

ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพจากการรังวัด  
ด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย

นายธีทัต เจริญกาลัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

EFFECT OF IONOSPHERIC DELAY ON PERFORMANCE  
OF THE NETWORK-BASED RTK GPS IN THAILAND

Mr. Teetat Charoenkalunyuta

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Survey Engineering

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศ  
ไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพจากการรังวัด  
ด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัย  
ระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย

โดย

นายธีทัต เจริญกาลัญญา

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุยฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์)

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรรเพชญ์ ชื่อนิติไพศาล)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชัยโชค ไวกาษา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตีบุญ เมฆากุลชาติ)

ชิตต์ เจริญกมลัญญาตา : ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย. (EFFECT OF IONOSPHERIC DELAY ON PERFORMANCE OF THE NETWORK-BASED RTK GPS IN THAILAND)  
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 141 หน้า.

ในปัจจุบัน เทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (Network-Based Real-Time Kinematic; NRTK) กำลังเป็นที่นิยมใช้งานในประเทศไทย โดยเทคนิคการรังวัดดังกล่าวนี้มีข้อดีคือ ใช้เวลาการรังวัดค่อนข้างเร็ว และได้ค่าพิกัดตำแหน่งในทันที แต่เทคนิคการรังวัดชนิดนี้ ก็มีข้อจำกัดที่ประสิทธิภาพเทคนิคการรังวัดดังกล่าวจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสถานีฐานเพิ่มขึ้น โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นในระบบเทคนิคการรังวัดดังกล่าว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์คือสาเหตุหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดชนิดนี้ลดลง

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาถึงการใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั้งโลก (GIM) และ โมเดลฯ ในพื้นที่ประเทศไทย (THIM) สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในระยะห่างระหว่างสถานีฐานขนาดต่างๆ ได้แก่ ขนาด 10-20, 30-50, 50-60 และ 60-80 กิโลเมตร โดยโมเดล GIM และ THIM นั้นได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Bernese 5.0 ทั้งนี้ในการศึกษาดังกล่าว ใช้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่ต่อเนื่องกันจำนวน 31 วัน จากสถานีฐานจีพีเอสในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดังกล่าวนี้ ทำได้โดยการวิเคราะห์ผลในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของตำแหน่ง ผลการประมวลผลชี้ให้เห็นว่า อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนาของระยะระหว่างสถานีฐานขนาดกลางเพิ่มขึ้น มากกว่า 9 % และ 16 % เมื่อใช้โมเดล GIM และ THIM ในการประมวลผลร่วมด้วย ตามลำดับ ในขณะที่ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานทุกขนาดไม่มีนัยสำคัญที่แตกต่างกัน สำหรับการใช้โมเดลทั้งสองดังกล่าว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การใช้โมเดล THIM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดนี้ในประเทศไทยได้มากกว่า การใช้โมเดล GIM โดยเฉพาะในระยะห่างระหว่างสถานีฐานขนาดกลาง

ภาควิชา.....วิศวกรรมสำรวจ.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสำรวจ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

## 5171812421 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS : NETWORK-BASED RTK GPS IN THAILAND/ IONOSPHERIC DELAY /VRS

TEETAT CHAROENKALUNYUTA : EFFECT OF IONOSPHERIC DELAY ON PERFORMANCE OF THE NETWORK-BASED RTK GPS IN THAILAND.

ADVISOR : PROF. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D., 141 pp.

Nowadays, the Network-Based Real Time Kinematic GPS (NRTK) becomes more popular in Thailand. The advantages of NRTK positioning are the rover’s observation period become much shorter and the coordinates could be obtained in real-time. However, the NRTK positioning is limited by the distance between the reference stations. The performance of the NRTK usually is degraded when the baseline length between the reference stations becomes longer. This effect may due to the increasing of one of the main error sources in the NRTK system that is the ionospheric delay.

In this thesis, the NRTK Virtual Reference Station (VRS) systems in Thailand were simulated in the difference reference station spacings i.e. 10-20, 30-50, 50-60 and 60-80 km. The ionospheric models i.e. the Global Ionospheric Maps (GIM) and the Thai Ionospheric Maps (THIM) that was generated by Bernese 5.0 were studied for the improvement of the NRTK-VRS performance in each reference station spacings. That NRTK-VRS performance were indicated by the three indicators that is the ambiguity fixing rate, the number of the position jump and the Root Mean Square Error (RMSE) of the positions. The results show that the ambiguity fixing rate of the middle spacings were improved more than 9% and 16% when using GIM and THIM respectively. While the number of the position jump and RMSE are no significant difference in overall spacing. Thus, it can conclude that THIM more effective than GIM for the improvement of the NRTK-VRS performance in Thailand especially in the middle spacings.

Department : .....Survey Engineering..... Student’s Signature.....

Field of Study : ...Survey Engineering... Advisor’s Signature.....

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อาจารย์สมศักดิ์ สันประเสริฐ วิศวกรรังวัดชำนาญการพิเศษ กรมที่ดิน และ นางสาวพรทิพย์ ใจมั่น นิสิตปริญญาโท ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาช่วยตรวจรูปเล่ม และให้คำแนะนำต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้าเช่นกัน และข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และข้อแนะนำต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่าน

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง กรมอุตุนิยมวิทยา กรมแผนที่ทหาร องค์การ National Institute of Information and Communications Technology (NICT) ประเทศญี่ปุ่น องค์การ International GNSS Service (IGS) ประเทศสหรัฐอเมริกา บริษัท Trimble (Thailand) จำกัด บริษัท Hollywood International จำกัด บริษัท ESRI (Thailand) จำกัด และบริษัท เอสดีเอ็ม จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนเอื้อเฟื้อข้อมูลจีพีเอสเพื่อใช้งานวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวของข้าพเจ้า ผู้บังคับบัญชาและเพื่อนร่วมงาน ในกรมที่ดิน รวมถึงเพื่อน ๆ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่าน ที่สนับสนุน และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ต
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	6
บทที่ 2 แนวคิดพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 แนวคิดพื้นฐานของงานวิจัย.....	7
2.2 ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโลกที่มีต่อสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส.....	8
2.2.1 การล่าช้าอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นดาวเทียมจีพีเอสผ่าน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	8
2.3 สมการค่าสังเกตของการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส.....	20
2.3.1 ชูโดเรนจ์ (Code Pseudoranges).....	20
2.3.2 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase).....	22
2.3.3 Doppler Measurements.....	24
2.4 เทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียม.....	24
2.4.1 Ionosphere-Free Linear Combination.....	25
2.4.2 Geometry-Free Linear Combination.....	27

2.5	เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบสัมพัทธ์.....	28
2.5.1	การรังวัดแบบสถิต (Static).....	29
2.5.2	การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid Static).....	29
2.5.3	การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic ).....	29
2.5.4	การรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (Network-Based RTK).....	30
2.6	ระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย.....	32
2.7	เทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส.....	33
2.7.1	องค์ประกอบของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส.....	33
2.7.2	แนวคิดเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบต่างๆ.....	36
2.8	ทฤษฎีของระบบ VRS.....	41
2.9	ค่าคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส.....	46
2.9.1	ค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส (StationDependent Error).....	46
2.9.2	ค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส (DistanceDependent Error).....	47
2.10	งานวิจัยที่ผ่านมา.....	50
บทที่ 3	ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
3.1	ข้อมูลการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส.....	53
3.2	ข้อมูลสำหรับการประมวลผลความถูกต้องสูง.....	55
3.2.1	ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง.....	55
3.2.2	ข้อมูลการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ.....	58
3.3	ข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั้งโลก.....	59



บทที่ 4	วิธีดำเนินการวิจัย.....	61
4.1	การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทยในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง.....	62
4.2	การประเมินผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆในประเทศไทย....	69
4.2.1	วัตถุประสงค์.....	69
4.2.2	วิธีดำเนินการวิจัย.....	70
บทที่ 5	ผลการประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	90
5.1	ผลกระทบของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสสำหรับการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย.....	95
5.2	ค่าคลาดเคลื่อนหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย.....	96
5.3	การใช้โมเดล GIM สำหรับการลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย.....	98

5.4 การใช้โมเดล Thai Ionospheric Maps (THIM) สำหรับการลดค่าคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส แบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ใน ประเทศไทย.....	99
5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโมเดล THIM และ GIM.....	100
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	105
6.1 บทสรุป.....	105
6.2 ข้อจำกัด ปัญหาและอุปสรรค.....	106
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	107
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก .....	113
ภาคผนวก ก.....	114
ภาคผนวก ข.....	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเลขยกกำลังหนึ่ง สองและสาม โดยแยกตามคลื่น L1 และ L2 ภายใต้สภาวะการณ์ที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีความแปรปรวนเท่ากับ 100 TECU.....	11
2.2	แสดงค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียม จีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสพร้อมทั้งวิธีขจัด หรือลดค่าคลาดเคลื่อน.....	49
3.1	แสดงสถานีฐานจีพีเอสถาวรที่นำข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมมาใช้ในงานวิจัย.....	55
3.2	แสดงรายละเอียดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากหน่วยงาน IGS.....	58
4.1	แสดงอัตราผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัดของสถานีเปิดโล่งกับสถานีปกคลุม ระดับปานกลาง.....	64
4.2	แสดงค่า RMSE ทางตะวันออก ทางเหนือและทางตั้ง ของสถานีเปิดโล่ง และ สถานีปกคลุมระดับปานกลาง.....	65
4.3	แสดงรายละเอียดข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Bernese....	76
4.4	แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าพิกัดความถูกต้องสูงจำนวน 7 Sessions (วัน) ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสด้วยซอฟต์แวร์ Bernese.....	82
4.5	แสดงจำนวน Sessions ของการสร้างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) โดย 1 Session ใช้ ข้อมูลดาวเทียม 1 วัน.....	88
5.1	ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันจากการรังวัดด้วย ดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐาน จีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลในสามรูปแบบคือ อัตราของ ผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในขนาดของระยะห่างระหว่าง สถานีฐาน แบบต่างๆ ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	91

ข-1	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 10 – 20 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน CUSV.....	117
ข-2	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 10 – 20 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน DPT9.....	120
ข-3	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 30-50 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน CUSV.....	123

ข-4	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส ขนาด 30 – 50 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน RTSD.....	126
ข-5	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส ขนาด 50 – 60 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน CUSV.....	129
ข-6	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส ขนาด 50 – 60 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน TMDB.....	132
ข-7	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส ขนาด 60 – 80 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน LADP.....	135

ข-8	ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยระบบเครือข่าย สถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความ คลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 60 – 80 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน PKKT.....	138
-----	--	-----

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของสถานีฐานถึงสถานีผู้ใช้งานกับค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง ความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดและพื้นที่ให้บริการของเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที.....	2
1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของสถานีฐานถึงสถานีผู้ใช้งานกับค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง ความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดและพื้นที่ให้บริการของเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส.....	2
2.1 แสดงแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบชั้นเดียว (Single Layer).....	12
2.2 แสดงขนาดของสมการยกกำลังหนึ่งของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่น $L_1$ , $L_2$ และ $L_5$ โดยเป็นฟังก์ชันของมุม zenith เหนือตำแหน่งเครื่องรับ.....	13
2.3 แสดงค่าคาดการณ์ของจำนวนจุดบนดวงอาทิตย์ตั้งแต่ปี 1995 ถึงปี 2020 โดยแกนนอนคือช่วงเวลามีหน่วยเป็นปี และแกนตั้งคือค่าเฉลี่ย TEC มีหน่วยเป็น TECU.....	16
2.4 แสดงค่าเฉลี่ย TEC ทุกๆ 2 ชั่วโมง โดยแกนนอนคือช่วงเวลามีหน่วยเป็นปี และแกนตั้งคือค่าเฉลี่ย TEC มีหน่วยเป็น TECU ซึ่งกราฟเส้นสีแดงเป็นค่าโดยประมาณ และกราฟเส้นสีน้ำเงินเป็นค่าที่คาดการณ์ (ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 1995 ถึงเดือนกันยายน 2006) ซึ่งในปี 2002 มีค่าเฉลี่ย TEC สูงสุดเท่ากับ 60 TECU.....	17
2.5 แสดงแผนที่ไอโอโนสเฟียร์ของโลก (The Global Ionospheric Map-GIM) ในปี 2002 โดยแกนนอนคือช่วงเวลามีหน่วยเป็นชั่วโมง แกนตั้งคือตำแหน่งทางละติจูดมีหน่วยเป็นองศา และ ค่าเฉลี่ย TEC แสดงโดยสัญลักษณ์สีต่างๆ มีหน่วยเป็น TECU.....	17
2.6 แสดงพื้นที่อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกที่มีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	18

รูปที่		หน้า
2.7	แสดงการเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาระยะเวลาที่คลื่นจากดาวเทียมเดินทางมายังเครื่องรับ.....	21
2.8	แสดงพื้นที่การให้บริการการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสโดยกรรมที่ดิน.....	31
2.9	แสดงตัวอย่างการติดตั้งสถานีฐานจีพีเอสถาวร (ซ้าย) แสดงเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัด (ขวา) แสดงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดและอุปกรณ์สื่อสารที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ต.....	34
2.10	แสดงองค์ประกอบของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส.....	35
2.11	แสดงเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ FKP โดย $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ และ $R_4$ คือ ระบุค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากโมเดลของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์และวงโคจรของดาวเทียม.....	37
2.12	แสดงเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ MAC.....	39
2.13	แสดงเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS.....	40
2.14	แสดงแนวคิดการทำงานระบบ VRS.....	44
3.1	แสดงที่ตั้งสถานีฐานจีพีเอสถาวรที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
3.2	แสดงตัวอย่างของสถานที่ติดตั้งเสาอากาศเครื่องรับของสถานีฐานจีพีเอสถาวรของกรรมที่ดิน.....	54
3.3	แสดงที่ตั้งของสถานีฐานจีพีเอสถาวรซึ่งอยู่ในเครือข่ายการวิจัยและการให้บริการข้อมูลของ International GNSS Service (IGS).....	56
3.4	แสดงตัวอย่างของวงโคจรดาวเทียมแบบ Final ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553.....	57
3.5	แสดงที่ตั้งของสถานีฐานจีพีเอสทั่วโลกสำหรับคำนวณข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั้งโลก (GIM).....	59
3.6	แสดงตัวอย่าง GIM แบบ Final ของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553.....	60



รูปที่	หน้า	
4.1	แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสำหรับการศึกษาผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส แบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (NRTK) ในประเทศไทย.....	61
4.2	แสดงตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งานสำหรับการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย.....	62
4.3	แสดงสภาพแวดล้อมของสถานีผู้ใช้งานทั้งสองสถานีโดยรูปบนคือ สถานี ที่เปิดโล่ง และรูปล่างคือ สถานีที่มีสิ่งปกคลุมระดับปานกลาง.....	63
4.4	แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านตะวันออกโดยใช้ VRS ที่สถานีเปิดโล่ง....	65
4.5	แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านเหนือ โดยใช้ VRS ที่สถานีเปิดโล่ง.....	66
4.6	แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางดิ่งโดยใช้ VRS ที่สถานีเปิดโล่ง.....	66
4.7	แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านตะวันออกโดยใช้ VRS ที่สถานีปกคลุม ระดับปานกลาง.....	67
4.8	แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านเหนือ โดยใช้ VRS ที่สถานีปกคลุม ระดับปานกลาง.....	67
4.9	แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางดิ่งโดยใช้ VRS ที่สถานีปกคลุม ระดับปานกลาง.....	68
4.10	แสดงวิธีดำเนินการวิจัยสำหรับการประเมินผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อน ชนิดต่างๆต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดย อาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในระยะห่างระหว่าง สถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆ ในประเทศไทย.....	70
4.11	แสดงตัวอย่างการขยายไฟล์ RINEX ด้วยซอฟต์แวร์ crx2mx.....	72
4.12	แสดงหน้าเว็บไซต์ของ Center for Orbit Determination in Europe (CODE) สำหรับ ดาวน์โหลดข้อมูลเพื่อประมวลผลความถูกต้องสูงด้วย ซอฟต์แวร์ Bernese.....	73
4.13	แสดงหน้าเว็บไซต์ของ The Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) สำหรับดาวน์โหลดข้อมูลพิกัดตำแหน่งของสถานีที่ใช้ในการตรึง (Fixed) ค่าพิกัด.....	75

รูปที่	หน้า
4.14 แสดงลำดับโมดูลที่ใช้ในการประมวลผลด้วยวิธี Bernese Processing Engine (BPE)	77
4.15 แสดงการตรึงค่าพิกัดระบบ ITRF 2005 จากสถานี HYDE TCMS PIMO และ NTUS สำหรับการคำนวณค่าพิกัดความละเอียดสูงด้วยซอฟต์แวร์ Bernese	80
4.16 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ (ค่าพิกัดของแต่ละสถานี) ที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Bernese	81
4.17 แสดงที่ตั้งของสถานีฐานจีพีเอสที่นำข้อมูลมาใช้ในการประมวลผลเพื่อสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทย (Thai Ionospheric Map- THIM)	83
4.18 แสดงตัวอย่างของโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM (บน) และ THIM (ล่าง) ในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล ณ เวลา 9:00-11:00 น. เวลาประเทศไทย ของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2553	85
4.19 แสดงตัวอย่าง THIM ในรูปแบบไฟล์ IONEX ณ เวลา 9:00-11:00 น. เวลาประเทศไทยของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2553	86
4.20 แสดงการจำลองรูปสามเหลี่ยมที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานขนาดต่างๆ สำหรับการสร้างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) โดย 1) ไม่ใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์ (No model) 2) ใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM และใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทย (THIM)	87
4.21 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลแบบจลน์ระหว่างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) กับสถานีการรังวัดจีพีเอสจริง	89
5.1 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันของอัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity-Fixing Rate) ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานแบบต่างๆ ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	92
5.2 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันของจำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูงหรือค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ (Number of Position Jump) ในแนวราบ (บน) และแนวตั้ง (ล่าง) ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานแบบต่างๆ ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	93

รูปที่	หน้า	
5.3	แสดงกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวัน ของค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบ (บน) และแนวตั้ง (ล่าง) ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานแบบต่างๆ ของแต่ละโมเดล ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	94
5.4	แสดงกราฟผลลัพธ์จากการประมวลผลโดยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส แบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส 50-60 กิโลเมตร ของสถานีผู้ใช้งาน CUSV ใน วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 (DOY = 43) (วันที่จัดว่ามีความไม่สม่ำเสมอ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์น้อย) โดยเปรียบเทียบการไม่ใช้โมเดล ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (No model) ใช้โมเดล GIM และ THIM.....	103
5.5	แสดงกราฟผลลัพธ์จากการประมวลผลโดยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส แบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส 50-60 กิโลเมตร ของสถานีผู้ใช้งาน CUSV ใน วันที่ 3 มีนาคม 2553 (DOY = 62) (วันที่จัดว่ามีความไม่สม่ำเสมอ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูง) โดยเปรียบเทียบการไม่ใช้โมเดล ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (No model) ใช้โมเดล GIM และ THIM.....	104
ก-1	แสดงการแบ่งชั้นบรรยากาศของโลก.....	115
ก-2	แสดงค่าอุณหภูมิ ความสูง ความดัน และค่าไอ้ในบรรยากาศของชั้นบรรยากาศ โทรโพสเฟียร์และ สตราโทสเฟียร์.....	115
ก-3	แสดงชั้นบรรยากาศย่อยของไอโอโนสเฟียร์และ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนใน บริเวณพื้นที่ Mid-Latitude ซึ่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเวลากลางวันมี ขนาดสูงกว่าในเวลากลางคืน.....	116

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BPE	: Bernese Processing Engine
CODE	: Center for Orbit Determination in Europe
DGPS	: Differential GPS
DOL	: Department of Lands
DOY	: Day of Year
DPT	: Department of Public Works and Town & Country Planning
FKP	: Flaechen Korrektur Parameters
GIM	: Global Ionospheric Map
GLONASS	: GLObal Navigation Satellite System
GPS	: Global Positioning System
IGS	: International GNSS Service
IONEX	: IONosphere map Exchange
IRI	: International Reference Ionosphere
JPL	: The Jet Propulsion Laboratory
MAC	: Master-Auxiliary Concept
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NMEA	: National Marine Electronics Association
PPP	: Precise Point Positioning
RINEX	: Receiver INdependent Exchange
RMSE	: Root Mean Square Error
ROTI	: Rate of Change of TEC
RTCM	: The Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	: Real Time Kinematic
RTSD	: Royal Thai Survey Department
SD	: Standard Deviation
SIP	: Sub Ionosphere Point
SOPAC	: The Scripps Orbit and Permanent Array Center
TEC	: Total Electron Content

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

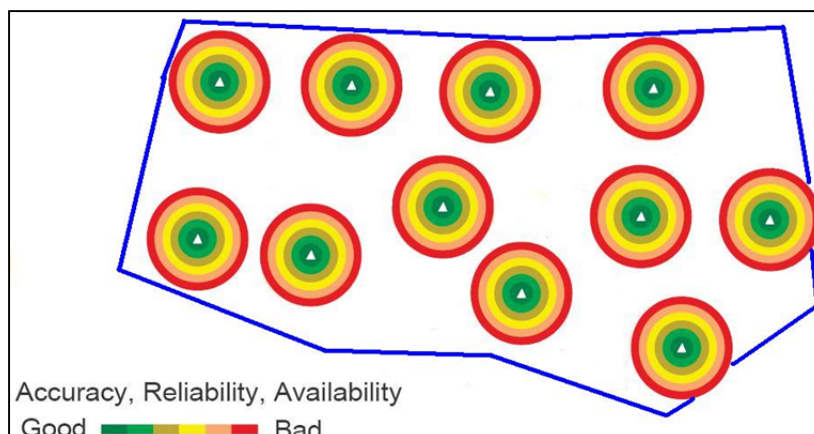
THIM	: Thai Ionospheric Map
TMD	: Thai Meteorology Department
UTC	: Coordinated Universal Time
UV	: Ultraviolet
VRS	: Virtual Reference Station

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและสภาพปัญหา

ในปัจจุบัน การรังวัดเพื่อการหาตำแหน่งด้วยดาวเทียมจีพีเอสแพร่หลายเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย วิธีการหาตำแหน่งด้วยดาวเทียมจีพีเอสที่นิยมนำมาใช้สำหรับงานที่ต้องการ Productivity สูง คือ เทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic-RTK) ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสอย่างน้อยสองเครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งจะถูกวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัด (สถานีฐาน) ส่วนอีกเครื่องจะถูกนำไปวาง ณ จุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด (สถานีผู้ใช้งาน) และต้องมีอุปกรณ์สื่อสาร อาทิเช่น โทรศัพท์มือถือ หรือวิทยุมือถือ สำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งาน เทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีนี้มีข้อดี คือ ใช้เวลาในการรังวัดค่อนข้างสั้น และการประมวลผลข้อมูลจะกระทำพร้อมกันขณะทำการรังวัด ทำให้ได้ค่าพิกัดตำแหน่งในทันที โดยมีความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับเซนติเมตร (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549) แต่เทคนิคการรังวัดแบบนี้มีข้อจำกัดคือ ความถูกต้องทางตำแหน่ง (Accuracy) และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัด (Reliability) จะลดลงเมื่อระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น อีกทั้งพื้นที่ขอบเขตสำหรับการทำงานได้ของแต่ละสถานีฐานไม่ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน (ดังรูปที่ 1.1) ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว เทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (Network-based RTK GPS) ซึ่งมีข้อดีคือ มีความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับเซนติเมตรเช่นเดียวกับเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที และมีความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดสูง โดยความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดตลอดจนขอบเขตในการทำงานนั้นเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันตลอดทั้งภายในโครงข่ายจีพีเอส (ดังรูปที่ 1.2) ทำให้มีพื้นที่ในการทำงานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังสนับสนุนการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ เช่น สะพาน หรือเขื่อนขนาดใหญ่ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของสถานีฐานถึงสถานีผู้ใช้งานกับค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง ความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดและพื้นที่ให้บริการของเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที



รูปที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของสถานีฐานถึงสถานีผู้ใช้งานกับค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง ความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดและพื้นที่ให้บริการของเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส

เนื่องจากกรมที่ดินมีการติดตั้งระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบ Virtual Reference Station (VRS) ในบริเวณพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลและเปิดใช้งานเป็นครั้งแรกในประเทศไทย (ซึ่งจัดอยู่ในเขตพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตร (Musa, 2007)) โดยมีระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวร (Station Spacing) ตั้งแต่ 27.8 กิโลเมตร ถึง 125.6 กิโลเมตร และมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรเท่ากับ 60 กิโลเมตร ในขณะที่ประเทศอื่นๆ ซึ่งอยู่ใกล้กันกับประเทศไทยและจัดอยู่ในเขตพื้นที่ใกล้

เส้นศูนย์สูตรเช่นกัน อาทิเช่น ประเทศมาเลเซียในพื้นที่ Peninsular (ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ติดกับประเทศไทย) มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานดาว ตั้งแต่ 30 กิโลเมตรถึง 100 กิโลเมตร (Nordlin, 2012) ประเทศฮ่องกง มีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานดาวเท่ากับ 10 กิโลเมตร (Hu, Chen et al., 2001) และประเทศสิงคโปร์มีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานดาวเท่ากับ 16.9 กิโลเมตร (Hu, Khoo et al., 2002) ในขณะที่ Wu (2006) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในพื้นที่ประเทศไต้หวันตอนใต้ พบว่าระยะห่างระหว่างสถานีฐานดาวที่ไกลที่สุดซึ่งเท่ากับ 34 กิโลเมตร จะให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบไม่เกิน 3 เซนติเมตรและทางตั้งไม่เกิน 4.5 เซนติเมตร ดังนั้นการศึกษาถึงระยะห่างระหว่างสถานีฐานดาวที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง ประกอบกับ Musa (2007) และ Lim, Rizos et al. (2008) ได้ระบุว่าค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีฐานจีพีเอสดาวสำหรับเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสนั้น ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์และค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรของดาวเทียม โดยค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวนสูงและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ศูนย์สูตร (Hernandes, Juan et al., 1999; Odijk, 2002) อาทิเช่น ในพื้นที่ประเทศไทย ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าและมีลักษณะราบเรียบ (Smooth) เมื่อเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยขึ้นอยู่กับค่าความสูงของพื้นที่ ณ ตำแหน่งของสถานีฐานฯด้วย กล่าวคือ หากความแตกต่างของค่าพิกัดทางด้านความสูงของสถานีฐานฯ ในระบบเครือข่ายมีความใกล้เคียงกัน ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นี้จะมีขนาดค่อนข้างน้อย และค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรของดาวเทียมสามารถขจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดชนิดนี้ได้โดย การใช้วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง (Final orbit) ในการประมวลผลร่วมด้วย ดังนั้นการศึกษาถึงค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงวิธีการลดขนาดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ในประเทศไทย มีความเป็นไปได้ที่จะช่วยให้เทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายฯ สำหรับประเทศไทย มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบ VRS พื้นที่ประเทศไทย
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบจากระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS
- 1.2.3 ศึกษาถึงวิธีการลดขนาดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งในระดับทั่วโลก (Global) และแบบจำลองฯที่สร้างขึ้นเองเฉพาะในพื้นที่ประเทศไทย ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS สำหรับประเทศไทย

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS (NRTK-VRS) ในประเทศไทย ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริงพื้นที่จังหวัดชลบุรี ในช่วงเวลา 11:21:00 - 00:21:00 เวลาประเทศไทย ของวันที่ 14 และ 15 สิงหาคม พ.ศ.2551 เป็นจำนวน 13 ชั่วโมง ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมสำหรับสถานีผู้ใช้งาน รุ่น Trimble 5700 โดยใช้ระบบสื่อสารระหว่างสถานีผู้ใช้งานกับศูนย์ควบคุมส่วนกลาง ผ่าน GPRS ด้วยโทรศัพท์มือถือ 2) การสร้างแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมาตร ด้วยการประมวลผลแบบภายหลัง (Post-Processing) โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียมจีพีเอสเท่านั้น (ไม่รวม ดาวเทียม GLONASS) แบบ RINEX จาก 6 สถานีฐานจีพีเอสที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมาตร ระหว่างวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ถึง 3 มีนาคม 2553 จำนวน 31 วัน และ 3) การจำลองการทำงานแบบการรังวัด NRTK-VRS พื้นที่กรุงเทพฯ และปริมาตร ในระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆ ได้แก่ ขนาด 10-20, 30-50, 50-60 และ 60-80 กิโลเมตร โดยใช้ข้อมูล RINEX จากดาวเทียมจีพีเอสเท่านั้น จาก 12 สถานีฐานจีพีเอสที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ และ

ปริมาตร ระหว่างวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ถึง 3 มีนาคม 2553 จำนวน 31 วัน ด้วยการประมวลผลแบบภายหลัง ร่วมกับแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก (Global Ionospheric Maps) หรือ แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมาตร

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสและเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส รวมถึงค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ ที่ส่งผลถึงเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายฯ ดังกล่าวด้วย
- 1.4.2 ประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสที่ติดตั้งโดยกรมที่ดิน
- 1.4.3 รวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในงานวิจัยทั้งหมด ประกอบด้วย ข้อมูลการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสข้อมูลแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก และข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสที่ให้ค่าความถูกต้องสูง และข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม ข้อมูลพารามิเตอร์การวางตัวของโลก ข้อมูล Antenna Phase Variation และข้อมูล Ocean Loading เป็นต้น
- 1.4.4 ศึกษาการใช้งานซอฟต์แวร์ Bernese 5.0 ในการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสทั้งแบบประมวลผลทีละขั้นและแบบอัตโนมัติ
- 1.4.5 ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสำหรับเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย พร้อมทั้งวิเคราะห์หาปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนสำหรับเทคนิคการรังวัดฯ ดังกล่าว
- 1.4.6 ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก สำหรับเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย
- 1.4.7 ประมวลผลข้อมูลจีพีเอสสำหรับการสร้างแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของประเทศไทย
- 1.4.8 ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของประเทศไทย สำหรับเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย

1.4.9 วิเคราะห์ เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ สรุปผลและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.5.1 ความเหมาะสมของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสถาวรสำหรับการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในพื้นที่ประเทศไทย
- 1.5.2 คุณลักษณะของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สัมพันธ์กับประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบ VRS พื้นที่ประเทศไทย
- 1.5.3 วิธีการลดขนาดค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS พื้นที่ประเทศไทย

## บทที่ 2

### แนวคิดพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดพื้นฐานของงานวิจัย

เทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสเป็นที่แพร่หลายและนิยมใช้ในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก โดยเทคนิคการรังวัดชนิดนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ 1) สถานีฐานจีพีเอสถาวร (GPS Permanent Station) 2) ศูนย์ควบคุมการทำงาน (Control Center) และ 3) สถานีผู้ใช้งาน (Rover) ซึ่งหลักในการทำงานของเทคนิคการรังวัดฯ ดังกล่าว เริ่มต้นจากการที่สถานีฐานจีพีเอสถาวรแต่ละแห่งจะทำการประมาณค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์และ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียม (Ionospheric Delay, Tropospheric Delay and Satellite Orbit Bias) (Musa, 2007; Lim, Rizos et al., 2008) หลังจากนั้น ศูนย์ควบคุมฯ จะใช้ข้อมูลการประมาณค่าคลาดเคลื่อนฯของแต่ละสถานีฐานฯดังกล่าว ทำการสร้างค่าแก้ของค่าคลาดเคลื่อนฯนั้นซึ่งมีขอบเขตอยู่ภายในโครงข่ายสถานีฐานฯ เท่านั้น จากนั้น ศูนย์ควบคุมฯ จะส่งค่าแก้ฯ ดังกล่าวให้แก่สถานีผู้ใช้งานโดยตรง ซึ่งสถานีผู้ใช้งานจะนำค่าแก้ฯนี้ไปประมวลผลเพื่อให้ได้ค่าพิกัดตำแหน่งในทันที ดังนั้นเทคนิคการรังวัดดาวเทียมฯนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการประมาณค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามในภูมิภาคใกล้เส้นศูนย์สูตร Musa (2007: 33) ระบุว่า เป็นภูมิภาคที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวนสูงสุดเมื่อเทียบกับภูมิภาคอื่นในโลก และตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 กรมที่ดินได้ติดตั้งระบบการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลซึ่งเป็นพื้นที่ค่อนข้างราบโดยมีความแตกต่างทางตำแหน่งในแนวตั้งค่อนข้างน้อย ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์น่าจะมีผลกระทบน้อยสำหรับเทคนิคการรังวัดดาวเทียมฯ ชนิดนี้ในประเทศไทย จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเชื่อได้ว่า ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อเทคนิคการรังวัดดาวเทียมฯ ชนิดนี้ในประเทศไทย ดังนั้นการประมาณค่าคลาดเคลื่อนฯ ชนิดนี้โดยการสร้างแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกต้องและเหมาะสมสำหรับพื้นที่ประเทศไทยน่าจะเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมฯ ชนิดนี้ในประเทศไทย

## 2.2 ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโลกที่มีต่อสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

ชั้นบรรยากาศของโลกประกอบด้วยประจุไฟฟ้า อะตอมที่เป็นกลาง โมเลกุลและ กลุ่มก๊าซต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเบื้องต้น คือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง (Neutral Atmosphere) และชั้นบรรยากาศที่เป็นไอโอไนซ์หรือเรียกว่า ไอโอโนสเฟียร์ (Ionized Atmosphere) โดยรายละเอียดของชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แสดงในภาคผนวก ก

ผลกระทบหลักของชั้นบรรยากาศที่มีต่อคลื่นดาวเทียมจีพีเอสเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง โดยเมื่อคลื่นดาวเทียมจีพีเอสเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกจะเกิดการหักเหของคลื่น ซึ่งในงานการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสนั้น ผลกระทบจากการหักเหดังกล่าว ถือเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งต้องการขจัดให้หมดไป แต่สำหรับในการศึกษาด้านชั้นบรรยากาศของโลกนั้นผลกระทบจากการหักเหถือว่าเป็นตัวสัญญาณชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถศึกษาเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับชั้นบรรยากาศของโลกได้ดียิ่งขึ้น

### 2.2.1 การล่าช้าอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นดาวเทียมจีพีเอสผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ถ้าคลื่นเดินทางจากดาวเทียมผ่านสุญญากาศ เวลาที่ใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมคูณกับความเร็วแสงจะเท่ากับระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ แต่ในความเป็นจริงชั้นบรรยากาศของโลกไม่ได้เป็นสุญญากาศ ดังนั้นคลื่นจึงเกิดการหักเห ทำให้ความเร็วและทิศทางของคลื่นเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อคลื่นสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส อธิบายได้โดยค่า Ionospheric Refractive Index

#### 2.2.1.1 Ionospheric Refractive Index

ค่า Refractive Index ( $n$ ) สำหรับตัวกลางในชั้นบรรยากาศ นิยามโดยอัตราส่วนระหว่างความเร็วในการแพร่กระจายของสัญญาณในสภาวะสุญญากาศ ( $n$ ) ต่อความเร็วในตัวกลาง ( $v$ ) (Misra and Enge, 2001):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

โดยที่

$c$  คือ ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

$v$  คือ ความเร็วในสื่อตัวกลางอื่นๆ (เมตร/วินาที)

ค่า  $n$  จะเท่ากับ 1 เมื่อคลื่นเดินทางผ่านสุญญากาศ เนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีตัวกลางที่มีคุณสมบัติทำให้คลื่นวิทยุเกิดการกระจายตัว (Dispersive) ดังนั้นค่า Refractive Index จะแปรผันผกผันกับความถี่ของคลื่น (Langley, 1998a) โดยค่า Ionospheric Refractive Index สามารถใช้สมการกำลังหนึ่งประมาณค่าโดยใช้สูตรของ Appleton-Hartree (Teunissen, 1998) :

$$n = 1 \pm \frac{\alpha N_e}{f^2} \quad (2.2)$$

โดยที่

$\alpha$  คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $40.3e10^{16} \text{ ms}^{-2} \text{ TECU}^{-1}$

$N_e$  คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron Density) (electron.m<sup>-3</sup>)

$f$  คือ ค่าความถี่ของคลื่น (Hz)

จากสมการที่ (2.2) ถ้า  $n > 1$  แสดงว่า คลื่นเดินทางได้ช้าลง (Group Refractive Index) ในทางตรงกันข้ามถ้า  $n < 1$  แสดงว่า คลื่นเดินทางได้เร็วขึ้น (Phase Refractive Index) ดังนั้นจากคุณสมบัติข้างต้นจะเห็นว่าเราสามารถแยกได้ระหว่างความเร็วเฟส (Phase Velocity) หรือความเร็วกลุ่ม (Group Velocity) เนื่องด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส ถูก Modulate เป็น PRN Codes (Pseudo Random Noise) ดังนั้นเมื่อสัญญาณนี้เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะถูกรวมกันเป็นหนึ่งเดียว (Superposition of a Group) จึงทำให้สัญญาณดังกล่าวเดินทางได้ช้าลง (Group Delay) ในขณะที่เดียวกัน คลื่นส่งของสัญญาณจีพีเอส (GPS Carrier Phase) ไม่ได้ถูก Modulate จึงทำให้เดินทางได้เร็วขึ้น (Phase Delay) ซึ่งจากสมการที่ (2.2) จะสรุปได้ว่า Ionospheric Refractive Index จะมีค่าที่แตกต่างกันระหว่าง คลื่น L1 และ L2

### 2.2.1.2 First Order Ionospheric Delay Modeling

เมื่ออินทิเกรต สมการที่ (2.2) กับเส้นทางของการเดินทางของคลื่นดาวเทียมจีพีเอสผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ( $S$ ) จะได้ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมถึงเครื่องรับของซูโดเรนจ์ (Code Pseudoranges) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phases) (Langley, 1996) ดังนี้

$$R_r^S = \int_S \left(1 + \frac{\alpha N_e}{f^2}\right) dS = \rho_r^S + \Delta^{Iono} \quad (2.3)$$

$$\varphi_r^S = \int_S \left(1 - \frac{\alpha N_e}{f^2}\right) dS = \rho_r^S - \Delta^{Iono} \quad (2.4)$$

โดยที่

$R_r^S$  คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัสจากดาวเทียม  $S$  ถึงเครื่องรับ  $r$  (เมตร)

$\rho_r^S$  คือ ระยะทางจากดาวเทียม  $S$  ถึงเสาอากาศของเครื่องรับ  $r$  (เมตร)

$S$  คือ เส้นทางของการเดินทางของคลื่นดาวเทียมจีพีเอสผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)

$\Delta^{Iono}$  คือ สมการกำลังหนึ่งค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)

$\varphi_r^S$  คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่งจากดาวเทียม  $S$  ถึงเครื่องรับ  $r$  (เมตร)

$$\Delta^{Iono} = \frac{\alpha}{f^2} TEC \quad (2.5)$$

เมื่อ  $TEC$  คือปริมาณรวมของอิเล็กตรอน (Total Electron Content) ตามแนวเส้นทางโดย 1 หน่วยของ TEC (TECU) จะเท่ากับ  $10^{16}$  electron.m<sup>-2</sup> ซึ่งสมการที่ (2.5) แสดงให้เห็นว่า คลื่นที่มีความถี่สูงจะทำให้การ Delay นั้นลดลง ส่วนค่าคงที่  $\alpha$  เท่ากับสมการที่ (2.6) (Rothacher and Mervart, 1996)

$$\alpha = 40.3e10^{16}ms^{-2} TECU^{-1} \quad (2.6)$$

มีข้อควรพิจารณาคือ เนื่องด้วย สมการที่ (2.2) ได้ตัดค่า Ionospheric Delay ที่มีค่าตั้งแต่เลขยกกำลังสองขึ้นไป ดังนั้นสมการที่ (2.3) - (2.5) จึงไม่ได้นำค่าดังกล่าวมาคำนวณด้วย ซึ่ง Bassiri and Hajj (1993) ได้ศึกษาถึงขนาดของผลกระทบจากค่า Ionospheric Delay ของเลขยกกำลังต่างๆ (ดังตารางที่ 2.1) พบว่า ค่า Ionospheric Delay ของเลขยกกำลังหนึ่งมีขนาดใหญ่กว่ามากเมื่อเทียบกับค่าเลขยกกำลังที่สูงกว่า ดังนั้นในสมการที่ (2.3) - (2.5) จึงสมมุติว่า สัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเดินทางเป็นเส้นตรงเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ซึ่งในความเป็นจริงสัญญาณมีการบิดเบี้ยว เนื่องจากอิทธิพลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์) โดย Odijk (2002) ได้คำนวณถึงผลกระทบจากการที่สัญญาณมีการบิดเบี้ยวภายใต้สภาวะการณ์ที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวนมากที่สุดพบว่า มีผลกระทบต่อค่าความถูกต้องอยู่ในระดับมิลลิเมตรเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเลขยกกำลังหนึ่ง สองและ สาม โดยแยกตามคลื่น L1 และ L2 ภายใต้สภาวะการณ์ที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวนเท่ากับ 100 TECU (Bassiri and Hajj, 1993)

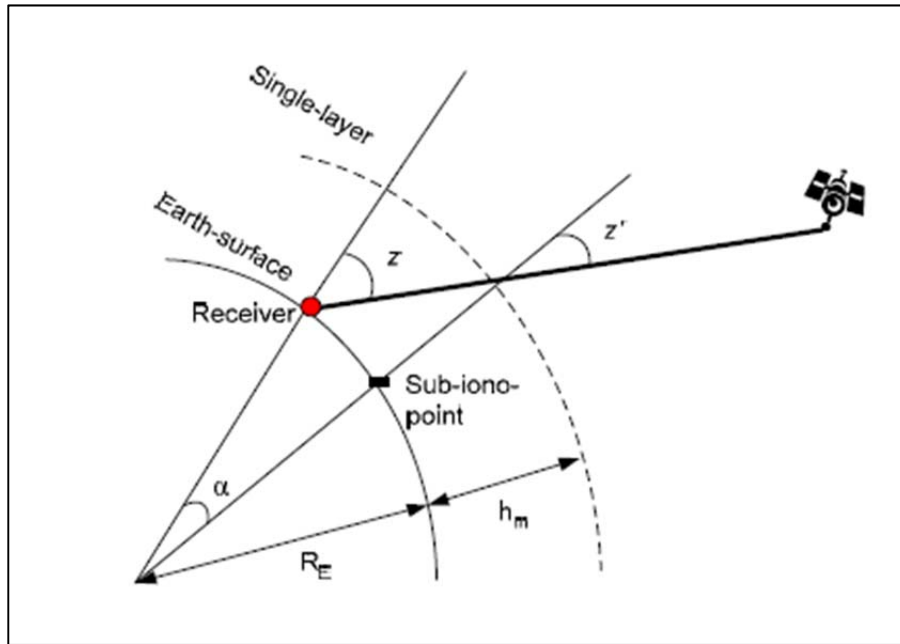
<b>Ionospheric Delay</b>	<b>Delay to L1 (m)</b>	<b>Delay to L2 (m)</b>	<b>RRE (m)</b>
First Order	16.223	26.718	0.0
Second Order	~-0.016	~-0.033	~-0.011
Third Order	~-0.009	~-0.002	~-0.007

### 2.2.1.3 Single Layer Ionospheric Delay Modeling

โดยทั่วไป แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ใช้สมมุติฐานที่ว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศชั้นเดียวแบบบางๆ (Single Layer) ที่มีการกำหนดความสูงเหนือพื้นผิวโลกคงที่ โดยแบบจำลอง



ดังกล่าวจะพิจารณามุม Zenith ( $z$ ) เหนือเครื่องรับและมุม Zenith ( $z'$ ) เหนือพื้นผิวชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่อยู่สูงจากพื้นผิวโลกเท่ากับ  $h_m$  โดยมุมทั้งสองดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่คลื่นจากดาวเทียมเดินทางผ่านไปยังเครื่องรับ (ดูรูปที่ 2.1)

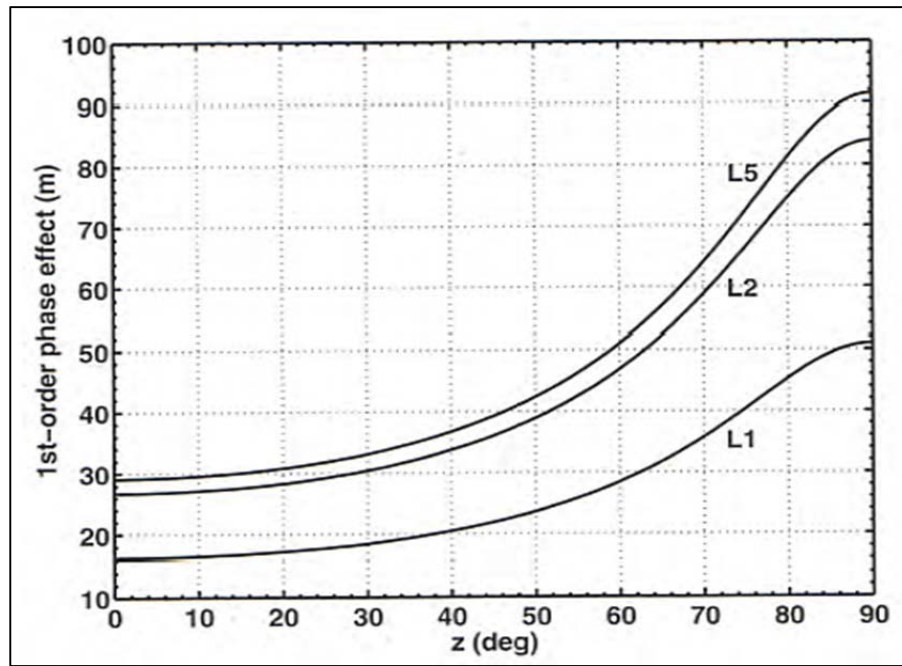


รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบชั้นเดียว (Single Layer) (Musa, 2007)

ทั้งนี้ หากพิจารณาที่มุม  $z$  ความคลาดเคลื่อนของคลื่นจะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับขนาดของมุม  $z$  เนื่องจากหากมุม  $z$  มีขนาดใหญ่ แสดงว่าเส้นทางของคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีระยะทางมากกว่าเส้นทางของคลื่น  $z$  ที่มีขนาดเล็กกว่า ดังนั้น คลื่นจากดาวเทียมที่อยู่ใกล้เส้นขอบฟ้าจะมีค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าคลื่นจากดาวเทียมที่อยู่ไกลจากเส้นขอบฟ้า

Odiik (2002) ได้คำนวณหาขนาดของสมการยกกำลังหนึ่งของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีผลต่อคลื่นส่ง  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_5$  โดยเป็นฟังก์ชันของมุม Zenith เหนือตำแหน่งเครื่องรับ โดยสรุปได้ว่า ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่น  $L_1$  มีขนาดตั้งแต่ 16 เมตร (ตำแหน่งดาวเทียมอยู่ที่เหนือหัวเครื่องรับ) ถึง 50 เมตร (ตำแหน่งดาวเทียมอยู่ที่เส้นขอบฟ้า) ทั้งนี้

ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศดังกล่าวของคลื่น  $L_2$  และ  $L_5$  มีขนาดใหญ่กว่า  $L_1$  (ดูรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 แสดงขนาดของสมการยกกำลังหนึ่งของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่น  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_5$  โดยเป็นฟังก์ชันของมุม Zenith เหนือตำแหน่งเครื่องรับ (Odijk, 2002)

#### 2.2.1.4 Mapping Function ของการคำนวณค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

Mapping Function คือวิธีการ Projected ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ตำแหน่งเอียงต่างๆ (Slant) ลงสู่ตำแหน่งทางตั้ง (Vertical) ของเครื่องรับ โดยทั่วไปค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้คือ TEC และสมการที่ใช้ทั่วไป ได้แก่

$$f(z) = \frac{1}{\cos z} \quad (2.7)$$

โดย  $z$  มีหน่วยเป็นเรเดียน

สมการ Mapping Function อื่นๆที่เป็นที่นิยม ได้แก่ สมการของ Klobuchar (2006)

$$f(E) = 1 + 16 \left[ 0.53 - \frac{E}{\pi} \right]^3 \quad (2.8)$$

โดยที่  $E = 90^\circ - z$  คือ มุมระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ (องศา)

ดังนั้น จากสมการที่ (2.5) และ (2.7) จะได้

$$\Delta^{Iono} = \frac{1}{\cos z'} \cdot \frac{\alpha}{f^2} VTEC \quad (2.9)$$

โดยที่

$$z' = \sin^{-1} \left[ \frac{R_E}{R_E + h_m} \sin(z) \right] \quad (2.10)$$

VTEC คือ Vertical TEC (TECU)

$R_E$  คือ รัศมีของโลก (โดยปกติเท่ากับ 6371 กิโลเมตร)

$z$  คือ มุม Zenith เหนือเครื่องรับ (เรเดียน)

$z'$  คือ มุม Zenith เหนือพื้นผิวชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เรเดียน)

$h_m$  คือ ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือพื้นผิวโลก ซึ่งโดยทั่วไปนิยมกำหนดค่าอยู่ที่ 300-400 กิโลเมตร

หากนำสมการที่ (2.7) และ (2.9) มาเขียนใหม่จะได้

$$\frac{VTEC}{TEC} = \cos z' \quad (2.11)$$

อย่างไรก็ตาม Code (2006) ได้ Modify สมการ Single Layer Mapping Function โดยเปลี่ยนค่าจาก  $\sin(z)$  เป็น  $\sin(\alpha z)$  ในสมการที่ (2.10) ดังนั้นจะได้

$$z' = \sin^{-1}\left[\frac{R_E}{R_E+h_m} \sin(\alpha z)\right] \quad (2.12)$$

โดยที่

$\alpha$  คือ มุมระหว่างเครื่องรับกับตำแหน่ง Sub Ionosphere Point (SIP) (เรเดียน) (ดังรูปที่ 2.1) และค่าพิกัดที่ตำแหน่งของ SIP เป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่คลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Piercing Point) ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้ (Kleusberg, 1998):

$$\eta = z' - z \quad (2.13)$$

$$\varphi_{SIP} = \sin^{-1}[\cos \eta \sin \varphi' + \sin \eta \cos \varphi \cos A'] \quad (2.14)$$

$$\lambda_{SIP} = \lambda' + \left[\frac{\sin \eta \sin A'}{\cos \varphi}\right] \quad (2.15)$$

โดยที่

$\varphi_{SIP}$  คือ ละติจูด ณ ตำแหน่ง SIP (องศา)

$\lambda_{SIP}$  คือ ลองจิจูด ณ ตำแหน่ง SIP (องศา)

$\varphi'$  คือ ละติจูดของตำแหน่งเครื่องรับ (องศา)

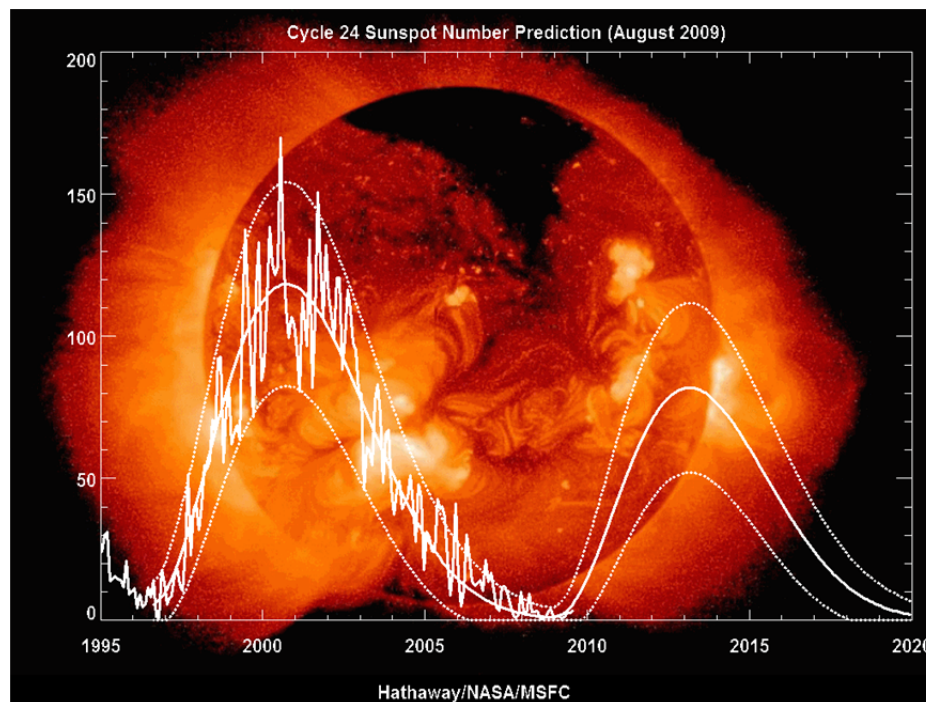
$\lambda'$  คือ ลองจิจูดของตำแหน่งเครื่องรับ (องศา)

$A'$  คือ อะซิมุท ณ ตำแหน่งเครื่องรับ (องศา)

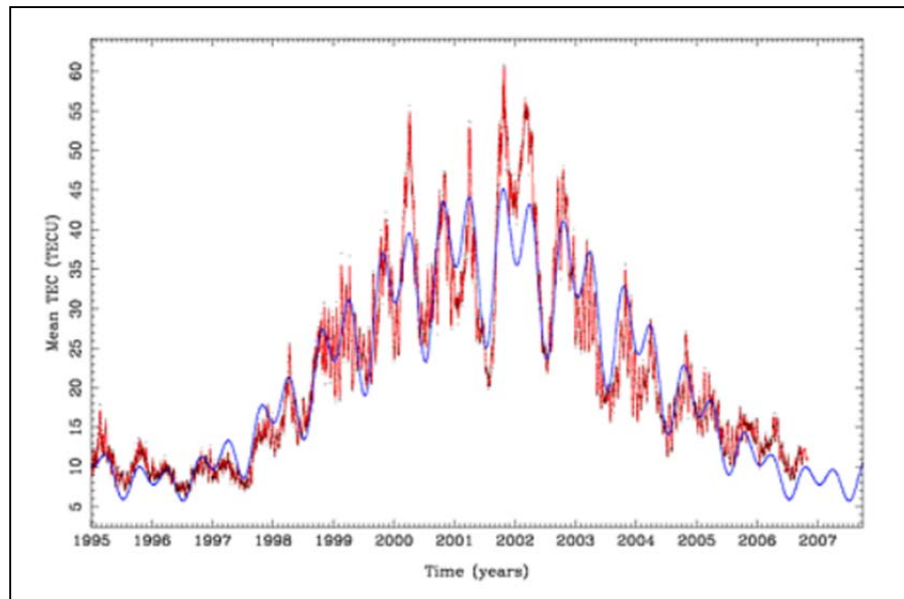
### 2.2.1.5 ความแปรปรวนของปริมาณรวมของอิเล็กตรอน (TEC)

ค่า TEC จะมีปริมาณสูงขึ้นอยู่กับ ระดับของรังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Activity) ค่าสนามแม่เหล็กของโลก ณ ตำแหน่งของเครื่องรับ (Geomagnetic Location) การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และช่วงเวลาในแต่ละวัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

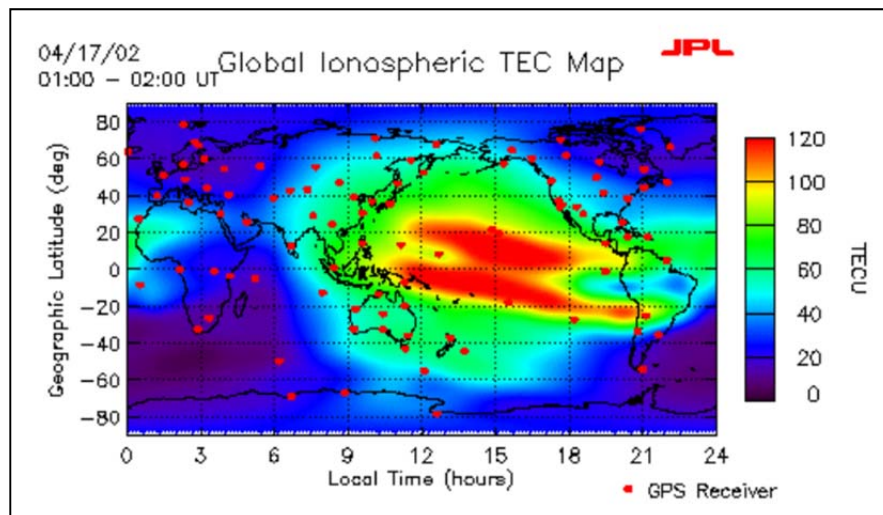
**2.2.1.5.1 รังสีจากดวงอาทิตย์ :** โดยปกติลักษณะของรังสีจากดวงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot Number) กล่าวคือถ้าจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์มีจำนวนมากจะทำให้ความเข้มจากรังสีจากดวงอาทิตย์มีค่ามาก ส่งผลให้ค่า TEC มีปริมาณสูงตามไปด้วย ซึ่งองค์การ NASA ได้ทำการศึกษาจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (ดูรูปที่ 2.3) จากกราฟสรุปได้ว่าจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์จะมีมากที่สุดตามช่วงเวลาของวัฏจักรสุริยะ (Solar Cycle) ที่เกิดขึ้นทุกๆ 11 ปี วัฏจักรสุริยะที่ 23 ในปี 2002 มีจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ มากที่สุดทำให้ในปี 2002 นี้มีค่าเฉลี่ย TEC สูงสุดตามไปด้วย (ดูรูปที่ 2.4) โดยในปี 2002 นี้ได้มีการทำแผนที่ไอโอโนสเฟียร์ของโลก (The Global Ionospheric Map-GIM) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 แสดงค่าคาดการณ์ของจำนวนจุดบนดวงอาทิตย์ตั้งแต่ปี 1995 ถึงปี 2020 โดยแกนนอนคือช่วงเวลามีหน่วยเป็นปี และแกนตั้งคือค่าเฉลี่ย TEC มีหน่วยเป็น TECU ([http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn\\_predict\\_1.gif](http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif))

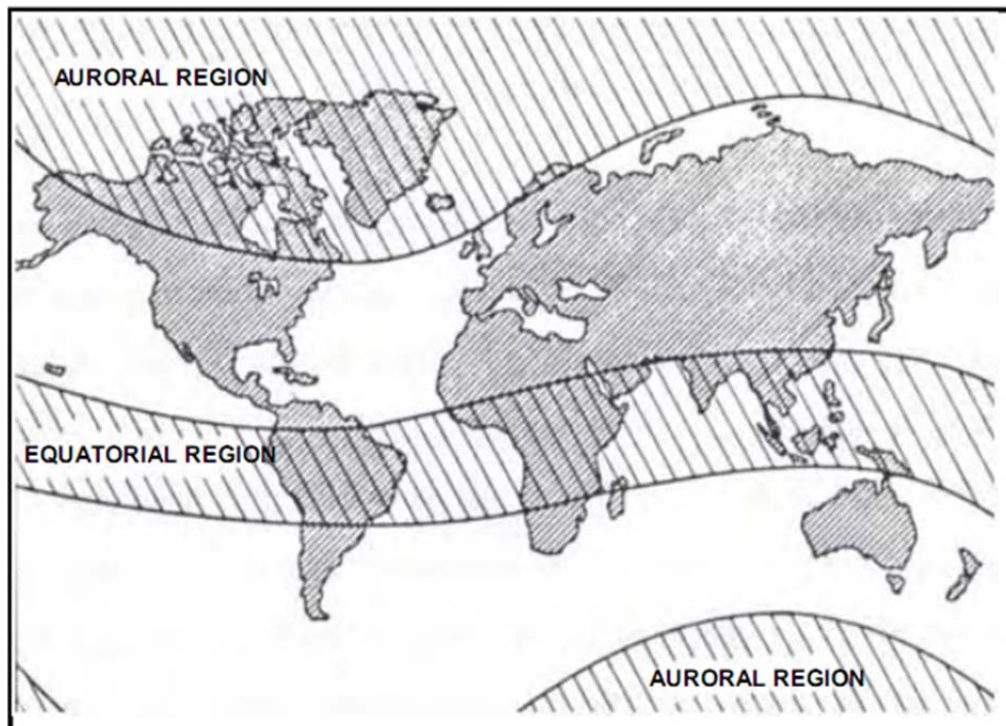


รูปที่ 2.4 แสดงค่าเฉลี่ย TEC ทุกๆ 2 ชั่วโมง โดยแกนนอนคือช่วงเวลามีหน่วยเป็นปี และแกนตั้งคือค่าเฉลี่ย TEC มีหน่วยเป็น TECU ซึ่งกราฟเส้นสีแดงเป็นค่าโดยประมาณและกราฟเส้นสีน้ำเงินเป็นค่าที่คาดการณ์ (ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 1995 ถึงเดือนกันยายน 2006) ซึ่งในปี 2002 มีค่าเฉลี่ย TEC สูงสุดเท่ากับ 60 TECU



รูปที่ 2.5 แสดงแผนที่ไอโอโนสเฟียร์ของโลก (The Global Ionospheric Map-GIM) ในปี 2002 โดยแกนนอนคือช่วงเวลามีหน่วยเป็นชั่วโมง แกนตั้งคือตำแหน่งทางละติจูดมีหน่วยเป็นองศา และ ค่าเฉลี่ย TEC แสดงโดยสัญลักษณ์สีต่างๆมีหน่วยเป็น TECU (<http://iono.jpl.nasa.gov/index.html>)

**2.2.1.5.2** **สนามแม่เหล็กของโลก** : ค่าสนามแม่เหล็กโลกมีอิทธิพลต่อประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิสระในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้นพื้นที่ที่มีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกสูง จะทำให้พื้นที่นั้นเกิดความแปรปรวน ความไม่สม่ำเสมอ และความเข้มของอิเล็กตรอนอิสระในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะสูง ตามไปด้วย (High Ionospheric Activity) รูปที่ 2.6 แสดงพื้นที่ที่อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกมีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยในพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตร (Equatorial Region หรือ Low-Latitude; ซึ่งนิยามโดยพื้นที่ตั้งแต่ละติจูด ที่  $23.5^{\circ}$  N ถึง  $23.5^{\circ}$  S) พื้นที่ผิวหน้าของ TEC (TEC Gradient) และค่า TEC จะมีค่ามากที่สุด ในขณะที่พื้นที่ใกล้ขั้วโลก (Auroral/Polar Region) จะมีความแปรปรวนและความไม่สม่ำเสมอของ TEC และในพื้นที่ Mid-Latitude จะมีพื้นที่ผิวหน้าของ TEC และค่า TEC ที่น้อยที่สุด (Wanninger, 1993)



รูปที่ 2.6 แสดงพื้นที่อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกที่มีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (พื้นที่แรเงา) (Seeber, 1993)

**2.2.1.5.3 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล :** โดยทั่วไประดับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในฤดูหนาวจะสูงกว่าในฤดูร้อน (Kleusberg, 1998) แต่เนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์จะมีปริมาณสูงในฤดูร้อนซึ่งมีผลโดยตรงต่อระดับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังนั้นข้อสรุปนี้จึงยังไม่ทราบปัจจัยที่แท้จริงที่ทำให้ระดับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในฤดูหนาวสูงกว่าฤดูร้อน โดย Kleusberg (1998) ได้คำนวณรูปแบบการหักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแนวตั้ง (The Ionosphere Vertical Refractivity Profiles) โดยใช้แบบจำลอง International Reference Ionosphere (IRI) สรุปว่าในฤดูหนาวมีการหักเหจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงกว่าในฤดูร้อนถึง 10 เท่า

**2.2.1.5.4 ช่วงเวลาในแต่ละวัน :** ในบริเวณพื้นที่ Mid-Latitude ค่า TEC จะมีปริมาณสูงในช่วงเวลากลางวัน (โดยเฉพาะในช่วงหลังเที่ยงวัน) และจะมีปริมาณน้อยที่สุดในช่วงเวลากลางคืนจนถึงรุ่งเช้า (Langley, 1996) อย่างไรก็ตามในบริเวณพื้นที่เขตร้อนค่า TEC กับมีอัตราที่กลับกันกับพื้นที่ Mid-Latitude โดย Wanninger (1995) สรุปว่า ในพื้นที่เขตร้อนค่า TEC จะมีความแปรปรวนมากในช่วงเวลาระหว่างหลังดวงอาทิตย์ตกดินจนถึงเที่ยงคืนและความแปรปรวนนี้จะมีอย่างต่อเนื่องไปจนถึงรุ่งเช้า ซึ่งถ้าพิจารณาค่า TEC เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ Mid Latitude และ พื้นที่เขตร้อนเฉพาะในเวลากลางวันนั้นจะพบว่าในพื้นที่ Mid Latitude ณ ช่วงเวลาที่มีค่าเฉลี่ยของรังสีจากดวงอาทิตย์สูงที่สุดอาจมีค่า TEC สูงถึง 40 TECU (โดยจะลดลงในช่วงเวลากลางคืน) แต่สำหรับ ค่า TEC ในพื้นที่เขตร้อนนั้นจะมีปริมาณที่สูงกว่าในพื้นที่ Mid-Latitude (Langley, 1996)

Warnant (2002) ได้สรุปว่า ปริมาณของ TEC ในทุกพื้นที่มีค่าประมาณ 20 TECU สำหรับช่วงเวลาที่มิมีรังสีจากดวงอาทิตย์ในปริมาณที่น้อย ในขณะที่ช่วงเวลาที่มิมีรังสีจากดวงอาทิตย์ในปริมาณที่มากนั้น ค่า TEC ในพื้นที่เขตร้อนมีค่าประมาณ 100 TECU ส่วนพื้นที่ Mid-Latitude นั้นค่า TEC มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 100 TECU ด้วยเช่นกัน ส่วน Zain et al. (2002) ได้รายงานถึงความแปรปรวนของปริมาณ TEC ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยสรุปว่า ปริมาณ TEC มีความแปรปรวนประมาณ 20%-25% สำหรับช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็ก (Geomagnetic Storms)

ความไม่สม่ำเสมอในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillations) อาจทำให้แอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณดาวเทียมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว



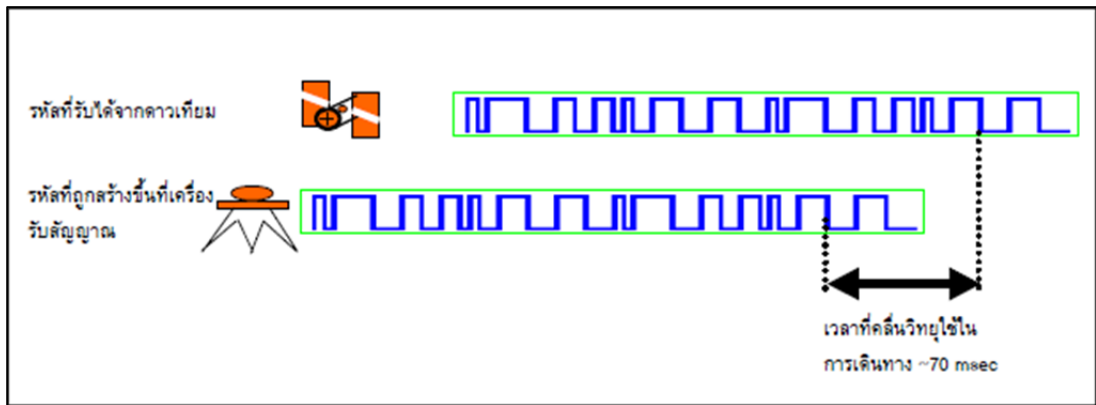
โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลา ซึ่งมักเกิดขึ้นในพื้นที่สนามแม่เหล็กโลกในเขตศูนย์สูตร และในเขตขั้วโลกเป็นส่วนใหญ่ (Wanninger, 1993; Langley, 1996) ในขณะที่บริเวณ mid-latitude มีการหักเหของคลื่นที่ไม่บ่อยนัก อย่างไรก็ตาม ยังมีผลกระทบจาก Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTIDs) ซึ่งเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ของความแปรปรวนตามธรรมชาติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นเสมอในบริเวณนี้ โดยเฉพาะในเวลากลางวันของฤดูหนาวในช่วงเวลาที่รังสีจากดวงอาทิตย์มีค่าสูง (Wanninger, 1999)

## 2.3 สมการค่าสังเกตของการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส

โดยทั่วไป ข้อมูลจากดาวเทียมจีพีเอสที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการรังวัดดาวเทียมมี 2 ชนิด คือ ซูดเรนจ์ (Code Pseudoranges) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phases) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 ซูดเรนจ์ (Code Pseudoranges)

ซูดเรนจ์คือ ระยะทางระหว่างดาวเทียมถึงเสาอากาศของเครื่องรับ ซึ่งการหาระยะทางนี้ทำได้โดยการนำระยะเวลาในขณะที่คลื่นจากดาวเทียมจีพีเอสเดินทางไปถึงเสาอากาศของเครื่องรับคูณด้วยความเร็วของคลื่นดังกล่าว (ซึ่งก็คือความเร็วแสง นั่นเอง) การนับเวลาดังกล่าวนั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบให้ตรงกันของรหัสที่ส่งมาจากดาวเทียมกับรหัสที่เครื่องรับสร้างขึ้น ดังนั้นระยะเวลาที่เลื่อนให้รหัสทั้งสองตรงกันก็คือระยะเวลาที่คลื่นจากดาวเทียมเดินทางมาถึงเครื่องรับนั่นเอง (ดังแสดงในรูปที่ 2.7) ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของระยะเวลาดังกล่าว ได้แก่ ความเที่ยงตรงของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ ซึ่งมักมีความแตกต่างกัน รวมถึงความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงของคลื่นจากดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกมายังเครื่องรับและปัจจัยอื่นๆด้วย ดังแสดงในสมการที่ (2.10) (Xu, 2003)



รูป 2.7 แสดงการเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาระยะเวลาที่คลื่นจากดาวเทียมเดินทางมายังเครื่องรับ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

$$R_r^S(t_r, t_e) = \rho_r^S(t_r, t_e) + c(\Delta\delta^S - \Delta\delta_r) + \Delta^{Orbit} + \Delta^{Iono} + \Delta^{Trop} + \Delta^{Tide} + \Delta^{Mul} + \epsilon \quad (2.16)$$

โดยที่

- $R_r^S$  คือ ชูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัสจากดาวเทียม  $S$  ถึงเครื่องรับ  $r$  (เมตร)
- $\rho_r^S$  คือ ระยะทางจากดาวเทียม  $S$  ถึงเสาอากาศของเครื่องรับ  $r$  (เมตร)
- $t_e$  คือ เวลาขณะที่คลื่นถูกส่งออกมาจากดาวเทียม (วินาที)
- $t_r$  คือ เวลาขณะที่คลื่นถึงเครื่องรับ (วินาที)
- $c$  คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)
- $\Delta\delta^S$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
- $\Delta\delta_r$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
- $\Delta^{Orbit}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากรวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
- $\Delta^{Iono}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
- $\Delta^{Trop}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (เมตร)

- $\Delta^{Tide}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงจากแผ่นดินและแรงจากมหาสมุทร (Earth Tide and Ocean Loading) (เมตร)
- $\Delta^{Mul}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
- $\epsilon$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในซุโดเรนจ์ที่วัดได้ของรหัส และค่าคลาดเคลื่อนแฝงอื่นๆ (เมตร)

### 2.3.2 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase)

สำหรับงานรังวัดดาวเทียมที่ต้องการค่าความละเอียดถูกต้องสูงในระดับที่ดีกว่าเซนติเมตร มีจำเป็นที่จะต้องประมวลผลโดยการใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง โดยการวัดเฟสของคลื่นส่งนั้น ประกอบด้วยการหาค่าของข้อมูล 3 ส่วนคือ 1) จำนวนลูกคลื่นเต็มรอบวงที่ซึ่งเรียกว่า เลขปริศนา (Ambiguity) 2) จำนวนการเปลี่ยนแปลงของลูกคลื่นที่เต็มรอบ 3) เศษเหลือของลูกคลื่น โดยการหาค่าเลขปริศนานั้นต้องการข้อมูลเฟสของคลื่นส่งจากดาวเทียมจำนวนมากพอสมควรจำนวนหนึ่งสำหรับคำนวณหา ส่วนการนับจำนวนการเปลี่ยนแปลงของลูกคลื่นที่เต็มรอบและการวัดค่าเศษเหลือของลูกคลื่นนั้นสามารถหาค่าได้ในทันทีด้วยวิธีการเปรียบเทียบให้ตรงกันระหว่างข้อมูลเฟสของคลื่นส่งและข้อมูลเฟสที่เครื่องรับสร้างขึ้น ขณะเวลาที่ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งเดินทางถึงเครื่องรับในครั้งแรก โดย เครื่องรับในปัจจุบันสามารถวัดค่าเศษเหลือของลูกคลื่นได้ละเอียดมากกว่า 1 ใน 100 ส่วนของความยาวคลื่นของคลื่นส่งซึ่งเทียบได้เท่ากับความต้องการในระดับมิลลิเมตร (Xu, 2003) ความละเอียดของการค่าเศษเหลือดังกล่าวนี้ เป็นเหตุผลที่บ่งชี้ว่าวิธีการวัดข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมีความถูกต้องสูงกว่าวิธีการวัดด้วยซุโดเรนจ์ สมการสำหรับการวัดเฟสของคลื่นส่งแสดงได้ดังนี้ (Xu, 2003)

$$\lambda\varphi_r^S(t_r, t_e) = \varrho_r^S(t_r, t_e) + c(\Delta\delta^S - \Delta\delta_r) + \lambda N_r^S + \Delta^{Orbit} - \Delta^{Iono} + \Delta^{Trop} + \Delta^{Tide} + \Delta^{Mul} + \epsilon \quad (2.17)$$

โดยที่

$\varphi_r^S$  คือ ซุโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่งจากดาวเทียม  $S$  ถึงเครื่องรับ  $r$  (เมตร)

$\rho_r^S$	คือ ระยะทางจากดาวเทียม $S$ ถึงเสาอากาศของเครื่องรับ $r$ (เมตร)
$t_e$	คือ เวลาขณะที่คลื่นถูกส่งออกมาจากดาวเทียม (วินาที)
$t_r$	คือ เวลาขณะที่คลื่นถึงเครื่องรับ (วินาที)
$C$	คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)
$\Delta\delta^S$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
$\Delta\delta_r$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
$\Delta^{Orbit}$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
$\Delta^{Iono}$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)
$\Delta^{Trop}$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (เมตร)
$\Delta^{Tide}$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงจากแผ่นดินและแรงจากมหาสมุทร (Earth Tide and Ocean Loading) (เมตร)
$\Delta^{Mul}$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
$\epsilon$	คือค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในซู่โคเรนจ์ที่วัดได้ของรหัสและค่าคลาดเคลื่อนแฝงอื่นๆ (เมตร)
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)
$N_r^S$	คือ ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่ง (หน่วยนับ)

จากสมการที่ (2.16) และ (2.17) จะเห็นว่ามีความแตกต่างกัน คือ ตัวแปร  $\lambda$  และ  $N_r^S$  จะมีเฉพาะในสมการที่ (2.17) และเครื่องหมายของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ( $\Delta^{Iono}$ ) จะตรงกันข้ามกันระหว่างสมการทั้งสอง อย่างไรก็ตามอย่างไรก็ดี ไม่ว่าจะรังวัดดาวเทียมด้วยข้อมูลรหัสตามสมการที่ (2.16) หรือรังวัดดาวเทียมด้วยข้อมูลเฟสของคลื่นส่งตามสมการที่ (2.17) จะเห็นได้ว่าข้อมูลทั้งสองนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนหลายชนิดแฝงอยู่ ดังนั้นจึงต้องหาวิธีที่จะขจัดหรือลดขนาดของความคลาดเคลื่อนดังกล่าวให้ได้มากที่สุด ซึ่งการขจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนนั้นมีหลายวิธีแต่ที่เป็นที่นิยมใช้แพร่หลายในซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูลจีพีเอสเชิงพาณิชย์และเชิงวิจัย ได้แก่ เทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียม (Data Combination) และเทคนิคการหาค่าต่างของข้อมูลดาวเทียม (Data Differencing)

### 2.3.3 Doppler Measurements

**Doppler Measurements** คือการวัดการเลื่อนของความถี่ของคลื่นดาวเทียม ซึ่งการเลื่อนดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของดาวเทียม โดยจะทำให้ค่าความถี่ของคลื่นดาวเทียมผิดไปจากความเป็นจริง โดยค่าดังกล่าวนี้เรียกว่า Doppler Count หรือ Integrated Doppler สามารถคำนวณได้ ดังสมการต่อไปนี้ (Xu, 2003)

$$D = \frac{dq_r^S(t_r, t_e)}{\lambda dt} - f \frac{d\beta}{dt} + \Delta f + \epsilon \quad (2.18)$$

โดยที่

$D$	คือ Doppler Count หรือ Integrated Doppler (เมตร)
$\frac{dq_r^S(t_r, t_e)}{dt}$	คือ การ Differentiating ของระยะทางจากดาวเทียม $S$ ถึงเสาอากาศของเครื่องรับ $r$ เทียบกับเวลา (เมตร/วินาที)
$\frac{d\beta}{dt}$	คือ การ Differentiating ของเทอมค่าคลาดเคลื่อนดาวเทียมและเครื่องรับ เทียบกับเวลา (เมตร/วินาที)
$\Delta f$	คือ ค่าแก้ค่าความถี่ (เมตร)
$\epsilon$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนแฝงอื่นๆ (เมตร)

### 2.4 เทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียม (Data Combination)

เทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียม เป็นวิธีการรวมข้อมูลรังวัดดาวเทียมจากเครื่องรับและสถานีเดียวกัน เพื่อขจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนบางชนิด ตัวอย่างเช่น การลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ เป็นต้น โดยทั่วไป ข้อมูลที่นำมาผ่านกรรมวิธีนี้ได้แก่ ข้อมูลรหัส (C/A Code,  $P_1$ ,  $P_2$  และ  $P_5$ ) ข้อมูลคลื่นส่ง ( $L_1$  Phase  $\varphi_1$ ,  $L_2$  Phase  $\varphi_2$  และ  $L_5$  Phase  $\varphi_5$ ) และข้อมูล Doppler Count ( $D_1$ ,  $D_2$  และ  $D_5$ ) แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียมนี้อาจทำให้ข้อมูลดาวเทียมเดิมมีคุณภาพลดลงได้

### 2.4.1 Ionosphere-Free Linear Combination

เป็นเทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียมที่นิยมใช้แพร่หลายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ข้อมูลสองชนิดที่มีความถี่แตกต่างกัน ซึ่งหลักการนี้ทำให้ต้องออกแบบดาวเทียมจีพีเอสให้ปล่อยสัญญาณในหลายความถี่

จากสมการที่ (2.17) และสมมติว่าได้ขจัดค่าคลาดเคลื่อนชนิดอื่นๆ หมดแล้ว เหลือเฉพาะค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้ (Hofmann-Wellenhof, 2008)

$$\lambda_1 \varphi_1 = \rho_r^S + c(\Delta\delta_r^S) + \lambda_1 N_1 - \Delta_1^{Iono} \quad (2.19)$$

$$\lambda_2 \varphi_2 = \rho_r^S + c(\Delta\delta_r^S) + \lambda_2 N_2 - \Delta_2^{Iono} \quad (2.20)$$

โดยที่

$\varphi_1, \varphi_2$  คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่งของความถี่  $L_1$  และ  $L_2$  ตามลำดับ (เมตร)

$\rho_r^S$  คือ ระยะทางจากดาวเทียม  $S$  ถึงเสาอากาศของเครื่องรับ  $r$  (เมตร)

$c$  คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

$\Delta\delta_r^S$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

$\lambda_1, \lambda_2$  คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่งที่ความถี่  $L_1$  และ  $L_2$  ตามลำดับ (เมตร)

$N_1, N_2$  คือ ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่งที่ความถี่  $L_1$  และ  $L_2$  ตามลำดับ (หน่วยนับ)

$\Delta_1^{Iono}, \Delta_2^{Iono}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ความถี่  $L_1$  และ  $L_2$  ตามลำดับ (เมตร)

เมื่อแทนค่า  $c = f\lambda$  และจัดรูปสมการที่ (2.19) และ (2.20) ใหม่ จะได้

$$\varphi_1 = \frac{f_1}{c} \rho_r^S + f_1(\Delta\delta_r^S) + N_1 - \frac{f_1}{c} \Delta_1^{Iono} \quad (2.21)$$

$$\varphi_2 = \frac{f_2}{c} \varrho_r^S + f_2 (\Delta \delta_r^S) + N_2 - \frac{f_2}{c} \Delta_2^{Iono} \quad (2.22)$$

และสามารถเขียนได้อีกแบบหนึ่งคือ

$$\varphi_1 = a f_1 + N_1 - \frac{b}{f_1} \quad (2.23)$$

$$\varphi_2 = a f_2 + N_2 - \frac{b}{f_2} \quad (2.24)$$

โดยที่

$$a = \frac{\varrho_r^S}{c} + \Delta \delta_r^S \quad \text{คือ Geometry Term}$$

$$b = \frac{f_i^2}{c} \Delta_i^{Iono} \quad \text{คือ Ionosphere Term}$$

ดังนั้น หากต้องการกำจัด ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หรือ Ionosphere Term จะทำได้โดยการคูณสมการที่ (2.23) ด้วย  $f_1$  และคูณสมการที่ (2.24) ด้วย  $f_2$  จากนั้นนำสมการทั้งสองมาลบกัน ดังแสดงได้ดังนี้

$$\varphi_1 f_1 - \varphi_2 f_2 = a(f_1^2 - f_2^2) + N_1 f_1 - N_2 f_2 \quad (2.25)$$

หากคูณสมการที่ (2.25) ด้วย  $f_1/(f_1^2 - f_2^2)$  และจัดเรียงใหม่ จะได้

$$\left[ \varphi_1 - \frac{f_2}{f_1} \varphi_2 \right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = a f_1 + \left[ N_1 - \frac{f_2}{f_1} N_2 \right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.26)$$

เมื่อแทนค่า Geometry Term  $a = \frac{\varrho_r^S}{c} + \Delta \delta_r^S$  ในสมการที่ (2.26) จะได้สมการ Ionosphere-Free Linear Combination สำหรับข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ดังนี้

$$\left[\varphi_1 - \frac{f_2}{f_1} \varphi_2\right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = \frac{f_1}{c} Q_r^S + f_1 \Delta \delta_r^S + \left[N_1 - \frac{f_2}{f_1} N_2\right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.27)$$

โดยที่ เทอม  $\left[\varphi_1 - \frac{f_2}{f_1} \varphi_2\right]$  เรียกว่า Geometric Residual อย่างไรก็ตามมีข้อควรพิจารณา คือสมการ Ionosphere-Free Linear Combination สำหรับข้อมูลเฟสของคลื่นส่งนี้ การหาค่าเลขปริศนาจะจำกัดเฉพาะระบบดาวเทียมจีพีเอสระบบเดียวเท่านั้นเนื่องจากเทอม  $\frac{f_2}{f_1}$  เป็นความถี่ที่ใช้เฉพาะในระบบดาวเทียมจีพีเอสเท่านั้น

ในทำนองเดียวกัน สามารถเขียนสมการ Ionosphere-Free Linear Combination สำหรับการวัดซูดอเรนจ์ได้ดังนี้

$$\left[R_1 - \frac{f_2}{f_1} R_2\right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = Q_r^S + c \Delta \delta_r^S \quad (2.28)$$

การรวมข้อมูลแบบ Ionosphere-Free Linear Combination สามารถจัดหรือลดขนาดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ อย่างไรก็ตามมีข้อควรพิจารณา คือ ชื่อ Ionosphere-Free นั้นอาจจะไม่ตรงกับความเป็นจริงนัก เนื่องจากการรวมข้อมูลแบบนี้ ยังคงต้องมีการประมาณค่าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากการหาค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ อยู่บนพื้นฐานว่าคลื่นส่งเดินทางเป็นเส้นตรง โดยทั้งที่ความเป็นจริงแล้วยังมีอิทธิพลอื่น เช่น สนามแม่เหล็กโลกซึ่งทำให้คลื่นส่งบิดเบี้ยวได้ เป็นต้น

#### 2.4.2 Geometry-Free Linear Combination

จากสมการที่ (2.23) และ (2.24) หากคูณสมการที่ (2.23) ด้วย  $f_2$  และ คูณสมการที่ (2.24) ด้วย  $f_1$  จะได้

$$f_2 \varphi_1 = a f_1 f_2 + N_1 f_2 - \frac{f_2}{f_1} b \quad (2.29)$$

$$f_1 \varphi_2 = a f_1 f_2 + N_2 f_1 - \frac{f_1}{f_2} b \quad (2.30)$$



นำสมการที่ (2.29) และ (2.30) มาลบกัน จะได้

$$f_2\varphi_1 - f_1\varphi_2 = N_1f_2 - N_2f_1 - \frac{f_2}{f_1}b + \frac{f_1}{f_2}b \quad (2.31)$$

แทนค่า  $b = \frac{f_i^2}{c}\Delta_i^{Iono}$  ลงในสมการที่ (2.31) และจัดรูปใหม่จะได้

$$f_2\varphi_1 - f_1\varphi_2 = N_1f_2 - N_2f_1 - \frac{f_1f_2}{c}(\Delta_1^{Iono} + \Delta_2^{Iono}) \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.32) คือ การรวมข้อมูลแบบ Geometry-Free Linear Combination จะเห็นว่า สามารถหาค่าเทอม  $(\Delta_1^{Iono} + \Delta_2^{Iono})$  ได้ ซึ่งก็คือ ขนาดของค่าคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั่นเอง

## 2.5 เทคนิคในการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบสัมพัทธ์ (Differential GPS- DGPS)

การหาค่าตำแหน่งแบบสัมพัทธ์เป็นการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งจะวางอยู่ที่จุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว เช่น หมุดหลักฐานแผนที่กรมที่ดิน หรือ หมุดหลักฐานแผนที่กรมแผนที่ทหาร เป็นต้น ส่วนเครื่องรับอีกเครื่องจะถูกนำไปวางตรงจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ผลที่ได้จากการทำงานในลักษณะนี้คือตำแหน่งเปรียบเทียบของจุดหนึ่ง เทียบกับอีกจุดหนึ่งหรือเป็นเส้นฐานที่มีทิศทางระหว่างจุดที่นำเครื่องรับทั้งสองไปตั้งรับสัญญาณ วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมาประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัด แต่ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะการใช้งานข้อมูลเฟสของคลื่นส่งเท่านั้น เนื่องจากจะให้ค่าความถูกต้องสูง (ประมาณ 1-5 เซนติเมตร) และซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลดังกล่าวใช้งานง่ายและมักได้รับมาพร้อมกับชุดเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัด ซึ่งการใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมาคำนวณหาค่าพิกัดนั้นจะใช้ได้กับเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดเท่านั้น โดยมีหลักการ ทำงานคือ สามารถคำนวณย้อนกลับไปหาขนาดของค่าคลาดเคลื่อนในข้อมูลซูโดเรนจ์ จากดาวเทียมแต่ละดวงได้เนื่องจากการทราบค่าพิกัดสถานีฐาน (ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะเป็นผลรวมของค่าคลาดเคลื่อนหลายชนิด เช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม และค่าคลาดเคลื่อนจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศ เป็นต้น) วิธีการรังวัดในสนาม

ของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งที่ใช้กันในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ดังนี้

### 2.5.1 การรังวัดแบบสถิต ( Static )

วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งจะถูกวางไว้บนจุดที่ทราบค่าพิกัดแล้วหรือสถานีฐาน ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการหาพิกัดหรือสถานีผู้ใช้งาน วิธีนี้เครื่องรับสัญญาณทั้งสองสถานีจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งอยู่กับที่เป็นระยะเวลาหนึ่งๆ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1-2 ชั่วโมง วิธีการนี้จะให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุด โดยเริ่มตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่มีความยาวไม่เกิน 20 กิโลเมตร) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

### 2.5.2 การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว ( Rapid Static)

วิธีการทำงานของวิธีนี้เหมือนกับวิธีการรังวัดแบบสถิตทุกประการ เพียงแต่ระยะเวลาในการรับสัญญาณจะสั้นลงเหลือประมาณ 10-20 นาที วิธีการนี้จะให้ค่าความถูกต้องระหว่าง 1-3 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

### 2.5.3 การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic )

วิธีการนี้มักถูกเรียกโดยย่อว่า RTK ซึ่งหลักการทำงานของวิธีการรังวัดหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ด้วยวิธีการทำงานแบบจลน์ในทันทีนั้นคล้ายคลึงกับวิธีการแบบสถิต คือต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งถูกวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด แต่กรณีของวิธีการหาตำแหน่งแบบจลน์ในทันทีนั้นสามารถเคลื่อนย้ายเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่สองได้ เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารระหว่างเครื่องรับทั้งสอง ซึ่งอาจเป็นเครื่องรับและส่งคลื่นวิทยุหรือโทรศัพท์มือถือ รวมถึงอุปกรณ์ที่สามารถติดต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตได้ การหาพิกัดของตำแหน่งจุดต่างๆ ด้วยวิธีนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง และเครื่องรับสัญญาณที่ใช้จะต้องเป็นเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่เท่านั้น วิธีการนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1-5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร)

(เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549) อย่างไรก็ตาม เทคนิคการรังวัดแบบนี้มีข้อจำกัดคือ ความถูกต้องทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดจะลดลงเมื่อระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น อีกทั้งพื้นที่ขอบเขตสำหรับการทำงานได้ของแต่ละสถานีฐานไม่ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 2.5.4 การรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (Network-Based RTK)

วิธีการนี้ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีในเรื่องของความถูกต้องทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดที่จะลดลงเมื่อระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น โดยทำให้ความถูกต้องทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัด ตลอดจนพื้นที่ขอบเขตสำหรับการทำงานเป็นมาตรฐานเดียวกันตลอดภายในโครงข่าย ทั้งนี้วิธีการนี้มีการทำงานในสนามคล้ายคลึงกับวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีแต่แตกต่างกันที่ผู้ใช้งานจำเป็นต้องขอรหัสผู้ใช้ (User Name) จากผู้ให้บริการระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (ซึ่งในประเทศไทยให้บริการโดยกรมที่ดิน) โดยที่ผู้ใช้งานใช้เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวไปวางตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดภายในพื้นที่ระบบเครือข่ายสถานีฐานฯ (ดูรูปที่ 2.8 ประกอบ) โดยในปี 2553 พื้นที่ให้บริการครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพฯ และภาคกลางบางส่วน ซึ่งเครื่องรับสัญญาณที่ใช้จำเป็นต้องเป็นประเภทที่ใช้งานกับการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานฯ ได้ วิธีการนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1-5 เซนติเมตรเช่นกัน



ค่าคลาดเคลื่อน (ที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่และช่วงเวลา) ครอบคลุมทุกพื้นที่ภายในเครือข่าย

- 2.5.2.2 เพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าเลขปริศนา (Improved Ambiguity Resolution) เนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนที่เหลือน้อยลง ดังนั้นการหาค่าจำนวนเต็มของเลขปริศนาจึงทำได้ง่ายขึ้น ทำให้ขั้นตอนการประมวลผลเพื่อหาค่าเลขปริศนานั้นรวดเร็วกว่าและมีความน่าเชื่อถือกว่า
- 2.5.2.3 เพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าตำแหน่ง (Improved Positioning Performance) เนื่องจากการหาค่าเลขปริศนานั้นทำได้รวดเร็วกว่าและมีความน่าเชื่อถือกว่า ดังนั้นจึงทำให้การหาค่าตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งานทำได้รวดเร็วกว่าและมีความน่าเชื่อถือกว่าด้วย ซึ่งถ้ามีการหาค่าตำแหน่งหลายๆจุดไกลออกไปจากสถานีฐาน (เช่นตลอดเส้นทางตามแนวถนน) โดยวิธีการรังวัดแบบจลน์แบบดั้งเดิม จะพบค่ากระโดดของค่าพิกัดที่ไม่สัมพันธ์กันเมื่อเปลี่ยนสถานีฐาน ซึ่งค่ากระโดดของค่าพิกัดนี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสถานีฐานในการอ้างอิงตำแหน่ง
- 2.5.2.4 เพิ่มระยะทางในการทำงานระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งาน (Increased Distance to Reference Station) เนื่องจากการสร้างแบบจำลองเพื่อขจัดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่และประสิทธิภาพของการหาค่าเลขปริศนาที่ดีกว่า ทำให้ระยะทางในการทำงานระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานมากกว่า ในขณะที่ค่าความถูกต้องไม่เปลี่ยนแปลง
- 2.5.2.5 มีระบบในการควบคุมดูแลในการทำงาน (System Surveillance) โดยสามารถบริหารจัดการและควบคุมดูแล ตลอดจนการติดตามกลุ่มผู้ใช้งานได้ (Monitoring) นอกจากนี้หากสถานีฐานใดไม่สามารถใช้งานได้ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อผู้ใช้งานบ้างแต่ก็ยังมีสถานีฐานอื่นๆที่ใช้งานทดแทนกันได้

อย่างไรก็ตามเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานฯ ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ทำให้ประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดฯ นี้ลดลง โดยเฉพาะในพื้นที่ประเทศไทย ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 2.6 ระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย

กรมที่ดินเป็นหน่วยงานแรกของประเทศไทยที่นำ เทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสมาใช้ งาน โดยเป็นระบบ VRS

ซึ่งมีการติดตั้งสถานีฐานถาวรเพื่อรับสัญญาณดาวเทียม ทั้งหมด 11 สถานี โดยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Trimble รุ่น NetR5 ตั้งอยู่ที่สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี สำนักงานที่ดินจังหวัดชลบุรี สาขาพนัสนิคม สำนักงานที่ดินจังหวัดชลบุรี สาขาบางละมุง สำนักงานที่ดินจังหวัดชลบุรี สาขาสัตหีบ สำนักงานที่ดินจังหวัดระยองสาขาปลวกแดง สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองครักษ์ สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย และสำนักงานที่ดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (รูปที่ 2.8) ซึ่งครอบคลุมเนื้อที่ประมาณ 14,479 ตารางกิโลเมตร และมีระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวร (Station Spacing) ตั้งแต่ 27.8 กิโลเมตร ถึง 125.6 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรเท่ากับ 60 กิโลเมตร มีศูนย์ควบคุมส่วนกลางตั้งอยู่ที่ สำนักเทคโนโลยีทำแผนที่ อาคารรังวัดและทำแผนที่ กรมที่ดิน จังหวัดนนทบุรี ซึ่งที่ศูนย์ควบคุมฯ ใช้ชุดซอฟต์แวร์ระบบ Trimble VRS ซึ่งประกอบด้วย GPStream, TNC, GPSTimeServer, GPSWeb, GPSNet, RTKNet และ TED เป็นตัวควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ โดยระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานถาวรและศูนย์ควบคุมฯ ได้แก่ ระบบสัญญาณนำส่งข้อมูลความเร็วสูง (ADSL) สำหรับช่องทางการสื่อสารหลัก (Primary Line) และ เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GPRS สำหรับการสื่อสารสำรอง(Backup Line) (สำนักเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2551)

## 2.7 เทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงองค์ประกอบและแนวคิดแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ ของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส

### 2.7.1 องค์ประกอบของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส

ในการที่จะทำการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสได้นั้น จำเป็นจะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือสำหรับระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส และจำเป็นต้องมีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สามารถสื่อสารกับระบบเครือข่ายฯ สำหรับผู้ใช้งานเสียก่อน ดังนี้

### 2.7.1.1 สถานีฐานจีพีเอสถาวร (Permanent Reference Stations) อย่างน้อย 3 สถานี

โดยสถานีฐานจีพีเอสถาวรจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรับวงคุณภาพสูงชนิดหลายความถี่ และเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมควรจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Choke Ring เพื่อลดการเกิดคลื่นสะท้อน โดยจำเป็นต้องติดตั้งในสถานที่ที่มั่นคงถาวร และสภาพพื้นที่ดังกล่าวต้องโล่ง ปราศจากสิ่งกีดขวางโดยรอบเพื่อการรับสัญญาณดาวเทียมได้รอบทิศทางและในมุมต่ำ รวมถึงสถานีฐานจีพีเอสถาวรต้องเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อการส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางในทันทีและตลอดเวลา (รูปที่ 2.9)



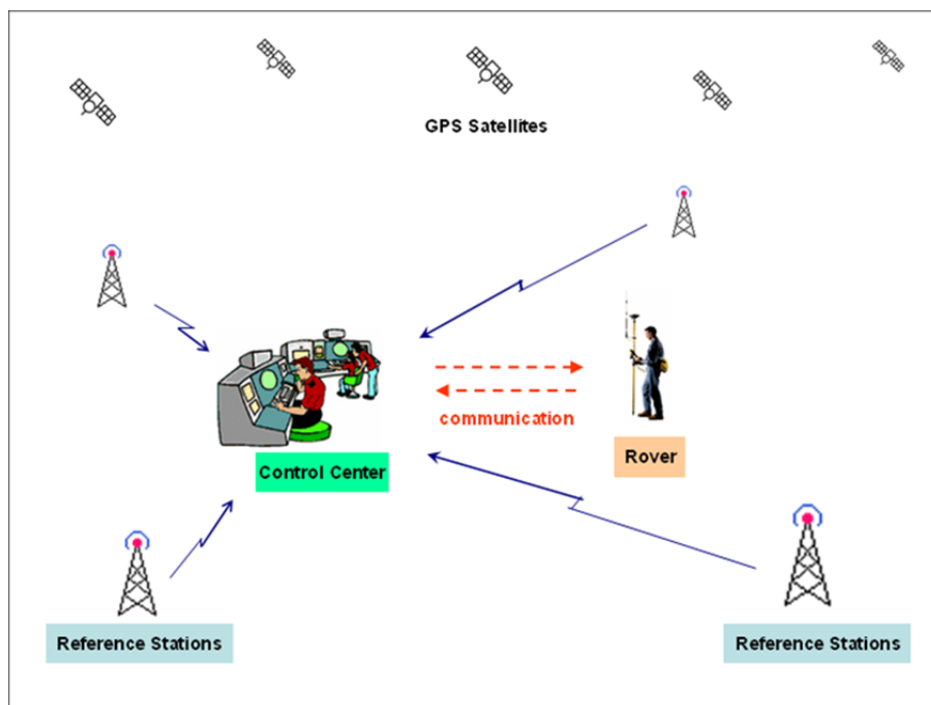
รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการติดตั้งสถานีฐานจีพีเอสถาวร (ซ้าย) แสดงเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบรับวง (ขวา) แสดงเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรับวงและอุปกรณ์สื่อสารที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ต

### 2.7.1.2 ศูนย์ควบคุมส่วนกลาง (Control Center)

ประกอบด้วยซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานฯ โดยซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะรับข้อมูลมาจากทุกสถานีฐานถาวรแล้วทำการประมวลผลเพื่อหาค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ แล้วส่งให้สถานีผู้ใช้งานเพื่อใช้งานอีกที (รูปที่ 2.10)

### 2.7.1.3 สถานีผู้ใช้งาน (Rover Station)

โดยทั่วไป การเลือกใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดสำหรับสถานีผู้ใช้งานจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของงานที่ต้องการ โดยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมฯ ดังกล่าวจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สื่อสารที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตได้ (รูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส



## 2.7.2 แนวคิดเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบต่างๆ

หลักการทำงานของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสมีหลายแนวคิดแต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศต่างๆ มีดังนี้

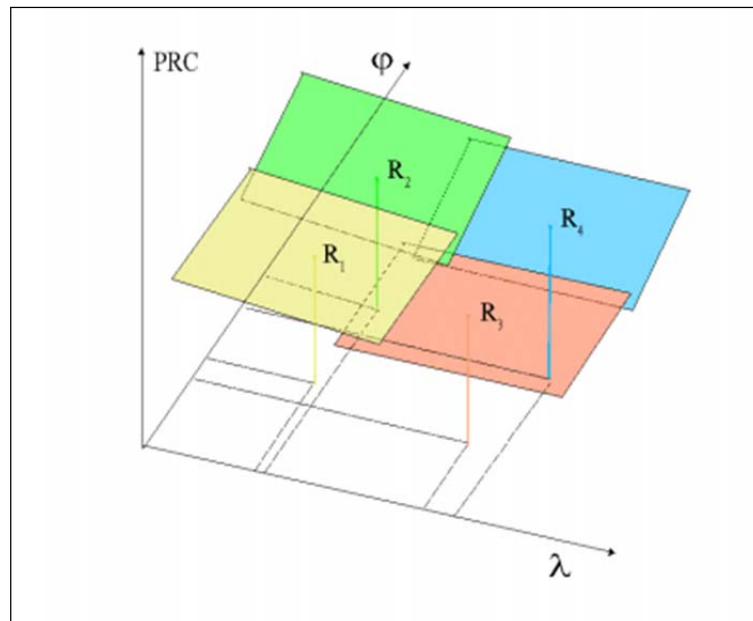
### 2.7.2.1 ระบบ Area Correction Parameter (Flaechen Korrektur Parameters-FKP)

ระบบ FKP เกิดขึ้นครั้งแรกที่ประเทศเยอรมัน ดั้งเดิมชื่อเป็นภาษาเยอรมันว่า Flaechen Korrektur Parameters มีการทำงาน 2 ขั้นตอนหลัก คือ (Lin, 2006: 6-7)

2.7.2.1.1 ซอฟต์แวร์ระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีจะทำการคำนวณค่าต่างครั้งที่สองของการหาค่าเลขปริศนาและค่าแก้ไขชนิดต่างๆของแต่ละสถานีสำหรับทุกดาวเทียม

2.7.2.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากโมเดลของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์และวงโคจรของดาวเทียมจะถูกคำนวณสำหรับแต่ละดาวเทียมภายในพื้นที่ระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส ภายในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง (อย่างน้อยทุกๆ 10 วินาที) โดย ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะถูกส่งไปยังสถานีผู้ใช้งานในรูปแบบของ Message RTCM Type 59 ซึ่งสถานีผู้ใช้งานจะนำค่าสัมประสิทธิ์นี้ไป Interpolate ค่าแก้ไขของตนเอง (รูปที่ 2.11)

ข้อเสียของระบบ FKP คือ Message RTCM type 59 ไม่ได้อยู่ในมาตรฐานของ RTCM (The Radio Technical Commission for Maritime Services) เนื่องจากมาตรฐาน RTCM กำหนดห้ามไม่ให้มีการแก้ไขข้อมูลจากสถานีฐานฯ ก่อนการคำนวณค่าแก้ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศและวงโคจรของดาวเทียม อย่างไรก็ตามยังเป็นที่ยกเถียงของนักวิชาการบางคนเกี่ยวกับมีความเป็นไปได้ที่โมเดลชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่คำนวณจากสถานีฐานฯ กับสถานีผู้ใช้งานจะมีความไม่สอดคล้องกัน



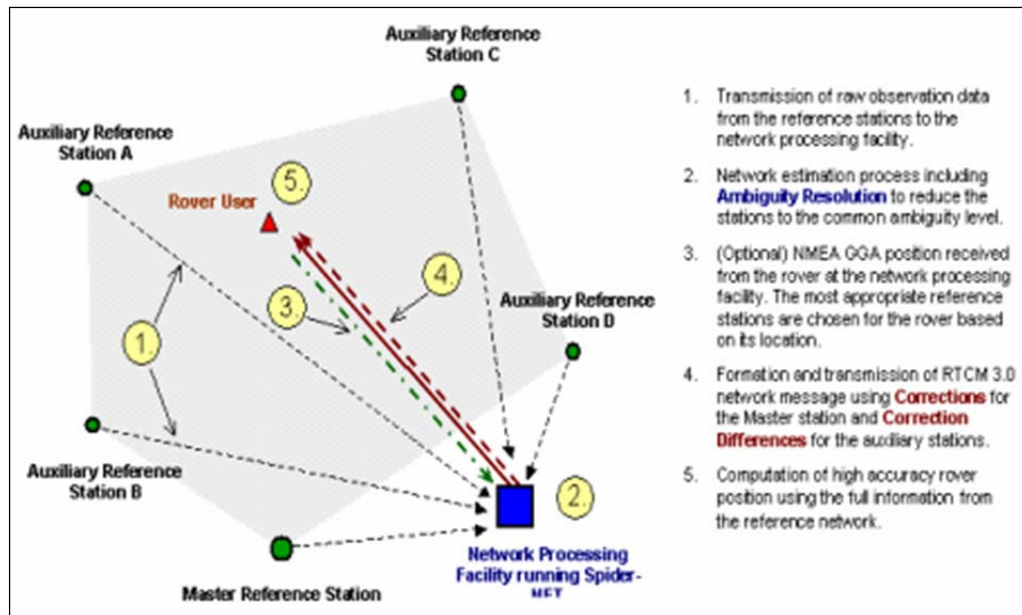
รูปที่ 2.11 แสดงเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ FKP โดย  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือระนาบค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากโมเดลของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์และวงโคจรของดาวเทียม (Wübbena, Bagge et al., 2001)

#### 2.7.2.2 ระบบ Master-Auxiliary Concept (MAC)

ระบบ MAC เป็นการพัฒนาร่วมกันระหว่าง บริษัท Leica Geosystems และบริษัท Geo++ โดยมีแนวคิดหลักคือ การลดขนาดของข้อมูลสำหรับการส่งผ่านข้อมูลภายในระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 1) การส่งข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบเต็ม (Full Raw Observation) และข้อมูลตำแหน่งของสถานีฐานหลัก (Master Station) และ 2) การส่งข้อมูลค่าต่างของค่าแก้ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์และวงโคจรของดาวเทียมและค่าต่างของตำแหน่งระหว่างสถานีฐานหลักกับสถานีฐานรอง (Auxiliary Stations) สำหรับทุกๆคู่ของสถานีฐานหลักกับสถานีฐานรอง (ข้อมูลชนิดนี้มีขนาดเล็กทำให้ใช้ Bandwidth น้อยสำหรับการรับส่งข้อมูล) โดยข้อมูลค่าต่างของค่าแก้ฯ นี้ สถานีผู้ใช้งานอาจนำไป Interpolate ณ ตำแหน่งสถานีผู้ใช้งานเองหรือนำไป Reconstruct ใหม่เพื่อให้ได้ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบเต็มของทุกสถานีฐานจีพีเอส

ระบบ MAC มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ (Brown, Keenan et al., 2005) (รูปที่ 2.12)

- 2.7.2.2.1 สถานีฐานฯทุกสถานีจะส่งข้อมูลสัญญาณดาวเทียม ของสถานีตนเองไปยังสถานีควบคุม
- 2.7.2.2.2 ซอฟต์แวร์ที่สถานีควบคุมจะทำการหาค่าเลขปริศนาของแต่ละสถานีฐานฯแล้วลดรูปให้อยู่ในรูปแบบ Common Ambiguity Level
- 2.7.2.2.3 สถานีผู้ใช้งานจะส่งตำแหน่งโดยประมาณของสถานีตนเองในรูปแบบของ NMEA- GGA (National Marine Electronics Association - GPS Fix Data) มายังสถานีควบคุม หลังจากนั้น ซอฟต์แวร์ของสถานีควบคุมจะเลือกสถานีฐานฯซึ่งเป็นสถานีฐานฯที่มีระยะทางใกล้ที่สุดกับสถานีผู้ใช้งาน ซึ่งเรียกว่าสถานีฐานฯหลักและจะเลือกสถานีฐานฯรองหลายๆสถานีจากตำแหน่งที่ใกล้กันกับสถานีผู้ใช้งานด้วย
- 2.7.2.2.4 ซอฟต์แวร์ของสถานีควบคุมจะทำการคำนวณค่าแก้ไขของระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสจากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมของสถานีฐานฯหลักและสถานีฐานฯรองที่เลือกแล้วตามข้อ 2.7.2.2.3 สำหรับพิกัดตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งานโดยเฉพาะ
- 2.7.2.2.5 ซอฟต์แวร์ของสถานีควบคุมจะสร้าง RTCM 3.0 Message โดยใช้ข้อมูลค่าแก้ไขจากสถานีฐานฯหลักและค่าต่างของค่าแก้ไขของทุกคู่ระหว่างสถานีฐานฯหลักกับสถานีฐานฯรอง แล้วส่งไปยังสถานีผู้ใช้งาน
- 2.7.2.2.6 สถานีผู้ใช้งานจะคำนวณตำแหน่งของตนเองโดยใช้ข้อมูล RTCM 3.0 Message ที่ได้รับมาจากสถานีควบคุม



รูปที่ 2.12 แสดงเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ MAC (Brown, Keenan et al., 2005)

### 2.7.2.3 ระบบ Virtual Reference Station (VRS)

ระบบ **Virtual Reference Station (VRS)** เสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย (Vollath, Buecherl et al., 2000) ซึ่ง มีการทำงาน 3 ขั้นตอนหลัก คือ

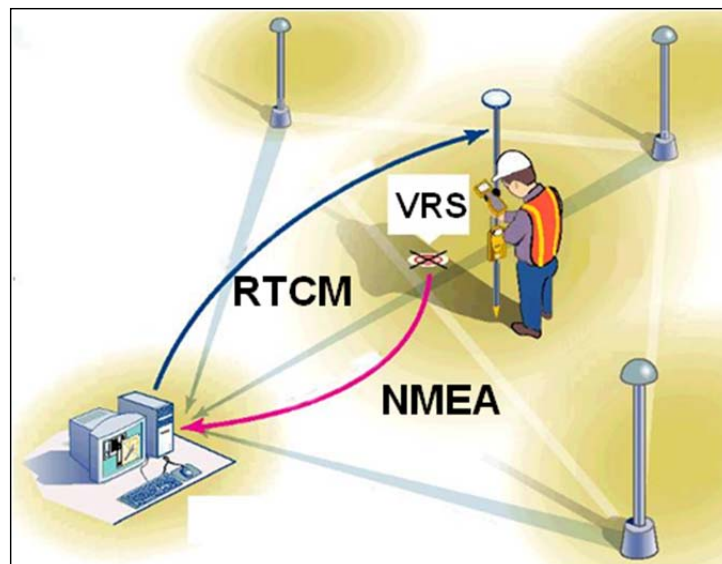
2.7.2.3.1 ซอฟต์แวร์ระบบเครือข่ายแบบจลน์ในพื้นที่จะทำการคำนวณค่าต่างครั้งที่สองด้วยวิธี Ionosphere-Free Linear Combination สำหรับทุกๆคู่ของสถานีฐานฯ และจะคำนวณหาค่าเลขปริศนาและค่าคลาดเคลื่อนรวมของแต่ละสถานีฐานฯด้วย

2.7.2.3.2 ค่าคลาดเคลื่อนรวมของทุกสถานีจะถูกนำไปคำนวณและ Interpolate สำหรับตำแหน่งโดยประมาณของ สถานีผู้ใช้งาน (ซึ่งทราบได้โดยการหาค่าจาก ซูโดเรนจ์ ของเครื่องรับ) ซึ่งตำแหน่งโดยประมาณนี้จะถูกส่งจากสถานีผู้ใช้งานไปยังซอฟต์แวร์ระบบเครือข่ายฯในรูปแบบของ NMEA Message

2.7.2.3.3 ค่าคลาดเคลื่อนรวมที่ถูก Interpolate แล้วจะถูกส่งในรูปแบบของ Message 18/19 หรือ 20/21 ของ RTCM 2.3 โดยเป็นข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลการรังวัดดาวเทียมที่ทราบขนาดค่าคลาดเคลื่อนรวม ณ ตำแหน่งใกล้เคียงกับสถานีผู้ใช้งาน แล้วส่งไปยังสถานีผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงเสมือนว่ามีสถานีเสมือน (Virtual Reference Station) สำหรับอ้างอิงใกล้ ๆ กับสถานีผู้ใช้งาน

2.7.2.3.4 ซอฟต์แวร์ที่สถานีผู้ใช้งานจะทำการประมวลผลพื้นฐานซึ่งมีขนาดสั้นระหว่างสถานีเสมือนและข้อมูลการรังวัดดาวเทียมจริงของสถานีผู้ใช้งานเพื่อหาค่าตำแหน่งที่ถูกต้องของสถานีผู้ใช้งาน

ข้อดีของระบบ VRS คือ สถานีผู้ใช้งานไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือซอฟต์แวร์เพิ่มเติมเนื่องจากการประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้งานนั้นเหมือนกับการทำงาน Single RTK และอย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าระบบนี้ต้องการการสื่อสารแบบสองทาง (Two Way Communication)



รูปที่ 2.13 แสดงเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS (Landau, Vollath et al., 2002)

## 2.8 หลักการของระบบ VRS

Hofmann-Wellenhof (2008) ได้เสนอแนวคิดหลักของระบบ VRS คือ การสร้างสถานีเสมือน (Virtual Reference Station) จากข้อมูลดาวเทียมของทุกสถานีฐานจีพีเอสในรูปแบบข้อมูลดาวเทียมที่ลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ แล้ว ( ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์ และวงโคจรดาวเทียม ) ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่ใกล้กับสถานีผู้ใช้งาน จากนั้น สถานีผู้ใช้งานจะทำการประมวลผลเส้นฐานสั้นๆ ระหว่างสถานีเสมือนกับข้อมูลดาวเทียมของสถานีผู้ใช้งาน เพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูง ณ สถานีผู้ใช้งาน โดยสามารถทำความเข้าใจหลักการระบบ VRS ได้โดยพิจารณาจากสมการดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่ง ณ เวลาใดๆ สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\varphi_r^S(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^S(t) + N + f^S \Delta\delta_r^S(t) \quad (2.33)$$

โดยที่

$\varphi_r^S(t)$	คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่ง ณ เวลาใดๆ (เมตร)
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)
$\rho_r^S(t)$	คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ เวลาใดๆ (เมตร)
$N$	คือ Ambiguity หรือ ค่าเลขปริศนาของคลื่นส่ง (หน่วยนับ)
$f^S$	เท่ากับ $\frac{c}{\lambda}$ มีหน่วยเป็นเฮิรต และเมื่อ $c$ คือ ความเร็วแสง มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที
$\Delta\delta_r^S(t)$	คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ (เมตร)

ถ้าหากว่ากำหนดให้ ตำแหน่งของสถานีฐานจีพีเอสสถานี A ของเครื่องรับ r เท่ากับ เวกเตอร์  $X_A$  และตำแหน่งของสถานีเสมือน (VRS) เท่ากับ เวกเตอร์  $X_V$  ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.33) จะได้

$$\varphi_r^S(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_A, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) \quad (2.34)$$

$$\varphi_r^S(X_V, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_V, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) \quad (2.35)$$

โดยที่

$\varphi_r^S(X_A, t)$  คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานี A ณ เวลาใดๆ (เมตร)

$\varphi_r^S(X_V, t)$  คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานี VRS ณ เวลาใดๆ (เมตร)

$\varrho_r^S(X_A, t)$  คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่งของสถานี A (เมตร)

$\varrho_r^S(X_V, t)$  คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่งของสถานี VRS(เมตร)

ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (2.35) มาลบกับสมการที่ (2.34) จะได้

$$\varphi_r^S(X_V, t) - \varphi_r^S(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_V, t) - \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_A, t) \quad (2.36)$$

จะเห็นว่าเทอม ค่าเลขปริศนา (N) และ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ ( $\Delta \delta_r^S(t)$ ) จะหายไป โดยหลังจากจัดเรียงสมการที่ (2.36) ใหม่ จะได้

$$\varphi_r^S(X_V, t) = \varphi_r^S(X_A, t) + \frac{1}{\lambda} [\varrho_r^S(X_V, t) - \varrho_r^S(X_A, t)] \quad (2.37)$$

จากสมการที่ (2.37) จะเห็นว่า ทางซ้ายมือของสมการคือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานี VRS ซึ่งไม่จำเป็นต้องรังวัดจริง เนื่องจากเทอมต่างๆทางขวามือของสมการสามารถหาค่าได้ กล่าวคือ เทอม  $\varphi_r^S(X_A, t)$  ได้จากการรังวัดดาวเทียม ณ สถานีฐานจีทีเอส A ส่วนเทอม  $\varrho_r^S(X_A, t)$  สามารถหาค่าได้เนื่องจากทราบตำแหน่งของดาวเทียมและตำแหน่งของสถานีฐาน A และเทอม  $\varrho_r^S(X_V, t)$  สามารถหาค่าได้เช่นเดียวกันเนื่องจากการทราบตำแหน่งของดาวเทียมและตำแหน่งของสถานี VRS (ซึ่งทราบค่าโดยวิธีการวัดชุดโคเรนจ์) แต่เนื่องจากในความเป็นจริง ข้อมูล

ดาวเทียมที่ได้จากสถานีฐานฯยังมีความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆแฝงอยู่ ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโปสเฟียร์ และวงโคจรดาวเทียม ดังแสดงในสมการที่ (2.38)

$$\Delta_r^S(X_A, t) = \Delta^{Orbit}(X_A, t) + \Delta^{Iono}(X_A, t) + \Delta^{Trop}(X_A, t) \quad (2.38)$$

โดยที่

$\Delta_r^S(X_A, t)$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆที่สถานี A (เมตร)

$\Delta^{Orbit}(X_A, t)$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียมที่สถานี A (เมตร)

$\Delta^{Iono}(X_A, t)$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สถานี A (เมตร)

$\Delta^{Trop}(X_A, t)$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ที่สถานี A (เมตร)

ซึ่งในความเป็นจริงสมการที่ (2.34) จำเป็นต้องพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆด้วย ดังนั้นจะได้

$$\varphi_r^S(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_A, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_A, t) \quad (2.39)$$

ในทางเดียวกัน กรณีมีสามสถานีฐานฯ จะได้ ดังนี้ (ดูรูปที่ 2.17 ประกอบ)

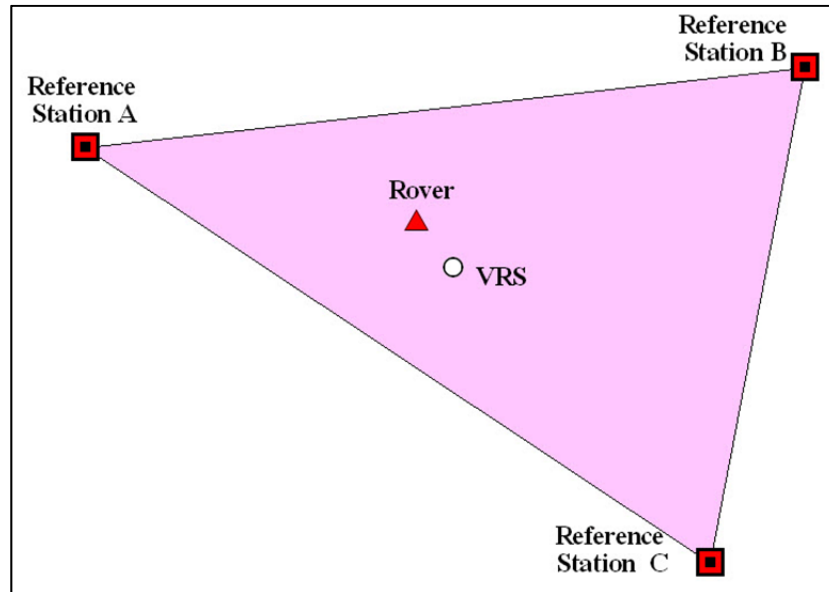
$$\varphi_r^S(X_B, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_B, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_B, t) \quad (2.40)$$

$$\varphi_r^S(X_C, t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_C, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_C, t) \quad (2.41)$$



และการหาข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานี VRS จะเป็นไปตามสมการข้างล่าง

$$\varphi_r^S(X_V, t) = \varphi_r^S(X_A, t) + \frac{1}{\lambda} [\varrho_r^S(X_V, t) - \varrho_r^S(X_A, t)] + \Delta_r^S \quad (2.42)$$



รูปที่ 2.14 แสดงแนวคิดการทำงานระบบ VRS

จากสมการที่ (2.39) - (2.41) ค่าคลาดเคลื่อน  $\Delta_r^S(X_A, t)$ ,  $\Delta_r^S(X_B, t)$  และ  $\Delta_r^S(X_C, t)$  สามารถหาค่าได้ เนื่องจากการทราบตำแหน่งของทุกสถานีฐานฯ (ทำให้หาค่าของเทอม  $\frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_A, t)$ ,  $\frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_B, t)$  และ  $\frac{1}{\lambda} \varrho_r^S(X_C, t)$  ได้) อีกทั้งเทอมของ N และ  $f^S \Delta \delta_r^S(t)$  สามารถหาค่าได้โดย วิธีการหาค่าเลขปริศนา (ซึ่งไม่ใช่เรื่องยากเนื่องจากทราบตำแหน่งของทุกสถานีฐานฯ) และการใช้เทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สองของทุกคู่สถานีฐานฯ (ดูรายละเอียดได้ที่ เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549) ตามลำดับ

ดังนั้น เมื่อทราบค่าความคลาดเคลื่อน  $\Delta_r^S(X_A, t)$ ,  $\Delta_r^S(X_B, t)$  และ  $\Delta_r^S(X_C, t)$  แล้ว สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนของสถานี VRS ( $\Delta_r^S(X_V, t)$ ) ได้จากการ Interpolate ในรูปแบบต่างๆ รวมถึงวิธีการ Weighted mean จากข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนของทุกสถานี ตัวอย่างเช่น สมการ ดังต่อไปนี้

$$\Delta_r^S(X_i, t) = aX_i + bY_i + cZ_i \quad (2.43)$$

โดยที่

$X_i, Y_i, Z_i$  คือ ตำแหน่งของสถานี  $i$  ทั้งสามทิศทาง (ในระบบพิกัด Earth Center Earth Fix หรือระบบพิกัดระนาบที่ประกอบด้วยค่าความสูง)

$a, b, c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งหาค่าได้จากสถานีฐาน  $A, B$  และ  $C$  โดยการแก้สมการเชิงเส้น อย่างไรก็ตามหากมีสถานีฐานมากกว่า 3 สถานี สามารถใช้เทคนิค Least-Square Adjustment หาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวได้

ดังนั้น ค่าคลาดเคลื่อนที่สถานี VRS ( $\Delta_r^S(X_V, t)$ ) หาได้จากการทราบค่าสัมประสิทธิ์และตำแหน่งสถานี VRS ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม มีข้อควรพิจารณาเกี่ยวกับการหาค่าคลาดเคลื่อนที่สถานี VRS ดังนี้

- 2.8.1 ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากสาเหตุอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ (Antenna Phase Center Offset and Variation) และค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับสถานีจีพีเอส ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนทั้งสองนี้จึงไม่ควรเกิดขึ้นที่สถานี VRS อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปสถานีฐานจีพีเอสดาว มักจะติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและเสาอากาศคุณภาพสูงพร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ Choke Ring ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดผลกระทบจากคลื่นหลายวิถี ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนทั้งสองนี้จะถูกขจัดหมดไปแล้ว
- 2.8.2 ถึงแม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์จะถูกขจัดออกไปโดยขั้นตอน Data Combination และเทคนิคค่าต่างครั้งที่สองหรือการใช้โมเดลก็ตามแต่ค่าคลาดเคลื่อนทั้งสองนี้ยังคงเหลืออยู่และส่งผลกระทบต่อเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส

จากหลักการของระบบ VRS ข้างต้น จะเห็นได้ว่า มีค่าคลาดเคลื่อนหลายชนิดที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพหรือความถูกต้องทางตำแหน่งของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมนี้ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

## 2.9 ค่าคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส

โดยทั่วไปค่าคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

### 2.9.1 ค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส (Station Dependent Error)

คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นตามลักษณะเฉพาะของสถานีจีพีเอส โดยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบของตำแหน่งเสาอากาศ ชนิดของเสาอากาศและเครื่องรับได้แก่

#### 2.9.1.1 ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ (Satellite & Receiver Clock Error)

เกิดจากการที่ความเที่ยงตรงของเวลาของนาฬิกาดาวเทียมจีพีเอสมีความแตกต่างกันกับเวลาของนาฬิกาเครื่องรับ ซึ่งนาฬิกาดาวเทียมจีพีเอส อ้างอิงกับความถี่แบบอะตอม ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากและมีการติดตามปรับแก้เวลาโดยสถานีภาคพื้นดินเป็นระยะๆ ส่วนนาฬิกาเครื่องรับ อ้างอิงกับความถี่แบบควอทซ์ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่านาฬิกาดาวเทียมจีพีเอส ผลจากการอ้างอิงความถี่ที่แตกต่างกันของนาฬิกาดาวเทียมจีพีเอสและเครื่องรับ ทำให้ข้อมูลการรังวัดที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนจากการเลื่อนของเวลา (Clock Drift) แฝงอยู่เสมอ อย่างไรก็ตามสามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ได้ได้โดยใช้เทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง (Single & Double Difference) (สามารถดูรายละเอียดของเทคนิคค่าต่างได้จาก เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549) รวมทั้งการใช้เครื่องรับที่มีประสิทธิภาพสูง

#### 2.9.1.2 ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลุด (Cycle Slip Error)

เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของการรับสัญญาณดาวเทียมซึ่งอาจเกิดจากการบดบังเครื่องรับจากสภาพแวดล้อม เช่น สิ่งปลูกสร้างต่างๆและต้นไม้ เป็นต้น สามารถป้องกันได้โดยการเลือกพื้นที่ในการรับสัญญาณดาวเทียมที่โล่งและการใช้เครื่องรับที่มีประสิทธิภาพสูง

**2.9.1.3 ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multi-path Error)** เกิดจากการรับสัญญาณจากคลื่นสะท้อน ซึ่งทำให้ระยะทางที่ได้คลาดเคลื่อนจากความจริง ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ขจัดออกยาก เนื่องจากเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบแผน สามารถลดได้โดยการเลือกใช้เสาอากาศแบบป้องกันคลื่นหลายวิถีที่เรียกว่า Choke Ring

**2.9.1.4 ค่าคลาดเคลื่อนจากการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ (Antenna Phase Center Offset and Variation)** โดยสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ได้โดยเลือกใช้เสาอากาศที่มีคุณภาพสูง และวัดสอบหาค่าแก้ก่อน รวมทั้งการเลือกใช้แบบจำลองปรับแก้ค่าการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ

**2.9.1.5 ค่าคลาดเคลื่อนจากค่าพิกัดอ้างอิงของสถานีฐานจีพีเอสดาว** การทำงานด้วยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายฯ นั้น สิ่งที่มีความสำคัญที่ควรพิจารณาสิ่งหนึ่งคือระบบอ้างอิงตำแหน่งของสถานีฐาน โดยตำแหน่งของสถานีฐานฯ ทุกสถานีควรมีความถูกต้องสูงและอ้างอิงอยู่ในระบบเดียวกันไม่เช่นนั้นค่าคลาดเคลื่อนจากค่าพิกัดของสถานีฐานฯ นี้ก็จะส่งผลให้การหาค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้งานผิดพลาดไปด้วย สำหรับระบบการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายฯ ที่มีการติดตั้งและใช้งานมาเป็นเวลานานหลายปี ประเด็นของการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งพิกัดของสถานีฐานเปลี่ยนไปเป็นข้อที่ควรพิจารณาด้วย (Jensen, 2002)

## 2.9.2 ค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส (Distance Dependent Error)

คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่มีขนาดเพิ่มขึ้นตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอสที่เพิ่มขึ้นได้แก่

**2.9.2.1 ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay)** คือ ค่าคลาดเคลื่อนแบบ Non-Dispersive ซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างช้าและมีลักษณะราบเรียบ (Smooth) เมื่อเทียบกับค่าคลาดเคลื่อน

อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ ออกไปได้ โดยการใช้นิยามค่าต่างครั้งที่สองและการใช้โมเดลค่าแก้ นอกจากนี้ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นโทรโพสเฟียร์นี้ยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความสูงของพื้นที่ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของสถานีฐานฯ ทุกสถานีด้วย ดังนั้นในการออกแบบระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส ควรคำนึงถึงข้อจำกัดนี้ด้วย

### 2.9.2.2 ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรของดาวเทียม (*Satellite Orbit Error*)

เป็น ค่าคลาดเคลื่อนแบบ Non-Dispersive เช่นเดียวกับค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงแบบช้าและมีลักษณะราบเรียบ (Smooth) เช่นกัน สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ได้โดยใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง (Precise Orbit)

### 2.9.2.3 ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (*Ionospheric Delay*)

คือ ค่าคลาดเคลื่อนแบบ Dispersive ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณดาวเทียม สามารถลดขนาดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ได้ โดยการใช้นิยามค่าต่างครั้งที่สองของแต่ละคู่ของสถานีฐานฯ โดยใช้เครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่และการใช้โมเดลค่าแก้ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้มีความแปรปรวนสูงและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่ง Musa (2007) ระบุว่า ในภูมิภาคเขตศูนย์สูตร (Low Latitude หรือ Equatorial Region) ค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้มีผลเสียต่อประสิทธิภาพของการรับวัดดาวเทียมจีพีเอส มากกว่า ในบริเวณภูมิภาคอื่นๆ ของโลก คือ Middle Latitude และ High Latitude

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสพร้อมทั้งวิธีกำจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าว

ประเภทของค่าคลาดเคลื่อน		ชนิดของค่าคลาดเคลื่อน	วิธีการกำจัดหรือลดขนาดค่าคลาดเคลื่อน
ค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส	ที่เกิดจากดาวเทียม	นาฬิกาดาวเทียม	1. เทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่หนึ่งและสอง 2. ใช้ค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมแบบความถูกต้องสูง
		ที่เกิดจากเครื่องรับ	นาฬิกาเครื่องรับ
	คลื่นรบกวน		ใช้เครื่องรับคุณภาพสูง
	ที่เกิดจากเสาอากาศเครื่องรับ	คลื่นหลายวิถี	อุปกรณ์ป้องกันคลื่นหลายวิถี (Choke Ring)
		การแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ	1. ใช้เสาอากาศที่มีคุณภาพสูง 2. การวัดสอบ
			3. ใช้โมเดลปรับแก้
	คลื่นหลุด	ตรวจสอบได้โดยการหาค่าต่างครั้งที่สองและสาม	
ค่าพิกัดของสถานีฐานฯ	-	ใช้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูง	
ค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส	Dispersive	ไอไอโนสเฟียร์	1. เทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สอง 2. ใช้โมเดลปรับแก้
			Non-Dispersive
	วงโคจรดาวเทียม	ใช้วงโคจรดาวเทียมความถูกต้องสูง	

## 2.10 งานวิจัยที่ผ่านมา

Lim et al. (2008) ได้แบ่งค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส ออกเป็นสองประเภทหลักคือ 1) ค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมและเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี เป็นต้น และ 2) ค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์ และวงโคจรดาวเทียม โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนประเภทที่ 2) นั้นเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมนี้ นอกจากนี้ Lim et al. (2008) ยังได้ศึกษาถึงการนำ Running Average Function มาประยุกต์ใช้กับค่าแก้เนื่องจากผลกระทบของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และวงโคจรของดาวเทียม สำหรับเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส ซึ่งผลการศึกษาที่ได้ชี้ให้เห็นว่า การนำ Running Average Function มาประยุกต์ใช้ร่วมกับค่าแก้ดังกล่าวนั้น จะทำให้การ Generate ค่าแก้ของระบบเครือข่ายและการหาค่าเลขปริศนาได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ค่าแก้ดังกล่าวเพียงอย่างเดียว อีกทั้งการคำนวณตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งานมีความถูกต้องสูงกว่าด้วย และ Musa (2007) ได้ชี้ให้เห็นถึงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่เขตศูนย์สูตรจะส่งผลกระทบต่อารรังวัดดาวเทียมจีพีเอสมากกว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่เขต Mid-Latitude อีกทั้ง Musa (2007) ได้วิเคราะห์สาเหตุหลักของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ในพื้นที่เขตศูนย์สูตรและพื้นที่ Mid-Latitude ซึ่งจากการศึกษา พบว่าสาเหตุหลักของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีขนาดใหญ่กว่าและมีความแปรปรวนมากกว่าสาเหตุหลักของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยเฉพาะในพื้นที่เขตศูนย์สูตร และ Musa (2007) ยังได้ศึกษาถึงการนำ Stochastic Model มาใช้กับเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสด้วย โดยพบว่า Stochastic Model ช่วยทำให้การหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity Resolution) เร็วขึ้นแต่ความถูกต้องทางตำแหน่งนั้นยังคงเท่าเดิม รวมถึง Attaviriyasuwon et al. (2005) และ Gwal et al. (2004) ได้ศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ประเทศไทย โดย Attaviriyasuwon et al. (2005) พบว่า ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ประเทศไทยจะมีความแปรปรวนสูงในเวลากลางคืน ในขณะที่ Gwal et al. (2004) พบว่า ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ประเทศไทยจะมีความแปรปรวนสูงในเวลาหลังเที่ยงคืน โดยจะเกิดขึ้นในรูปแบบของ Ionospheric

Scintillation ดังนั้นจากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสนั้นขึ้นอยู่กับค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์ และวงโคจรดาวเทียมซึ่งขนาดของค่าคลาดเคลื่อนประเภทนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส กล่าวคือ ยิ่งระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสมีขนาดสั้นลงเท่าใด ค่าคลาดเคลื่อนประเภทดังกล่าวนี้ย่อมมีขนาดเล็กตามไปด้วย แต่เนื่องจากการติดตั้งสถานีฐานจีพีเอสแต่ละแห่งใช้เงินลงทุนค่อนข้างสูงในประเทศไทย ดังนั้นระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสชนิดนี้ในประเทศไทย จึงเป็นเรื่องที่ควรคำนึงถึงเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอสชนิดต่างๆ นั้น จะเห็นได้ว่าพื้นที่ประเทศไทยซึ่งอยู่ในพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ซึ่งในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีความแปรปรวนสูงกว่าพื้นที่อื่นๆ ของโลก อันได้แก่ พื้นที่ Mid Latitude และพื้นที่ใกล้ขั้วโลกทั้งสอง ดังนั้นในพื้นที่ประเทศไทย ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จึงมีขนาดใหญ่ และในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลซึ่งมีลักษณะเป็นที่ราบทำให้ความสูงของแต่ละสถานีฐานฯ มีความแตกต่างกันน้อย ดังนั้น ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จึงน่าจะมีขนาดเล็กตามไปด้วย อีกทั้งในปัจจุบันมีการคำนวณวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงโดย International GNSS Service (IGS) ทั้งแบบ Ultra Rapid, Rapid และ Final Orbits ซึ่งมีความถูกต้องของวงโคจรดาวเทียมสูง ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียมจึงมีขนาดเล็กเช่นกัน ทั้งนี้ หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย จึงควรพิจารณาถึงค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยการลดขนาดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้มีหลายวิธี ได้แก่ โดยการใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สองของแต่ละคู่ของสถานีฐานฯ โดยใช้เครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่และการใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก (Global) มีหลายโมเดล โดย Memarzadeh (2009) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Klobuchar, NeQuick และ Global Ionospheric Maps (GIM) ในสถานะชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความแปรปรวนมากและน้อย ตามลำดับ ในพื้นที่ Mid latitude ผลปรากฏว่า โมเดล GIM ให้ผลที่ถูกต้องสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ โมเดล Klobuchar และ NeQuick ในขณะที่ Wienia (2008) ได้ศึกษาการใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM สำหรับเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความถูกต้องสูง ในภูมิภาคยุโรป (ซึ่งจัดอยู่ในพื้นที่



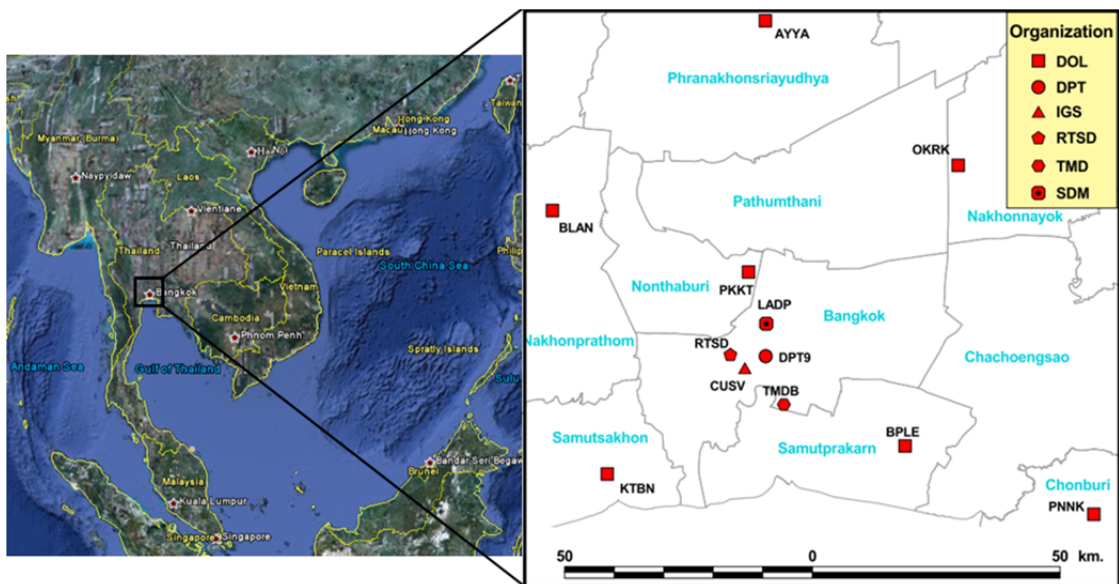
Mid latitude) ผลปรากฏว่า ความถูกต้องทางราบอยู่ในระดับ 30 เซนติเมตร ในขณะที่ความถูกต้องทางตั้งอยู่ในระดับ 50 เซนติเมตร ดังนั้น โมเดลแบบ GIM จึงน่าจะนำมาลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทยได้ อย่างไรก็ตาม โมเดล GIM เป็นแบบ Global Scale ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ขนาดเล็กอย่างระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส ดังนั้น การใช้โมเดลท้องถิ่นในประเทศไทยสำหรับการลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้จึงน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย ซึ่ง Dach (2008) ได้อธิบายการสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสความละเอียดสูงที่มีชื่อว่า Bernese 5.0

### บทที่ 3

## ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.1 ข้อมูลการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส ในรูปแบบของ RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ซึ่งใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ถึง 3 มีนาคม พ.ศ. 2553 จำนวน 31 วัน ของสถานีฐานจีพีเอสดาวจากหลายหน่วยงาน ได้แก่ กรมที่ดิน (DOL) กรมแผนที่ทหาร (RTSD) กรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) กรมโยธาธิการและผังเมือง (DPT) บริษัทเอสดีเอ็ม จำกัด (SDM) และ IGS ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงที่ตั้งสถานีฐานจีพีเอสดาวที่ใช้ในงานวิจัย

สถานีฐานจีพีเอสดาวทุกสถานีติดตั้งในตำแหน่งที่มั่นคงถาวรและไม่เคลื่อนตัว โดยส่วนใหญ่เสาอากาศเครื่องรับของสถานีฐานจีพีเอสดังกล่าวติดตั้งอยู่บนคานฟ้าของอาคาร ซึ่งไม่มีสิ่งกีดขวางบดบังเสาอากาศเครื่องรับ (แสดงในรูปที่ 3.2) อีกทั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและเสาอากาศเครื่องรับที่ใช้งานนั้นเป็นชนิดที่มีคุณภาพสูง โดยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้เป็นชนิดสองความถี่ ในขณะที่เสาอากาศเครื่องรับบางสถานีฐานฯ มีอุปกรณ์ Choke Ring ด้วย รายละเอียด

ชนิดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและเสาอากาศเครื่องรับของแต่ละสถานีฐานจีพีเอส แสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของสถานที่ติดตั้งเสาอากาศเครื่องรับของสถานีฐานจีพีเอสถาวรของกรมที่ดิน

ตารางที่ 3.1 แสดงสถานีฐานจีพีเอสดาวที่นำข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมมาใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	สถานี	หน่วยงาน	ชนิดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม	ชนิดของเสาอากาศ
1		กรมที่ดิน	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 TZGD
2	BLAN	กรมที่ดิน	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 TZGD
3	BPLE	กรมที่ดิน	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 TZGD
4	KTBN	กรมที่ดิน	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 TZGD
5	OKRK	กรมที่ดิน	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 TZGD
6	PKKT	กรมที่ดิน	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 TZGD
7	PNNK	กรมที่ดิน	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00 TZGD
8	CUSV	IGS	TRIMBLE NETRS	TRM41249.00 NONE
9	DPT9	กรมโยธาธิการและผังเมือง	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504 NONE
10	LADP	บริษัทเอสดีเอ็ม จำกัด	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAX1202GG NONE
11	RTSD	กรมแผนที่ทหาร	LEICA CRS1000	LEIAT504
12	TMDB	กรมอุตุนิยมวิทยา	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504 NONE

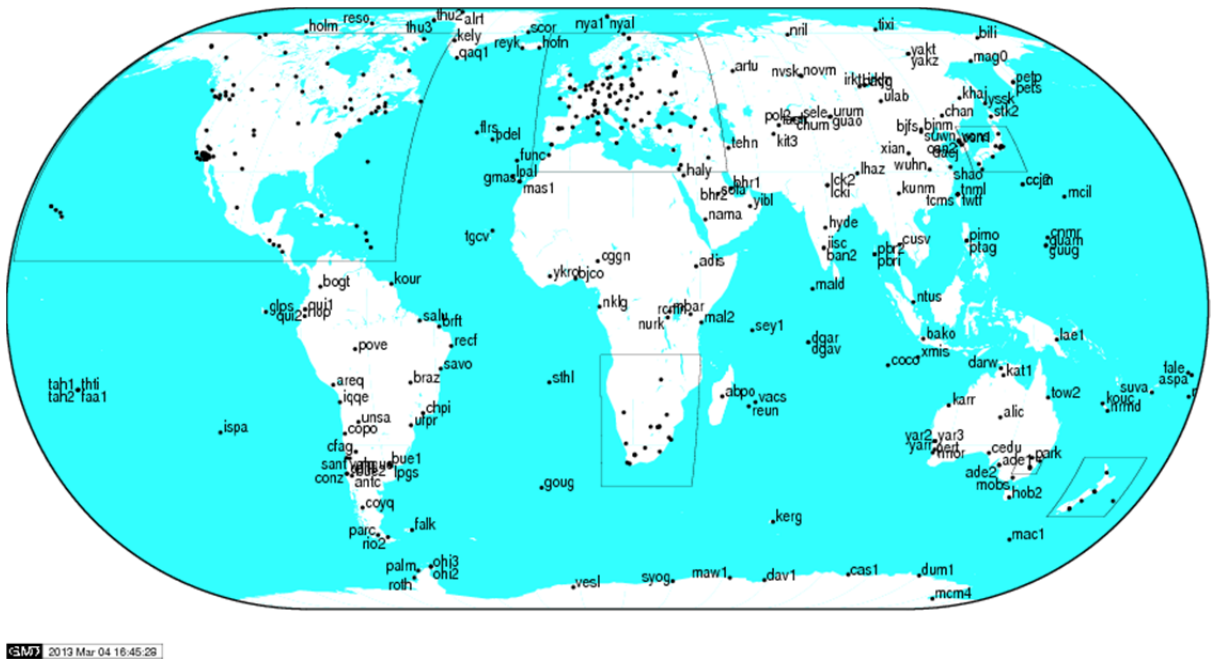
### 3.2 ข้อมูลสำหรับการประมวลผลความถูกต้องสูง

ในการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสแบบ Static สำหรับพิกัดตำแหน่งที่มีความถูกต้องสูง และการสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทยนั้น จำเป็นต้องใช้ข้อมูลสำหรับนำไปปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ข้อมูลดังกล่าว ได้แก่

#### 3.2.1 ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง

โดยทั่วไป การประมวลผลข้อมูลจีพีเอสที่ต้องการความถูกต้องสูง จำเป็นต้องขจัดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียมให้ได้มากที่สุด ดังนั้นจึงต้องใช้วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง แทนการใช้วงโคจรดาวเทียมแบบนำหนทั่วไป โดย International GNSS Service (IGS) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีความร่วมมือมากกว่า 200 องค์กรใน 80 ประเทศ และมีสถานีฐานจีพีเอสดาวมากกว่า 300 แห่งทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย ซึ่งสถานีฐานจีพีเอสดาว ตั้งอยู่บนอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) ทั้งนี้ IGS ทำหน้าที่ในการเก็บบันทึกและปรับแก้ข้อมูลจีพีเอสสำหรับคำนวณวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงในหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบ Final, Rapid และ

Ultra rapid ซึ่งข้อมูลแต่ละแบบสามารถดาวน์โหลดได้จาก เว็บไซต์ของ Center for Orbit Determination in Europe (CODE) หรือ เว็บไซต์ของ IGS รายละเอียดข้อมูลที่ให้บริการโดย IGS แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และตัวอย่างข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงที่ตั้งของสถานีฐานจีพีเอสดาวเทียมซึ่งอยู่ในเครือข่ายการวิจัยและการให้บริการข้อมูลของ International GNSS Service (IGS) (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/complete.html>)

```

#cP2010 2 1 0 0 0.00000000 96 d+d IGS05 FIT AIUB
## 1569 86400.00000000 900.00000000 55228 0.00000000000000
+ 50 G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17
+ G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32R01R02
+ R03R04R05R07R08R10R11R13R14R15R17R18R19R20R21R23 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 5 4 4 4 4 4 4 4 4 5 4 4 5 5 6 4 4
++ 4 4 4 4 4 5 4 4 5 4 4 4 4 4 4 4 4
++ 4 5 5 6 4 5 5 4 4 4 5 4 5 4 4 5 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c M cc GPS ccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.000000000000000000
%f 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.000000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* Center for Orbit Determination in Europe (CODE)
/* Final GNSS orbits and GPS clocks for year-day 10032
/* Note: Middle day of a 3-day arc GPS/GLONASS solution
/* PCV:IGS05_1569 OL/AL:FES2004 NONE YN ORB:CoN CLK:CoN
* 2010 2 1 0 0 0.00000000
PG01 18851.801645 -18578.644127 -1417.508325 -84.634095
PG02 13803.801383 19275.372730 -12466.764074 221.763564
PG03 -23289.758454 -10669.326393 -8011.517065 509.664609
PG04 6016.249017 25655.851365 -762.354572 4.061012
PG05 14929.618028 6360.147940 -21060.238636 -11.614148
PG06 -20679.491056 -13256.266256 -10070.261937 255.099057
PG07 -8516.130748 17900.510658 -17608.445520 3.496902
PG08 -1431.837734 25101.803331 -7696.721652 2.772644
PG09 15127.244943 2165.429107 21070.733378 103.373115
PG10 9932.539326 11806.250901 -21791.321318 -34.269678
PG11 -16549.306346 3496.390873 20259.619139 -42.823078

```

รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างของวงโคจรดาวเทียมแบบ Final ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจากหน่วยงาน IGS (IGS, 2007)

Products	Accuracy Orbit	Accuracy Sat .Clocks	Latency	Updates	Interval
Broadcast Ephemeris	~160 cm.	~7 ns	Real time	--	Daily
Ultra Rapid (Predicted Half)	~10 cm.	~5 ns	Real time	4 time daily	15 min
Ultra Rapid (Observed Half)	< 5 cm.	~0.2 ns	3 hours	4 time daily	15 min
Rapid	< 5 cm.	~0.1 ns	17 hours	Daily	15 min
Final	< 5 cm.	< 0.1 ns	~13 days	Weekly	15 min

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีความละเอียดสูงที่สุด

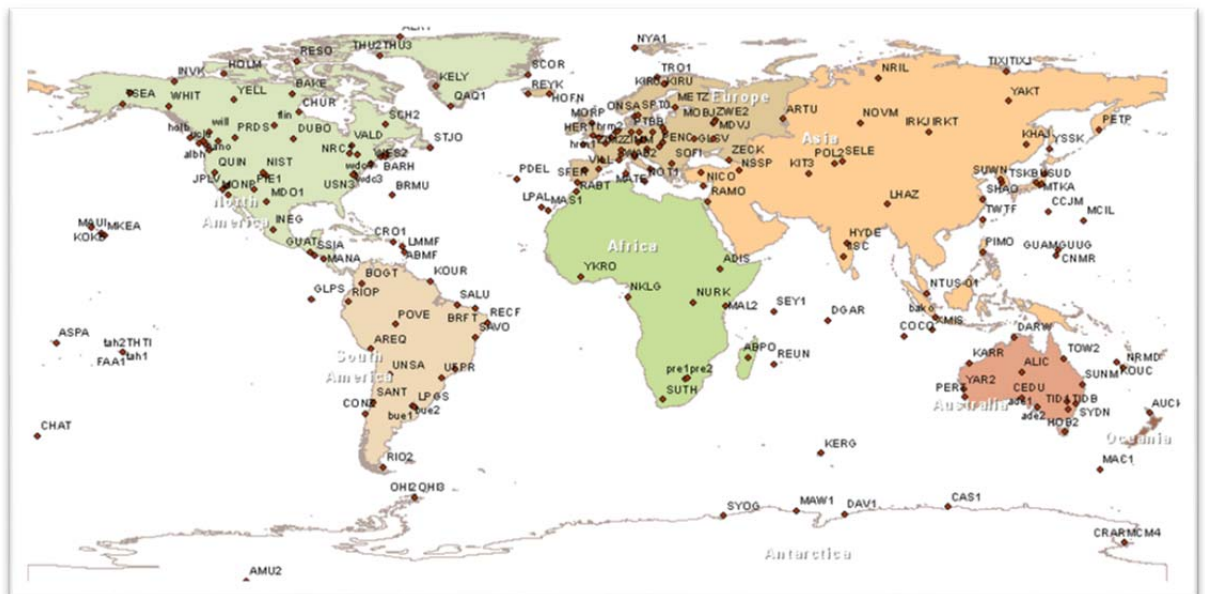
### 3.2.2 ข้อมูลการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ

นอกจากข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแล้วยังมีข้อมูลการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆอีก ได้แก่ ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์แบบทั้งโลก ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากดาวเทียมและข้อมูลดาวเทียมที่มีปัญหา ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงชนิดต่างๆ ที่กระทำต่อดาวเทียม อาทิเช่น Gravity Fields, Nutation Models และ Subdaily Pole Models ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจาก Differential Code Bias ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงเหวี่ยงจากการหมุนของโลก (Earth Rotation Parameters/ Pole Information) ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากนาฬิกาดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงมหาสมุทร (Ocean Tide Loading) และข้อมูลพิกัดตำแหน่งของสถานีฐานจีพีเอสดาว IGS (โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา) ทั้งนี้ข้อมูลกล่าวมาทั้งหมดสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ของ CODE อย่างไรก็ตาม ข้อมูลพิกัดตำแหน่งของสถานีฐานจีพีเอสดาว IGS

(โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา) นั้นสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ของ The Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) ได้เช่นกัน

### 3.3 ข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก (Global Ionosphere Maps - GIM)

เช่นเดียวกับกับข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง IGS ทำหน้าที่ในการเก็บบันทึก และปรับแก้ข้อมูลจีพีเอสจากสถานีจีพีเอสทั่วโลก (ดังแสดงในรูปที่ 3.5) สำหรับคำนวณข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก (GIM) ในหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบ Predicted, Rapid และ Final โดยที่ข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศ แบบ Predicted สามารถดาวน์โหลดได้ล่วงหน้า 1-2 วัน ส่วนข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศ แบบ Rapid สามารถดาวน์โหลดได้หลังจากเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง ในขณะที่ข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศ แบบ Final สามารถดาวน์โหลดได้หลังจากเวลาผ่านไป 3 วัน (ดูตัวอย่าง GIM ได้ในรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.5 แสดงที่ตั้งของสถานีฐานจีพีเอสทั่วโลกสำหรับคำนวณข้อมูลโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก (GIM)

ข้อมูล GIM ประกอบด้วยค่า VTEC ของทุกจุดตัดตารางรูปสี่เหลี่ยม (Grid Points) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ IONEX (IONosphere Map Exchange) (Schaer,1999) ค่า VTEC ดังกล่าวจะเป็น



ค่า VTEC ทุกๆสองชั่วโมงโดยเริ่มจาก 0-2, 2-4, 4-6 จนถึง 22-24 ตามเวลาของ UTC (Coordinated Universal Time) ทั้งนี้ความละเอียดของ GIM เท่ากับ 5° ลองจิจูด และ 2.5° ละติจูดโดยครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก ทั้งนี้ค่า VTEC ใช้โมเดล Spherical Harmonics Expansion ที่ Degree และ Order ที่ 15 ของ Solar-Geomagnetic Reference Frame ในการคำนวณ และใช้ Piece-Wise Linear Functions สำหรับเป็นข้อมูลตัวแทนในเวลาหลัก (Time Domain) สำหรับการแปลงค่าจาก Line of Sight TEC ไปเป็น VTEC นั้นใช้โมเดล ซึ่ง Modify มาจาก Single Layer Mapping Function ของ The Jet Propulsion Laboratory (JPL) Extended Slab Model Mapping Function โดย Mapping Function ดังกล่าวคำนวณมาจากมุมสูงของแต่ละดาวเทียม (Geodetic Satellite Elevation Angles) ทั้งนี้ในการคำนวณค่า Ionospheric Pierce Points นั้น กำหนดให้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็น Spherical Layer ซึ่งมีรัศมีเท่ากับ 6,821 กิโลเมตร อย่างไรก็ตาม โมเดล GIM แบบ Final นั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถูกต้องประมาณ 2-8 TECU โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ช่วงเวลาของวัฏจักรสุริยะ (Solar Circle) ฤดูกาลและตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณ เป็นต้น (CODE, 2012)

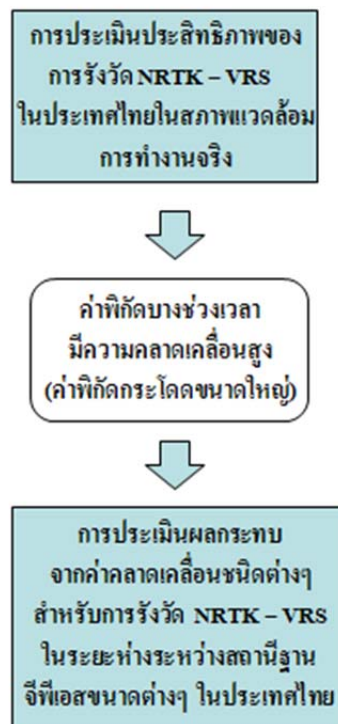
1	END OF TEC MAP														
2	START OF TEC MAP														
2010	2	4	2	0	0	EPOCH OF CURRENT MAP									
87.5-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
13	14	14	14	14	14	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16
16	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	18	18
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	17	17	17	16	16
16	15	15	15	14	14	14	13	13	13	13	13	13	13	13	13
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13						
85.0-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
15	15	16	16	16	17	17	17	18	18	18	18	19	19	19	19
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	19	19	20	20	21
21	22	23	23	23	24	24	23	23	23	22	22	21	20	19	18
17	16	15	15	14	14	13	13	13	13	12	12	13	13	13	13
13	13	13	14	14	14	14	15	15							
82.5-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
19	19	20	20	21	21	22	22	22	23	23	23	23	23	23	22
22	21	21	20	19	18	18	17	17	17	18	18	19	20	21	23
24	26	27	28	29	30	30	30	30	29	28	26	25	23	21	20
18	17	15	14	14	13	13	13	14	14	14	15	15	16	16	17
17	17	17	18	18	18	18	18	19							
80.0-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
25	25	25	25	26	26	27	27	28	28	28	28	28	28	28	27
26	25	24	22	21	19	18	17	16	15	15	16	17	19	21	23
26	28	31	33	34	35	36	36	35	34	32	30	27	25	22	19
17	15	14	13	13	13	14	15	16	17	19	20	22	23	24	24
25	25	25	25	25	25	25	25	25							
77.5-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
32	31	31	31	32	32	32	33	33	33	33	33	32	32	31	31
30	28	27	25	23	21	18	16	15	13	13	13	14	16	19	22
26	29	32	35	37	39	39	39	38	36	33	30	27	23	20	17
14	12	10	10	10	12	14	17	20	23	26	28	31	32	34	35
35	35	35	34	34	33	33	32	32							

รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่าง GIM แบบ Final ของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยสำหรับการศึกษาผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (NRTK) ในประเทศไทยนั้น มีขั้นตอนการดำเนินการเริ่มตั้งแต่การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัด NRTK แบบ VRS ในประเทศไทย ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริงซึ่งทำให้พบค่าพิสัยบางช่วงเวลามีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิสัยกระโดดขนาดใหญ่) จากนั้นจึงดำเนินการประเมินผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆสำหรับการรังวัด NRTK แบบ VRS ในประเทศไทย โดยในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังกล่าวอย่างละเอียด (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสำหรับการศึกษาผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส (NRTK) ในประเทศไทย

#### 4.1 การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง

มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยพิจารณาความถูกต้องทางตำแหน่ง (Accuracy) ความแม่นยำ (Precision) และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัด (Reliability) ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันของการทำงานจริงโดยการหาค่าพิกัดตำแหน่งจากการรังวัด NRTK แบบ VRS ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมสำหรับสถานีผู้ใช้งาน รุ่น Trimble 5700 จำนวน 2 สถานี โดยสถานีที่ 1 เป็นสถานีที่เปิดโล่ง (เป็นสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การรับสัญญาณดาวเทียม) และสถานีที่ 2 เป็นสถานีที่มีสิ่งปกคลุมระดับปานกลาง ซึ่งทั้ง 2 สถานีนี้ ตั้งอยู่ที่วัดอ่างศิลา อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ( ซึ่งได้กำหนดอัตราในการบันทึกค่าพิกัดตำแหน่งทุกๆ 1 วินาที จำนวน 13 ชั่วโมง ระหว่างเวลา 11:21:00 - 00:21:00 เวลาประเทศไทย (UTC +7)) ของวันที่ 14 และ 15 สิงหาคม พ.ศ.2551 ตามลำดับ โดยใช้ระบบสื่อสารระหว่างสถานีผู้ใช้งานกับศูนย์ควบคุมส่วนกลาง ผ่าน GPRS ด้วยโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งานสำหรับการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย



รูปที่ 4.3 แสดงสภาพแวดล้อมของสถานีผู้ใช้งานทั้งสองสถานีโดยรูปบนคือ สถานีที่เปิดโล่ง และรูปล่างคือ สถานีที่มีสิ่งปกคลุมระดับปานกลาง

#### 4.1.1 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

4.1.1.1 การเปรียบเทียบอัตราผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัดระหว่างสถานีเปิดโล่งกับสถานีปกคลุมระดับปานกลาง โดยเปรียบเทียบในรูปแบบของอัตราผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัดของทั้งสองสถานี ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\frac{\text{จำนวนผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัด}}{\text{จำนวน Epochs ทั้งหมดของการรับสัญญาณ}} * 100 \quad (4.1)$$

ผลลัพธ์ที่ได้ปรากฏว่า อัตราผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัดของสถานีเปิดโล่งเท่ากับ 79.9 % ในขณะที่อัตราผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัดของสถานีปกคลุมเท่าที่ร้อยละ 58.0 % (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) ทั้งนี้ในสภาพพื้นที่จริงในสนามได้มีการเปลี่ยนแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือและโอนถ่ายข้อมูลค่าพิกัดจากตัวควบคุมเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (Receiver Controller) โดยทั้งสองสถานีใช้เวลาสำหรับการเปลี่ยนแบตเตอรี่และการโอนถ่ายข้อมูลดังกล่าวเท่าๆกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัดของสถานีเปิดโล่งกับสถานีปกคลุมระดับปานกลาง

สถานี	อัตราผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัด
เปิดโล่ง	79.9%
ปกคลุมระดับปานกลาง	58.0%

4.1.1.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวเชิงตำแหน่งของสถานีเปิดโล่งและสถานีปกคลุมระดับปานกลาง โดยการพล็อตกราฟและคำนวณค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของค่าพิกัด ทางตะวันออก (Easting) ทางเหนือ (Northing) และ ทางตั้ง (Height) ดังสมการที่ (4.2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ave})^2}{n}} \quad (4.2)$$

โดยที่

$x_i$  คือ ค่าพิกัดในแต่ละ Epoch

$x_{ave}$  คือ ค่าเฉลี่ยค่าพิกัดของทุก Epoch

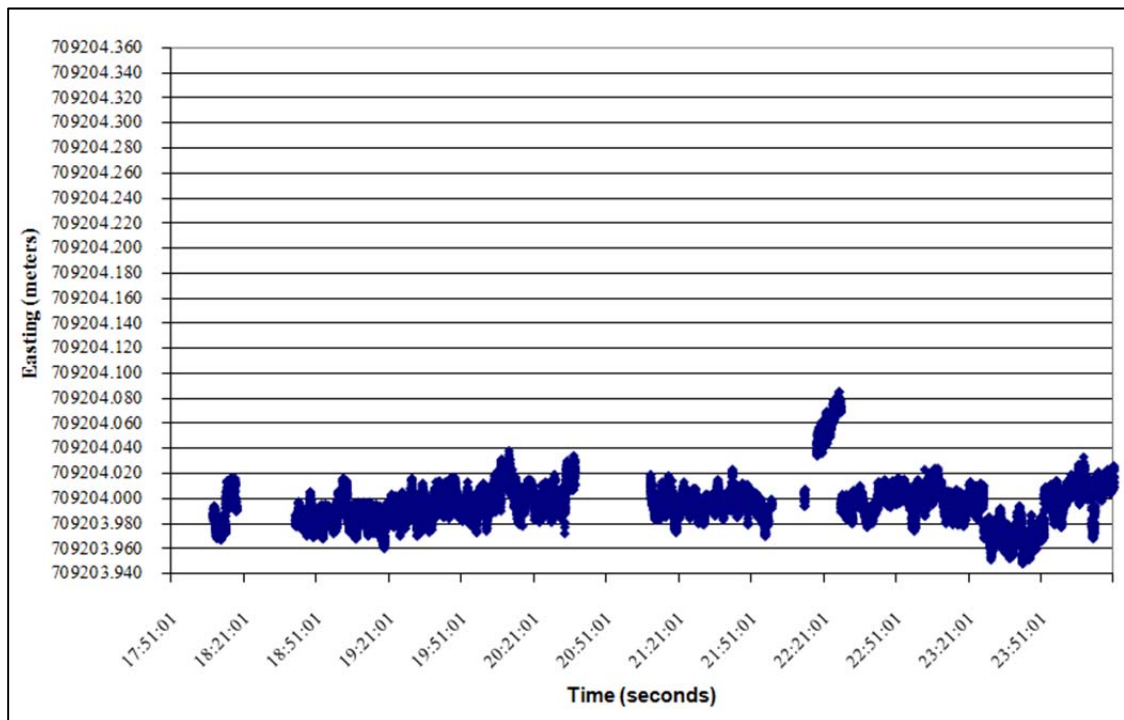
$n$  คือ จำนวน Epoch ทั้งหมด

ผลลัพธ์ที่ได้ว่า สถานีที่เปิดโล่ง มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบอยู่ในระดับ 1-3 เซนติเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง อยู่ในระดับ 45 เซนติเมตร ส่วนที่สถานีปกคลุมระดับปานกลาง มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบอยู่ในระดับ 2-3 เซนติเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง อยู่ในระดับ 10 เซนติเมตร

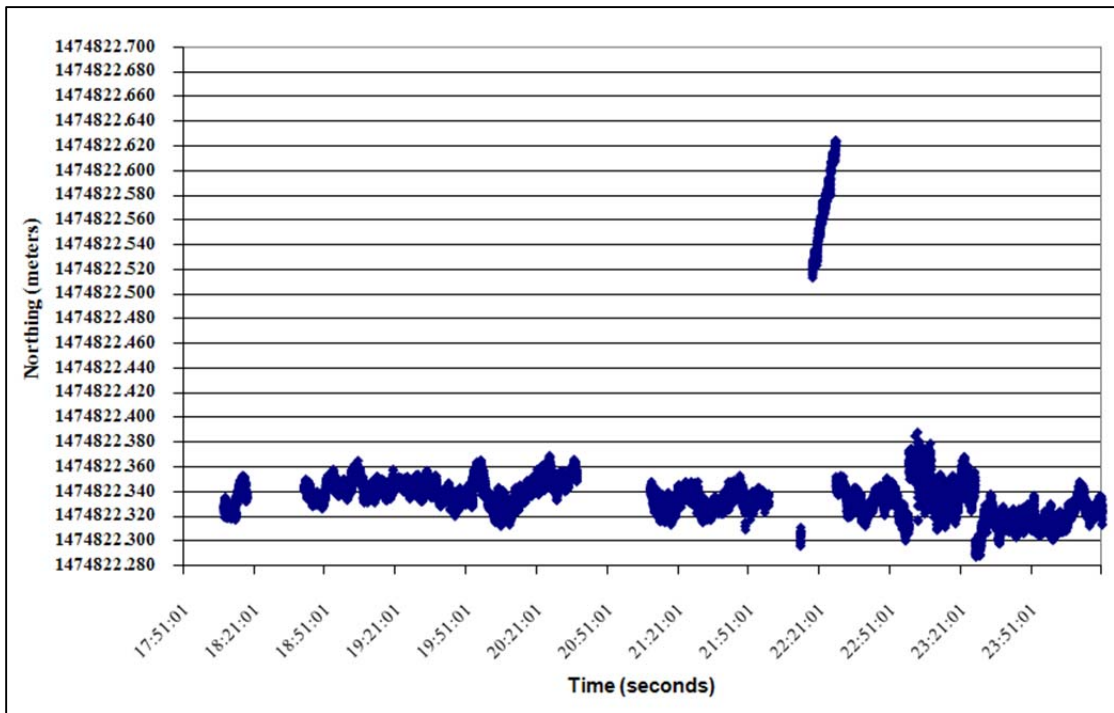
รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงกราฟการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางตะวันออก ทางเหนือ และทางดิ่ง ตามลำดับของสถานีเปิดโล่ง ในขณะที่ รูปที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงกราฟการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางตะวันออก ทางเหนือและทางดิ่ง ตามลำดับของสถานีปกคลุมระดับปานกลาง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า RMSE ทางตะวันออก ทางเหนือและทางดิ่ง ของสถานีเปิดโล่ง และสถานีปกคลุมระดับปานกลาง

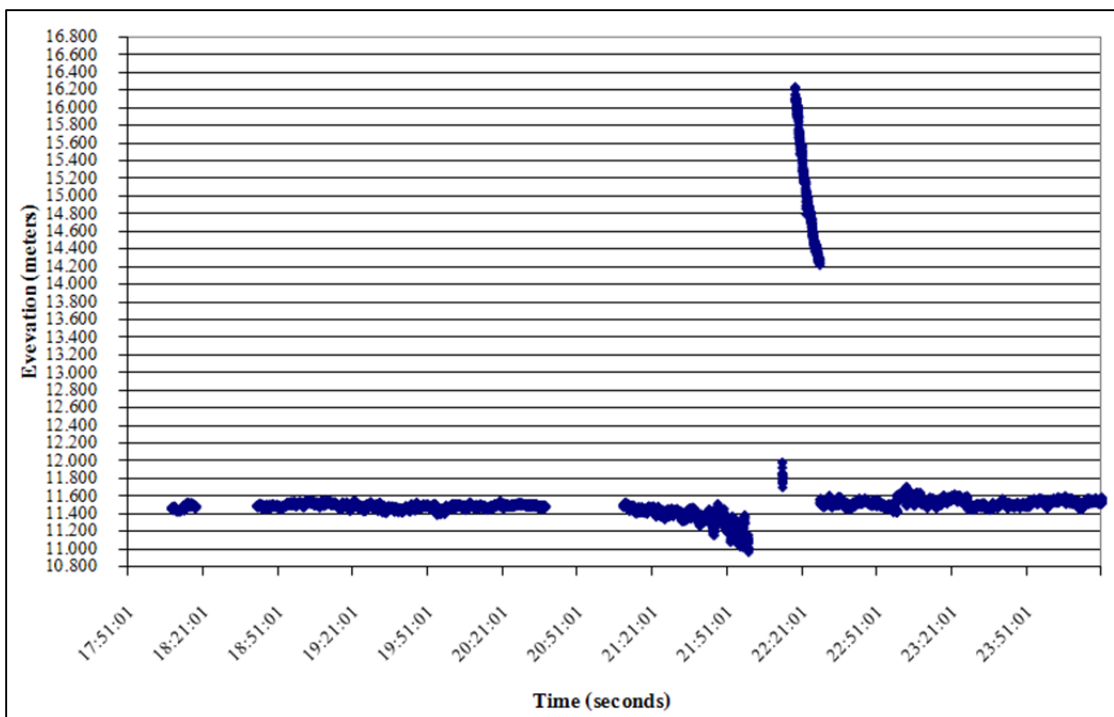
สถานี	RMSE		
	Northing (m)	Easting (m)	Elevation (m)
เปิดโล่ง	0.032	0.016	0.448
ปกคลุมระดับปานกลาง	0.034	0.023	0.102



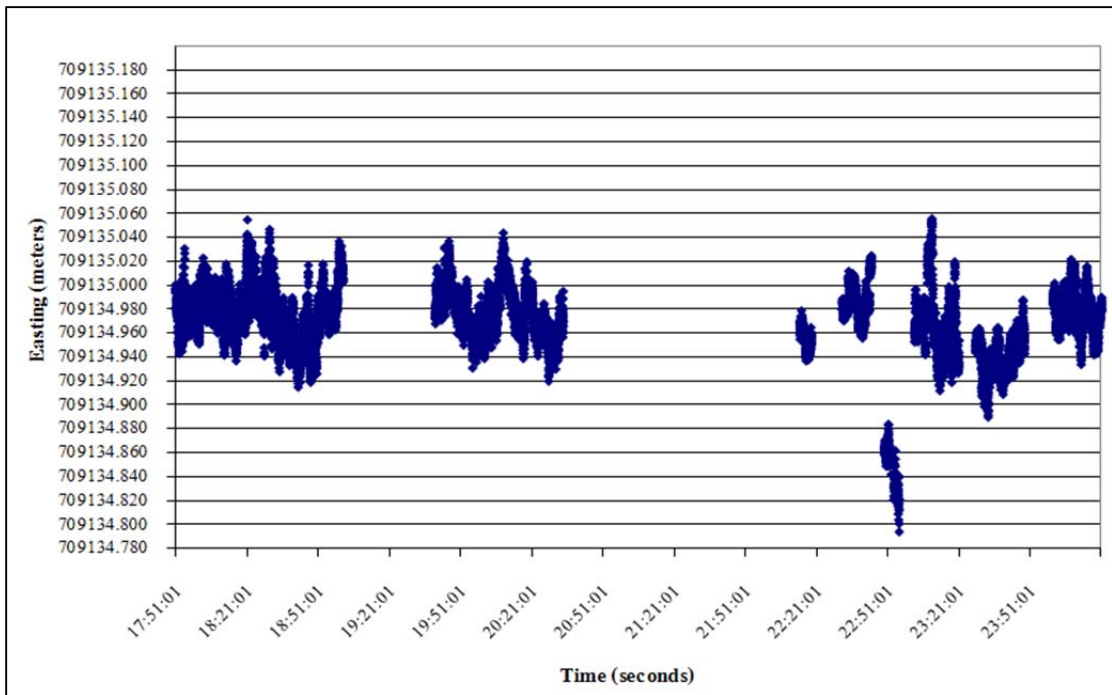
รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านตะวันออกโดยใช้ VRS ที่สถานีเปิดโล่ง



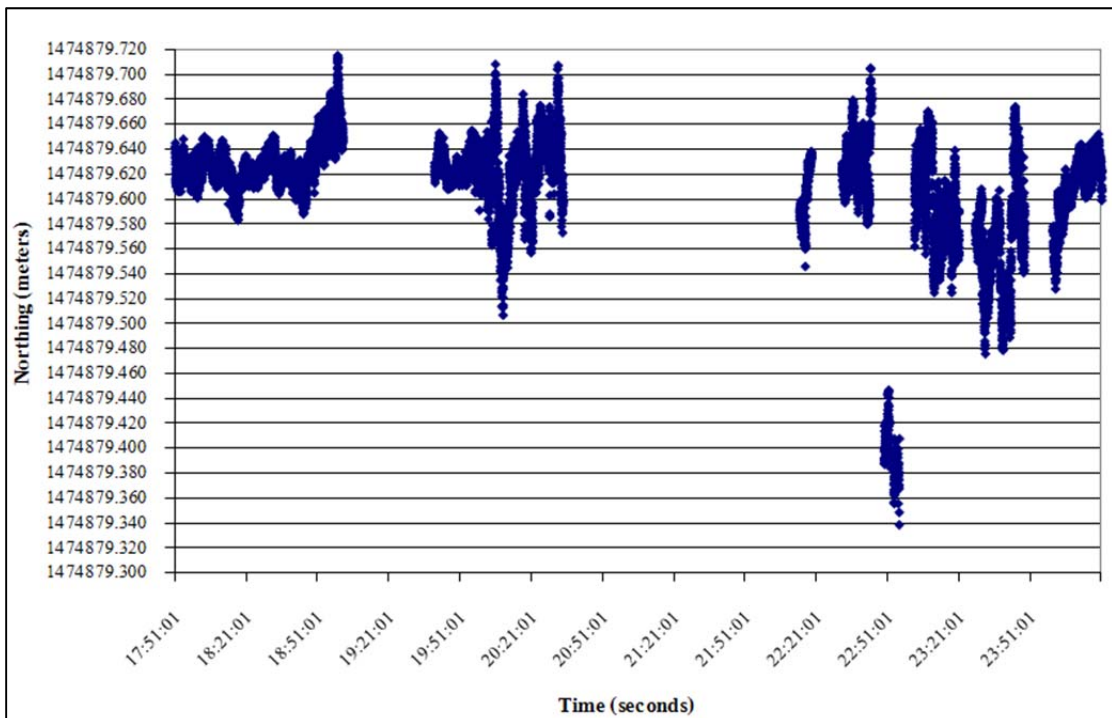
รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านเหนือ โดยใช้ VRS ที่สถานีเปิดโล่ง



รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางดิ่งโดยใช้ VRS ที่สถานีเปิดโล่ง

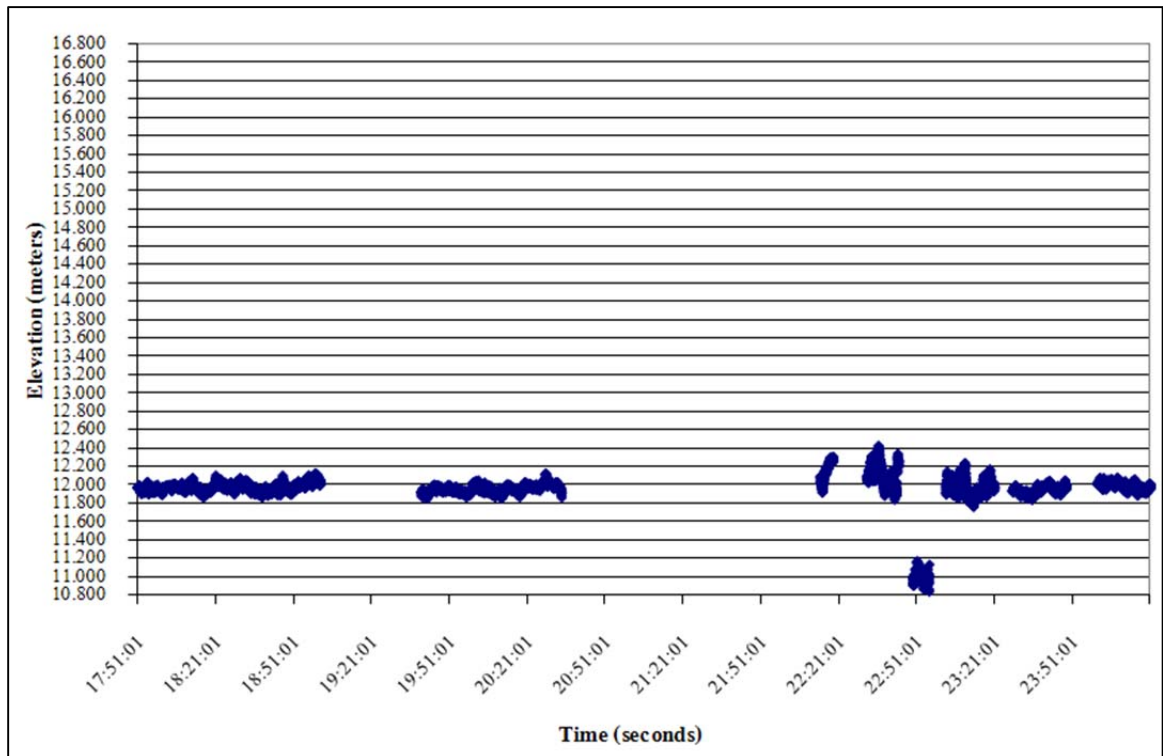


รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านตะวันออกโดยใช้ VRS ที่สถานีปกคลุมระดับปานกลาง



รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางด้านเหนือโดยใช้ VRS ที่สถานีปกคลุมระดับปานกลาง





รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวเชิงตำแหน่งทางดิ่งโดยใช้ VRS ที่สถานีปกคลุมระดับปานกลาง

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการได้ค่าพิกัดจากเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในพื้นที่ประเทศไทยสรุปได้ว่า บริเวณพื้นที่เปิดโล่งมีโอกาสของการได้ค่าพิกัดตำแหน่งมากกว่าบริเวณพื้นที่ที่มีสิ่งปกคลุม ส่วนค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของทั้งสองสถานีนี้นั้น สรุปได้ว่า ค่าพิกัดในทางราบอยู่ในระดับ 1 ถึง 3 เซนติเมตร และค่าพิกัดในทางดิ่งอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามค่าพิกัดทั้งทางราบและทางดิ่งของทั้งสองสถานี ยังมีบางช่วงเวลาที่ค่าพิกัดบางช่วงเวลามีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่ากระโดดขนาดใหญ่) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.9 (ช่วงเวลาประมาณ 22:21 ถึง 22:30 น. สำหรับสถานีเปิดโล่ง และ 20:51 ถึง 23:00 น. สำหรับสถานีปกคลุมระดับปานกลาง) ทั้งนี้ค่ากระโดดขนาดใหญ่ น่าจะเกิดขึ้นจากการประมวลผลเพื่อหาค่าเลขปริศนาที่เกิดความผิดพลาดโดยสืบเนื่องมาจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งในหัวข้อถัดไปได้วิเคราะห์ถึงค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในพื้นที่ประเทศไทย

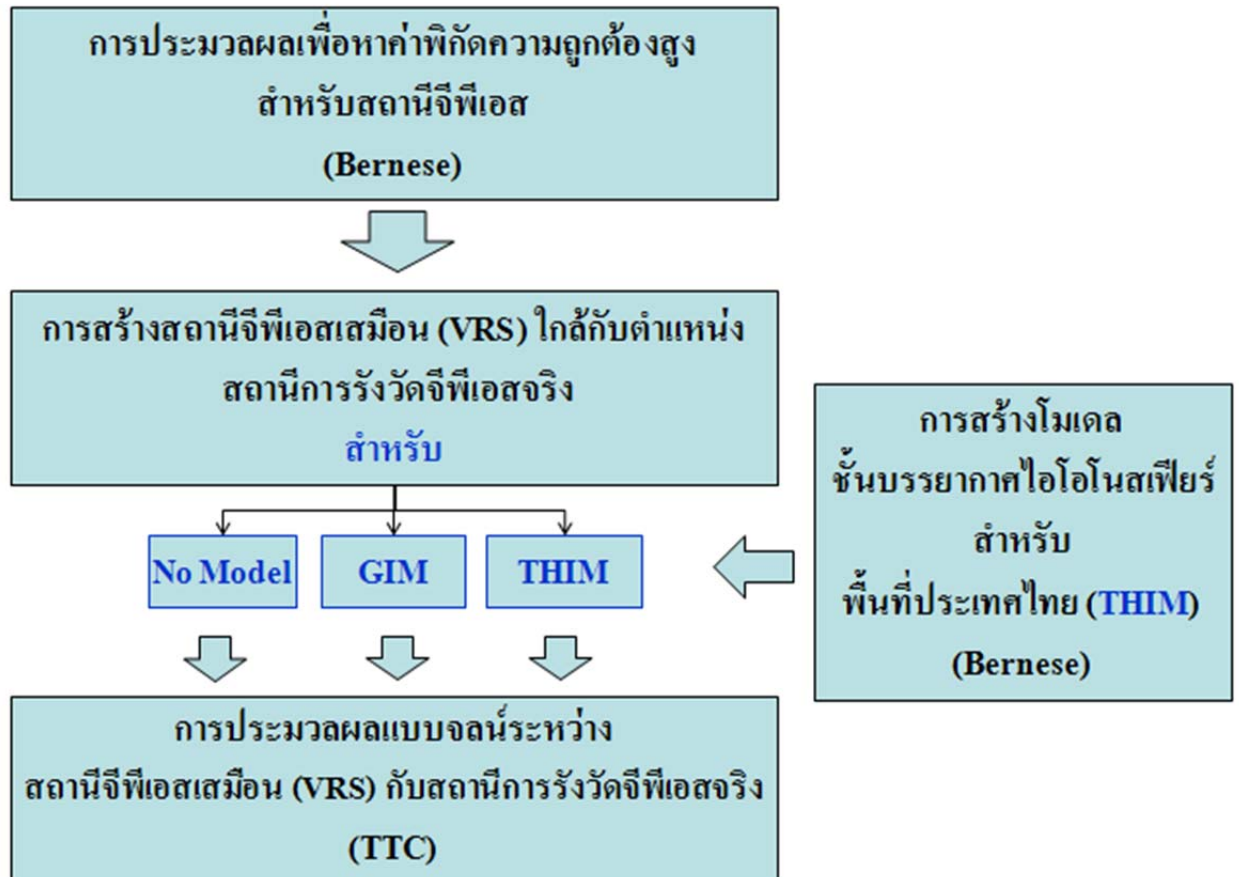
## 4.2 การประเมินผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆในประเทศไทย

### 4.2.1 วัตถุประสงค์

- 4.2.1.1 เพื่อประเมินผลกระทบจากระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสถาวรขนาดต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในพื้นที่ประเทศไทย (ซึ่งประเทศไทยจัดอยู่ในพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตร) รวมถึงประเมินผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยวิธีดังกล่าวด้วย
- 4.2.1.2 ประเมินผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในพื้นที่ประเทศไทย โดยการขจัดหรือลดขนาดของค่าคลาดเคลื่อนชนิดอื่นๆให้ได้มากที่สุด อาทิเช่น ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียม เป็นต้น
- 4.2.1.3 ศึกษาถึงวิธีการลดขนาดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ประเทศไทย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS สำหรับประเทศไทยโดย
  - 4.2.1.3.1 ใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ GIM ซึ่งเป็นแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ระดับโลก (Global)
  - 4.2.1.3.2 ใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สร้างขึ้นเองเฉพาะในพื้นที่ประเทศไทยจากซอฟต์แวร์ Bernese

#### 4.2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงวิธีดำเนินการวิจัยและผลที่ได้รับซึ่งต้องนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยในแต่ละขั้นตอนใช้ซอฟต์แวร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.10 แสดงวิธีดำเนินการวิจัยสำหรับการประเมินผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆ ในประเทศไทย

#### 4.2.2.1 การประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงสำหรับสถานีจีพีเอส

โดยทั่วไป การประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงสำหรับสถานีจีพีเอสนั้นวิธีที่นิยมใช้มี 2 วิธี ได้แก่ การหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงด้วยเทคนิคจุดเดี่ยว (Precise Point Positioning-PPP) และการหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงด้วยเทคนิคการหาค่าต่าง (Differential GPS- DGPS) ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงด้วยเทคนิคการหาค่าต่างโดยใช้ซอฟต์แวร์ Bernese ในการประมวลผลซึ่งมีวิธีดำเนินการดังนี้ (รูปที่ 4.10)

##### 4.2.2.1.1 การเตรียมข้อมูลจีพีเอส

สำหรับการประมวลข้อมูลจีพีเอสด้วยซอฟต์แวร์ Bernese นั้น ข้อมูลจีพีเอสต้องอยู่ในรูปแบบของข้อมูล RINEX แบบรายวัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจีพีเอสจากหลายหน่วยงาน (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1) โดยที่แต่ละหน่วยงานมีการจัดเก็บข้อมูลจีพีเอสแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง และกรมอุตุนิยมวิทยาจัดเก็บข้อมูลจีพีเอสในรูปแบบ RINEX แบบรายชั่วโมงซึ่งสามารถใช้ซอฟต์แวร์ Bernese ทำการรวมข้อมูลให้เป็นแบบรายวันได้ ในขณะที่ข้อมูลจากกรมแผนที่ทหารและบริษัทเอสดีเอ็ม จำกัด จัดเก็บอยู่ในรูปแบบของไฟล์ Leica แบบรายชั่วโมง ซึ่งต้องใช้ซอฟต์แวร์ของ Leica แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ RINEX เสียก่อนแล้วจึงทำการรวมไฟล์ให้เป็นแบบรายวันด้วยซอฟต์แวร์ Bernese อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจีพีเอสจาก IGS จัดเก็บในรูปแบบของไฟล์บีบอัดข้อมูล RINEX แบบรายวันที่เรียกว่า Hatanaka Compression (\*.crx) ซึ่งต้องใช้ซอฟต์แวร์ crx2mx ทำการขยายไฟล์เสียก่อนดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทั้งนี้สามารถดาวน์โหลดซอฟต์แวร์ crx2mx ได้จาก เว็บไซต์ <http://facility.unavco.org/software/preprocessing/preprocessing.html#hatanaka> ทั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 1-7 กุมภาพันธ์ 2553

```

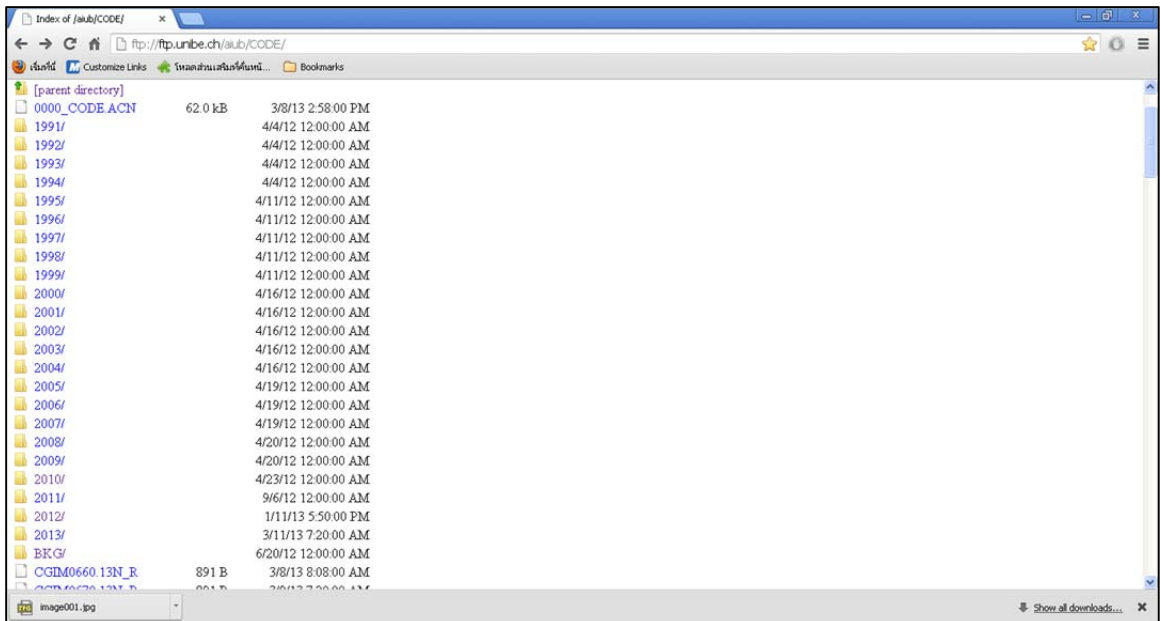
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\hatanaka>rem Echo off
C:\hatanaka>rem D:
C:\hatanaka>cd C:\hatanaka
C:\hatanaka>rem crx2rnx BLAN009A.09d
C:\hatanaka>for %g in (*.13d) do crx2rnx %g
C:\hatanaka>crx2rnx BLMG032A.13d
C:\hatanaka>for %g in (*.13d) do del %g
C:\hatanaka>del BLMG032A.13d
C:\hatanaka>rem dir C:\RNXCMP\bin
C:\hatanaka>pause
Press any key to continue . . .

```

รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างการขยายไฟล์ RINEX ด้วยซอฟต์แวร์ crx2rnx

#### 4.2.2.1.2 การเตรียมข้อมูลวงโคจรดาวเทียม

ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้แบบ Final ในรูปแบบไฟล์ PRE โดยเป็นข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบรายวัน ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/> (ดังแสดงในรูปที่ 4.12) โดยไฟล์วงโคจรดาวเทียมที่ดาวน์โหลดมานั้นจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ EPH ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนเป็นไฟล์ PRE ก่อน ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนนามสกุลไฟล์เท่านั้น (Rename) หลังจากนั้นจึงนำไฟล์ PRE ไว้ในโฟลเดอร์ C:\GPSDATA\XXXX\ORB เมื่อ XXXX คือชื่อของ Campaign ในซอฟต์แวร์ Bernese



รูปที่ 4.12 แสดงหน้าเว็บไซต์ของ Center for Orbit Determination in Europe (CODE) สำหรับดาวน์โหลดข้อมูลเพื่อประมวลผลความถูกต้องสูงด้วยซอฟต์แวร์ Bernese

#### 4.2.2.1.3 ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงเหวี่ยงจากการหมุนของโลก (Earth Rotation Parameters/ Pole Information)

ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้จะเป็นแบบรายปี โดยข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ ERP (ตัวอย่างเช่น C04\_2010.ERP โดย 2010 คือปี ค.ศ.) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER50/ORB/> จากนั้นให้นำไฟล์ดังกล่าวไว้ในโฟลเดอร์ C:\GPSDATA\XXXX\ORB เมื่อ XXXX คือชื่อของ Campaign ในซอฟต์แวร์ Bernese

#### 4.2.2.1.4 ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจาก Differential Code Bias ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้จะเป็นแบบรายเดือน โดยข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ DCB (ตัวอย่างเช่น P1P21002.DCB โดย 10 คือปี ค.ศ. สองหลักท้ายและ 02 คือ ลำดับของเดือน) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/> (ดังแสดงในรูปที่ 5.3) จากนั้นให้นำไฟล์ดังกล่าวไว้ในโฟลเดอร์ C:\GPSDATA\XXXX\ORB เมื่อ XXXX คือชื่อของ Campaign ในซอฟต์แวร์ Bernese

#### 4.2.2.1.5 ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากนาฬิกาควเทียม

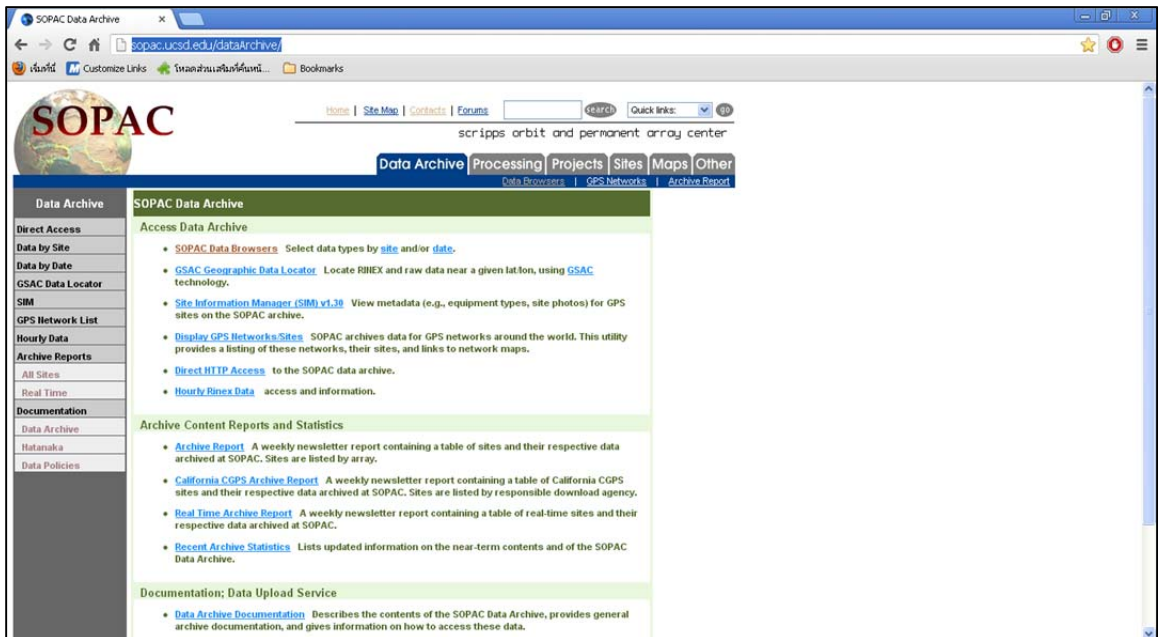
ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้จะเป็นแบบรายวัน โดยข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ CLK (ตัวอย่างเช่น CODE15652.CLK โดย 1565 คือ GPS Week (4 หลักแรก) และ 2 ลำดับวันของสัปดาห์ซึ่งเริ่มจาก 0 ในวันอาทิตย์) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/> (ดังแสดงในรูปที่ 5.3) จากนั้นให้นำไฟล์ดังกล่าวไว้ในโฟลเดอร์ C:\GPSDATA\XXXX\ORB เมื่อ XXXX คือชื่อของ Campaign ในซอฟต์แวร์ Bernese

#### 4.2.2.1.6 ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์แบบทั่วโลก

ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนทั้งสองดังกล่าวจะเป็นแบบรายวัน โดยข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลกจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ ION ในขณะที่ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์แบบทั่วโลกอยู่ในรูปแบบของไฟล์ TRO ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/> (ดังแสดงในรูปที่ 4.12) จากนั้นให้นำทั้งสองไฟล์ดังกล่าวไว้ในโฟลเดอร์ C:\GPSDATA\XXXX\ATM เมื่อ XXXX คือชื่อของ Campaign ในซอฟต์แวร์ Bernese

#### 4.2.2.1.7 การเตรียมข้อมูลพิกัดตำแหน่งของสถานีฐานจีพีเอสดาว IGS สำหรับสถานีที่ใช้ในการตรึง (Fixed) ค่าพิกัด

โดยทั่วไปสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/> (ดังแสดงในรูปที่ 4.13) โดยข้อมูลพิกัดตำแหน่งดังกล่าวจะเปลี่ยนตามเวลาดังนั้นสามารถเลือกข้อมูลพิกัดตำแหน่งสำหรับช่วงเวลาที่ทำการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสได้ จากนั้นให้นำข้อมูลพิกัดตำแหน่งดังกล่าวใส่ไว้ในไฟล์ C:\GPSDATA\XXXX\STA\YYYY.STA เมื่อ XXXX คือชื่อของ Campaign ในซอฟต์แวร์ Bernese และ YYYY คือชื่อของไฟล์ค่าพิกัด



รูปที่ 4.13 แสดงหน้าเว็บไซต์ของ The Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) สำหรับดาวน์โหลดข้อมูลพิกัดตำแหน่งของสถานีที่ใช้ในการตรึง (Fixed) ค่าพิกัด

#### 4.2.2.1.8 การเตรียมข้อมูลอื่นๆที่จำเป็นในการประมวลผล

ซอฟต์แวร์ Bernese เป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัย ซึ่งมีวิธีการคำนวณที่สลับซับซ้อน ในขั้นตอนการประมวลผล จะต้องใช้ข้อมูลการแก้ค่าคลาดเคลื่อนจำนวนมาก อาทิเช่น ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากดาวเทียมและข้อมูลดาวเทียมที่มีปัญหา ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ และข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงแม่เหล็กเป็นต้น ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้ตาม ตารางที่ 4.3 หลังจากนั้นจึงนำไฟล์เหล่านั้นไว้ในโฟลเดอร์ C:\BERN50\GPS\GEN



ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่จำเป็นต้องการใช้ในการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Bernese (สมเกียรติ อองศ์เลขา, 2551)

ชื่อไฟล์	รายละเอียด	ความจำเป็นในการ Update	Download Site
CONST.	ค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ	ไม่	Aiub*
DATUM.	ข้อมูล Datum	เมื่อมี Ellipsoid ใหม่	Aiub*
RECEIVER.	ข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องรับ	เมื่อมีเครื่องรับชนิดใหม่	Aiub*
PHAS_COD.I01	Relative Antenna Model แบบ ระบุ Radome Codes	เมื่อมีเสาอากาศชนิดใหม่หรือ มีค่าแก้ไขใหม่	Aiub*
SATELLIT.I01	ข้อมูลเกี่ยวกับดาวเทียมใช้คู่กับ PHAS_COD.I01	เมื่อมีการส่งดาวเทียมดวง ใหม่	Aiub*
PHAS_COD.I05	Absolute Antenna Model แบบ ระบุ Radome Codes	เมื่อมีเสาอากาศชนิดใหม่หรือ มีค่าแก้ไขใหม่	Aiub*
SATELLIT.I05	ข้อมูลเกี่ยวกับดาวเทียมใช้คู่กับ PHAS_COD.I05	เมื่อมีการส่งดาวเทียมดวง ใหม่	Aiub*
SAT____.CRX	ข้อมูลดาวเทียมที่มีปัญหา	เมื่อเกิดปัญหากับดาวเทียม	Aiub*
GPSUTC.	ข้อมูล GPS Leap Second	เมื่อมีการปรับแก้เวลา	Aiub*
IAU.2000NUT	ข้อมูล Nutation Model Coefficients	ไม่	Aiub*
IERS.2000SUB	ข้อมูลย่อการวางตัวของโลก	ไม่	Aiub*
JGM.3	ข้อมูล Earth Potential Coefficient	ไม่	Aiub*
POLOFF.	ข้อมูล Pole Offset Coefficients	ไม่	Aiub*
DE200.EPH	ข้อมูลวงโคจรดาวเคราะห์	ไม่	JPL**
_____.BLQ	ข้อมูล Ocean Loading	เมื่อใช้สถานีใหม่	OSO***

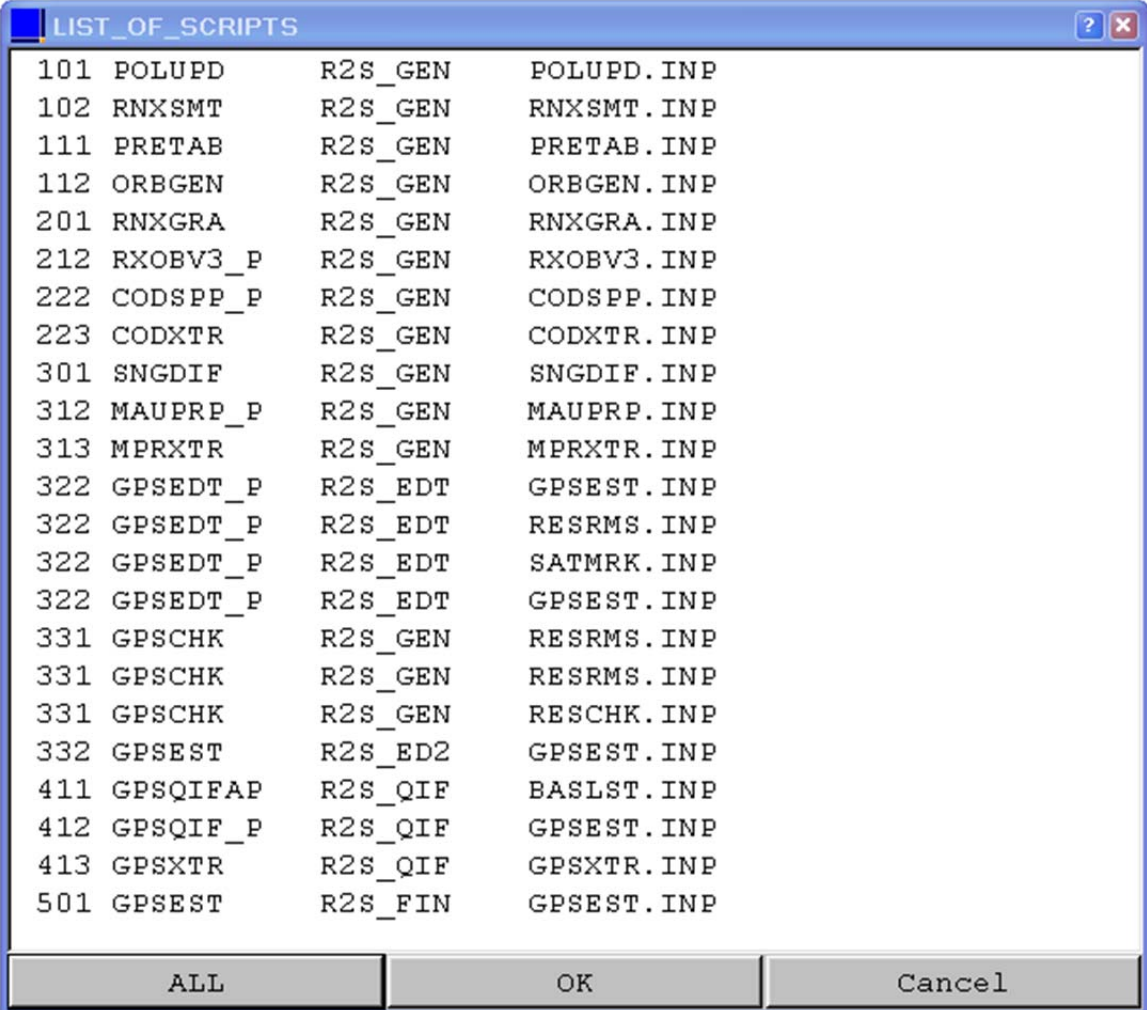
\*Aiub หมายถึง <http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/GEN>

\*\*JPL หมายถึง <http://www.jpl.nasa.gov>

\*\*\*OSO หมายถึง <http://www.oso.chalmers.se/~loading/>

#### 4.2.2.1.9 การประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงด้วย Bernese Processing Engine (BPE)

โดยทั่วไปการประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงด้วยซอฟต์แวร์ Bernese จะมีความน่าเชื่อถือก็ต่อเมื่อทำการประมวลผลแบบรายวันเป็นเวลา 1 สัปดาห์ (Weekly Solution) ซึ่งหากประมวลผลด้วยวิธีธรรมดาจะมีขั้นตอนค่อนข้างมาก และมีความซับซ้อน เมื่อเทียบกับการใช้วิธี Bernese Processing Engine (BPE) ทั้งนี้ โมดูลที่ใช้ในการประมวลผลเรียงตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.14 และการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับแต่ละโมดูล แสดงในภาคผนวก ก การประมวลผลของแต่ละโมดูลที่สำคัญมีดังนี้



Script ID	Script Name	Engine Type	Input File
101	POLUPD	R2S_GEN	POLUPD.INP
102	RNXSMT	R2S_GEN	RNXSMT.INP
111	PRETAB	R2S_GEN	PRETAB.INP
112	ORBGEN	R2S_GEN	ORBGEN.INP
201	RNXGRA	R2S_GEN	RNXGRA.INP
212	RXOBV3_P	R2S_GEN	RXOBV3.INP
222	CODSPP_P	R2S_GEN	CODSPP.INP
223	CODXTR	R2S_GEN	CODXTR.INP
301	SNGDIF	R2S_GEN	SNGDIF.INP
312	MAUPRP_P	R2S_GEN	MAUPRP.INP
313	MPRXTR	R2S_GEN	MPRXTR.INP
322	GPSEDT_P	R2S_EDT	GPSEST.INP
322	GPSEDT_P	R2S_EDT	RESRMS.INP
322	GPSEDT_P	R2S_EDT	SATMRK.INP
322	GPSEDT_P	R2S_EDT	GPSEST.INP
331	GPSCHK	R2S_GEN	RESRMS.INP
331	GPSCHK	R2S_GEN	RESRMS.INP
331	GPSCHK	R2S_GEN	RESCHK.INP
332	GPSEST	R2S_ED2	GPSEST.INP
411	GPSQIFAP	R2S_QIF	BASLST.INP
412	GPSQIF_P	R2S_QIF	GPSEST.INP
413	GPSXTR	R2S_QIF	GPSXTR.INP
501	GPSEST	R2S_FIN	GPSEST.INP

รูปที่ 4.14 แสดงลำดับโมดูลที่ใช้ในการประมวลผลด้วยวิธี Bernese Processing Engine (BPE)

#### 4.2.2.1.9.1 การประมวลผลสำหรับการแปลงรูปแบบ (Format) อื่นๆให้อยู่ในรูปแบบของซอฟต์แวร์ Bernese

การประมวลผลสำหรับหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงรูปแบบค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดให้อยู่ในรูปแบบที่ซอฟต์แวร์ Bernese สามารถนำไปใช้ในการประมวลผลได้ ที่สำคัญได้แก่

- POLUPD ใช้สำหรับสร้างไฟล์ Bernese Pole (.ERP) จากไฟล์ IERS (IEP)
- RNXSMT ใช้สำหรับจัด ค่าคลาดเคลื่อน เบื้องต้นของไฟล์ RINEX พร้อมทั้งจะทำการ Smooth ข้อมูลห้สของคลื่นส่ง (Code Observations) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ .SMT
- PRETAB ใช้สำหรับการสร้างไฟล์วงโคจรดาวเทียมแบบ Tubular จากข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Final โดยผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ .TAB และ .CLK
- ORBGEN ใช้สำหรับการสร้างไฟล์ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม .STD จากไฟล์ .TAB และ .ERP
- RNXGRA ใช้สำหรับสร้างกราฟเทียมนของข้อมูล RINEX โดยผลลัพธ์จะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ .SMC
- RXOBV3\_P ใช้สำหรับนำเข้าข้อมูลไฟล์ RINEX หรือไฟล์ .SMT ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ Bernese Observation โดยผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ .CZH .CZO .PZH และ .PZO

#### 4.2.2.1.9.2 การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น

การประมวลผลสำหรับหัวข้อนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุและจัดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ เช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลุด คลื่นหลายวิถี หรือจากสาเหตุอื่นๆ การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นประกอบด้วย การเรียกใช้โมดูลต่างๆ ดังนี้

- CODSPP ใช้สำหรับประมวลผลข้อมูลห้สของคลื่นส่ง เพื่อหาค่าแก้नाพิก้าของเครื่องรับพร้อมทั้งทำการแก้ข้อมูลการรังวัดให้อ้างอิงที่เวลา Epoch เดียวกัน (Receiver Clock Synchronization) ในขั้นตอนนี้ได้ตรวจสอบค่า RMS (Root Mean Square) ของผลการปรับแก้มีค่าไม่เกิน 30 เมตร

- SNGDIF ใช้สำหรับการสร้างเส้นฐาน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกสร้างเส้นฐานตามแนวรัศมี (Star)
- MAUPRP ใช้สำหรับตรวจหาและแก้ไขปัญหาคลื่นหลุด
- GPSEST เป็นการปรับแก้เบื้องต้น เพื่อตรวจสอบค่า RMS ว่ามีค่ามากผิดปกติหรือไม่ โดยในขั้นตอนนี้ใช้การประมวลผลข้อมูลแบบสมการ Ionosphere Free Linear Combination ( $L_3$ ) แบบ Float Solution
- RESRMS เพื่อสร้างไฟล์ข้อมูล Residual Statistics ซึ่งจะถูกใช้ในขั้นตอนต่อไป
- SATMRK เพื่อทำการตัดข้อมูลการรังวัดดาวเทียมดวงที่มีค่า RMS มากกว่า 4 เซนติเมตร

#### 4.2.2.1.9.3 การประมวลผลข้อมูลเพื่อหาค่าเลขปริศนา

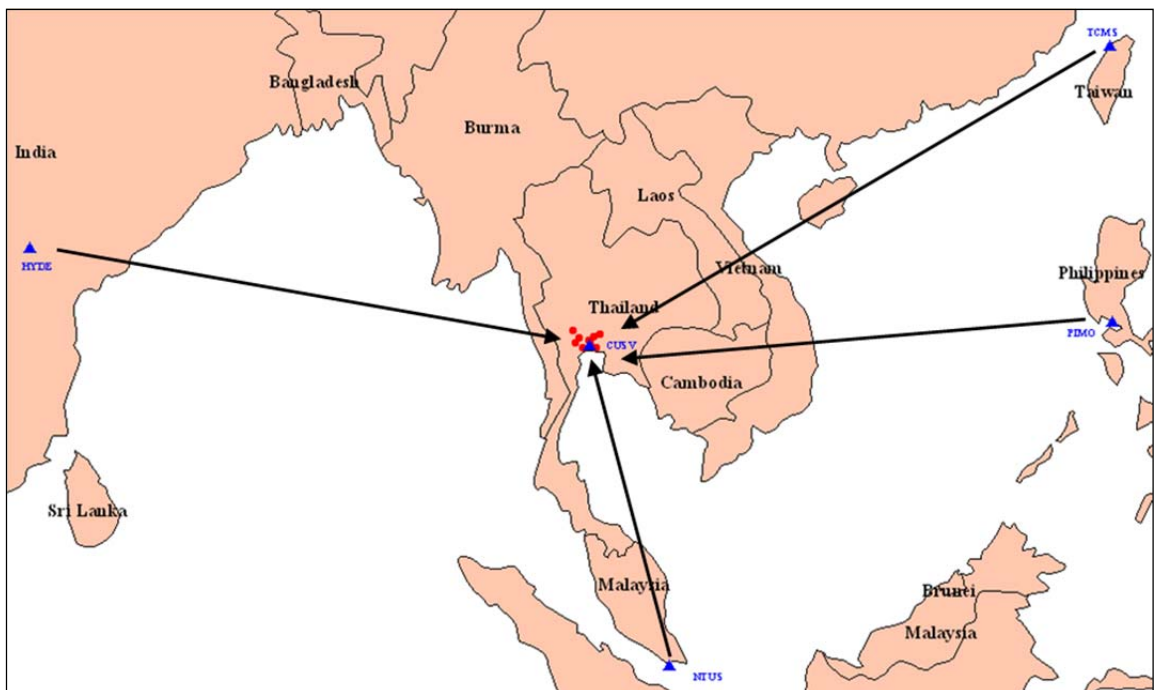
ค่าเลขปริศนา หมายถึง ค่าจำนวนเต็มของลูกคลื่นจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ ณ ขณะเวลาที่เครื่องรับเริ่มถือสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสได้ โดยในขั้นตอนการปรับแก้สมการการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสจะต้องทำการหาค่าเลขปริศนาเป็นเลขจำนวนจริงก่อน (Float Number) แล้วจึงทำการหาค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม (Ambiguity Resolution) ในภายหลัง การประมวลผลข้อมูลเพื่อหาค่าเลขปริศนา ประกอบด้วยการเรียกใช้โมดูลของซอฟต์แวร์ Bernese ดังนี้

- GPSEST โดยใช้คลื่น  $L_1+L_2$  เพื่อหาค่าเลขปริศนาแบบจำนวนเต็ม ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี QIF (Quasi Ionosphere-Free) เนื่องจากเหมาะสมกับการประมวลผลเส้นฐานที่มีความยาวมาก

#### 4.2.2.1.9.4 การประมวลผลสำหรับการปรับแก้ครั้งสุดท้าย

จำนวนเต็มเลขปริศนาที่ได้จากข้อ ค. จะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการปรับแก้ครั้งสุดท้าย (Final Solution) ด้วยโปรแกรม GPSEST โดยใช้สมการ Ionosphere Free Linear Combination ( $L_3$ ) ได้ผลลัพธ์ คือ ค่าพิกัดของทุกสถานี ทั้งนี้ในการปรับแก้ครั้งนี้ได้ทำการตรึงค่าพิกัดระบบ ITRF 2005 ของช่วงเวลาเดือนกุมภาพันธ์ 2553 (February 2010 Epoch) จากสถานี HYDE, TCMS, PIMO

และ NTUS (ดังแสดงในรูปที่ 4.15) เพื่อถ่ายค่าพิกัดไปสู่สถานี CUSV จากนั้นจึงถ่ายค่าพิกัดจากสถานี CUSV ไปสู่สถานีอื่นๆ ต่อไป ตัวอย่างค่าพิกัดของแต่ละสถานีที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Bernese แสดงในรูปที่ 4.16 ดังนั้นค่าพิกัดที่ได้จะเป็นค่าพิกัดในระบบ ITRF 2005 (Feb'10 Epoch) และจะให้ค่าความถูกต้องอยู่ในระดับมิลลิเมตร



รูปที่ 4.15 แสดงการตรึงค่าพิกัดระบบ ITRF 2005 จากสถานี HYDE, TCMS, PIMO และ NTUS สำหรับการคำนวณค่าพิกัดความละเอียดสูงด้วยซอฟต์แวร์ Bernese

IGS05/ITRF05 COORDINATES BASED ON IGS01P37_RS54.SNX/ITRF2000_GPS 24-JUN-09 08:00					
-----					
LOCAL GEODETIC DATUM: IGS05					
NUM	STATION NAME	X (M)	Y (M)	Z (M)	FLAG
1	CUSV	-1132914.7276	6092528.5918	1504633.2693	F
2	HYDE	1208444.4043	5966806.0117	1897077.0173	F
3	NTUS	-1508022.9588	6195576.6136	148799.3961	F
4	PIMO	-3186293.8012	5286624.2781	1601158.3058	F
5	TCMS	-2982783.0608	4966660.0476	2658809.4117	F
6	PKKT	-1132703.7100	6087759.5866	1523587.4642	R
7	BLAN	-1092604.9229	6093002.7095	1531704.9652	R
8	BPLE	-1165297.2429	6090154.6743	1489142.5690	R
9	KTBN	-1108229.2267	6099966.3626	1492516.8333	R
10	OKRK	-1178264.3280	6073650.4059	1544930.0586	R
11	KSIX	-1151871.1020	6080792.1100	1536920.0530	R
12	LADP	-1136511.6525	6089551.8958	1513494.9688	R
13	NAKO	-1079284.2221	6100175.8773	1512613.4835	R
14	SUPH	-1062438.6246	6090262.5620	1563307.8154	R
15	BLMG	-1173898.8920	6106033.4532	1416075.5879	R
16	PLDG	-1209062.0035	6097744.2937	1422375.5442	R
17	PNNK	-1203242.5121	6086106.4484	1475570.5131	R
18	STHP	-1177360.3676	6111613.3626	1389031.3187	R
19	HYDE 22307M001	1208444.4535	5966806.1587	1897076.9151	R
20	NTUS 22601M001	-1508022.7800	6195576.6820	148799.4690	R
21	PIMO 22003M001	-3186293.8000	5286624.2800	1601158.3100	R

รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ (ค่าพิคคของแต่ละสถานี) ที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Bernese

#### 4.2.2.2 ผลของการประมวลผลเพื่อหาค่าพิคคความถูกต้องสูงสำหรับสถานีจีพีเอส

สำหรับการประมวลผลเพื่อหาค่าพิคคความถูกต้องสูงสำหรับสถานีจีพีเอสนั้น (หัวข้อที่ 4.2.2.1) นั้น ผลที่ได้ คือ ค่าพิคคความถูกต้องสูงจำนวน 7 Sessions โดย 1 Session เท่ากับ 1 วัน (Daily Solution) ของทุกสถานีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเมื่อนำค่าพิคคจำนวน 7 Sessions ดังกล่าวมาคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ผลลัพธ์ที่ได้คือไม่เกิน 5 มิลลิเมตรสำหรับทุกสถานี ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้ค่าพิคคความถูกต้องสูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากค่าเฉลี่ยจำนวน 7 Sessions (Weekly Solution) ดังกล่าว โดยค่าพิคคดังกล่าวนี้นำไปใช้ในขั้นตอนที่ 4.2.2.5 ต่อไป

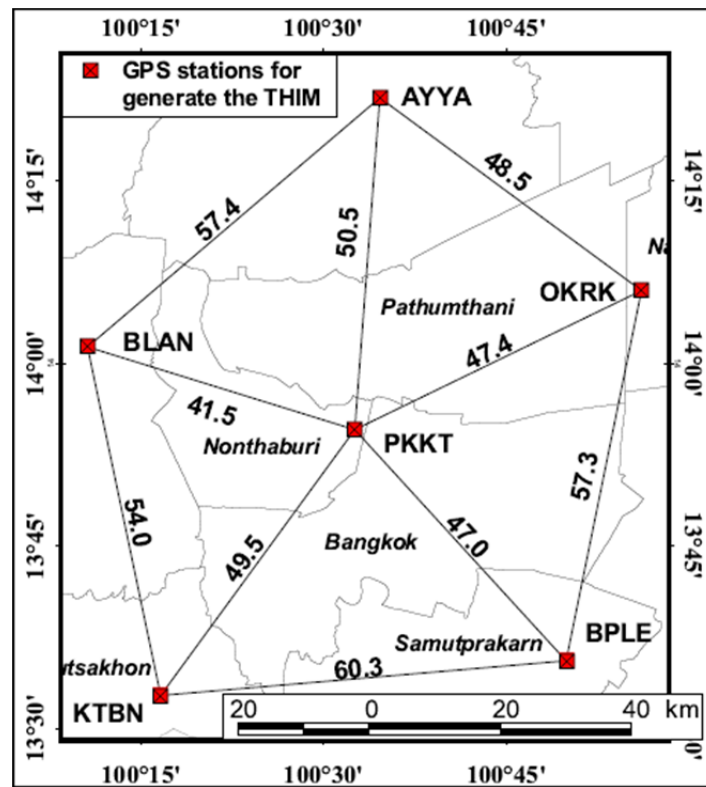
ตารางที่ 4.4 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าพิกัดความถูกต้องสูงจำนวน 7 Sessions (วัน) ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสด้วยซอฟต์แวร์ Bernese

No	Station	Standard Deviation (SD) of the Cartesian Coordinate		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
1	AYYA	0.005	0.001	0.001
2	BLAN	0.004	0.003	0.002
3	BPLE	0.004	0.005	0.002
4	KTBN	0.004	0.005	0.002
5	OKRK	0.005	0.005	0.001
6	PKKT	0.005	0.003	0.002
7	PNNK	0.005	0.005	0.005
8	CUSV	0.004	0.004	0.002
9	DPT9	0.005	0.004	0.001
10	LADP	0.002	0.010	0.004
11	RTSD	0.005	0.002	0.001
12	TMDB	0.005	0.004	0.002

#### 4.2.2.3 การสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทย (*Thai Ionospheric Map- THIM*)

การสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้ซอฟต์แวร์ Bernese นั้น วิธีการและขั้นตอนการประมวลผลเกือบจะเหมือนกันกับการประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดความถูกต้องสูงสำหรับสถานีจีพีเอส (หัวข้อ 4.2.2.1) ทุกประการ แต่จะต่างกันที่ข้อมูลดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผล จะใช้ข้อมูลจาก 6 สถานีที่มีระยะห่างระหว่างสถานีเท่าๆกัน คือ ระยะห่างระหว่าง 41.5 ถึง 60.3 กิโลเมตร ได้แก่ สถานี AYYA, BLAN, KTBN, BPLE, OKRK และ PKKT (ดังแสดงในรูปที่ 4.17)

รวมทั้งข้อมูลดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผล เป็นข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสเพียงอย่างเดียว (ไม่รวมข้อมูลดาวเทียม GLONASS) และการประมวลผลในขั้นตอนการปรับแก้ครั้งสุดท้าย (หัวข้อที่ 4.2.2.1.9.4) ซึ่งใช้โมดูล GPSEST ในการประมวลผล ใช้สมการ Geometry Free Linear Combination ( $L_4$ ) แทนที่สมการ Ionosphere Free Linear Combination ( $L_3$ ) รวมถึงได้ทำการตรึงค่าพิกัดของทั้ง 6 สถานีด้วยค่าพิกัดที่คำนวณได้จากหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นจะคงเหลือค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงผลในแบบของโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในรูปแบบของไฟล์ IONEX (.YYI เมื่อ YY คือ เลขปี ค.ศ. สองหลักหลัง)

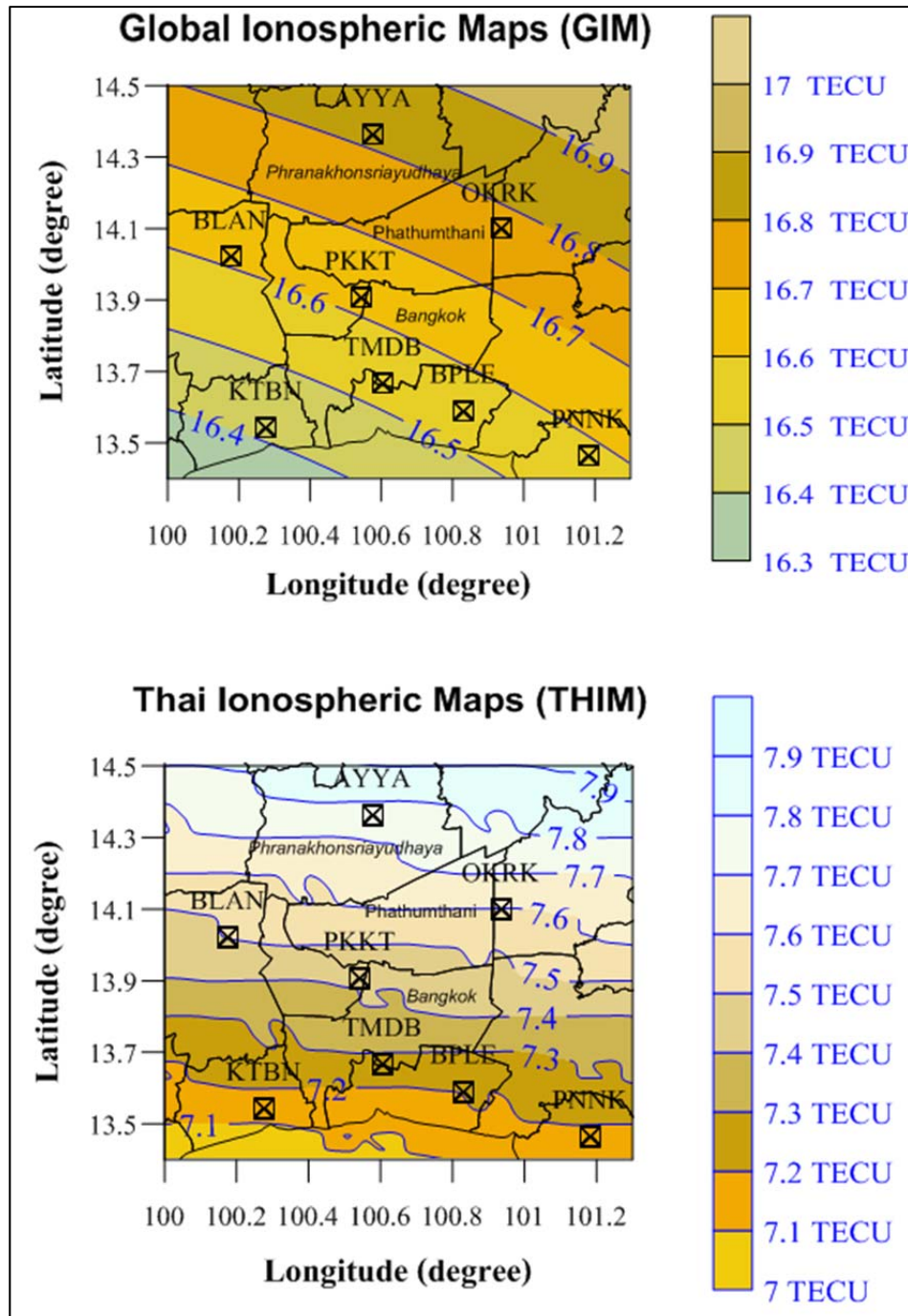


รูปที่ 4.17 แสดงที่ตั้งของสถานีฐานจีพีเอสที่นำข้อมูลมาใช้ในการประมวลผลเพื่อสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทย (Thai Ionospheric Map- THIM)



#### 4.2.2.4 โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทย(Thai Ionospheric Map- THIM)

สำหรับการสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทยนั้น (หัวข้อที่ 4.2.2.3) นั้น ผลลัพธ์ที่ได้คือโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ประเทศไทยที่มีชื่อว่า Thai Ionospheric Map (THIM) โดย THIM ประกอบด้วยค่า VTEC ของทุกจุดตัดตารางรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ IONEX เช่นเดียวกับ GIM ค่า VTEC ดังกล่าวจะเป็นค่า VTEC ทุกๆหนึ่งชั่วโมงโดยเริ่มจาก 0-1, 1-2, 2-3 จนถึง 23-24 ตามเวลาของ UTC ทั้งนี้ความละเอียดของ THIM เท่ากับ  $0.1^{\circ}$  ลองจิจูด และ  $0.1^{\circ}$  ละติจูดโดยครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่  $100^{\circ}$ - $101.2^{\circ}$  ลองจิจูดและ  $13.4^{\circ}$ - $14.4^{\circ}$  ละติจูด (ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ล่าง) ทั้งนี้ค่า VTEC ใช้โมเดล Spherical Harmonics Expansion ที่ Degree และ Order ที่ 15 ของ Solar-Geomagnetic Reference Frame ในการคำนวณ และใช้ Piece-Wise Linear Functions สำหรับเป็นข้อมูลตัวแทนในเวลาหลัก (Time Domain) เช่นเดียวกับ GIM อีกทั้งการแปลงค่าจาก Line of Sight TEC ไปเป็น VTEC นั้น ใช้โมเดล ซึ่ง Modify มาจาก Single Layer Mapping Function ของ The Jet Propulsion Laboratory (JPL) Extended Slab Model Mapping Function โดย Mapping Function ดังกล่าวคำนวณมาจากมุมสูงของแต่ละดาวเทียม และในการคำนวณค่า Ionospheric Pierce Points นั้น กำหนดให้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็น Spherical Layer มีรัศมีเท่ากับ 6,821 กิโลเมตร เช่นเดียวกับ GIM เช่นกัน รูปที่ 4.18 (ล่าง) และ 4.19 แสดงตัวอย่างของ THIM ณ เวลา 9:00-11:00 น. เวลาประเทศไทยของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553



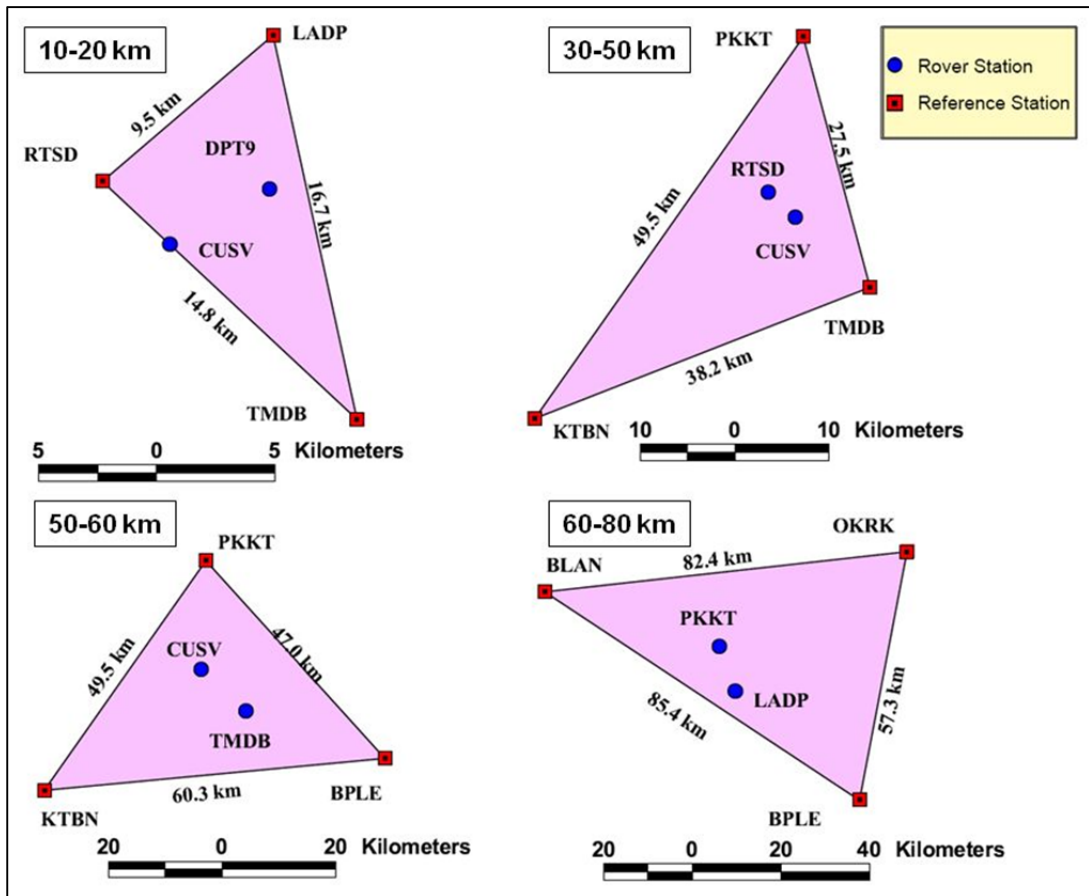
รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างของโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM (บน) และ THIM (ล่าง) ในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล ณ เวลา 09:00-11:00 น. เวลาประเทศไทยของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

2	END OF TEC MAP														
3	START OF TEC MAP														
2010	EPOCH OF CURRENT MAP														
12.5	2	4	2	0	0	LAT/LON1/LON2/DLON/H									
63	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
12.6	99.0	103.0	0.1	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H										
64	64	64	64	64	64	64	64	64	65	65	65	65	65	65	65
65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
65	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
12.7	99.0	103.0	0.1	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H										
65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	66
66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
66	66	66	66	66	66	66	66	66	67	67	67	67	67	67	67
12.8	99.0	103.0	0.1	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H										
65	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
66	66	66	66	66	66	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
12.9	99.0	103.0	0.1	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H										
66	66	66	66	66	66	66	67	67	67	67	67	67	67	67	67
67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68

รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่าง THIM ในรูปแบบไฟล์ IONEX ณ เวลา 09:00-11:00 น. เวลาประเทศไทย ของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

#### 4.2.2.5 การสร้างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) ใกล้กับตำแหน่งสถานีการรังวัดจีพีเอสจริง

การประมวลผลเพื่อสร้างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) ใกล้กับตำแหน่งสถานีการรังวัดจีพีเอสจริงโดยใช้ซอฟต์แวร์ Trimble Total Control 2.73 (TTC 2.73) ซึ่งการประมวลผลดังกล่าวจะจำลองรูปสามเหลี่ยมที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานขนาดต่างๆ โดย 1) ไม่ใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์ (No Model) 2) ใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์แบบ Final GIM และใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์ที่สร้างขึ้นเองจากหัวข้อ 4.2.2.4 (THIM) สำหรับการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามลำดับโดยระยะห่างระหว่างสถานีฐานๆที่จำลองรูปสามเหลี่ยมมีขนาดประมาณเท่ากับ 10-20, 30-50, 50-60 และ 60-80 กิโลเมตร ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.20) โดยผลลัพธ์ที่ได้คือสถานีจีพีเอสเสมือนที่อยู่ในรูปแบบของไฟล์ RINEX ณ ตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณด้วยรหัสของคลื่นส่งในแต่ละสถานีผู้ใช้งานสำหรับ โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งสองชนิดและไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละรูปสามเหลี่ยมขนาดต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 4.5)



รูปที่ 4.20 แสดงการจำลองรูปสามเหลี่ยมที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานขนาดต่างๆ สำหรับการสร้างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) โดย 1) ไม่ใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์ (No Model) 2) ใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM และใช้โมเดลไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่ประเทศไทย (THIM) (Charoenkalunyuta, Satirapod et al. 2012)

ตารางที่ 4.5 แสดงจำนวน Sessions ของการสร้างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) โดย 1 Session ใช้ข้อมูลดาวเทียม 1 วัน

Reference receiver spacing	User Station	No. of Sessions			
		No model	Final GIM model	THIM model	Total
10-20 km	CUSV	25	25	25	75
	DPT9	25	25	25	75
30-50 km	CUSV	31	31	31	93
	RTSD	30	30	30	90
50-60 km	CUSV	30	30	30	90
	TMDB	31	31	31	93
60-80 km	LADP	28	28	28	84
	PKKT	28	28	28	84
<b>Total</b>					684

#### 4.2.2.6 การประมวลผลแบบจลน์ระหว่างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) กับสถานีการรังวัดจีพีเอสจริง

จากเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS (ดูรายละเอียดหัวข้อที่ 2.7.2.3) การคำนวณค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้งานจะใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจลน์ระหว่างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) กับข้อมูลการรังวัดจีพีเอสจากสถานีผู้ใช้งานจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกซอฟต์แวร์ TTC 2.73 สำหรับการประมวลผลดังกล่าว โดยกำหนดให้สถานีเสมือนเป็นหมุดควบคุม (Control Point) และสถานีผู้ใช้งานเป็นสถานีจลน์ โดยผลลัพธ์ที่ได้ คือค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้งานทุกๆ 1 วินาที (ดังแสดงในรูปที่ 4.21) จำนวน 684 Sessions (ตามตารางที่ 4.5) ในระบบพิกัด ITRF 2005 (Feb'10 Epoch) เนื่องจากค่าพิกัดของสถานีจีพีเอสเสมือนซึ่งใช้เป็นหมุดควบคุมนั้นอยู่ในระบบพิกัด ITRF 2005 (Feb'10 Epoch)

#datum: WGS_84	6378137.000	298.25722356	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.0000000000		
172830.000000	-1132914.691	6092528.405	1504633.232	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
172860.000000	-1132914.691	6092528.402	1504633.227	0.004	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
172890.000000	-1132914.687	6092528.390	1504633.230	0.004	0.003	0.008	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
172920.000000	-1132914.691	6092528.403	1504633.230	0.005	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
172950.000000	-1132914.688	6092528.398	1504633.232	0.006	0.005	0.013	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
172980.000000	-1132914.691	6092528.407	1504633.229	0.006	0.006	0.013	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173010.000000	-1132914.693	6092528.409	1504633.228	0.008	0.007	0.016	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173040.000000	-1132914.700	6092528.416	1504633.225	0.007	0.006	0.014	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173070.000000	-1132914.705	6092528.433	1504633.226	0.002	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173100.000000	-1132914.706	6092528.428	1504633.228	0.006	0.006	0.013	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173130.000000	-1132914.702	6092528.427	1504633.229	0.003	0.002	0.005	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173160.000000	-1132914.702	6092528.422	1504633.225	0.004	0.003	0.008	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173190.000000	-1132914.702	6092528.428	1504633.230	0.006	0.005	0.012	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173220.000000	-1132914.698	6092528.420	1504633.228	0.003	0.002	0.005	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173250.000000	-1132914.696	6092528.419	1504633.231	0.008	0.007	0.015	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173280.000000	-1132914.703	6092528.434	1504633.230	0.006	0.005	0.011	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173310.000000	-1132914.701	6092528.420	1504633.228	0.004	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173340.000000	-1132914.705	6092528.422	1504633.231	0.010	0.008	0.019	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173430.000000	-1132914.706	6092528.424	1504633.230	0.012	0.010	0.023	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173490.000000	-1132914.711	6092528.425	1504633.228	0.010	0.008	0.019	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173520.000000	-1132914.709	6092528.433	1504633.229	0.011	0.009	0.020	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173550.000000	-1132914.716	6092528.441	1504633.222	0.011	0.009	0.019	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173580.000000	-1132914.710	6092528.429	1504633.224	0.012	0.010	0.022	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173610.000000	-1132914.710	6092528.432	1504633.226	0.009	0.007	0.017	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173640.000000	-1132914.702	6092528.423	1504633.228	0.010	0.008	0.018	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173670.000000	-1132914.701	6092528.415	1504633.230	0.010	0.008	0.017	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173700.000000	-1132914.703	6092528.415	1504633.224	0.010	0.008	0.018	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED
173730.000000	-1132914.705	6092528.424	1504633.225	0.008	0.006	0.014	0.000	0.000	0.000	2.8	6	???????? FIXED

รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลแบบจลนระหว่างสถานีจีพีเอสเสมือน (VRS) กับสถานีการรังวัดจีพีเอสจริง

## บทที่ 5

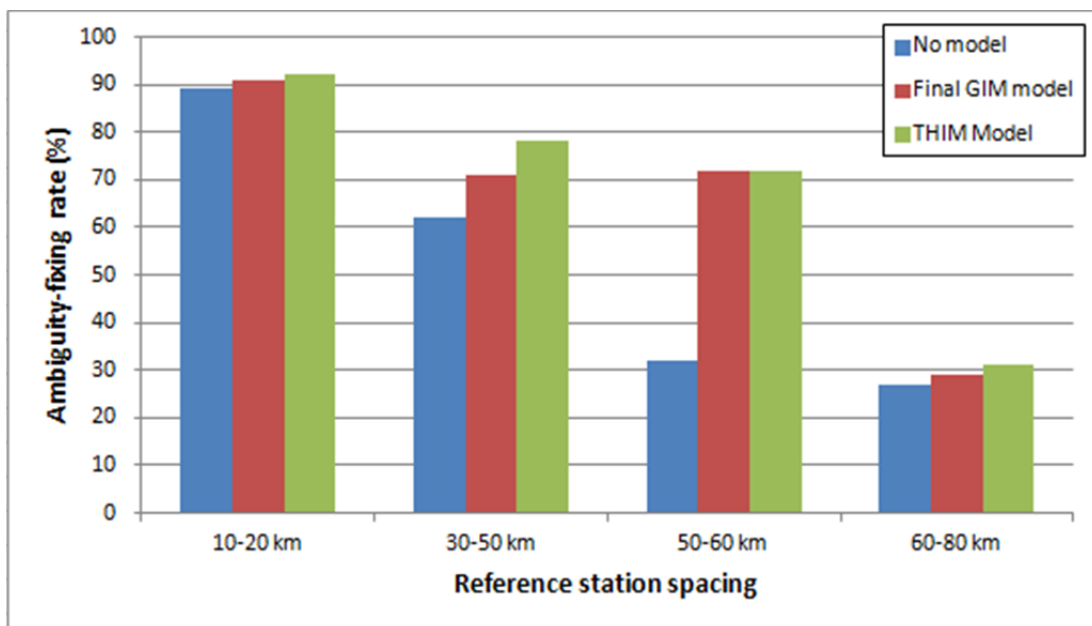
### ผลการประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลลัพธ์ที่ได้รับจากการประมวลผลของการประเมินผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย (หัวข้อที่ 4.2) ได้แก่ ค่าพิคัดของสถานีผู้ใช้งานทุกๆ 1 วินาที ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานแบบต่างๆ (ดังแสดงในรูปที่ 4.21) ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ตามตารางที่ 4.5) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าพิคัดความถูกต้องสูงจากหัวข้อที่ 4.2.2.2 โดยนำมาวิเคราะห์ผลในสามรูปแบบคือ 1) อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity-Fixing Rate) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ 2) จำนวนของค่าพิคัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิคัดกระโดดขนาดใหญ่) ทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง (Number of The Position Jump) โดยค่าพิคัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูงนี้ นิยามโดยค่าพิคัดที่มีความคลาดเคลื่อนเกิน  $\pm 5$  เซนติเมตร จากค่าพิคัดความถูกต้องสูง และ 3) ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ทั้งในแนวราบและแนวดิ่งซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร โดยผลจากการประมวลผลแสดงในภาคผนวก ก และค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันแสดงได้ตามตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 - 5.3

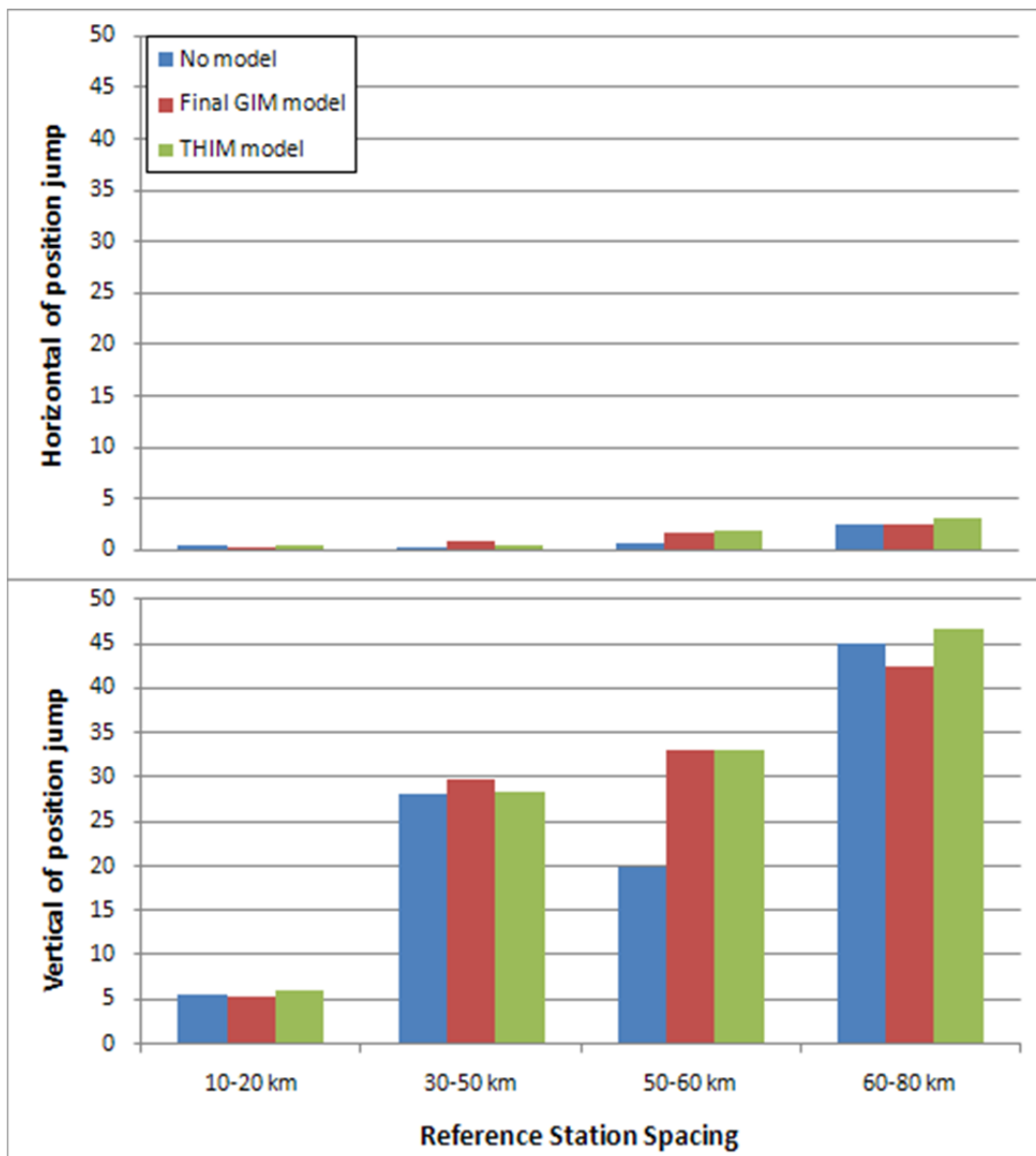
ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐาน แบบต่างๆ ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

Reference receiver spacing	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
	No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
				Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
10-20 km	89	91	92	1	6	0	5	0	6	0.011	0.023	0.011	0.022	0.011	0.023
30-50 km	62	71	78	0	28	1	30	1	28	0.012	0.036	0.013	0.036	0.012	0.036
50-60 km	32	72	72	1	20	2	33	2	33	0.014	0.044	0.014	0.043	0.014	0.044
60-80 km	27	29	31	2	45	3	43	3	47	0.035	0.072	0.029	0.071	0.035	0.072

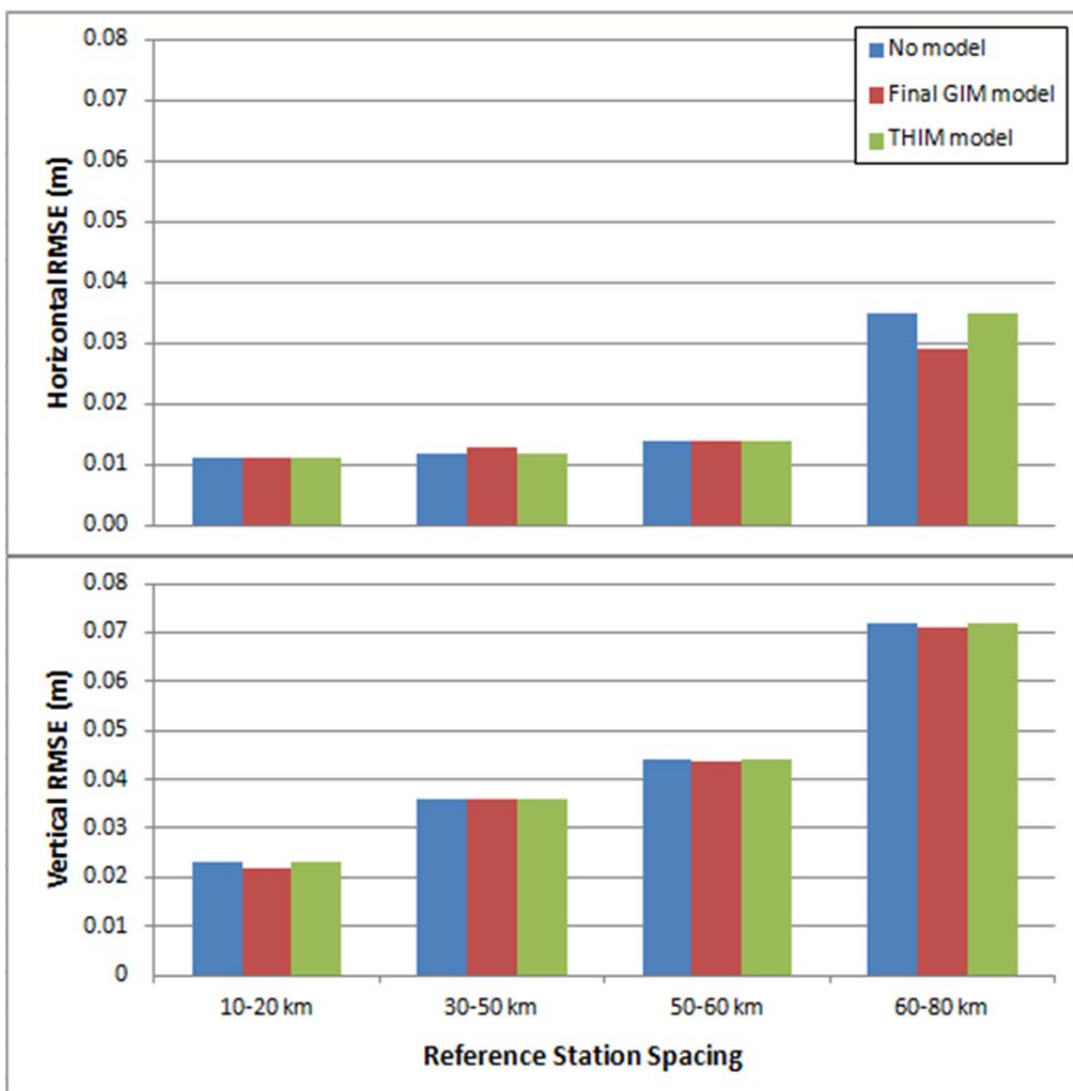




รูปที่ 5.1 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันของอัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity-Fixing Rate) ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานแบบต่างๆ ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



รูปที่ 5.2 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันของจำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูงหรือค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ (Number of Position Jump) ในแนวราบ (บน) และแนวตั้ง (ล่าง) ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานแบบต่างๆ ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



รูปที่ 5.3 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลทั้งสองสถานีในแต่ละวันของค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบ (บน) และแนวตั้ง (ล่าง) ในขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานแบบต่างๆ ของแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ทั้งนี้ จากตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 – 5.3 สามารถสรุปประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย ได้ดังนี้

### 5.1 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสสำหรับการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย

จากตารางที่ 5.1 และกราฟในรูปที่ 5.1-5.3 สรุปได้ว่าประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทยนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสโดยระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสที่มีขนาดที่สั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระยะห่างๆ ที่ยาวกว่า ทั้งในแง่ของการหาค่าเลขปริศนา จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE โดยในกรณีของการหาค่าเลขปริศนานั้น จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างสถานีฐานๆ ขนาด 10-20 กิโลเมตร ให้ผลที่ดีที่สุด ในขณะที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานๆ ขนาด 60-80 กิโลเมตร ให้ผลที่แย่ที่สุด ถึงแม้ว่าจะใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในขั้นตอนการประมวลผลแล้วก็ตาม อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาห่างระหว่างสถานีฐานๆ ขนาดตั้งแต่ 30 จนถึง 60 กิโลเมตรนั้น การใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งแบบท้องถิ่นและแบบทั่วโลก ทำให้การหาค่าเลขปริศนามีประสิทธิภาพขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ดังแสดงในรูปที่ 5.1) ส่วนในกรณีของจำนวนค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ในแนวราบ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสทุกขนาดให้ผลที่ไม่มีนัยสำคัญที่แตกต่างกัน ในขณะที่จำนวนค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ในแนวตั้ง จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่จะแปรผันโดยตรงกับระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส (ดังแสดงในรูปที่ 5.2) สำหรับในกรณีของค่า RMSE ของค่าพิกัดทั้งในแนวราบและแนวตั้งนั้น จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างสถานีฐานๆ ขนาด 10-20 กิโลเมตร ให้ผลที่ดีที่สุด ในขณะที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานๆ ขนาด 60-80 กิโลเมตร ให้ผลที่แย่ที่สุด เช่นเดียวกันกับกรณีของการหาค่าเลขปริศนา (ดังแสดงในรูปที่ 5.3)

## 5.2 ค่าคลาดเคลื่อนหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย

โดยทั่วไปค่าคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (หัวข้อที่ 2.9) คือ

### 5.2.1 ค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อน

อันเนื่องมาจากนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลุด ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี ค่าคลาดเคลื่อนจากการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศและค่าคลาดเคลื่อนจากค่าพิกัดอ้างอิงของสถานีฐานจีพีเอสถาวร โดยค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้มีผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสค่อนข้างน้อย โดยไม่นำมาพิจารณาได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้สถานีจีพีเอสถาวรใช้เครื่องรับและเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมคุณภาพสูง ดังนั้น ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลุดและค่าคลาดเคลื่อนจากการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ จึงมีขนาดเล็กหรืออาจจะไม่มีเลย และสถานีถาวรทุกสถานีดังกล่าวตั้งอยู่ในพื้นที่โล่งซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีจึงมีขนาดเล็กหรืออาจจะไม่มีเลยเช่นกัน อีกทั้งในงานวิจัยนี้ใช้ค่าพิกัดที่มีคุณภาพสูง (หัวข้อที่ 4.2.2.2) ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนจากค่าพิกัดอ้างอิงของสถานีฐานจีพีเอสถาวรจึงมีขนาดเล็กหรืออาจจะไม่มีเลยเช่นกัน

### 5.2.2 ค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะทางระหว่างสถานีจีพีเอส โดยจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม

ระยะทางระหว่างสถานีฐานจีพีเอสที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรของดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทั้งนี้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรของดาวเทียมย่อมจะถูกขจัดหมดไปหรือเหลือค่าคลาดเคลื่อนที่มีขนาดเล็กโดยการใช่วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง อีกทั้งพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้อยู่ในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล ซึ่งมีลักษณะเป็นที่ราบ ทำให้ความแตกต่างของตำแหน่งในทางแนวตั้งของแต่ละสถานีฐานถาวรมีขนาดเล็ก (ไม่เกิน 10 เมตร) ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นั้นจึงน่าจะมีความน้อย

เช่นกันซึ่งสามารถมองข้ามไปได้ ดังนั้นจึงเหลือเพียงค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่น่าส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย

การลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้น ทำได้โดยการใช้เทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สองของการหาค่าเลขปริศนาสำหรับแต่ละคู่ของสถานีฐานจีพีเอส โดยเทคนิค Ionosphere-Free Linear Combination อย่างไรก็ตามเทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สองดังกล่าวยังไม่สามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ให้หมดไปได้ เนื่องจากเทคนิค Ionosphere-Free Linear Combination นั้นยังคงต้องมีการประมาณสถานะชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยพิจารณาที่ค่า TEC ตามความเป็นจริง ซึ่งหากการประมาณค่าฯ นั้นไม่ถูกต้อง จะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวเข้าไปในการหาค่าเลขปริศนาด้วย ดังนั้นเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ให้ได้มากที่สุด จึงจำเป็นต้องประมาณสถานะชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้การประมาณสถานะชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามความเป็นจริงนั้นทำได้โดยใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทั้งนี้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีทั้งแบบทั้งโลกและแบบท้องถิ่น โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั้งโลก (Global) มีหลายโมเดล อาทิ เช่น Klobuchar, NeQuick และ Global Ionospheric Maps (GIM) เป็นต้นโดย Memarzadeh (2009) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั้งโลกชนิดต่างๆ ได้แก่ Klobuchar, NeQuick และ Global Ionospheric Maps (GIM) ในสภาวะชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความแปรปรวนมากและน้อย ตามลำดับ ในพื้นที่ Mid Latitude ผลปรากฏว่า โมเดล GIM ให้ผลที่ถูกต้องสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ โมเดล Klobuchar และ NeQuick ในขณะที่ Wienia (2008) ได้ศึกษาการใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM สำหรับเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความถูกต้องสูงในภูมิภาคยุโรป (ซึ่งจัดอยู่ในพื้นที่ Mid Latitude) ผลปรากฏว่า ความถูกต้องทางราบอยู่ในระดับ 30 เซนติเมตร ในขณะที่ความถูกต้องทางดิ่งอยู่ในระดับ 50 เซนติเมตร

เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าโมเดล GIM มีความน่าเชื่อถือสูง ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำโมเดล GIM มาศึกษาการลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย

### 5.3 การใช้โมเดล GIM สำหรับการลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย

จากการวิเคราะห์อัตราการหาค่าเลขปริศนา จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE นั้น (ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และกราฟในรูปที่ 5.1-5.3) พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 30 - 50 กิโลเมตร อัตราการหาค่าเลขปริศนาเพิ่มขึ้น 19% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้โมเดล GIM และการไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 50 - 60 กิโลเมตรนั้น อัตราการหาค่าเลขปริศนากลับเพิ่มขึ้นถึง 40% ในขณะที่อัตราการหาค่าเลขปริศนาที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 10-20 กิโลเมตร และ 60-80 กิโลเมตร การใช้โมเดล GIM ยังคงให้ผลที่ดีกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใช้โมเดลฯ ในขณะที่จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ นั้น การใช้ GIM และ ไม่ใช้โมเดลฯ มีอัตราความแตกต่างกันเล็กน้อยทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้งอย่างไม่มีนัยสำคัญ รวมถึงในกรณีของค่า RMSE เช่นกัน การใช้ GIM และ ไม่ใช้โมเดลฯ มีอัตราความแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้ง

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย ในแง่ของความสำเร็จในการหาค่าเลขปริศนา เมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้โมเดล GIM ซึ่งได้แก่ จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE ทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้งนั้น ไม่แตกต่างกันกับในกรณีของการไม่ใช้โมเดล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดล GIM มีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับใช้ประมวลผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสเทคนิคดังกล่าว อย่างไรก็ตาม โมเดล GIM เป็นแบบทั้งโลก (Global Scale) ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ขนาดเล็กอย่างระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอส อีกทั้ง โมเดล GIM ไม่มีตัวแทนข้อมูลจีพีเอสในพื้นที่ประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง (ดังแสดงในรูปที่ 3.5) ดังนั้น การใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ท้องถิ่นของประเทศไทย สำหรับการลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ จึงน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมกว่าการใช้โมเดลฯ แบบทั้งโลก สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย

#### 5.4 การใช้โมเดล Thai Ionospheric Maps (THIM) สำหรับการลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย

จากการวิเคราะห์อัตราการทำค่าเลขปริศนา จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE นั้น (ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และกราฟในรูปที่ 5.1-5.3) พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้โมเดล GIM กล่าวคือ ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 30 - 50 กิโลเมตร อัตราการทำค่าเลขปริศนาเพิ่มขึ้น 26% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้โมเดล THIM และการไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 50 - 60 กิโลเมตรนั้น อัตราการทำค่าเลขปริศนากลับเพิ่มขึ้นถึง 40% เช่นเดียวกันกับการใช้โมเดล GIM ในขณะที่อัตราการทำค่าเลขปริศนาที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 10-20 กิโลเมตร และ 60-80 กิโลเมตร การใช้โมเดล THIM ยังคงให้ผลที่ดีกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใช้โมเดลฯ ในขณะที่จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ ทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้ง นั้น การใช้ THIM และไม่ใช้โมเดลฯ มีอัตราความแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญรวมถึงในกรณีของค่า RMSE เช่นกัน การใช้ THIM และไม่ใช้โมเดลฯ มีอัตราความแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้งเช่นกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ THIM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย ในแง่ของความสำเร็จในการหาค่าเลขปริศนาเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เช่นเดียวกันกับการใช้โมเดล GIM โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้โมเดล THIM ซึ่งได้แก่ จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE ทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้งนั้น ไม่แตกต่างกันกับในกรณีของการไม่ใช้โมเดลฯ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดล THIM มีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับการใช้ประมวลผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสเทคนิคดังกล่าวด้วย



## 5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโมเดล THIM และ GIM

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโมเดล GIM และ THIM นั้นพบว่าการใช้โมเดล THIM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทยมากกว่าโมเดล GIM กล่าวคือ โมเดล THIM ให้อัตราการหาค่าเลขปริศนา ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 10 – 20, 30 -50 และ 60 -80 กิโลเมตร มากกว่าโมเดล GIM เท่ากับ 1%, 7% และ 2% ตามลำดับ ในขณะที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 50 - 60 กิโลเมตร ให้อัตราการหาค่าเลขปริศนาที่เท่ากัน (ดังแสดงในรูปที่ 5.1) และเมื่อพิจารณาถึงจำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE ทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้ง พบว่า โดยรวมในทุกขนาดของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส โมเดล THIM มีจำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และ ค่า RMSE ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับโมเดล GIM (ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้โมเดล THIM ให้ผลที่ดีกว่าการใช้โมเดล GIM สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย ในแง่ของความสำเร็จในการหาค่าเลขปริศนา โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้โมเดล THIM และ โมเดล GIM ซึ่งได้แก่ จำนวนของค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่ และค่า RMSE ทั้งค่าพิกัดในแนวราบและแนวตั้งนั้น ไม่มีนัยสำคัญที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดล THIM มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโมเดล GIM สำหรับเทคนิคการรังวัดดังกล่าวนี้

เพื่อสนับสนุนผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.1 ถึง 5.5 นี้ จะได้แสดงสถานะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในรูปแบบของความแปรปรวนและความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศดังกล่าว โดยความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศฯ แสดงได้โดย ค่า Total Electron Content Unit (TEC) ในขณะที่ความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศฯ แสดงได้โดยค่า Rate of Change of TEC (ROTI) ทั้งนี้รายละเอียดของ TEC แสดงในหัวข้อที่ 2.2.3 ในขณะที่ ROTI สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.1) และ (5.2) (Pi, Mannucci et al. 1997) และ (Charoenkalunyuta, Satirapod et al. 2012)

$$ROT = \frac{TEC_k^i - TEC_{k-1}^i}{t_k - t_{k-1}} \quad (5.1)$$

$$ROTI = \sigma_{ROT} \quad (5.2)$$

โดยที่

**TEC** คือ ค่า Total Electron Content

**i** คือ ดาวเทียมจีพีเอสที่รับสัญญาณได้

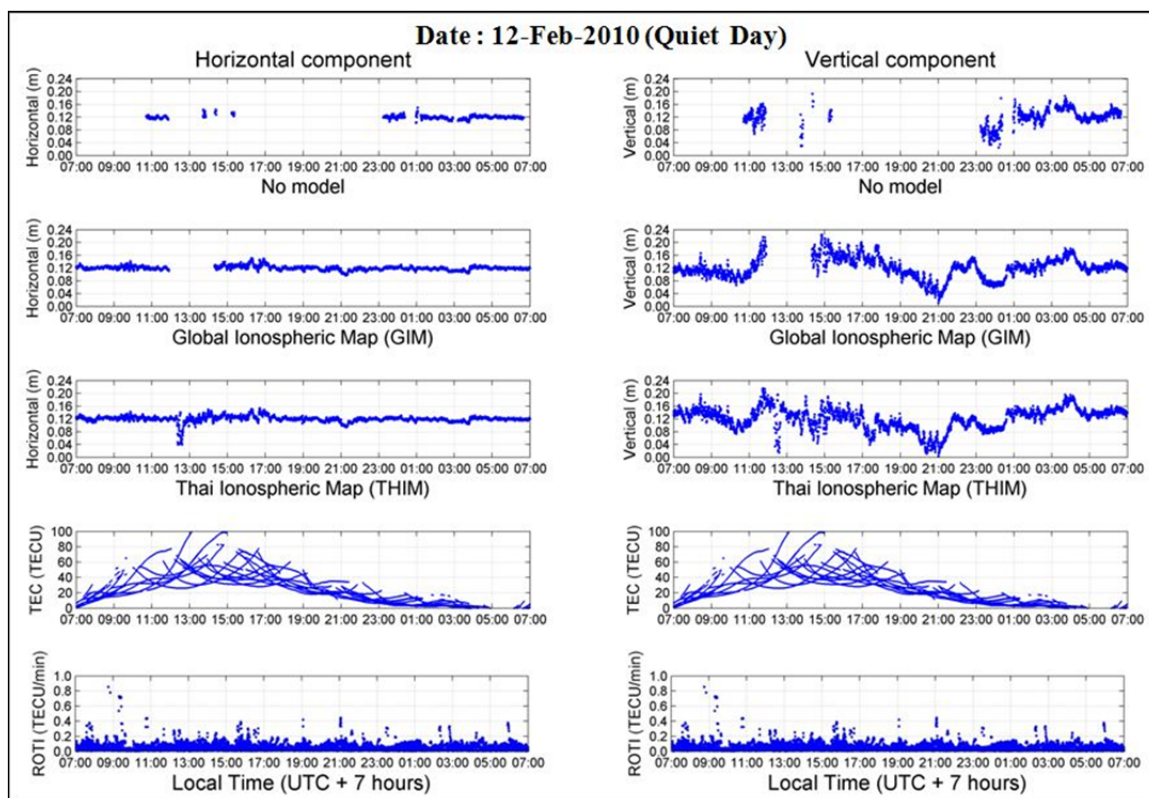
**k** คือ เวลา

$\sigma_{ROT}$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ **ROT** ของเวลาทุก 5 นาที

รูปที่ 5.4 แสดงกราฟผลลัพธ์จากการประมวลผลโดยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส 50-60 กิโลเมตร ของสถานีผู้ใช้งาน CUSV ในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 (Day of Year-DOY = 43) (วันที่จัดว่ามีความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์น้อย หรือ Quite Day) โดยเปรียบเทียบการไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (No Model) ใช้โมเดล GIM และ THIM ตามลำดับ ในขณะที่รูปที่ 5.5 แสดงกราฟผลลัพธ์จากการประมวลผลโดยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอส 50-60 กิโลเมตร ของสถานีผู้ใช้งาน CUSV เช่นกัน ในวันที่ 3 มีนาคม 2553 (DOY = 62) (วันที่จัดว่ามีความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูง หรือ Disturb Day) โดยเปรียบเทียบ No Model ใช้โมเดล GIM และ THIM ตามลำดับเช่นเดียวกับรูปที่ 5.4

จากรูปทั้งสองดังกล่าว สรุปได้ว่า ในวันที่ Quite Day การประมวลผลโดยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS โดยการใช้โมเดล THIM นั้น ให้ผลที่มีนัยสำคัญที่ดีกว่า การใช้โมเดล GIM และ No Model ในแง่ของจำนวนค่าพิกัดที่ประมวลผลสำเร็จ (ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จากรูปบน-ล่าง รูปที่ 1-3 ทั้งทางด้านซ้ายและขวามือ ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามในวันที่ Quite Day นี้ ยังคงปรากฏว่ามีค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวนสูง (ค่า TEC สูง) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลา 12:00- 13:00 น เวลาประเทศไทย ถึงแม้ว่าจะใช้โมเดล THIM

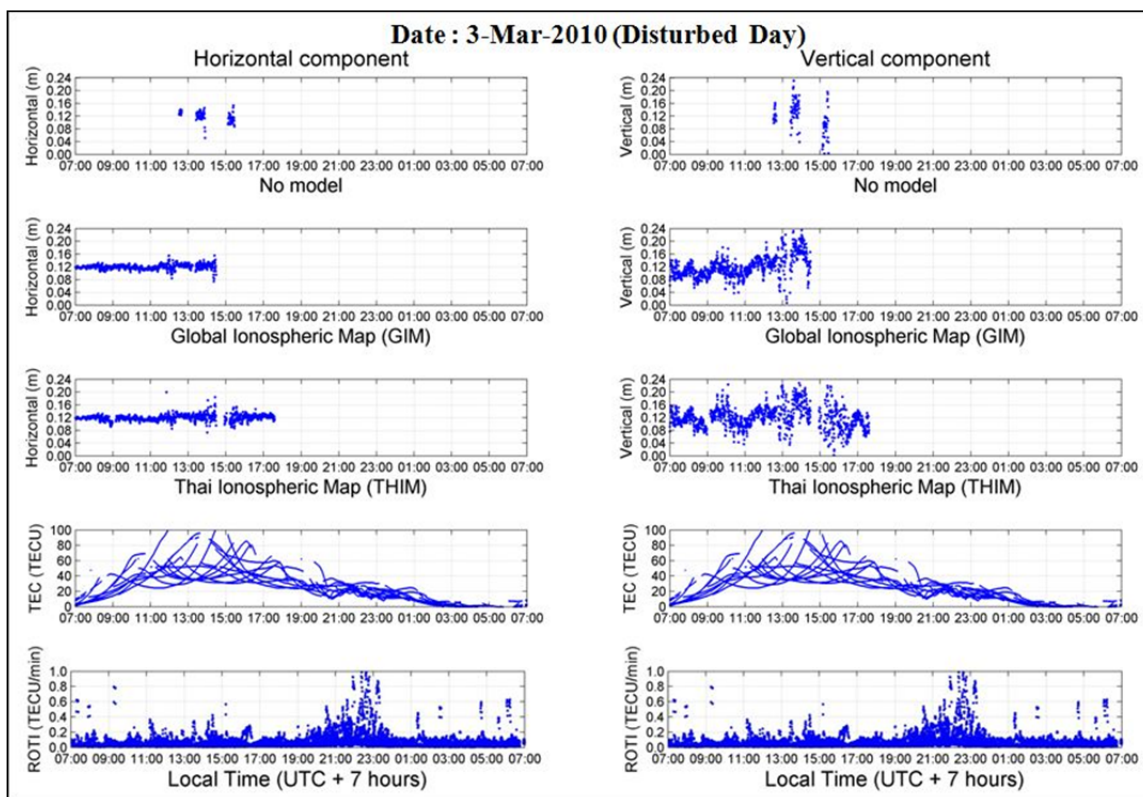
ในการประมวลผลแล้วก็ตาม ส่วนในวัน Disturb Day นั้น ในช่วงเวลาที่มีความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูง (ค่า ROTI สูง) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลา 18:00- 07:00 น เวลาประเทศไทย นั้น การประมวลผลด้วยเทคนิคการรังวัดชนิดนี้ไม่สำเร็จโดยไม่สามารถหาค่าเลขปริศนาได้ ถึงแม้ว่าจะใช้โมเดล THIM ในการประมวลผลแล้วก็ตาม (ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จากรูปบน- ล่าง รูปที่ 1-3 ทั้งทางด้านซ้ายและขวามือ ตามลำดับ) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความแปรปรวนและความไม่สม่ำเสมอสูงนั้น มีผลกระทบอย่างสูงต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS โดยเป็นการลดประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งอาจเกิดจากการที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดปรากฏการณ์ Scintillation อย่างไรก็ตาม การประมวลผลโดยการใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดังกล่าวได้ โดยเฉพาะการใช้โมเดลท้องถิ่น เช่น โมเดล THIM ให้ผลที่ดีกว่าการใช้โมเดลแบบทั่วโลก (GIM)



รูปที่ 5.4 แสดงกราฟผลลัพธ์จากการประมวลผลโดยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน จีพีเอส 50-60 กิโลเมตร ของสถานีผู้ใช้งาน CUSV ในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 (DOY = 43) (วันที่จัดว่ามีความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์น้อย) โดย เปรียบเทียบการไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (No Model) ใช้โมเดล GIM และ THIM ตามลำดับ

จากรูปบนถึงรูปล่าง (ด้านซ้ายมือ) แสดงค่าพิกัดทุก 1 วินาทีในแนวราบของ No Model, GIM, THIM ซึ่งสัมพันธ์กับค่า TEC และ ROTI ตามลำดับ

จากรูปบนถึงรูปล่าง (ด้านขวามือ) แสดงค่าพิกัดทุก 1 วินาทีในแนวตั้งของ No Model, GIM, THIM ซึ่งสัมพันธ์กับค่า TEC และ ROTI ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 แสดงกราฟผลลัพธ์จากการประมวลผลโดยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบ จดน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ที่ระยะห่างระหว่าง สถานีฐานจีพีเอส 50-60 กิโลเมตร ของสถานีผู้ใช้งาน CUSV ในวันที่ 3 มีนาคม 2553 (DOY = 62) (วันที่จัดว่ามีความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูง) โดย เปรียบเทียบการไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (No Model) ใช้โมเดล GIM และ THIM ตามลำดับ

จากรูปบนถึงรูปล่าง (ด้านซ้ายมือ) แสดงค่าพิกัดทุก 1 วินาทีในแนวราบของ No Model, GIM, THIM ซึ่งสัมพันธ์กับค่า TEC และ ROTI ตามลำดับ

จากรูปบนถึงรูปล่าง (ด้านขวามือ) แสดงค่าพิกัดทุก 1 วินาทีในแนวตั้งของ No Model, GIM, THIM ซึ่งสัมพันธ์กับค่า TEC และ ROTI ตามลำดับ

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย ซึ่งเน้นเทคนิคแบบ VRS (NRTK-VRS) ซึ่งการศึกษาเริ่มต้นจากการประเมินประสิทธิภาพของการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทย ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง จากนั้น จึงทำการจำลองการทำงานแบบการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทย ในระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆ ได้แก่ ขนาด 10-20, 30-50, 50-60 และ 60-80 กิโลเมตร ด้วยการประมวลผลแบบภายหลัง (Post Processing) ร่วมกับแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั่วโลก (Global Ionospheric Maps) หรือ แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล ที่สร้างขึ้นเองที่มีชื่อว่า Thai Ionospheric Maps (THIM) ทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงการใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทยได้ ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปสาระสำคัญได้ 6 ประการ ดังนี้

- 6.3.1 จากการประเมินประสิทธิภาพของการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทย ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง พบว่า มีค่าพิสัยบางช่วงเวลาที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิสัยกระโดดขนาดใหญ่) โดยเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 21:00 – 23:00 น เวลาประเทศไทย
- 6.3.2 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสสำหรับการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทยนั้น ไม่ควรมีระยะห่างระหว่างสถานีฐานเกินกว่า 60 กิโลเมตร ทั้งนี้ ที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานตั้งแต่ 30 จนถึง 60 กิโลเมตร นั้นควรใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ THIM หรือ GIM ในการประมวลผลร่วมด้วยเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
- 6.3.3 ค่าคลาดเคลื่อนหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทย คือ ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

โดยเฉพาะในช่วงที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวนและความไม่สม่ำเสมอสูง

- 6.3.4 การใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทย ในแง่ของความสำเร็จในการหาค่าเลขปริศนาเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
- 6.3.5 การใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ THIM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทย ในแง่ของความสำเร็จในการหาค่าเลขปริศนาเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
- 6.3.6 การใช้โมเดล THIM ให้ผลลัพธ์ของความสำเร็จในการหาค่าเลขปริศนาที่ดีกว่าการใช้โมเดล GIM สำหรับการรังวัด NRTK-VRS ในประเทศไทย

## 6.2 ข้อจำกัด ปัญหาและอุปสรรค

- 6.2.1 ข้อมูลดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับมาจากหลายหน่วยงานซึ่งการที่จะได้ข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันและต่อเนื่องกันในระยะเวลายาวนานนั้นเป็นเรื่องที่ยาก (ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รับข้อมูลที่ต่อเนื่องกัน จำนวน 31 วัน เท่านั้น)
- 6.2.2 โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM ไม่มีตัวแทนข้อมูลจีพีเอสที่อยู่ในประเทศไทย ซึ่งหากโมเดลนี้มีตัวแทนข้อมูลในประเทศไทย อาจจะทำให้ความถูกต้องของโมเดล GIM ในประเทศไทยเพิ่มขึ้นกว่าที่เป็นอยู่
- 6.2.3 โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบ GIM จะสามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้เมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้งานจริงกับการรังวัด NRTK-VRS ได้ เนื่องจากเทคนิคการรังวัดดังกล่าวเป็นแบบ Real-Time

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในครั้งนี้มีข้อเสนอแนะดังนี้

- 6.3.1 หากมีข้อมูลดาวเทียมของหลายสถานีในพื้นที่ประเทศไทย ดังเช่นในงานวิจัยนี้ ในช่วงเวลาเดียวกันและต่อเนื่องกันในระยะเวลายาวนานพอ โดยมีระยะเวลายาวนานถึงหนึ่งปีหรือหลายๆ ปี จะทำให้วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละฤดูกาลหรือในแต่ละช่วงเวลา 13 ปี (โดยประมาณ) ของวัฏจักรสุริยะ (Solar Cycle) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการรับวัด NRTK-VRS ในประเทศไทยได้
- 6.3.2 การประมวลผลข้อมูลจีพีเอสเพื่อการสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับประเทศไทยนั้น ข้อมูลจีพีเอสที่นำมาประมวลผลควรมาจากสถานีฐานจีพีเอสที่มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานๆ เท่าๆ กัน จึงจะทำให้โมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับประเทศไทย มีความถูกต้องสูง
- 6.3.3 สำหรับการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสเพื่อการสร้างโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับประเทศไทยนั้น ควรใช้ข้อมูลดาวเทียมจากเฉพาะดาวเทียมจีพีเอสเท่านั้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทดลองนำข้อมูลดาวเทียมจากเฉพาะดาวเทียมจีพีเอสและข้อมูลดาวเทียมจากดาวเทียมจีพีเอสรวมกับดาวเทียม GLONASS มาประมวลผลเพื่อสร้างโมเดลดังกล่าว เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยประมวลผลในขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพเทคนิคการรับวัด NRTK-VRS ผลปรากฏว่า ข้อมูลดาวเทียมจากเฉพาะดาวเทียมจีพีเอสให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าข้อมูลดาวเทียมจากดาวเทียมจีพีเอสรวมกับดาวเทียม GLONASS
- 6.3.4 ความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เมื่อเกิดปรากฏการณ์ Scintillation ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการรับวัด NRTK ในประเทศไทย มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากโมเดลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการศึกษาครั้งนี้ยังไม่สามารถขจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ Scintillation ได้



6.3.5 ปัจจัยจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการรังวัด NRTK อาทิเช่น ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียม เป็นต้น มีความน่าสนใจเช่นกัน เนื่องจากอาจจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัด NRTK ได้

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ทีดิน, กรม. รายงานการตรวจรับระบบโครงข่าย RTK GPS Network กรมที่ดิน. กรมที่ดิน กระทรวงมหาดไทย, 2551.

เฉลิมชนม์ สติระพจน์. การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสเบื้องต้น (แปลและเรียบเรียง), พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

### ภาษาอังกฤษ

Bassiri, S. and G. Hajj. Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them. Manuscripta geodaetica 18 (1993): 280-280

Brown, N., R. Keenan, B. Richter and L. Toryer. Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM V3. 0 master-auxiliary messages. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Long Beach, CA (13-16 September 2005): 13-16

Charoenkalunyuta, T., C. Satirapod, H.-K. Lee and Y.-S. Choi . Performance of Network-Based RTK GPS in Low-Latitude Region: A Case Study in Thailand. Engineering Journal 16 (2012): 9

Charoenkalunyuta, T., C. Satirapod, Y. Li and C. Rizos . An investigation of the effect of Ionospheric models on the performance of Network-based RTK GPS in Thailand. International Journal of Geoinformatics 8 (2012): 6

Hernandes, P., J. Juan and O. Colombo. Precise ionospheric determination and its application to real-time GPS ambiguity resolution. 12th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the ION, Nashville, Tennessee, USA (14-17 September 1999): 14-17

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtengger, H. and Collins, J. GPS Theory and Practice. 5<sup>th</sup> edition. New York: Springer-Verlag, 2001.

- Hu, C., W. Chen, Y. Chen, X. Ding and C. Simon. Hong Kong GPS Active Network. KIS (2001): 80-86
- Hu, G., V. Khoo, P. Goh and C. Law. Performance of Singapore Integrated Multiple Reference Station Network (SIMRSN) for RTK positioning. GPS Solutions 6: 65-71
- Janssen, V. A mixed-mode GPS network processing approach for volcano deformation monitoring. Ph.D. Thesis, School of Surveying & Spatial Information Systems The University of New South Wales, Australia. 2003.
- Jensen, A. Numerical weather predictions for network RTK. Ph.D. Thesis, Publications Series 4, Volume 10, National Survey and Cadastre, Denmark. 2002.
- Kleusberg, A. Atmospheric models from GPS. GPS for Geodesy 2<sup>nd</sup> edition. New York: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- Kossey, P., J. Heckscher, H. Carlson and E. Kennedy. HAARP: High frequency active auroral research program. Journal of Arctic Research of the United States 1 (1999).
- Landau, H., U. Vollath and X. Chen. Virtual reference station systems. Journal of Global Positioning Systems 1 (2002): 137-143
- Langley, R. Propagation of the GPS Signals. GPS for Geodesy (1996): 103-140
- Lim, S., C. Rizos and T. Musa. Application of Running Average Function to Non-Dispersive Errors of Network-Based Real-Time Kinematic Positioning. Journal of Global Positioning Systems 7 (2008): 148-155
- Lin, M. RTCM 3.0 Implementation in Network RTK and Performance Analysis. M.Sc Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada. 2006.
- Misra, P. and P. Enge. Global positioning system: signals, measurements, and performance. Ganga-Jamuna Press Lincoln, USA. 2001.
- Mockler, S. Water vapor in the climate system. Special Report, American, Geophysical Union 1995.
- Musa, T. Residual Analysis of Atmospheric Delay in Low Latitude Region Using Network-Based GPS Positioning. Ph.D. Thesis, School of Surveying & Spatial Information Systems, University of New South Wales, Australia. 2007.

- Nordin, A. F. Geospatial Information, SDI & The Economy – The Malaysian Context.  
19th United Nations Regional Cartographic Conference for Asia and the Pacific,  
29 October - 1 November 2012, Bangkok, Thailand
- Odiijk, D. Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays. Ph.D. Thesis,  
Mathematical Geodesy and Positioning Faculty of Civil Engineering and Geosciences  
Delft, University of Technology, Netherlands. 2002.
- Pi, X., A. Mannucci, U. Lindqwister and C. Ho. Monitoring of global ionospheric irregularities  
using the worldwide GPS network. Geophysical Research Letters 24 (1997): 2283-2286
- Rizos, C. Principles and Practice of GPS Surveying, Monograph 17, pp 555, School of Geomatic  
Engineering, The University of New South Wales, 1997.
- Rothacher, M. and L. Mervart. Bernese GPS software version 4.0, 418. Bern: 1996
- Schaer, S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System.  
Ph.D. Thesis, Geod.-Geophys. Arb. Schweiz. 1999.
- Seeber, G. Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. Berlin, Germany: De  
Gruyter, 1993.
- Teunissen, P. GPS for Geodesy. 1998.
- Vollath, U., A. Buecherl, H. Landau, C. Pagels and B. Wagner. Multi-base RTK positioning  
using virtual reference stations. Proceedings of the 13th International Technical Meeting of  
the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, UT, USA (2000): 123-  
131.
- Wanninger, L. Effects of equatorial ionosphere on GPS. GPS World 4 (1993): 48-52
- Wanninger, L. Improved ambiguity resolution by regional differential modelling of the  
ionosphere. Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of  
the Institute of Navigation (1995): 55-62.
- Wanninger, L. The performance of virtual reference stations in active geodetic GPS-networks  
under solar maximum conditions. Citeseer (1999): 1419-1427.

- Warnant, R. Atmospheric perturbations on GNSS signals and their influence on time transfer. 22th General Assembly of the Int. Union of Radio Science, Maastricht, The Netherlands (17-24 August 2002):
- Wei, E., H. Chai, Z. An and J. Liu. VRS Virtual Observations Generation Algorithm. Journal of Global Positioning Systems 5 (2006): 76-81
- Wu, C. Positioning Accuracy Analysis of GPS Network RTK in Southern Taiwan. Master Thesis, Earth Sciences National Cheng Kung University, Taiwan, 2006.
- Wübbena, G., A. Bagge and M. Schmitz. RTK networks based on Geo++ GNSMART–concepts, implementation, results. Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (2001): 368-378
- Zain, A., Y. Ho and M. Abdullah. Enabling GPS technology on Equatorial Ionosphere monitoring during geomagnetic storm of July 15-17, 2000. ION GPS 2002: 15 th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR: Institute of Navigation, 3975 University Drive, Suite 390, Fairfax, VA, 22030, USA (2002):

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

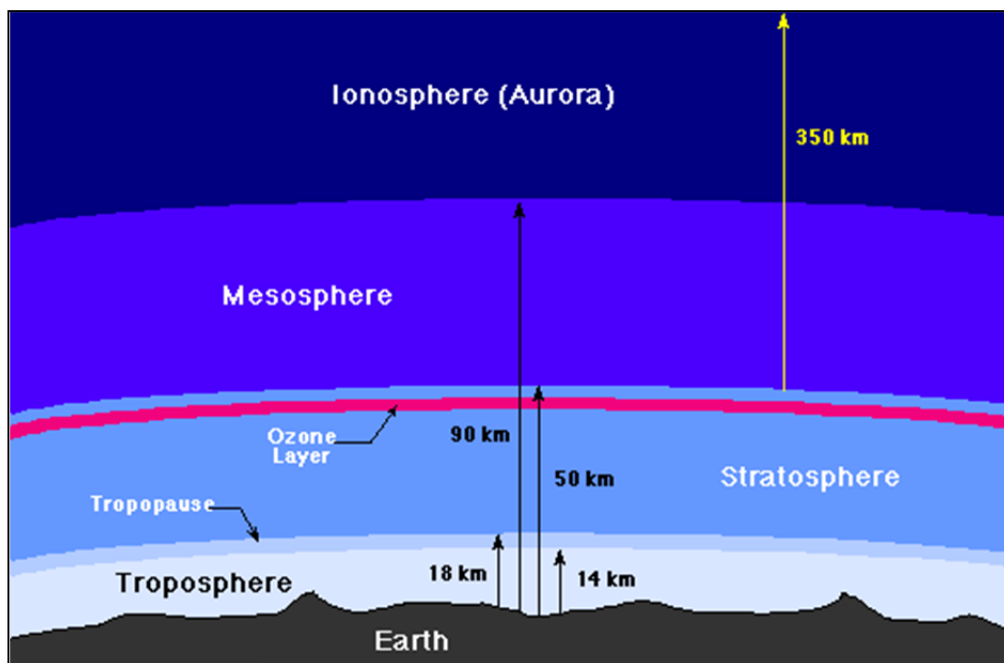
### ก-1 ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโลกที่มีต่อสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

ชั้นบรรยากาศของโลกประกอบด้วยประจุไฟฟ้า อะตอมที่เป็นกลาง โมเลกุลและ กลุ่มก๊าซต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเบื้องต้น คือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง (Neutral Atmosphere) และ ชั้นบรรยากาศที่เป็นไอโอไนซ์หรือเรียกว่าไอโอโนสเฟียร์ (Ionized Atmosphere)

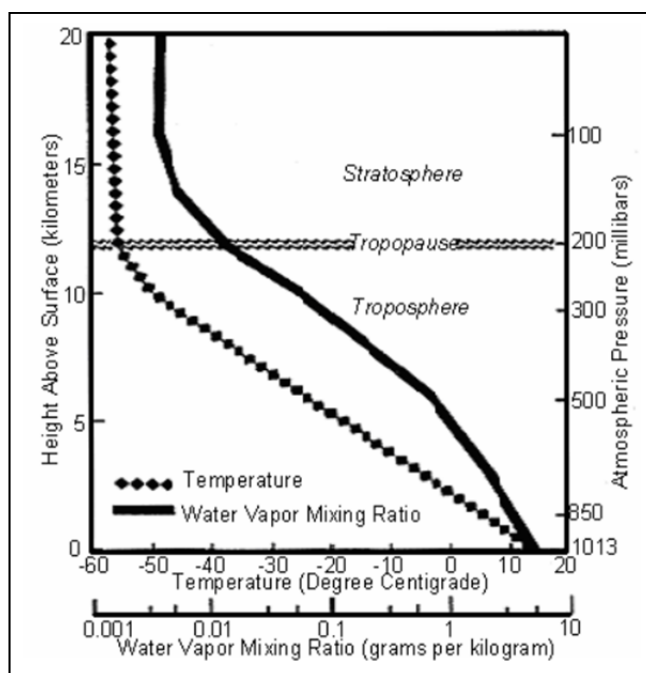
#### ก-1.1 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง

ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางมีขอบเขตประมาณ 80 กิโลเมตร ประกอบด้วย 3 ชั้นใหญ่ๆ คือ โทรโปสเฟียร์ (Troposphere) สตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) และบางส่วนของมีโซสเฟียร์ (Mesosphere) (ดังรูปที่ ก-1) ชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์และโทรโปสเฟียร์ถูกแบ่งโดยเส้นโทรโปพอส (Tropopause) ซึ่งชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นมากที่สุดและอยู่ชั้นล่างสุดคือชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ มีระยะความสูงจากพื้นดินถึงชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ประมาณ 13 กิโลเมตร สภาพอากาศต่างๆก็เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศนี้นั่นเอง

ชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ ประกอบด้วยกลุ่มก๊าซที่เป็นกลางชนิดแห้ง (ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนเป็นหลัก) รวมไปถึงฝุ่นละอองและมลภาวะที่มาจากแหล่งต่างๆ ด้วย โดยกลุ่มก๊าซดังกล่าวนี้มีการเปลี่ยนแปลงแบบช้าๆ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบจำลองโดยการใช้กฎของก๊าซและ Hydrostatic เป็นต้นแบบ นอกจากนี้ชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ยังมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบหลายส่วนอีกด้วยโดยแต่ละส่วนจะมีอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่ไม่เท่ากัน รูปที่ ก-2 แสดงค่าอัตราส่วนของไอน้ำในบรรยากาศที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความดันและระดับความสูงเหนือพื้นดิน จากรูปจะเห็นว่าค่าไอน้ำในบรรยากาศมีขนาดใหญ่ในช่วงต่ำกว่า 12 กิโลเมตรจากพื้นดิน ซึ่งค่าไอน้ำมีขนาดที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความดัน แต่ค่าไอน้ำจะมีขนาดลดลงเมื่อความสูงจากพื้นดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์จึงเป็นชั้นที่มีความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อคลื่นดาวเทียมจีพีเอสมากที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นบรรยากาศอื่นๆภายในชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง จะสัมพันธ์กับปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Hernandes, Juan et al., 1999; Odijk, 2002)



รูปที่ ก-1 แสดงการแบ่งชั้นบรรยากาศของโลก (Musa, 2007)

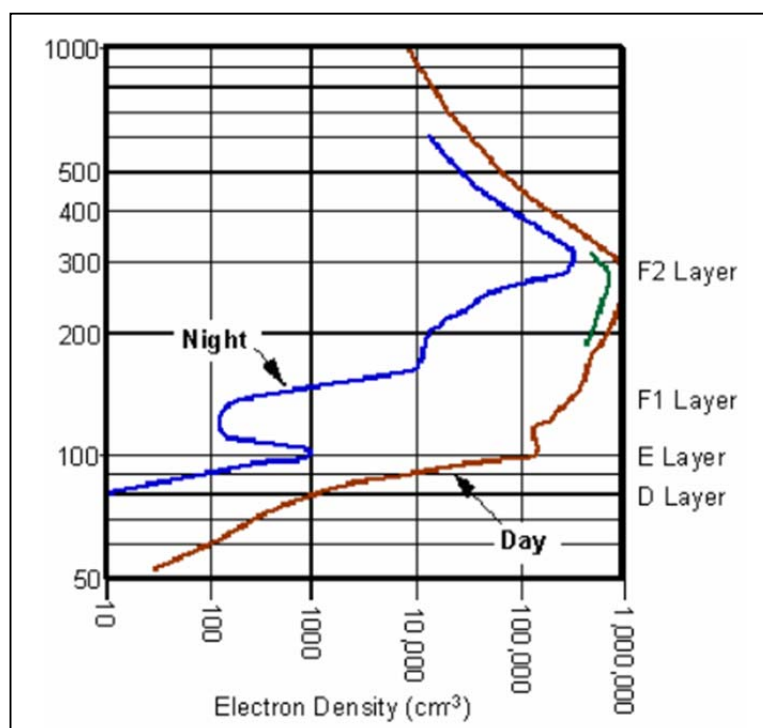


รูปที่ ก-2 แสดงค่าอุณหภูมิ ความสูง ความดัน และค่าไอน้ำในบรรยากาศของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ สตราโทสเฟียร์ (Mockler, 1995)



### ก-1.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์คือส่วนหนึ่งของชั้นบรรยากาศของโลกที่เกิดกระบวนการแตกตัวของไอออน (Ionisation) โดยรังสีจากดวงอาทิตย์ (ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ต-UV) ซึ่งชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีขอบเขตประมาณ 50 - 1000 กิโลเมตรเหนือผิวโลกแบ่งเป็นชั้นย่อยๆตามระดับการแตกตัวของไอออนได้แก่ ชั้น D, E, F1 และ F2 (ดูรูปที่ ก-3)



รูปที่ ก-3 แสดงชั้นบรรยากาศย่อยของไอโอโนสเฟียร์และ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในบริเวณพื้นที่ Mid-Latitude ซึ่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเวลากลางวันมีขนาดสูงกว่าในเวลากลางคืน (Kossey, Heckscher et al., 1999)

ในชั้นบรรยากาศ F2 ระดับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุดที่ความสูงเหนือพื้นโลกประมาณ 350-400 กิโลเมตร แต่อิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่ออยู่ในชั้นบรรยากาศ E และค่าอิเล็กตรอนจะลดลงอย่างรวดเร็วในบริเวณต่ำกว่าชั้นบรรยากาศ D และสูงกว่าชั้นบรรยากาศ F2 รูปที่ ก-3 แสดงค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเวลากลางวันมีขนาดสูงกว่าในเวลากลางคืน (บริเวณพื้นที่ Mid-Latitude)

**ภาคผนวก ข** แสดงตารางผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาดต่างๆ

ตารางที่ ข-1 ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 10 – 20 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน CUSV

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
2-Feb-10	033	98	89	93	0	1	0	0	0	0	0.011	0.018	0.010	0.018	0.010	0.019
3-Feb-10	034	85	97	97	0	6	0	0	0	1	0.011	0.022	0.010	0.020	0.010	0.022
4-Feb-10	035	97	99	99	0	0	0	0	0	0	0.009	0.018	0.009	0.016	0.009	0.018
8-Feb-10	039	65	67	67	0	3	0	0	0	0	0.010	0.015	0.008	0.012	0.008	0.014
9-Feb-10	040	88	85	96	0	3	0	2	0	6	0.010	0.021	0.009	0.020	0.011	0.023
10-Feb-10	041	96	95	95	0	1	0	2	0	1	0.009	0.020	0.009	0.018	0.009	0.022
11-Feb-10	042	91	93	95	7	20	5	17	0	17	0.016	0.029	0.015	0.026	0.015	0.030

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
12-Feb-10	043	71	82	92	0	0	0	6	0	0	0.010	0.024	0.011	0.024	0.011	0.024
13-Feb-10	044	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0.009	0.015	0.009	0.014	0.009	0.016
14-Feb-10	045	86	96	91	0	0	0	1	0	6	0.008	0.019	0.009	0.019	0.009	0.020
15-Feb-10	046	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0.009	0.018	0.009	0.017	0.009	0.020
16-Feb-10	047	97	95	96	0	23	0	7	0	7	0.011	0.029	0.011	0.023	0.011	0.025
17-Feb-10	048	100	100	100	0	0	0	0	0	5	0.009	0.018	0.009	0.017	0.009	0.020
18-Feb-10	049	98	95	96	0	6	2	14	2	12	0.013	0.021	0.014	0.024	0.017	0.026
19-Feb-10	050	70	56	64	0	4	0	0	0	1	0.010	0.020	0.009	0.015	0.010	0.020
20-Feb-10	051	81	93	87	0	0	0	3	0	3	0.010	0.018	0.011	0.021	0.011	0.025
21-Feb-10	052	82	94	95	0	13	0	11	0	11	0.014	0.028	0.013	0.025	0.014	0.028
22-Feb-10	053	98	99	99	0	0	0	2	0	1	0.010	0.020	0.009	0.018	0.009	0.020
23-Feb-10	054	95	95	93	0	0	0	0	0	0	0.009	0.016	0.009	0.014	0.009	0.017
24-Feb-10	055	91	96	94	0	10	0	5	0	9	0.014	0.026	0.011	0.024	0.011	0.025
25-Feb-10	056	96	99	98	0	1	0	4	0	2	0.013	0.026	0.013	0.026	0.013	0.026

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
26-Feb-10	057	96	99	99	0	7	0	5	0	5	0.010	0.022	0.010	0.022	0.010	0.023
27-Feb-10	058	58	68	75	11	13	0	18	0	0	0.028	0.080	0.015	0.031	0.012	0.022
28-Feb-10	059	100	97	100	0	0	0	0	0	0	0.008	0.015	0.008	0.015	0.008	0.017
1-Mar-10	060	75	79	80	5	8	7	10	6	11	0.015	0.026	0.016	0.028	0.016	0.029

ตารางที่ ข-2 ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวตั้ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวตั้ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 10 – 20 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน DPT9

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
2-Feb-10	033	99	80	89	0	0	0	0	0	0	0.010	0.018	0.010	0.016	0.009	0.017
3-Feb-10	034	85	96	97	0	4	0	0	0	0	0.011	0.022	0.010	0.019	0.010	0.021
4-Feb-10	035	97	99	99	0	0	0	0	0	0	0.009	0.020	0.009	0.020	0.009	0.022
8-Feb-10	039	66	69	68	0	0	0	1	0	0	0.008	0.012	0.008	0.015	0.008	0.017
9-Feb-10	040	87	84	96	3	16	3	16	8	25	0.014	0.048	0.012	0.050	0.016	0.050
10-Feb-10	041	96	95	95	0	0	0	0	0	0	0.009	0.021	0.009	0.018	0.009	0.024
11-Feb-10	042	93	94	95	2	9	0	5	0	4	0.014	0.024	0.012	0.023	0.012	0.026
12-Feb-10	043	69	82	92	0	0	0	8	0	0	0.011	0.019	0.011	0.026	0.010	0.020
13-Feb-10	044	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0.010	0.018	0.009	0.013	0.009	0.016

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
14-Feb-10	045	86	95	92	0	0	0	1	0	0	0.009	0.017	0.009	0.022	0.009	0.020
15-Feb-10	046	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0.009	0.018	0.009	0.018	0.009	0.021
16-Feb-10	047	97	94	95	0	38	0	41	0	41	0.010	0.031	0.011	0.032	0.011	0.038
17-Feb-10	048	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0.009	0.016	0.009	0.018	0.009	0.019
18-Feb-10	049	97	95	99	0	11	0	9	6	39	0.011	0.038	0.012	0.025	0.011	0.028
19-Feb-10	050	70	56	65	0	7	0	0	0	3	0.011	0.022	0.010	0.018	0.010	0.022
20-Feb-10	051	81	91	88	0	0	0	1	0	0	0.011	0.017	0.011	0.022	0.011	0.024
21-Feb-10	052	84	95	95	0	44	0	28	0	34	0.015	0.036	0.014	0.029	0.014	0.029
22-Feb-10	053	97	99	99	0	5	0	8	0	7	0.010	0.022	0.010	0.022	0.010	0.020
23-Feb-10	054	95	95	100	0	0	0	0	0	1	0.010	0.018	0.010	0.017	0.010	0.019
24-Feb-10	055	91	98	94	0	9	0	5	0	14	0.013	0.028	0.013	0.029	0.012	0.027
25-Feb-10	056	96	99	98	0	7	0	12	0	27	0.014	0.029	0.014	0.031	0.013	0.029
26-Feb-10	057	96	99	99	0	2	0	1	0	2	0.009	0.019	0.009	0.022	0.009	0.022

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
27-Feb-10	058	59	68	75	0	3	0	23	0	0	0.009	0.025	0.015	0.034	0.011	0.025
28-Feb-10	059	100	98	100	0	0	0	0	0	0	0.008	0.013	0.008	0.013	0.008	0.015
1-Mar-10	060	76	79	80	0	3	0	2	0	2	0.010	0.021	0.010	0.020	0.012	0.025

ตารางที่ ข-3 ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวดิ่ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 30 – 50 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน CUSV

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
1-Feb-10	032	69	92	92	0	6	0	19	0	19	0.009	0.033	0.010	0.028	0.009	0.029
2-Feb-10	033	75	68	77	0	5	0	11	0	16	0.009	0.031	0.011	0.028	0.011	0.031
3-Feb-10	034	53	58	75	0	16	2	12	2	13	0.011	0.040	0.015	0.039	0.013	0.036
4-Feb-10	035	65	85	86	0	40	0	250	0	259	0.010	0.044	0.013	0.073	0.010	0.039
5-Feb-10	036	99	99	100	0	17	0	2	0	2	0.009	0.033	0.010	0.024	0.009	0.024
6-Feb-10	037	38	89	84	0	6	0	4	0	3	0.008	0.031	0.010	0.024	0.010	0.025
7-Feb-10	038	90	74	76	0	60	0	24	0	17	0.008	0.042	0.010	0.031	0.009	0.032
8-Feb-10	039	65	71	65	0	0	0	4	0	0	0.008	0.032	0.011	0.030	0.011	0.030
9-Feb-10	040	65	74	68	0	2	0	26	0	8	0.008	0.038	0.015	0.034	0.011	0.027
10-Feb-10	041	86	52	51	2	99	0	23	0	5	0.011	0.052	0.011	0.032	0.009	0.032



Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.		
11-Feb-10	042	82	60	77	0	48	0	49	0	55	0.014	0.050	0.018	0.047	0.015	0.043
12-Feb-10	043	63	44	35	0	59	1	76	0	53	0.008	0.049	0.014	0.047	0.009	0.048
13-Feb-10	044	59	91	100	0	0	0	0	0	0	0.008	0.030	0.010	0.025	0.008	0.024
14-Feb-10	045	39	31	58	0	4	0	1	1	2	0.008	0.032	0.010	0.027	0.037	0.177
15-Feb-10	046	69	77	88	0	3	0	0	0	0	0.009	0.029	0.011	0.025	0.009	0.024
16-Feb-10	047	89	65	90	0	21	0	18	0	7	0.011	0.045	0.013	0.037	0.013	0.035
17-Feb-10	048	49	80	67	0	0	0	1	0	8	0.009	0.028	0.010	0.021	0.010	0.028
18-Feb-10	049	48	88	99	0	10	3	3	0	5	0.014	0.036	0.017	0.030	0.014	0.028
19-Feb-10	050	70	38	68	0	8	0	0	0	0	0.009	0.036	0.009	0.030	0.010	0.031
20-Feb-10	051	55	48	82	0	9	0	0	0	6	0.011	0.036	0.011	0.023	0.010	0.027
21-Feb-10	052	30	87	92	0	3	0	26	1	26	0.011	0.030	0.017	0.041	0.013	0.035
22-Feb-10	053	46	99	100	0	2	0	2	0	1	0.009	0.028	0.010	0.028	0.009	0.025
23-Feb-10	054	55	99	100	0	2	0	3	0	3	0.009	0.032	0.010	0.029	0.009	0.029
24-Feb-10	055	60	53	77	1	41	0	21	0	29	0.013	0.046	0.011	0.033	0.012	0.038
25-Feb-10	056	85	52	86	0	10	0	19	0	13	0.014	0.040	0.017	0.044	0.015	0.037

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.		
26-Feb-10	057	61	98	99	0	25	0	17	0	11	0.009	0.039	0.010	0.033	0.011	0.034
27-Feb-10	058	38	53	56	0	21	0	28	0	50	0.011	0.043	0.014	0.038	0.013	0.041
28-Feb-10	059	49	79	84	0	19	0	39	0	32	0.010	0.039	0.015	0.041	0.011	0.034
1-Mar-10	060	60	58	60	0	17	3	29	0	20	0.012	0.036	0.015	0.042	0.014	0.042
2-Mar-10	061	45	65	67	0	4	0	0	0	0	0.009	0.030	0.011	0.023	0.010	0.023
3-Mar-10	062	79	80	75	0	36	0	47	0	44	0.009	0.037	0.011	0.034	0.009	0.028

ตารางที่ ข-4 ผลลัพธ์จากการรั้งวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวดิ่ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 30 – 50 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน RTSD

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
2-Feb-10	033	74	67	76	0	25	0	35	0	34	0.009	0.036	0.010	0.033	0.012	0.036
3-Feb-10	034	54	58	75	0	69	2	33	2	42	0.012	0.051	0.015	0.041	0.014	0.041
4-Feb-10	035	65	84	86	0	124	0	299	0	304	0.008	0.050	0.013	0.096	0.010	0.048
5-Feb-10	036	98	99	100	0	3	0	0	0	0	0.009	0.032	0.011	0.026	0.010	0.025
6-Feb-10	037	38	89	84	0	3	0	0	0	0	0.007	0.030	0.010	0.025	0.010	0.025
7-Feb-10	038	90	74	76	0	89	0	38	0	26	0.008	0.050	0.011	0.033	0.009	0.034
8-Feb-10	039	65	71	65	0	11	0	12	1	18	0.008	0.037	0.010	0.034	0.010	0.034
9-Feb-10	040	65	74	70	0	57	20	59	0	25	0.008	0.048	0.028	0.042	0.012	0.029
10-Feb-10	041	86	53	52	7	158	0	23	0	10	0.016	0.066	0.013	0.037	0.009	0.040

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
11-Feb-10	042	81	57	76	0	52	0	54	1	97	0.015	0.054	0.016	0.051	0.016	0.048
12-Feb-10	043	63	44	35	0	106	9	97	20	89	0.010	0.064	0.018	0.061	0.027	0.073
13-Feb-10	044	59	91	100	0	3	0	0	0	0	0.008	0.032	0.009	0.030	0.008	0.026
14-Feb-10	045	39	31	58	0	9	0	2	0	2	0.007	0.037	0.011	0.027	0.009	0.026
15-Feb-10	046	69	77	88	0	6	0	1	0	0	0.008	0.032	0.010	0.028	0.009	0.028
16-Feb-10	047	89	66	91	0	14	0	21	0	8	0.010	0.044	0.013	0.040	0.011	0.039
17-Feb-10	048	49	80	67	0	0	0	1	0	4	0.008	0.032	0.009	0.026	0.009	0.030
18-Feb-10	049	49	88	99	0	20	0	4	0	16	0.011	0.038	0.015	0.031	0.014	0.029
19-Feb-10	050	70	38	68	0	9	0	0	0	0	0.008	0.038	0.009	0.032	0.011	0.032
20-Feb-10	051	56	49	82	0	25	0	14	0	9	0.012	0.041	0.011	0.029	0.011	0.031
21-Feb-10	052	30	88	92	0	24	2	67	1	50	0.016	0.049	0.017	0.045	0.013	0.040
22-Feb-10	053	48	99	100	0	0	0	3	0	4	0.009	0.029	0.010	0.032	0.010	0.029
23-Feb-10	054	55	99	100	0	8	0	12	0	12	0.009	0.037	0.010	0.033	0.009	0.033

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
24-Feb-10	055	62	54	77	0	47	0	31	0	30	0.012	0.045	0.013	0.039	0.013	0.039
25-Feb-10	056	85	53	86	0	46	0	32	0	29	0.017	0.046	0.016	0.045	0.018	0.039
26-Feb-10	057	61	98	99	0	28	3	29	3	30	0.009	0.045	0.013	0.047	0.012	0.043
27-Feb-10	058	38	52	57	0	46	0	66	0	85	0.009	0.050	0.015	0.047	0.013	0.049
28-Feb-10	059	49	79	84	0	42	0	32	0	4	0.010	0.044	0.016	0.041	0.011	0.035
1-Mar-10	060	60	58	60	5	39	4	25	3	25	0.014	0.054	0.016	0.047	0.015	0.047
2-Mar-10	061	44	64	66	0	8	0	7	0	5	0.010	0.035	0.011	0.026	0.010	0.026
3-Mar-10	062	79	80	75	0	54	0	57	0	57	0.009	0.042	0.010	0.040	0.009	0.032

ตารางที่ ข-5 ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวดิ่ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 50 – 60 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน CUSV

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
1-Feb-10	032	58	85	98	0	20	0	32	0	21	0.002	0.030	0.007	0.030	0.007	0.029
2-Feb-10	033	38	95	96	0	7	0	1	0	3	0.005	0.026	0.017	0.031	0.006	0.029
3-Feb-10	034	40	99	100	0	39	1	25	0	16	0.007	0.044	0.018	0.036	0.008	0.026
4-Feb-10	035	29	97	98	0	34	0	31	0	28	0.002	0.045	0.019	0.031	0.009	0.029
5-Feb-10	036	42	98	100	0	49	0	47	0	11	0.005	0.047	0.021	0.046	0.007	0.030
6-Feb-10	037	30	98	96	0	11	0	17	0	0	0.003	0.030	0.007	0.038	0.006	0.026
7-Feb-10	038	53	95	98	0	12	0	6	0	17	0.002	0.028	0.019	0.031	0.007	0.028
8-Feb-10	039	24	24	27	0	5	0	2	0	2	0.003	0.030	0.008	0.026	0.006	0.026
9-Feb-10	040	27	98	99	0	7	6	55	22	98	0.003	0.034	0.008	0.040	0.009	0.048
10-Feb-10	041	34	45	44	0	46	0	82	0	46	0.008	0.072	0.016	0.078	0.002	0.079

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
11-Feb-10	042	33	35	35	1	46	1	37	0	46	0.012	0.051	0.015	0.046	0.009	0.044
12-Feb-10	043	35	91	100	0	3	0	5	0	13	0.006	0.030	0.007	0.032	0.009	0.034
13-Feb-10	044	32	95	68	0	33	0	17	0	52	0.005	0.040	0.014	0.037	0.007	0.030
14-Feb-10	045	37	81	84	0	20	0	89	0	122	0.006	0.037	0.011	0.052	0.007	0.040
15-Feb-10	046	45	97	98	0	3	0	4	0	5	0.006	0.033	0.007	0.028	0.007	0.035
16-Feb-10	047	19	21	24	0	6	0	6	0	9	0.010	0.046	0.015	0.044	0.007	0.044
17-Feb-10	048	34	97	63	0	7	0	13	0	42	0.003	0.034	0.008	0.032	0.002	0.038
18-Feb-10	049	36	88	94	0	18	0	23	0	11	0.002	0.036	0.010	0.035	0.004	0.033
19-Feb-10	050	18	76	73	0	18	0	129	0	21	0.003	0.042	0.016	0.051	0.009	0.035
21-Feb-10	052	24	30	81	0	7	0	25	1	45	0.007	0.041	0.015	0.044	0.004	0.041
22-Feb-10	053	30	94	76	0	12	0	39	0	7	0.006	0.038	0.012	0.038	0.081	0.098
23-Feb-10	054	41	97	47	0	15	0	23	0	3	0.004	0.037	0.011	0.034	0.009	0.033
24-Feb-10	055	45	59	69	0	12	0	26	0	26	0.004	0.037	0.011	0.035	0.009	0.039
25-Feb-10	056	29	50	65	0	23	0	10	0	24	0.016	0.055	0.019	0.034	0.009	0.041
26-Feb-10	057	50	92	60	0	42	22	145	1	79	0.006	0.038	0.012	0.051	0.009	0.045

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
27-Feb-10	058	27	25	29	0	6	0	4	0	4	0.004	0.033	0.007	0.032	0.003	0.034
28-Feb-10	059	52	91	95	38	144	1	36	0	40	0.535	0.240	0.014	0.039	0.008	0.033
1-Mar-10	060	4	30	30	0	0	0	9	0	4	0.006	0.016	0.017	0.036	0.009	0.033
2-Mar-10	061	22	40	48	0	3	0	19	0	23	0.005	0.027	0.018	0.037	0.007	0.040
3-Mar-10	062	12	63	87	0	6	0	9	0	15	0.010	0.049	0.023	0.034	0.002	0.035



ตารางที่ ข-6 ผลลัพธ์จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวดิ่ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 50 – 60 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน TMDB

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
1-Feb-10	032	51	83	97	0	41	0	46	0	41	0.004	0.045	0.019	0.041	0.009	0.042
2-Feb-10	033	36	94	94	0	1	0	33	0	35	0.006	0.028	0.029	0.031	0.006	0.033
3-Feb-10	034	37	99	100	6	16	21	42	21	50	0.010	0.048	0.022	0.038	0.007	0.037
4-Feb-10	035	26	98	98	0	6	3	49	3	28	0.003	0.032	0.006	0.032	0.003	0.031
5-Feb-10	036	36	98	100	0	53	0	33	0	57	0.006	0.052	0.026	0.028	0.002	0.036
6-Feb-10	037	31	98	96	0	12	0	4	0	14	0.005	0.034	0.008	0.023	0.007	0.029
7-Feb-10	038	48	92	99	0	19	0	4	0	9	0.003	0.032	0.006	0.028	0.007	0.029
8-Feb-10	039	24	25	27	0	3	0	3	0	3	0.006	0.038	0.012	0.037	0.006	0.037
9-Feb-10	040	26	97	95	0	28	14	70	61	259	0.003	0.046	0.020	0.045	0.006	0.045
10-Feb-10	041	31	39	42	0	52	0	55	0	72	0.007	0.073	0.027	0.068	0.003	0.092

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
11-Feb-10	042	24	27	37	0	6	0	4	1	34	0.003	0.033	0.007	0.032	0.007	0.041
12-Feb-10	043	34	92	96	0	5	0	1	0	4	0.006	0.027	0.018	0.027	0.009	0.030
13-Feb-10	044	35	95	56	0	5	0	9	0	3	0.006	0.028	0.009	0.030	0.007	0.028
14-Feb-10	045	36	81	84	0	9	0	12	0	14	0.002	0.031	0.005	0.024	0.007	0.034
15-Feb-10	046	46	97	95	0	6	0	18	0	28	0.002	0.038	0.012	0.033	0.009	0.030
16-Feb-10	047	19	21	23	0	50	0	49	0	72	0.012	0.075	0.029	0.067	0.009	0.067
17-Feb-10	048	33	97	59	0	0	0	17	0	33	0.002	0.028	0.029	0.029	0.002	0.035
18-Feb-10	049	32	87	92	0	3	0	49	0	29	0.002	0.028	0.019	0.039	0.002	0.031
19-Feb-10	050	7	74	75	0	28	3	79	4	91	0.011	0.082	0.016	0.048	0.023	0.051
20-Feb-10	051	19	26	61	0	2	0	3	0	6	0.009	0.032	0.006	0.030	0.003	0.033
21-Feb-10	052	17	29	79	0	6	0	5	0	161	0.010	0.040	0.014	0.034	0.003	0.054
22-Feb-10	053	26	92	68	0	17	0	41	0	4	0.005	0.041	0.015	0.039	0.006	0.031
23-Feb-10	054	28	95	47	1	6	0	69	0	1	0.093	0.049	0.013	0.044	0.009	0.037
24-Feb-10	055	36	57	63	0	10	0	33	0	29	0.004	0.035	0.009	0.039	0.009	0.041
25-Feb-10	056	31	52	71	0	5	0	2	0	3	0.011	0.043	0.017	0.027	0.003	0.031

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
26-Feb-10	057	50	92	54	0	115	29	188	0	13	0.006	0.059	0.013	0.071	0.008	0.037
27-Feb-10	058	28	26	28	0	20	0	29	0	27	0.004	0.045	0.019	0.048	0.002	0.048
28-Feb-10	059	46	91	94	0	27	2	44	0	16	0.005	0.039	0.008	0.038	0.009	0.036
1-Mar-10	060	0	30	30	0	0	0	32	0	41	0.000	0.000	0.007	0.045	0.003	0.048
2-Mar-10	061	22	44	50	0	4	0	13	0	4	0.006	0.036	0.010	0.039	0.007	0.036
3-Mar-10	062	12	64	81	0	7	0	9	0	5	0.007	0.051	0.008	0.029	0.009	0.036

ตารางที่ ข-7 ผลลัพธ์จากการรั้งวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวดิ่ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 60 – 80 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน LADP

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
1-Feb-10	032	31	91	62	9	15	0	35	0	16	0.041	0.053	0.026	0.060	0.028	0.056
2-Feb-10	033	47	79	86	0	41	0	3	0	26	0.029	0.058	0.025	0.045	0.029	0.048
3-Feb-10	034	57	65	31	14	264	21	369	0	114	0.041	0.104	0.040	0.106	0.038	0.081
4-Feb-10	035	27	88	19	0	49	9	76	0	23	0.031	0.075	0.034	0.085	0.034	0.056
5-Feb-10	036	2	29	27	0	0	46	105	8	11	0.035	0.047	0.052	0.269	0.061	0.304
6-Feb-10	037	68	5	30	0	270	0	10	0	153	0.032	0.084	0.025	0.064	0.037	0.090
7-Feb-10	038	49	65	69	0	190	10	293	25	176	0.033	0.100	0.033	0.106	0.100	0.130
8-Feb-10	039	8	58	22	0	26	0	285	0	168	0.027	0.075	0.032	0.100	0.034	0.105
9-Feb-10	040	42	1	69	26	255	0	15	4	119	0.136	0.433	0.025	0.089	0.038	0.080

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
13-Feb-10	044	20	1	7	0	11	0	0	0	0	0.031	0.060	0.024	0.038	0.029	0.052
14-Feb-10	045	36	3	46	0	51	0	27	0	23	0.032	0.062	0.031	0.080	0.029	0.053
15-Feb-10	046	44	90	18	0	213	0	71	0	1	0.031	0.084	0.028	0.065	0.031	0.089
16-Feb-10	047	26	25	15	0	63	0	35	0	11	0.030	0.075	0.027	0.070	0.027	0.071
17-Feb-10	048	15	6	44	0	53	0	12	0	200	0.034	0.079	0.035	0.072	0.033	0.080
18-Feb-10	049	52	6	55	0	148	0	9	3	158	0.032	0.078	0.025	0.064	0.033	0.075
19-Feb-10	050	7	5	20	0	29	0	14	0	109	0.039	0.075	0.029	0.069	0.033	0.084
20-Feb-10	051	32	41	25	0	28	0	75	0	36	0.031	0.059	0.028	0.066	0.028	0.059
21-Feb-10	052	3	5	5	0	6	0	22	0	21	0.028	0.057	0.025	0.071	0.028	0.061
22-Feb-10	053	31	17	29	0	41	0	76	16	110	0.027	0.059	0.030	0.083	0.034	0.074
23-Feb-10	054	37	21	29	0	113	0	70	0	66	0.034	0.077	0.033	0.079	0.042	0.085
24-Feb-10	055	6	3	3	0	5	1	39	1	31	0.034	0.065	0.040	0.088	0.044	0.082
25-Feb-10	056	26	30	20	1	14	0	11	0	14	0.037	0.066	0.030	0.064	0.035	0.067

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
26-Feb-10	057	9	1	23	0	4	0	12	11	75	0.028	0.052	0.025	0.135	0.043	0.090
27-Feb-10	058	1	6	3	0	0	0	1	0	40	0.043	0.052	0.024	0.056	0.026	0.105
28-Feb-10	059	41	7	4	0	47	0	20	0	1	0.029	0.067	0.026	0.068	0.032	0.057
1-Mar-10	060	21	20	40	1	18	1	69	0	30	0.035	0.061	0.031	0.077	0.034	0.056
2-Mar-10	061	8	34	33	40	58	0	13	0	15	0.094	0.170	0.027	0.057	0.030	0.053
3-Mar-10	062	5	1	36	0	0	0	0	1	40	0.026	0.040	0.023	0.045	0.033	0.071

ตารางที่ ข-8 ผลลัพธ์จากการรั้งวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสแบบ VRS ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลลัพธ์ในสามรูปแบบคือ อัตราของผลสำเร็จจากการหาค่าเลขปริศนา (%) จำนวนของค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง (ค่าพิกัดกระโดดขนาดใหญ่) ในแนวราบและแนวดิ่ง และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง (เมตร) ในแต่ละโมเดลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของระยะห่างระหว่างสถานีฐานจีพีเอสขนาด 60 – 80 กิโลเมตร สถานีผู้ใช้งาน PKKT

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
1-Feb-10	032	31	89	65	0	26	0	30	0	57	0.031	0.058	0.029	0.052	0.033	0.058
2-Feb-10	033	51	79	86	0	27	0	34	0	31	0.027	0.049	0.023	0.046	0.027	0.040
3-Feb-10	034	62	74	32	0	24	0	52	0	14	0.030	0.053	0.027	0.056	0.030	0.048
4-Feb-10	035	33	94	21	0	39	0	7	0	24	0.029	0.064	0.026	0.043	0.029	0.056
5-Feb-10	036	2	29	21	0	3	0	8	4	6	0.037	0.056	0.029	0.050	0.039	0.042
6-Feb-10	037	73	10	33	7	34	2	8	0	15	0.032	0.092	0.029	0.051	0.032	0.049
7-Feb-10	038	56	70	78	36	105	36	134	29	128	0.044	0.087	0.041	0.087	0.041	0.076
8-Feb-10	039	23	33	21	0	24	0	27	0	4	0.027	0.056	0.026	0.056	0.027	0.043
9-Feb-10	040	55	7	65	0	12	0	19	0	27	0.030	0.058	0.028	0.078	0.030	0.056

Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
13-Feb-10	044	16	7	15	0	5	0	0	0	5	0.027	0.044	0.026	0.043	0.029	0.045
14-Feb-10	045	36	2	35	0	13	0	1	0	2	0.031	0.051	0.030	0.047	0.028	0.039
15-Feb-10	046	40	88	14	0	3	0	19	0	0	0.029	0.050	0.026	0.049	0.030	0.043
16-Feb-10	047	22	22	9	0	36	0	34	0	2	0.029	0.076	0.027	0.076	0.027	0.051
17-Feb-10	048	14	5	39	0	3	9	11	5	23	0.031	0.057	0.045	0.060	0.034	0.049
18-Feb-10	049	56	6	58	0	5	0	17	0	10	0.029	0.050	0.025	0.082	0.028	0.046
19-Feb-10	050	1	5	20	0	0	7	33	0	59	0.030	0.060	0.042	0.086	0.032	0.071
20-Feb-10	051	13	47	19	0	2	1	24	0	12	0.030	0.052	0.029	0.057	0.031	0.048
21-Feb-10	052	6	4	3	0	15	0	3	0	3	0.034	0.101	0.025	0.060	0.028	0.048
22-Feb-10	053	24	10	21	0	0	0	1	0	18	0.025	0.038	0.029	0.050	0.028	0.044
23-Feb-10	054	41	31	31	0	86	0	60	60	250	0.035	0.069	0.029	0.067	0.120	0.288
24-Feb-10	055	2	3	3	0	1	0	8	0	13	0.028	0.046	0.035	0.057	0.037	0.062
25-Feb-10	056	26	32	27	0	24	0	30	0	30	0.033	0.076	0.028	0.074	0.030	0.072
26-Feb-10	057	2	0	17	0	0	0	0	6	49	0.029	0.056	0.020	0.104	0.041	0.084



Date	Day of Year (DOY)	Amb.-fixing rate (%)			No. of position jump						RMSE (m)					
		No model	Final GIM	THIM	No model		Final GIM		THIM		No model		Final GIM		THIM	
					Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
27-Feb-10	058	1	4	6	0	0	0	0	0	6	0.039	0.045	0.025	0.051	0.029	0.065
28-Feb-10	059	42	12	2	0	7	0	7	0	8	0.027	0.054	0.025	0.056	0.032	0.058
1-Mar-10	060	19	20	35	0	12	3	39	0	19	0.027	0.049	0.030	0.070	0.026	0.045
2-Mar-10	061	8	34	34	2	10	0	7	0	7	0.034	0.060	0.023	0.051	0.026	0.046
3-Mar-10	062	9	7	41	0	0	0	0	0	8	0.025	0.041	0.027	0.041	0.028	0.042

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ: นายธีรทัต เจริญกาศัญญา (ชื่อเดิม นายธีรทัต เจริญกาศัญญา)

วันเดือนปีเกิด: 1 กันยายน พ.ศ. 2516

#### คุณวุฒิทางการศึกษา:

พ.ศ. 2540 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2547 นิติศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยรามคำแหง

พ.ศ. 2550 Master of Technology (Remote Sensing & GIS)

National Institute of Technology, Warangal, India

#### ประสบการณ์การทำงาน:

พ.ศ. 2540 ถึงปัจจุบัน วิศวกรรังวัดชำนาญการ กรมที่ดิน

พ.ศ. 2550 – 2551 อาจารย์พิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ม. เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2555 อาจารย์พิเศษโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ. นครนายก

#### ผลงานทางวิชาการ:

##### ผลงานตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ:

Charoenkalunyuta, T., C. Satirapod, H.-K. Lee and Y.-S. Choi . Performance of Network-Based RTK GPS in Low-Latitude Region: A Case Study in Thailand. Engineering Journal 16 (2012): 9

Charoenkalunyuta, T., C. Satirapod, Y. Li and C. Rizos . An investigation of the effect of Ionospheric models on the performance of Network-based RTK GPS in Thailand. International Journal of Geoinformatics 8 (2012): 6

ธีรทัต เจริญกาศัญญา และ เฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2553) “การประเมินค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบแรกในประเทศไทย: ผลการศึกษาเบื้องต้น” วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 พฤศจิกายน 2552 - มกราคม 2553 น.45-56

##### ผลงานประชุมทางวิชาการ:

Charoenkalunyuta, T., C. Satirapod, Y. Li and C. Rizos (2012). “An Investigation of the effect of Ionospheric models on performance of Network-Based RTK GPS in Thailand”. The 33rd Asian Conference On Remote Sensing, Thailand, 26-30 November 2012.