

การปรับปรุงแบบจำลองสโตนคาสติคสำหรับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวี
อาร์เอส



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Improving on the stochastic model for Virtual Reference Station (VRS) Network-based
GNSS Surveying



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

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงแบบจำลองสโตนคาสติคสำหรับการรังวัด
โดย	ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส
สาขาวิชา	นายธเนศ จรุงจินันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมสำรวจ
	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ ทินนโชติ)	
.....	กรรมการ
(ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปณิธาน ศรีนวลดี)	

ชเนศ จรุงจินันท์ : การปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกสำหรับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส. (Improving on the stochastic model for Virtual Reference Station (VRS) Network-based GNSS Surveying) อ.ที่ปรึกษา
 หลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

หลักการของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสคือการนำข้อมูลการรับสัญญาณโดยสถานีฐานหลายสถานีมาประมวลผลร่วมกันเพื่อคำนวณค่าแก้ที่อยู่ในรูปแบบของสถานีฐานวีอาร์เอส การพัฒนาวิธีการแบบใหม่ได้มุ่งเน้นไปที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการลดค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางเพื่อที่จะได้ค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอสที่มีความถูกต้องสูง อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะลดค่าคลาดเคลื่อนประเภทนี้ได้โดยสมบูรณ์เป็นผลให้ยังคงมีค่าคลาดเคลื่อนหลงเหลืออยู่ในค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอส งานวิจัยนี้ได้เสนอการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก 2 แนวทางและได้ประเมินประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองสโตคาสติกที่ใช้ในมาตรฐานทั่วไป แนวทางที่หนึ่ง แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE เป็นวิธีการทางสถิติที่มีการประมาณค่าสมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมได้อย่างครบถ้วน อย่างไรก็ตามจะต้องใช้ epoch จำนวนมากพอในการหาค่าตอบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE เพิ่มความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบประมาณ 5% (0.7 มิลลิเมตร) และทางตั้ง 6% (0.9 มิลลิเมตร) ค่า F-ratio ที่มากกว่าแสดงถึงความน่าเชื่อถือของเลขปริศนาที่เพิ่มขึ้น แนวทางที่สอง คือการใช้แบบจำลองสโตคาสติก RIU ซึ่งเป็นการให้นำหนักค่าสังเกตตามค่าเศษเหลือของการประมาณค่าภายในช่วง วิธีนี้ใช้ข้อมูล 1 epoch ในการคำนวณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสโตคาสติก RIU เพิ่มความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบประมาณ 4% (0.7 มิลลิเมตร) และทางตั้ง 1% (0.4 มิลลิเมตร) และสามารถเพิ่มอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนาจาก 86% เป็น 95%

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
 ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5871412721 : MAJOR GEOMATIC ENGINEERING

KEYWORD: Stochastic model, Network based RTK

Thanate Jongrujanan : Improving on the stochastic model for Virtual Reference Station (VRS) Network-based GNSS Surveying. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D.

The key concept of the virtual reference station (VRS) GNSS network-based technique is to use the observables of multiple reference stations to generate the network corrections in the form of a VRS. The advanced functional models have been adopted for mitigating distance-dependent errors in order to generate high-quality VRS. However, it is difficult to completely model these errors, the unmodelled errors remain in the VRS. The two improved stochastic models were proposed to deal with these errors and their results were compared to those of the standard stochastic models. In the first model, the statistical method, MINQUE has been applied because of its fully populated variance-covariance matrix (VCV) estimation, however, it requires adequate epoch length in a solution. The results indicated that the MINQUE enhanced the positioning accuracy by 5% (0.7 mm) and 6% (0.9 mm) for horizontal and vertical component and the larger F-ratio values means that the more reliable ambiguities were obtained. In the second model, the residual interpolation uncertainty (RIU) was used as the weighting schemes because it enables epoch-by-epoch VCV calculation. The results showed that the RIU produced better positioning accuracy by 4% (0.7 mm) and 1% (0.4 mm) for horizontal and vertical component. In addition, the ambiguity resolution successful rate increased from 86% to 95%

Field of Study: Geomatic Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่แนะนำให้คำปรึกษาให้แนวทางที่เป็นประโยชน์ในงานศึกษาวิจัย รวมทั้งสนับสนุนทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าเป็นอย่างดี

ขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ รศ.ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชนินทร์ ทินนโชติ อ.ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญา ตระ.ปณิธาน ศรีนวลดี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนเสียสละเวลาในการพิจารณาความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์และเหมาะสมด้านเนื้อหามากยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณหน่วยงาน กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง และ IGS ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจีเอ็นเอสเอส

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ อ.สุรศักดิ์ เขียววิวัฒน์ และอ.สมบัติ ทรัพย์สวนแดง ที่สนับสนุนการศึกษาต่อครั้งนี้

ธเนศ จงรุจินันท์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการทำงานของเครื่องรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐาน.....	6
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประมวลผลด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส.....	7
2.2.1 ขั้นตอนการหาเลขปริศนาของการคำนวณเส้นฐานระหว่างสถานีฐาน.....	8
2.2.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางระหว่างสถานีฐาน ...	10
2.2.3 ขั้นตอนการหาค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางด้วยการประมาณภายในช่วง.....	10
2.2.4 ขั้นตอนการสร้างสถานีฐานวีอาร์เอสและส่งค่าแก้.....	12
2.2.5 ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งสถานีผู้ใช้.....	13

2.3	แบบจำลองสโตนคาสติคของการประมวลผลฝั่งสถานีผู้ใช้	15
2.3.1	แบบจำลองสโตนคาสติคที่ให้น้ำหนักเท่ากัน	18
2.3.2	แบบจำลองที่ขึ้นกับมมยกดาวเทียม	20
2.3.3	แบบจำลองสโตนคาสติค MINQUE	24
2.3.4	แบบจำลองสโตนคาสติค RIU	29
2.4	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโปรแกรมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองสโตนคาสติค ..	35
2.5	เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตนคาสติค	36
2.5.1	ความน่าเชื่อถือในการหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็ม	36
2.5.2	ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของสถานีผู้ใช้	38
บทที่ 3	การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตนคาสติค MINQUE	39
3.1	ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอส	39
3.2	ขั้นตอนการหาความกว้างวินโดว์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองสโตนคาสติค MINQUE	41
3.3	ขั้นตอนการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์	46
3.4	ผลการทดสอบการประมวลผลแบบจลน์	48
บทที่ 4	การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตนคาสติค RIU	53
4.1	ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอส	53
4.2	ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายเพื่อคำนวณค่าดัชนี RIU	54
4.3	ขั้นตอนการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์	55
4.4	ผลการทดสอบการประมวลผลแบบจลน์	57
4.4.1	ผลลัพธ์ของอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนาจำนวนเต็ม	57
4.4.2	ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์	59
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	64
5.1	บทสรุป	64
5.2	ข้อเสนอแนะ	67

ภาคผนวก ก การรังวัดจีเอ็นเอสเอสแบบสัมพัทธ์และค่าคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ.....	70
บรรณานุกรม.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	92



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ตารางเปรียบเทียบการปรับปรุงสมาชิกภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม.....	25
ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าสถิติแบบทั้งหมดเมื่อใช้แบบจำลองสโตคาสติกที่ต่างกัน	51
ตารางที่ 4-1 ตารางเปรียบเทียบอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนาเมื่อใช้แบบจำลองสโตคาสติก RIU กับแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐาน.....	58
ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงค่าสถิติโดยรวมของการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐานของการใช้ แบบจำลองสโตคาสติกที่ต่างกัน.....	62
ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะระหว่างแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE และ RIU...	65

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1	ผังแสดงขั้นตอนของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส	8
รูปที่ 2-2	การหาเลขปริศนาของการคำนวณเส้นฐานระหว่างสถานีฐาน	9
รูปที่ 2-3	รูปแสดงการ Interpolation ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง	11
รูปที่ 2-4	การสร้างสถานีฐานวีอาร์เอส	13
รูปที่ 2-5	การประมวลผลเส้นฐานผังสถานีผู้ใช้	14
รูปที่ 2-6	กราฟิกแสดงตัวอย่างเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าการวัดเฟสจีพีเอส	16
รูปที่ 2-7	รูปแสดงนิยามของ Spatial correlation และ Temporal correlation.....	18
รูปที่ 2-8	กราฟิกแสดงการหาค่าความแปรปรวนของค่าแก้แต่ละคู่ดาวเทียมและความถี่	33
รูปที่ 2-9	รูปแสดงการใช้เทคนิคมูฟวิงวินโดว์ในการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์	35
รูปที่ 2-10	รูปแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็ม	37
รูปที่ 3-1	รูปแสดงสถานีฐานที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE.....	40
รูปที่ 3-2	ผังแสดงขั้นตอนการประมวลผลแบบ batch ร่วมกับแบบจำลอง MINQUE	42
รูปที่ 3-3	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ทางราบของการประมวลผลแบบ batch ร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามแบบที่มีความกว้างวินโดว์ตั้งแต่ 13-20 epoch	43
รูปที่ 3-4	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ทางตั้งของการประมวลผลแบบ batch ร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามแบบที่มีความกว้างวินโดว์ตั้งแต่ 13-20 epoch	44
รูปที่ 3-5	กราฟแสดงค่า F-Ratio แยกตามความกว้างของวินโดว์ตั้งแต่ 13-20 epoch.....	45
รูปที่ 3-6	มูฟวิงวินโดว์ของเทคนิคค่าต่างที่สองและแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE	46
รูปที่ 3-7	ผังแสดงขั้นตอนการประมวลผลแบบจลน์ผลร่วมกับแบบจำลอง MINQUE	47
รูปที่ 3-8	กราฟเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง MINQUE กับแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน (บน: ทางราบ และ ล่าง: ทางตั้ง).....	49

รูปที่ 3-9 กราฟเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง MINQUE กับแบบจำลองที่
 ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม (บน: ทางราบ และ ล่าง: ทางตั้ง)..... 50

รูปที่ 4-1 แผนที่แสดงสถานีฐานที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองสโตคาสติก RIU 54

รูปที่ 4-2 เวกเตอร์เส้นฐานของการคำนวณดัชนี RIU..... 55

รูปที่ 4-3 มูฟวี่วงวินโดว์ที่ใช้ร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติก RIU 56

รูปที่ 4-4 ผังแสดงขั้นตอนการประมวลผลแบบจลน์ร่วมกับแบบจำลอง RIU..... 57

รูปที่ 4-5 กราฟแสดงการกระจายตัวของจำนวน Epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์การหาเลขปริศนา..... 58

รูปที่ 4-6 กราฟเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง RIU กับแบบจำลองที่ให้
 น้ำหนักเท่ากัน บน: ทางราบ และ ล่าง: ทางตั้ง) 60

รูปที่ 4-7 กราฟเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง RIU กับแบบจำลองที่
 ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม บน: ทางราบ และ ล่าง: ทางตั้ง)..... 61

รูปที่ 5-1 การใช้มูฟวี่วงวินโดว์กับการประมวลแบบ Single epoch positioning และ RIU..... 68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสเป็นเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบสัมพัทธ์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับงานรังวัดเส้นฐานที่มีความยาวปานกลาง (ประมาณ 20 -100 กิโลเมตร) ซึ่งต้องการความถูกต้องของค่าพิกัดในระดับเซนติเมตรเนื่องจากการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยสถานีฐานหนึ่งสถานีไม่สามารถทำความถูกต้องในระดับนี้ ทั้งนี้สาเหตุหลักเป็นผลเนื่องมาจากค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรที่มีขนาดเพิ่มขึ้นแปรผันตามกับระยะเส้นฐานที่มากขึ้น (Distance-dependent errors) โดยเฉพาะในกรณีของประเทศไทยถือว่าค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ส่งผลกระทบต่อกรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสมากกว่าเมื่อเทียบกับภูมิภาคอื่น เนื่องจากมีที่ตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic equatorial regions) ที่มีความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงที่สุด (Charoenkalunyuta et al., 2012)

หลักการของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสคือการนำข้อมูลจีเอ็นเอสเอสซึ่งมีการรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องโดยสถานีฐานตั้งแต่ 3 สถานีขึ้นไปที่ตั้งอยู่บริเวณโดยรอบตำแหน่งสถานีผู้ใช้ (Rover) มาประมวลผลร่วมกันที่ฝั่งแม่ข่ายเพื่อคำนวณค่าแก้ของค่าคลาดเคลื่อนที่มีขนาดแปรผันตามกับระยะเส้นฐาน ณ ตำแหน่งใกล้กับสถานีผู้ใช้ด้วยวิธีการประมาณภายในช่วง (Interpolation method) ค่าแก้ดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นในรูปแบบของสถานีฐานวีอาร์เอส (Virtual reference station : VRS) และส่งไปยังเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสของผู้รังวัดเพื่อนำไปประมวลผลเส้นฐานร่วมกับข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสกำลังรับสัญญาณอยู่ในขณะเวลาเดียวกัน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่ได้มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Functional model) ของการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายในการลดค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางเพื่อที่จะเพิ่มความถูกต้องของค่าการวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสของสถานีฐานวีอาร์เอส อันได้แก่ ขั้นตอนการหาค่าเลขปริศนาเส้นฐานระหว่างสถานีฐาน (Lim et al., 2008; Odijk and Teunissen, 2010), ขั้นตอนการประมาณค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศ (Zhang et al., 2009) และขั้นตอนการประมาณค่าคลาดเคลื่อนภายในช่วง (Cui et al., 2018; Mohammed Al-Shaery et al., 2010) ในขณะที่

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประมวลผลที่ฝั่งสถานีผู้ใช้เป็นเพียงการปรับแก้สมการค่าต่างครั้งที่สองระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอสกับค่าการวัดเฟสคลื่นส่งของสถานีผู้ใช้ด้วยการปรับแก้ลิสต์สแควร์ อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ฝั่งแม่ข่ายที่ได้กล่าวมาข้างต้นไม่สามารถที่จะลดค่าคลาดเคลื่อนแบบมีระบบ (Systematic errors) ได้โดยสมบูรณ์โดยเฉพาะค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ของธรรมชาติเป็นผลให้ยังคงมีค่าคลาดเคลื่อนหลงเหลืออยู่ในค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอสซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของค่าเศษเหลือ (Residuals) แนวทางเลือกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ที่จะลดค่าคลาดเคลื่อนที่ยังคงแฝงอยู่ในค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอสคือการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก (Stochastic model) หรือการหาค่าสมาชิกของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Variance-covariance matrix: VCV) ของการปรับแก้ลิสต์สแควร์ให้มีความถูกต้องมากขึ้นกว่าแบบจำลองสโตคาสติกอย่างง่าย การนำแบบจำลองสโตคาสติกอย่างง่ายมาใช้ในการประมวลผลดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสโดยไม่ได้มีการปรับปรุงนั้นมีความไม่สมเหตุผล เพราะในความเป็นจริงนั้นสถานีฐานวีอาร์เอสไม่ได้เป็นสถานีฐานที่เป็นการรับสัญญาณจริง การให้ค่าน้ำหนักของค่าสังเกตจะต้องใช้ตัวบ่งชี้ที่สามารถสะท้อนถึงความไม่แน่นอนของการคำนวณโครงข่ายที่มีหลายชั้นตอน ไม่ว่าจะเป็นชั้นตอนการหาเลขปริศนาระหว่างสถานีฐาน, การประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ และการ Interpolation ซึ่งความไม่แน่นอนจะยิ่งเพิ่มขึ้นในกรณีที่รังวัดดาวเทียมขณะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศ

เนื้อหาของงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกสำหรับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นเพื่อส่งผลถึงการเพิ่มอัตราความสำเร็จในกระบวนการหาเลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็ม (Ambiguity resolution) และความถูกต้องของการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐาน (Baseline components) โดยจะดำเนินการด้วย 2 แนวทางได้แก่แนวทางที่หนึ่งคือ การใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการประมาณค่าสมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมโดยใช้ค่าเศษเหลือของการปรับแก้ลิสต์สแควร์จุดเด่นของแบบจำลองนี้คือความสามารถที่จะคำนวณสมาชิกของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมได้อย่างครบถ้วน (fully populated variance-covariance matrix) อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดที่จะต้องใช้อัฒนุรังวัด epoch ใน 1 solution จำนวนมากพอกำหนดค่าการวัดของดาวเทียมที่เป็นชุดเดียวกันในการหาค่าตอบ ถึงแม้ว่าจะเคยมีงานทดสอบที่นำวิธี MINQUE ไปใช้กับการสร้างแบบจำลองสโตคาสติกสำหรับการรังวัดจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส แต่ก็ยังเป็นเพียงการทดสอบกับการรังวัดแบบสถิติซึ่งใช้อัฒนุรังวัด epoch ใน 1 solution จำนวนมากและข้อมูลทดสอบที่ใช้เป็นข้อมูล

เฟสคลื่นส่งแบบความถี่เดียว (L1) ซึ่งไม่สะท้อนถึงความสำคัญของค่าความแปรปรวนร่วมความถี่ของเฟสคลื่นส่ง (Musa et al., 2003) ดังนั้นการนำวิธี MINQUE มาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลแบบจำลองของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสยังจำเป็นที่จะต้องการทดสอบเพิ่มเติม และแนวทางที่สองคือ การใช้แบบจำลองสโตคาสติก RIU ที่ให้น้ำหนักตามค่าเศษเหลือของการประมาณค่าภายในช่วง (Residual interpolation uncertainty) ของการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายมาช่วยในการปรับปรุงค่าความแปรปรวนของค่าการวัดดาวเทียมที่เป็นสมาชิกแนวทแยงของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมให้มีความถูกต้องมากขึ้นโดยวิธีนี้ไม่มีข้อจำกัดที่จะต้องใช้ข้อมูลรังวัดที่มี epoch จำนวนมากในการคำนวณทำให้มีความเหมาะสมกับกรณีของการรังวัดแบบจลน์ในสภาพภูมิประเทศซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการบดบังสัญญาณดาวเทียมขณะสถานีผู้ใช้เคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น อาคาร, สะพาน ทำให้ต้องคำนวณเลขปริศนาใหม่ (Re-initialization) อยู่บ่อยครั้ง ถึงแม้ว่าจากงานศึกษาของ Prochniewicz et al. (2016) ได้ใช้ดัชนีติดตามคุณภาพโครงข่ายที่มาใช้ปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก แต่ดัชนีดังกล่าวก็มีความซับซ้อนในการคำนวณกว่าดัชนี RIU และพื้นที่ทดสอบอยู่ในบริเวณละติจูดกลาง ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศเหมือนประเทศไทยซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติม ในงานศึกษานี้จะประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตคาสติกที่ได้ปรับปรุงขึ้นโดยใช้การเปรียบเทียบ (Benchmark) ในแง่ของความน่าเชื่อถือของการหาค่าเลขปริศนา และความถูกต้องของค่าพิกัดผลลัพธ์กับแบบจำลองที่ให้น้ำหนักค่าการวัดดาวเทียมแต่ละดวงเท่ากันและแบบจำลองที่ให้น้ำหนักตามค่ามุลยดาวเทียมซึ่งเป็นแบบจำลองสโตคาสติกที่ใช้เป็นมาตรฐานในซอฟต์แวร์ประมวลผลจีเอ็นเอสเอสทั่วไป (Standard stochastic model)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาเทคนิคการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกที่สามารถคำนวณค่าน้ำหนักของค่าสังเกตในการปรับแก้ลิสต์สแควร์ที่มีความสอดคล้องกับคุณภาพของค่าแก้โครงข่าย ซึ่งโดยทางทฤษฎีแล้วเมื่อแบบจำลองสโตคาสติกได้รับการปรับปรุงจะส่งผลทำให้การคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสในขณะที่เกิดความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศมีค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของการหาเลขปริศนาที่สูงกว่าในกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐานในซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) แนวทางของงานวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพของงานรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสแก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเพื่อทำหน้าที่หรืองานวิศวกรรมในประเทศไทย ในกรณีของการรังวัดแบบจลน์ในขณะเวลาที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศ หรือการรังวัดแบบจลน์ในบริเวณพื้นที่ซึ่งมีลักษณะเป็นเมืองหนาแน่น

2) อัลกอริทึมของการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสของงานวิจัยสามารถนำไปเป็นส่วนหนึ่งของการหาตำแหน่งค่าพิกัดในการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องอุตสาหกรรมใหม่ซึ่งภาครัฐกำลังให้การสนับสนุนให้พัฒนาด้วยองค์ความรู้ของประเทศไทยเอง เช่น การทำแผนที่ด้วยโดรน, การเกษตรความแม่นยำสูง รวมไปถึงการนำไปต่อยอดเป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลจีเอ็นเอสเอสสำหรับการวิจัยของหน่วยงานด้านการศึกษาในอนาคต

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ข้อมูลดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสของสถานีฐานที่นำมาใช้ในงานศึกษาอยู่ในรูปแบบไฟล์ RINEX ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์จากกรมที่ดิน, กรมโยธาธิการและผังเมือง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากหน่วยงาน IGS

2) การประมวลผลจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสในการทำงานจริงจะเป็นการคำนวณค่าแก้ด้วยโปรแกรมที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายของศูนย์ควบคุม และส่งค่าแก้ผ่านระบบสื่อสารไปยังเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสในรูปแบบข้อมูล steaming เพื่อประมวลผลเส้นฐานหาค่าพิกัดผลลัพธ์แบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องระบบสื่อสารขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นได้จนทำให้การประมวลผลมีความไม่สมบูรณ์และเป็นการง่ายที่จะควบคุมสภาพแวดล้อมระหว่างการทดสอบ ในงานศึกษานี้จึงได้ออกแบบการทดสอบให้ประมวลผลอัลกอริทึมของแบบจำลองสโตคาสติกโดยวิธีการจำลองการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสมาไว้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย โดยการนำข้อมูลดาวเทียมของสถานีฐานที่เคยรับสัญญาณดาวเทียมไว้แล้วในอดีตและได้มีการ resampling ข้อมูลจับเก็บไว้ใช้กับการประมวลผลแบบภายหลังที่อัตราการสุ่มเก็บขนาดต่างๆ ในรูปแบบไฟล์ RINEX มาจำลองเป็นโครงข่ายสถานีฐานเพื่อสร้างสถานีฐานวีอาร์เอสด้วยโปรแกรมประมวลผลจีเอ็นเอสเอส Trimble Total Control (TTC) ในขณะที่การประมวลผลเส้นฐานแบบจลน์ระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอสกับสถานีผู้ใช้ ร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติกที่ได้พัฒนาขึ้นจาก 2 แบบจำลองได้แก่ แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE และ แบบจำลองสโตคาสติก RIU ได้ถูกประมวลผลโดยโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นบนซอฟต์แวร์ MATLAB

3) การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตคาสติกที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นจะใช้วิธีการเปรียบเทียบอัตราความสำเร็จในกระบวนการหาเลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็ม และความถูกต้องของการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐาน (Baseline components) กับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสโตคาสติกที่เป็นมาตรฐานในซอฟต์แวร์ประมวลผลจีเอ็นเอสเอสทั่วไปจำนวน 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน และ แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของ การรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐาน

การรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐาน (Network-based RTK) เป็นวิธีการรังวัดดาวเทียมแบบสัมพัทธ์ด้วยการใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งและซูโดเรนจ์ที่รับสัญญาณอย่างต่อเนื่อง โดยสถานีฐาน (Continuously Operating Reference Station: CORS) ตั้งแต่ 3 สถานีขึ้นไปซึ่งตั้งอยู่โดยรอบตำแหน่งสถานีผู้ใช้ (Rover) มาประมวลผลรวมกันที่ศูนย์ควบคุม (Control center) ซึ่งโปรแกรมประมวลผลแบบโครงข่ายของศูนย์ควบคุมจะทำหน้าที่รับคำสั่งขอใช้บริการจากเครื่องรับของผู้รังวัด, รวบรวมข้อมูลค่าการวัดดาวเทียมจากสถานีฐาน รวมถึงข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความถูกต้องสูง (Precise Orbit), แบบจำลองชั้นบรรยากาศ (Atmospheric model) จากศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลจีเอ็นเอสเอส (GNSS analysis center) และคำนวณค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง ณ ตำแหน่งสถานีผู้ใช้ได้แก่ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ และค่าคลาดเคลื่อนที่เนื่องจากวงโคจรด้วยวิธีการประมาณในช่วง (Interpolation Method) และส่งค่าแก้ไปยังเครื่องรับของผู้รังวัดผ่านระบบสื่อสาร เช่น สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่, คลื่นวิทยุ หรืออินเทอร์เน็ต ซึ่งค่าแก้ดังกล่าวนำไปใช้หาค่าพิคัดของสถานีผู้ใช้ในการประมวลผลฝั่งสถานีผู้ใช้ต่อไป จากหลักการทำงานข้างต้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้การรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานสามารถมีพื้นที่ให้บริการ (Coverage area) ที่ให้ค่าพิคัดความถูกต้องระดับเซนติเมตรได้ครอบคลุมพื้นที่โครงข่าย ในขณะที่การรังวัดจีเอ็นเอสเอสแบบหนึ่งสถานีฐานถูกจำกัดที่ประมาณ 10-15 กิโลเมตรรอบสถานีฐานเท่านั้น (Feng and Wang, 2008)

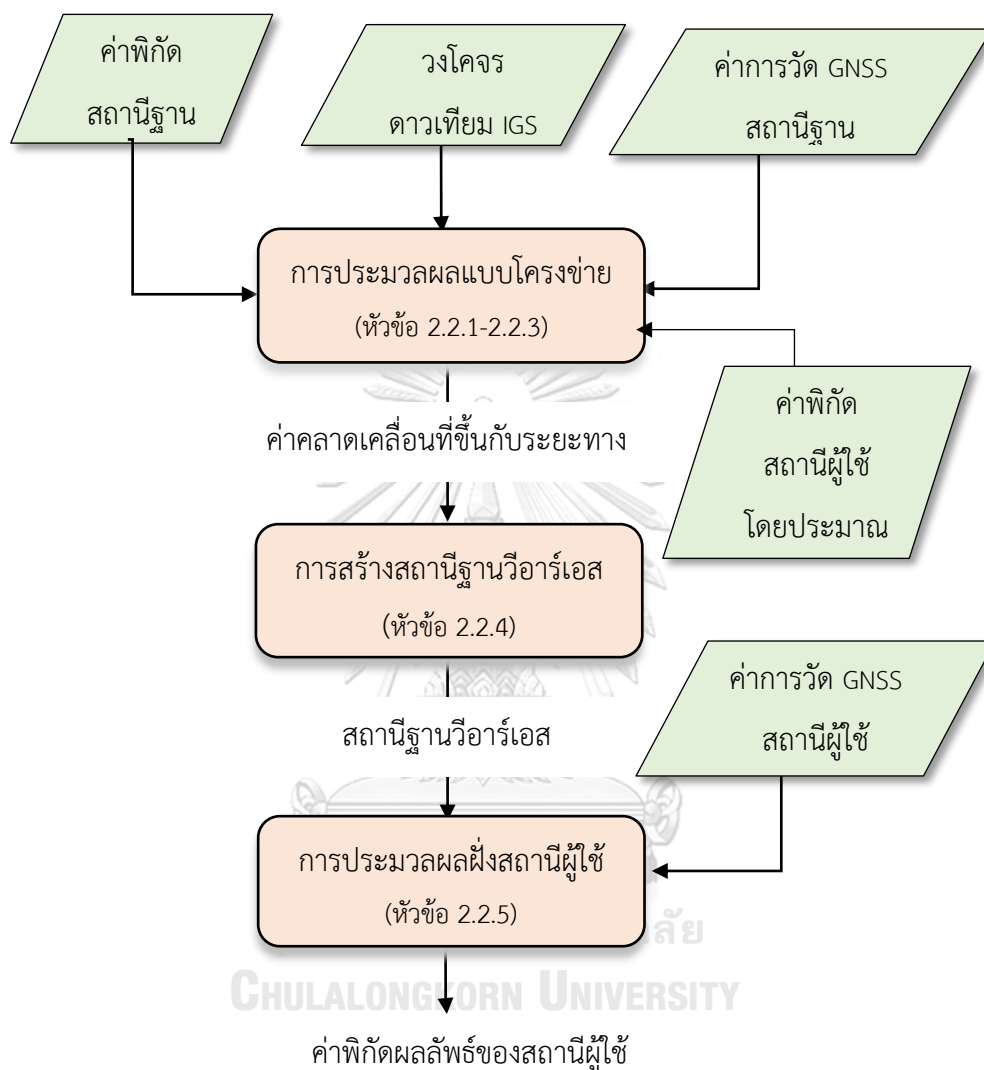
สำหรับในประเทศไทยซึ่งกำลังอยู่ในช่วงกำลังดำเนินการขยายโครงข่ายสถานีฐานให้ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศและได้นำโครงข่ายสถานีฐานไปใช้กับการพัฒนาประเทศในหลายด้านเช่น งานออกโฉนดที่ดิน, งานแผนที่สำหรับสาธารณสุข (Chanutboonsin et al., 2016) ระบบโครงข่ายสถานีฐานที่ให้บริการแล้วในปัจจุบันได้แก่ กรมที่ดิน, กรมโยธาธิการและผังเมือง, กรมแผนที่ทหาร เป็นต้น การรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานยังมีการแยกย่อยวิธีลงไปอีกตามเทคนิคเฉพาะตัวของแต่ละผู้พัฒนาระบบโครงข่ายสถานีฐาน ซึ่งเทคนิคการส่งค่าแก้ที่โปรแกรมประมวลผลโครงข่ายในปัจจุบันของประเทศไทยสามารถให้บริการได้แก่ FKP

(Flächen-Korrektur-Parameter in German), MAC (Master Auxiliary network Correction) และ VRS (Virtual Reference Station) โดยเทคนิควีอาร์เอสเป็นเทคนิคที่ทุกโครงข่ายสถานีฐานในประเทศไทยสามารถให้บริการค่าแก้ได้ ข้อแตกต่างของแต่ละวิธีคือลักษณะของการส่งค่าแก้ที่ส่งไปยังเครื่องรับของผู้ใช้ งานศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ผ่านมา (Berber and Arslan, 2013) ไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าวิธีใดที่มีข้อได้เปรียบหรือเสียเปรียบกว่าวิธีอื่นได้ในทุกกรณี ทั้งนี้การเลือกเทคนิคการส่งค่าแก้จึงขึ้นกับผู้ดูแลระบบว่าจะใช้เหตุผลใดเป็นเกณฑ์ตัดสินใจ อย่างไรก็ตามโปรแกรมประมวลผลโครงข่ายในประเทศไทยปัจจุบันสามารถให้บริการได้มากกว่าหนึ่งวิธีในเวลาเดียวกัน ในอนาคตหน่วยงานดูแลโครงข่ายสถานีฐานในประเทศไทยมีความมุ่งหมายที่จะบูรณาการข้อมูลจีเอ็นเอสเอสและใช้โครงข่ายสถานีฐานร่วมกันเพื่อไม่ให้เกิดการใช้ทรัพยากรโครงสร้างพื้นฐานของประเทศไปอย่างซ้ำซ้อนตามแนวคิดของศูนย์ข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแห่งชาติ (National GNSS data center) และคาดว่าจะรองรับการให้บริการค่าแก้ด้วยเทคนิควีอาร์เอสเป็นหลัก (รายละเอียดของโครงข่ายสถานีฐานในประเทศไทยในขณะดำเนินการวิจัยสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ภาคผนวกข้อ 5)

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประมวลผลด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส

วีอาร์เอสเป็นเทคนิคการประมาณค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะเส้นฐานด้วยโครงข่ายสถานีฐานและส่งค่าแก้ไปยังสถานีผู้ใช้ในรูปแบบของสถานีฐานวีอาร์เอส (Virtual reference stations) สถานีฐานวีอาร์เอสคือสถานีฐานที่ไม่ได้มีอยู่จริงแต่ถูกจำลองขึ้นให้เสมือนว่าเป็นสถานีฐานหนึ่งสถานีที่รับสัญญาณข้อมูลการวัดค่าดาวเทียม ณ ตำแหน่งที่ใกล้กับสถานีผู้ใช้ เพื่อที่จะทำการคำนวณในขั้นต่อไปที่ฝั่งเครื่องรับเป็นการประมวลผลเส้นฐานที่มีระยะสั้นจนสามารถใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing) ลดค่าคลาดเคลื่อนที่แปรผันตามระยะเส้นฐานลงได้เป็นผลทำให้การคำนวณองค์ประกอบเส้นฐานมีความถูกต้อง (Vollath et al., 2000) การคำนวณค่าแก้โดยส่วนใหญ่ของเทคนิควีอาร์เอสทั้งหมดจะถูกดำเนินการโดยโปรแกรมคำนวณโครงข่ายที่ฝั่งแม่ข่าย การบริหารภาระงาน (Workload) ของการคำนวณจึงมีการให้น้ำหนักไปที่คอมพิวเตอร์ฝั่งแม่ข่ายมากกว่า ซึ่งจะยิ่งเห็นได้ชัดเจนในกรณีที่ผู้รับบริการค่าแก้จำนวนมากในเวลาเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามค่าแก้จะมีขนาดข้อมูลไม่มากจึงทำให้เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสของสถานีผู้ใช้อาจจะไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการคำนวณมาก ประเด็นนี้ทำให้เทคนิควีอาร์เอสเป็นที่นิยมมากที่สุดหลายประเทศ รวมถึงประเทศไทย กรมที่ดินซึ่งเป็นหน่วยงานที่ดูแลโครงข่ายที่มีจำนวนสถานีฐานมากที่สุดในประเทศไทยได้สนับสนุนให้ช่างรังวัดที่ดินใช้เทคนิควีอาร์เอสในการรังวัดออกโฉนด โดยที่

เทคนิคการรังวัดวีอาร์เอสมีลำดับของขั้นตอนเป็นดังรูปที่ 2-1 และมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

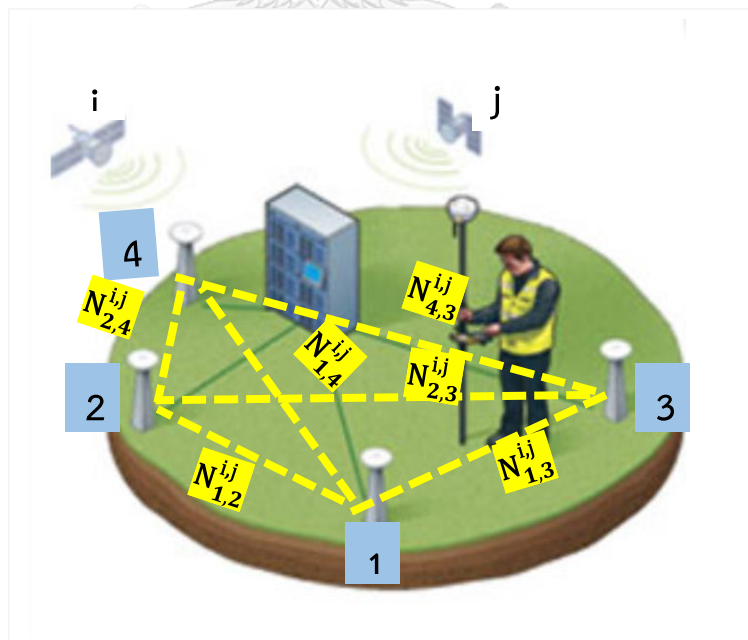


รูปที่ 2-1 ผังแสดงขั้นตอนของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส

2.2.1 ขั้นตอนการหาเลขปริศนาของการคำนวณเส้นฐานระหว่างสถานีฐาน

เพื่อที่ระบบของศูนย์ควบคุมจะสามารถคำนวณค่าแก้ที่ทำให้ค่าพิกัดผลลัพธ์ความถูกต้องในระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตรได้ในลักษณะการทำงานแบบโดยทันที (Real-time mode) การประมวลผลเส้นฐานระหว่างสถานีฐานจำเป็นที่จะต้องคำนวณค่าเลขปริศนาของเส้นฐานให้เป็นจำนวนเต็มที่มีความถูกต้องและคงรักษาความสำเร็จในกระบวนการหาค่าเลขปริศนาอยู่โดยตลอดแบบเรียลไทม์ (ความหมายของเลขปริศนาสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ภาคผนวกข้อ 1 และหัวข้อ 2.5.1)

รวมถึงประสิทธิภาพในการคำนวณเลขปริศนาใหม่อีกครั้ง (Re-initialization) ได้อย่างรวดเร็วทั้งในกรณีของดาวเทียมที่โคจรเข้ามาใหม่ หรือกรณีมีปัญหาดาวเทียมบางดวงเกิดคลื่นหลุด (Cycle slip) หรือมีข้อมูลขาดช่วง (Long data gap) โดยทั่วไปโครงข่ายสถานีฐานจะถูกออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานประมาณ 30 – 100 กิโลเมตร ซึ่งระยะเส้นฐานที่ค่อนข้างมากดังกล่าวทำให้ผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศมีมากจนหากใช้สมการค่าต่างที่สองในการคำนวณเลขปริศนามีความเป็นไปได้สูงว่าจะให้ค่าเลขปริศนาที่ผิดพลาดได้ ดังนั้นการที่จะหาค่าเลขปริศนากรณีนี้จำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิคที่แตกต่างออกไป เช่น วิธีการรวมคลื่นและชุดเรนจ์ (Phase and code range combination) ตัวอย่างเช่น เทคนิค Melbourne-Wübbena (Shengli et al., 2016) ที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงการนำข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความถูกต้องสูง (Precise Orbit), โมเดลชั้นบรรยากาศ (Atmospheric model) จากศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลจีเอ็นเอสเอสระดับนานาชาติ (GNSS analysis center) มาช่วยในการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรและเป็นค่าเริ่มต้นในการหาเลขปริศนา จากรูปที่ 2-2 แสดงตัวอย่างของค่าต่างที่สองของเลขปริศนาของเส้นฐานระหว่างสถานีฐาน 4 สถานีและระหว่างดาวเทียม 2 ดวง ซึ่งถูกดำเนินการประมวลผลโดยโปรแกรมคำนวณค่าแก้ซึ่งติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายของศูนย์ควบคุมโครงข่าย



รูปที่ 2-2 การหาเลขปริศนาของการคำนวณเส้นฐานระหว่างสถานีฐาน
(Elhattab, 2016)

2.2.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางระหว่างสถานีฐาน

เมื่อสามารถหาค่าต่างครั้งที่สองของเลขปริศนาของการประมวลผลเส้นฐานระหว่างเส้นฐานได้ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณค่าเศษเหลือ (Double differenced residuals of observables) ของเส้นฐานที่เชื่อมระหว่างสถานีฐานด้วยเทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง (รายละเอียดของสมการค่าต่างครั้งที่สองสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก) โดยเพื่อความสะดวกในการคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์จะกำหนดให้สถานีฐานใดสถานีหนึ่งเป็นสถานีฐานอ้างอิงหลัก (Master station) ในการใช้เทคนิคการหาค่าต่าง จากรูปที่ 2-3 เป็นการแสดงเวกเตอร์ของค่าเศษเหลือของค่าต่างครั้งที่สองของค่าเฟสดาวเทียมระหว่างสถานีฐานหลักหมายเลขที่ 1 กับสถานีฐานหมายเลขที่เหลือ ($n = 2, 3, 4$) และคู่ดาวเทียม i, j ของแต่ละ epoch ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสูตรดังนี้

$$R_{m,q,r}^{ij} = \begin{bmatrix} R_{1,2,r}^{ij} \\ \vdots \\ R_{1,n,r}^{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,2,r}^{ij} - \rho_{1,2}^{ij} - \lambda_r N_{1,2,r}^{ij} \\ \vdots \\ \phi_{1,n,r}^{ij} - \rho_{1,n}^{ij} - \lambda_\phi N_{1,n,r}^{ij} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

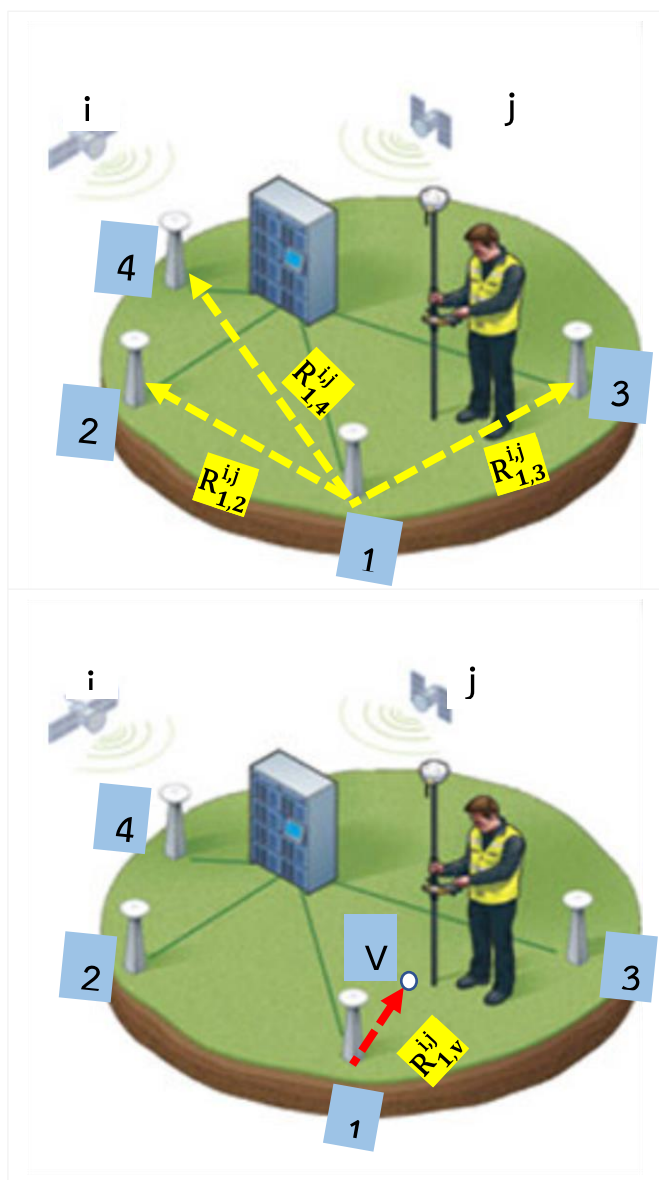
เมื่อ $\phi_{1,n,r}^{ij}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของเฟสคลื่นส่งระหว่างสถานีฐาน 1, n และดาวเทียม i, j
 $\rho_{1,n}^{ij}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของระยะทางเรขาคณิตระหว่างสถานีฐาน 1, n และดาวเทียม i, j
 λ_r คือความยาวคลื่นของเฟสคลื่นส่ง r (L1 และ L2)
 $N_{1,n,r}^{ij}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของเลขปริศนาระหว่างสถานีฐาน 1, n และดาวเทียม i, j
 $\rho_{1,n,r}^{ij}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของระยะทางระหว่างดาวเทียมกับสถานีฐาน n โดยคำนวณมาจากค่าพิกัดของสถานีฐานที่ทราบค่าและค่าพิกัดดาวเทียมคำนวณมาจากข้อมูลวงโคจร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.3 ขั้นตอนการหาค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางด้วยการประมาณภายในช่วง

เมื่อผู้รับวัดส่งคำสั่งร้องขอค่าแก้ไขที่ระบบบริการ เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสของผู้ใช้จะส่งค่าพิกัดโดยประมาณของสถานีผู้ใช้ไปยังศูนย์ควบคุมของระบบบริการด้วย ค่าพิกัดดังกล่าวจะถูกใช้เป็นตำแหน่งที่ระบบจะจำลองสถานีฐานวีอาร์เอสขึ้นมา ระบบจะทำการคำนวณหาค่าต่างที่สองของค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง ณ ตำแหน่งที่ทำการรับวัดโดยประมาณ จากรูปที่ 2-3 แสดงถึงตัวอย่างของการหาค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง เมื่อทราบค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางระหว่างสถานีฐาน ($R_{1,2}^{ij}, R_{1,3}^{ij}, R_{1,4}^{ij}$ จากขั้นตอนที่แล้ว เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางมีคุณสมบัติความสัมพันธ์เชิงตำแหน่ง (Spatial correlation) ถ้ากำหนดให้ จุด V เป็นตำแหน่งที่ระบบจะจำลองสถานีฐานวีอาร์เอส ซึ่งถ้าจุด V ตั้งอยู่ภายในพื้นที่ภายในโครงข่ายสถานีฐาน (อยู่ในรูปปิดของสถานีฐานหมายเลขที่ 1 ถึง 4) การประมาณค่าต่างของค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับ

ระยะทางสำหรับตำแหน่งจุด $V (R_{1,v}^{ij})$ จะสามารถนำวิธี Interpolation มาใช้ได้ ซึ่งวิธีการประมาณภายในช่วง (Interpolation) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการประมาณค่าๆ หนึ่ง ณ ตำแหน่งจุดสนใจ x ซึ่งไม่ได้มีการวัดค่าสังเกต $f(x)$ ไว้ โดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์รูปแบบใดรูปแบบหนึ่งในการคำนวณหาค่าประมาณ $g(x)$ จากจุดอ้างอิงกลุ่มหนึ่งที่มีการวัดค่าสังเกตไว้ และจุดอ้างอิงดังกล่าวมีการกระจายตัวของตำแหน่งอยู่โดยรอบจุดที่สนใจ โดยค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง $g(x) - f(x)$ จะต้องไม่มากจนมีผลกระทบต่อจุดประสงค์ของการนำค่าประมาณไปใช้



รูปที่ 2-3 รูปแสดงการ Interpolation ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง
(Elhattab, 2016)

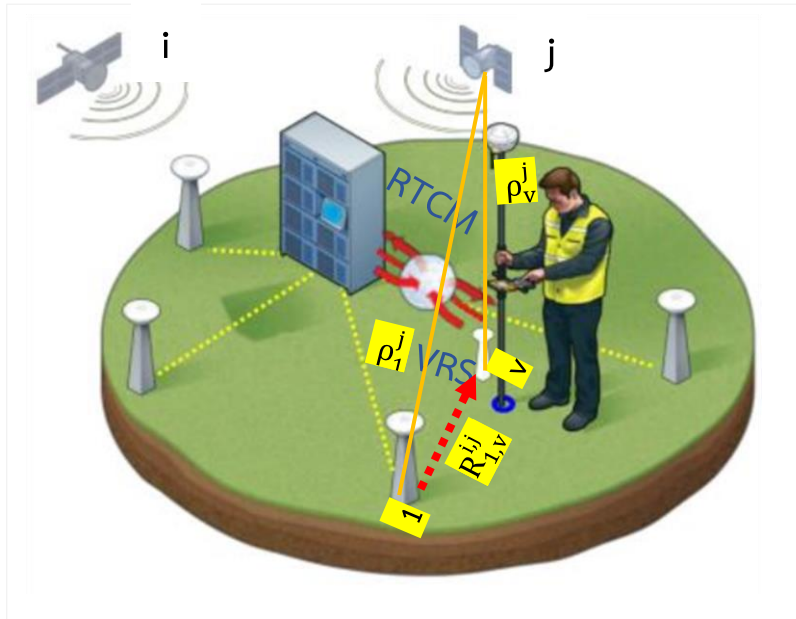
Mohammed Al-Shaery et al. (2011) ได้ทำการสรุปและเปรียบเทียบวิธีการ Interpolation ประเภทต่างๆ ได้แก่ Linear Interpolation Method (LIM), Low-order surface model (LSM), Least squares collocation (LSC) และ Ordinary kriging (OKR) กับการนำไปใช้กับเทคนิควีอาร์เอส โดยทดสอบกับข้อมูลโครงข่ายสถานีฐานซึ่งตั้งอยู่บริเวณแถบละติจูดกลาง (Mid-latitude regions) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นในแนวทางเดียวกันว่าการ Interpolation แต่ละวิธีให้ค่าความถูกต้องที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยยะ โดยที่วิธี OKR ที่เป็นวิธีแบบ Geostatistics interpolation ซึ่งมีความซับซ้อนของแบบจำลองมากกว่าแบบ Deterministic interpolation จะสามารถให้ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ดีกว่าก็ต่อเมื่อสถานีฐานมีจำนวนตั้งแต่ 10 สถานีขึ้นไป

2.2.4 ขั้นตอนการสร้างสถานีฐานวีอาร์เอสและส่งค่าแก้

เมื่อคำนวณค่าคลาดเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งสถานีฐานวีอาร์เอสด้วยวิธีการประมาณค่าภายในช่วงได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ตามแนวคิดของเทคนิควีอาร์เอส โปรแกรมประมวลผลแบบโครงข่ายจะนำค่าคลาดเคลื่อนประกอบกับข้อมูลการวัดจีเอ็นเอสเอสของสถานีฐานหนึ่งที่กำหนดเป็นสถานีฐานสร้างเป็นค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอส (Virtual observations) ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi_v^j = \phi_1^j + \rho_{1,v}^j + R_{1,v}^{ij} \quad (2-2)$$

จากรูปที่ 2-4 เริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่าแก้เชิงเรขาคณิต (Geometric displacement: $\rho_{1,v}^j$) ซึ่งก็คือค่าต่างครั้งที่หนึ่งระหว่างระยะทางจากสถานีฐานอ้างอิงถึงดาวเทียม j กับระยะทางระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอสถึงดาวเทียม j จากนั้นนำค่าแก้เชิงเรขาคณิตและค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อน $R_{1,v}^{ij}$ จากการ Interpolation ไปแปลงค่าการวัดเฟสคลื่นส่งดาวเทียม j ที่สถานีฐาน (ϕ_1^j) ให้เป็นค่าการวัดเฟสคลื่นส่งเสมือนของดาวเทียม j (ϕ_v^j) หลังจากนั้นระบบจะส่งข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอสไปยังสถานีผู้ใช้ผ่านทางระบบสื่อสารในลักษณะข้อมูล streaming ด้วยรูปแบบการส่งข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแบบเรียลไทม์ที่เป็นกลางไม่ขึ้นกับบริษัทผู้ผลิตเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส ได้แก่ RTCM (Radio Technical Commission for Maritime service) ซึ่งได้ให้รายละเอียดไว้ในภาคผนวกข้อ 4 หรืออาจจะเป็นรูปแบบการส่งข้อมูลที่ถูกรวบรวมขึ้นโดยผู้ผลิตเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเช่น Compact measurement record (CMR) ของเครื่องรับ Trimble หรือ Leica binary 2 (LB2) ของเครื่องรับ Leica (Heo et al., 2009)



รูปที่ 2-4 การสร้างสถานีฐานว็อาร์เอส
(Elhattab, 2016)

2.2.5 ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งสถานีผู้ใช้

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการประมวลผลเส้นฐานระหว่างสถานีฐานว็อาร์เอสบกัสถานีผู้ใช้ (Rover-side processing) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมวลผลเส้นฐานที่นิยมใช้เป็นสมการค่าสังเกตในการปรับแก้ลิสต์สแควร์ได้แก่ สมการค่าต่างครั้งที่สองของเฟสคลื่นส่งดาวเทียม (Double differenced carrier phase equation) มีรายละเอียดดังนี้

$$\phi_{v,u}^{i,j} = \rho_{v,u}^{i,j} + \lambda N_{v,u}^{i,j} - I_{v,u}^{i,j} + T_{v,u}^{i,j} + O_{v,u}^{i,j} \quad (2-3)$$

เมื่อ v คือสถานีฐานว็อาร์เอส

u คือสถานีผู้ใช้ (Rover station)

i คือดาวเทียมอ้างอิง

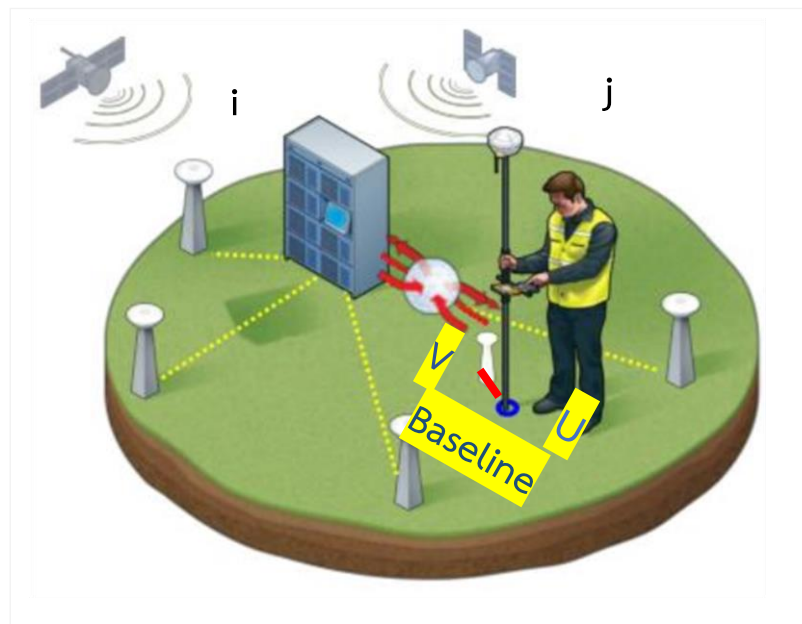
j คือดาวเทียมที่เป็นคู่ดาวเทียมกับดาวเทียมอ้างอิง

$\phi_{v,u}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของเฟสคลื่นส่งระหว่างจุด v , u และดาวเทียม i , j

$\rho_{v,u}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของระยะทางเรขาคณิตระหว่างจุด v , u และดาวเทียม i , j

$N_{v,u}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของเลขบริศนาระหว่างจุด v , u และดาวเทียม i , j

$I_{v,u}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของค่าคลาดเคลื่อนไอโอโนสเฟียร์ระหว่างจุด v , u และดาวเทียม i , j
 $T_{v,u}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของค่าคลาดเคลื่อนโทโพสเฟียร์ระหว่างจุด v , u และดาวเทียม i , j
 $O_{v,u}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรระหว่างจุด v , u และดาวเทียม i , j



รูปที่ 2-5 การประมวลผลเส้นฐานฝั่งสถานีผู้ใช้

(Elhattab, 2016)

เนื่องจากสถานีฐานวีสอาร์เอสถูกสร้างให้เสมือนมีตำแหน่งอยู่ใกล้กับสถานีผู้ใช้ การประมวลผลเส้นฐานจึงเหมือนกับกรณีเส้นฐานระยะทางสั้นจนถือว่าเทคนิคค่าต่างครั้งที่สองสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะเส้นฐานได้ทั้งหมด นั่นคือสมมุติค่าของเทอม $I_{v,u}^{i,j}$, $T_{v,u}^{i,j}$, $O_{v,u}^{i,j}$ ในสมการที่ 2-3 เท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเทอม $p_{v,u}^{i,j}$ ของสมการค่าต่างครั้งที่สองอยู่ในรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจะต้องถูกทำให้เป็นสมการเชิงเส้นเพื่อทำให้การคำนวณต่อไปสามารถใช้สมการทางพีชคณิตเชิงเส้น (Linear algebra) คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ลำดับแรก (First order Taylor's series expansion) สามารถสร้างสมการค่าสังเกตในการปรับแก้ลีสท์สแควร์ในรูปแบบเมทริกซ์ (Linearized observation equation) สำหรับการรับสัญญาณที่ Epoch ที่สนใจได้ดังนี้

$$l = AX \quad (2-4)$$

เมื่อ l คือ เวกเตอร์ค่าสังเกต Observed-minus-computed vector ($y - p_0$)

y คือ เวกเตอร์ค่าต่างครั้งที่สองของการวัดเฟสคลื่นส่งดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส L1, L2

p_0 คือ เวกเตอร์ของค่าต่างที่สองของระยะทางเรขาคณิตระหว่างจุด v, u และดาวเทียม i, j

X คือ เวกเตอร์ของค่าพารามิเตอร์ได้แก่ องค์ประกอบของเส้นฐาน (Baseline components)

และค่าต่างที่สองของเลขปริศนา

A คือ Design Matrix ของค่าพารามิเตอร์ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก)

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ X จะสามารถคำนวณจากสมการปกติ $(A^T P A) X = A^T P L$ ได้ดังนี้

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (2-5)$$

โดยที่ $P = C^{-1}$ (2-6)

เมื่อ P คือ เมทริกซ์ค่าน้ำหนักของข้อมูล (Weight matrix:)

C คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Variance-covariance matrix of observation)

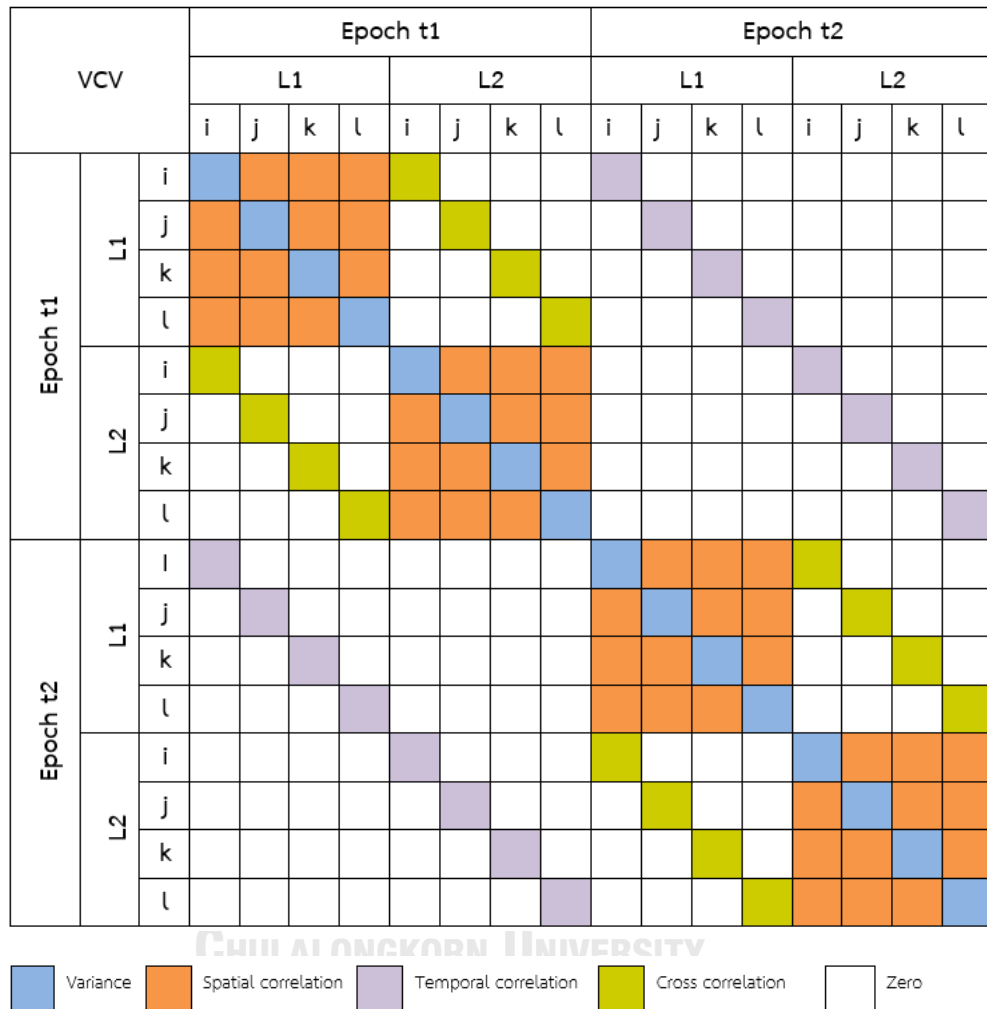
2.3 แบบจำลองสโตคาสติกของการประมวลผลฝั่งสถานีผู้ใช้

จากสมการที่ 2-5 จะเห็นได้ว่าในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของการปรับแก้สี่ทศสแควร์ นอกจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความถูกต้องซึ่งจะส่งผลในเทอมของ Design matrix (A) แล้ว เมทริกซ์ค่าน้ำหนักของข้อมูล (P) ที่มีความแม่นยำสูงก็เป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณา ซึ่งโดยปกติการสร้างเมทริกซ์ค่าน้ำหนักของข้อมูลจะดำเนินการผ่านกระบวนการที่เรียกว่าการสร้างแบบจำลองสโตคาสติก

แบบจำลองสโตคาสติก คือการกำหนดค่าของสมาชิกที่อยู่ภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (C) เพื่ออธิบายคุณลักษณะเชิงสถิติของความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของค่าสังเกตแต่ละตัวแบบมีหลักการและเหตุผลเพื่อที่จะได้เมทริกซ์ค่าน้ำหนักของการปรับแก้สี่ทศสแควร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำตามสมการที่ 2-6 ความไม่แน่นอนของข้อมูลการวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนในเครื่องรับ (Receiver noise), ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath error) และค่าคลาดเคลื่อนที่ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์ยังขจัดออกได้ไม่หมด (Unmodelled systematic error)

จากรูปที่ 2-6 เป็นรูปกราฟิกแสดงถึงโครงสร้างของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม โดยได้ยกตัวอย่างของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของข้อมูลจีพีเอสเฟสคลื่นส่ง L1 และ L2 รับสัญญาณ

ดาวเทียมจำนวน 4 ดวง (i, j, k, l) จำนวน 2 epoch (t1, t2) โดยสมาชิกที่อยู่ในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ค่าความแปรปรวน (Variance) ซึ่งเป็นสมาชิกในแนวทแยงของเมทริกซ์ และค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) เป็นสมาชิกนอกแนวทแยง



รูปที่ 2-6 กราฟิกแสดงตัวอย่างเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าการวัดเฟสจีพีเอส

ค่าความแปรปรวนร่วมยังแบ่งออกเป็น 3 ประเภท แต่ละประเภทมีตำแหน่งในเมทริกซ์ตามนิยามของแต่ละประเภท โดยนิยามของค่าความแปรปรวนและค่าความแปรปรวนร่วมมีดังต่อไปนี้

1) ค่าความแปรปรวน (Variance) คือค่าสถิติที่ใช้เพื่อวัดการกระจายตัวของข้อมูลจากค่าเฉลี่ยของความต่างจากค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง สำหรับความแปรปรวนของข้อมูลการวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละดวง ยิ่งโอกาสที่จะเกิดปัจจัยหรือสภาวะแวดล้อมที่เป็นสาเหตุที่จะทำให้แบบจำลอง

คณิตศาสตร์จัดค่าคลาดเคลื่อนออกได้ไม่หมดมีมากเท่าไร ยิ่งส่งผลทำให้โอกาสที่ค่าความแปรปรวนจะมีค่าสูงมีมากขึ้นเท่านั้น ปัจจัยหรือสภาวะแวดล้อมดังกล่าวในกรณีของสถานีผู้ใช้ ได้แก่ มุมยกของสัญญาณดาวเทียมเดินทางมายังเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส ยิ่งมุมยกมีค่าต่ำเท่าไร ยิ่งแสดงว่าสัญญาณดาวเทียมเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางที่มากขึ้นเท่านั้นทำให้ความแปรปรวนมีค่าที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีของข้อมูลการวัดดาวเทียมของสถานีฐานวีอาร์เอสตามทฤษฎีแล้วจะมีค่าความแปรปรวนมากกว่าข้อมูลการวัดดาวเทียมที่เป็นการรับสัญญาณจริง เพราะนอกจากมุมยกของดาวเทียมแล้ว ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่เป็นสาเหตุหลักได้แก่ ความไม่แน่นอนของการประมาณค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศจากการคำนวณแบบโครงข่าย ยิ่งชั้นบรรยากาศมีสภาวะความแปรปรวนมากเท่าไร ประสิทธิภาพของการประมาณค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ยิ่งต่ำ

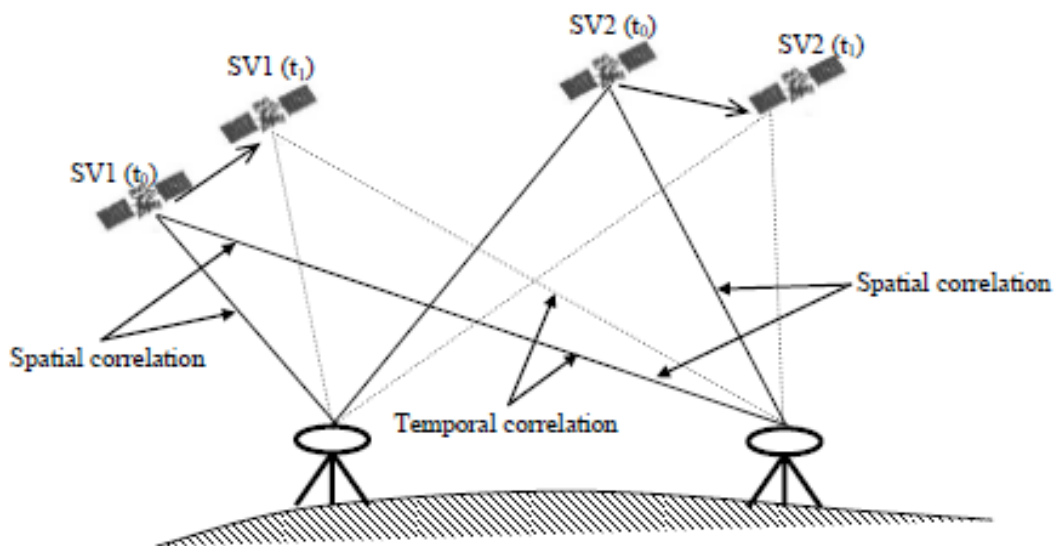
2) ค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) คือค่าสถิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว มีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ หากมีค่าบวกแสดงถึงเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันและหากมีค่าเป็นลบแสดงถึงเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้ามกัน โดยค่าความแปรปรวนร่วมจะเป็นสมาชิกนอกแนวทแยงของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.1) ความแปรปรวนร่วมเชิงตำแหน่ง (Spatial covariance) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดาวเทียมกับความใกล้เคียงของตำแหน่งระหว่างดาวเทียมหรือระหว่างเครื่องรับ จากรูปที่ 2-7 แสดงความสัมพันธ์สองแบบ แบบที่หนึ่งคือ การพิจารณาความสัมพันธ์ของการส่งสัญญาณจากดาวเทียมดวงหนึ่งกับเครื่องรับสองเครื่อง เมื่อดาวเทียมดวงหนึ่งส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับสองเครื่องที่มีตำแหน่งใกล้กัน ค่าการวัดที่ได้จากเครื่องรับสองเครื่องย่อมมีค่าที่ใกล้เคียงกันกว่ากรณีค่าที่จะได้เครื่องรับสองเครื่องตั้งห่างกันกว่า แบบที่สองคือ การพิจารณาความสัมพันธ์ของการส่งสัญญาณจากดาวเทียมสองดวงกับเครื่องรับหนึ่งเครื่อง ค่าการวัดที่ได้จากดาวเทียมสองดวงที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกันมาก ย่อมมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าการวัดที่ได้จากดาวเทียมสองดวงที่มีตำแหน่งห่างกันย่อมแตกต่างกันมากกว่า

2.2) ความแปรปรวนร่วมระหว่างความถี่ของเฟสคลื่นส่ง (Frequency cross-correlation covariance) จากงานวิจัยของ Bona (2000) ได้ทดสอบ เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสประเภทรังวัดของผู้ผลิตหลายรายด้วยวิธี zero-baseline เพื่อจำกัดผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก และได้พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างเฟสคลื่นส่ง L1 กับ L2 เป็นค่าบวก ในขณะที่ไม่พบความสัมพันธ์ร่วมระหว่างเฟสคลื่นส่งกับรหัสชุดเดรนซ์

2.3) ความแปรปรวนร่วมระหว่างเวลา (Temporal covariance) เมื่อดาวเทียมแต่ละดวงเคลื่อนที่ไปตามวงโคจรของมัน ค่าการวัดสัญญาณจากดาวเทียมดวงหนึ่งไปยังเครื่องรับจะ

เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างมีแนวโน้มในแต่ละ epoch จากรูปที่ 2-7 แสดงการเคลื่อนที่ของดาวเทียม epoch t_0 ไปยัง epoch t_1 ยิ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าการวัดระหว่างสอง epoch ที่ระยะเวลา t_0 ห่างจาก t_1 มากเท่าไร ค่าการวัดยิ่งระหว่างสอง epoch ยิ่งแตกต่างกันมากขึ้นเท่านั้น ความแปรปรวนร่วมระหว่างเวลาเป็นปัจจัยที่จะต้องให้ความสนใจในกรณีของการประมวลผลที่ใช้ข้อมูลดาวเทียมจำนวนหลาย epoch ใน 1 solution ได้แก่การรังวัดแบบสถิต (Static survey) ในขณะที่การรังวัดที่จำนวน epoch ใน 1 solution ไม่มากอย่างการรังวัดแบบจลน์โดยทันที (RTK) สามารถที่จะละไว้ไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ



รูปที่ 2-7 รูปแสดงนิยามของ Spatial correlation และ Temporal correlation
(Satirapod, 2006)

2.3.1 แบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากัน

แบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากัน (Equal-weight stochastic model) เป็นแบบจำลองสโตคาสติกอย่างง่ายที่สุดโดยถูกสร้างขึ้นมาด้วยสมมุติฐานที่กำหนดให้ค่าการวัดดาวเทียมแต่ละดวงมีค่าความแปรปรวนที่เท่ากันและเป็นอิสระต่อกัน ไม่คำนึงถึงความเกี่ยวพันกันระหว่างข้อมูลทั้ง 3 ประเภทโดยการกำหนดให้ค่าแปรปรวนร่วมของเฟสคลื่นส่งเท่ากับศูนย์เพื่อความง่ายในการคำนวณ ดังนั้นเมทริกซ์ความแปรปรวน (C_e) ของดาวเทียม n ดวงจะมีค่าดังนี้

$$C_o = \sigma^2 I \quad (2-7)$$

เมื่อ I คือเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด $n \times n$; σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสคลื่นส่ง โดยทั่วไป หากไม่ได้คำนึงถึงการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกมักจะสมมติเป็นค่าโดยประมาณเช่น เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

หากพิจารณาค่าต่างครั้งที่หนึ่งระหว่างสถานี v, u ขณะรังวัดดาวเทียมจำนวน n ดวง (1, 2, ..., n) จะได้สมการค่าต่างครั้งที่หนึ่งดังนี้

$$S = T_S \Phi \quad (2-8)$$

$$S = \begin{bmatrix} \phi_{vu}^1 \\ \phi_{vu}^2 \\ \vdots \\ \phi_{vu}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_v^1 \\ \phi_u^1 \\ \phi_v^2 \\ \phi_u^2 \\ \vdots \\ \phi_v^n \\ \phi_u^n \end{bmatrix}$$

จากกฎการแพร่จะได้ว่าเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าต่างครั้งที่หนึ่ง (C_S) เป็นดังนี้

$$C_S = T_S C_o T_S^2 = 2\sigma^2 I \quad (2-9)$$

เมื่อพิจารณาสมการค่าต่างครั้งที่สองระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอส (v) กับสถานีผู้ใช้ (u) ของดาวเทียม n ดวง (1, 2, 3, ..., n) โดยกำหนดให้ ดาวเทียม 1 เป็นดาวเทียมอ้างอิง จะได้สมการค่าต่างครั้งที่สอง ดังนี้

$$D = T_D S \quad (2-10)$$

$$D = \begin{bmatrix} \phi_{vu}^{1,2} \\ \phi_{v,u}^{1,3} \\ \vdots \\ \phi_{v,u}^{1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & \dots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{vu}^1 \\ \phi_{v,u}^2 \\ \vdots \\ \phi_{v,u}^n \end{bmatrix}$$

จากกฎการแพร่จะได้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าต่างครั้งที่สองที่ epoch ใดๆ มีค่าดังนี้

$$C_D = T_D C_S T_D^T = 2 \sigma^2 T_D T_D^T = \sigma^2 \begin{bmatrix} 4 & 2 & \dots & 2 \\ 2 & 4 & \dots & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 & 2 & \dots & 4 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

หากเป็นการประมวลผลเส้นฐานแบบ 2 ความถี่ และกำหนดให้ความแปรปรวนร่วมระหว่างความถี่ของเฟสคลื่นส่งเท่ากับศูนย์จะได้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าต่างครั้งที่สองของการวัดสองความถี่ที่ epoch ที่สนใจมีค่าดังนี้

$$C_D = \sigma^2 \begin{bmatrix} 4 & 2 & \dots & 2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 2 & 4 & \dots & 2 & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 2 & 2 & \dots & 4 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 4 & 2 & \dots & 2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & 2 & 4 & \dots & 2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 2 & 2 & \dots & 4 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CIVILANGKORN UNIVERSITY

2.3.2 แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม

แบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม (Elevation-weight model) เป็นแบบจำลองที่ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าสัญญาณที่เดินทางดาวเทียมมายังเครื่องรับในทิศทางของค่ามุมยกดาวเทียมที่ต่ำกว่ามีแนวโน้มที่จะมีความแปรปรวนของข้อมูลมากกว่าสัญญาณดาวเทียมที่เดินทางมาในทิศทางของค่ามุมยกดาวเทียมที่สูงกว่า สาเหตุเนื่องมาจากสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศด้วยระยะทางที่มากกว่าและยังมีความเป็นไปได้ที่จะได้รับผลกระทบจากคลื่นหลายวิถี (Multipath error) ที่มากกว่า ดังนั้นในการสร้างเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมจะกำหนดให้ค่าความแปรปรวนของดาวเทียมของค่าการวัดดาวเทียมแต่ละดวงให้มีค่าไม่เท่ากันขึ้นกับมุมยกของดาวเทียมแต่ละดวง ณ เวลาที่สนใจ แบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมถือเป็นแบบจำลองที่ใช้อย่างกว้างขวางซึ่งมีการผนวกเข้ากับโปรแกรมประมวลผลจีเอ็นเอสเอ็นเอ็นเช่น โปรแกรม GAMIT และโปรแกรม

Bernese GPS มีงานวิจัยหลายงานที่ผ่านมาได้ทดสอบการนำค่ามุมยกดาวเทียมมาเป็นตัวชี้วัดของคุณภาพสัญญาณดาวเทียมและหาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างค่าความแปรปรวนของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสกับค่ามุมยกดาวเทียมและเสนอผลลัพธ์ของงานศึกษาออกมาในรูปแบบของสูตรเชิงประจักษ์ (Empirical formula) ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชัน Sin หรือ Cosine หรือ Exponential ของมุมยกดาวเทียมมีรายละเอียดดังนี้

- 1) สูตรการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสดาวเทียม j (Han and Rizos, 2000)

$$\sigma^j = s (a_0 + a_1 e^{-\frac{E^j}{E_0}}) \quad (2-13)$$

เมื่อ $j = (1, \dots, s)$; s คือจำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส; a_0, a_1, E_0 เป็นค่าคงที่เฉพาะเครื่องรับซึ่งได้จากการวัดสอบเครื่องรับและ E^j คือมุมยกดาวเทียม (หน่วยเป็นองศา)

- 2) สูตรการหาค่าความแปรปรวนของดาวเทียม j ของโปรแกรม GAMIT (Jin et al., 2005)

$$\sigma^j = \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{\cos^2 \theta_j}} \quad (2-14)$$

เมื่อ θ_j คือค่ามุมยกของดาวเทียม j ; และสำหรับเฟสคลื่นส่ง L1; $a = 4.3$ มิลลิเมตร; $b = 3$ มิลลิเมตร;

- 3) สูตรการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสดาวเทียม j ของโปรแกรม Bernese GPS (Dach et al., 2007)

$$\sigma^j = \frac{\sigma^2}{(\sin \theta_j)} \quad (2-15)$$

เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสคลื่นส่ง เช่นสมมุติค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

θ_j คือค่ามุมยกของดาวเทียม j ; $j = (1, \dots, s)$

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ความแปรปรวนของดาวเทียมแต่ละดวงไม่เท่ากัน เมทริกซ์ความแปรปรวน (C_0) ของดาวเทียม n ดวงจะมีค่าดังนี้

$$C_0 = \begin{bmatrix} (\sigma^1)^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & (\sigma^2)^2 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & (\sigma^s)^2 \end{bmatrix}$$

เมื่อพิจารณาค่าต่างครั้งที่หนึ่งระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอส (v) และสถานีผู้ใช้ (u) ขณะรั้งวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจำนวน S ดวง (1, 2, ..., s) จะได้สมการค่าต่างครั้งที่หนึ่งดังนี้

$$S = T_S \Phi \quad (2-16)$$

$$S = \begin{bmatrix} \phi_{vu}^1 \\ \phi_{vu}^2 \\ \vdots \\ \phi_{vu}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_v^1 \\ \phi_u^1 \\ \phi_v^2 \\ \phi_u^2 \\ \vdots \\ \phi_v^s \\ \phi_u^s \end{bmatrix}$$

ซึ่งจากกฎการแพร่จะได้ว่าเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าต่างครั้งที่หนึ่ง (C_S) เป็นดังนี้

$$\text{เมื่อ } C_S = T_S C_0 T_S^T = \begin{bmatrix} (2\sigma^1)^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & (2\sigma^2)^2 & \dots & \vdots \\ \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & (2\sigma^s)^2 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

เมื่อพิจารณาสมการค่าต่างครั้งที่สองระหว่างสถานี v , u ของดาวเทียม s ดวง (1, 2, 3,..., s) โดยกำหนดให้ดาวเทียมหมายเลขที่ 1 เป็นดาวเทียมอ้างอิง จะได้สมการค่าต่างครั้งที่สองดังนี้

$$D = T_D S \quad (2-18)$$

$$D = \begin{bmatrix} \emptyset_{vu}^{1,2} \\ \emptyset_{v,u}^{1,3} \\ \vdots \\ \emptyset_{v,u}^{1,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & \dots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \emptyset_{vu}^1 \\ \emptyset_{v,u}^2 \\ \vdots \\ \emptyset_{v,u}^s \end{bmatrix}$$

จากกฎการแพร่จะได้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าต่างครั้งที่สอง (C_D) มีค่าดังนี้

$$C_D = T_D C_S T_D^T \quad (2-19)$$

หากเป็นการประมวลผลเส้นฐานที่ใช้เฟสคลื่นส่ง 2 ความถี่ และกำหนดให้ความแปรปรวนร่วมระหว่างความถี่ของเฟสคลื่นส่งเท่ากับศูนย์จะได้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าต่างครั้งที่สองของค่าการวัดสองความถี่ที่ epoch ใดๆ มีค่าดังนี้

$$C_D = \begin{bmatrix} q_1 & q_i & \dots & q_i & 0 & \dots & \dots & 0 \\ q_i & q_2 & & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & q_i & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ q_i & \dots & q_i & q_s & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & q_1 & q_i & \dots & q_i \\ \vdots & \ddots & \vdots & q_i & q_2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & q_i \\ 0 & \dots & \dots & 0 & q_i & \dots & q_i & q_s \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

$$\text{เมื่อ } q_i = \frac{2}{\sigma^{\text{ref}}}, q_j = \frac{2}{\sigma_j} + \frac{2}{\sigma^{\text{ref}}}$$

σ^j คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสดาวเทียม j (คำนวณจากสูตร 2-13 หรือ 2-14 หรือ 2-15) เมื่อ $j = 1, 2, \dots, s$; s คือจำนวนดาวเทียมที่ epoch ใด ๆ

σ^{ref} คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสดาวเทียมอ้างอิง (คำนวณจากสูตร 2-13 หรือ 2-14 หรือ 2-15)

อย่างไรก็ตามการนำแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมมาเป็นแบบจำลองสโตคาสติกของการประมวลผลดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ด้วยโครงข่ายสถานะพื้นฐานวีอาร์เอสโดยไม่ได้ปรับปรุงนั้นมี

ความไม่สมเหตุผล เนื่องจากให้ค่าน้ำหนักของค่าสังเกตด้วยมุมยกดาวเทียมแต่เพียงอย่างเดียว เพราะในความเป็นจริงนั้นสถานีฐานว็อลอาร์เอสไม่ได้เป็นสถานีฐานที่เป็นการรับสัญญาณจริง แต่ค่าการวัดดาวเทียมได้มาจากการคำนวณโครงข่ายหลายขั้นตอน ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการหาเลขปริศนาระหว่างสถานีฐาน, การประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ และการ Interpolation แบบจำลองสโตคาสติกที่สมจริงจะต้องสะท้อนถึงความไม่แน่นอนของค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง นอกจากนี้แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมยังมีข้อจำกัดในการประมาณค่าความแปรปรวนได้แม่นยำเฉพาะกรณีที่มุมยกดาวเทียมมีค่าสูงกว่า 40 องศาขึ้นไป และแบบจำลองจะลดประสิทธิภาพในการประมาณค่าความแปรปรวนลงในกรณีของการรังวัดในบริเวณพื้นที่ซึ่งมีลักษณะเป็นเมือง เนื่องจากผลจากคลื่นหลายวิถีจากพื้นผิวสะท้อนของอาคารสิ่งปลูกสร้างโดยรอบสถานีผู้ใช้ (Li et al., 2015)

2.3.3 แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE

จากงานวิจัยด้านสถิติที่ผ่านมาได้มีผู้คิดค้นวิธีการประมาณค่าสมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Variance component estimation) จากการใช้ค่าเศษเหลือของการปรับแก้ลิสต์สแควร์อยู่หลายแนวทาง วิธีการดังกล่าวมีสูตรคำนวณที่เป็นขั้นตอนที่แน่นอน (Rigorous method) ตัวอย่างของวิธีทางสถิติดังกล่าวได้แก่ 1) Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation (MINQUE) 2) Best Invariant Quadratic Unbiased (BIQUE) 3) Restricted Maximum likelihood estimation (REML) และ 4) Helmert ซึ่ง Junhuan et al. (2011) ได้ทำการเปรียบเทียบสูตรคำนวณของแต่ละวิธีและสรุปว่าทั้ง 4 วิธีเป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีความใกล้เคียงกัน โดยที่วิธี REML และ BIQUE สร้างขึ้นภายใต้สมมติฐานที่ค่าคลาดเคลื่อนของการวัดจะต้องมีการกระจายตัวแบบปกติ ในขณะที่ MINQUE นั้นมีความยืดหยุ่นกว่าเพราะไม่ได้มีการตั้งเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนของการวัดว่าต้องเป็นการกระจายแบบปกติ ส่วนวิธี Helmert ถึงจะไม่ได้มีการตั้งเงื่อนไขเช่นกันแต่มีข้อจำกัดว่าต้องใช้เฉพาะกรณีที่เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมมีลักษณะเป็นแบบบล็อกตามแนวทแยง (Block-diagonal matrix) เท่านั้น จึงมองได้ว่าวิธี Helmert เป็นเพียงกรณีย่อยของวิธี MINQUE ดังนั้นจึงทำให้วิธี MINQUE ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลายสาขามากกว่าวิธีการอื่น

วิธี MINQUE ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองสโตคาสติกสำหรับการประมวลผลเส้นฐานของการหาตำแหน่งจีเอ็นเอสเอสแบบสัมพัทธ์ (Relative GNSS positioning) ในการประมวลผลแบบสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐานดังตารางที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองสโต

คาสติก MINQUE มีจุดเด่นที่สามารถที่จะคำนวณสมาชิกของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมได้อย่างครบถ้วน (Fully populated variance-covariance matrix) ได้แก่ ความแปรปรวนของดาวเทียมแต่ละดวง, ความแปรปรวนร่วมเชิงตำแหน่ง, ความแปรปรวนร่วมระหว่างความถี่ของเฟสคลื่นส่ง หรือแม้แต่ความแปรปรวนร่วมระหว่างเวลาก็สามารถคำนวณได้โดยการใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลค่าต่างที่สองของเฟสดาวเทียมให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลลักษณะเป็นอนุกรมเวลาก่อนด้วยแบบจำลอง Auto Regressive model (Wang et al., 2002) อย่างไรก็ตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการประมวลผลแบบจลน์ซึ่งใช้จำนวน epoch ต่อ 1 solution ไม่มากจึงจะไม่นำความแปรปรวนร่วมระหว่างเวลาเข้ามาพิจารณาในการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก

ตารางที่ 2-1 ตารางเปรียบเทียบการปรับปรุงสมาชิกภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม

Stochastic model	Variance	Spatial covariance	Cross correlation covariance
แบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน			
แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม	X		
แบบจำลอง MINQUE	X	X	X
แบบจำลอง RIU	X		

แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE เป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่าหากประมวลผลพื้นฐานด้วยข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่มีจำนวน epoch ต่อ 1 solution ที่มากพอจะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนมีระบบโดยส่วนใหญ่ออกไปได้ ค่าเศษเหลือของค่าการวัดจีเอ็นเอสเอสจากการปรับแก้ลิสต์สแควร์จะสามารถเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงถึงคุณลักษณะทางสถิติของค่าคลาดเคลื่อนที่ยังคงหลงเหลืออยู่และเป็นค่าสถิติเริ่มต้นที่นำมาใช้คำนวณค่าสมาชิกของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมได้ที่มีความถูกต้องสูงได้ งานวิจัยที่ผ่านมาในการประยุกต์ใช้วิธี MINQUE จะถูกแสดงในหัวข้อที่ 1) และอัลกอริทึมของแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE จะถูกแสดงในหัวข้อที่ 2) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ MINQUE

Satirapod et al. (2001) ได้ทดสอบนำวิธี MINQUE มาประยุกต์ใช้สำหรับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบสถิต (Static surveying) และเสนอเทคนิคการสร้างแบบจำลองสโตคาสติกแบบวนซ้ำ (Iterative stochastic modeling) โดยได้ทดสอบประมวลผลพื้นฐานข้อมูลจีพีเอสเฟสคลื่นส่ง L1 ของการรังวัดแบบสถิตที่มีระยะเส้นฐาน 23 กิโลเมตร ด้วยอัตรา 30 วินาที เป็นเวลา

30 นาที นั่นคือเป็นจำนวน 60 epoch ต่อ 1 ชุดข้อมูล (Batch) ผลจากการประมวลผลพบว่า ความถูกต้องทางราบดีขึ้น 0.8 มิลลิเมตร และทางตั้งดีขึ้น 1.2 มิลลิเมตร ในขณะที่กระบวนการหาค่า เลขปริศนามีความน่าเชื่อถือขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่าทดสอบทางสถิติ F-ratio และ W-ratio นอกจากนี้ยังได้เสนอเทคนิคการสร้างแบบจำลองสโตคาสติกแบบแยกส่วน (Segmented stochastic modeling) สำหรับประยุกต์ใช้กับการรังวัดแบบสถิติที่มีความยาวเส้นฐานระยะยาวขึ้น โดยได้ ทดสอบประมวลผลข้อมูลจีพีเอสเฟสคลื่นส่ง L1 ที่มีเส้นฐานความยาว 70 กิโลเมตร ระยะเวลา ระหว่าง epoch 30 วินาที ช่วงเวลาการรังวัด 5 ชั่วโมง ผลการประมวลผลเส้นฐานแสดงให้เห็นว่า ความถูกต้องทางราบดีขึ้น 1.9 มิลลิเมตร และทางตั้งดีขึ้น 0.1 มิลลิเมตร ในขณะที่กระบวนการหาค่า เลขปริศนามีความน่าเชื่อถือขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่า F-ratio และ W-ratio

Satirapod et al. (2002) ได้เสนอวิธี Simplified MINQUE ที่มีการลดทอนความซับซ้อนของ สมการคณิตศาสตร์ของวิธี MINQUE ลงโดยการนิยามเมทริกซ์ R ขึ้นใหม่ให้เป็นเพียง Block matrix เพื่อประหยัดหน่วยความจำคอมพิวเตอร์และทำให้การคำนวณมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยจากการ ทดสอบประมวลผลเส้นฐานข้อมูลจีพีเอสเฟสคลื่นส่ง L1 ที่ระยะ 15 เมตร, 870 เมตร และ 13,300 เมตร จำนวน 120 epoch ต่อ 1 ชุดข้อมูล (Batch) พบว่าวิธี Simplified MINQUE สามารถให้ ความถูกต้องทางตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับวิธี MINQUE แบบเต็มรูปแบบในระดับมิลลิเมตร ในขณะที่ กระบวนการหาค่าเลขปริศนามีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากค่าทดสอบ ทางสถิติ F-ratio และ W-ratio

Musa et al. (2003) ได้ทดสอบนำวิธี MINQUE ไปใช้กับการสร้างแบบจำลองสโตคาสติก สำหรับการรังวัดจีพีเอสแบบสถิติด้วยโครงข่ายสถานีฐาน ข้อมูลทดสอบที่ใช้เป็นข้อมูลเฟสคลื่นส่งแบบ ความถี่เดียว (L1) เป็นข้อมูลจีพีเอสของโครงข่าย SCIGN รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกาที่มีระยะห่าง ระหว่างสถานีฐานประมาณ 60 กิโลเมตร ด้วยอัตราการรับข้อมูลดาวเทียมที่ 30 วินาที เป็นเวลา 120 นาทีนำมาประมวลผลแบบสถิติจำนวน 240 epoch ต่อ 1 ชุดข้อมูล (Batch) ผลการทดสอบเมื่อ เปรียบเทียบกับวิธีการให้น้ำหนักค่าสังเกตเท่ากันพบว่าไม่สามารถเพิ่มความถูกต้องของค่าพิกัดทาง ราบและทางตั้งได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่า F-ratio ที่สูงมากขึ้น สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของกระบวนการหาเลขปริศนาแบบ จำนวนเต็มได้

2) อัลกอริทึมของ MINQUE

กำหนดให้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าต่างครั้งที่สองของค่าการวัดดาวเทียมอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$C = \sum_{i=1}^k \theta_i T_i \quad (2-21)$$

เมื่อ $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ เป็นสมาชิกที่ต้องการทราบค่าของเมทริกซ์ C มีจำนวนเท่ากับ k ตัว โดยที่ $k = r(r+1)/2$ เมื่อ $r =$ จำนวนคู่ดาวเทียม

T_1, T_2, \dots, T_k คือ Accompanying matrices

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dots, T_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{m+1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, T_{m+2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dots, T_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Rao (1971) ได้นิยามทฤษฎี MINQUE ให้ $l^T M l$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกำลังสอง (quadratic function) ของ l เป็นค่าประมาณของฟังก์ชันเชิงเส้นของสมาชิกของ $VCV \theta_i$ ($i = 1, 2, \dots, k$) $g_1\theta_1 + g_2\theta_2 + \dots + g_k\theta_k$ และเมทริกซ์ M เป็นเมทริกซ์ที่ทำให้ Norm ของเมทริกซ์ค่าต่างระหว่างค่าประมาณ MINQUE กับ Natural estimator มีค่าน้อยที่สุด โดย M สามารถหาค่าได้จากการแก้ปัญหา Trace ของเมทริกซ์ที่มีค่าน้อยที่สุด $\text{Tr} [M C M C] = \min$ และ M จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $MA=0$; $\text{Tr} [MT_i] = g_i$

เมื่อ $\text{Tr} []$ คือ Trace operator ของเมทริกซ์

และ A คือ Design Matrix ของการปรับแก้สี่เหลี่ยมของค่าต่างที่ส่องระหว่างคู่ดาวเทียมและสถานี
ฐาน ค่าสมาชิกของเมทริกซ์ VCV สามารถหาได้จากสมการ

$$\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_k) = S^{-1}q \quad (2-22)$$

เมื่อ เมทริกซ์ $S = [S_{ij}]$ โดยที่ $S_{ij} = \text{Tr} [RT_i RT_j]$ (2-23)

และเวกเตอร์ $q = [q_i]$ โดยที่ $q_i = L^T RT_i RL$ (2-24)

และเมทริกซ์ $R = PQ_V P$ (2-25)

โดยที่ $Q_V = P^{-1} - A(A^T P A)^{-1} A^T$ และ P คือเมทริกซ์ค่าน้ำหนัก

เมทริกซ์ R สามารถแสดงในรูปของส่วนประกอบของเมทริกซ์ย่อย (partitioned matrix) เมื่อ m คือ
จำนวน Epoch ใน 1 ช่วงรับสัญญาณ (Session) ได้ดังนี้

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & \cdots & R_{mm} \end{bmatrix}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือของค่าสังเกต v กับค่าสังเกต L

$$v = -Q_V P L \quad (2-26)$$

$$P Q_V P v = -P Q_V P L = P v \quad (2-27)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (2-23), (2-24) (2-25) จะได้ว่า

$$q_i = L^T RT_i RL = v^T RT_i R v = v^T P T_i P v \quad (2-28)$$

จากสมการ (2-22), (2-23), (2-24), (2-25) จะเห็นได้ว่าค่าสมาชิกภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (θ^{\wedge}) ซึ่งเป็นตัวไม่ทราบค่าอยู่ด้านซ้ายของสมการไม่สามารถหาได้ด้วยการแก้สมการโดยตรง เนื่องจากทางด้านฝั่งขวาของสมการมีเมทริกซ์ P อยู่ภายในนิยามของฟังก์ชันของทั้งเมทริกซ์ S และเวกเตอร์ q ดังนั้นการแก้สมการที่ (2-22) เพื่อหาค่า θ^{\wedge} นั้นจึงต้องใช้วิธีการหาค่าตอบแบบวนซ้ำ (Iteration) โดยเริ่มต้นด้วยการนำค่าสมาชิกภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมจากแบบจำลองมาเป็นค่าเริ่มต้นของการวนซ้ำรอบแรก ($\theta^{\wedge 0}$) จากนั้นคำตอบของตัวไม่ทราบในแต่ละรอบจะถูกใช้เป็นค่าประมาณของรอบถัดไปดังสมการต่อไปนี้

$$\theta^{\wedge j+1} = s^{-1}(\theta^{\wedge j}) q(\theta^{\wedge j}) \quad (2-29)$$

โดยที่ $j = 0, 1, 2, \dots, k$ หากการวนซ้ำเพื่อหาค่า θ^{\wedge} Converge เข้าหาค่าตอบได้แสดงว่าค่า θ^{\wedge} เป็นไปตามสมการเงื่อนไข $S(\theta^{\wedge}) \theta^{\wedge} = q(\theta^{\wedge})$ เป็นการวนซ้ำเพื่อหา θ^{\wedge} ตามเงื่อนไข $\text{Tr}[R(\theta^{\wedge})T_j] = \text{Tr}(\theta^{\wedge})T_j R(\theta^{\wedge})L$

2.3.4 แบบจำลองสโตคาสติก RIU

การประมวลผลแบบโครงข่ายจะสามารถสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอสที่มีความถูกต้องมากหรือน้อยขึ้นเพียงไรขึ้นกับปัจจัยหลายประการมาประกอบกันได้แก่ ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน, อัลกอริทึมของการประมวลผล, ตำแหน่งของสถานีผู้ใช้, เรขาคณิตของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสขณะรับสัญญาณ, ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศ โดยเฉพาะความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีการแปรผันไปตามเวลาโดยตลอดในข้อมูลทุก ๆ Epoch งานศึกษาที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอตัวชี้วัดคุณภาพของค่าแก้โครงข่ายโดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะให้ผู้ดูแลระบบนำไปใช้ตรวจสอบคุณภาพของค่าแก้ที่จะส่งไปยังสถานีผู้ใช้ที่ตำแหน่งใดก็ตามภายในพื้นที่ให้บริการของโครงข่าย รวมถึงเป็นการระบุพื้นที่ให้บริการที่มีปัญหาด้านความถูกต้องเชิงตำแหน่งเพื่อควบคุมคุณภาพของการบริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและงานวิจัยดัชนีการติดตามคุณภาพ ต่อด้วยอัลกอริทึมของแบบจำลองสโตคาสติก RIU มีรายละเอียดดังนี้

- 1) แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีการติดตามคุณภาพของค่าแก้โครงข่าย

Chen and Landau (2003) ได้เสนอให้นำค่าเศษเหลือจากการประมาณค่าภายในช่วง (Residual Interpolation Uncertainty) หรือดัชนี RIU มาเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของค่าการวัดของ สถานีฐานวีอาร์เอส โดยใช้สมมุติฐานที่ว่าเมื่ออัลกอริทึมของการประมาณค่าภายในช่วงที่ใช้ในการ ประมวลผลโครงข่ายเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการเชิง เส้น (Linear interpolation model: LIM) ณ. เวลาหนึ่งที่ชั้นบรรยากาศบริเวณที่ทำการรังวัดมี ความแปรปรวนสูงจนทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าคลาดเคลื่อนกับระยะทางมีลักษณะที่ไม่ เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) จะทำให้ค่าเศษเหลือจากการประมาณค่าภายในช่วงที่คำนวณได้มีค่า มากกว่าเวลาที่ชั้นบรรยากาศสงบไม่มีความแปรปรวน จึงทำให้สามารถนำค่าเศษเหลือมาใช้เป็นดัชนี ที่แสดงถึงคุณภาพของค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอสแต่ละคู่ดาวเทียมได้

D. Prochniewicz et al. (2016) ได้คำนวณตัวชี้วัดคุณภาพ NBSM (Network-based stochastic model) มาจากค่าความถูกต้องของคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางซึ่งคำนวณได้จาก แบบจำลอง Variogram ของ Ordinary kriging ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าภายในช่วงที่จัดเป็นแบบ Geostatistics ที่มีจุดเด่นคือนอกจากแบบจำลองจะให้ค่าประมาณของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแล้วยัง สามารถให้ค่าความถูกต้องของค่าประมาณด้วย

Alves et al. (2005) ได้นำตัวชี้วัดคุณภาพ GBI (Geometry base indicator) ซึ่งเป็น ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของผลต่างของมุมเอียงของระนาบของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้น บรรยากาศ ระนาบที่นำมาใช้คำนวณค่าดัชนีได้แก่ ระนาบสามเหลี่ยมที่ล้อมรอบตำแหน่งสถานีผู้ใช้ และระนาบทั้งสามที่มีด้านติดกัน (การคำนวณค่าดัชนีต้องการสถานีฐานจำนวน 6 สถานีเป็นอย่าง น้อย) โดยค่าดัชนีที่ต่ำจะแสดงถึงความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศที่ไม่มาก

นอกจากการใช้ดัชนีเพื่อติดตามคุณภาพของโครงข่ายสถานีฐานจีเอ็นเอสเอส ในช่วงเวลาต่อมา อีกรังงานวิจัยที่มีแนวคิดที่นำดัชนีเพื่อติดตามคุณภาพมาใช้ในปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกของ การประมวลผลแบบจลน์ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นด้วยดังต่อไปนี้

Alves et al. (2006) ได้นำตัวชี้วัดคุณภาพ GBI มาใช้กับการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก ของการรังวัดด้วยโครงข่ายสถานีฐาน จากการทดสอบประมวลผลแบบโครงข่ายโดยใช้สถานีฐานใน การประมาณค่าภายในช่วงจำนวน 6 สถานีฐานที่มีระยะห่างระหว่างกันประมาณ 49 กิโลเมตรใน ประเทศเยอรมันแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงไม่สามารถลดค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลัง สองของตำแหน่งได้แต่อัตราความสำเร็จการหาเลขปริศนามีค่าเพิ่มขึ้น 0.2 เปอร์เซ็นต์

Prochniewicz et al. (2016) นำตัวชี้วัดคุณภาพ NBSM มาใช้กับการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกของการรังวัดด้วยโครงข่ายสถานีฐาน จากการทดสอบประมวลผลแบบโครงข่ายโดยใช้สถานีฐานในการประมาณค่าภายในช่วงจำนวน 13 สถานีฐานที่มีระยะห่างระหว่างกันประมาณ 50 กิโลเมตรในประเทศโปแลนด์แสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองทางราบได้ 3 มิลลิเมตร (30 %) และทางตั้งประมาณ 9 มิลลิเมตร (20 %) รวมทั้งอัตราความสำเร็จการหาเลขปริศนามีค่าเพิ่มขึ้น 7 เปอร์เซ็นต์

2) อัลกอริทึมของแบบจำลองสโตคาสติก RIU

แบบจำลองสโตคาสติก RIU จะสมมุติให้ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางถูกจำลองอยู่ในลักษณะเป็นระนาบ (Plane) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของการประมาณค่าภายในช่วง 2 ค่าได้แก่ตามแนวแกนทิศตะวันออก-ตกและแนวแกนทิศเหนือ-ใต้ เรียกโดยย่อว่าค่าคงที่ a, b ตามลำดับ จะได้สมการเชิงเส้นในการประมาณค่าภายในช่วงของแต่ละคู่ดาวเทียมดังนี้

$$R_{1,q,r}^{ij} = \begin{bmatrix} R_{1,2,r}^{ij} \\ \vdots \\ R_{1,n,r}^{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_{1,2} & \Delta N_{1,2} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta E_{1,n} & \Delta N_{1,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

เมื่อ

$R_{1,q,r}^{ij}$ คือค่าเศษเหลือของค่าต่างครั้งที่สองของค่าเฟสดาวเทียมคลื่น r ระหว่างสถานีฐาน 1, q และคู่ดาวเทียม i, j เมื่อ r คือคลื่น L1 หรือ L2 โดยกำหนดให้สถานีฐานหมายเลข 1 เป็นสถานีฐานอ้างอิง และ q เป็นสถานีฐานหมายเลข 2 ถึง n เมื่อ n คือจำนวนสถานีฐาน (โดยที่เวกเตอร์ $R_{1,q,r}^{ij}$ สามารถคำนวณค่าได้ตามหัวข้อ 2.2.2)

$\Delta E_{1,q}$ $\Delta N_{1,q}$ คือค่าต่างของค่าพิคักระหว่างสถานีฐานหมายเลขที่ 1 ซึ่งมีสถานีฐานอ้างอิง กับสถานีฐานหมายเลขที่เหลือ q (สถานีฐานหมายเลข 2 ถึง n)

หากเขียนสมการข้างต้นอย่างย่อคือ $R = BX$ และ P คือเมทริกซ์การให้น้ำหนักค่าสังเกตของการปรับแก้ลิสต์สแควร์ กำหนดให้เป็นส่วนกลับของระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐานอ้างอิงหลัก (Master station) ถึงสถานีฐานแต่ละจุด จะสามารถปรับแก้สมการลิสต์สแควร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ a, b ของแต่ละคู่ดาวเทียม ได้ดังนี้

$$X = (B^T P B)^{-1} B^T P R \quad (2-31)$$

เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าพารามิเตอร์ (Covariance matrix of parameter: Q_x) ซึ่งแสดงถึงค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์ a, b สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_x = \sigma_0^2 (B^T P B)^{-1} \quad (2-32)$$

เมื่อ ค่า Unit variance (σ_0^2) มีค่าเท่ากับ $\sigma_0^2 = \frac{v^T P v}{s-3}$ (2-33)

v คือค่าเศษเหลือของค่าสังเกต; s คือจำนวนคู่ดาวเทียม,

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ X และหาค่าเมทริกซ์ผลต่างของค่าพิกัดระหว่างสถานีฐาน 1, v จะได้ว่า $E = [\Delta E_{1,v} \Delta N_{1,v}]$ ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางที่ตำแหน่งสถานีฐานวีอาร์เอสจะเท่ากับ

$$R_{1,v}^{ij} = E X \quad (2-34)$$

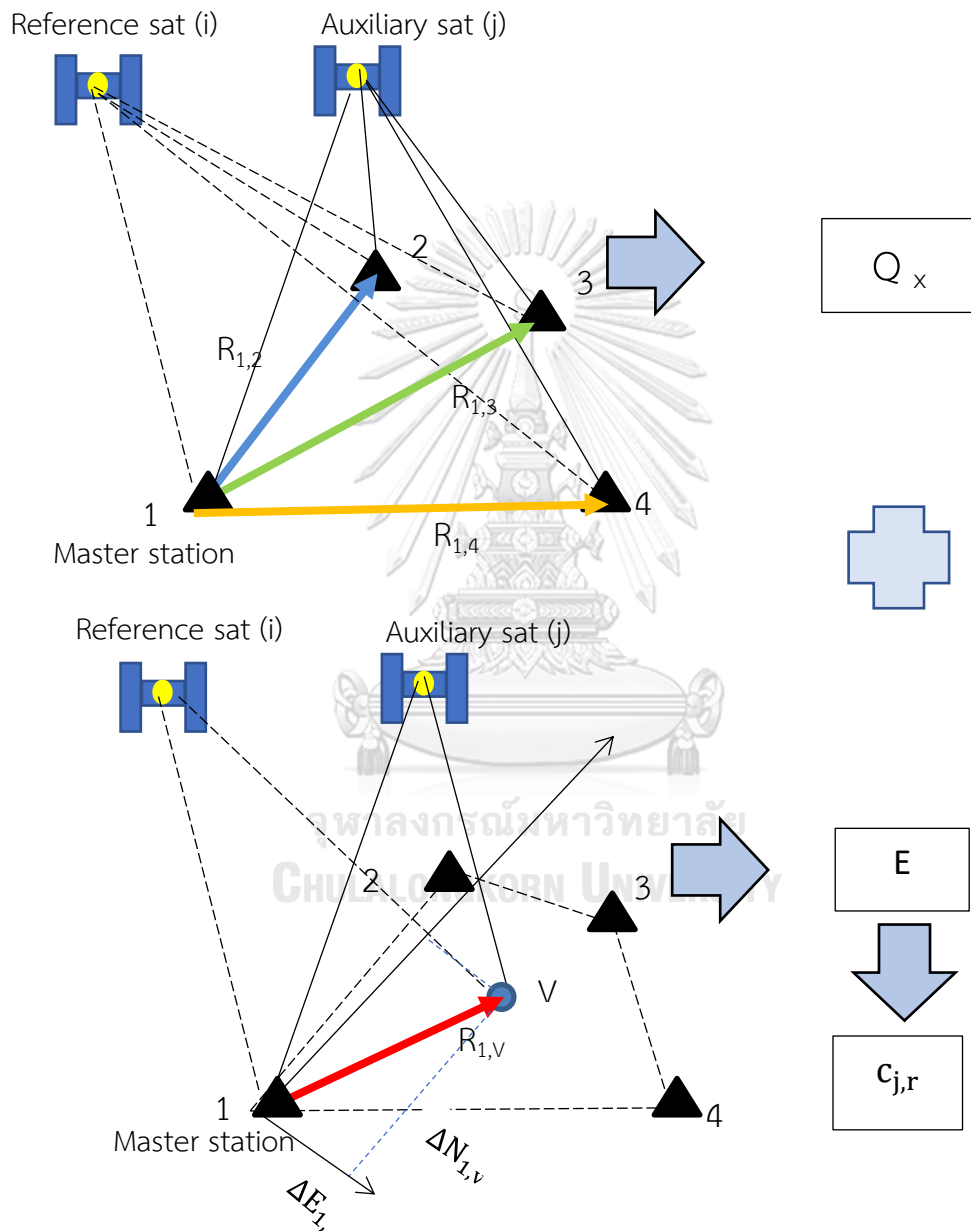
ซึ่งจากกฎการแพร่ ค่าต่างที่สองของค่าคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งสถานีฐานวีอาร์เอสของแต่ละคู่ดาวเทียมที่คำนวณได้จะมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ

$$C_{j,r} = E Q_x E^T \quad (2-35)$$

เมื่อ j หมายถึงคู่ดาวเทียมที่กำลังพิจารณาและ r หมายถึงคลื่น L1 หรือ L2

ดังนั้นเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนในรูปเมทริกซ์เป็นดังนี้

$$C_{RIU} = \text{diagonal} [C_{1,1}, C_{2,1}, \dots, C_{s,1}, C_{1,2}, C_{2,2}, \dots, C_{s,2}] \quad (2-36)$$



รูปที่ 2-8 กราฟิกแสดงการหาค่าความแปรปรวนของค่าแก้ไขแต่ละคู่ดาวเทียมและความถี่

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประมวลผลเส้นฐานระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอส กับสถานีผู้ใช้ หากเราตั้งสมมุติฐานว่าค่าต่างครั้งที่สองระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอสกับสถานีผู้ใช้ของแต่ละคู่ดาวเทียมมีค่าความแปรปรวนที่ไม่เท่ากันและแพร่กระจายมาจากความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของสองกระบวนการ ได้แก่ 1) การคำนวณสถานีฐานวีอาร์เอสโดยฝั่งแม่ข่าย 2) การใช้เทคนิคค่าต่างที่สองการวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสโดยฝั่งสถานีผู้ใช้ ซึ่งจากกฎการแพร่ แบบจำลองสโตคาสติกสามารถอธิบายในรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

$$C_L = C_{RIU} + C_D \quad (2-37)$$

$$= \begin{bmatrix} q_1 & q_i & \dots & q_i & 0 & \dots & \dots & 0 \\ q_i & q_2 & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & q_i & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_i & \dots & q_i & q_s & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & q_1 & q_i & \dots & q_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & q_i & q_2 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & q_i \\ 0 & \dots & \dots & 0 & q_i & \dots & q_i & q_s \end{bmatrix}$$

เมื่อ C_L คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนรวมของค่าต่างครั้งที่สองระหว่างสถานีฐานวีอาร์เอสกับค่าการวัดของสถานีผู้ใช้

C_{RIU} คือ เมทริกซ์ตัวชี้วัดคุณภาพของค่าต่างที่สองของค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง (คำนวณจากฝั่งแม่ข่าย)

C_D คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนรวมของค่าต่างครั้งที่สองการวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสซึ่งสร้างจากแบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมที่ใช้สูตรการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสดาวเทียมของโปรแกรม Bernese GPS

โดยที่

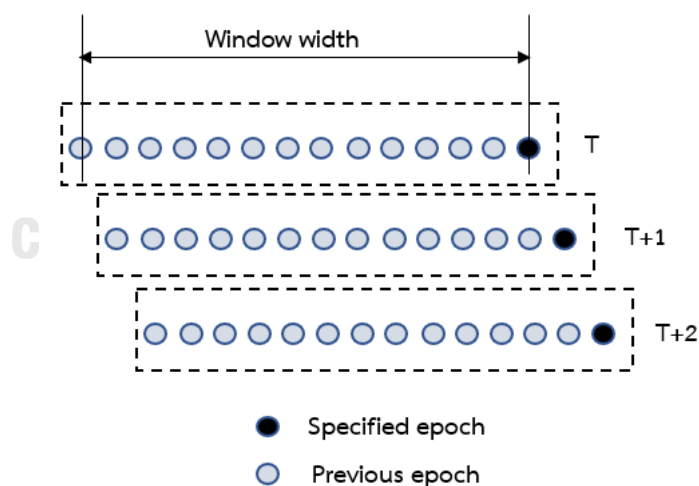
$$q_i = \frac{2\sigma^2}{(\sin \theta_{ref})^2}, \quad q_j = \frac{2\sigma^2}{(\sin \theta_j)^2} + \frac{2\sigma^2}{(\sin \theta_{ref})^2} + C_{j,r}$$

θ_{ref} คือมุมยกของดาวเทียมอ้างอิง (Reference satellite)

θ_j คือมุมยกของดาวเทียมที่เป็นคู่ดาวเทียม (Auxiliary satellite)

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโปรแกรมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองสโตคาสติก

เพื่อที่จะทดสอบประสิทธิภาพของการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก ในงานวิจัยนี้ได้เขียนโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อประมวลผลเส้นฐานด้วยข้อมูลจีพีเอสแบบสองความถี่ (L1/L2) โดยใช้สมการค่าต่างครั้งที่สองเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการปรับแก้ลิสต์สแควร์ ร่วมกับการเขียนโปรแกรมในส่วนของแบบจำลองสโตคาสติกตามทฤษฎีในบทที่ 2 ได้แก่ แบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน, แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม, แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE และแบบจำลองสโตคาสติก RIU สำหรับการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์เพื่อให้ได้ค่าพิกัดผลลัพธ์ในแต่ละ epoch (Epoch-to-EPOCH solution) ได้ใช้เทคนิคมูฟวิงวินโดว์ (Moving window) ในการคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ของ epoch ที่สนใจดังรูปที่ 2-9 เทคนิคนี้จะใช้ค่าการวัดดาวเทียมของ epoch ที่อยู่ในวินโดว์ในการคำนวณค่าพิกัด โดยวินโดว์จะเริ่มต้นจาก epoch ที่กำลังพิจารณาถอยหลังนับจาก epoch ที่สนใจไปถึง epoch ก่อนหน้ามีจำนวนเท่ากับความกว้างของวินโดว์ที่กำหนดไว้ ในขณะที่การคำนวณค่าพิกัดของ epoch ต่อไปจะเป็นการนำข้อมูลค่าการวัดดาวเทียมของ epoch ล่าสุดเพิ่มเข้ามาในวินโดว์และตัดค่าการวัดดาวเทียมของ epoch ที่ผ่านมานานที่สุดออกจากวินโดว์จึงเสมือนกับวินโดว์มีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Srinuandee and Satirapod, 2015)



รูปที่ 2-9 รูปแสดงการใช้เทคนิคมูฟวิงวินโดว์ในการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์

นอกจากนี้โปรแกรมที่เขียนบนซอฟต์แวร์ MATLAB ที่ได้พัฒนาขึ้นได้นำซอร์สโค้ด LAMBDA ซึ่งพัฒนาโดยกลุ่มวิจัยจีเอ็นเอสเอสของมหาวิทยาลัย Delft University of Technology และมหาวิทยาลัย Curtin มาประกอบเข้าเพื่อใช้ในกระบวนการหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็ม โดยทาง

ผู้พัฒนาอัลกอริทึม LAMBDA ได้อนุญาตให้นำซอร์สโค้ด 2 ภาษาคอมพิวเตอร์ได้แก่ MATLAB และ Python ไปใช้ได้งานวิจัยของตนเองตามเงื่อนไขที่กำหนด (<https://www.tudelft.nl/citg/over-faculteit/afdelingen/geoscience-remote-sensing/research/lambda/lambda/>)

2.5 เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตคาสติก

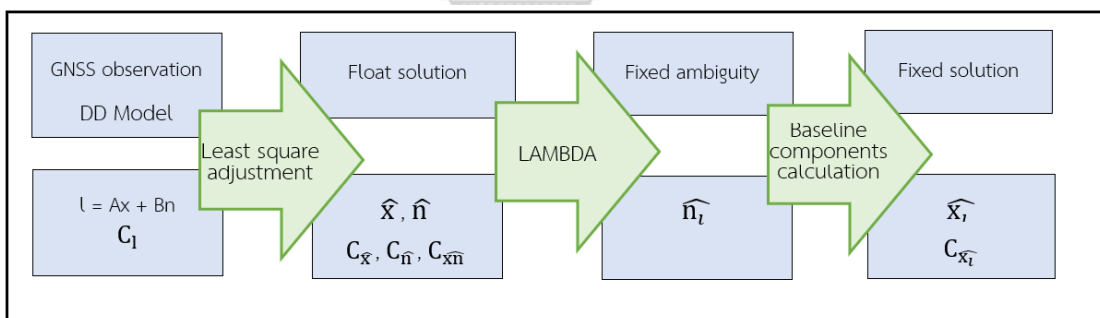
ในงานวิจัยนี้การประเมินว่าแบบจำลองสโตคาสติกที่ได้ปรับปรุงแล้วจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสได้หรือไม่จะใช้วิธีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติกที่เป็นมาตรฐาน (แบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน, แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม) โดยเกณฑ์ที่นำมาพิจารณามี 2 ข้อดังนี้

2.5.1 ความน่าเชื่อถือในการหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็ม

สำหรับงานที่ต้องการค่าความละเอียดถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตรจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการประมวลผล ซึ่งการวัดเฟสของคลื่นส่งในเครื่องรับเป็นการวัดเปรียบเทียบหรือค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมากับเฟสของคลื่นความถี่ f_0 ที่เครื่องรับสร้างขึ้นมา โดยคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมานั้นแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของคลื่นจำนวนเต็มรอบ (Integer cycle part) กับส่วนที่ไม่เต็มรอบ (Fractional part) ในการรับสัญญาณนั้นเครื่องรับสัญญาณไม่สามารถจะนับจำนวนเต็มรอบของคลื่นส่งที่ส่งลงมา จำนวนเต็มรอบสามารถหาค่าได้จากการคำนวณในภายหลัง โดยจำนวนเต็มนี้มีชื่อเรียกว่า Ambiguity หรือ เลขปริศนา สำหรับการหาระยะที่ละเอียดถูกต้องสูงจากการวัดระยะด้วยการวัดเฟสของคลื่นส่งของการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์แบบจลน์ในรูปแบบของค่าระยะทางระหว่างจุดสองจุดหรือที่เรียกว่า เส้นฐาน (Baseline) จึงจำเป็นต้องหาค่าเลขปริศนา (N) ซึ่งในทางทฤษฎีค่าเลขปริศนาจะต้องเป็นเลขจำนวนเต็มระหว่างข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง L1 และ L2 จะมีเลขปริศนาที่ต่างกัน และยังมีค่าต่างกันสำหรับคู่ดาวเทียมและเครื่องรับแต่ละคู่ (satellite-receiver pair) ค่าเลขปริศนาแต่ละค่าจะเป็นค่าคงที่ที่ทราบใดที่มีการรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องและไม่เกิดคลื่นหลุด การหาค่าเลขปริศนาเป็นขั้นตอนของการประมวลผลข้อมูล หลังจากที่ได้ขจัดค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ และซ่อมแซมคลื่นหลุดในข้อมูลแล้ว (ดูรายละเอียดค่าคลาดเคลื่อนแต่ละชนิดในภาคผนวก)

ดังนั้นความน่าเชื่อถือของกระบวนการหาค่าเลขปริศนาแบบจำนวนเต็ม (Ambiguity Resolution : AR) ซึ่งเป็นขั้นตอนของการนำค่าประมาณของเลขปริศนาที่เป็นเลขทศนิยมที่ได้มาจากการปรับแก้ลิสต์สแควร์มาคำนวณเพื่อค้นหาชุดของเลขปริศนาที่เป็นเลขจำนวนเต็มที่มีความน่าจะเป็นที่จะเป็นคำตอบที่ถูกต้องที่สุด จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ จากรูปที่ 3-2 องค์ประกอบเส้นฐาน (\hat{X}) ที่เป็นผลลัพธ์ของการปรับแก้สมการ

ค่าต่างครั้งที่สองด้วยลิสต์สแควร์ในขั้นตอนแรกเป็นการคำนวณโดยใช้ค่าเลขปริศนาที่เป็นเลขจำนวนจริง (\hat{n}) แต่ในความเป็นจริงแล้วเลขปริศนาของเฟสคลื่นส่งจะต้องเป็นจำนวนเต็ม (\hat{n}_i) ค่าพิกัดที่คำนวณได้ (Float solution) จะต้องผ่านการปรับแก้ที่เรียกว่ากระบวนการหาค่าเลขปริศนาแบบจำนวนเต็ม เพื่อที่จะให้ได้ค่าพิกัดผลลัพธ์ (\hat{x}_i) ที่มีความถูกต้องในระดับเซนติเมตรหรือดีกว่า (Fixed solution) อัลกอริทึมที่มีการใช้อย่างแพร่หลายได้แก่ LAMBDA (Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment method) ซึ่งเป็นการปรับแก้ลิสต์สแควร์แบบตั้งเงื่อนไขจำนวนเต็ม (Integer least-squares adjustment) โดยได้นำหลักการของความน่าจะเป็นมาใช้ในการค้นหา linear combination ของเลขปริศนาจำนวนเต็มที่จะให้ค่าผลรวมค่า Norm กำลังสองที่น้อยที่สุดของเวกเตอร์ของค่าเศษเหลือของเลขปริศนา (De Jonge and Tiberius, 1996) ในวารสารวิชาการนิยมเรียกเทคนิคการค้นหาเลขปริศนาแบบนี้ว่าอยู่ในประเภท Ambiguity domain search อัลกอริทึม LAMBDA ต้องการค่าประมาณขององค์ประกอบเส้นฐาน (\hat{x}), เลขปริศนาที่เป็นเลขจำนวนจริง (\hat{n}) และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของพารามิเตอร์ ($C_{\hat{x}}, C_{\hat{n}}, C_{\hat{x}\hat{n}}$) ที่มีความถูกต้องสูงในการคำนวณค้นหาชุดเลขปริศนาจำนวนเต็ม การที่จะได้มาซึ่งค่าประมาณที่มีความถูกต้องสูงจำเป็นจะต้องมีแบบจำลองสโตคาสติกที่สมจริง (Realistic stochastic model) ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้



รูปที่ 2-10 รูปแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็ม

สำหรับการทดสอบทางสถิติว่าจะยอมรับเลขปริศนาจำนวนเต็มที่คำนวณได้หรือไม่จะใช้ค่าบ่งชี้คุณภาพเป็นเกณฑ์ตัดสินได้แก่ Ambiguity ratio ซึ่งแสดงถึงความต่างระหว่างค่าเลขปริศนาที่เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดอันดับหนึ่งกับเลขปริศนาที่เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดอันดับสอง หากความแตกต่างระหว่างตัวเลือกที่หนึ่งและตัวเลือกที่สองมีมากย่อมแสดงให้เห็นความเป็นไปได้สูงที่ได้รับชุดเลขปริศนาของตัวเลือกที่หนึ่งที่มีความถูกต้อง ค่าบ่งชี้คุณภาพที่นิยมใช้ในงานวิจัยและซอฟต์แวร์ประมวลผลโดยทั่วไปได้แก่ ค่า F-ratio โดยค่า Threshold ที่ถูกใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าเลขปริศนาที่

คำนวณสามารถยอมรับได้หรือไม่มีค่าเท่ากับ 2-3 (Euler and Schaffrin, 1991) โดยค่า F-ratio สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F\text{-ratio} = \frac{R_2 + \omega}{R_1 + \omega} \quad (2-38)$$

เมื่อ R_1 R_2 คือผลรวมของกำลังสองของค่า Residual ของชุดเลขปริศนาที่ดีที่สุดอันดับ 1 และอันดับ 2 ; และ ω คือผลรวมของกำลังสองของค่า Residual ของค่าสังเกต

2.5.2 ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของสถานีผู้ใช้

ในงานวิจัยนี้ใช้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของค่าพิกัดผลลัพธ์ที่ผ่านกระบวนการหาเลขปริศนาสำเร็จแล้ว (Fixed solution) เป็นตัวชี้วัดการปรับปรุงประสิทธิภาพ หลังจากที่ได้เลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็มแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ในระดับ Fixed solution มีสูตรคำนวณดังต่อไปนี้

$$\hat{x}_i = \hat{X} - C_{xn} C_n^{-1} (\hat{n} - \hat{n}_i) \quad (2-39)$$

สำหรับวิธีการคำนวณความถูกต้องเชิงตำแหน่งโดยรวม (overall positional accuracy) ใช้การคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error : RMSE) ทางราบและทางตั้งระหว่างค่าพิกัดผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับค่าพิกัดอ้างอิงที่ทราบค่าของสถานีผู้ใช้ซึ่งเป็นค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูงระดับมิลลิเมตร ค่าพิกัดอ้างอิงที่ทราบค่าเป็นค่าพิกัดที่คำนวณมาจากการประมวลผลเสถียรแบบสถิติด้วยโปรแกรม Bernese GPS เพื่อให้ได้ความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับสูง (ระดับมิลลิเมตร) ได้มีการนำข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความถูกต้องสูง IGS แบบ Final, ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแรงเหวี่ยงจากการหมุนของโลก, ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจาก Differential code bias (DCB) ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม, ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากนาฬิกาดาวเทียม, ข้อมูลค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์แบบทั้งโลก และค่าพิกัดสถานีฐานของ IGS ที่ใช้เป็นจุดตรึงค่าพิกัดมาร่วมประมวลผลเสถียรกับข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแบบรายวัน (Daily Solution) เป็นเวลา 7 วัน และนำมาหาค่าเฉลี่ยของค่าพิกัด (Charoenkalunyuta et al., 2012)

บทที่ 3

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE

จากหัวข้อที่ 2.3.1 และ 2.3.2 ได้กล่าวถึงแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันว่าเป็นแบบจำลองสโตคาสติกที่ง่ายที่สุด ในขณะที่แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมว่าเป็นแบบจำลองสโตคาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดในซอฟต์แวร์ประมวลผลจีเอ็นเอสเอส เนื่องด้วย Empirical formula ในการคำนวณไม่ได้มีความซับซ้อนจนเกินไป อย่างไรก็ตามหากนำมาเป็นแบบจำลองสโตคาสติกของการประมวลผลดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสโดยไม่ได้มีการปรับปรุงนั้นมีความไม่สมเหตุผล เนื่องจากไม่ได้ให้น้ำหนักของค่าสังเกตสอดคล้องกับความไม่แน่นอนของการคำนวณแบบโครงข่ายที่มีหลายขั้นตอน ได้แก่ ความไม่แน่นอนของการหาเลขปริศนาระหว่างสถานีฐาน, ความไม่แน่นอนของการประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ วิธีทางสถิติ MINQUE จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เนื่องจากสามารถใช้ค่า residuals ของค่าสังเกตซึ่งสามารถสะท้อนถึงความไม่แน่นอนของปัจจัยข้างต้นมาคำนวณค่าความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมได้อย่างครบถ้วน อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา (Musa et al., 2003) ยังจำกัดอยู่กับการประมวลผลแบบสถิติที่มีจำนวน epoch ต่อ 1 ชุดข้อมูล (Batch) มาก (ระดับ 100 epoch ขึ้นไป) นอกจากนี้ข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสที่เคยใช้ทดสอบเป็นเพียงข้อมูลเฟสหนึ่งความถี่ (L1) ทำให้ไม่ครอบคลุมถึงค่าความแปรปรวนร่วมระหว่างความถี่ของคลื่นส่ง งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีทางสถิติ MINQUE มาทดสอบกับข้อมูลจีพีเอสสองความถี่ (L1, L2) ในการประมวลผลแบบจลน์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันการทำงานหลักของการรังวัดด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส โดยเนื้อหาของบทที่ 3 จะเริ่มต้นด้วยการอธิบายขั้นตอนการสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอส ต่อด้วยการหาความกว้างวินโดว์ที่เหมาะสมกับวิธี MINQUE ด้วยการทดสอบประมวลผลแบบ batch และหัวข้อสุดท้ายอธิบายถึงขั้นตอนการทดสอบประมวลผลแบบจลน์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE กับแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐาน

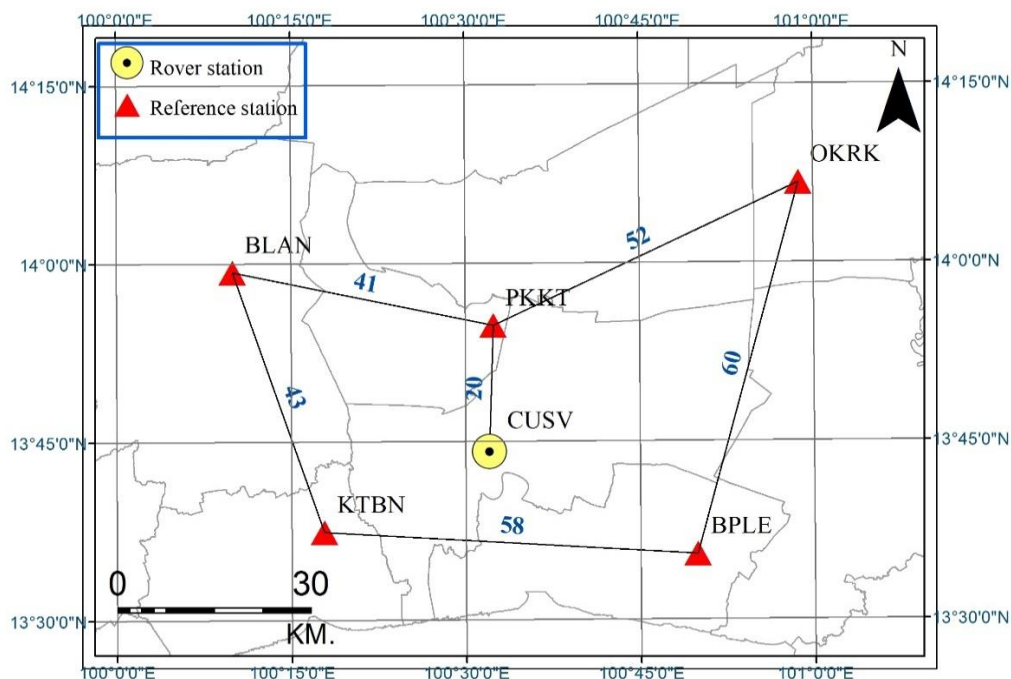
3.1 ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอส

ขั้นตอนนี้เป็นการนำข้อมูลสถานีฐานที่บันทึกอยู่ในรูปแบบไฟล์ RINEX มาจำลองเป็นโครงข่ายสถานีฐานเพื่อประมวลผลสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอสที่บริเวณใกล้กับค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้ด้วยโปรแกรม Trimble Total Control ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ทำหน้าที่สร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอส ตามขั้นตอน 2.2.1-2.2.4 มีรายละเอียดดังนี้

1) ใช้ข้อมูลสถานีฐานจีเอ็นเอสเอส จำนวน 6 สถานีฐาน ดังรูปที่ 3-1 รับข้อมูลดาวเทียม วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 เวลา 3.00 - 8.00 น. มีอัตราการรับข้อมูลดาวเทียม (Observation rate) เท่ากับ 30 วินาที โดยกำหนดมุมยกดาวเทียมที่น้อยที่สุด (Cut-off Angle) เท่ากับ 10 องศา ทั้งนี้สถานีฐานทั้ง 6 สถานีมีที่ตั้งอยู่บริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง ในการทดสอบจะกำหนดให้สถานีฐาน KTBN, BPLE, OKRK, PKKT, BLAN จำนวน 5 สถานีฐานของกรมที่ดินซึ่งมีระยะห่างระหว่างสถานีฐานประมาณ 50 กิโลเมตรทำหน้าที่เป็นโครงข่ายสถานีฐานที่ใช้ในการสร้างสถานีฐานวีอาร์เอส ในขณะที่สถานีฐาน CUSV ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งตั้งอยู่บริเวณระหว่างกลางของสถานีฐานของกรมที่ดินถูกจำลองเป็นสถานีผู้ใช้

2) ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงแบบ Ultra-rapid ที่ความถูกต้องของวงโคจรประมาณ 3 เซนติเมตร ของหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) ในการลดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจร (<https://www.igs.org/products>)

3) ใช้ค่าพิกัดสถานีฐานที่มีความถูกต้องสูงในระดับมิลลิเมตรของสถานีฐาน KTBN, BPLE, OKRK, PKKT, BLAN (รายละเอียดตามหัวข้อ 2.5.2) ในการคำนวณโครงข่ายสถานีฐาน และค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูงในระดับมิลลิเมตรของสถานีฐาน CUSV ถูกใช้ในการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการคำนวณค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้



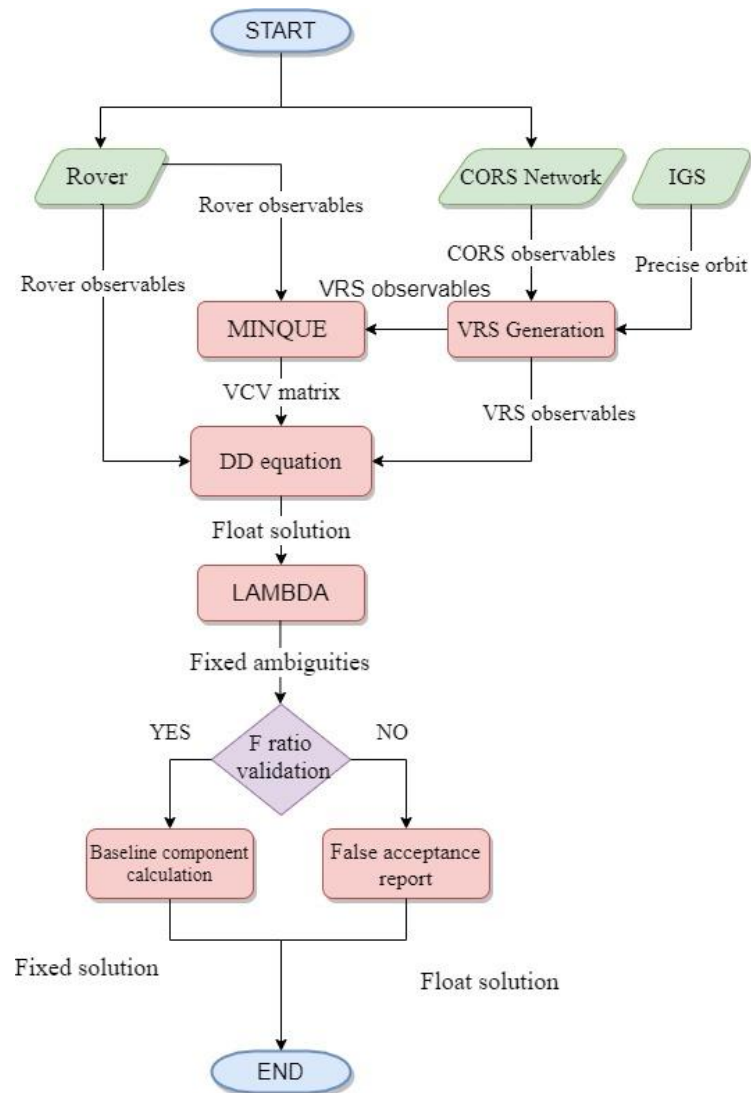
รูปที่ 3-1 รูปแสดงสถานีฐานที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE

3.2 ขั้นตอนการหาความกว้างวินโดว์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE

เนื่องด้วยแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าหากการประมวลผลพื้นฐานด้วยข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่มีจำนวน epoch ต่อ 1 solution ที่มากพอที่จะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนมีระบบโดยส่วนใหญ่ออกไปได้ ค่าเศษเหลือของค่าการวัดจีเอ็นเอสเอสของการปรับแก้สี่ทศวรรษจึงจะสามารถนำมาใช้คำนวณค่าความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมได้ ทำให้เกิดข้อจำกัดที่จะต้องใช้ epoch จำนวนมากต่อ 1 solution ในการหาเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม การที่จะทราบว่าแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE จะสามารถนำไปใช้กับการประมวลผลแบบจลน์ด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสได้หรือไม่ จะต้องทราบจำนวน epoch ต่อ 1 solution ที่แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE จะสามารถเกิดการวนซ้ำที่ลู่เข้าหาคำตอบ (convergence) ได้เสียก่อนว่ามีขนาดเท่าไร เนื่องจากการประมวลผลแบบจลน์ในงานศึกษานี้ใช้เทคนิคมูฟวิงวินโดว์ (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4) การคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ในแต่ละมูฟวิงวินโดว์ถือเป็น 1 solution ดังนั้นการหาความกว้างวินโดว์ที่เหมาะสมจะใช้วิธีการแบ่งข้อมูลดาวเทียมออกเป็นชุดข้อมูล (batch) ที่มีจำนวน epoch แตกต่างกันไป แล้วนำไปทดสอบประมวลผลพื้นฐานมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

- 1) ทำการสุ่มแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) เพื่อหาความกว้างวินโดว์ที่น้อยที่สุดที่จะทำให้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE สามารถลู่เข้าหาคำตอบได้ (Convergence) โดยแบ่งข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอสกับสถานีผู้ใช้ CUSV ออกเป็นชุดข้อมูลที่มีความกว้างขนาดต่าง ๆ กลุ่มละ 30 ชุดข้อมูล จากนั้นประมวลผลพื้นฐานระหว่างสถานีผู้ใช้ CUSV กับสถานีฐานวีอาร์เอสด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นบนซอฟต์แวร์ MATLAB มีลำดับตามผังแสดงขั้นตอนที่เรียกว่าการประมวลผลแบบ batch ดังแสดงในรูปที่ 3-2 เริ่มต้นด้วยการใช้เทคนิคค่าต่างที่สอดคล้องกับแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE เพื่อให้ได้คำตอบแบบ Float solution ขึ้นต่อไปเป็นการนำผลลัพธ์ Float solution และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของพารามิเตอร์ไปคำนวณหาชุดเลขปริศนาที่ดีที่สุดด้วย LAMBDA และตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเลขปริศนาด้วยค่าดัชนี F-ratio หากผ่านเงื่อนไขว่าค่า F-ratio มีค่ามากกว่า 3 จะจำแนกว่ากระบวนการหาเลขปริศนาของชุดข้อมูลนั้นมีผลสำเร็จ (Euler and Schaffrin, 1991) หากการหาเลขปริศนามีผลสำเร็จจะคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ที่เรียกว่า Fixed solution ด้วยสูตรปรับแก้ 9 ตามสมการ 2-39 ในทางตรงกันข้ามหากการหาเลขปริศนาไม่สำเร็จจะถือว่าคำตอบเป็นแบบ Float solution ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าเมื่อกำหนดให้ความกว้างของวินโดว์มีขนาดตั้งแต่ 13 epoch ขึ้นไป การปรับแก้สี่ทศวรรษของแบบจำลอง MINQUE สามารถเกิดการวน

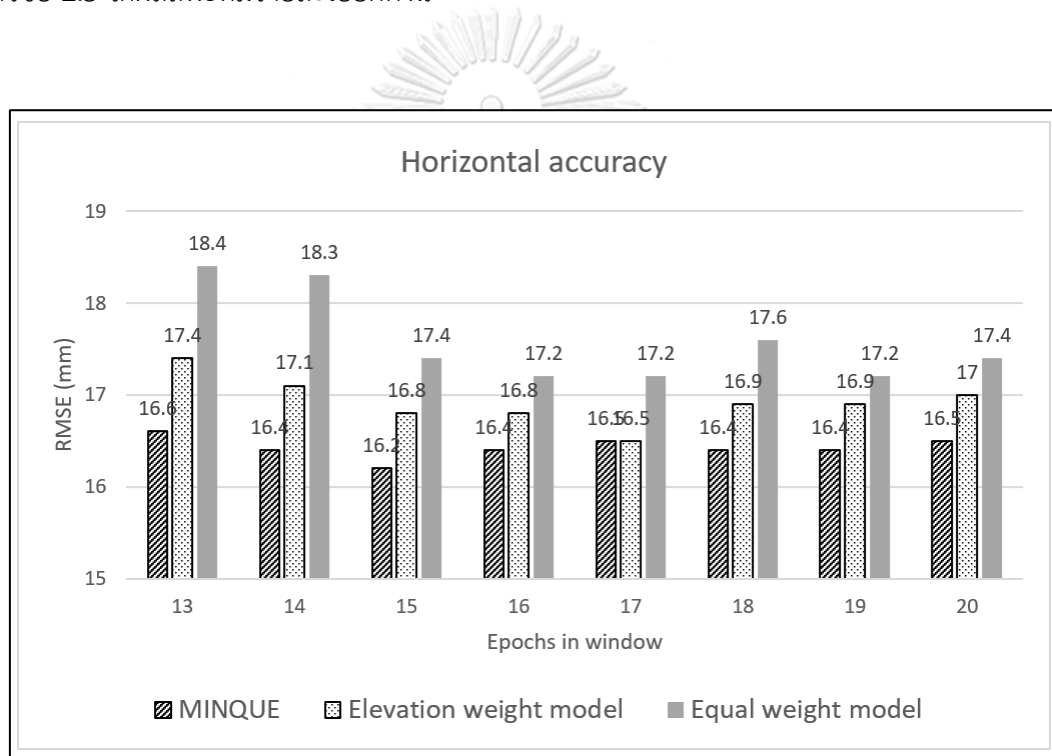
ซ้ำที่ลู่เข้า (Convergence) ได้ทั้งหมดทุกชุดข้อมูล จึงถือได้ว่าความกว้าง 13 epoch เป็นความกว้างของวินโดว์ที่น้อยที่สุดที่สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE



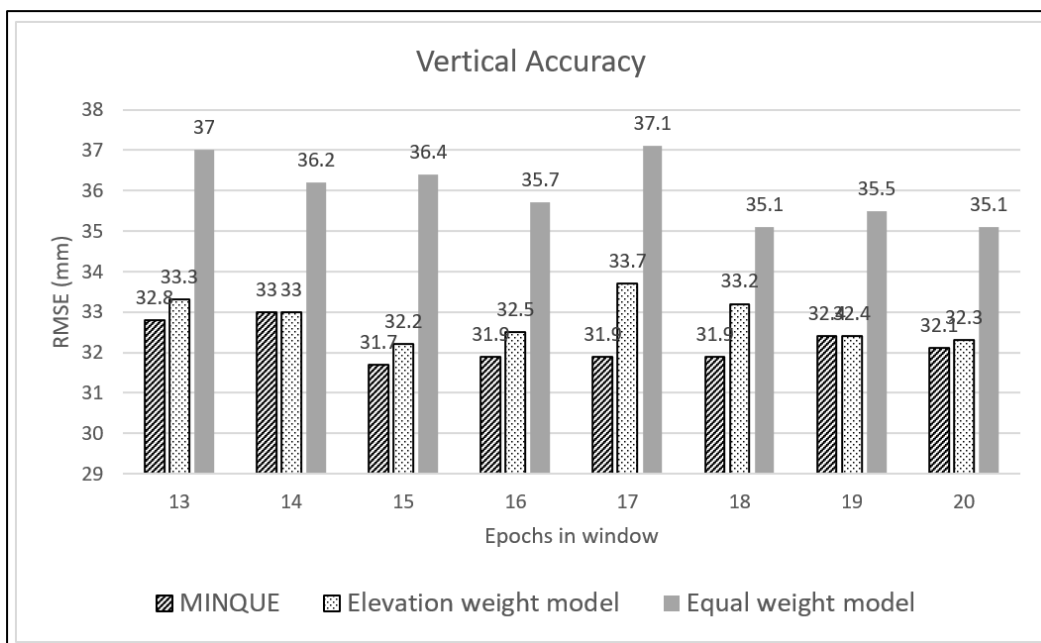
รูปที่ 3-2 ผังแสดงขั้นตอนการประมวลผลแบบ batch ร่วมกับแบบจำลอง MINQUE

2) เมื่อได้ทราบว่าความกว้างวินโดว์ที่น้อยที่สุดเท่ากับ 13 epoch แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการหาความกว้างวินโดว์ที่เหมาะสมที่จะนำแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE ไปประยุกต์ใช้กับการประมวลผลแบบจลน์ โดยได้ทดสอบประมวลผลแบบ batch เริ่มต้นตั้งแต่ความกว้างวินโดว์ 13 epoch ขึ้นไปจนถึงความกว้างวินโดว์ 20 epoch ซึ่งคาดหวังว่าผลลัพธ์ขององค์ประกอบเส้นฐานที่ได้จะเริ่มมีค่าคงที่ ความกว้างวินโดว์ละ 30 session รวม 240 session นอกจากนี้เพื่อจะให้นักศึกษา

สามารถครอบคลุมถึงการรังวัดสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid static) ซึ่งเป็นอีกฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส โดยเป็นการหาค่าพิกัดผลลัพธ์ด้วยการประมวลผลภายหลัง (Post processing) แบบ batch ดังนั้นจึงทดสอบประมวลผลเส้นฐานเช่นเดียวกับการใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE อีกครั้งแต่เปลี่ยนจากการใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE มาเป็นแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันและแบบจำลองที่ขึ้นกับมุกดาวเทียมเพื่อนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE กับแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐานทั้งสองสำหรับการรังวัดสถิตอย่างรวดเร็ว ตามเกณฑ์ประเมินในหัวข้อ 2.5 ได้ผลลัพธ์ที่มีรายละเอียดดังนี้



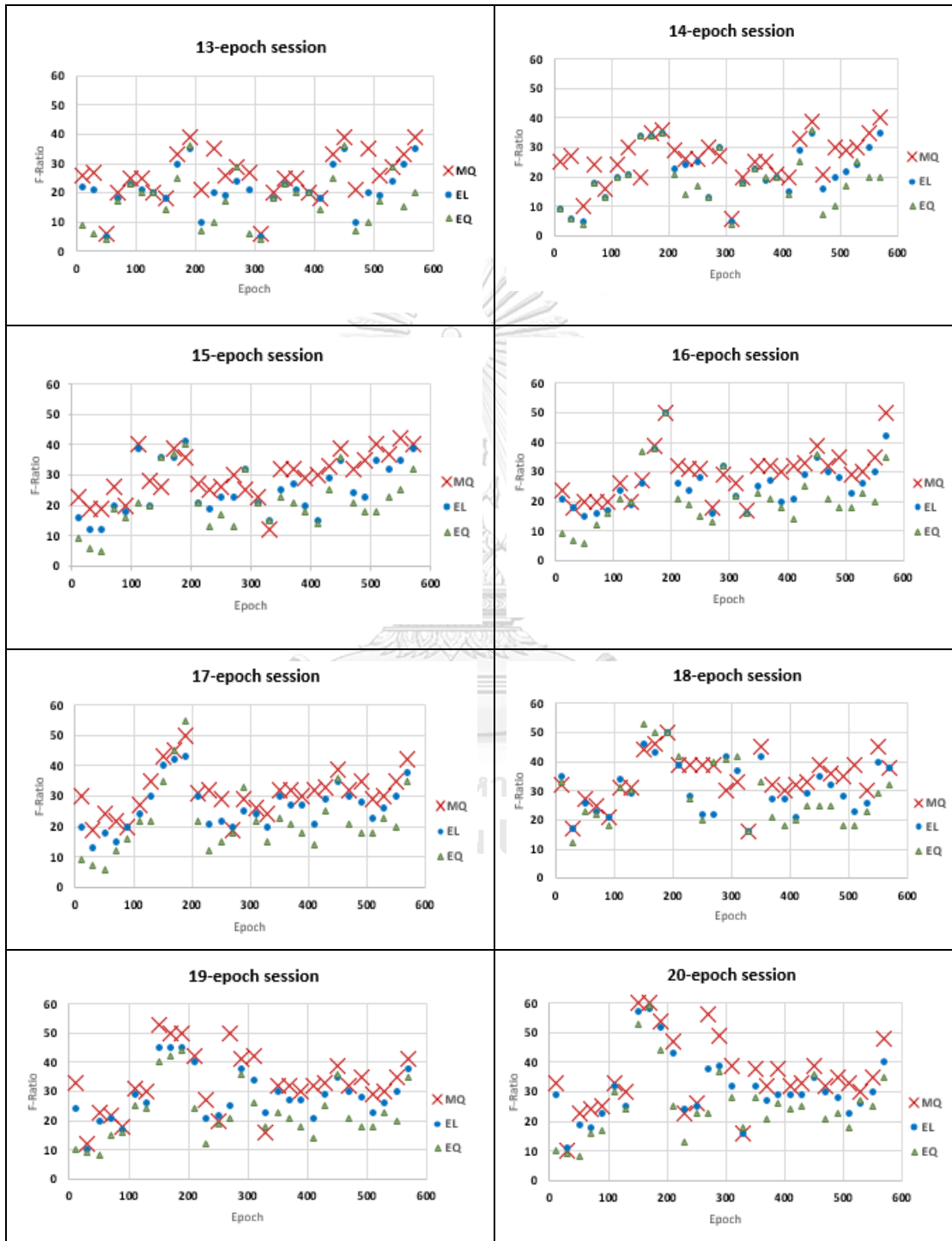
รูปที่ 3-3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ทางราบของการประมวลผลแบบ batch ร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามแบบที่มีความกว้างวินโดว์ตั้งแต่ 13-20 epoch



รูปที่ 3-4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ทางตั้งของการประมวลผลแบบ batch ร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามแบบที่มีความกว้างวินโดว์ตั้งแต่ 13-20 epoch

จากรูปที่ 3-3 เป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า RMSE ทางราบขององค์ประกอบเส้นฐานของกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE กับกรณีที่ใช้แบบจำลองมาตรฐานทั้งสองแบบที่แต่ละความกว้างวินโดว์ จะเห็นได้ว่าค่า RMSE ทางราบของกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE มีความใกล้เคียงกันในระดับเศษของมิลลิเมตรตั้งแต่ความกว้าง 13 epoch เป็นต้นไป และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติกที่เป็นมาตรฐานพบว่าแบบจำลอง MINQUE ให้ค่า RMSE ทางราบที่ต่ำกว่าแบบจำลองมาตรฐานทั้งสองแบบแทบทุกความกว้างวินโดว์ ยกเว้นกรณีที่ใช้ความกว้างวินโดว์ 17 epoch ที่ให้ค่า RMSE ทางราบเท่ากับแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณารูปที่ 3-4 เป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า RMSE ทางตั้งขององค์ประกอบเส้นฐานของกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE กับกรณีที่ใช้แบบจำลองมาตรฐานทั้งสองแบบพบว่าในขณะค่า RMSE ทางตั้งจะมีความใกล้เคียงกันในระดับเศษของมิลลิเมตรตั้งแต่ความกว้าง 15 epoch เป็นต้นไป และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติกที่เป็นมาตรฐานพบว่าแบบจำลอง MINQUE ให้ค่า RMSE ทางตั้งที่ต่ำกว่าแบบจำลองมาตรฐานทั้งสองแบบแทบทุกกรณี ยกเว้นความกว้างวินโดว์ 14 epoch ที่ให้ค่า RMSE ทางตั้งเท่ากับแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม โดยที่ความกว้างวินโดว์ที่ 15 epoch สามารถให้ค่า RMSE ที่มีค่าน้อยที่สุดทั้งทางราบและทางตั้ง

จากผลการทดสอบจึงสรุปว่าความกว้างของวินโดว์เท่ากับ 15 epoch เป็นความกว้างที่มีความเหมาะสมที่สุด

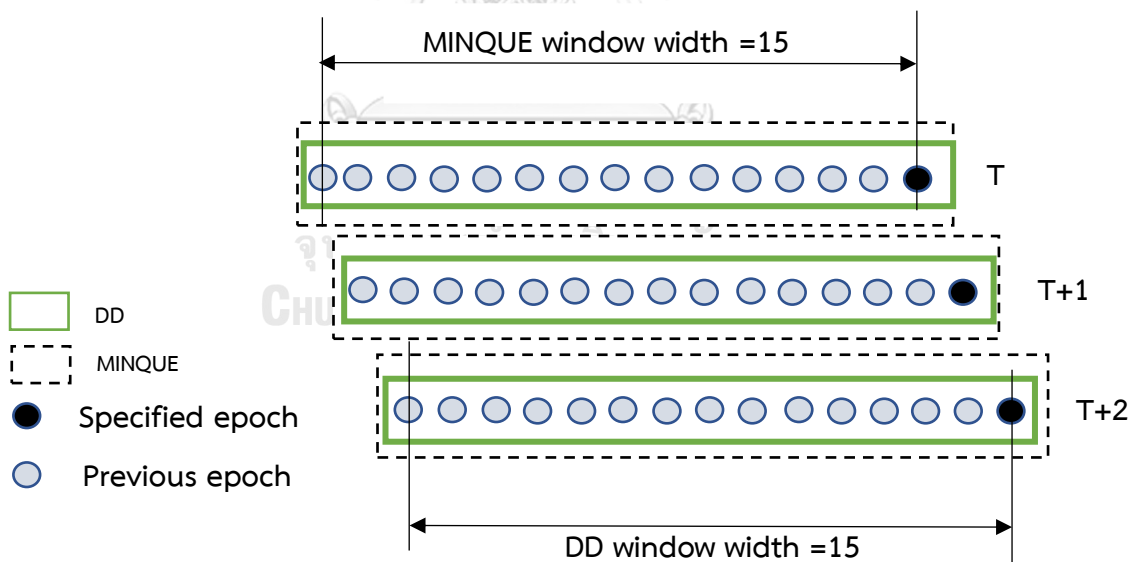


รูปที่ 3-5 กราฟแสดงค่า F-Ratio แยกตามความกว้างของวินโดว์ตั้งแต่ 13-20 epoch

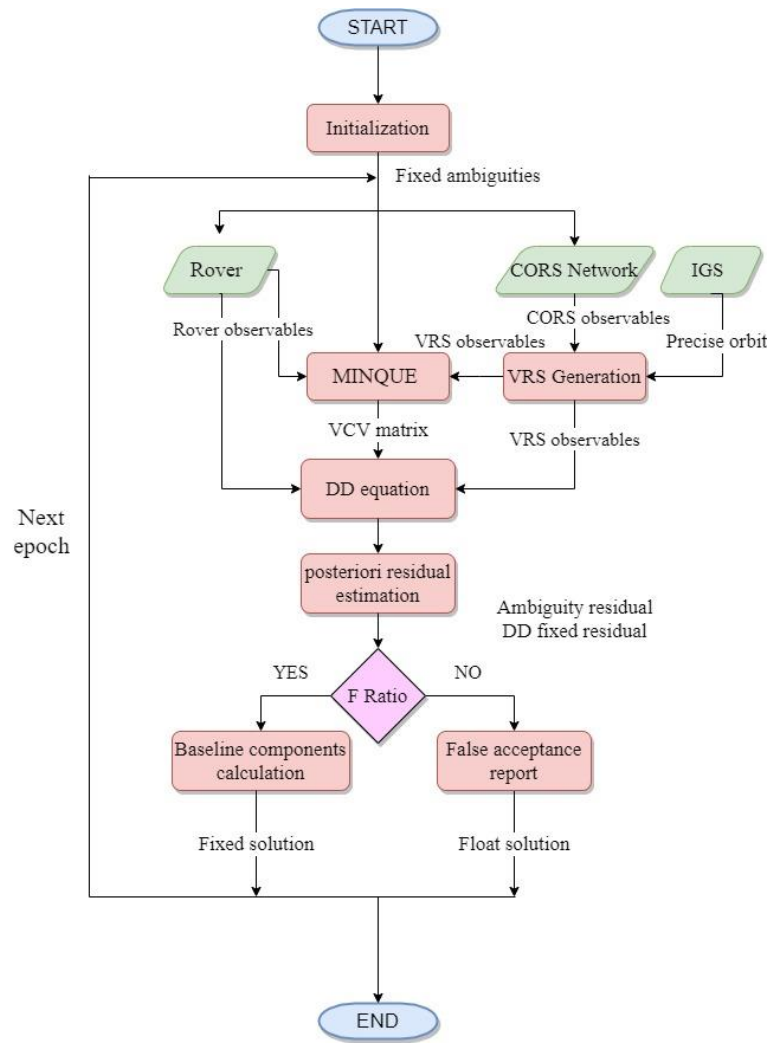
จากรูปที่ 3-5 เมื่อพิจารณาถึงค่า F-Ratio ของการประมวลผลแต่ละ session แยกตามความกว้างวินโดว์ (13-20 epoch) พบว่าค่า F-Ratio ของแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามแบบมีแนวโน้มที่ค่อนข้างชัดเจนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้วินโดว์ที่มีความกว้างมากกว่า และเมื่อใช้เงื่อนไขค่า Threshold F-Ratio > 3 (Euler and Schaffrin, 1991) พบว่าการประมวลผลเส้นฐานร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามให้อัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนาเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ได้เช่นเดียวกันในทุก session ของความกว้างวินโดว์ อย่างไรก็ตามการที่แบบจำลอง MINQUE มี session ที่มีค่า F-Ratio มากที่สุดเป็นจำนวน 228 session จากทั้งหมด 240 session แสดงถึงความน่าเชื่อถือของการหาเลขปริศนาที่เพิ่มขึ้น

3.3 ขั้นตอนการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์

ในขั้นตอนนี้เป็นการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์เพื่อหาค่าองค์ประกอบเส้นฐานจำนวน 600 epoch โดยใช้มูฟวิงวินโดว์ที่มีความกว้าง 15 epoch ซึ่งเป็นความกว้างที่เหมาะสมจากผลทดสอบของขั้นตอนที่แล้วดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 มูฟวิงวินโดว์ของเทคนิคค่าต่างที่สองและแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE



รูปที่ 3-7 ผังแสดงขั้นตอนการประมวลผลแบบจลน์ผลร่วมกับแบบจำลอง MINQUE

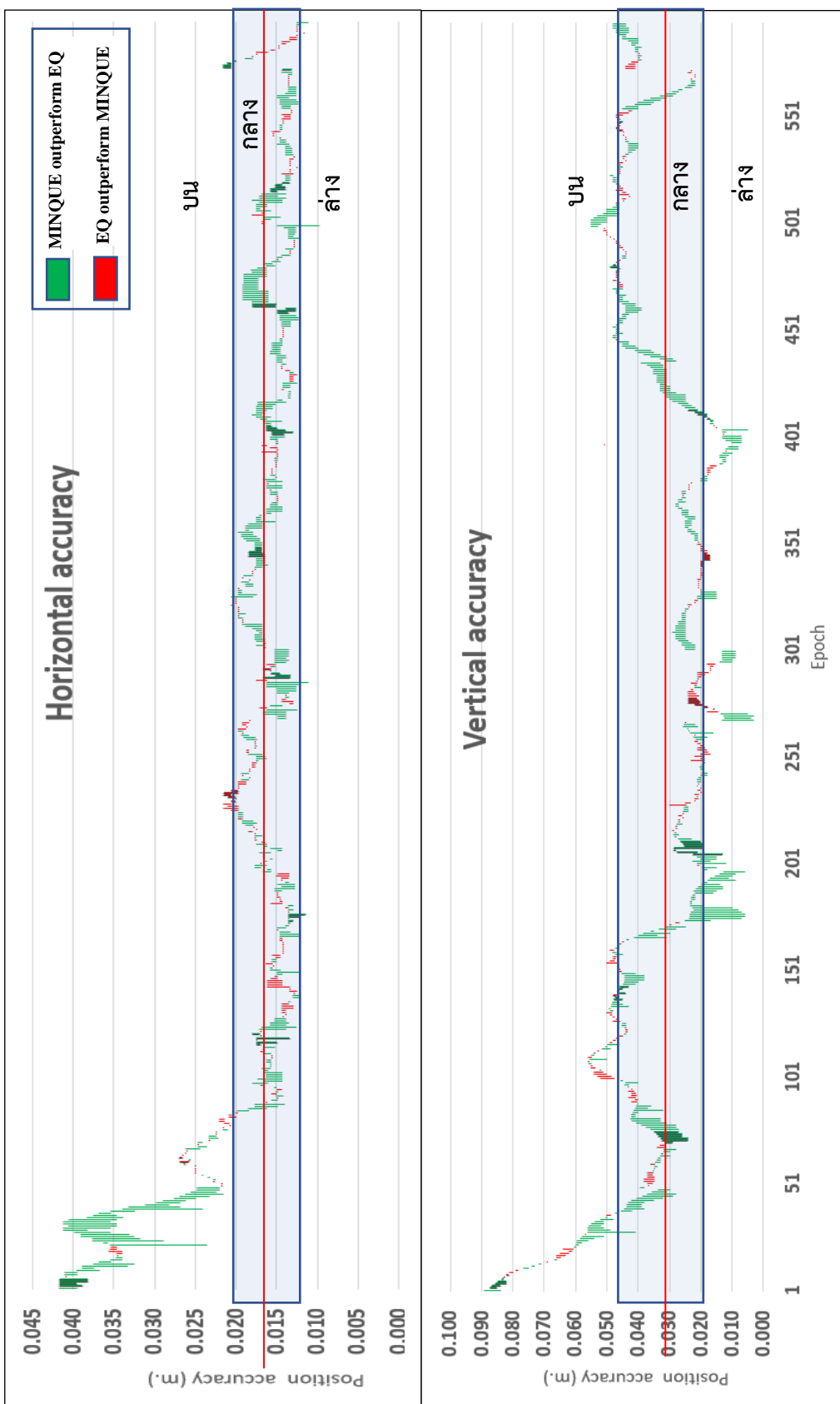
การออกแบบวิธีทดสอบถูกกำหนดให้เป็นไปดังผังขั้นตอนในรูปที่ 3-7 เริ่มต้นด้วยการใช้ช่วงเวลาจำนวน 20 epoch ในช่วงเริ่มต้น (Initialization time) เพื่อคำนวณเลขปริศนาจำนวนเต็ม (Fixed ambiguities) การคำนวณในช่วงเริ่มต้นนั้นจะเป็นการประมวลผลแบบ batch โดยจำลองว่าเป็นการรังวัดแบบสถิตซึ่งเครื่องรับของสถานีผู้ใช้อยู่นิ่งไม่มีการเคลื่อนที่มีขั้นตอนการคำนวณดังรูปที่ 3-2 ต่อจากนั้นจะเป็นการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐานแบบจลน์ในแต่ละ epoch ด้วยเทคนิคมูฟวิงวินโดวในหัวข้อที่ 2.4 ในการคำนวณของแต่ละมูฟวิงวินโดวประกอบด้วยการใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สองของค่าวัดเฟสดาวเทียม L1 และ L2 ระหว่างสถานีฐานว็อาร์เอสกับสถานีผู้ใช้เพื่อสร้างเป็นสมการค่าสังเกตของการปรับแก้สแควร์ โดยเลขปริศนาที่นำมาใช้เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณในช่วงเวลาเริ่มต้นและถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ในสมการค่าต่างที่สองตลอดช่วงเวลาทดสอบ 600 epoch ในขณะที่เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมถูกสร้างด้วยแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE โดยใช้ค่าเศษ

เหลือที่คำนวณจากเลขปริศนาจำนวนเต็ม (Fixed residuals) เป็นข้อมูลในการคำนวณ เมื่อได้ องค์ประกอบเส้นฐานที่เป็นคำตอบผลลัพธ์แล้ว ต่อจากนั้นจะคำนวณค่า F-ratio โดยใช้สูตรคำนวณ จากสมการ 2-38 ในหัวข้อ 2.5.1 และตรวจสอบเงื่อนไข F-ratio > 3 หรือไม่ (Euler and Schaffrin, 1991) ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขถือว่าการหาเลขปริศนามีความสำเร็จและการคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ เป็น Fixed solution ในกรณีที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขถือว่าการหาเลขปริศนามิสำเร็จและการคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ในระดับ Float solution จากนั้นจึงเริ่มการคำนวณมุมพัวริงวินโดว์ถัดไปจนครบ 600 epoch

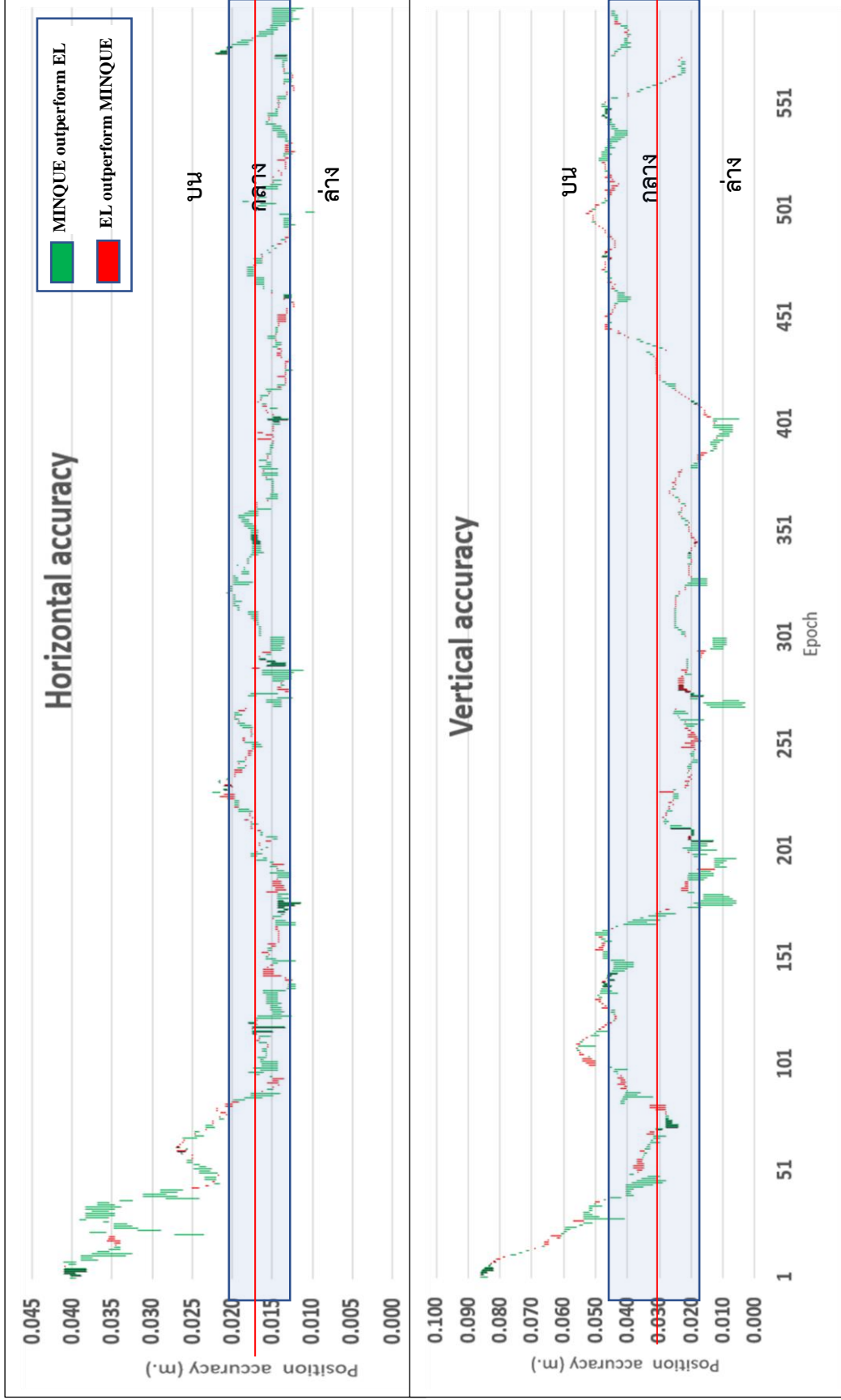
ขั้นตอนต่อไปเป็นการประมวลผลแบบจลน์ซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนจากแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE เป็นแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันและแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมเพื่อนำผลลัพธ์ มาเปรียบเทียบกับารปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกทำให้ประสิทธิภาพของการประมวลผลดีขึ้น หรือไม่

3.4 ผลการทดสอบการประมวลผลแบบจลน์

เมื่อได้ค่าพิกัดผลลัพธ์จากการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์แล้ว ต่อจากนั้นเป็นการหาค่า ความถูกต้องทางราบและทางดิ่งของแต่ละ epoch โดยวิธีการเปรียบเทียบค่าพิกัดสถานีผู้ใช้ CUSV ที่ คำนวณได้กับค่าพิกัดอ้างอิงที่มีความถูกต้องสูงระดับมิลลิเมตร (หัวข้อ 2.5.2) ผลลัพธ์ของการ เปรียบเทียบค่าความถูกต้องระหว่างกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE กับกรณีที่ใช้ แบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐาน จำนวน 600 epoch ได้ถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟซึ่งมีแกนตั้งเป็น ค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (หน่วยเป็นเมตร) และแกนนอนเป็นเวลาทดสอบ (หน่วยเป็น epoch) โดยแท่งสีเขียวหมายถึงการปรับปรุงด้วยแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE สามารถให้ความถูกต้อง เชิงตำแหน่งที่ดีกว่าแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐาน ในขณะที่แท่งสีแดงมีความหมายตรงกันข้าม การเปรียบเทียบแบบจำลอง MINQUE กับแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันเป็นไปดังรูปที่ 3-8 ความ ถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (รูปบน) และทางดิ่ง (รูปล่าง) ในขณะที่การเปรียบเทียบแบบจำลอง MINQUE กับแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมเป็นไปดังรูปที่ 3-9 ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (รูปบน) และความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางดิ่ง (รูปล่าง) ซึ่งเมื่อตรวจสอบเงื่อนไข F-Ratio > 3 (Euler and Schaffrin, 1991) พบว่าการใช้แบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามแบบให้อัตราความสำเร็จของการ หาเลขปริศนาเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามแบบจำลอง MINQUE มี solution ที่ มีค่า F-Ratio มากที่สุดเป็นจำนวน 569 epoch จากทั้งหมด 600 epoch แสดงถึงความน่าเชื่อถือ ของการหาเลขปริศนาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3-8 กราฟเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง MINQUE กับแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน (บน: ทารวรา และ ล่าง: ทางตั้ง)



รูปที่ 3-9 กราฟเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง MINQUE กับแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมมองดาวเทียม (บน: ทางราบ และ ล่าง: ทางตั้ง)

จากการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์จำนวน 600 epoch ในตารางที่ 3-1 พบว่าจากการเปรียบเทียบค่า RMSE เมื่อใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE จะให้ค่า RMSE ทางราบน้อยกว่าแบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากันประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ (1.1 มิลลิเมตร) และน้อยกว่าแบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ (0.7 มิลลิเมตร) ในขณะที่ให้ค่า RMSE ทางตั้งน้อยกว่าแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ (1.9 มิลลิเมตร) และน้อยกว่าแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ (0.9 มิลลิเมตร) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบเส้นฐานทางราบของแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกันในระดับมิลลิเมตร ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบเส้นฐานทางตั้งที่ได้จากแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE มีค่าน้อยกว่าแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม 0.6 มิลลิเมตร และน้อยกว่าแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันประมาณ 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าสถิติแบบทั้งหมดเมื่อใช้แบบจำลองสโตคาสติกที่ต่างกัน

แบบจำลองสโตคาสติก	องค์ประกอบเส้นฐานทางราบ (mm)		องค์ประกอบเส้นฐานทางตั้ง (mm)	
	RMSE	SD	RMSE	SD
	แบบจำลองที่ให้น้ำหนักค่าสังเกตเท่ากัน (EQ)	17.3	3.9	33.6
แบบจำลองมุมยกดาวเทียม (EL)	16.9	3.8	32.6	13.6
แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE	16.2	3.7	31.7	13.0

จากรูปที่ 3-8 และ 3-9 เป็นการแบ่งค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งออกเป็น 3 โซนคือ โซนบน, โซนกลาง และโซนล่าง โดยโซนกลางเป็นแถบที่สร้างจากการนำค่า RMSE \pm ค่า SD ซึ่งจะได้โซนกลางของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบมีขีดจำกัดบนเท่ากับ 0.020 เมตร และมีขีดจำกัดล่างเท่ากับ 0.125 เมตร ในขณะที่โซนกลางของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งมีขีดจำกัดบนเท่ากับ 0.045 เมตรและมีขีดจำกัดล่างเท่ากับ 0.019 เมตรจะเห็นได้ว่าในช่วง 40 epoch แรกจะเป็นช่วงที่ทั้งค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งมีค่าสูง (อยู่ในโซนบน) หลังจากนั้นทั้งค่าความถูกต้องทางราบและทางตั้งเริ่มเคลื่อนที่อยู่ภายในพื้นที่ของโซนกลางหรืออยู่ใกล้เคียงกับกรอบบนและล่าง การเปลี่ยนแปลงค่าความถูกต้องด้วยอัตราที่เร็วกว่าช่วงเวลาอื่นแสดงให้เห็นถึงชั้นบรรยากาศที่มีความแปรปรวนซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้สูงเมื่อรังวัดในพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรอย่าง

ประเทศไทย อย่างไรก็ตามจากรูปกราฟิกจะเห็นได้ช่วงเวลาดังกล่าวที่ค่า RMSE อยู่บริเวณโซนบน เป็นช่วงเวลาที่เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสโตคาสติคมาตรฐาน การปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติคด้วยวิธี MINQUE สามารถลดค่า RMSE ลงได้ในระดับที่มากกว่าในช่วงเวลาอื่น (โซนกลางและล่าง) อย่างชัดเจนที่สุด



บทที่ 4

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสโตคาสติก RIU

จากผลการทดสอบในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส ทั้งการประมวลผลแบบจลน์และแบบสถิตอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามความกว้างของมูฟวิงวินโดว์ที่มากพอที่จะทำให้การวนซ้ำเพื่อหาค่าสมาชิกภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมสามารถถูกรู้เข้าได้ มีความกว้างวินโดว์ตั้งแต่ 13 epoch ขึ้นไป ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดกับกรณีของการนำไปประยุกต์ใช้กับการรังวัดแบบจลน์ในสภาพภูมิประเทศที่มีความเป็นเมือง ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการบดบังสัญญาณดาวเทียมจาก อาคาร, สะพาน ในขณะที่สถานีผู้ใช้กำลังเคลื่อนที่จนจะต้องคำนวณเลขปริศนาใหม่ (Re-initialization) อยู่บ่อยครั้ง จากประเด็นข้างต้นงานศึกษานี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองสโตคาสติก RIU อีกแบบจำลองหนึ่งซึ่งเป็นการนำตัวชี้วัดคุณภาพของโครงข่ายสถานีฐานที่บ่งบอกถึงความไม่แน่นอนของการประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศของการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายมาใช้ในการปรับปรุงเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม 1 epoch อย่างไรก็ตามเป็นการปรับปรุงเฉพาะค่าความแปรปรวน ไม่ครอบคลุมถึงค่าความแปรปรวนร่วม จึงจำเป็นที่จะต้องทดสอบประสิทธิภาพเพิ่มเติมมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายเพื่อสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอส

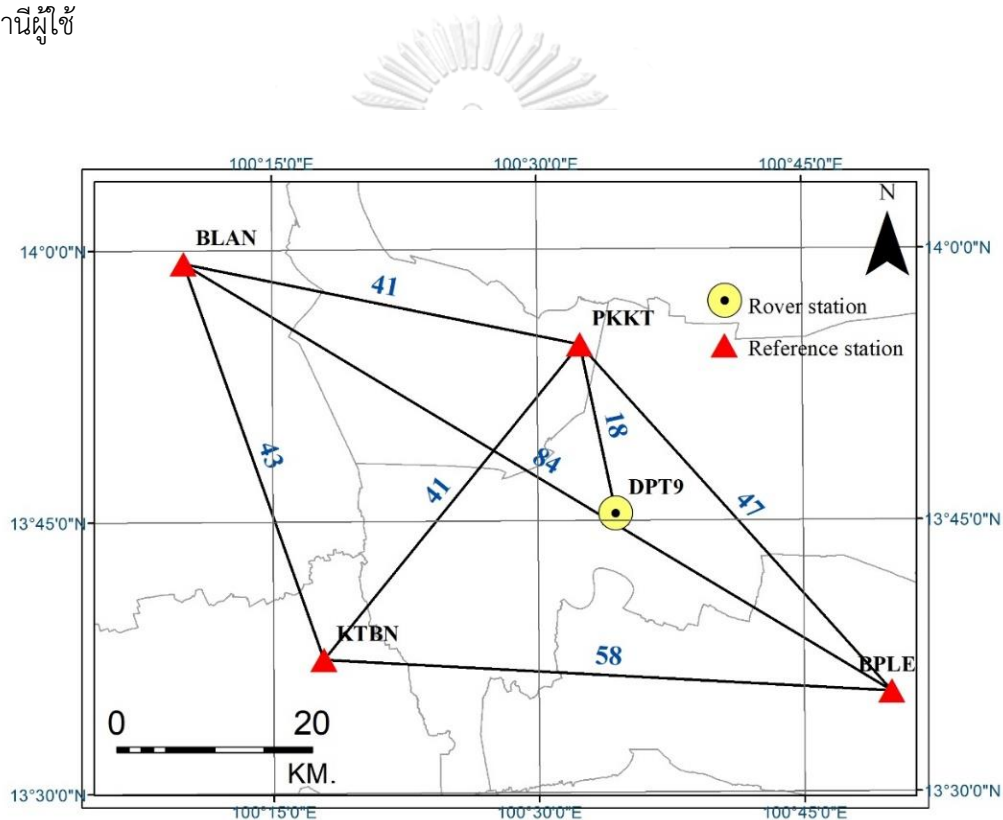
ขั้นตอนนี้เป็นการนำข้อมูลสถานีฐานที่บันทึกอยู่ในรูปแบบไฟล์ RINEX มาจำลองเป็นโครงข่ายสถานีฐานเพื่อประมวลผลสร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอสที่บริเวณใกล้กับค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้ด้วยโปรแกรม Trimble Total Control ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ทำหน้าที่สร้างข้อมูลสถานีฐานวีอาร์เอส ตามขั้นตอน 2.2.1-2.2.4 มีรายละเอียดดังนี้

1) ใช้ข้อมูลสถานีฐานจีเอ็นเอสเอส จำนวน 5 สถานีฐาน ดังรูปที่ 4-1 รับข้อมูลดาวเทียมวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2557 เวลา 8.30 -13.00 น. มีอัตราการรับข้อมูลดาวเทียม (Observation rate) เท่ากับ 15 วินาที โดยกำหนดมุมยกดาวเทียมที่น้อยที่สุด (Cut-off Angle) เท่ากับ 10 องศา บันทึกอยู่ในรูปแบบไฟล์ RINEX ทั้งนี้สถานีฐานมีที่ตั้งอยู่บริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง ในการทดสอบจะกำหนดให้สถานีฐาน KTBN, BPLE, PKKT, BLAN จำนวน 4 สถานีฐานของกรมที่ดินซึ่งมีระยะห่างระหว่างสถานีฐานประมาณ 50 กิโลเมตรเป็นโครงข่ายสถานีฐานที่ใช้ในการสร้างสถานีฐานวี

อาร์เอส ในขณะที่สถานีฐาน DPT9 ของกรมโยธาธิการและผังเมืองซึ่งตั้งอยู่บริเวณระหว่างกลางของสถานีฐานของกรมที่ดินเป็นสถานีผู้ใช้

2) ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงแบบ Ultra-rapid orbit (ความถูกต้องของวงโคจรประมาณ 2.5 เซนติเมตร) ของหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) ในการลดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจร (<https://www.igs.org/products>)

3) ใช้ค่าพิกัดสถานีฐานที่มีความถูกต้องสูงในระดับมิลลิเมตร (ตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.5.2) ของสถานีฐาน KTBN, BPLE, PKKT, BLAN ถูกใช้ในการจำลองโครงข่ายสถานีฐาน และค่าพิกัดของสถานีฐาน DPT9 ถูกใช้ในการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการคำนวณค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้

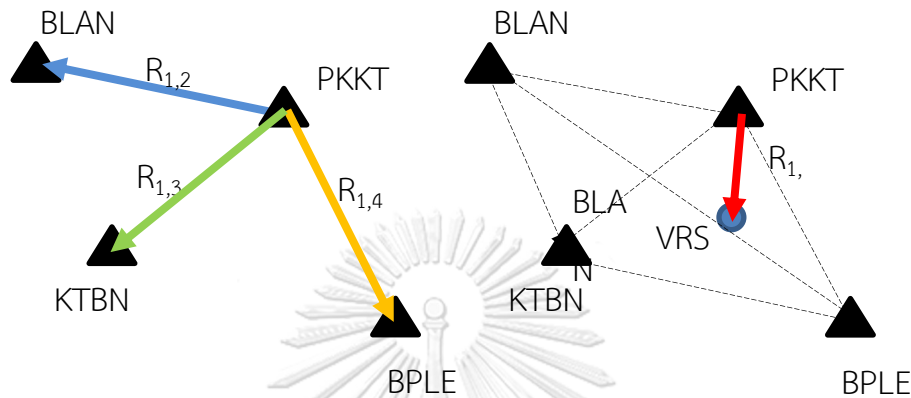


รูปที่ 4-1 แผนที่แสดงสถานีฐานที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองสโตคาสติก RIU

4.2 ขั้นตอนการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายเพื่อคำนวณค่าดัชนี RIU

ในขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณค่าดัชนี RIU จากข้อมูลดาวเทียมที่รับสัญญาณโดยสถานีฐานและประมวลผลที่ฝั่งแม่ข่ายมีลำดับการคำนวณดังนี้ เริ่มต้นด้วยการคำนวณเลขปริศนาจำนวนเต็มระหว่างเส้นฐานด้วยโปรแกรม Trimble Total Control (รายละเอียดตามหัวข้อ 2.2.1) ในการทดสอบนี้ได้

กำหนดให้สถานีฐาน PKKT เป็นสถานีอ้างอิงหลัก Master station ดังนั้นเวกเตอร์ของเส้นฐานระหว่างสถานีฐานหลักกับสถานีฐานที่เหลือ ได้แก่ PKKT- KTBN, PKKT-BPLE และ PKKT-BLAN ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 เวกเตอร์เส้นฐานของการคำนวณดัชนี RIU

จากนั้นนำเลขปริศนาไปคำนวณค่าต่างที่สองของค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางทั้งสามเส้นฐาน (รายละเอียดตามหัวข้อ 2.2.2) และคำนวณค่าดัชนี RIU ของแต่ละคู่ดาวเทียมในแต่ละ epoch ตามขั้นตอนที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-8

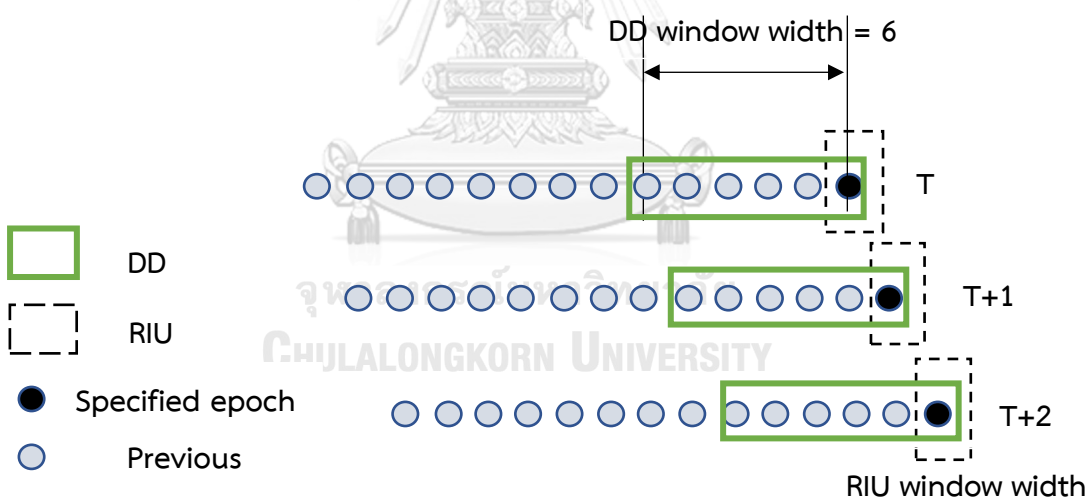
4.3 ขั้นตอนการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์

ในขั้นตอนนี้เป็นการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์เพื่อหาค่าองค์ประกอบเส้นฐานจำนวน 1058 epoch โดยใช้มูฟวิงวินโดว์ที่มีความกว้างขนาด 6 epoch ในการคำนวณค่าฟังก์ชันผลลัพท์ในแต่ละ epoch ในขณะที่เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมถูกคำนวณมาจากแบบจำลองสโตคาสติก RIU ในทุก epoch โดยได้นำค่าดัชนี RIU จากขั้นตอนที่แล้วมาใช้ตามสูตรคำนวณในสมการที่ 2.37 ดังรูปที่ 4-3 โดยการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐานในแต่ละมูฟวิงวินโดว์จะเป็นการใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สองของเฟสคลื่นส่ง L1 และ L2 ระหว่างสถานีฐานวอร์เอสบกับสถานีผู้ใช้ DPT9 และระหว่างคู่ดาวเทียมสร้างสมการค่าสังเกตของการปรับแก้ลิสท์สแควร์เพื่อคำนวณผลลัพท์ของ Float solution

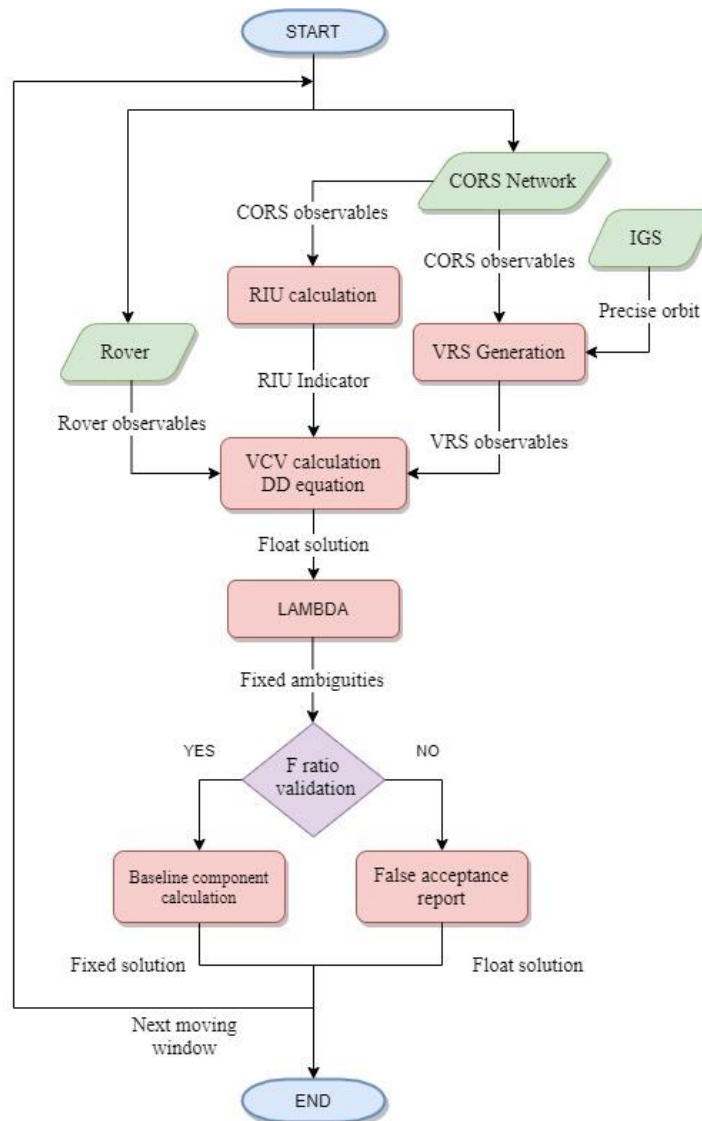
ขั้นต่อไปเป็นการนำผลลัพท์ Float solution และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของพารามิเตอร์เข้าไปหาชุดเลขปริศนาที่ดีที่สุดด้วย LAMBDA และตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเลขปริศนาด้วยค่าดัชนี F-ratio หากผ่านเงื่อนไขเชื่อว่าค่า F-ratio มีค่ามากกว่า 3 (Euler and Schaffrin, 1991) จะ

สรุปว่ากระบวนการหาเลขปริศนาของ session นั้นมีผลสำเร็จและการคำนวณค่าฟังก์ชันค่าผิดพลาดเป็น Fixed solution ในกรณีที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขถือว่าหาเลขปริศนาไม่สำเร็จและการคำนวณค่าฟังก์ชันค่าผิดพลาดในระดับ Float solution จากนั้นจึงเริ่มการคำนวณมุฟวิงวินโดว์ถัดไปจนครบ 1058 epoch จากผังขั้นตอนในรูปที่ 4-4 จะเห็นได้ว่าการกำหนดให้คำนวณเลขปริศนาใหม่ในทุกมุฟวิงวินโดว์ เนื่องจากจุดประสงค์ของการทดสอบสมรรถภาพของการใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE เน้นไปที่การใช้งานในกรณีของการรบกวนแบบจลน์ในภูมิภาคที่มีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการบดบังสัญญาณดาวเทียมอยู่บ่อยครั้งขณะสถานีผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสกับรถยนต์เคลื่อนที่เข้าไปในเขตเมืองซึ่งมีอาคารและสะพานอยู่ตลอดเส้นทางทำให้จะต้องคำนวณเลขปริศนาใหม่อยู่เสมอ

ขั้นตอนต่อไปเป็นการประมวลผลแบบจลน์ซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนแบบจำลองสโตคาสติกเป็นแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันและแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบว่าการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก RIU ทำให้ประสิทธิภาพของการประมวลผลดีขึ้นหรือไม่



รูปที่ 4-3 มุฟวิงวินโดว์ที่ใช้ร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติก RIU



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4-4 ผังแสดงขั้นตอนการประมวลผลแบบจลน์ร่วมกับแบบจำลอง RIU

4.4 ผลการทดสอบการประมวลผลแบบจลน์

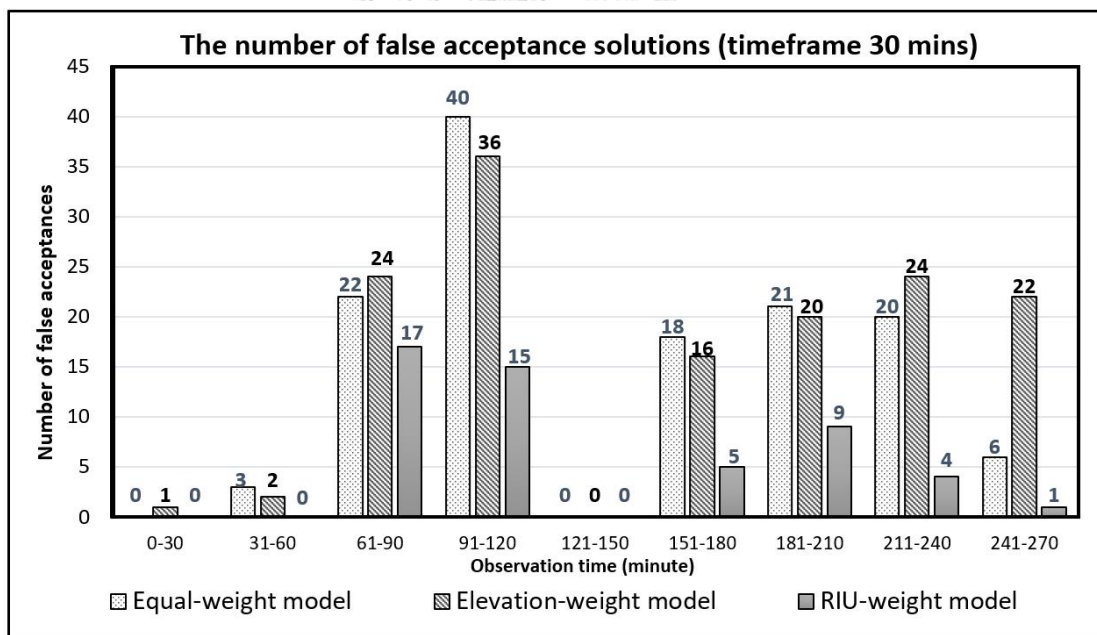
4.4.1 ผลลัพธ์ของอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนาจำนวนเต็ม

จากการออกแบบวิธีทดสอบให้คำนวณหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็มใหม่ทุกครั้งก่อนการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐานในแต่ละมูฟวิงวินโดว์ เมื่อพิจารณาผลความสำเร็จการหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็มจำนวน 1058 epoch โดยกำหนดให้ค่า threshold ของค่า F-ratio เท่ากับ 3 (Euler and Schaffrin, 1991) พบว่าแบบจำลองสโตคาสติก RIU สามารถให้อัตราความสำเร็จของการหา

เลขปริศนามากกว่าแบบจำลองที่ให้น้ำหนักค่าสังเกตเท่ากันประมาณ 7.5 เปอร์เซ็นต์และมากกว่าแบบจำลองมุกดาวเทียม 8.9 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ตารางเปรียบเทียบอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนาเมื่อใช้แบบจำลองสโตคาสติก RIU กับแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐาน

แบบจำลองสโตคาสติก	อัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนา (%)	จำนวน Epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์/จำนวน Epoch ทั้งหมด
แบบจำลองที่ให้น้ำหนักค่าสังเกตเท่ากัน (EQ)	87.71	130/1058
แบบจำลองมุกดาวเทียม (EL)	86.29	145/1058
แบบจำลองสโตคาสติก RIU	95.18	51/1058

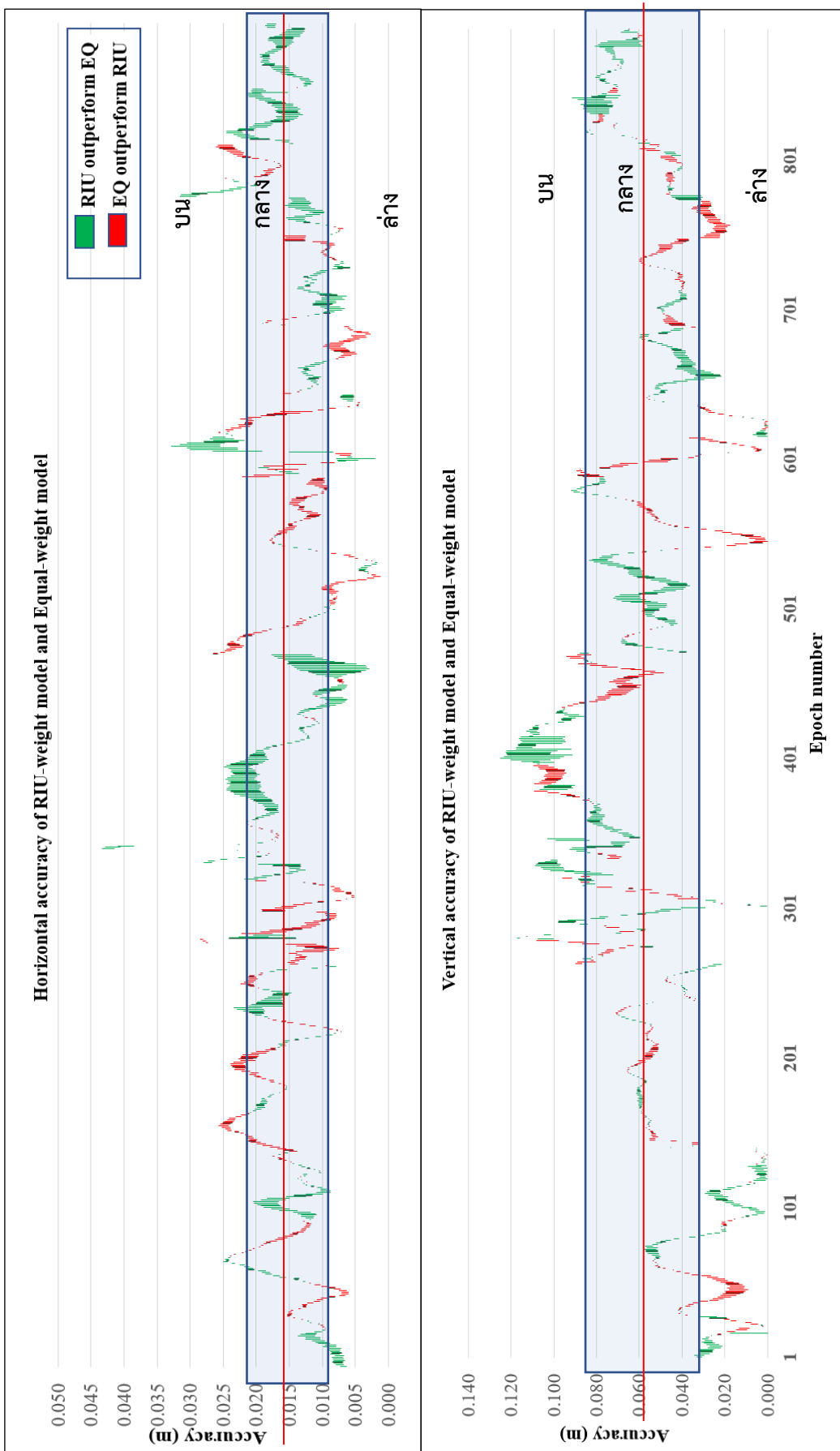


รูปที่ 4-5 กราฟแสดงการกระจายตัวของจำนวน Epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์การหาเลขปริศนา

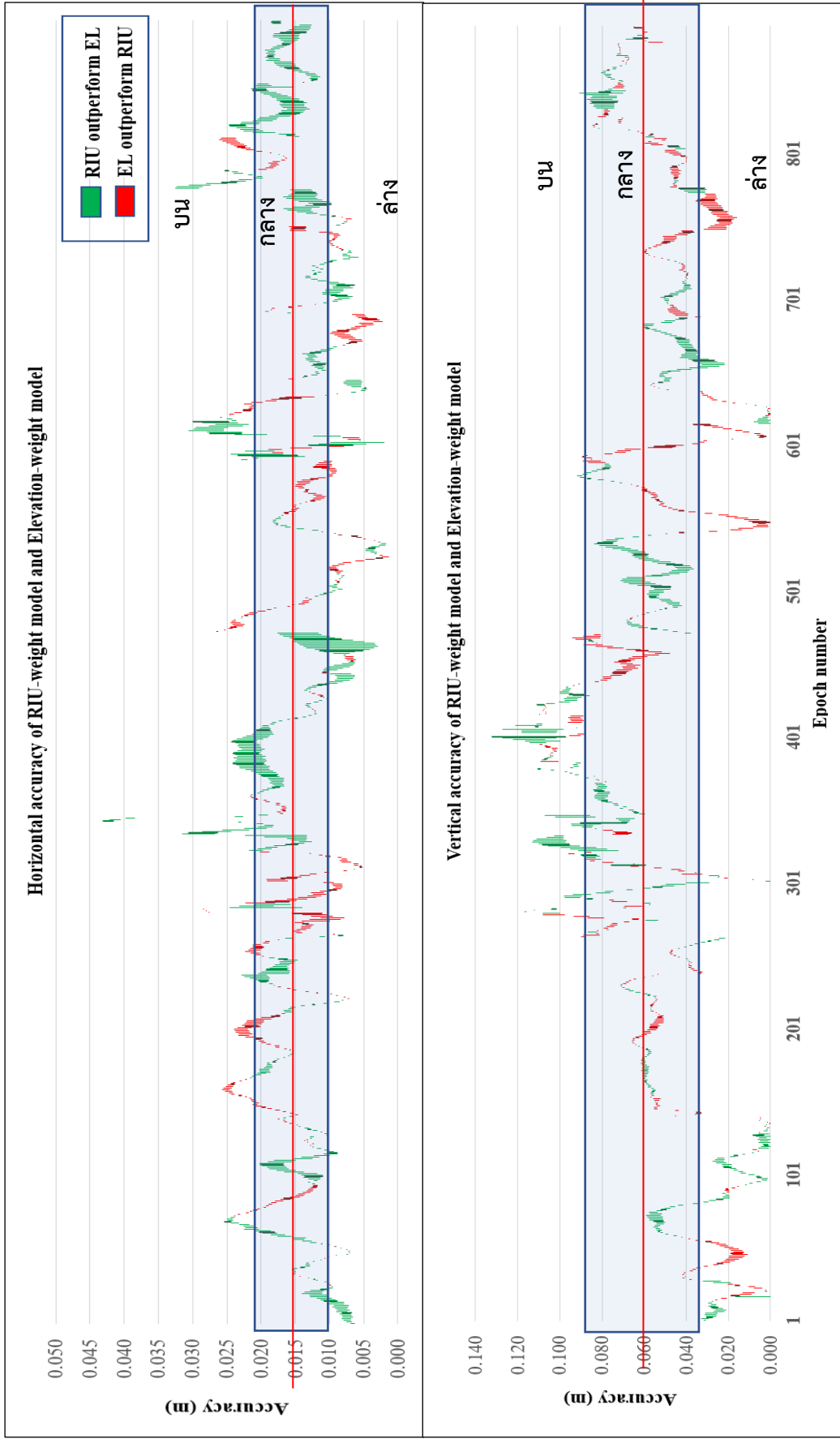
จากรูปที่ 4-5 เป็นกราฟแสดงถึงการกระจายตัวของจำนวน Epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับ (Euler and Schaffrin, 1991) สำหรับการหาเลขปริศนา $F\text{-ratio} < 3$ ในช่วงเวลาทดสอบ โดยแกนนอนของกราฟได้แบ่งช่วงเวลาออกเป็นกลุ่ม (กลุ่มละ 30 นาที) และแกนตั้งของกราฟแท่งแสดงจำนวน Epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ภายในแต่ละช่วง 30 นาที จากกราฟพบว่าแบบจำลองสโตคาสติก RIU จะเป็นแบบจำลองที่มีจำนวน epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์น้อยที่สุดในทุกกลุ่มของช่วงเวลา ทั้งสามแบบจำลองมีจำนวน Epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์สูงสุดที่กลุ่มช่วงเวลาที่สี่ (90-120 นาที) และมีจำนวนต่ำสุดที่กลุ่มช่วงเวลาที่ห้า (120-150 นาที) จำนวน Epoch ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ของแบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักค่าสังเกตเท่ากันและแบบจำลองสโตคาสติกมุกดาวเทียมมีความสอดคล้องไปในทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทุกช่วงเวลายกเว้นในกลุ่มช่วงเวลาสุดท้าย (240-270 นาที) ที่แบบจำลองสโตคาสติกมุกดาวเทียมมีจำนวนมากกว่าแบบมีนัยยะ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อหาข้อจำกัดของแบบจำลองสโตคาสติกมุกดาวเทียม Li et al. (2015) ได้สรุปถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุกดาวเทียมกับคุณภาพสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจะมีน้อยลงเมื่อมุกดาวเทียมมีค่าน้อยกว่า 40 องศา เมื่อมาพิจารณาข้อมูลดาวเทียมในช่วงเวลาสุดท้าย (240-270 นาที) มีข้อสังเกตว่ามีจำนวนดาวเทียมอยู่ 5 ดวง น้อยกว่าจำนวนดาวเทียมในเวลาทดสอบซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมี 6 ดวง โดยเฉลี่ย และมีข้อมูลบาง epoch มีดาวเทียมที่มีมุกดาวเทียมน้อยกว่า 40 องศาเข้ามาอาจจะมีส่วนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อจำกัดบางอย่างที่ทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ขึ้นกับมุกดาวเทียมลดลง

4.4.2 ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์

ความถูกต้องเชิงตำแหน่งขององค์ประกอบเส้นฐานในแต่ละ epoch ถูกประเมินด้วยการหาค่าต่างกับค่าพิกัดอ้างอิงที่มีความถูกต้องสูงระดับมิลลิเมตร ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องระหว่างกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติก RIU กับกรณีที่ใช้แบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐานได้ถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟซึ่งมีแกนตั้งเป็นค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (หน่วยเป็นเมตร) และแกนนอนเป็นเวลาทดสอบ (หน่วยเป็น epoch) โดยแท่งสีเขียวหมายถึงการปรับปรุงด้วยแบบจำลองสโตคาสติก RIU สามารถให้ความถูกต้องที่ดีกว่าแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐาน ในขณะที่แท่งสีแดงมีความหมายตรงกันข้าม การเปรียบเทียบแบบจำลองสโตคาสติก RIU กับแบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากันเป็นไปดังรูปที่ 4-6 แสดงความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (รูปบน) และทางตั้ง (รูปล่าง) ในขณะที่การเปรียบเทียบแบบจำลองสโตคาสติก RIU กับแบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุกดาวเทียมเป็นไปดังรูปที่ 4-7 แสดงความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (รูปบน) และทางตั้ง (รูปล่าง)



รูปที่ 4-6 กราฟเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง RIU กับแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน บน: ทางราบ และ ล่าง: ทางตั้ง)



รูปที่ 4-7 กราฟเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างแบบจำลอง RIU กับแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม บน: ทางราบ และ ล่าง: ทางตั้ง)

เมื่อพิจารณาค่าสถิติโดยรวม (Overall statistics) ขององค์ประกอบเส้นฐานที่คำนวณได้จากการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในตารางที่ 4-2 พบว่าจากการเปรียบเทียบค่า RMSE เมื่อใช้แบบจำลองสโตคาสติก RIU จะให้ค่า RMSE ทางราบน้อยกว่าแบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากันประมาณ 4.3 เปอร์เซ็นต์ (0.7 มิลลิเมตร) และน้อยกว่าแบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมประมาณ 4.3 เปอร์เซ็นต์ (0.7 มิลลิเมตร) ในขณะที่ให้ค่า RMSE ทางตั้งน้อยกว่าแบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากันประมาณ 2.6 เปอร์เซ็นต์ (1.6 มิลลิเมตร) และน้อยกว่าแบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์ (0.4 มิลลิเมตร) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบเส้นฐานทางราบที่ได้จากแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกันในระดับมิลลิเมตร ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบเส้นฐานทางตั้งได้จากแบบจำลองสโตคาสติก RIU มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียมและน้อยกว่าแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากันประมาณ 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงค่าสถิติโดยรวมของการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐานของการใช้แบบจำลองสโตคาสติกที่ต่างกัน

แบบจำลองสโตคาสติก	องค์ประกอบเส้นฐานทางราบ		องค์ประกอบเส้นฐานทางตั้ง	
	(mm)		(mm)	
	RMSE	SD	RMSE	SD
แบบจำลองที่ให้น้ำหนักค่าสังเกตเท่ากัน (EQ)	16.4	5.9	61.0	26.8
แบบจำลองมุมยกดาวเทียม (EL)	16.4	6.0	59.8	26.0
แบบจำลองสโตคาสติก RIU	15.7	5.8	59.4	25.9

จากรูปที่ 4-6 และ 4-7 เป็นการแบ่งค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งออกเป็น 3 โซนคือ โซนบน, โซนกลาง และโซนล่าง โดยโซนกลาง (แถบสีเทา) เป็นแถบที่สร้างจากการนำค่า $RMSE \pm$ ค่า SD ซึ่งจะได้โซนกลางของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบมีขีดจำกัดบนเท่ากับ 0.021 เมตร และมีขีดจำกัดล่างเท่ากับ 0.099 เมตร ในขณะที่โซนกลางของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้งมีขีดจำกัดบนเท่ากับ 0.085 เมตรและมีขีดจำกัดล่างเท่ากับ 0.034 เมตร เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า RMSE จะเห็นได้ว่าค่า RMSE ทั้งแนวราบและแนวตั้งจะเคลื่อนที่อยู่ภายในพื้นที่ของโซนกลางหรืออยู่ใกล้เคียงกับกรอบบนและล่างของโซน อย่างไรก็ตามในช่วง epoch ที่ 300

ถึง 400 ค่า RMSE เคลื่อนที่อยู่ในโซนบน เมื่อพิจารณาจากรูปกราฟที่เป็นแท่งเขียวที่ยาวแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสโตคาสติคมาตรฐาน การปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติคด้วยวิธี RIU สามารถลดค่า RMSE ลงได้ในระดับที่มากกว่าในช่วงเวลาอื่นอย่างชัดเจน มีข้อสังเกตว่าค่า SD ของค่า RMSE ทั้งทางราบและทางตั้งของการทดสอบวิธี RIU มีค่ามากกว่าการทดสอบวิธี MINQUE ในบทที่ 3 เกือบสองเท่า สาเหตุน่าจะเป็นผลมาจากการทดสอบแบบจำลอง RIU ใช้ความกว้างมูฟวิงวินโดว์เท่ากับ 6 epoch ในขณะที่การทดสอบแบบจำลอง MINQUE ใช้ความกว้างมูฟวิงวินโดว์ที่ 15 epoch สอดคล้องกับค่า RMSE ทางตั้งของการทดสอบแบบจำลอง RIU ที่มากกว่าแบบจำลอง MINQUE เช่นกัน (มากกว่าประมาณ 2.8 เซนติเมตร) ในขณะที่ค่า RMSE ทางราบของทั้งสองการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสโดยส่วนใหญ่ได้มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Functional model) ของการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายในการคำนวณค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นไปได้โดยยากที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสามารถคำนวณค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศซึ่งมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์ธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้ยังมีค่าคลาดเคลื่อนที่หลงเหลืออยู่แฝงอยู่ในค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอสแต่ละค่าด้วยความถูกต้องที่ไม่เท่ากัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก (Stochastic model) สำหรับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสในการประมวลผลฝั่งสถานีผู้ใช้ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นเพื่อส่งผลถึงการเพิ่มความน่าเชื่อถือในกระบวนการหาเลขปริศนาและความถูกต้องของการคำนวณองค์ประกอบเส้นฐาน โดยได้ดำเนินการปรับปรุงด้วย 2 แนวทางได้แก่ แนวทางที่หนึ่งคือ การใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการประมาณค่าสมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมโดยใช้ค่าเศษเหลือของสมการลิสท์สแควร์ จุดเด่นของแบบจำลอง MINQUE คือความสามารถที่จะคำนวณสมาชิกของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมได้อย่างครบถ้วน อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดจะต้องใช้ epoch จำนวนมากต่อ 1 solution ในการหาคำตอบและการคำนวณประกอบด้วยหลายขั้นตอน และแนวทางที่สองคือ การใช้แบบจำลองสโตคาสติก RIU ซึ่งเป็นวิธีที่ให้น้ำหนักตามค่าเศษเหลือการประมาณค่าภายในช่วงของการประมวลผลฝั่งแม่ข่ายมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงค่าความแปรปรวนของค่าการวัดดาวเทียมซึ่งเป็นสมาชิกแนวทแยงของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมให้มีความถูกต้องมากขึ้นโดยวิธี RIU ไม่มีข้อจำกัดที่จะต้องใช้ epoch จำนวนมากในการคำนวณและมีอัลกอริทึมของการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน เมื่อพิจารณาจุดเด่นและจุดด้อยที่เป็นลักษณะเฉพาะของแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE และ RIU ในการนำแบบจำลองสโตคาสติกทั้งสองไปประยุกต์ใช้กับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส สามารถสรุปเป็นหัวข้อดังแสดงในตารางที่ 5-1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะระหว่างแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE และ RIU

ข้อที่	หัวข้อ	MINQUE	RIU
1.	ความหน่วงเวลา (Latency) ของการคำนวณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม	สามารถคำนวณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมที่ความกว้างของมูฟวิงวินโดว์ตั้งแต่ 13 epoch ขึ้นไป จึงน่าจะมีความเหมาะสมกับการรังวัดที่สถานีผู้ใช้ไม่เคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่มาก เช่น การหาค่าพิกัดหมุดหลักที่ดิน, จุดบังคับภาพถ่ายโดรน หรือการรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว	สามารถคำนวณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมในแต่ละ epoch ด้วยข้อมูลดาวเทียม 1 epoch จึงมีความสอดคล้องกับการหาตำแหน่ง Single-epoch positioning ซึ่งเป็นการหาตำแหน่งและเลขปริศนาโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม 1 epoch เหมาะกับงานสำรวจในพื้นที่เขตเมืองซึ่งมีอาคาร สะพาน บดบังสัญญาณทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่จะต้องคำนวณเลขปริศนาใหม่อยู่ตลอด
2.	สมาชิกเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมที่ถูกปรับปรุงความถูกต้อง	ปรับปรุงทั้งค่าความแปรปรวน และค่าความแปรปรวนร่วมของค่าการวัดดาวเทียม	ปรับปรุงเฉพาะสมาชิกในแนวทแยง (ค่าความแปรปรวนของค่าการวัดดาวเทียม)
3.	ข้อมูลที่ใช้คำนวณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม	ไม่ต้องส่งข้อมูลใดๆ เพิ่มเติมจากการคำนวณ ฝั่งแม่ข่ายไปยังเครื่องรับสถานีผู้ใช้เนื่องจากเป็นการสกัดค่าเศษเหลือของค่าต่างที่สองของข้อมูลค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอสและสถานีผู้ใช้ซึ่งสามารถคำนวณได้ที่การคำนวณฝั่งเครื่องรับ	ต้องมีการส่งค่าดัชนี RIU เพิ่มเติมจากฝั่งแม่ข่ายเพื่อใช้คำนวณร่วมกับข้อมูลค่าการวัดของสถานีฐานวีอาร์เอสและสถานีผู้ใช้ ซึ่งจะต้องศึกษาต่อไปในมาตรฐานการส่งข้อมูลในรูปแบบ RTCM message

งานวิจัยได้ทำการทดสอบโดยนำข้อมูลสถานีฐานจีเอ็นเอสเอสบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงมาจำลองเป็นโครงข่ายวีอาร์เอสที่มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานเฉลี่ยประมาณ 50 กิโลเมตร โดยมีสถานีผู้ใช้อู่บริเวณตรงกลางภายในโครงข่ายสถานีฐานที่ได้จำลองไว้ จากนั้นทำการทดสอบประมวลผลจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ด้วยสมการค่าต่างครั้งที่สองร่วมกับแบบจำลองสโตคาสติกที่ได้สร้างขึ้นจากแนวคิดการปรับปรุงข้างต้น การประเมินประสิทธิภาพของการปรับปรุงใช้วิธีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับกรณีของแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐานซึ่งถูกใช้แพร่หลายในซอฟต์แวร์ประมวลผลจีเอ็นเอสเอสทั่วไป ได้แก่ แบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากันและแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม ซึ่งจากผลลัพธ์ของการทดสอบในบทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถสรุปได้ดังนี้

1) แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE จำเป็นจะต้องมีความกว้างของมูฟวิงวินโดว์ที่มากพอที่จะทำให้การวนซ้ำเพื่อหาค่าสมาชิกภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมสามารถลู่อู่เข้าได้ ซึ่งจากการทดสอบพบว่ามีความกว้างวินโดว์ตั้งแต่ 13 epoch ขึ้นไป และพบว่าเมื่อความกว้างวินโดว์ตั้งแต่ 15 epoch ขึ้นไป การเพิ่มขนาดความกว้างของวินโดว์แทบจะไม่มีผลต่อของค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ได้รับโดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าในระดับเศษของมิลลิเมตร ผลการทดสอบประมวลผลแบบจลน์โดยใช้ความกว้างมูฟวิงวินโดว์ที่ 15 epoch ในการคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสโตคาสติกที่ให้น้ำหนักเท่ากัน การใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE สามารถเพิ่มความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (ประมาณ 6%) และทางตั้ง (ประมาณ 8%) ให้กับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้แบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม การใช้แบบจำลองสโตคาสติก MINQUE สามารถเพิ่มความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (ประมาณ 4%) และทางตั้ง (ประมาณ 4%) ถึงแม้ว่าอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนาจะเท่ากับ 100% ทุกกรณีแต่เมื่อพิจารณาถึงค่า F-ratio ของกรณีที่ใช้แบบจำลอง MINQUE จะสูงกว่าแบบจำลองสโตคาสติกมาตรฐานทั้งสองแบบเป็นจำนวน 569 epoch จากทั้งหมด 600 epoch แสดงถึงความน่าเชื่อถือของกระบวนการหาเลขปริศนาที่มีมากขึ้น

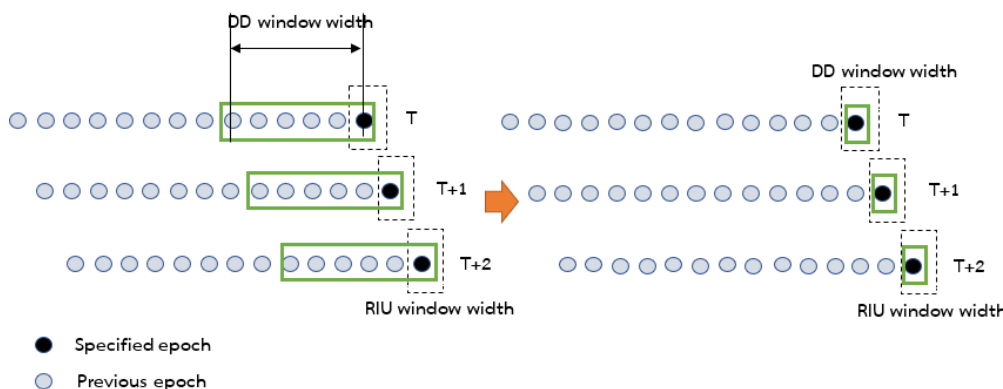
2) จากผลการทดสอบกรณีที่ใช้แบบจำลอง RIU ในการประมวลผลแบบจลน์โดยใช้ความกว้างมูฟวิงวินโดว์ที่ 6 epoch ในการคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ให้น้ำหนักเท่ากัน แบบจำลองสโตคาสติก RIU สามารถเพิ่มความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (ประมาณ 4%) และทางตั้ง (ประมาณ 3%) ให้กับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอส ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม แบบจำลองสโตคาสติก RIU สามารถเพิ่มความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ (ประมาณ 4%) และทางตั้ง (ประมาณ 1%) และเมื่อพิจารณาถึงอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนา อัตราความสำเร็จของกรณีที่ใช้แบบจำลองมาตรฐานทั้งสองแบบจะใกล้เคียงกันอยู่ที่ระดับ 86-87% ในขณะที่อัตรา

ความสำเร็จของกรณีที่ใช้แบบจำลอง RIU จะอยู่ที่ระดับ 95% ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านอัตราความสำเร็จค่อนข้างจะสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Prochniewicz et al. (2016) ซึ่งใช้ค่าดัชนี NBSM ถึงแม้ว่าพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้จะอยู่ในประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรที่ถือได้ว่าเป็นภูมิภาคที่ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ส่งผลกระทบต่อารรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสมากกว่าเมื่อเทียบกับภูมิภาคอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกสำหรับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสยังมีประเด็นที่สามารถศึกษาเพิ่มเติมต่อเนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้ในอนาคตดังต่อไปนี้

1) แบบจำลองสโตคาสติก RIU สามารถที่จะสร้างเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมที่ epoch ใดๆ โดยการใช้ข้อมูลจีเอ็นเอสเอสของโครงข่ายสถานีฐานที่ epoch ดังกล่าวเพียง epoch เดียว (Epoch-by-Epoch solution) ในขณะที่งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่งเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการประมวลผลแบบจลน์โดยใช้มูฟริงวินโดว์ที่มีความกว้าง 6 epoch ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยสมการค่าสังเกตที่มากกว่า 1 epoch (Multi-epoch solution) ขอบเขตงานวิจัยจึงยังไม่ครอบคลุมถึงการหาค่าตำแหน่งจีเอ็นเอสเอสด้วยข้อมูล 1 epoch (GNSS Single epoch positioning) ซึ่งเป็นเทคนิคที่กำลังเป็นที่สนใจเนื่องจากมีข้อเด่นในแง่ของการเลี่ยงการเกิดคลื่นหลุด (cycle slip) และความรวดเร็วของการ Re-initialization เมื่อเกิดความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณดาวเทียมจากการบดบังของสิ่งปลูกสร้าง อย่างไรก็ตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับ Single epoch positioning จะแตกต่างจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่าต่างเฟสครั้งที่สองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ การใช้สมการค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่งและชุดเรเนดร์ร่วมกัน หรืออาจจะเป็นการใช้เทคนิคคลื่นผสมหลายความถี่ เช่น คลื่น Narrow lane, คลื่น Wide lane ในการสร้างสมการค่าสังเกตและกระบวนการหาค่าเลขปริศนา ดังนั้นจะต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติก RIU ขึ้นใหม่และประเมินความถูกต้องก่อนนำไปใช้ร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ข้างต้น



รูปที่ 5-1 การใช้มูฟวิงวินโดว์กับการประมวลแบบ Single epoch positioning และ RIU

2) นับตั้งแต่มีการเริ่มปฏิบัติการของระบบดาวเทียมนำทางเปย์โต่ว (BeiDou Navigation Satellite System: BDS) ของประเทศจีนตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 ได้มีงานศึกษาการประมวลผล RTK แบบผสมหลายระบบดาวเทียม (Multi-GNSS) ระหว่างระบบ GPS กับ BDS เช่น การเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่งระหว่างสองระบบ L1+B1 กับ L2+B2 และแบบสองความถี่สองระบบ L1+L2+B1+B2 (Odolinski et al., 2013; Odolinski et al., 2015) ซึ่งต่อมา Wu et al. (2019) และ Hou et al. (2019) ได้มีการเสนอการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกของระบบดาวเทียม BDS ด้วยแบบจำลองที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม โดยได้สร้างสูตรความสัมพันธ์ระหว่างมุมยกดาวเทียมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟสคลื่นส่งและชุดโคเรนจ์ของดาวเทียมแต่ละดวงจากการรับสัญญาณทดสอบ ซึ่งได้มีการแยกสูตรตามวงโคจรดาวเทียมของระบบดาวเทียม BDS ได้แก่ วงโคจรค้างฟ้า (Geostationary Earth: GEO), วงโคจรระยะปานกลาง (Medium Earth Orbit: MEO) และวงโคจรเอียง (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit: IGSO) ดังนั้นจากผลลัพธ์ของงานวิจัย Wu et al. (2019) และ Hou et al. (2019) น่าจะเป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสโตคาสติก RIU สำหรับการรับวัดดาวเทียมเปย์โต่วต่อไป เช่นเดียวกันกับกรณีของ MINQUE ได้มีงานศึกษาที่ได้นำแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE ข้อมูลดาวเทียมเปย์โต่วมาทดสอบร่วมกับประมวลผลแบบจลนโดยทันทีที่ใช้สถานีฐานหนึ่งสถานี (Single base RTK) และได้สรุปผลว่าแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE สามารถเพิ่มอัตราความสำเร็จการหาเลขปริศนาสำหรับการประมวลผลเฟสคลื่นส่ง B1 และ B2 ประมาณ 4 % (Zhetao et al., 2018)

3) จากเหตุผลที่ว่าบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร (low-latitude area) มีการเกิดปรากฏการณ์ Ionosphere Scintillation ขึ้นบ่อยครั้งจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความแปรปรวนอย่าง

รวดเร็วในเรื่องปริมาณและความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Total Electron Content :TEC) จนทำให้สัญญาณดาวเทียมที่วิ่งผ่านมีการแกว่งขึ้นลงอย่างกะทันหันจากระดับปกติส่งผลต่อความถูกต้องในการวัดระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับสัญญาณ Luo et al. (2019) ได้เสนอแบบจำลองสโตคาสติก Tracking jitter model ที่ให้น้ำหนักตามปริมาณความแรงของ Ionosphere Scintillation โดยตัวชี้วัดความแรงที่นำไปใช้คำนวณหาค่าความถูกต้องของดาวเทียมแต่ละดวงเป็นค่าที่ได้มาจากข้อมูลความเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation Monitoring Records : ISMR) ของสถานีตรวจสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้แก่ ดัชนีแสดงความรุนแรงปรากฏการณ์ Ionosphere Scintillation (S4 index), ข้อมูลสัญญาณรบกวนทางเฟส (phase noise) , อัตราสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise ratio) ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยในการใช้แบบจำลองสโตคาสติก Tracking jitter model ร่วมกับการประมวลผลหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความถูกต้องสูง (Precise point positioning: PPP) ซึ่งได้ใช้ฮ่องกงมีพื้นที่ทดสอบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีขึ้นของการรับวัดบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแบบจำลองสโตคาสติกที่ขึ้นกับมุมยกดาวเทียม แนวคิดของงานวิจัยดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงแบบจำลองสโตคาสติกสำหรับการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสด้วยโครงข่ายสถานีฐานวีอาร์เอสในประเทศไทยได้ โดยในประเทศไทยมีการเก็บข้อมูลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosonde) จากสถานีวัดตรวจสภาพอากาศที่ กรุงเทพมหานคร, เชียงใหม่ และชุมพร โดยหน่วยงานเพื่อการวิจัย Thai GNSS and Space Weather Information Center เป็นผู้ดูแลและบริการข้อมูล (<http://iono-gnss.kmitl.ac.th/>)

4) จากข้อจำกัดของแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE ในเรื่องความกว้างของมูฟวิงวินโดว์ที่ต้องมีมากพอที่จะทำให้การวนซ้ำเพื่อหาค่าสมาชิกภายในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมสามารถลู่อู่เข้าหาค่าตอบได้ วิธีการหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ที่จะลดความกว้างของมูฟวิงวินโดว์คือการลดจำนวนตัวไม่ทราบค่าในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมลง โดยอาจจะนำค่าความแปรปรวนของดาวเทียมแต่ละดวงที่ได้จากแบบจำลองสโตคาสติก RIU มาเป็นตัวทราบค่าในแบบจำลองสโตคาสติก MINQUE และใช้วิธี MINQUE คำนวณหาเฉพาะสมาชิกที่เป็นค่าความแปรปรวนร่วมซึ่งเป็นสมาชิกในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมที่เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

ภาคผนวก ก

การรังวัดจีเอ็นเอสเอสแบบสัมพัทธ์และค่าคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ

ในภาคผนวกจะเป็นบทที่กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นของการรังวัดจีเอ็นเอสเอสแบบสัมพัทธ์และค่าคลาดเคลื่อนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของการประมวลผลสัญญาณ ตลอดไปจนถึงแนวคิดซึ่งเป็นที่มาของการรังวัดแบบจลน์โดยทันทีด้วยโครงข่ายและสถานะการพัฒนาโครงข่ายสถานีฐานของประเทศไทย เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาเนื้อหาของงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. สมการค่าสังเกตของการรังวัดจีเอ็นเอสเอส

ค่าที่รังวัดได้จากการรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่สำคัญและนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาตำแหน่งมี 2 ชนิด คือ ซูโดเรนจ์ (Pseudorange) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase) มีรายละเอียดดังนี้

1) ซูโดเรนจ์ คือ ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณ หากค่าได้จากการถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมเปรียบเทียบกับรหัสที่เครื่องรับสัญญาณสร้างขึ้น โดยจะทำการเลื่อนไปมาจนกระทั่งได้รหัสที่ตรงกัน ค่าเลื่อนระหว่างรหัสทั้งสองคือระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ เมื่อนำความเร็วของคลื่นวิทยุคูณด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ จะได้ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณซึ่งเรียกว่า ซูโดเรนจ์

2) เฟสของคลื่นส่ง เป็นการวัดเปรียบเทียบหรือค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมา กับเฟสของคลื่นความถี่ f_0 ที่เครื่องรับสร้างขึ้นมา โดยคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมา นั้นแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของคลื่นจำนวนเต็มรอบ (Integer cycle part) กับส่วนที่ไม่เต็มรอบ (Fractional part) ในการรับสัญญาณนั้นเครื่องรับสัญญาณไม่สามารถจะนับจำนวนเต็มรอบของคลื่นส่งที่ส่งลงมาจำนวนเต็มรอบสามารถหาค่าได้จากการคำนวณในภายหลัง โดยจำนวนเต็มนี้มีชื่อเรียกว่า Ambiguity หรือ เลขปริศนา ค่าเลขปริศนาของแต่ละดาวเทียมจะเป็นค่าคงที่ที่ทราบได้ที่มีการรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องและไม่เกิดคลื่นหลุด ดังแสดงในรูป ก-1 ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งที่รับได้จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสนั้น จะเจือปนไปด้วยค่าความคลาดเคลื่อนหลายชนิด ซึ่งสมการค่าสังเกตของการวัดเฟสของคลื่นส่งของการรับสัญญาณดาวเทียม i ที่เครื่องรับที่จุด a ที่ใช้ในการประมวลผลมีรายละเอียดของสมการดังนี้

$$\phi_a^i = \rho_a^i + \lambda N_a^i - I_a^i + T_a^i + O_a^i + C(\delta_a - \delta^i)$$

เมื่อ

ρ_a^i คือค่าเฟสคลื่นส่ง (เมตร)

ρ_a^i คือระยะทางเรขาคณิตจากดาวเทียม i ถึงเครื่องรับ a (เมตร)

N_a^i คือเลขปริศนาของคลื่นส่ง (เมตร)

I_a^i คือค่าคลาดเคลื่อนไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่งจากดาวเทียม i ถึงจุด a (เมตร)

T_a^i คือค่าคลาดเคลื่อนโทโพสเฟียร์ของคลื่นส่งจากดาวเทียม i ถึงจุด a (เมตร)

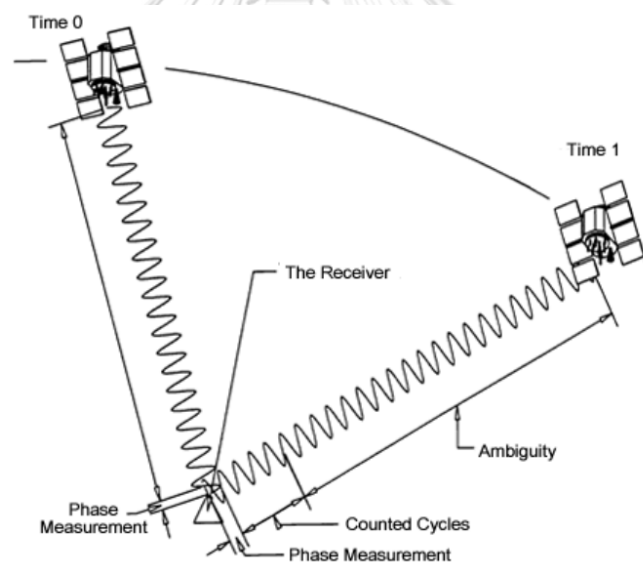
O_a^i คือค่าคลาดเคลื่อนวงโคจร (เมตร)

δ_a คือค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับของจุด a (วินาที)

δ^i คือค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม i (วินาที)

λ คือความยาวคลื่น $L1 = 0.1903$ เมตร, $L2 = 0.2442$ เมตร และ $L5 = 0.2548$ เมตร

C คือความเร็วของคลื่นส่ง (299,792,458 เมตร/วินาที)



รูป ก-1 รูปแสดงนิยามของเลขปริศนาของเฟสคลื่นส่ง

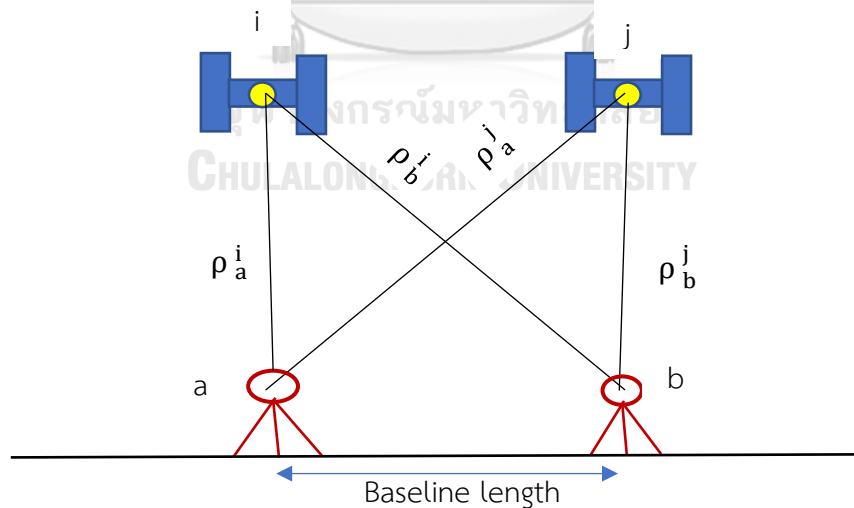
(ที่มา Basic GPS, Nptel.ac.in, 2019. [Online]. Available:

https://nptel.ac.in/courses/105104100/lectureB_8/B_8_4carrier.htm)

2. การรังวัดจีเอ็นเอสเอสแบบสัมพัทธ์

โดยทั่วไปหลักการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอสสามารถแบ่งออกเป็นสองวิธีคือ การหาตำแหน่งจุดเดียว (Single point positioning) และการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative positioning) โดยทั่วไปการหาตำแหน่งจุดเดี่ยวนั้นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้การนำทาง (Navigation) แต่

สำหรับงานรังวัดเพื่อจัดทำแผนที่ความถูกต้องระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตรจะเกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์โดยอาศัยข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์จะต้องมีเครื่องรับอย่างน้อย 2 เครื่องในการทำงาน โดยนำเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่หนึ่งไปวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า สถานีฐาน (Reference station) หลังประมาณปี พ.ศ. 2533 เริ่มมีการสร้างเป็นสถานีฐานแบบถาวร (Continuously Operating Reference Station: CORS) ซึ่งมีการรับสัญญาณต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ซึ่งเรียกว่าสถานีผู้ใช้ (Rover station) ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในรูปของระยะทางในสามมิติที่เชื่อมระหว่างจุดสองจุดที่ได้ทำการรังวัด โดยทั่วไปจะเรียกว่า “เส้นฐาน” หรือ “Baseline” ที่มีความละเอียดถูกต้องสูงระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตร เมื่อทราบตำแหน่งสัมบูรณ์ของสถานีฐานและเส้นฐาน จะสามารถหาตำแหน่งสัมบูรณ์ของสถานีผู้ใช้ การลดหรือขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่มีอยู่ในข้อมูลถือเป็นหัวใจสำคัญของการได้มาซึ่งความถูกต้องของการคำนวณเส้นฐาน เทคนิคค่าต่างเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการลดและขจัดค่าคลาดเคลื่อนหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สองกับข้อมูลเฟสของคลื่นส่งถือเป็นวิธีที่ยอมรับกันทั่วไปว่าให้ค่าความถูกต้องสูง ดังนั้นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จึงใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สองในการสร้างสมการค่าสังเกตสำหรับการประมวลผล โดยประสิทธิภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นด้วยเทคนิคค่าต่างจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างเครื่องรับทั้งสอง หรือที่เรียกกันว่า ระยะเส้นฐาน (Baseline length) ยิ่งระยะเส้นฐานยิ่งยาวมาก ประสิทธิภาพของเทคนิคค่าต่างครั้งที่สองในการลดค่าความคลาดเคลื่อนยิ่งน้อยลง



รูป ก-2 รูปแสดงเทคนิคค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่งในการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ด้วยเฟสคลื่นส่งที่ใช้สมการค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่งใช้ในการประมวลผลเส้นฐานแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามลักษณะของการรังวัด ได้แก่

1) การรังวัดแบบสถิต (static surveying) เป็นการตั้งรับสัญญาณแบบอยู่กับที่พร้อมกันประมาณ 1 ชั่วโมงขึ้นไป ที่สถานีฐานและสถานีผู้ใช้ เพื่อให้ได้เส้นฐานที่มีความถูกต้องในระดับมิลลิเมตรสำหรับระยะเส้นฐานประมาณไม่เกิน 15 กิโลเมตร

2) การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid static surveying) เป็นการตั้งรับสัญญาณแบบอยู่กับที่พร้อมกันประมาณ 10-20 นาที ที่สถานีฐานและสถานีผู้ใช้ เพื่อให้ได้เส้นฐานที่มีความถูกต้องในระดับ 1-3 เซนติเมตรสำหรับระยะเส้นฐานไม่เกิน 15 กิโลเมตรโดยประมาณ

3) การรังวัดแบบจลน์โดยทันที (Real time kinematic surveying: RTK) เป็นการตั้งรับสัญญาณพร้อมกันโดยเครื่องรับที่สถานีฐานเป็นการตั้งอยู่กับที่ ในขณะที่เครื่องรับที่เป็นสถานีผู้ใช้สามารถเคลื่อนที่ได้ จุดเด่นของการรังวัดแบบจลน์โดยทันที คือสามารถคำนวณค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้ได้ในแต่ละ epoch ในทันที เนื่องจากการส่งค่าแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางจากสถานีฐานไปยังสถานีผู้ใช้ผ่านทางระบบสื่อสารหรือ อินเทอร์เน็ต อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการรังวัดแบบ RTK ยังมีข้อจำกัดเรื่องระยะเส้นฐานไม่เกิน 15 กิโลเมตรโดยประมาณ

3. สมการค่าสังเกตของค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่ง

การหาค่าต่างที่สองจะสามารถขจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียมและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาเครื่องรับ และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียมและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศทั้งจากไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ ประสิทธิภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นขึ้นอยู่กับระยะเส้นฐาน เมื่อนำสมการค่าสังเกตของการวัดเฟสของคลื่นส่งมาหาค่าต่างสองครั้ง กล่าวคือเป็นการหาค่าต่างระหว่างจุดสองจุดและดาวเทียมสองดวงตามลำดับ ได้แก่ ระหว่างจุด a, b และดาวเทียม i, j ดังรูป ก-2 จะได้สมการค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่ง (Double difference equation of carrier phase) ที่ใช้ในการประมวลผลจีเอ็นเอสเอสดังนี้

$$\phi_{a,b}^{i,j} = \rho_{a,b}^{i,j} + \lambda N_{a,b}^{i,j} - I_{a,b}^{i,j} + T_{a,b}^{i,j} + O_{a,b}^{i,j}$$

เมื่อ a คือสถานีฐานที่ทราบค่าพิกัด (Reference station)

b คือสถานีผู้ใช้ (Rover station)

i คือดาวเทียมที่เป็นคู่ดาวเทียมกับดาวเทียมอ้างอิง (j)

j คือดาวเทียมอ้างอิง

$\phi_{a,b}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของเฟสคลื่นส่งระหว่างจุด a, b และดาวเทียม i, j

$\rho_{a,b}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของระยะทางเรขาคณิตระหว่างจุด a, b และดาวเทียม i, j

$N_{a,b}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของเลขปริศนาระหว่างจุด a, b และดาวเทียม i, j

$I_{a,b}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของค่าคลาดเคลื่อนไอโอโนสเฟียร์ระหว่างจุด a, b และดาวเทียม i, j

$T_{a,b}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองของค่าคลาดเคลื่อนโทโพสเฟียร์ระหว่างจุด a, b และดาวเทียม i, j

$O_{a,b}^{i,j}$ คือค่าต่างครั้งที่สองค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรระหว่างจุด a, b และดาวเทียม i, j

เมื่อพิจารณาสมการค่าต่างที่สองของเฟสคลื่นส่งจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ได้แก่ องค์ประกอบเส้นฐาน ซึ่งแฝงอยู่ในเทอม $\rho_{a,b}^{i,j}$ และค่าต่างครั้งที่สองของเลขปริศนา $N_{a,b}^{i,j}$ ส่วนค่าต่างครั้งที่สองของค่าคลาดเคลื่อนได้แก่ $I_{a,b}^{i,j}$, $T_{a,b}^{i,j}$, $O_{a,b}^{i,j}$ เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่มีคุณสมบัติขึ้นกับระยะทาง คือยิ่งมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเส้นฐานมากขึ้น ดังนั้นในกรณีที่เป็นการบินวงโคจรเส้นฐานไม่ยาวนาน (ต่ำกว่าประมาณ 15 กิโลเมตร) โดยทั่วไปมักจะสมมุติให้มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในทางตรงข้ามเมื่อระยะเส้นฐานมากกว่า 15 กิโลเมตรจะต้องมีวิธีการประมาณค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางเหล่านั้นก่อนที่จะปรับแก้ลิสต์สแควร์ โดยในปัจจุบันการประมาณค่ามักจะเป็นค่าแก้ที่คำนวณมาจากโครงข่ายสถานีฐานจีเอ็นเอสเอส เมื่อจัดเทอมต่างๆ ให้อยู่ในรูปแบบของสมการปรับแก้ลิสต์สแควร์ $L = AX$ เมื่อ L คือเมทริกซ์ค่าสังเกต, A คือ Design matrix และ X คือเมทริกซ์ของค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ องค์ประกอบเส้นฐาน และค่าต่างที่สองของเลขปริศนา อย่างไรก็ตามเนื่องจากเทอม $\rho_{a,b}^{i,j}$ ของสมการค่าต่างครั้งที่สองอยู่ในรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจะต้องถูกทำให้เป็นสมการเชิงเส้นเพื่อทำให้การคำนวณต่อไปสามารถใช้สมการทางพีชคณิตเชิงเส้น (Linear algebra) คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ลำดับแรก (First order Taylor's series expansion) สามารถสร้างสมการค่าสังเกตในการปรับแก้ลิสต์สแควร์ในรูปแบบเมทริกซ์ (Linearized observation equation) ซึ่งมีตัวอย่างในกรณีของการรับสัญญาณดาวเทียมจำนวน 4 ดวงที่ 1 epoch ดังนี้

$$L = [\emptyset_{a,b}^{1,2} - \rho_{a,b}^{1,2} \quad \emptyset_{a,b}^{1,3} - \rho_{a,b}^{1,3} \quad \emptyset_{a,b}^{1,4} - \rho_{a,b}^{1,4}]^T$$

$$A = [B \quad \lambda E]$$

$$X = [\Delta x_{a,b} \quad \Delta y_{a,b} \quad \Delta z_{a,b} \quad N_{a,b}^{1,2} \quad N_{a,b}^{1,3} \quad N_{a,b}^{1,4}]^T$$

เมื่อ

E = เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) ขนาด 3×3

$$B = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_i = \frac{X_0 - X^i}{\rho_0^i} - \frac{X_0 - X^1}{\rho_0^1} ; \beta_i = \frac{Y_0 - Y^i}{\rho_0^i} - \frac{Y_0 - Y^1}{\rho_0^1} ; \gamma_i = \frac{Z_0 - Z^i}{\rho_0^i} - \frac{Z_0 - Z^1}{\rho_0^1}$$

X_0 Y_0 Z_0 คือค่าพิกัดโดยประมาณของสถานีผู้ใช้ (คำนวณได้จากการประมวลผลแบบจุดเดียว)

X^1 Y^1 Z^1 คือค่าพิกัดดาวเทียมอ้างอิง (ดาวเทียมหมายเลขที่ 1)

X^i Y^i Z^i คือค่าพิกัดดาวเทียม i เมื่อ $i = [2,3,4]$ (คำนวณจากข้อมูลวงโคจรดาวเทียม)

ρ_0^i คือระยะเรขาคณิตจากค่าพิกัดโดยประมาณของสถานีผู้ใช้ไปยังดาวเทียม i

ρ_0^1 คือระยะเรขาคณิตจากค่าพิกัดโดยประมาณของสถานีผู้ใช้ไปยังดาวเทียมอ้างอิง (ดาวเทียมหมายเลขที่ 1)

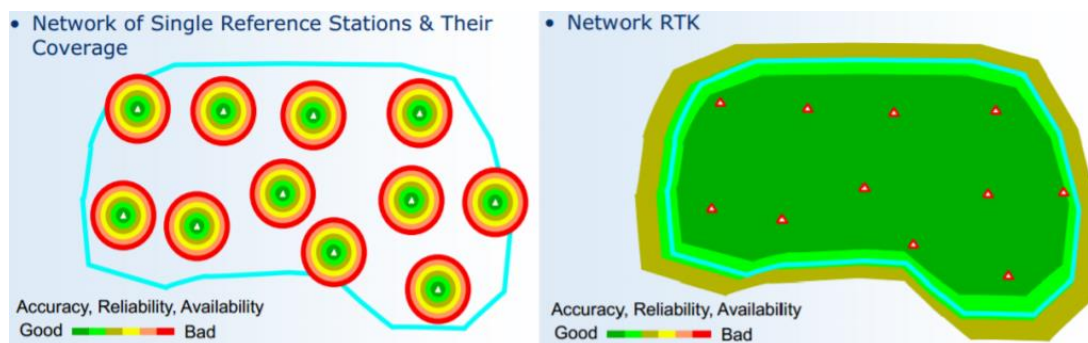
$\Delta x_{a,b}$ $\Delta y_{a,b}$ $\Delta z_{a,b}$ คือองค์ประกอบเส้นฐานจากจุด a ถึงจุด b

$N_{a,b}^{1,2}$ $N_{a,b}^{1,3}$ $N_{a,b}^{1,4}$ คือค่าต่างที่สองของเลขปริศนาระหว่างจุด a กับ b และระหว่างดาวเทียมอ้างอิงหมายเลขที่ 1) กับดาวเทียมที่กำลังพิจารณา

ซึ่งจากสมการข้างต้น จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ 6 ตัว จึงต้องมีข้อมูลอย่างน้อย 2 epoch จึงจะสามารถหาคำตอบได้ เพื่อที่จะแก้ปัญหาได้โดย Design matrix ไม่มีขนาดใหญ่จนเกินไป ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้การปรับแก้สี่สแควร์แบบ Sequential least-squares

4. การรังวัดแบบจลน์โดยทันทีด้วยโครงข่าย (Network-based RTK surveying)

ประมาณปี พ.ศ. 2543 การรังวัดแบบจลน์โดยทันทีแบบใช้สถานีฐานหนึ่งสถานีได้มีการพัฒนาไปเป็นการรังวัดแบบจลน์โดยทันทีด้วยโครงข่ายเพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องของการรังวัดที่จะต้องอยู่ภายในระยะเส้นฐานที่จำกัด (ประมาณ 15 กิโลเมตร) และทำให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่จะได้รับมีความสม่ำเสมออยู่ในระดับเดียวกันทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ ไม่แปรผกผันกับระยะทางระหว่างสถานีผู้ใช้ (Rover) กับสถานีฐานเหมือนกับการรังวัดแบบจลน์โดยทันทีแบบใช้สถานีฐานหนึ่งสถานีดังรูปที่ ก-3 หลักการของการรังวัดแบบจลน์โดยทันทีด้วยโครงข่าย คือการนำข้อมูลจีเอ็นเอสเอสซึ่งมีการรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องโดยสถานีฐานตั้งแต่ 3 สถานีขึ้นไปที่ตั้งอยู่บริเวณโดยรอบตำแหน่งสถานีผู้ใช้มาประมวลผลร่วมกันที่ฝั่งแม่ข่ายเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทาง ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศเป็นปัจจัยหลัก และสร้างเป็นค่าแก้และส่งไปยังเครื่องรับเพื่อนำไปใช้ในการปรับแก้เพื่อคำนวณค่าพิกัดผลลัพธ์แบบเรียลไทม์ ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์โดยทันที (RTK GNSS network) จะประกอบด้วย 3 องค์ประกอบได้แก่



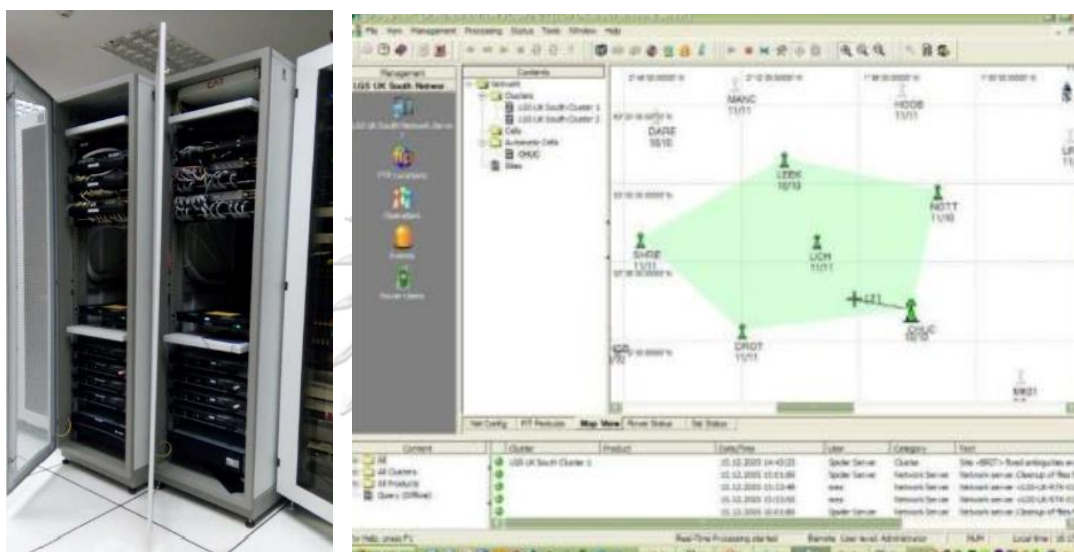
รูป ก-3 การเปรียบเทียบพื้นที่การให้บริการระหว่าง Single base RTK กับ Network RTK (https://v1.cecdn.yun300.cn/fsite_1802020370/ComNav_CORS_Solution2.01561382800309.pdf)

1) สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (Continuous Operating Reference Station: CORS) เป็นสถานีรับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งถาวร ในตำแหน่งที่มีความมั่นคง โดยสถานีเหล่านี้จะรับสัญญาณดาวเทียมตลอด 24 ชั่วโมง และทำการส่งสัญญาณดาวเทียมที่รับได้ไปยังศูนย์ควบคุมผ่านทางระบบสื่อสาร เช่น ทางโทรศัพท์ หรือระบบอินเทอร์เน็ต ดังรูป ก-4 แสดงตัวอย่างของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงและอุปกรณ์การรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ติดตั้งอยู่ในสถานีฐาน



รูป ก-4 สถานีฐานจีเอ็นเอสเอส (www.dol-rtknetwork.com)

2) ศูนย์ควบคุม (Control Center) เป็นชุดของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ส่งมาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงหรือ CORS เพื่อให้ซอฟต์แวร์คำนวณค่าปรับแก้ให้แก่ผู้ใช้งานที่ทำการรังวัดค่าพิกัดแบบจลน์ กำหนดและตรวจสอบสิทธิการใช้งาน สำรองข้อมูล ตลอดจนให้บริการดาวน์โหลดข้อมูลสัญญาณดาวเทียมสำหรับใช้คำนวณค่าพิกัดแบบภายหลัง (Post Processing) ดังแสดงในรูปที่ ก-5



รูป ก-5 ระบบประมวลผลฝั่งแม่ข่ายของศูนย์ควบคุม RTK GNSS Network

(www.dol-rtknetwork.com)

3) การสื่อสาร (Communication) คือ ระบบสื่อสารที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างศูนย์ควบคุม กับสถานีฐาน CORS และระหว่างศูนย์ควบคุมกับผู้ใช้งานโดยการสื่อสารที่ปกติจะเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงกับศูนย์ควบคุม ซึ่งมักจะใช้เป็นระบบอินเทอร์เน็ตพื้นฐาน เช่น ระบบ ADSL หรือ Leased Line เนื่องจากการรับส่งข้อมูลต้องการความเสถียรภาพสูง และจากการที่สถานี CORS จะต้องทำงานตลอดเวลา ดังนั้น จึงต้องมีการสื่อสารสำรอง (Backup Link) เช่น อินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ไว้ใช้งาน เพื่อทดแทนในกรณีที่ระบบสื่อสารหลักเกิดขัดข้อง ในส่วนของการรับส่งข้อมูลระหว่างศูนย์ควบคุมกับผู้ใช้งานจะใช้ระบบอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์มือถือ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้การสื่อสารที่มีเสถียรภาพที่สูงมาก ทั้งนี้การรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจะอาศัย NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol) ซึ่งเป็นโปรโตคอลระดับ application (HTTP 1.1) ที่ใช้ในการส่ง

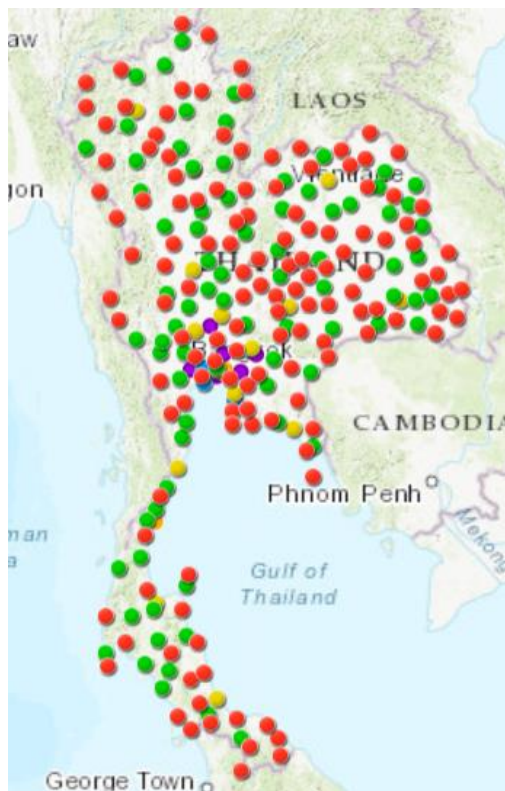
ข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่มีลักษณะ steaming ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ได้แก่ การส่งข้อมูลจีเอ็นเอสเอสจากสถานีฐานไปยังศูนย์ควบคุม และการส่งค่าแก้ RTK จากศูนย์ควบคุมไปยังเครื่องรับของผู้รับวัด ทั้งที่อยู่กับที่หรือกำลังเคลื่อนที่ NTRIP ถูกพัฒนาขึ้นโดยหน่วยงาน Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG) ของประเทศเยอรมัน สร้างอยู่บนกฎของ TCP/IP และเป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิดทำให้ผู้ผลิตเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสสามารถนำไปใช้ในซอฟต์แวร์ของเครื่องรับได้นอกจากนี้ NTRIP ยังถูกออกแบบให้รองรับการส่งค่าแก้ RTK ทั้งในรูปแบบ RTCM ซึ่งเป็นอิสระกับผู้ผลิตเครื่องรับ และรูปแบบ proprietary format ของผู้ผลิต เช่น CMR/CMR+ ของ Trimble, LB2 ของ Leica เป็นต้น ซึ่งในขณะดำเนินการวิจัย RTCM version 3.1 ถือเป็นเวอร์ชันล่าสุดที่ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานด้าน RTK และรองรับ Network RTK โดยได้ออกเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการรับวัด Network RTK โดยเฉพาะ (RTCM SC104 3.0) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตาราง ก-1 มาตรฐาน RTCM ที่เกี่ยวข้องกับการรับวัด Network RTK (<https://www.rtcn.org/>)

รหัสเอกสาร	รายชื่อเอกสารมาตรฐาน RTCM
RTCM 10402.3	RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 2.3“This standard is used around the world for differential satellite navigation systems, both maritime and terrestrial
RTCM 10403.3	Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3 + Amendment 1 (April 28, 2020) - A more efficient alternative to RTCM 10402.3
RTCM 10410.1	Standard for Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) - An application-level protocol that supports streaming Global Navigation Satellite System (GNSS) data over the Internet
RTCM 10401.2	Standard for Differential Navstar GPS Reference Stations and Integrity Monitors (RSIM) - A companion to RTCM 10402.3, this standard addresses the performance requirements for the equipment which broadcasts DGNSS corrections

5. ระบบโครงข่ายการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในประเทศไทย

ประเทศไทยเริ่มมีการสร้างสถานีฐาน CORS เมื่อปี พ.ศ. 2539 จำนวน 11 สถานี ตั้งอยู่บริเวณจังหวัดที่มีลักษณะความเป็นเมืองที่หนาแน่น เพื่อให้บริการรังวัดแบบจลน์โดยทันทีด้วยหนึ่งสถานีฐาน (Single base RTK) และการดาวน์โหลดข้อมูลจีเอ็นเอสเอสเพื่อการประมวลผลภายหลัง (Post processing) โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง จากนั้นหน่วยงานราชการในประเทศได้มีการสร้างสถานี CORS อย่างต่อเนื่อง ปี พ.ศ. 2548 กรมอุตุนิยมวิทยาได้สร้างสถานีฐาน CORS จำนวน 5 สถานีสำหรับระบบติดตามแผ่นดินไหวและสึนามิ ในปีถัดมาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ตั้งสถานีฐาน CUSV เพื่อเป็นหนึ่งในสถานีฐานที่อยู่ในโครงข่ายสถานีฐานระดับโลกของหน่วยงาน IGS (The International GNSS Service) ต่อมาในปี พ.ศ. 2551 กรมที่ดินได้จัดสร้างระบบ LandGNSS ขึ้นบริเวณภาคกลางและตะวันออกซึ่งนับเป็นระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์โดยทันทีระบบแรกของประเทศไทย นับจนถึงปีที่ยานศึกษานี้แล้วเสร็จ (ปี พ.ศ. 2563) ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์โดยทันทีได้ขยายการให้บริการอย่างรวดเร็วจนครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทย มีจำนวนสถานีฐานมากกว่า 200 สถานี ดังรูป ก-6 ประกอบด้วยโครงข่าย LandGNSS ของกรมที่ดิน 101 สถานี, โครงข่าย RTSD ของกรมแผนที่ทหาร 77 สถานี, โครงข่ายกรมโยธาธิการและผังเมือง 15 สถานี, โครงข่ายสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ 6 สถานี, และสถานีฐาน CORS ของหน่วยงานอื่นๆ ได้แก่ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ 4 สถานี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 4 สถานี, กรมอุตุนิยมวิทยา 4 สถานี, สถาบันมาตรวิทยา 1 สถานี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 1 สถานี ซึ่งได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาประเทศด้านต่างๆ เช่น การออกโฉนดรายแปลง, การจัดทำแผนที่กายภาพและผังเมือง, งานติดตามทรัพยากรน้ำ และในอนาคตมีแผนงานที่จะตั้งศูนย์ควบคุมกลางของประเทศเพื่อผนวกโครงข่ายของหน่วยงานราชการเข้าด้วยกันเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ร่วมกันให้ได้ตามแผนพัฒนาอุตสาหกรรมใหม่ไทยแลนด์ 4.0 ได้แก่ ระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะ, การเกษตรความแม่นยำสูง และเมืองอัจฉริยะ (Smart cities) เป็นต้น



รูป ก-6 แผนที่แสดงการกระจายตัวของสถานีฐานในประเทศไทย
(<https://gnss-portal.rtsd.mi.th/portal/apps/sites/#/gnss>)

6. ค่าคลาดเคลื่อนในข้อมูลดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและผลกระทบต่อการคำนวณเส้นฐาน

ในงานสำรวจจริงวัดไม่ว่าจะทำการรังวัดด้วยอุปกรณ์ชนิดใดก็ตาม ย่อมมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ ในงานสำรวจด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบสัมพัทธ์ก็เช่นเดียวกันก็ย่อมมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น หากจะแบ่งค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ ออกเป็นกลุ่มตามวิธีการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 การแบ่งกลุ่มค่าคลาดเคลื่อนที่มีผลกระทบต่อกรังวัดจีเอ็นเอสเอส

ข้อ ที่	กลุ่มของค่า คลาดเคลื่อน	ชนิดของค่าคลาดเคลื่อน	วิธีการปรับแก้ค่า คลาดเคลื่อน
1	ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับ ระยะทาง	ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์, ค่า คลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ โทรโปสเฟียร์ และค่าคลาดเคลื่อน	— สามารถลดขนาดได้ด้วย เทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง ในกรณีของระยะเส้น ฐานสั้น

ข้อ ที่	กลุ่มของค่า คลาดเคลื่อน	ชนิดของค่าคลาดเคลื่อน	วิธีการปรับแก้ค่า คลาดเคลื่อน
		เนื่องจากวงโคจรดาวเทียม	— ค่าแก้จากระบบ โครงข่ายสถานีฐานใน กรณีของระยะเส้นฐาน ยาว
2	ค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่ ขึ้นกับระยะทางและ สามารถลดขนาดได้ด้วย เทคนิคค่าต่างที่สอง	ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม , ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกา เครื่องรับ	สามารถขจัดออกได้ ทั้งหมดด้วยเทคนิคค่าต่าง ที่สอง
3	ค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่ ขึ้นกับระยะทางและ สามารถลดขนาดได้ด้วย การควบคุมคุณภาพงาน สำรวจ	— ค่าคลาดเคลื่อนจากการ แปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟส ของเสาอากาศ — ค่าคลาดเคลื่อนจากสัญญาณ รบกวนในเครื่องรับ — คลื่นหลายวิถี (Multipath)	— สามารถควบคุมคุณภาพ ให้มีผลกระทบไม่มาก โดยการเลือกใช้เสา อากาศ, เครื่องรับ สัญญาณที่มีคุณภาพสูง

จากตารางที่ ก-2 ค่าคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะทางนับเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการรังวัดจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์โดยทันทีมากกว่ากลุ่มค่าคลาดเคลื่อนประเภทอื่น โดยเฉพาะกับการรังวัดที่มีระยะเส้นฐานยาว การใช้เทคนิคค่าต่างที่สองกับการประมวลผลเส้นฐานที่ระยะเส้นฐานยาวจะไม่มีประสิทธิภาพเพราะไม่สามารถหักล้างค่าคลาดเคลื่อนประเภทนี้ออกไปได้มากพอ ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะยังคงแฝงอยู่ในรูปแบบของค่าเศษเหลือที่มีค่ามากเกินไปจะส่งผลให้การหาค่าเลขปริศนาจำนวนเต็มไม่ถูกต้อง หากเป็นการรังวัดที่มีระยะเส้นฐานยาว (ประมาณ 15 กิโลเมตรขึ้นไป) จะต้องมียุทธศาสตร์การร่วมในการประมวลผล ซึ่งความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะส่งผลกระทบต่อค่าคำนวณเส้นฐานมากที่สุด และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ส่งผลกระทบรองลงมา ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากข้อมูลวงโคจรดาวเทียมมีผลกระทบน้อยมากเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ

- 1) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีขอบเขตของความสูงเหนือพื้นโลกตั้งแต่ 50 ถึง 1,000 กิโลเมตรในชั้นนี้จะมีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีผลทำให้คลื่นสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเดินทางด้วยความเร็วที่ต่างจากความเร็วแสง การเดินทางของคลื่นสัญญาณจีเอ็นเอสเอสผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีผลทำให้ซูโดเรนจ์เดินทางช้าลงดังนั้นระยะที่วัดได้จึงยาวกว่าที่ควรจะเป็น ในทางกลับกันเฟสของคลื่นส่งจะเดินทางได้เร็วขึ้น ระยะที่วัดได้จึงสั้นลงกว่าที่ควรจะเป็น Beutler et al. (1998) พิสูจน์ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อความยาวเส้นฐานเป็นสูตรคำนวณจากเรขาคณิตของการสมมุติให้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ให้แบบบาง (Single layer) ดังนี้

$$\frac{\delta B_{\text{ion}}}{B} = \frac{1}{R_E \cos z} \frac{40.3}{f^2} \text{VTEC}$$

เมื่อ δB_{ion} อัตราส่วนของค่าคลาดเคลื่อนต่อความยาวเส้นฐานที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ppm)

B ความยาวเส้นฐาน (กิโลเมตร)

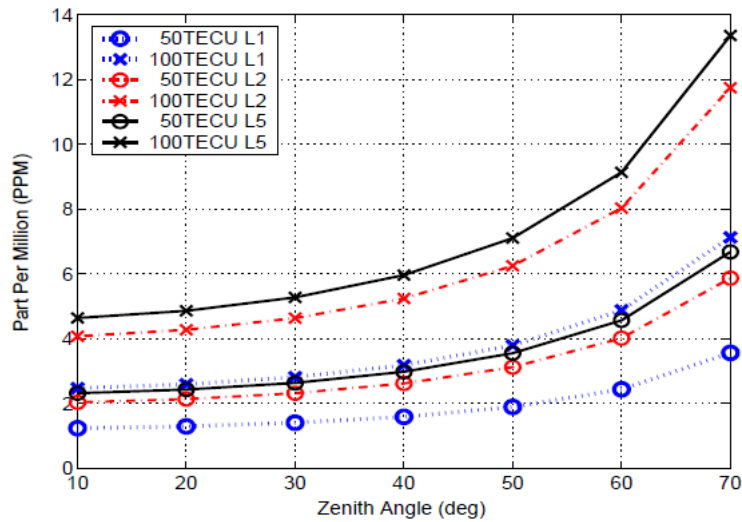
R_E รัศมีของโลก (ประมาณ 6,371 กิโลเมตร)

z มุม zenith ดาวเทียม (องศา)

f ความถี่ของสัญญาณดาวเทียม (Hz)

VTEC ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (TECU)

จากสูตรข้างต้นแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อเส้นฐานจะแปรผันตรงกับความยาวเส้นฐาน ค่า VTEC จะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ฤดูกาลและเวลา ระดับความแรงของแสงอาทิตย์ (Solar activity), และความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในขณะรับวัด ในส่วนของเทอมตัวหาร $\cos z$ เป็นฟังก์ชันในการแปลงค่าคลาดเคลื่อนให้อยู่ในทิศทางทางการเดินทางของสัญญาณ (Mapping function) และมีผลต่อสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าสัญญาณที่มีความถี่สูง เมื่อนำสูตรมานำเสนอในรูปแบบกราฟจะเห็นว่าผลกระทบต่อเส้นฐานจะมีค่ามากที่สุดในกรณีของสัญญาณดาวเทียม L5 (L5 มีความถี่ต่ำกว่า L1, L2) ที่เดินทางในทิศทางมุม Zenith เท่ากับ 70 องศา (มุมยก เท่ากับ 20 องศา) โดยที่ค่า VTEC ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ 100 TECU (โดยทั่วไป VTEC จะอยู่ในช่วง 50-60 TECU แต่อาจจะขึ้นไปในระดับ 100 TECU ในกรณีของพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตร) จะทำให้เส้นฐานที่คำนวณได้มีค่าคลาดเคลื่อน 12 ppm (ถ้าเส้นฐานยาว 100 กิโลเมตร ค่าคลาดเคลื่อนจะเท่ากับ 120 เซนติเมตร)



รูป ก-7 กราฟแสดงผลกระทบต่อเส้นฐานจากค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Beutler et al., 1998)

2) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์

ชั้นโทรโปสเฟียร์จะเริ่มจากพื้นโลกจนถึงความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร ในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบคือ ส่วนประกอบแห้งและส่วนประกอบชื้น โดยส่วนประกอบแห้งจะมีขนาดประมาณ 90 % ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ ส่วนประกอบชื้นจะมีขนาดประมาณ 10% ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ โดยทั่วไปสามารถที่จะหาค่าคลาดเคลื่อนจากการล่าช้าของเส้นทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโปสเฟียร์ในส่วนแห้งได้ดี แต่ในส่วนชื้นนั้นยากที่จะหาค่าที่ถูกต้อง ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบมีผลทำให้คลื่นเดินทางมาถึงเครื่องรับช้ากว่าความเป็นจริง ทำให้ระยะที่วัดได้ยาวกว่าที่ควรจะเป็น

ผลกระทบของชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ต่อเส้นฐานแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ เกิดจากเมื่อระยะเส้นฐานยิ่งเพิ่มขึ้นทำให้ระยะจากสถานีต้นและปลายถึงดาวเทียมดวงเดียวกันมีความต่างมากขึ้น ผลกระทบจึงมีมากขึ้นตาม และค่าคลาดเคลื่อนแบบสัมพัทธ์ เกิดจากสถานีต้นกับปลายของเส้นฐานอยู่บริเวณที่มีระดับความสูงภูมิประเทศที่แตกต่างกันจนมีความแตกต่างของชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน, ความชื้น โดยค่าคลาดเคลื่อนทั้งสองชนิดมีส่วนของเทอมตัวหาร $\cos z$ เป็นฟังก์ชันในการแปลงค่าคลาดเคลื่อนให้อยู่ในทิศทางการเดินทางของสัญญาณ (Mapping function) เช่นเดียวกัน

$$\frac{\delta B_{\text{trop}}}{B} = \frac{d_{\text{tropabs}}}{R_E \cos z}$$

$$dh = \frac{dtrop_{rel}}{\cos z}$$

เมื่อ δB_{trop} อัตราส่วนของค่าคลาดเคลื่อนต่อความยาวเส้นฐานที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (ppm)

$dtrop_{abs}$ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์แบบสัมบูรณ์

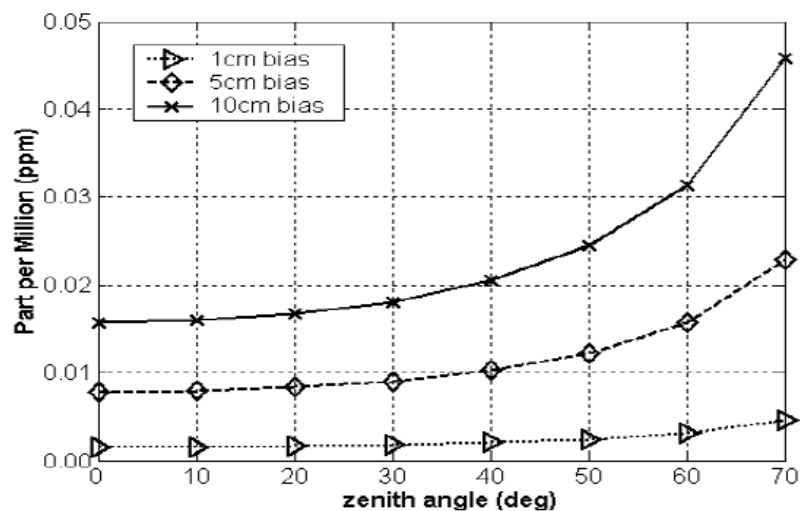
$dtrop_{rel}$ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์แบบสัมพัทธ์

B ความยาวเส้นฐาน (กิโลเมตร)

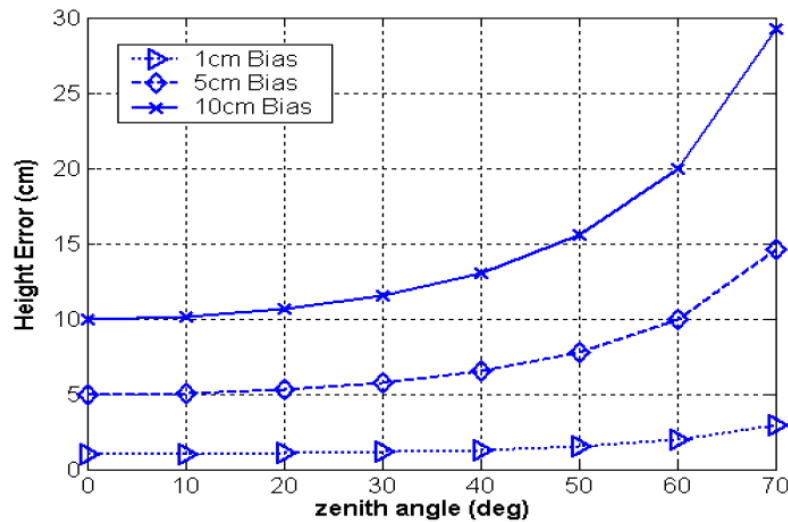
R_E รัศมีของโลก (ประมาณ 6,371 กิโลเมตร)

z มุม Zenith ดาวเทียม (องศา)

เมื่อนำสมการทั้งสองมานำเสนอในรูปแบบกราฟจะเห็นได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์แบบสัมบูรณ์มีคุณสมบัติแปรผันตามระยะเส้นฐาน สมมุติว่าประมาณค่าคลาดเคลื่อนโทรโปสเฟียร์ผิดไป 10 เซนติเมตร ผลกระทบจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.045 ppm สำหรับมุม zenith เท่ากับ 70 องศา (ถ้าเส้นฐานยาว 100 กิโลเมตร ค่าคลาดเคลื่อนจะเท่ากับ 4.5 เซนติเมตร) ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์แบบสัมพัทธ์นั้นจะส่งผลกระทบให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนกับความถูกต้องของค่าพิกัดทางตั้ง เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟจะเห็นได้ว่าผลกระทบที่มากที่สุดจะเกิดกับสัญญาณดาวเทียมในทิศมุม zenith มีค่าสูง



รูป ก-8 กราฟแสดงผลกระทบต่อเส้นฐานจากค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์แบบสัมบูรณ์ (Beutler et al., 1998)



รูป ก-9 กราฟแสดงผลกระทบต่อเส้นฐานจากค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์แบบสัมพัทธ์ (Beutler et al., 1998)

3) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากข้อมูลวงโคจรดาวเทียม

ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมนั้นถูกคำนวณขึ้นที่สถานีควบคุมหลัก (Master Control Station) โดยอาศัยข้อมูลที่ได้รับจากสถานีติดตามดาวเทียม (Monitor station) ที่กระจายตัวอยู่ร่วมกันเรียกว่าส่วนควบคุม (Control segment) ซึ่งจะมีการทำนายวงโคจรดาวเทียมล่วงหน้าและส่งข้อมูลที่ทำนายไปยังดาวเทียมเพื่อให้ดาวเทียมส่งมาให้กับผู้ใช้ในรูปแบบของข้อมูลนำหนที่มาพร้อมกับคลื่นสัญญาณดาวเทียม ในความเป็นจริงแล้วการทำนายวงโคจรของดาวเทียมให้สมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ เนื่องจากมีแรงต่างๆ มากกระทำกับตัวดาวเทียมมากมายหลายชนิด ด้วยเหตุนี้ตำแหน่งของดาวเทียมที่คำนวณได้จากข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจึงยังมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ สำหรับผลของค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมต่อการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์จะเป็นไปตามกฎหัวแม่มือ (Rule-of-thumb) สามารถประมาณค่าได้ด้วยสูตรดังนี้

$$\frac{\delta B_{\text{orbit}}}{B} = \frac{\delta r}{p}$$

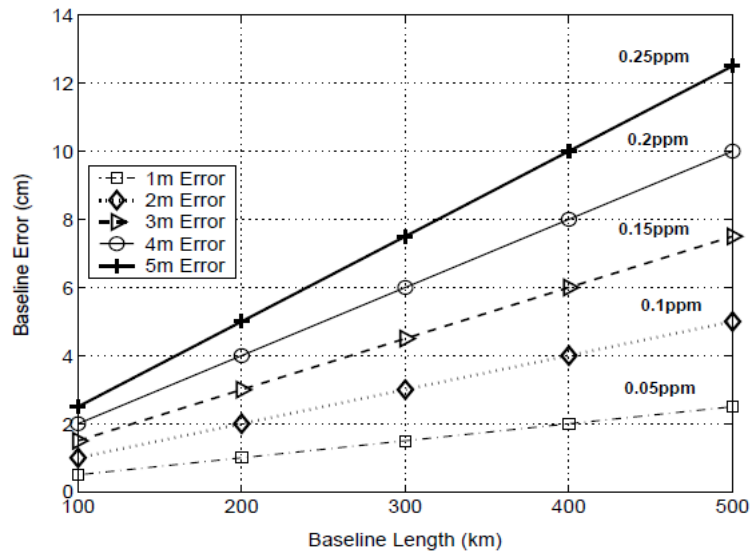
เมื่อ δB_{orbit} คือผลกระทบต่อความยาวเส้นฐานที่เกิดจากค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม (ppm)

δr คือ ค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม

p คือ ระยะทางจากเครื่องรับสัญญาณถึงดาวเทียม (ประมาณ 20,200 กิโลเมตร)

B คือ ระยะเส้นฐาน

จากกราฟถ้ากำหนดให้ Broadcast orbit มีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 1 เมตร และความยาวเส้นฐาน 100 กิโลเมตรจะได้ว่าผลกระทบต่อการคำนวณเส้นฐานอยู่ที่ประมาณ 5 เซนติเมตร



รูป ก-10 กราฟแสดงผลกระทบต่อการคำนวณเส้นฐานจากค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม (Beutler et al., 1998)

สำหรับวิธีการที่ใช้ลดค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถทำได้นอกเหนือจากการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ โดยอาศัยเทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สอง คือการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงจาก IGS แทนข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Broadcast ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ ก-3

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูงจาก IGS

(<https://www.igs.org/products>)

Product	Accuracy	Latency
Broadcast	100 cm	Real time
Ultra-rapid (predicted half)	5 cm	Real time
Ultra-rapid (observed half)	3 cm	3-9 hours
Rapid	2.5 cm	17-41 hours
Final	2.5 cm	12-18 days

บรรณานุกรม

- Alves, P., Geisler, I., Brown, N., Wirth, J. and Euler, H. J. (2005). Introduction of a Geometry-Based Network RTK Quality Indicators ION GNSS, Long Beach, CA, 881-889.
- Alves, P., Kotthoff, H., Geisler, I., Zelzer, O. and Euler, H. J. (2006). Rover Processing with Network RTK and Quality Indicators ION NTM, Monterey, CA, 881-889.
- Berber, M. and Arslan, N. (2013). Network RTK: A case study in Florida. *Measurement*, 46(8), 2798-2806.
- Beutler, G., Weber, R., Hugentobler, U., Rothacher, M. and Verdun, A. (1998). GPS Satellite Orbits. In P. J. G. Teunissen & A. Kleusberg (Eds.), *GPS for Geodesy* (pp. 43-109). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bona, P. (2000). Precision, Cross Correlation, and Time Correlation of GPS Phase and Code Observations. *GPS Solutions*, 4(2), 3-13.
- Chanutboonsin, K., Andrei, C.-O., Weerawong, K. and Charoenkalunyuta, T. (2016). Feasibility of DOL-VRS Service for Establishing Survey Control Using Post-Processing Method. *Engineering Journal*, 20, 229-238.
- Charoenkalunyuta, Satirapod, C. and Rizos, C. (2012). An investigation of the effect of ionospheric models on performance of network-based RTK GPS in Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 8(4), 61-66.
- Charoenkalunyuta, T., Satirapod, C., Lee, H. and Choi, Y. (2012). Performance of Network-Based RTK GPS in Low-Latitude Region: A Case Study in Thailand. *Engineering Journal*, 16, 95-103.
- Chen, X. and Landau, H. (2003). New Tools for Network RTK Integrity Monitoring. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), Portland, 1355-1360.
- Cui, J., Tang, W., Jin, L., Deng, C., Zou, X. and Gu, S. (2018). An improved ionosphere interpolation algorithm for network RTK in low-latitude regions. *GPS Solutions*, 22(4), 109.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. and Meindl, M. (2007). *User manual of the Bernese*

- GPS Software Version 5.0*: Astronomical Institute, University of Bern.
- De Jonge, P. and Tiberius, C. (1996). *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects* (Vol. 12): Publications of the Delft Computing Centre.
- Elhattab, A. (2016). Recent Positioning Techniques for Efficient Port Operations and Development of Suez Canal Corridor. *Renewable Energy and Sustainable Development*, 2, 126-136.
- Euler, H. J. and Schaffrin, B. (1991). On a Measure for the Discernibility between Different Ambiguity Solutions in the Static-Kinematic GPS-Mode. In K. S. i. G. IAG Symposia no.107 (Ed.), *Surveying and Remote Sensing*.
- Feng, Y. and Wang, J. (2008). GPS RTK Performance Characteristics and Analysis. *Journal of Global Positioning Systems*, 7(1), 1-8.
- Han, S. and Rizos, C. (2000). An Instantaneous Ambiguity Resolution Technique for Medium-Range GPS Kinematic Positioning. *Navigation*, 47(1), 17-31.
- Heo, Y., Yan, T., Lim, S. and Rizos, C. (2009). International Standard GNSS Real-Time Data Formats and Protocols. IGSS Symposium 2009, Holiday Inn Surfers Paradise, Qld, Australia.
- Hou, P., Zhang, B. and Yuan, Y. (2019). Combined GPS+BDS instantaneous single- and dual-frequency RTK positioning: stochastic modelling and performance assessment. *Journal of Spatial Science*, 1-24.
- Jin, S., Wang, J. and Park, P.-H. (2005). An improvement of GPS height estimations: stochastic modeling. *Earth, Planets and Space*, 57(4), 253-259.
- Junhuan, P., Yun, S., Shuhui, L. and Honglei, Y. (2011). MINQUE of Variance-Covariance Components in Linear Gauss-Markov Models. *Journal of Surveying Engineering*, 137(4), 129-139.
- Li, Y., Dingfa, H., Meng, L. and Dongwei, Z. (2015). BDS/GPS Stochastic Model Refinement and Assessment Using Satellite Elevation Angle and SNR. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume I, Berlin, Heidelberg, 537-549.
- Lim, S., Musa, T. and Rizos, C. (2008). Modelling of Dispersive and Nondispersive Effects on Network-Based Real-Time Kinematic Positioning. *Positioning*, 7, 58 - 65.

- Luo, X., Gu, S., Lou, Y., Chen, B. and Song, W. (2019). Better thresholds and weights to improve GNSS PPP under ionospheric scintillation activity at low latitudes. *GPS Solutions*, 24(1), 17.
- Mohammed Al-Shaery, A., Lim, S. and Rizos, C. (2010). Functional Models of Ordinary Kriging for Medium Range Real-time Kinematic Positioning Based on the Virtual Reference Station Technique. ION GNSS 2010, Portland.
- Mohammed Al-Shaery, A., Lim, S. and Rizos, C. (2011). Investigation of Different Interpolation Models Used in Network-RTK for the Virtual Reference Station Technique. *Journal of Global Positioning Systems*, 10, 136-148.
- Musa, T. A., Wang, J., Rizos, C. and Satirapod, C. (2003). Stochastic Modeling for Network-based GPS Positioning. The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services, Melbourne, Australia.
- Odijk, D. and Teunissen, P. J. G. (2010). Improving the speed of CORS Network RTK ambiguity resolution. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 79-84.
- Odolinski, R., Teunissen, P. J. G. and Odijk, D. (2013). Quality Analysis of a Combined COMPASS/BeiDou-2 and GPS RTK Positioning Model. IGNSS Symposium 2013, Outrigger Gold Coast, Qld Australia.
- Odolinski, R., Teunissen, P. J. G. and Odijk, D. (2015). Combined GPS + BDS for short to long baseline RTK positioning. *Measurement Science and Technology*, 26(4), 045801.
- Prochniewicz, Szpunar, R. and Brzezinski, A. (2016). Network-Based Stochastic Model for Instantaneous GNSS Real-Time Kinematic Positioning. *Journal of Surveying Engineering*, 142(4), 05016004.
- Prochniewicz, D., Szpunar, R. and Walo, J. (2016). A new study of describing the reliability of GNSS Network RTK positioning with the use of quality indicators. *Measurement Science and Technology*, 28(1), 015012.
- Rao, C. R. (1971). Estimation of variance and covariance components—MINQUE theory. *Journal of Multivariate Analysis*, 1(3), 257-275.
- Satirapod, C. (2006). Stochastic Models used in Static GPS Relative Positioning. *Survey*

- Review*, 38(299), 379-386.
- Satirapod, C., Wang, J. and Rizos, C. (2001). A New Stochastic Modelling Procedure for Precise Static GPS Positioning. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 126(6), 365-373.
- Satirapod, C., Wang, J. and Rizos, C. (2002). A Simplified MINQUE Procedure for the Estimation of Variance-Covariance Component of GPS Observables. *Survey Review*, 36(286), 582-590.
- Shengli, W., Jian, D., Jikun, O. and Wenfeng, N. (2016). Three-step Algorithm for Rapid Ambiguity Resolution between Reference Stations within Network RTK. *Journal of Navigation*, 69(6), 1310-1324.
- Srinuandee, P. and Satirapod, C. (2015). Use of genetic algorithm and sliding windows for optimising ambiguity fixing rate in GPS kinematic positioning mode. *Survey Review*, 47(340), 1-6.
- Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H., Pagels, C. and Wagner, B. (2000). Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations.
- Wang, J., Satirapod, C. and Rizos, C. (2002). Stochastic assessment of GPS carrier phase measurements for precise static relative positioning. *Journal of Geodesy*, 76, 95-104.
- Wu, S., Zhao, X., Pang, C., Zhang, L. and Wang, Y. (2019). A new strategy of stochastic modeling aiming at BDS hybrid constellation in precise relative positioning. *Advances in Space Research*, 63(9), 2757-2770.
- Zhang, S., Lim, S., Rizos, C. and Guo, J. (2009). Atmosphere Decomposition for VRS-Based Network-RTK System. The 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institution of Navigation, Savannah, Georgia.
- Zhetao, Z., Bofeng, L. and Yunzhong, S. (2018). Efficient Approximation for a Fully Populated Variance-Covariance Matrix in RTK Positioning. 144(4), 04018005.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ธเนศ จงรุจินันท์
วัน เดือน ปี เกิด	8 มิถุนายน 2517
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2546 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาระบบสารสนเทศปริภูมิทางวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	13 ถนนเฉลิมพระเกียรติ ร.๙ ซอย 71 แขวงดอกไม้ เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร 10250
ผลงานตีพิมพ์	Jongrujjan T. Satirapod C. Stochastic modeling for VRS network-based GNSS RTK with residual interpolation uncertainty, Journal of Applied Geodesy, 2020, Vol 14, Issue 3, p317-325 Jongrujjan T. Satirapod C. Improving the stochastic model for VRS network-based GNSS surveying Artificial Satellites :Journal of Planetary Geodesy, 2019, Vol. 54, Issue 1 p17-30 Jongrujjan T. Satirapod C. Study on the stochastic model for VRS network-based GNSS positioning, Proceedings of ITC CSCC 2018, Bangkok, July 4-7, 2018 ธเนศ จงรุจินันท์ และเฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2560) การศึกษาแบบจำลองสโตคาสติกสำหรับการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ด้วยเครือข่ายสถานีฐาน การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ 2560, กรุงเทพมหานคร