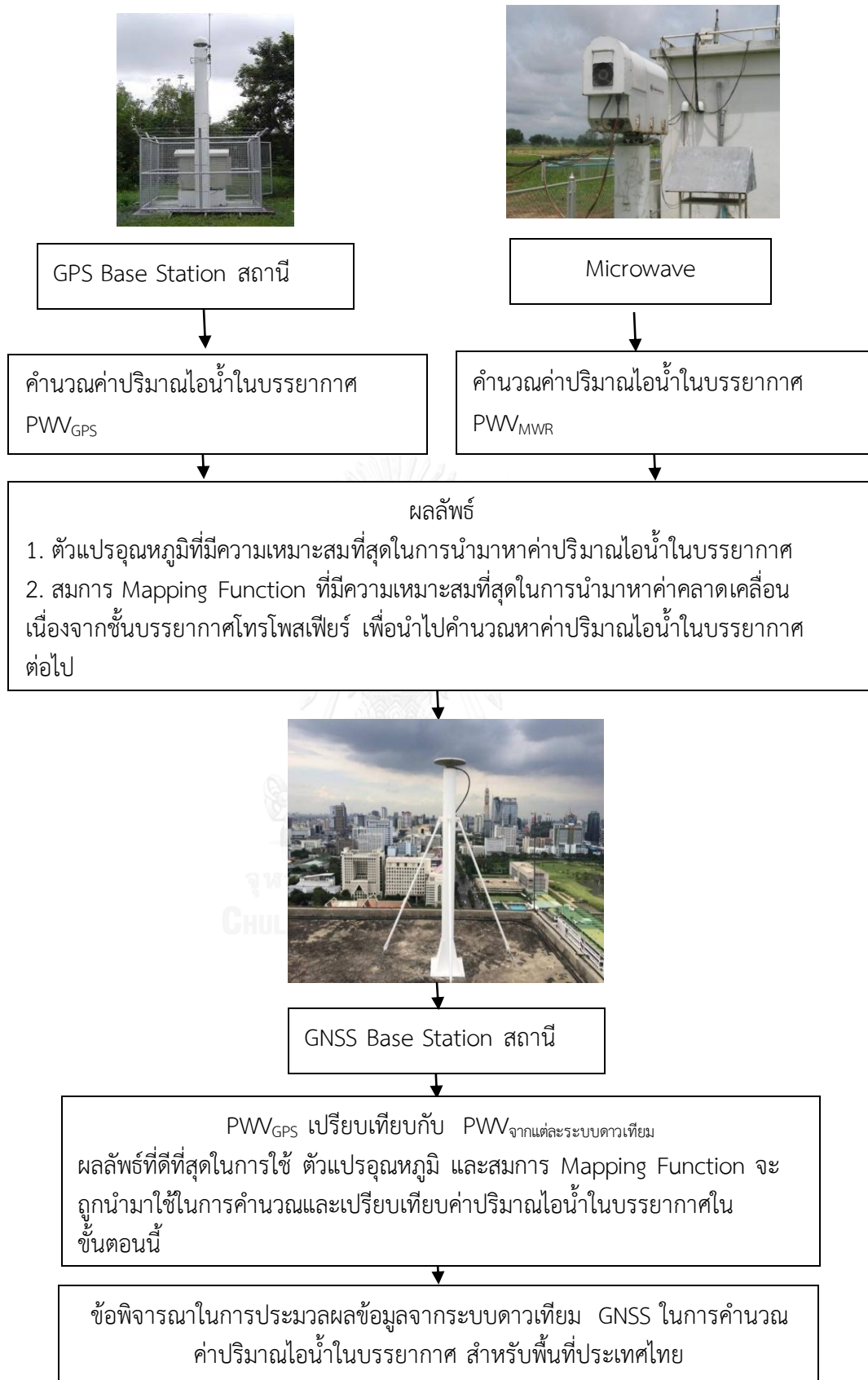
งานศึกษาในต่างประเทศแสดงให้เห็นว่า สามารถนำข้อมูลการรังวัดด้วยดาวเทียม GPS และ BEIDOU มาใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่อง Radiosondes และ เครื่อง Microwave Radiometer จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นจากงานวิจัยในประเทศไทย จะทำให้ได้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ดีกว่าจากการใช้อุณหภูมิเฉลี่ยสากล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GPS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น กับเครื่อง Microwave Radiometer และจะทำการเปรียบเทียบและประเมินค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากระบบดาวเทียม GNSS เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและผลกระทบที่เกิดขึ้น ในการนำข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง (CORS) มาใช้ในการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ถูกต้องและเหมาะสม สำหรับประเทศไทย



บทที่ 3

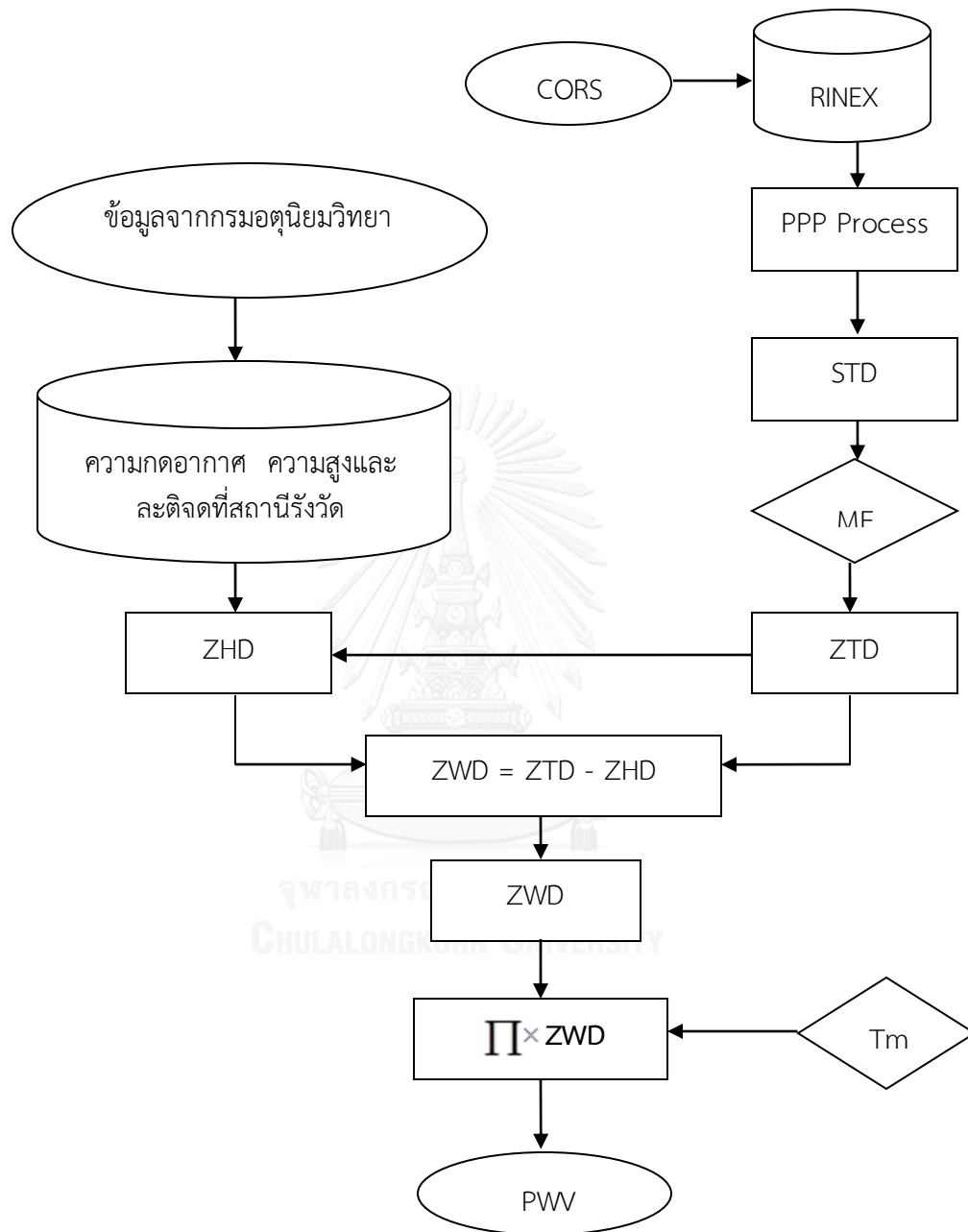
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม GNSS (GPS, GLONASS, BEIDOU) กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้จากเครื่อง Microwave Radiometer (อุปกรณ์ที่ใช้คำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในงานด้านอุตุนิยมวิทยา) แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของข้อมูล กล่าวคือ สถานีรับสัญญาณดาวเทียมกำหนดตำแหน่งที่จังหวัดนครราชสีมา (สถานี NKRM) ซึ่งอยู่ใกล้กับสถานี Microwave Radiometer มากที่สุดนั้นสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้เพียงแค่ระบบเดียวคือ GPS ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ จากวัตถุประสงค์ข้อ 2.1 เปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS แบบต่อเนื่อง (CORS) โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่อง Microwave Radiometer และจากวัตถุประสงค์ข้อ 2.2 เปรียบเทียบและประเมินค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยยึดการประมวลผลค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลดาวเทียม GPS เป็นตัวเปรียบเทียบกับระบบดาวเทียมอื่น ๆ ซึ่งจะอนุมานว่าการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากวัตถุประสงค์ข้อ 2.1 นั้นมีความถูกต้องเทียบเท่ากับเครื่องวัดทางอุตุนิยมวิทยาแล้ว



รูปที่ 3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัยนี้

3.1 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS



รูปที่ 3.2 การประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

CORS = Continuously Operating Reference Stations

PWW = Precipitable Water Vapor

ZWD = Zenith Wet Delay

RINEX = Receiver Independent Exchange Format

ZTD = Zenith Total Delay

T_m = Mean Tropospheric Temperature

STD = Slant Total Delay

ZHD = Zenith Hydrostatic Delay

MF = Mapping Function

3.1.1 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล

ในการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล จากรูปที่ 3.2 โดยเริ่มจากการนำไฟล์ RINEX จากสถานี NKRM แล้วก็จะทำการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ รายละเอียดตามภาคผนวก ก. หลังจากนั้นทำการประมวลผลด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ZTD นั้นได้มาจากแบบจำลองของ Saastamoniemi ซึ่งค่านี้จะประกอบไปด้วยสองส่วนที่สำคัญที่มีผลกระทบกับสัญญาณ GNSS คือค่า Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) หรือ ในส่วน Dry part ที่ถูกคำนวณจากค่าอุณหภูมิและความดันบรรยากาศจาก Global Pressure Temperature model (GPT) แล้วนำค่า ZTD มาลบกับค่า ZHD เพื่อให้ได้ค่า Zenith Wet Delay (ZWD) แล้วนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ PWW ต่อไป โดยจะต้องนำไปคูณกับค่าสัมประสิทธิ์ Π ซึ่งจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย T_m ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในค่าสัมประสิทธิ์ Π นั้น ถูกคำนวณจาก Global mean temperature จากหน่วยงาน Global Geodesy Observation System (GGOS Atmosphere)

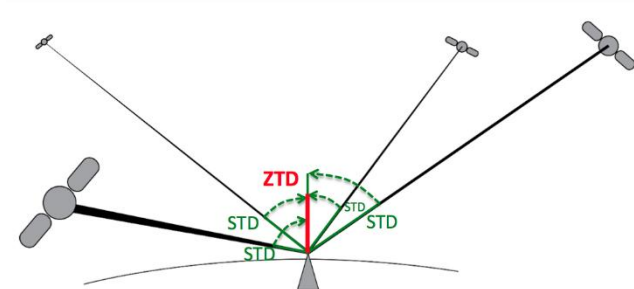
3.1.2 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอ้อมหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

ในการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอ้อมหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น จากรูปที่ 3.2 โดยเริ่มจากการนำไฟล์ RINEX จากสถานี NKRM เช่นกัน แล้วก็จะทำการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ รายละเอียดตามภาคผนวก ก. หลังจากนั้นทำการประมวลผลด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ZTD นั้นได้มาจากแบบจำลองของ Saastamonien ซึ่งค่านี้จะประกอบไปด้วยสองส่วนที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อสัญญาณ GNSS คือค่า Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) หรือ ในส่วน Dry part ที่ถูกคำนวณจากค่าความดันบรรยากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาจากสถานีที่ตั้งอยู่ในจังหวัดนครราชสีมา แล้วนำค่า ZTD มาลบกับค่า ZHD เพื่อให้ได้ค่า Zenith Wet Delay (ZWD) แล้วนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ PWV ต่อไป ซึ่งค่าอ้อมหภูมิเฉลี่ย T_m ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในค่าสัมประสิทธิ์ Π นั้นถูกคำนวณจากสมการค่าอ้อมหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น สำหรับประเทศไทย โดยใช้ค่าอ้อมหภูมิพื้นผิวจากกรมอุตุนิยมวิทยาจากสถานีที่ตั้งอยู่ในจังหวัดนครราชสีมา (Rata et al., 2016)

3.1.3 การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยใช้สมการ

Mapping Function

สำหรับการประมวลผลเพื่อค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ZTD ซึ่งในความเป็นจริงขณะรับสัญญาณนั้นดาวเทียมไม่ได้อยู่ในแนวตั้ง จึงต้องมีการใช้ Mapping Function เพื่อให้สามารถทำการหาคลาดเคลื่อนในแนวตั้งได้ โดยการใช้ Mapping Function ที่มีในปัจจุบันและแพร่หลายได้แก่ Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF) เป็นต้น

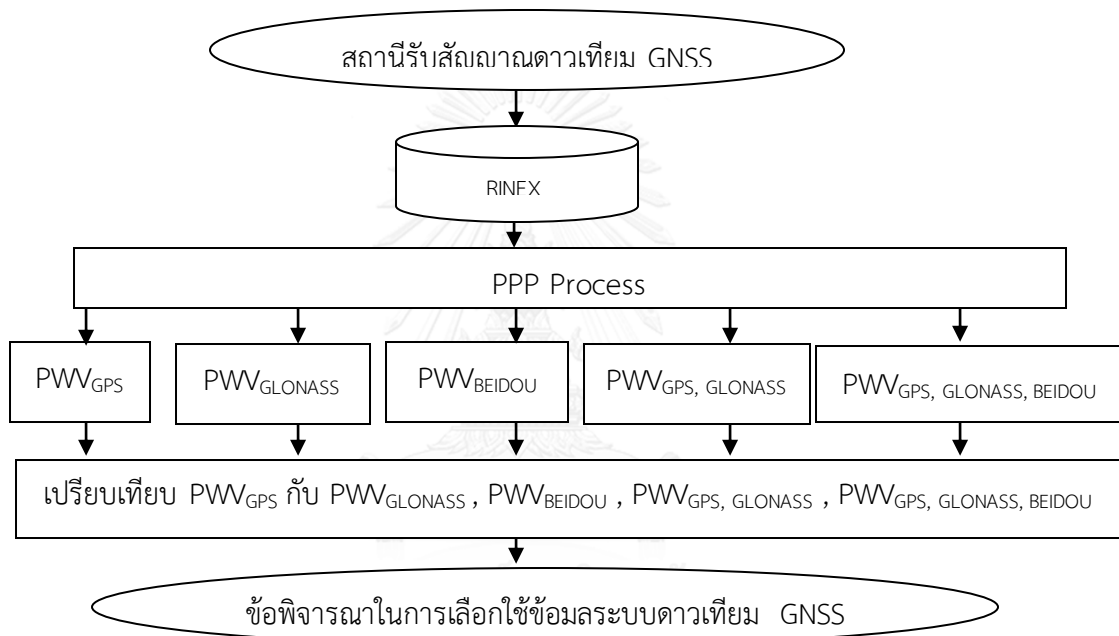


รูปที่ 3.3 การใช้ Mapping Function ในการแปลงจาก Slant Total Delay (STD) ให้มาเป็น Zenith Total Delay (ZTD)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้มีการทดสอบสมมติฐานในเรื่อง Mapping Function ที่แตกต่างกันในการหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ใน 2 รูปแบบ คือ Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF) ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ ในการนำมาหาค่า ZTD เพื่อความถูกต้องของการนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไป

3.2 การคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GNSS

หลังจากได้ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS กับ MWR โดยใช้ อุณหภูมิเฉลี่ยที่แตกต่างกันเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของค่า ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของระบบดาวเทียม GNSS ที่สถานี CUUT โดยเปรียบเทียบกับค่าปริมาณ ไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Global Mapping Function และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ในการประเมินประสิทธิภาพของค่าปริมาณไอน้ำใน บรรยากาศของระบบดาวเทียม



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่สถานี CUUT

3.3 การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของสองประชากร (F – test Statistic)

สถิติทดสอบแบบความแปรปรวนของสองประชากร คือการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยกรณีตัวอย่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GPS และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล Microwave Radiometer ที่เป็นอิสระจากกัน เพื่อพิสูจน์ว่าความแปรปรวนของทั้ง 2 ประชากรแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

3.3.1 การแจกแจงเอฟ (F - distribution)

มีความสำคัญในการทดสอบสมมติฐานความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก 2 วิธีการ โดยเมื่อ S_1^2 และ S_2^2 คือความแปรปรวนของตัวอย่างที่สุ่มมาจาก ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล Microwave Radiometer และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GPS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แตกต่างกันระหว่าง การใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และการใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ตามลำดับ ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน และมีขนาดเท่ากับ n_1 และ n_2 ตามลำดับ กลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มได้มาโดยการสุ่มมาจากค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มีการแจกแจงแบบปกติ

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน ความแปรปรวนของตัวอย่างที่สุ่มมาจากค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก 2 วิธีการ

- ตั้งสมมติฐานทางสถิติ ซึ่งประกอบด้วยสมมติฐานหลัก (Null hypothesis) (H_0) และสมมติฐานรอง (Alternative hypothesis) (H_1) โดยการสุ่มจากประชากร ดังนี้
 - ตัวอย่างที่สุ่มจากประชากรที่ 1 คือ ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก Microwave Radiometer
 - ตัวอย่างที่สุ่มจากประชากรที่ 2 คือ ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS (NKRM) โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แตกต่างกันระหว่าง การใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และการใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น
- กำหนดระดับนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการกำหนดความน่าจะเป็นที่ผู้วิจัยจะยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อน จากการปฏิเสธสมมติฐานหลักที่เป็นจริง โดยในการวิจัยนี้ กำหนดที่ $\alpha = 0.05$ โดยที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และมีจำนวนตัวอย่างที่สุ่มมาจากแต่ละประชากร 120 ตัวอย่าง จะได้

$$F_{0.05,120,120} = 1.351$$

- เลือกสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน คือ การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของสองประชากร (F – test Statistic) เพื่อคำนวณค่า $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$ ที่เป็นตัวแทนในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบเอฟ
- การกำหนดขอบเขตวิกฤติ เป็นการกำหนดพื้นที่หรือบริเวณในการแจกแจงตัวอย่างของสถิติทดสอบที่ใช้สำหรับปฏิเสธหรือยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) ซึ่งในการกำหนดขอบเขตวิกฤติจะพิจารณาสมมติฐานรอง (H_1) เพื่อนำค่าระดับนัยสำคัญ (α) ไปหาค่าวิกฤติ (critical value) มาใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากกลุ่มตัวอย่าง สำหรับการตัดสินใจว่าจะยอมรับ (Acceptance) หรือปฏิเสธ (Rejection) สมมติฐานหลัก (H_0)
- สรุปตัดสินใจโดยนำค่าสถิติ จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากตาราง (ค่าวิกฤติ) แล้วจึงจะตัดสินใจเกี่ยวกับผลทดสอบทางสถิติ

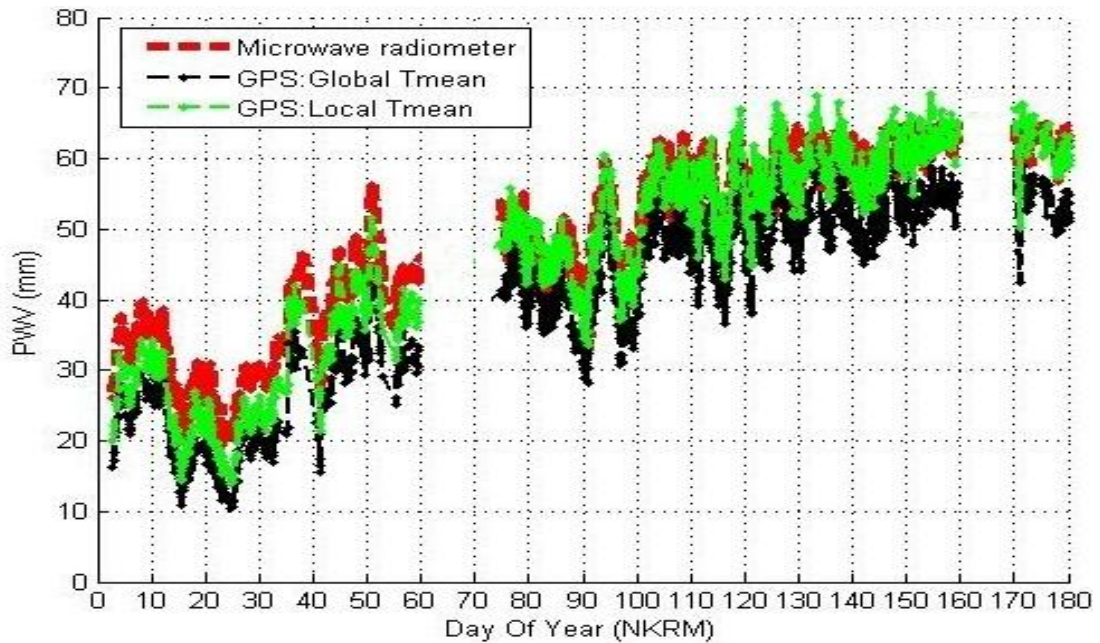
บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 การประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS เปรียบเทียบกับ Microwave Radiometer

หลังจากทำการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP) เป็นเวลาทั้งหมด 180 วัน (1 มกราคม – 30 มิถุนายน ค.ศ. 2014 , 2015) จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS) ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (NKRM) ผลของการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่อง Microwave Radiometer

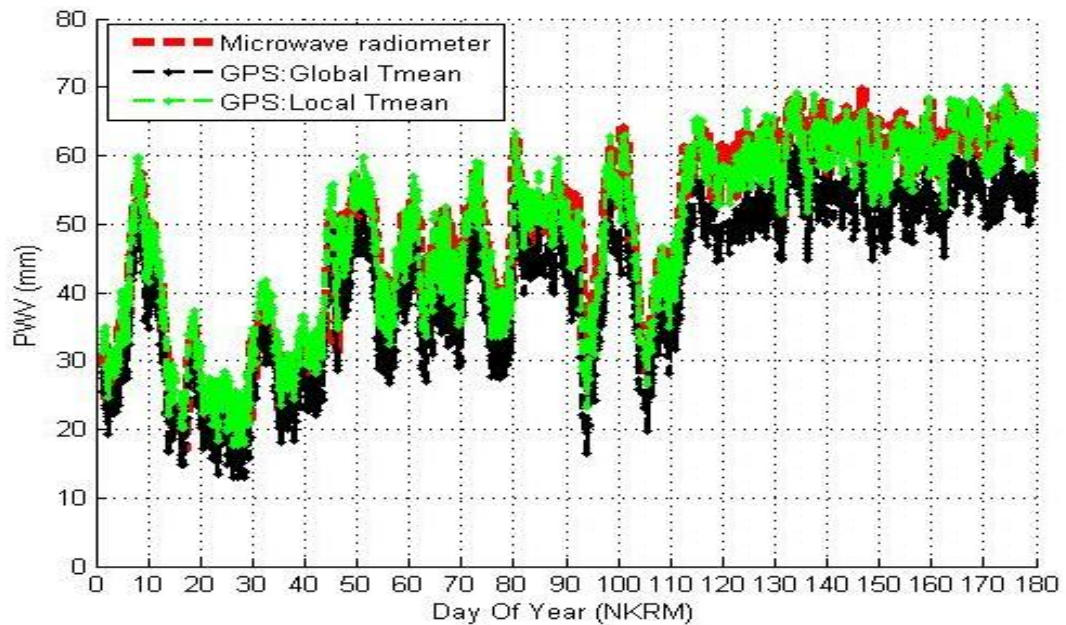
และการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทุกๆ 2 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งได้จากสมการ Mapping Function ที่แตกต่างกันใน 2 รูปแบบ คือ Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF) เป็นเวลาทั้งหมด 180 วัน (1 มกราคม – 30 มิถุนายน ค.ศ. 2015) จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง (NKRM) มีผลเป็นดังนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก Microwave Radiometer (MWR) ปี 2014

Tm Model	Mean error (mm)	RMSE (mm)
Local	1.5	3.7
Global	8.1	8.6

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก Microwave Radiometer (MWR) ปี 2014

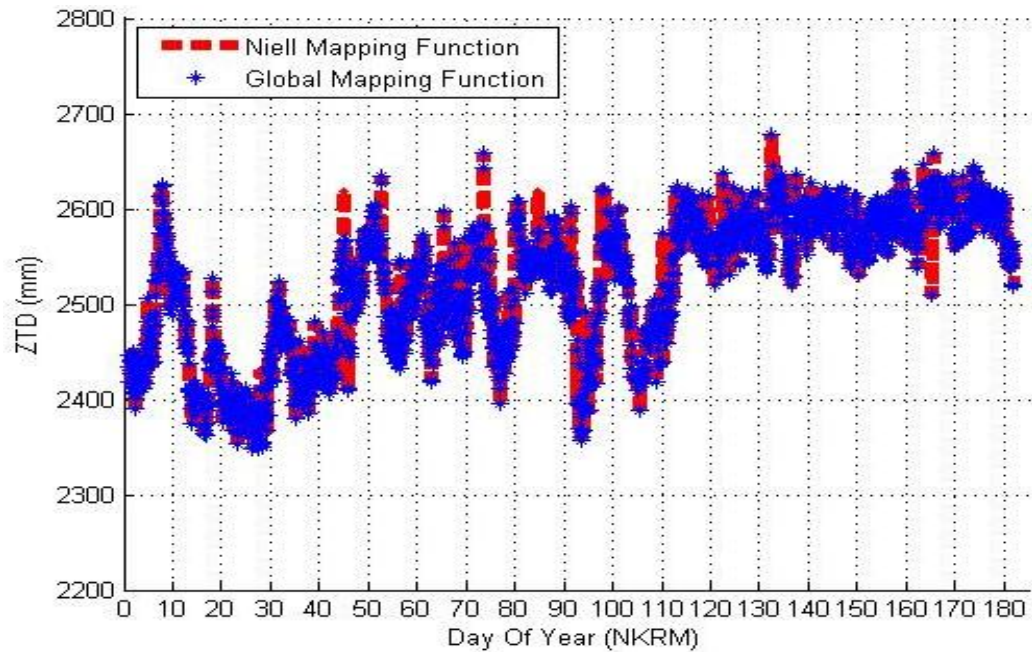


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก Microwave Radiometer (MWR) ปี 2015

Tm Model	Mean error (mm)	RMSE (mm)
Local	-0.3	2.9
Global	6.8	7.5

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก Microwave Radiometer (MWR) ปี 2015

และการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP) เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทุกๆ 2 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งได้จากสมการ Mapping Function ที่แตกต่างกันใน 2 รูปแบบ คือ Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF) เป็นเวลาทั้งหมด 180 วัน (1 มกราคม – 30 มิถุนายน ค.ศ. 2015) จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง(NKRM)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนในแนวตั้ง Zenith Total Delay (ZTD)

Mapping Function	Mean error (mm)	RMSE (mm)	Correlation coefficient r
Niell & Global	-0.2	2.7	0.999

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง และ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่า ZTD ที่ได้จากการใช้ Mapping Function ที่แตกต่างกัน จึงได้ทำการหาค่าสหสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ดังนี้ (Edwards, 1976)

$$r = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum (x^2) - (\sum x)^2][n \sum (y^2) - (\sum y)^2]}}$$

.....(4.1)

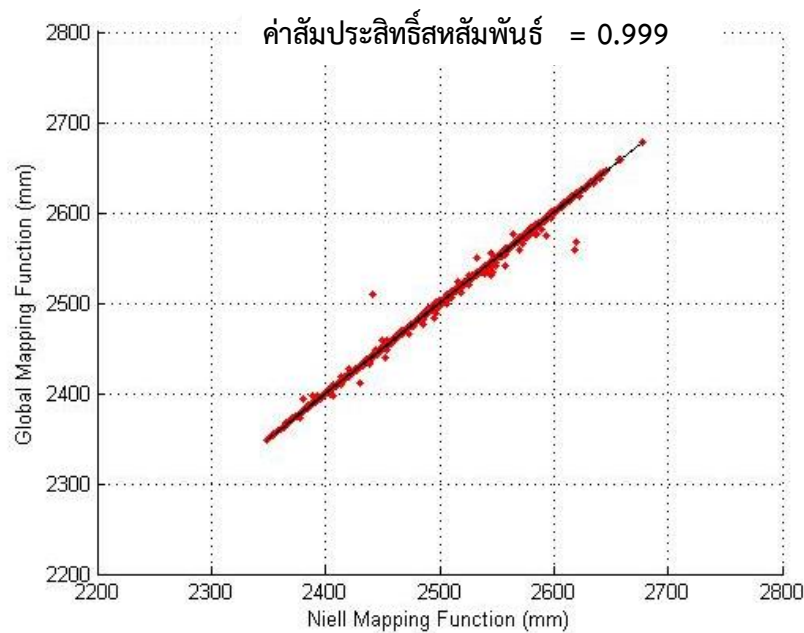
โดยที่ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

n คือ จำนวนข้อมูล

y คือ ข้อมูลตัวแปรหลัก (ค่า ZTD ที่ได้จากข้อมูล Global Mapping Function)

x คือ ข้อมูลตัวแปรตาม (ค่า ZTD ที่ได้จากข้อมูล Niell Mapping Function)

เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล มาแทนในสมการที่ 4.1 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.999 ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟ Correlation ระหว่าง Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF)

4.2 ผลการประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS ปี 2016

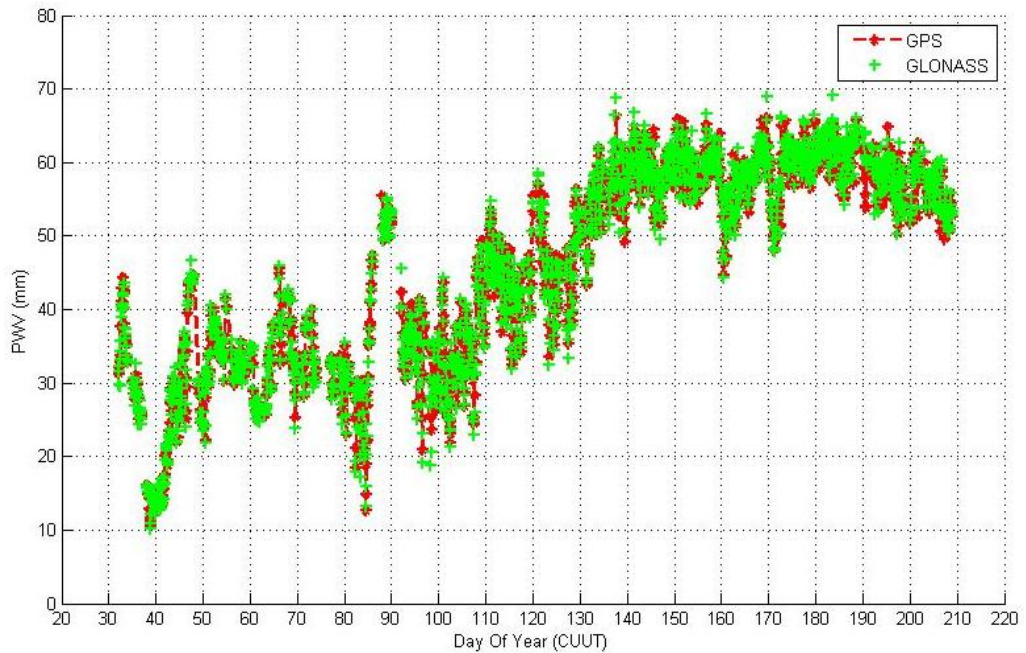
หลังจากได้ทำการเปรียบเทียบค่า PWV โดยใช้ข้อมูลหภูมิเฉลี่ยที่แตกต่างกัน ระหว่าง GPS กับ MWR แล้ว จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม GPS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นในการประมวลผลนั้นมีความใกล้เคียงกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก MWR และจากการคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ZTD โดยการใช้ Mapping Function ที่แตกต่างกันนั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า ZTD ที่ได้จาก 2 สมการนั้นมีความใกล้เคียงกัน จึงทำให้ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS เป็นตัวอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียมอื่น ๆ โดยจะทำการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วยสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่สถานี CUUT และเลือกใช้สมการ Global Mapping Function และใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เป็นเวลาทั้งหมด 181 วัน (1 กุมภาพันธ์ – 31 กรกฎาคม ค.ศ. 2016) โดยประมวลผลด้วยกัน 5 ชุดข้อมูล โดยข้อมูลชุดที่ 1 GPS เพียงระบบเดียว ชุดที่ 2 GLONASS เพียงระบบเดียว ชุดที่ 3 BEIDOU เพียงระบบเดียว และชุดที่ 4 GPS ร่วมกับ GLONASS และชุดที่ 5 ประมวลผลร่วมกัน 3 ระบบ คือ GPS ร่วมกับ GLONASS ร่วมกับ BEIDOU และนำข้อมูลชุดที่ 2 3 4 และ 5 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลชุดที่ 1 GPS เพียงระบบเดียว

ผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยกัน 5 ชุดข้อมูล จะเห็นมีค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ดังตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 ส่วนกราฟ Correlation ของค่า PWV กับระบบดาวเทียมแต่ละระบบสามารถดูได้จากรูปที่ 4.9

GNSS (PWV)	Mean error (mm)	STD (mm)	RMSE (mm)	Correlation coefficient r
GLONASS	-0.2	1.3	1.3	0.995
BEIDOU	1.6	6.3	6.5	0.892
GPS+GLONASS	-0.1	0.8	0.8	0.997
GPS+GLONASS+BEIDOU	0.5	2.0	2.1	0.987

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) และ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GPS เพียงระบบเดียว

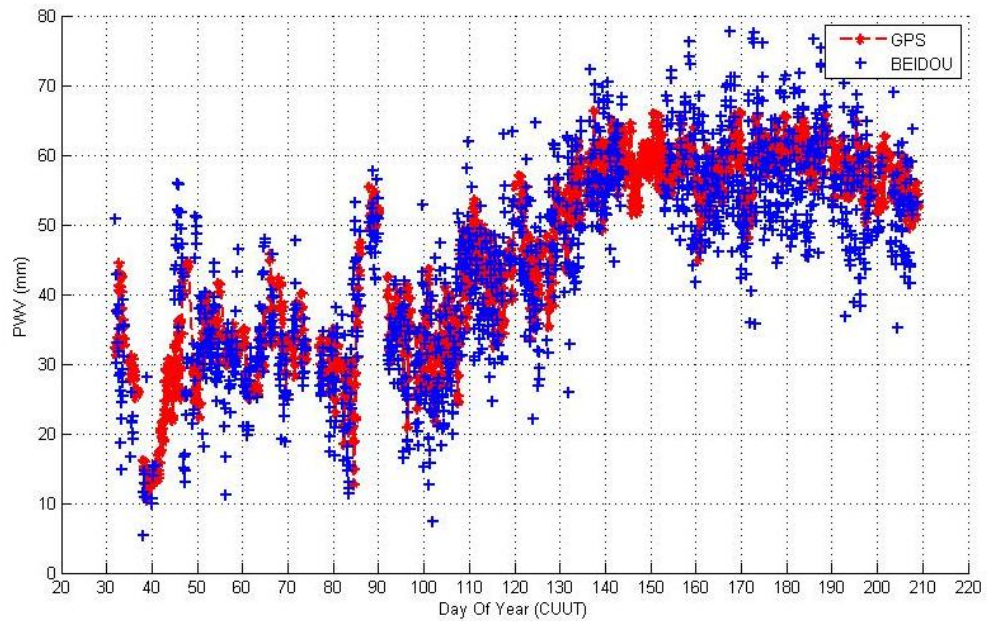
4.2.1 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GLONASS



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GLONASS

ในการเปรียบเทียบการคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS เปรียบเทียบกับข้อมูลจากระบบดาวเทียม GLONASS นั้น จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากทั้ง 2 ระบบดาวเทียมมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจาก ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากทั้งสองระบบดาวเทียมนั้น อยู่ในระดับความสูงเดียวกันคือ Medium Earth Orbit (MEO) และมีความถูกต้องใกล้เคียงกัน ทำให้การนำข้อมูลมาหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ มีความใกล้เคียงกัน

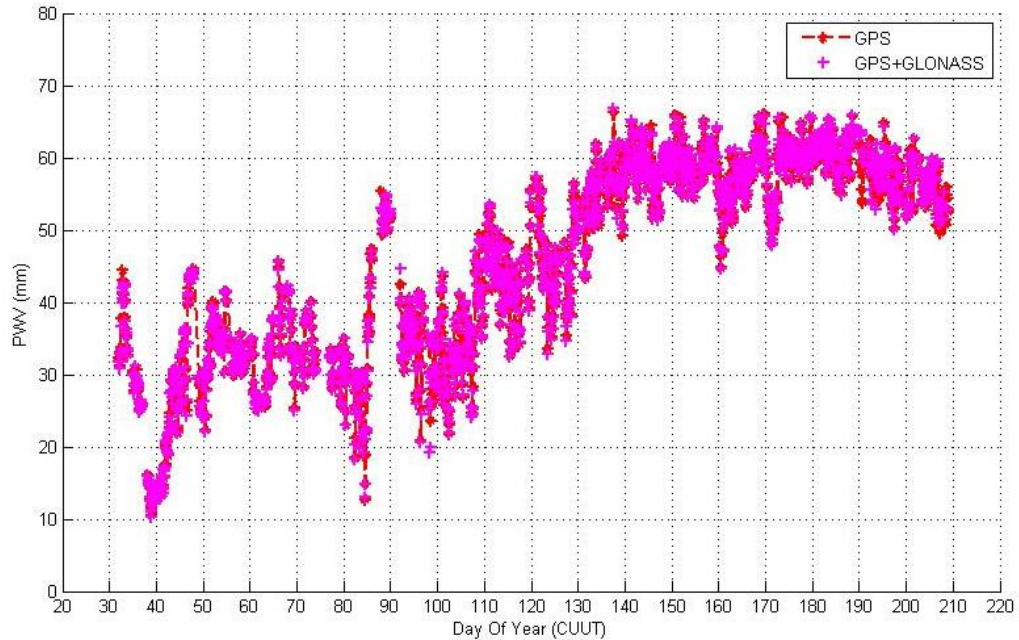
4.2.2 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ BEIDOU



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ BEIDOU

ในการเปรียบเทียบการคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS เปรียบเทียบกับข้อมูลจากระบบดาวเทียม BEIDOU นั้น จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากทั้ง 2 ระบบดาวเทียมมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจาก ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากระบบดาวเทียม BEIDOU นั้นยังไม่มี ความเสถียรเท่าที่ควร เนื่องจากในปัจจุบันระบบดาวเทียม BEIDOU ยังไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบ

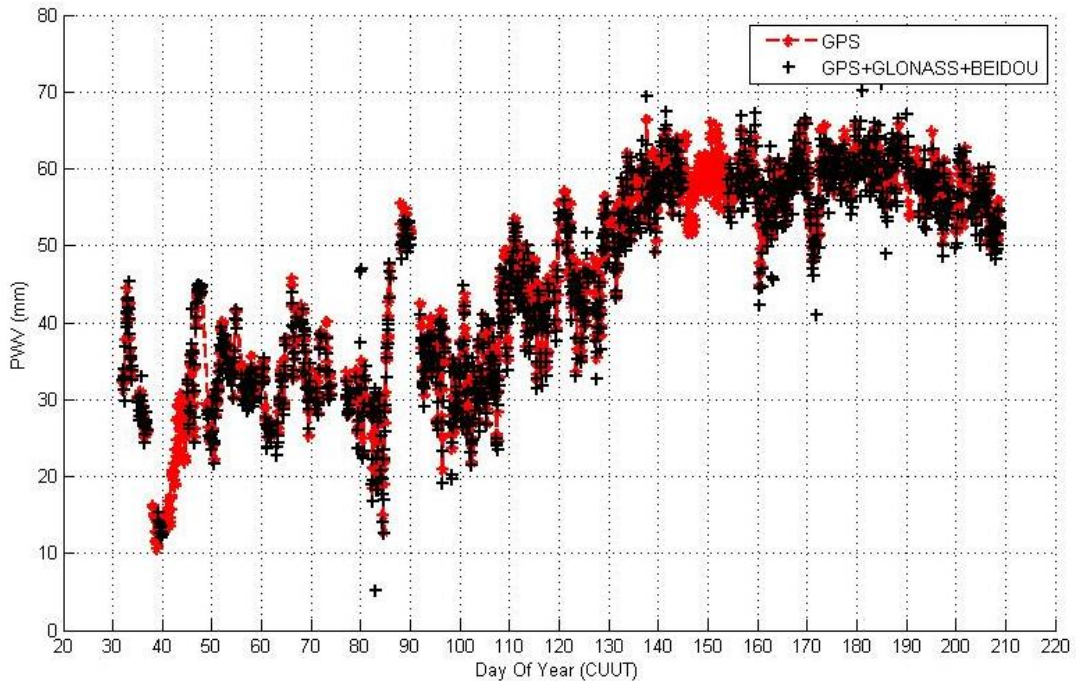
4.2.3 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GPS+GLONASS



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GPS+GLONASS

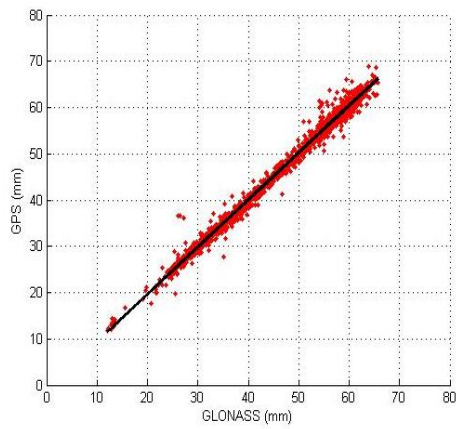
ในการเปรียบเทียบการคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS เปรียบเทียบกับการนำข้อมูลจากระบบดาวเทียม GPS มาประมวลผลร่วมกับ GLONASS นั้น จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากทั้ง 2 ชุดข้อมูลดาวเทียม มีความใกล้เคียงกันมากกว่าการใช้ระบบดาวเทียม GPS เพียงระบบเดียวในการเปรียบเทียบ เนื่องจากการมีจำนวนดาวเทียมที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความถูกต้องของการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศนั้นเพิ่มมากขึ้น

4.2.4 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GPS+GLONASS+BEIDOU

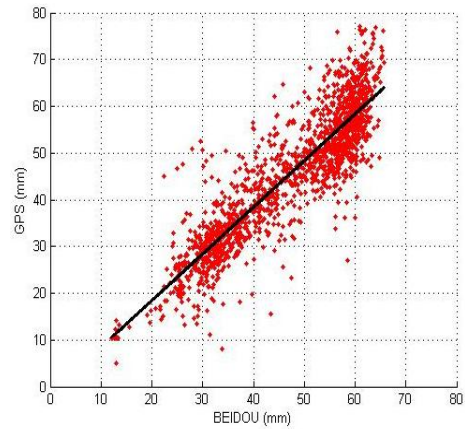


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GPS+GLONASS+BEIDOU

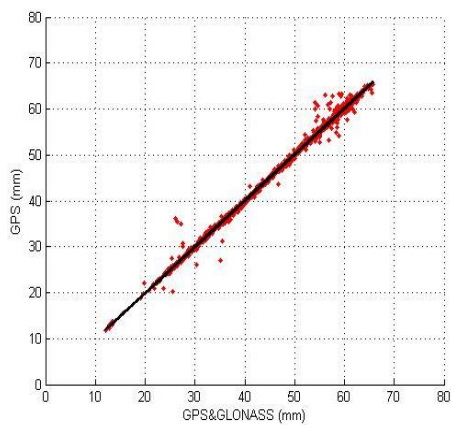
ในการเปรียบเทียบการคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS เปรียบเทียบกับการนำข้อมูลจากระบบดาวเทียม GPS มาประมวลผลร่วมกับ GLONASS และ BEIDOU นั้น จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากทั้ง 2 ชุดข้อมูลดาวเทียม มีความแตกต่างกันมากกว่า การใช้ GPS มาประมวลผลร่วมกับ GLONASS เนื่องจาก มีระบบดาวเทียม BEIDOU นั้นเข้ามาประมวลผลด้วย สาเหตุเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.2



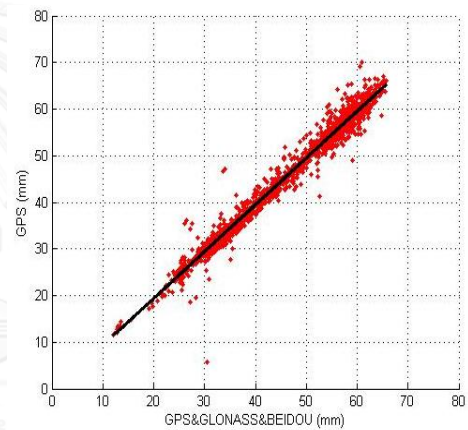
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.995
ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ GLONASS



ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.892
ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ BEIDOU



ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.997
ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับ
GPS+GLONASS



ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.987
ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับการใช้
GPS+GLONASS+BEIDOU

รูปที่ 4.9 กราฟ Correlation ของค่า PWV ระหว่าง GPS เปรียบเทียบกับค่า PWV จากแต่ละระบบดาวเทียม

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัยในประเด็นต่าง ๆ และข้อจำกัดในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยหรือเทคนิควิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

5.1 อภิปรายผล

กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก Microwave Radiometer (MWR) ในปี 2014 และ ปี 2015 จะเห็นว่าความแตกต่างระหว่างการใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล กับ Microwave Radiometer มีความแตกต่างมากกว่า การใช้อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ แสดงให้เห็นจากการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวน (F-test) รวมทั้งค่า RMSE และ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง (Mean error) ถึงระดับความแตกต่างของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จาก Microwave Radiometer และ GPS (NKRM) โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ในปี 2014 และปี 2015 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ หากใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เพราะฉะนั้นการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสามารถใช้ระบบดาวเทียม GPS น่าจะสามารถทดแทนการใช้ Microwave Radiometer ได้โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น และสามารถ ใช้ Mapping Function ที่แตกต่างกันใน 2 รูปแบบ คือ Global Mapping Function (GMF) และ Niell Mapping Function (NMF) เนื่องจาก การใช้ Mapping Function ทั้ง 2 รูปแบบ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ Global Mapping Function (GMF) สำหรับการหาค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ Zenith Total Delay (ZTD)

ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระบบดาวเทียม GPS มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิท้องถิ่นทดแทนการใช้ Microwave Radiometer ได้แล้วนั้น และเนื่องจากในปัจจุบันได้มีระบบดาวเทียมเพิ่มขึ้น เช่น GLONASS และ BEIDOU ฉะนั้นจึงได้มีการทดสอบประสิทธิภาพในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียมดังกล่าวด้วย จากงานวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นได้จากค่า RMSE ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน STD และค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง Mean error พบว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GLONASS สามารถหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้ใกล้เคียงกับ GPS แต่การหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก BEIDOU นั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากในปัจจุบันระบบดาวเทียม BEIDOU ยังไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบ และวงโคจรดาวเทียม BEIDOU ยังไม่มีความถูกต้องเท่าที่ควร โดยเฉพาะในวงโคจรค้างฟ้า Geostationary Orbit (GEO) จำนวน 5 ดวง (ดาวเทียมดวงที่ C01, C02, C03, C04, C05) ซึ่งมีความถูกต้องของวงโคจร 50 เซนติเมตร, และวงโคจรดาวเทียมแบบ Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) จำนวน 5 ดวง (ดาวเทียมดวงที่ C06, C07, C08, C09, C10) ซึ่งมีความถูกต้องของวงโคจร 10 เซนติเมตร และวงโคจรดาวเทียมแบบ Medium Earth Orbit (MEO) จำนวน 4 ดวง (ดาวเทียมดวงที่ C11, C12, C13, C14) ซึ่งมีความถูกต้องของวงโคจร 5 เซนติเมตร (Z. Deng, 2014) ส่วนความถูกต้องของวงโคจรดาวเทียม GPS และ GLONASS นั้นมีความถูกต้องของวงโคจรประมาณ 5 เซนติเมตร (Uhlemann, 2012) ทำให้มีผลต่อความถูกต้องของการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ทำให้เกิดความเสถียรมากกว่า BEIDOU เนื่องจากทั้งสองระบบดาวเทียมดังกล่าวสามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบแล้วในปัจจุบัน

5.2 สรุปผล

ตารางสรุปผลการนำข้อมูลแต่ละระบบดาวเทียมเพื่อนำไปหาค่า PWV	
การใช้ข้อมูล GPS	มีแนวโน้มที่จะสามารถใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ค่าเฉลี่ยวัดหุ้มน้ำที่องถึน สำหรับประเทศไทยทดแทนเครื่อง Microwave Radiometer ในทางอดุณิยมิวิทยาได้
การใช้ข้อมูล GLONASS	สามารถใช้ระบบดาวเทียม GLONASS ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบดาวเทียม GPS แต่เมื่อใช้ทั้งสองระบบดาวเทียมมาประมวลผลร่วมกันคือ GPS และ GLONASS จะทำให้ได้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มีความถูกต้องมากกว่าการใช้ระบบดาวเทียม GPS เพียงระบบเดียว เนื่องจากการมีจำนวนดาวเทียมที่เพิ่มมากขึ้น
การใช้ข้อมูล BEIDOU	ในเรื่องของวงโคจรยังไม่มีความถูกต้องและยังไม่มีความเสถียร (Z. Deng et al., 2014) เมื่อเทียบกับระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS อาจทำให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้ยังไม่มีความถูกต้องเท่าที่ควร ยิ่งไปกว่านั้น ถ้าหากใช้ค่าอุนหุ้มน้ำเฉลี่ยวัดหุ้มน้ำในการคำนวณหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม BEIDOU แล้วนั้น จะทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นกว่าการใช้ค่าอุนหุ้มน้ำเฉลี่ยวัดหุ้มน้ำที่องถึน
หมายเหตุ การใช้สมการ Mapping Function ที่แตกต่างกัน ไม่มีผลสำหรับการนำมาคำนวณเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ สามารถใช้สมการใดก็ได้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไป	

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ใช้เป็นเพียงข้อมูล GPS เท่านั้นในการเปรียบเทียบกับ Microwave Radiometer แต่ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS ในแต่ละระบบดาวเทียม จากสถานีที่ใกล้เคียงกับเครื่อง Microwave Radiometer

5.3.2 ในการนำไปใช้คำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง เพื่อการพยากรณ์ฝน จากหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ควรใช้ข้อมูลในลักษณะที่เป็นช่วงเวลานานขึ้น เช่น ข้อมูล 5 - 10 ปี เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ประมวลผลได้

5.3.3 ในด้านการประมวลผล หากสามารถใช้ซอฟต์แวร์ที่ทำการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้แบบเรียลไทม์ ประกอบกับการใช้วิธีการประมวลผลจากงานวิจัยนี้ ก็จะทำให้การพยากรณ์ฝนมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง



- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). **GPS METEOROLOGY - REMOTE-SENSING OF ATMOSPHERIC WATER-VAPOR USING THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM.** Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 97(D14), 15787-15801.
- Biyang Chen, & Liu, Z. (2014). **Analysis of Precipitable Water Vapor (PWV) Data Derived from Multiple Techniques: GPS, WVR, Radiosonde and NHM in Hong Kong.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 18. doi:10.1007/978-3-642-54737-9_16
- Boehm, J. (2006). Global Mapping Function (GMF): **A new empirical mapping function based on numerical weather model data.** GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 33, 4. doi:10.1029/2005GL025546
- Boehm, J., & Schuh, H. (2007). **Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis.** Journal of Geodesy, 81(6), 403-408. doi:10.1007/s00190-007-0144-2
- Boehm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). **Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data.** Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B2), n/a-n/a. doi:10.1029/2005jb003629
- Coster, A. (1997). **The Effect of Gradients in the GPS Estimation of Tropospheric Water Vapor.** The ION 53rd Annual Meeting, Albuquerque, NM.
- Dong-Hyo Sohn, & Park, K.-D. (2012). **Comparison of the Characteristics of Precipitable Water Vapor Measured by Global Positioning System and Microwave Radiometer.** J. Astron. Space Sci , Korea Astronomy and Space Science Institute, 10.
- Edwards, A. L. (1976). **An introduction to linear regression and correlation.** San Francisco : W.H.Freeman.
- Elgered, G. (1992). **Water Vapor Radiometry for Estimation of the Wet Delay.** Journal of Geophysical Research 96 (April 1992). doi:6541-6555
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). **Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products.** GPS Solutions, 5(2), 12-28. doi:10.1007/pl00012883
- Li, M., Li, W., Shi, C., Zhao, Q., Su, X., Qu, L., & Liu, Z. (2015). **Assessment of precipitable water vapor derived from ground-based BeiDou observations with**

Precise Point Positioning approach. *Advances in Space Research*, 55(1), 150-162.
doi:10.1016/j.asr.2014.10.010

Liang, H., Cao, Y., Wan, X., Xu, Z., Wang, H., & Hu, H. (2015). **Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China.** *Geodesy and Geodynamics*, 6(2), 135-142.
doi:10.1016/j.geog.2015.03.001

Liou, Y.-A. (2001). **Comparison of Precipitable Water Observations in the Near Tropics by GPS, Microwave Radiometer, and Radiosondes.** Center for Space and Remote Sensing Research, 11.

Lu, C. X., Li, X. X., Nilsson, T., Ning, T., Heinkelmann, R., Ge, M. R., . . . Schuh, H. (2015). **Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations.** *Journal of Geodesy*, 89(9), 843-856. doi:10.1007/s00190-015-0818-0

Maik Uhlemann, Gerd Gendt, Markus Ramatschi, & Deng, a. Z. (2012). **GFZ GlobalMulti-GNSS Network and Data Processing Results.** GFZ German Research Centre for Geosciences, 7. doi:10.1007/1345_2015_120

Niell, A. (1996). **Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths.** *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2), 3227-3246.

Office, C. S. N. (2013). BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard. Beijing, China.

Pacione, R. (2002). **Comparison of atmospheric parameters derived from GPS, VLBI and a ground-based microwave radiometer in Italy.** *Physics and Chemistry of the Earth*, 8.

Pacione, R., Fionda, E., Ferrara, R., Lanotte, R., Sciarretta, C., & Vespe, F. (2002). **Comparison of atmospheric parameters derived from GPS, VLBI and a ground-based microwave radiometer in Italy.** *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(4-5), 309-316. doi:10.1016/s1474-7065(02)00005-0

Rata, S., Chalermchon, S., Panu, S., & Chaiyaporn, K. (2016, 16 September 2016). **Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model using AIRS and AMSU for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation.** Paper presented at the ION GNSS+, Portland, Oregon.

Satirapod, C., & Chalermwattanachai, P. (2005). Impact of different tropospheric models on GPS baseline accuracy: case study in Thailand. Positioning, 1(09), 0.

WU, J. T., WU, S. C., HAJJ, G. A., BERTIGER, W. I. & LICHTEN,. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. Manuscripta Geodaetica, 91-98.

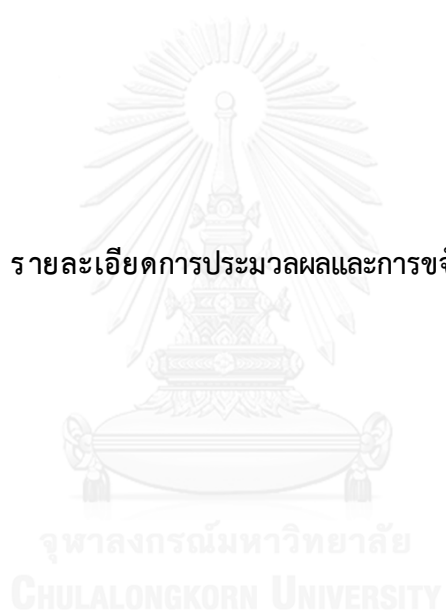
Z. Deng, M. Ge, M. Uhlemann, & Zhao, Q. (2014). Precise orbit determination of BeiDou Satellites at GFZ. Geo Forschungs Zentrum Potsdam IGS Workshop.

ชัยพร, ก. (2015). การวิเคราะห์ผลกระทบค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับความเสถียรภาพสูงในการประมวลผลข้อมูล GNSS สำหรับการรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูง. (Degree of Master of Engineering Program in Survey Engineering), Chulalongkorn University, Bangkok Thailand.





ภาคผนวก ก. รายละเอียดการประมวลผลและการจัดค่าความคลาดเคลื่อน



รายละเอียดการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อประมวลผลข้อมูลหาค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ZTD)

ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยจะใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase) ซึ่งทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier Phase) ก่อนที่จะทำการประมวลผล จะต้องทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบ (Systematic Error) ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere delay) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน Phase Center Offset & Phase Center Variation (PCO & PCV) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide , Ocean loading) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Phase wind-up (WU, 1993) ที่เกิดจากการหมุนของดาวเทียม ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดความผิดพลาดได้ในระดับเมตร (meters level) ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Kouba & Héroux, 2001) ซึ่งแต่ละค่าคลาดเคลื่อนจะถูกขจัดด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

- ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere delay) จะใช้แบบจำลองเชิงเส้นจากข้อมูลสองความถี่ (Ionosphere free combination) ซึ่งจะขจัดทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) จะทำให้ได้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และ ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) ที่อยู่ในรูปแบบ Ionosphere free

- ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) จะใช้แบบจำลองของ Saastamonien ในการปรับแก้ขั้นต้น แต่ทว่ายังคงเหลือค่าคลาดเคลื่อนนี้อยู่ในข้อมูล จึงต้องกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ในการประมาณค่าในขั้นตอนการประมวลผลเพื่อให้สามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนนี้ได้ดีขึ้น

- ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset) จะใช้ข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงจาก German Research Centre for Geosciences (GFZ) ซึ่งเป็นหนึ่งในศูนย์วิเคราะห์ GNSS ที่ IGS ยอมรับ

- ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน Phase Center Offset & Phase Center Variation (PCO & PCV) จะทำการปรับแก้โดยใช้แบบจำลองของ IGS

- ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide , Ocean loading) จะทำการปรับแก้โดยใช้แบบจำลอง IERS 2003 จากหน่วยงาน International Earth Rotation Service (IERS) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่จะติดตามปรากฏการณ์ต่างๆ เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกและการหมุนตัวของโลก

- และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหมุนของเสาอากาศดาวเทียม Phase-windup จะทำการแก้ไขโดยหลักการเฟสโพลาไรซ์เซชัน (Phase polarization) (WU, 1993)

รายละเอียด	แบบจำลองและการแก้ไข
มุมสูงดาวเทียม (Cut-off elevation angle)	5 องศา
ช่วงเวลาข้อมูล	30 วินาที
ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม และค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม	German Research Centre for Geosciences (GFZ) โดยช่วงเวลาข้อมูลวงโคจรคือ ทุกๆ 15 นาที
ค่าคลาดเคลื่อนศูนย์กลางเสาอากาศดาวเทียม (Phase Center Offset)	ตามค่าปกติจาก IGS MGEX
ค่าแปรปรวนศูนย์กลางเสาอากาศดาวเทียม (Phase Center Variation)	ตามค่าปกติจาก IGS MGEX
ค่าแก้เนื่องจากการหมุนของเสาอากาศดาวเทียม (Phase Wind-up Effect)	ใช้หลักการเฟสโพลาริซเซชัน (WU, 1993)
แบบจำลองค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere Model)	แบบจำลอง Saastamonien ทั้ง Wet และ Dry ร่วมกับ Global Mapping function
ค่าคลาดเคลื่อนไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere model)	แบบจำลอง Ionosphere free combination
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและแรงมหาสมุทร (Ocean loading, Ocean tide, Solid Earth Tide)	ใช้แบบจำลอง IERS 2003
พิกัดพื้นฐาน	ITRF2008

ตาราง ก.1 รายละเอียดการประมวลผลและการกำจัดความคลาดเคลื่อน (ชัยพร, 2015)

ภาคผนวก ข. ตารางคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คุณลักษณะเฉพาะ	ค่าตัวเลข
ความถี่	23.8, 31.4 GHz
มุมในการรับ	ทั่วท้องฟ้า
ความคลาดเคลื่อน	0.30 เคลวิน
ความละเอียด (Resolution)	0.25 เคลวิน
ช่วงเวลาการเก็บข้อมูล	45 วินาที
ขนาด	50×28×76 เซนติเมตร
น้ำหนัก	21 กิโลกรัม

ตาราง ข.1 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่อง Microwave Radiometer รุ่น WVR – 1100 ดัดแปลงจาก (Pacione et al., 2002)

คุณลักษณะเฉพาะ	ค่าตัวเลข
ขนาด	กว้าง 21.2 ซม x ยาว 16.6 ซม x สูง 7.9 ซม
น้ำหนัก	1.25 กิโลกรัม
อุณหภูมิในการใช้งาน	-40 เซลเซียส ถึง +65 เซลเซียส
ความคลาดเคลื่อนในการวัดแบบสถิต	ทางราบ 3 มม. + 0.5 ppm x ความยาวเส้น ฐาน ทางตั้ง 6 มม. + 0.5 ppm x ความยาวเส้นฐาน
การรับสัญญาณ	12 ช่องสัญญาณ, แบบสองความถี่ (L1/L2), P-code และ Carrier phase

ตาราง ข.2 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรุ่น LEICA GRX1200 PRO

คุณลักษณะเฉพาะ	ค่าตัวเลข
ขนาด	กว้าง 26.5 ซม x ยาว 13 ซม x สูง 5.5 ซม
น้ำหนัก	1.75 กิโลกรัม
อุณหภูมิในการใช้งาน	-40 องศาเซลเซียส ถึง +65 องศาเซลเซียส
ความคลาดเคลื่อนในการวัดแบบสถิต	ทางราบ 3 มม. + 0.1 ppm x ความยาวเส้น ฐาน ทางตั้ง 3.5 มม. + 0.4 ppm x ความยาวเส้น ฐาน
การรับสัญญาณ	440 ช่องรับสัญญาณ สามารถรับและบันทึก ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบ GPS L1, L2P, L2C, L5 GLONASS L1, L2 Galileo และ Beidou ได้

ตาราง ข.3 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรุ่น Trimble Net R9

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ: ร.ท.ธนพัทธ์ จงรักชอบ

วันเดือนปีเกิด: 21 กรกฎาคม พ.ศ.2532

ภูมิลำเนา: อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์

คุณวุฒิทางการศึกษา:

พ.ศ. 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ โรงเรียนนายร้อยพระ
จุลจอมเกล้า

ประสบการณ์การทำงาน:

พ.ศ. 2556 ปฏิบัติงานสนามรังวัดโครงข่ายดาวเทียม GPS ปีงบประมาณ 57

พ.ศ. 2557 ปฏิบัติงานสนามสำรวจและจัดทำหลักเขตแดนด้าน ไทย – มาเลเซีย
พื้นที่ อ.เบตง จ.ยะลา

