

การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายสถานี GNSS
แบบต่างๆ ในประเทศไทย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Evaluating the performance of various Network-based Real-Time Kinematic GNSS
techniques in Thailand

Mr. Somkiat Thipsumontha



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

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียม
แบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายสถานี GNSS แบบต่างๆ ใน
ประเทศไทย

โดย

นายสมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด พละการ)

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

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ปณิธาน ศรีนวลดี)

สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา : การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ โดยอาศัยเครือข่ายสถานี GNSS แบบต่างๆ ในประเทศไทย (Evaluating the performance of various Network-based Real-Time Kinematic GNSS techniques in Thailand) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 53 หน้า.

ปัจจุบันการรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสหรือ GNSS (Global Navigation Satellite System) ได้ใช้กันอย่างกว้างขวางในประเทศไทย การรังวัดแบบจลน์หรือ RTK (Real Time Kinematic) ซึ่งให้ความถูกต้องอยู่ในระดับเซนติเมตรและต้องการเวลาในการรังวัดในสนามไม่นาน อย่างไรก็ตามการรังวัดแบบ RTK ยังมีข้อจำกัดอยู่ (ระยะทางจากสถานีฐานโดยปกติน้อยกว่า 20 ก.ม.) การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายหรือ NRTK (Network-based Real Time Kinematic) ได้ถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยทั่วไป NRTK มีอยู่ 4 แนวคิด ยกตัวอย่างเช่น Virtual Reference Station (VRS), Flächen Korrektur Parameter (FKP), Master Auxiliary Concept (MAX) และ Individualized MAX (i-MAX) ในประเทศไทยยังไม่เคยมีการประเมินประสิทธิภาพระบบเครือข่ายทั้ง 4 ระบบนี้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ทดสอบทั้ง 4 ระบบนี้โดยใช้ซอฟต์แวร์ SpiderNet โดยทำการทดสอบที่สถานี DPT9 และ GISTDA ตั้งรับสัญญาณนาน 1 วัน และทำการรับสัญญาณแบบมีการเคลื่อนที่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แต่ละระบบเครือข่ายที่ทำการทดสอบมีความยาวของเส้นฐาน 2 ขนาด ได้แก่ 20 – 50 และ 40 – 60 กิโลเมตร ผลการทดสอบที่สถานี DPT9 และ GISTDA พบว่าจำนวนพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution ทั้ง 2 เครือข่ายมีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ทั้งหมดและเปรียบเทียบผลกับการรับสัญญาณแบบ Static พบว่าระบบ VRS ให้ความถูกต้องและความแม่นยำมากที่สุดสำหรับผลการทดสอบจากการรับสัญญาณแบบมีการเคลื่อนที่พบว่าระบบ MAX ให้ผลค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution โดยเฉลี่ยมากที่สุดจากทั้งสองเครือข่าย

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770510221 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: GNSS NETWORK / RTK / MAX / I-MAX / VRS / FKP

SOMKIAT THIPSUMONTHA: Evaluating the performance of various Network-based Real-Time Kinematic GNSS techniques in Thailand. ADVISOR: PROF. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D., 53 pp.

Currently, GNSS surveying is widely used in Thailand. Most of survey products can be obtained by the Real Time kinematic (RTK) mode which can provide positioning results at centimeter level of accuracy and requires less time in the field. However, the RTK method has some limitations (i.e. limited distance from the base station typically less than 20 km). The Network-based Real Time Kinematic (NRTK) has therefore been developed to overcome such problem. Generally, there are four NRTK concepts, for example, Virtual Reference Station (VRS), Flächen Korrektur Parameter (FKP), Master Auxiliary Concept (MAX) and Individualized (i-MAX). The performance of the four systems has never been assessed in Thailand. This research aims to test these systems by using SpiderNet Software. The results obtained from each NRTK system are compared. This experiment, station DPT9 and GISTDA are tested with 1-day observation period for each system. Tested networks have two different sizes which are 20 – 50 and 40 – 60 kilometers. It was found that the percentage of fixed solution is more than 50 percent. The horizontal coordinates are compared with the static result, found VRS provided best result in horizontal accuracy and precision. The kinematic result MAX provided most of fixed solution mode of two networks.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ ด้วยได้รับความช่วยเหลือจากบริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์ทางด้าน Software และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ กรมที่ดินที่อนุเคราะห์สถานี GNSS กรมโยธาธิการและผังเมือง (พระราม 9) และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ บางเขน ที่อนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศ. ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์และได้สละเวลาในการให้ความรู้ คำแนะนำ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดีและขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด พละการ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา และ ดร.ปณิธาน ศรีนวลดี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานที่ให้ความช่วยเหลือระหว่างที่ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ในการรังวัดดาวเทียม.....	4
2.2 การหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม.....	7
2.3 วิธีการรังวัดดาวเทียม.....	11
2.4 การรังวัดแบบการอาศัยเครือข่าย.....	12
2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	18
2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย.....	22
3.1 การทดสอบ.....	22
3.2 Software ที่ใช้ในการวิจัย.....	26
3.3 การเก็บข้อมูล.....	26

3.4 การวิเคราะห์ผล	27
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย	29
4.1 ผลการทดสอบแบบตั้งเครื่องรับอยู่กับที่.....	29
4.2 ผลการทดสอบแบบที่มีการเคลื่อนที่ ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....	33
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	35
5.2 ข้อจำกัด	36
5.3 ข้อเสนอแนะ	37
รายการอ้างอิง.....	38
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	53



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	ค่าพิกัดสถานีในเครือข่ายที่ทำการทดสอบ.....23
ตารางที่ 4.1	สรุปปริมาณผลการทดสอบค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution ที่สถานี DPT9 ...29
ตารางที่ 4.2	สรุปปริมาณผลการทดสอบค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution ที่สถานี GISTDA.....29
ตารางที่ 4.3	ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ MAX ที่สถานี DPT9 และ GISTDA.....30
ตารางที่ 4.4	ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ i- MAX ที่สถานี DPT9 และ GISTDA.....31
ตารางที่ 4.5	ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ VRS ที่สถานี DPT9 และ GISTDA31
ตารางที่ 4.6	ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ FKP ที่สถานี DPT9 และ GISTDA31
ตารางที่ 4.7	พิกัดของสถานี DPT9 และ GISTDA จากการทำให้ Static.....32
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบความถูกต้องของพิกัดทางราบที่ได้แต่ละระบบที่สถานี DPT9.....32
ตารางที่ 4.9	เปรียบเทียบความถูกต้องของพิกัดทางราบที่ได้แต่ละระบบที่สถานี GISTDA.....32
ตารางที่ 4.10	อัตราความเร็วเฉลี่ยในเก็บข้อมูลแบบมีการเคลื่อนที่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์33
ตารางที่ 4.11	ผลการทดสอบแบบที่มีการเคลื่อนที่จำนวนของค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....33
ตารางที่ 5.1	ค่าเฉลี่ย RMSE จากการทดสอบการตั้งเครื่องรับแบบอยู่กับที่ทั้งหมด.....35

สารบัญรูป

หน้า

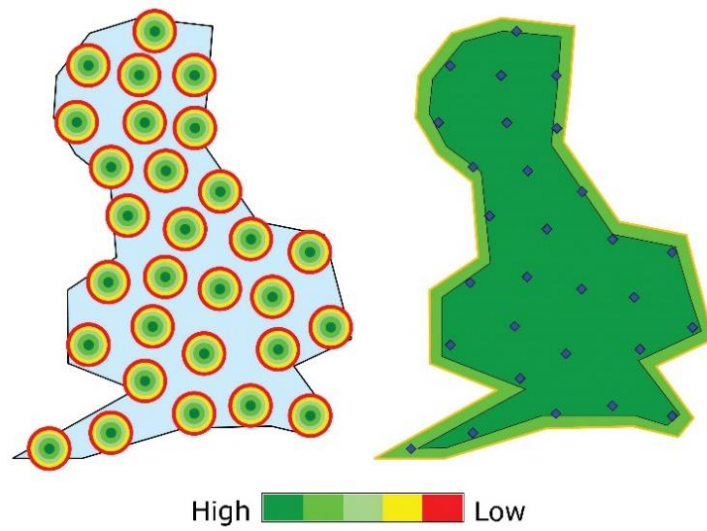
รูปที่ 1.1 ความถูกต้องของการรังวัดแบบ Single base station และแบบอาศัยเครือข่าย (GPS World, 2013).....	2
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างตำแหน่งสถานีของหน่วยงานต่างๆ บริเวณกรุงเทพฯ และต่างจังหวัด	2
รูปที่ 2.1 การหาตำแหน่งแบบจุดเดียว	9
รูปที่ 2.2 การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่าย VRS (USGS, 2016).....	14
รูปที่ 2.3 การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายแบบ FKP (Wübbena, Bagge, & Schmitz, 2001).....	14
รูปที่ 2.4 การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายแบบ i-MAX (Leica Geosystems, 2008)...	16
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายแบบ MAX (Leica Geosystems, 2008).....	18
รูปที่ 2.6 การแจกแจงแบบปกติ (นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์, 2556).....	19
รูปที่ 2.7 ความแม่นยำในการแจกแจงแบบปกติ	20
รูปที่ 3.1 เครือข่าย GNSS ที่ทำการทดสอบ.....	22
รูปที่ 3.2 การประมวลผลเส้นฐานแบบ Static	23
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดสอบแบบตั้งอยู่กับที่สถานี DPT9 และ GISTDA.....	24
รูปที่ 3.4 สถานที่การรังวัดแบบจลน์บริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน).....	25
รูปที่ 3.5 รูปแบบ Software SpiderNet ของผู้ผลิต Leica	26
รูปที่ 3.6 การเก็บข้อมูลที่กรมโยธาธิการและผังเมือง (ซ้าย) และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี อวกาศและภูมิสารสนเทศ บางเขน (ขวา).....	27
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบอยู่ใน Fixed Solution ที่สถานี DPT9 และ GISTDA	30
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการทดสอบ MAX ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE.....	33
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบอยู่ใน Fixed Solution การทำ NRTK ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	34
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบ NRTK ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	34

บทที่ 1

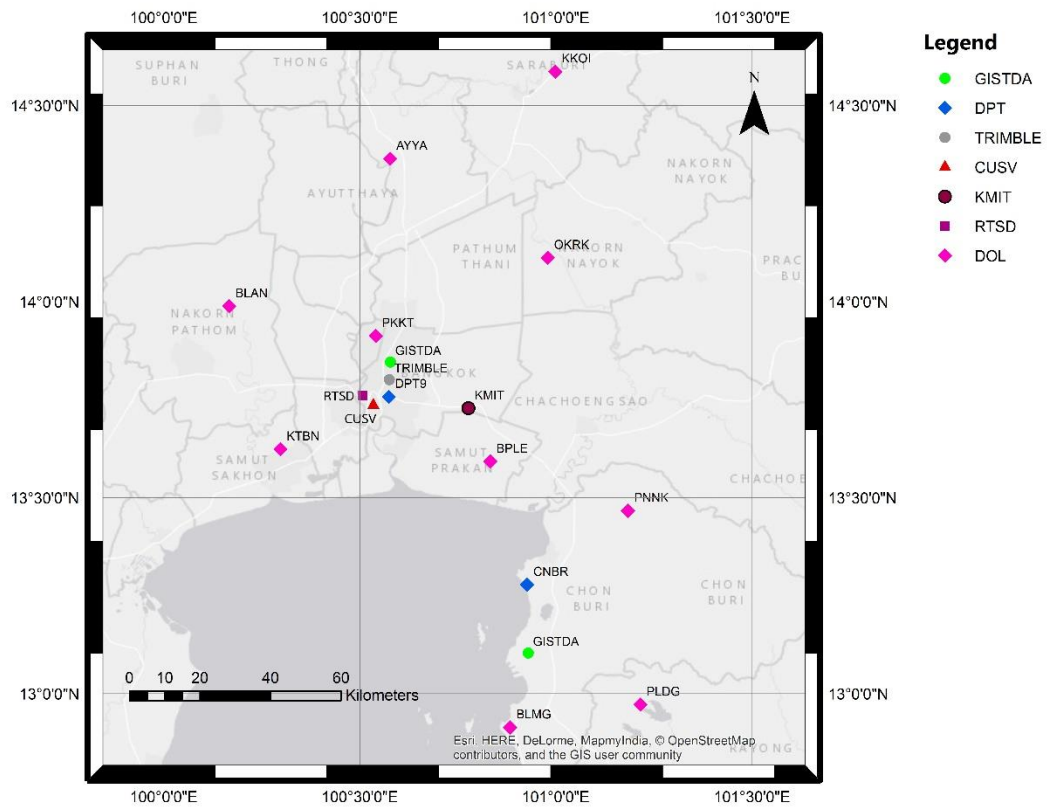
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การรังวัดดาวเทียมในปัจจุบันได้รับการนิยมนำมาใช้ในประเทศไทย สำหรับการรังวัดที่ต้องการผลการรังวัดมากๆ สามารถใช้วิธีการรังวัดแบบจลน์ (Real time kinematic) ซึ่งให้ความถูกต้องอยู่ในระดับเซนติเมตรและใช้เวลาในการรังวัดไม่นาน ในการรังวัดนี้จำเป็นต้องใช้สถานีฐานหรือใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 2 เครื่องโดยที่เครื่องใดเครื่องหนึ่งเป็นสถานีฐานเป็นจุดที่รู้ค่าพิกัด (Single base station) การรังวัดแบบจลน์โดยแบบ Single base station ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของความยาวของเส้นฐานที่มากขึ้นจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องทางตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 1.1 ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีการรังวัดแบบจลน์แบบอาศัยเครือข่ายเพื่อลดข้อจำกัดของการรังวัดแบบ Single base station ในประเทศไทยได้เริ่มมีการนำระบบการรังวัดแบบอาศัยเครือข่ายหน่วยงานที่นำมาใช้เป็นที่แรก คือ กรมที่ดิน ได้มีการติดตั้งระบบเครือข่ายสถานีฐานระบบ Virtual reference station (VRS) ซึ่งประเทศไทยยังคงใช้การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่าย VRS (ธีทัต เจริญกาลัญญา, 2555) ประเมินว่าผลที่ได้จากการรังวัดนั้นบางช่วงเวลาให้ค่าพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูงหรือมีค่าพิกัดที่กระโดดขนาดใหญ่ ในปัจจุบันการรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้นมีอยู่ 4 ระบบ ได้แก่ ระบบ VRS, ระบบ Flächen Korrektur Parameter (FKP), ระบบ Master Auxiliary Concept (MAX) และ Individualized MAX (i-MAX) ในประเทศไทยยังไม่เคยมีการประเมินทดลองการใช้ระบบเครือข่ายทั้ง 4 ระบบ ในประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่อยู่ในพื้นที่ Low-Latitude จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าพิกัดในช่วงเวลากลางคืนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Charoenkalunyuta, Satirapod, Lee, & Choi, 2012) ในการประเมินทั้ง 4 ระบบนี้ ระบบอื่นอาจจะให้ค่าความถูกต้องของพิกัดหรือมีความเหมาะสมมากกว่าการใช้ระบบ VRS ได้ ดังนั้นเพื่อต้องการทราบว่าแต่ละวิธีนั้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างไรเพื่อเป็นโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป ปัจจุบันหน่วยงานต่างๆ ของทางราชการ เช่น กรมโยธาธิการ และ กรมที่ดิน นั้นได้มีการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งในบริเวณกรุงเทพฯ ปริมณฑล และต่างจังหวัด ตัวอย่างตำแหน่งของสถานี GNSS ของแต่ละหน่วยงานแสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ความถูกต้องของการรับวัดแบบ Single base station และแบบอาศัยเครือข่าย (GPS World, 2013)



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างตำแหน่งสถานีของหน่วยงานต่างๆ บริเวณกรุงเทพฯ และต่างจังหวัด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาเปรียบเทียบผลการรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายจากระบบ MAX, i-MAX, VRS และ FKP

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ข้อมูลจากสถานีอยู่ในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลโดยกำหนดให้มีสถานีในเครือข่าย 4 สถานี
- 1.3.2 ทำการรังวัดแบบจลน์เก็บข้อมูล 1 วัน โดยการใช้อัตราเก็บข้อมูลทุก 1 วินาที ในแต่ละระบบ
- 1.3.3 การประมวลผลเป็นแบบ Real Time และใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS + GLONASS

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ทราบถึงความแตกต่างของการรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายด้วยระบบ MAX, i-MAX, VRS และ FKP
- 1.4.2 ทราบถึงความเหมาะสมของการรังวัดแบบจลน์แบบอาศัยเครือข่ายสำหรับประเทศไทย
- 1.4.3 สามารถประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายแต่ละระบบที่ให้ความแม่นยำ ความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดที่ได้

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ในการรังวัดดาวเทียม

ปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากการหาตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียมอย่างแพร่หลายประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศแรกที่มีการส่งดาวเทียมเข้าสู่วงโคจร คือ ระบบดาวเทียม GPS จากนั้นได้มีประเทศอื่นๆ พัฒนาและส่งดาวเทียมขึ้นไปสู่วงโคจร ได้แก่ ประเทศสหพันธรัฐเซีย GLONASS สหภาพยุโรป Galileo สาธารณรัฐประชาชนจีน Compass ประเทศญี่ปุ่น QZSS และประเทศสาธารณรัฐอินเดีย IRNSS ในการกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกโดยใช้ดาวเทียมนี้ คือ GNSS (Global Navigation Satellite System) สามารถแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบครอบคลุมทั้งโลกและแบบครอบคลุมระบบภูมิภาค

ในการรังวัดดาวเทียมสิ่งที่อยู่ในข้อมูลการรับสัญญาณ คือ ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ และส่งผลต่อการหาตำแหน่ง ดังเพื่อให้การหาด้วยตำแหน่งดาวเทียมมีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ออกไป ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

ค่าคลาดเคลื่อนในข้อมูลจีพีเอสจากการรับสัญญาณสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนจากดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศ ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีและค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ ทั้งนี้ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ บริเวณที่ทำการตั้งเครื่องรับสัญญาณด้วย ในค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ เหล่านี้สามารถกำจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนได้จากการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการปรับแก้ให้กับข้อมูล

2.1.1 ค่าคลาดเคลื่อนจากดาวเทียม

ค่าคลาดเคลื่อนจากดาวเทียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม สำหรับค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรของดาวเทียม ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมนี้นี้จะถูกคำนวณขึ้นโดยสถานีควบคุมหลัก โดยอาศัยข้อมูลที่รับได้จากสถานีติดตามดาวเทียม ในระหว่างการรับสัญญาณดาวเทียมจะส่งข้อมูลนำหนของดาวเทียมมาให้ผู้ใช้พร้อมกับคลื่นรับสัญญาณดาวเทียม สำหรับวิธีการลดค่าคลาดเคลื่อนจากดาวเทียมสามารถทำได้โดยการใช้ข้อมูลดาวเทียมความละเอียดสูงหรือจะเป็นการใช้เทคนิคการหาค่าต่างเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนออกไปและค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมเกิดจากการเทียบเวลาและความถี่มาตรฐานที่แตกต่างไปจากเวลาจีพีเอส โดยข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมจะอยู่ในข้อมูลนำหนที่ส่งมาพร้อมกับคลื่นสัญญาณดาวเทียม สำหรับวิธีการลดค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม

สามารถทำได้โดยการใช้ข้อมูลนาฬิกาค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงจาก IGS และการใช้เทคนิคการหาค่าต่างเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมออกไป (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2547)

2.1.2 ค่าคลาดเคลื่อนจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 คือ การเกิดค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาของเครื่องรับ การเกิดการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ การเกิดสัญญาณรบกวนในเครื่องรับและการเกิดค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดสถานีฐาน ในกรณีของการเกิดค่าคลาดจากนาฬิกาของเครื่องรับเกิดขึ้นเนื่องจากนาฬิกาของเครื่องรับนั้นมีคุณภาพที่ต่ำกว่านาฬิกาที่ใช้กับดาวเทียมเป็นอย่างมากจึงมีผลกับเวลาจีพีเอสมากซึ่งส่งผลกระทบต่อการวัดระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ สำหรับการรังวัดแบบจุดเดี่ยวค่าคลาดเคลื่อนนี้จะส่งผลกระทบเป็นอย่างมากซึ่งถือว่าเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ใหญ่ที่สุด ค่าคลาดเคลื่อนนี้สามารถลดได้โดยการกำหนดตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแล้วทำการประมาณระหว่างการประมวลผลและการใช้เทคนิคการหาค่าต่างเพื่อขจัดออกไป สำหรับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งของศูนย์กลางของเสาอากาศปกติระยะทางที่วัดระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับเป็นระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวส่งคลื่นสัญญาณดาวเทียมกับศูนย์กลางเฟสเสาอากาศ ค่าการเปลี่ยนแปลงของเสาอากาศจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของเสาอากาศที่ใช้ สำหรับวิธีการลดค่าคลาดเคลื่อนนี้สามารถทำได้โดยการใช้เสาอากาศที่มีคุณภาพสูง ถ้ามีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ควรใช้เสาอากาศชนิดเดียวกันและการเลือกใช้แบบจำลองปรับแก้การเปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ สำหรับการเกิดขึ้นของสัญญาณรบกวนในเครื่องรับนั้นเป็นค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจึงทำให้ไม่สามารถขจัดออกไปได้แต่การเลือกใช้เครื่องรับสัญญาณที่มีคุณภาพดีถือเป็นวิธีการลดค่าคลาดเคลื่อนนี้ และในการเกิดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากค่าพิกัดของสถานีฐาน ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นกับวิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์เท่านั้น เนื่องจากจะต้องรู้ค่าพิกัดเป็นอย่างดีที่สถานีอย่างน้อย 1 ฐาน วิธีการที่ช่วยในการลดค่าคลาดเคลื่อนนี้ได้สามารถทำได้โดยการถ่ายค่าพิกัดจากหน่วยงานต่างๆ มายังสถานีฐาน (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2547)

2.1.3 ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ

ค่าคลาดเคลื่อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การล่าช้าของคลื่นอันเนื่องจากการเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) และการล่าช้าของคลื่นอันเนื่องจากการเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) เมื่อคลื่นต้องเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องต้องเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ โดยชั้นบรรยากาศที่ส่งผลกระทบต่อเส้นทางของคลื่นนั้นก็คือชั้นไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ ในชั้นบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีขอบเขตอยู่เหนือพื้นโลกตั้งแต่ 50 กิโลเมตรถึง 1,000 กิโลเมตร ส่งผลให้การเดินทางของคลื่นนั้นต่างจากความเร็วแสง การ

เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนี้ส่งผลทำให้ซูโดเรนจ์เดินทางได้ช้าลงและในทางกลับกันทำให้เฟสของคลื่นส่งเดินทางได้เร็วขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อการวัดระยะระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ วิธีที่นำมาใช้ในการลดค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจกชั้นไอโอโนสเฟียร์ ได้แก่ การใช้เครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่ เนื่องจากการหักเหของคลื่นแปรผันกับความถี่ทำให้การใช้เครื่องรับแบบสองความถี่สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ การใช้เทคนิคการหาค่าต่างโดยประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นฐาน การเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยลดค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นไอโอโนสเฟียร์หรือเลือกรับสัญญาณในช่วงเวลากลางคืน สำหรับค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งชั้นบรรยากาศชั้นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะ คือ ส่วนแห้งและส่วนเปียกโดยส่วนแห้งคิดเป็น 90% และส่วนชื้นเป็น 10% ทั้งสองส่วนนี้ทำให้คลื่นเดินทางมาถึงช้าลงทำให้ระยะที่วัดระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับนั้นยาวกว่าความเป็นจริง วิธีการที่ใช้ในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นี้ คือ การใช้เทคนิคการหาค่าต่าง การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น Hopfield model Simplified Hopfield model Saastamoinen model เป็นต้น การกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าระหว่างการประมวลผล (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2547)

2.1.4 ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี

การกระจายของคลื่นเมื่อเกิดการสะท้อนของคลื่นตั้งแต่หนึ่งครั้งขึ้นไป สัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมที่อยู่มุมสูงที่สุดนั้นมีโอกาสที่จะเกิดคลื่นสะท้อนน้อยกว่าสัญญาณที่ถูกส่งมาจากดาวเทียมที่มีมุมต่ำ อิทธิพลของคลื่นหลายวิธีนี้มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิธีนี้เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมบริเวณที่มีการตั้งเครื่องรับสัญญาณ สิ่งที่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนได้แก่ ผงตึก น้ำ เป็นต้น โดยจะมีการสะท้อนกับสิ่งเหล่านี้ก่อนที่สัญญาณจะถึงเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ไม่สามารถจัดออกไปได้ วิธีที่ใช้ในการลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ออกไป ได้แก่ หลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีพื้นผิวสะท้อนใกล้กับเครื่องรับ การเลือกใช้เสาอากาศและเครื่องรับที่สามารถกรองคลื่นหลายวิถีออกไปได้ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2547)

2.1.5 ค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ

ค่าคลาดเคลื่อนที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลุด (Cycle slip) และค่าเลขปริศนา (Ambiguity) สำหรับค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจกคลื่นหลุดเกิดจากการที่มีสิ่งขีดขวางระหว่างการรับสัญญาณทำให้มีการขาดช่วงของการรับสัญญาณหรือเกิดจากความแปรปรวนที่มีคลื่นรบกวนขนาดใหญ่ สาเหตุดังที่กล่าวมาทำให้เครื่องรับไม่สามารถรับสัญญาณได้อย่างต่อเนื่อง จาก การที่คลื่นหลุดทำให้ค่าเลขปริศนานั้นเปลี่ยนไป แต่ในการประมวลผลนั้นจะมีการตรวจหาและซ่อมแซมคลื่นหลุด ในการตรวจหาคลื่นหลุดจะทำการใช้เทคนิคการหาค่าต่างโดยการหาค่าต่างครั้งที่สาม การซ่อมแซมคลื่นหลุดสามารถทำได้โดยการนำขนาดของคลื่นหลุดที่ได้มาบวกกับข้อมูลเฟส

หลังจากที่เกิดคลื่นหลุด ในส่วนของค่าเลขปริศนา (Ambiguity) โดยปกติในขณะที่รับสัญญาณ เครื่องรับจะทำการนับจำนวนลูกคลื่นที่เปลี่ยนแปลงจากการนับตั้งแต่ครั้งแรก โดยที่ค่าเลขปริศนานั้น ยังคงมีค่าเท่าเดิม (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2559) ในทางทฤษฎีนั้นค่าเลขปริศนานั้นต้องเป็นจำนวนเต็มและมีค่าคงที่เสมอในขณะที่มีการรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องในการหาค่าเลขปริศนานั้นจะทำในขั้นตอนการประมวลผล วิธีที่ใช้ในการขจัดหรือการหาค่าเลขปริศนาสามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคหาค่าต่างและกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในระหว่างการประมวลผลโดยการกำหนดให้เป็นเลขจำนวนเต็ม (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2547)

2.2 การหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม

ในการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว SPP (Single point positioning) และการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative positioning) โดยทั้ง 2 วิธีในการหาตำแหน่งสามารถใช้ข้อมูลได้ทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ถ้าการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวมีการใช้ข้อมูลเฟสคลื่นส่งจะเรียกว่า PPP (Precise point positioning)

2.2.1 การหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว

ในการของการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวมีหลักการพื้นฐาน คือ การเล็งสกัดย้อนหลังแบบ 3 มิติ โดยการเล็งสกัดโดยใช้ระยะทาง (Resection by distance) เพื่อที่จะหาตำแหน่งของเครื่องรับ สำหรับการหาตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$R = \rho + c\Delta\delta_r \quad (2.1)$$

โดยที่

- R คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัส
- ρ คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ
- c คือ ความเร็วแสงมีค่าคงที่เท่ากับ 299, 792.458 (เมตร/วินาที)
- $\Delta\delta_r$ คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ

สมการระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.2

$$\rho = \sqrt{(x^j - x_i)^2 + (y^j - y_i)^2 + (z^j - z_i)^2} \quad (2.2)$$

โดยที่

x, y, z คือ พิกัดคาร์ทีเซียนของดาวเทียมและเครื่องรับ

j คือ ดาวเทียมดวงใดๆ

i คือ เครื่องรับใดๆ

เมื่อนำสมการที่ 2.2 แทนลงในสมการที่ 2.1 จะได้

$$R = \sqrt{(x^j - x_i)^2 + (y^j - y_i)^2 + (z^j - z_i)^2} + \Delta c \delta_r \quad (2.3)$$

สำหรับการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวโดยอาศัยข้อมูลเฟส ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เมื่อต้องการความถูกต้องสูง โดยจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรของดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม รวมค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศและสามารถเขียนสมการได้ ดังสมการที่ 2.4

$$\phi = \rho + c\Delta\delta_r + \lambda N \quad (2.4)$$

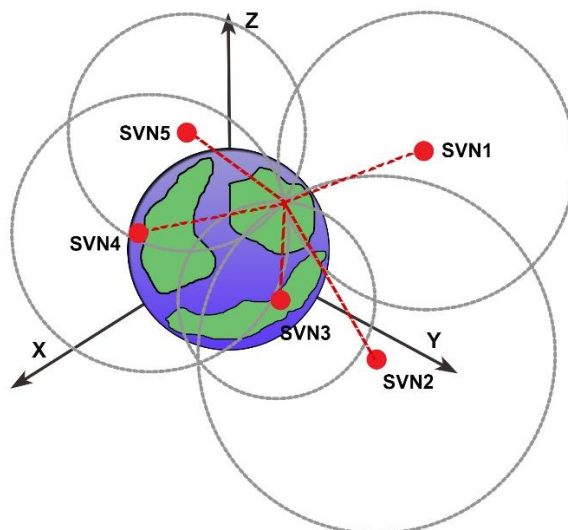
โดยที่ ϕ คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่ง

λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง

N คือ Ambiguity หรือ เลขปริศนาของคลื่นส่ง

เมื่อนำสมการที่ 2.2 มาแทนในสมการที่ 2.4 จะได้

$$\phi = \sqrt{(x^j - x_i)^2 + (y^j - y_i)^2 + (z^j - z_i)^2} + \Delta c \delta_r + \lambda N \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.1 การหาตำแหน่งแบบจุดเดียว

2.2.2 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

ในการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะเช่นเดียวกันกับการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวโดยแบ่งตามการใช้ข้อมูล ได้แก่ การใช้ข้อมูลจากซูโดเรนจ์และการใช้ข้อมูลเฟสคลื่นส่ง

ในการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์เป็นการเพิ่มความถูกต้องให้กับสถานีผู้ใช้โดยที่รู้ค่าพิกัดสถานีฐานเป็นอย่างดีทำให้สามารถคำนวณย้อนกลับไปหาค่าคลาดเคลื่อนของข้อมูลซูโดเรนจ์ที่ได้จากดาวเทียมแต่ละดวงได้ ในการเพิ่มความถูกต้องของตำแหน่งสามารถทำได้โดยการสถานีผู้ใช้รับค่าแก้ไขซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ของดาวเทียมแต่ละดวงมาปรับแก้ข้อมูลซูโดเรนจ์สมการของซูโดเรนจ์และค่าคลาดเคลื่อนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_A = \rho_A + \Delta r_A + d_{atmosA} + c(\Delta\delta_{rA} - \Delta\delta^j) \quad (2.6)$$

โดยที่

- R_A คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัสที่จุด A (เมตร)
- ρ_A คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับที่จุด A (เมตร)
- Δr_A คือ ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียม
- d_{atmos} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศของชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่จุด A

- c คือ ความเร็วแสงมีค่าคงที่ 299, 792.458 เมตร/วินาที
 $\Delta\delta_{rA}$ คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับที่ A (วินาที)
 $\Delta\delta^j$ คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม j (วินาที)

กำหนดให้จุด A เป็นสถานีที่ทราบค่าพิกัดเป็นอย่างดีทำให้สามารถทราบค่า ρ_A เป็นอย่างดี ทำให้สามารถคำนวณหาค่าแก้ (PRC) ได้ในดาวเทียม j ได้ดังนี้

$$PRC^j = \rho_A - R_A = -\Delta r_A - d_{atmosA} - c(\Delta\delta_{rA} - \Delta\delta^j) \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณาที่จุด B จากสมการที่ 2.6 จะเขียนได้ดังนี้

$$R_B = \rho_B + \Delta r_B + d_{atmosB} + c(\Delta\delta_{rB} - \Delta\delta^j) \quad (2.8)$$

นำค่าแก้มาปรับปรุงที่จุด B โดยนำค่าแก้มาบวกกับสมการที่ 2.8 จะได้

$$\begin{aligned} R_{Bcorr} &= R_B + PRC^j \\ &= \rho_B + (\Delta r_B - \Delta r_A) + (d_{atmosB} - d_{atmosA}) + c(\Delta\delta_{rB} - \Delta\delta_{rA}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

โดยที่

R_{Bcorr} คือ ซูโดเรนจ์ที่จุด B ที่ปรับแก้แล้ว

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การหาตำแหน่งสัมพัทธ์โดยอาศัยข้อมูลเฟสของคลื่นส่งซึ่งให้ความถูกต้องทางตำแหน่งสูง การได้มาของความถูกต้องของค่าพิกัดสูงสิ่งที่สำคัญที่สุด คือ การลดและการขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ เทคนิคในปัจจุบันที่ได้รับความนิยม คือ การหาค่าต่างครั้งที่สองกับข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ซึ่งถือว่าให้ความถูกต้องสูงและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปนอกจากการหาค่าต่างครั้งที่สองแล้วยังมีอีกอย่างที่เป็นสิ่งสำคัญ คือ การหาเลขปริศนา (Ambiguity Resolution)

$$\phi^{1,2} = \rho^{1,2} + \lambda N_{A,B}^{1,2} \quad (2.10)$$

โดยที่

$$\phi_{A,B}^{1,2} = (\phi_A^1 - \phi_B^1) - (\phi_A^2 - \phi_B^2)$$

$$\rho_{A,B}^{1,2} = (\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^2 - \rho_B^2)$$

$$\lambda N_{A,B}^{1,2} = \lambda(N_A^1 - N_B^1) - \lambda(N_A^2 - N_B^2)$$

2.3 วิธีการรังวัดดาวเทียม

การเลือกวิธีการรังวัดดาวเทียมผู้ใช้สามารถเลือกตามระดับความถูกต้องที่ต้องการตามลักษณะการใช้งานโดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ทำการรังวัด ปัจจุบันอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของเครื่องรับได้มีการออกแบบให้รังวัดของ GPS, GLONASS, Compass และอื่นๆ ตามรุ่นแล้วแต่การออกแบบ ในการได้มาของค่าพิกัดในการประมวลผลซึ่งเป็นการได้มาของค่าพิกัดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การประมวลผลแบบทันทีทันใดซึ่งทำให้สามารถรู้ค่าพิกัดได้ทันทีหลังจากที่รับสัญญาณและการประมวลผลแบบย้อนหลัง (Post-processing) ในขั้นตอนการประมวลผลซึ่งมีความสัมพันธ์กับเทคนิคการรังวัด โดยเทคนิคการรังวัดสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.3.1 การรังวัดแบบสถิต (Static)

ในเทคนิคการรังวัดแบบนี้จะต้องมีการรังวัดไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมงและใช้อัตราในการบันทึกข้อมูลไม่มากไปกว่า 30 วินาที ในปัจจุบันการรังวัดนี้เป็นที่นิยมเหมาะกับงานที่ต้องการความละเอียดสูงให้ความถูกต้องอยู่ในระดับมิลลิเมตรใช้ในการสร้างหมุดหลักฐานอ้างอิง ซึ่งเป็นการรังวัดเส้นฐานและนำข้อมูลที่ได้จากการรังวัดมาทำการประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพิกัด ณ จุดที่ไม่ทราบค่า

2.3.2 การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid static)

ในเทคนิคการรังวัดนี้มีความเหมือนกับการรังวัดแบบสถิตแต่ใช้เวลาในการรังวัดน้อยกว่าโดยจะเวลาประมาณ 10-15 นาที ให้ความถูกต้องน้อยกว่าซึ่งอยู่ในระดับเซนติเมตร โดยความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นฐานรวมถึงจำนวนดาวเทียมที่ปรากฏในขณะรังวัด

2.3.3 การรังวัดแบบจลน์อย่างทันทีทันใด (Real time kinematic, RTK)

สำหรับเทคนิคการรังวัดนี้เป็นแบบที่ให้ผลลัพธ์ค่าพิกัดทันทีทันใด ณ สถานีผู้ใช้โดยทำการรังวัดเพียง 10-30 วินาที โดยการรังวัดนี้ให้ความถูกต้องอยู่ในระดับเซนติเมตรเหมาะกับงานที่ต้องการปริมาณมากๆ ในระยะเวลาอันสั้น ในเทคนิคการรังวัดนี้ยังคงใช้หลักการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ โดยมีสถานีหลักอ้างอิง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการรังวัดนี้โดยอาศัยเครือข่ายซึ่งช่วยในเรื่องของความถูกต้องทางตำแหน่งและเรื่องค่าใช้จ่าย

2.4 การรังวัดแบบการอาศัยเครือข่าย

ในการรังวัดแบบอาศัยเครือข่าย (Network-Based Real-Time Kinematic, NRTK) ในการรังวัดแบบนี้จะช่วยในเรื่องของข้อจำกัดด้านต่างๆ จากการรังวัดแบบ Single base station รวมทั้งช่วยในการปรับปรุงให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีขึ้นโดยมีการส่งค่าปรับแก้ให้กับสถานีผู้ใช้โดยค่าแก้เหล่านี้ได้มาจากสถานีอ้างอิงภายในเครือข่ายที่มีการรับสัญญาณด้วยเช่นเดียวกันกับสถานีผู้ใช้ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้จากการรับสัญญาณมาทำการคำนวณเพื่อหาค่าแก้ ในการรังวัดแบบอาศัยเครือข่ายได้มีพัฒนาและเสนอเพื่อนำมาใช้ แนวคิดที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันโดยแต่ละระบบมีวิธีการปรับแก้ที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ VRS, FKP, i-MAX และ MAX หลักการของ NRTK นี้มีอยู่ 4 ส่วน คือ อันดับแรกการรับสัญญาณที่สถานีอ้างอิง อันดับที่สองจัดการกับข้อมูลและทำการสร้างค่าแก้ อันดับที่สามารถจัดส่งค่าแก้ไปยังสถานีผู้ใช้ และสุดท้ายสถานีผู้ใช้นำค่าแก้มาใช้งานเพื่อหาตำแหน่งของตนเอง

2.4.1 Virtual Reference Station (VRS)

ระบบ VRS เสนอโดยบริษัท Trimble โดยวิธีการจะทำการสร้างสถานีเสมือน Virtual Reference Station ใกล้กับสถานีผู้ใช้ (Hofmann-Wellenhop, Lichtenegger, & Wasle, 2007) โดยต้องการการติดต่อระหว่างสถานีผู้ใช้และศูนย์ควบคุม โดยสถานีผู้ใช้จะทำการส่งตำแหน่งประมาณของตนเองไปยังศูนย์ควบคุม เมื่อศูนย์ควบคุมได้รับตำแหน่งของสถานีผู้ใช้แล้ว ศูนย์ควบคุมจะทำการคำนวณค่าปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ จากสถานีอ้างอิงโดยในเครือข่ายโดยใช้ข้อมูลของการรับสัญญาณของทุกสถานีแล้วทำการสร้างสถานีอ้างอิงเสมือนใกล้กับผู้ใช้งานจากนั้นทำการประมวลผลเส้นฐานระหว่างสถานีผู้ใช้กับสถานีเสมือนแนวคิดของระบบ VRS แสดงดังรูปที่ 2.2 สำหรับระบบ VRS มีหลักการและสมการดังนี้

$$\phi_r^s(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(t) + N + f^s \Delta\delta_r^s(t) \quad (2.11)$$

โดยที่

$\phi_r^s(t)$ คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่ง ณ เวลาใดๆ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของเฟสคลื่นส่ง (เมตร)

$\rho_r^s(t)$ คือ ระยะทางเรขาคณิตจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ

N คือ เลขปริศนาคลื่นส่ง

f^s คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรต

$\Delta\delta_r^s(t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและเครื่องรับ

สมมติสถานีเครื่องรับ A และสถานี VRS ซึ่งเป็นเวกเตอร์กำหนดให้เป็น X_A และ X_{VRS} และแทนลงสมการที่ 2.11

$$\phi_r^s(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_A, t) + N + f^s \Delta \delta_r^s(t) \quad (2.12)$$

$$\phi_r^s(X_{VRS}, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_{VRS}, t) + N + f^s \Delta \delta_r^s(t) \quad (2.13)$$

นำสมการที่ 2.12 กับสมการที่ 2.13 มาทำการลบกันจะได้

$$\phi_r^s(X_A, t) - \phi_r^s(X_{VRS}, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_A, t) - \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_{VRS}, t) \quad (2.14)$$

ทำให้เทอมค่าเลขปริศนาและค่าคลาดเคลื่อนของเครื่องรับนั้นหายไป ในกรณีที่มีสามสถานีฐานแสดงดังรูปที่ 2.2 ผู้ใช้อยู่ในขอบเขตของรูปสามเหลี่ยม การหาข้อมูลวัดเฟสคลื่นส่งของสถานี VRS สามารถหาได้ดังนี้

$$\phi_r^s(X_{VRS}, t) = \phi_r^s(X_A, t) + \frac{1}{\lambda} (\rho_r^s(X_A, t) - \rho_r^s(X_{VRS}, t)) + \Delta_r^s \quad (2.15)$$

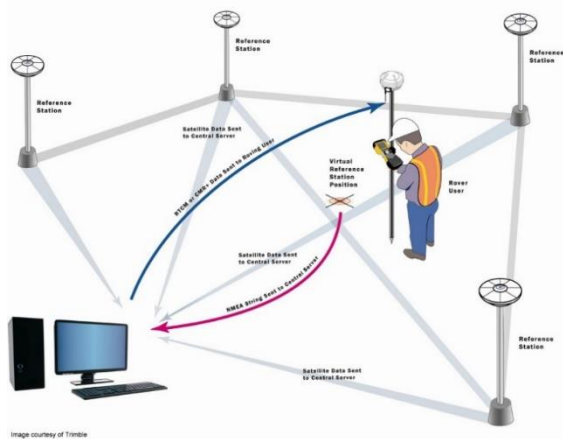
สิ่งที่เพิ่มเข้ามาในสมการที่ 2.15 เป็น Δ_r^s คือ ค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ที่สถานี A เช่น ชั้นบรรยากาศ วงโคจรในการหาค่าคลาดเคลื่อนจากสถานีต่างๆ จาก $\Delta_r^s(X_A, t)$ $\Delta_r^s(X_B, t)$ และ $\Delta_r^s(X_C, t)$ ค่าคลาดเคลื่อนที่สถานี VRS ได้จากการ Interpolate ในรูปแบบต่างๆ จากข้อมูลสถานีต่างๆ เช่น

$$\Delta_r^s(X_i, t) = aX_i + bY_i + cZ_i \quad (2.16)$$

โดยที่

a, b, c คือ ค่าสัมประสิทธิ์

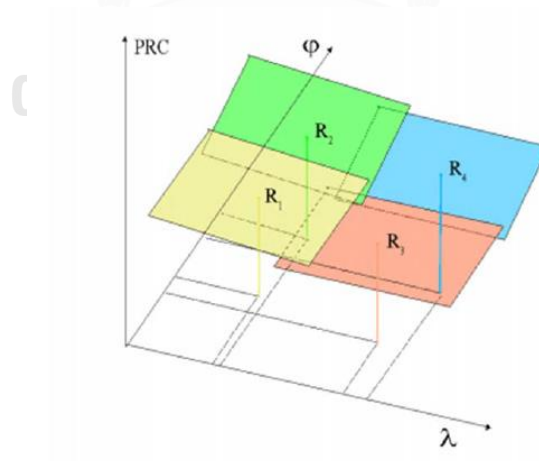
X_i, Y_i, Z_i คือ พิกัดทางสามมิติของสถานีใดๆ



รูปที่ 2.2 การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่าย VRS (USGS, 2016)

2.4.2 Flaechen-Korrektur-Parameter (FKP)

Flaechen-Korrektur-Parameter หรือเรียกอีกอย่าง Area Correction Approach เกิดขึ้นในประเทศเยอรมันพัฒนาโดยบริษัท Geo++ วิธีการนี้ไม่ต้องการตำแหน่งประมาณของสถานีผู้ใช้ โดยมีแนวคิดในการสร้างพื้นที่และสร้างพารามิเตอร์ปรับแก้ในพื้นที่ระบบเครือข่ายที่เป็นลักษณะทิศทางเหนือ-ใต้ และ ทิศตะวันออก-ตก จากสถานีในเครือข่าย โดยค่าสัมประสิทธิ์จะถูกส่งไปยังสถานีผู้ใช้ และสถานีผู้ใช้จะนำค่าสัมประสิทธิ์นี้ไปทำการ Interpolate เพื่อหาค่าแก้ให้กับตนเองดังรูปที่ 2.3 เมื่อ R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 คือ ระนาบของค่าแก้



รูปที่ 2.3 การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายแบบ FKP

(Wübbena, Bagge, & Schmitz, 2001)

ในวิธีการของ FKP ค่าเศษเหลือของเครือข่ายสถานีอ้างอิงถูกสมมติเป็นพื้นผิวและขนานกับทรงรี WGS-84 ในด้านของความสูงของทรงรี การเปลี่ยนแปลงของค่าเศษเหลือสามารถประมาณโดยใช้สมการที่ 2.17 ในรูปแบบ Bilinear

$$\delta r(t) = a(t)(\phi - \phi_R) + b(t)(\lambda - \lambda_R) + c(t) \quad (2.17)$$

โดยที่

$\delta r(t)$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เวลาใดๆ

a, b, c คือ สัมประสิทธิ์ขึ้นระนาบที่เวลาใดๆ

ϕ, λ คือ พิกัดภูมิศาสตร์ของจุดใดๆ ที่ต้องการ Interpolate (radian)

ϕ_R, λ_R คือ พิกัดภูมิศาสตร์ของจุดอ้างอิง (radian)

สัมประสิทธิ์สามารถประมาณได้จากการให้น้ำหนักในการคำนวณปรับแก้แบบ Least Square ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta r_{R-1} \\ \delta r_{R-2} \\ \vdots \\ \delta r_{R-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{R-1} & \Delta \phi_{R-1} & 1 \\ \Delta \lambda_{R-2} & \Delta \phi_{R-2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta \lambda_{R-n} & \Delta \phi_{R-n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

โดยที่

$\Delta \lambda_{R-j}$ คือ ค่าต่างทาง Longitude ระหว่างสถานีอ้างอิงกับสถานีใดๆ

$\Delta \phi_{R-j}$ คือ ค่าต่างทาง Latitude ระหว่างสถานีอ้างอิงกับสถานีใดๆ

สัมประสิทธิ์สามารถคำนวณปรับแก้แบบ Least Square (Wu, 2009)

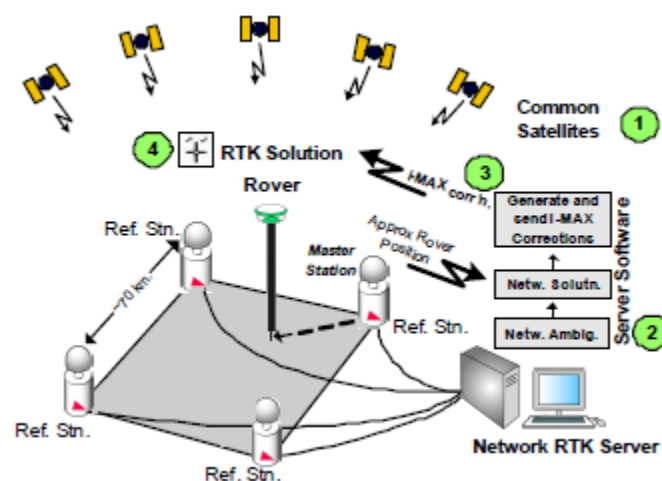
$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T \delta r \quad (2.19)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{R-1} & \Delta\phi_{R-1} & 1 \\ \Delta\lambda_{R-2} & \Delta\phi_{R-2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta\lambda_{R-n} & \Delta\phi_{R-n} & 1 \end{bmatrix} \text{ และ } \delta r = \begin{bmatrix} \delta r_{R-1} \\ \delta r_{R-2} \\ \vdots \\ \delta r_{R-n} \end{bmatrix}$$

2.4.3 i-MAX (Individualized MAX)

วิธีนี้เป็นวิธีที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Leica พัฒนาขึ้นมาพร้อมกับวิธี MAX ในระบบนี้ถูกพัฒนามาใช้กับเครื่องรับรุ่นเก่าที่มีแนวคิดคล้ายกันกับ Virtual reference station ซึ่งต้องการการติดต่อแบบสองทางระหว่างสถานีผู้ใช้และสถานีฐานอ้างอิง สถานีผู้ใช้จะส่งข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมและตำแหน่งประมาณของสถานีผู้ใช้ไปยังศูนย์ประมวลผลข้อมูลโดยที่ศูนย์ควบคุมจะกำหนด Master station ซึ่งเป็นสถานีที่ใกล้กับสถานีผู้ใช้มากที่สุดศูนย์ควบคุมจะทำการคำนวณหาค่าปรับแก้และส่งไปยังสถานีผู้ใช้ สุดท้ายการประมวลผลเป็นการประมวลผลเส้นฐานระหว่าง Master station กับสถานีผู้ใช้ในวิธีนี้จะค่อนข้าง Dynamic (El-Mowafy, 2012) และมีการอัปเดตอันเนื่องมาจากมีความสามารถในการติดตามและการประมวลผลซ้ำถ้าตำแหน่งของสถานีผู้ใช้นั้นเปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมซึ่งมีความสัมพันธ์กับสถานีฐานอ้างอิงจริงไม่ใช่สถานีเสมือน ซึ่งจะให้ผลของค่าพิกัดนั้นมีความน่าเชื่อถือและมีความคงที่ โดยขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.4 ในระบบนี้การสร้างค่าแก้ไม่ได้มีการใช้ข้อมูลดาวเทียมสูงสุด จุดเด่นที่แตกต่างจาก VRS คือ การสร้างค่าแก้สำหรับสถานีอ้างอิงจริงไม่ใช่สถานีเสมือน



รูปที่ 2.4 การรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายแบบ i-MAX (Leica Geosystems, 2008)

2.4.4 MAX (Master-Auxiliary Concept)

วิธีนี้เป็นวิธีที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Leica และ บริษัท Geo++ ในปี 2001 (Euler, Keenan, Zebhauser, & Wübbena, 2001) ได้เสนอวิธีใหม่ในการปรับแก้ในระบบเครือข่าย RTK เรียกว่า MAX สำหรับระบบนี้ในเครือข่ายสถานีอ้างอิงประกอบไปด้วย 3 สถานีหรือมากกว่าขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่าย ในการส่งค่าปรับแก้ในวิธีของ MAX จะส่งค่าแก้เป็นรูปแบบ Message เป็นรูปแบบ Radio Technical Commission for Maritime Services (RCTM) เวอร์ชัน 3 (Brown, Keenan, Richter, & Troyer, 2005) ให้กับสถานีผู้ใช้ โดยการคำนวณหาค่าปรับแก้จากสถานี Master และสถานี Auxiliary แล้วทำการคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนที่สถานีผู้ใช้นั้นทำการปรับแก้ค่าสังเกตที่สถานีผู้ใช้ในการหาตำแหน่งที่สถานีผู้ใช้ตัวของสถานีผู้ใช้สามารถติดตาม RTK solution และมีการคำนวณเพื่อให้ได้ Solution ที่เหมาะสม รวมทั้งยังมีการใช้ข้อมูลจากดาวเทียมทั้งหมดที่ได้มีการรับสัญญาณ ในการหาตำแหน่งวิธีนี้คือมีความสามารถในการติดตามและความสามารถในการประมวลผลซ้ำ จะมีการ Updated ค่าปรับแก้ค่อนข้างจะเป็นตามการเคลื่อนย้ายของสถานีผู้ใช้ ซึ่งทำให้ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลและใช้ค่าแก้ในวิธีนี้นั้นมีความคงที่และน่าเชื่อถือที่ดี โดยขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.5 และหากสมมติสถานี Master เป็นสถานี j และสถานี Auxiliary เป็นสถานี k และดาวเทียมใดๆ s สามารถเขียนสมการในการหาค่าต่างครั้งที่หนึ่งได้ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$\phi_{jk}^s = \phi_j^s + \frac{(\Delta R_{jk}^s - \delta \Delta r_{jk_i}^s + \delta \Delta r_{jk_o}^s + \Delta T_{jk}^s)}{\lambda} \quad (2.20)$$

$$P_{jk}^s = P_j^s + \Delta R_{jk}^s + \delta \Delta r_{jk_i}^s + \delta \Delta r_{jk_o}^s + \Delta T_{jk}^s \quad (2.21)$$

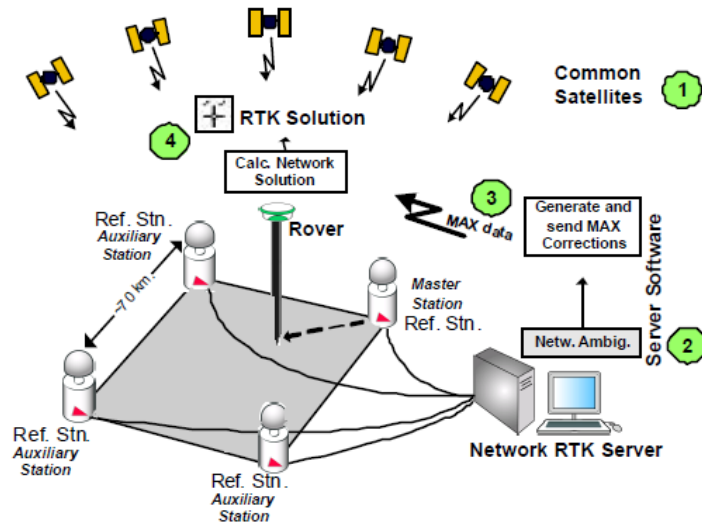
โดยที่

- $\delta \Delta r_{jk_o}^s$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรและชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
- $\delta \Delta r_{jk_i}^s$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์
- ϕ_j^s คือ ค่าสังเกตข้อมูลเฟส
- ΔT_{jk}^s คือ ค่าต่างในแบบจำลองของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์
- ΔR_{jk}^s คือ ค่าต่างของระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ
- P_j^s คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ

ในการหาเลขค่าเลขปริศนาในระบบ MAX กับดาวเทียม s และมีดาวเทียมอ้างอิง q สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.22

$$N_{kj}^s = N_{kj}^q + N_{kj}^{q,s} \quad (2.22)$$

ในการประมวลผลที่สถานีผู้ใช้จะเลือกวิธีการ Interpolate ค่าปรับแก้ที่ตำแหน่งของตนเอง (El-Mowafy, 2012)

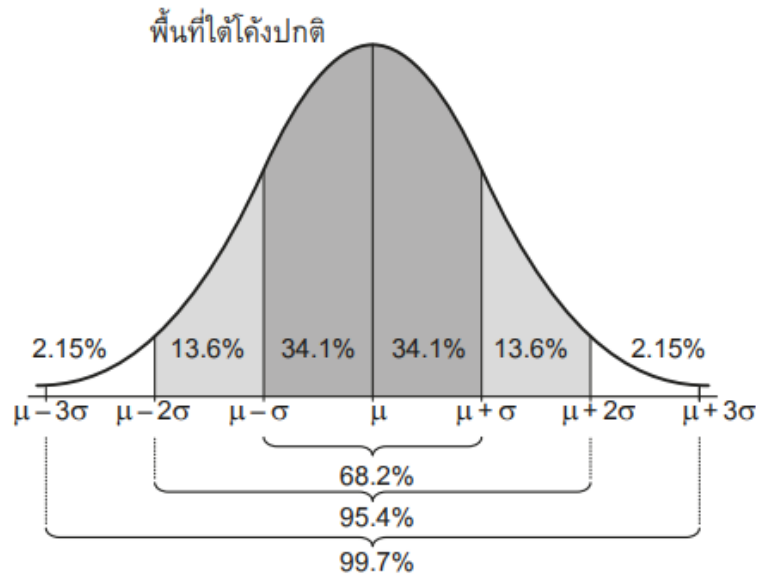


รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการรังวัดแบบจลนโดยอาศัยระบบเครือข่ายแบบ MAX (Leica Geosystems, 2008)

ในแต่ละระบบที่กล่าวมาจะมีการส่งค่าแก้ให้กับสถานีผู้ใช้เป็นรูปแบบ RTCM ทั้งหมด จากระบบที่ใช้กันโดยทั่วไป (Leica Geosystems, 2008) ได้มีการประเมินเปรียบเทียบความสามารถเบื้องต้นของแต่ละระบบพบว่าแต่ละระบบมีจุดเด่นและจุดด้อย เช่น VRS จะต้องมีการส่งตำแหน่งให้กับศูนย์ควบคุมอาจทำให้มีปัญหากับการรังวัดที่ต้องการเคลื่อนที่เร็ว สำหรับผลที่ได้จากการรังวัดจากระบบต่างๆ ได้มีการศึกษาบ้างแล้วแต่ว่าทำการศึกษาอยู่ในพื้นที่ แถบไซเบอร์ยุโรป ดังที่กล่าวมาจะมีเรื่องความแตกต่างในเรื่องพื้นที่การศึกษา

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ค่าทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำของการวัดข้อมูลหลายครั้ง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมา Plot กราฟจะทำให้ได้รูปประจักษ์คว่ำมีการกระจายตัวแบบ Normal Distribution แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยมีองค์ประกอบทางสถิติที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถหาได้จากสมการที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 การแจกแจงแบบปกติ (นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ, 2556)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2.23)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}} \quad (2.24)$$

โดยที่

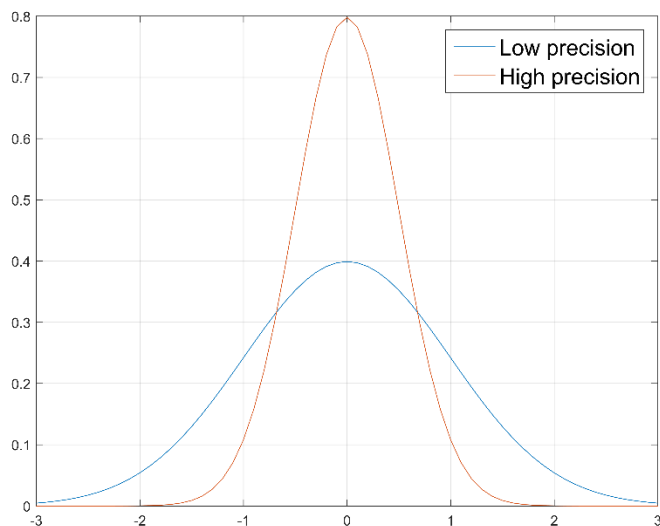
\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด

X คือ ค่าสังเกต

n คือ จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีความสัมพันธ์กับค่าความแม่นยำ (Precision) ของการวัด กล่าวคือ ค่าเบี่ยงเบนน้อยมาตรฐานน้อย การกระจายค่าคลาดเคลื่อนสุ่มน้อยค่าเฉลี่ยที่ได้จะเป็นค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของปริมาณนั้น สมการที่ 2.24 นิยมเรียกว่าค่าคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย Root Mean Square Error, RMSE (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2554)

ข้อมูลที่มีความแม่นยำสูงจะให้กราฟการกระจายแบบ Normal Distribution มีรูปที่โด่งและ ความแม่นยำต่ำให้กราฟรูปที่ต่ำแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความแม่นยำในการแจกแจงแบบปกติ

2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในประเทศไทยได้มีการนำระบบ NRTK มาใช้ในงานสำรวจโดยกรมที่ดินเป็นหน่วยงานแรกที่ได้มีการนำระบบ VRS มาใช้ (ธิตต์ เจริญกาลัญญาตา, 2555) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของชั้นบรรยากาศของชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยใช้โมเดลการสร้างชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบทั้งโลกและแบบใช้เฉพาะในประเทศไทยในการรังวัดด้วยระบบ VRS โดยใช้เครือข่ายที่มีขนาดเส้นฐานที่ต่างกัน พบว่าการใช้โมเดลสำหรับประเทศไทยนั้นช่วยในเรื่องของอัตราความสำเร็จของการหาเลขปริศนา จำนวนค่าพิกัดขนาดใหญ่และค่า Root Mean Square Error (RMSE) นั้นไม่มีนัยสำคัญ แต่ปัจจุบันมีระบบการรังวัดที่มีหลายระบบ คือ VRS, FKP, i-MAX, MAX, CBI และ MCBI ซึ่งระบบ CBI และ MCBI ได้นำเสนอโดยมหาวิทยาลัย Wuhan ประเทศจีน แต่ยังมีข้อจำกัดใน Software ในการประมวลผลที่มหาวิทยาลัย Wuhan เป็นผู้พัฒนาเรื่องของเครื่องมือรังวัดที่ต้องมีการผลิตในประเทศจีนซึ่งยังไม่รองรับโดยทั่วไป ส่วนระบบ VRS, FKP, i-MAX และ MAX ได้มีการใช้โดยทั่วไปและมี Software เชิงพาณิชย์ในการประมวลผล (Berber & Arslan, 2013) ได้ทำการศึกษาการรังวัดแบบจลน์โดยอาศัยระบบเครือข่ายโดยทำการเปรียบเทียบในแต่ละระบบ ได้แก่ VRS, FKP, i-MAX และ MAX ใน Florida ประเทศอเมริกา โดยทำการตั้งเครื่องรับสัญญาณทั้งหมด 7 สถานี โดยทำการเก็บข้อมูล 2 นาที ช่วงเวลาการเก็บข้อมูล 1 วินาที โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากการ

ประมวลผลแบบ Static จากการประเมินผลทั้ง 4 พบว่าการใช้ RTCM เวอร์ชัน 2 ในระบบ i-MAX และ VRS ให้ผลที่ดีที่สุดในเรื่องของ Initialization time และการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของพิกัดทางราบอยู่ใน 2-3 cm และทางตั้ง 10 – 20 cm



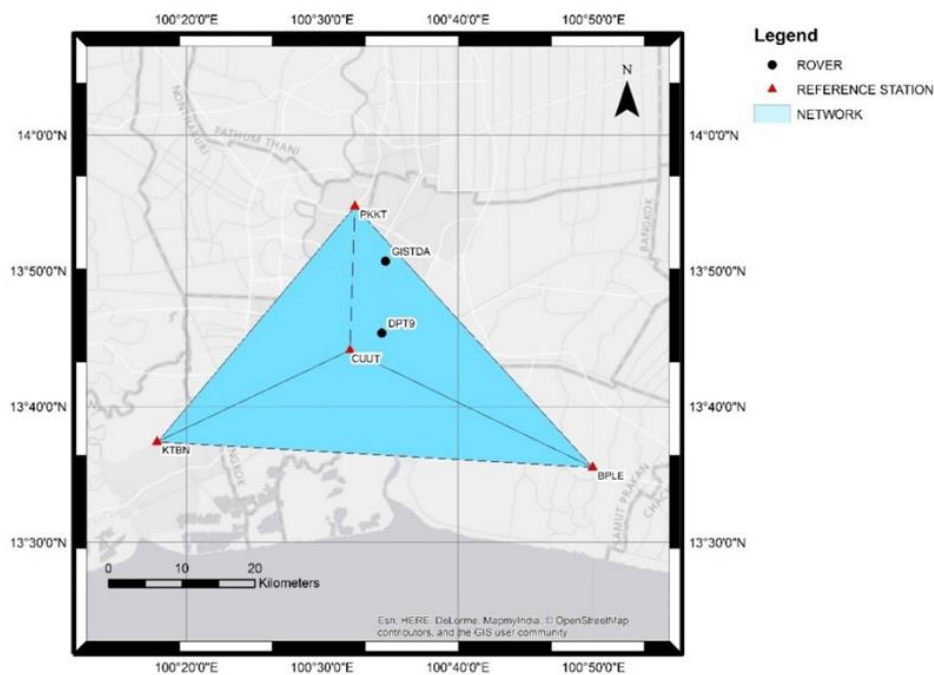
บทที่ 3

ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยได้ทำการทดสอบการรังวัดแบบ Network-Based Real-Time Kinematic, NRTK สำหรับเครือข่ายที่ทำการทดสอบได้กำหนดเครือข่ายที่ทำการทดสอบทั้งหมดสองเครือข่ายซึ่งมีความยาวของเส้นฐานระหว่างสถานีอ้างอิงที่ต่างกันโดยแต่ละเครือข่ายมีจำนวนสามสถานี ในการทดสอบแบ่งได้เป็นสองส่วน คือ การตั้งเครื่องรับเก็บข้อมูลอยู่กับที่และการเก็บข้อมูลแบบที่มีการเคลื่อนที่

3.1 การทดสอบ

จากที่กล่าวข้างต้นได้แบ่งการทดสอบเป็นสองส่วนแต่ในส่วนของเครือข่ายที่ทำการทดสอบเหมือนกันเครือข่ายที่ทำการทดสอบมีความยาวเส้นฐาน 2 ขนาด คือ 2 ขนาด ได้แก่ 20 - 50 และ 40 - 60 กิโลเมตร ในเครือข่ายความยาวเส้นฐาน 20 - 50 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีอ้างอิง CUUT PKKT และ BPLE และเครือข่ายความยาวเส้นฐาน 40 - 60 กิโลเมตร รูปแบบของเครือข่ายที่ทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครือข่าย GNSS ที่ทำการทดสอบ

สำหรับค่าพิกัดของสถานีในเครือข่ายที่ทำการทดสอบได้ทำการนำข้อมูลของแต่ละสถานีมาติดต่อกัน 7 วัน ทำการประมวลผลแบบ Online Processing ที่ <http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl> เพื่อให้ได้พิกัดของสถานีอยู่ในระบบเดียวกัน พิกัดของสถานีอ้างอิงในเครือข่ายได้จากตารางที่ 3.1

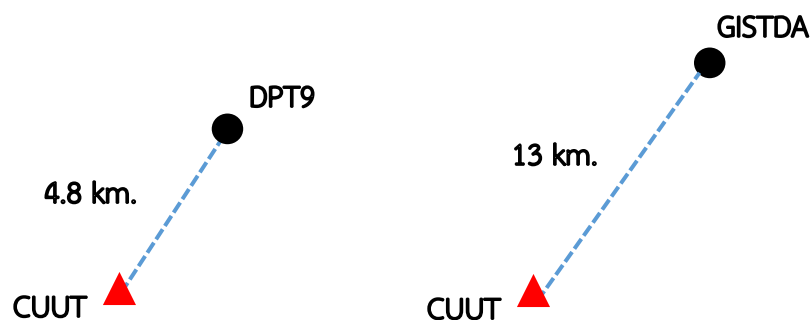
ตารางที่ 3.1 ค่าพิกัดสถานีในเครือข่ายที่ทำการทดสอบ

STATION	LATTITUDE (D-M-S)	LONGITUDE (D-M-S)	HEIGHT (m)
CUUT	13-44-9.567740	100-32-2.16640	74.3007
PKKT	13-54-44.91173	100-32-24.27010	13.3314
BPLE	13-35-31.28778	100-49-55.63381	-18.4317
KTBN	13-37-24.26202	100-17-49.46502	-19.3334

3.1.1 การทดสอบแบบตั้งเครื่องรับอยู่กับที่

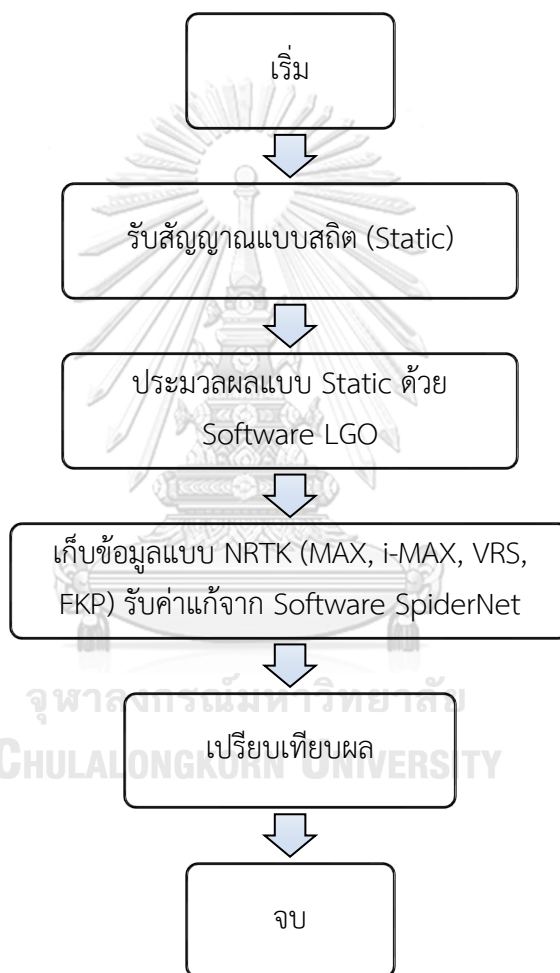
การเก็บข้อมูลทำการเก็บข้อมูลที่ DPT9 กรมโยธาธิการและผังเมือง (พระราม 9) และ GISTDA สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ บางเขน โดยก่อนการทดสอบ NRTK ได้ทำการเก็บข้อมูลแบบ Static ก่อนและทำการประมวลผลเส้นฐานเพื่อให้ได้ค่าพิกัดใช้ในการอ้างอิงและเปรียบเทียบความถูกต้อง ทั้งสองสถานีนี้เป็นสถานีที่อยู่ในเครือข่ายโดยทั้งสองเครือข่าย ค่าพิกัดที่ได้จากการทดสอบอยู่ในระบบพิกัด UTM WGS84 Zone 47

การเก็บข้อมูลในการประมวลผลแบบ Static โดยทำการตั้งเครื่องรับนาน 2 ชม. แล้วทำการประมวลผลเส้นฐานระหว่างสถานี CUUT กับสถานี DPT9 มีความยาวเส้นฐาน 4.8 กิโลเมตรและระหว่างสถานี CUUT กับสถานี GISTDA มีความยาวเส้นฐาน 13 กิโลเมตรทั้งสองเส้นฐานได้กำหนดสถานี CUUT เป็นสถานีอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การประมวลผลเส้นฐานแบบ Static

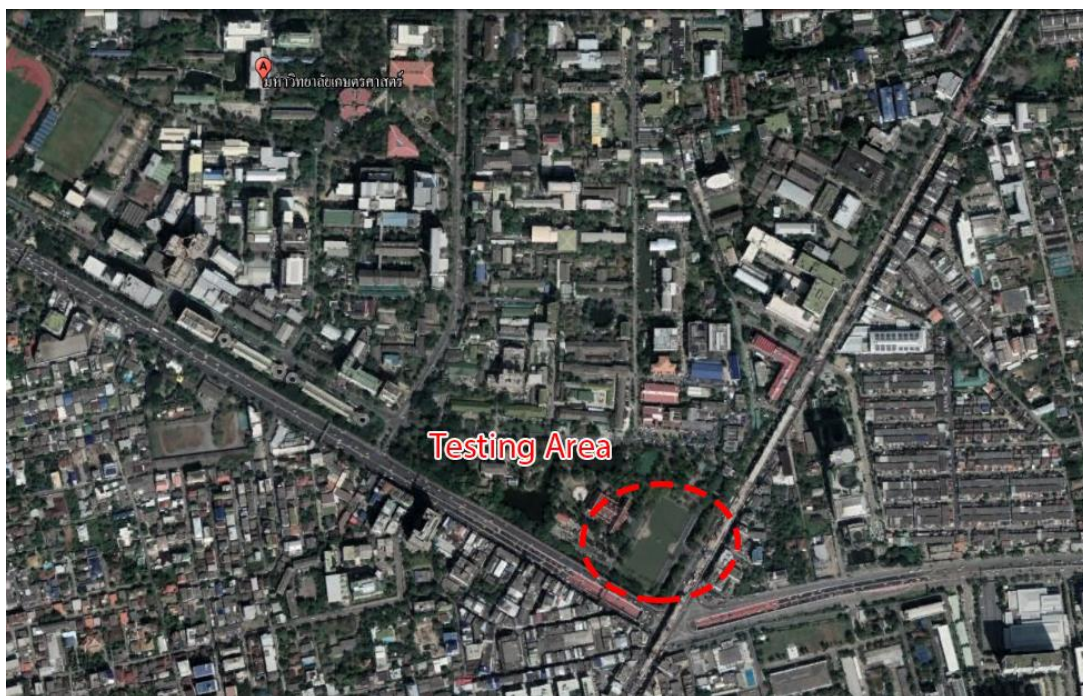
การทดสอบแบบตั้งเครื่องรับอยู่กับที่สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.3 ได้แก่ การรับสัญญาณแบบสถิตก่อนทำการเก็บข้อมูลเมื่อได้ข้อมูลแล้วจากนั้นทำการนำข้อมูลมาประมวลผลด้วย Software LGO ของผู้ผลิต Leica เพื่อให้ได้ค่าพิกัดไว้อ้างอิงเปรียบเทียบ จากนั้นทำการเริ่มเก็บข้อมูลแบบ NRTK เมื่อได้ข้อมูลจากนั้นทำการนำข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบกับพิกัดอ้างอิงที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิตและวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดสอบแบบตั้งอยู่กับที่สถานี DPT9 และ GISTDA

3.1.2 การทดสอบแบบที่มีการเคลื่อนที่

การรังวัดแบบที่มีการเคลื่อนที่ได้ทำผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) โดยทำการเดินเก็บข้อมูลบริเวณรอบสระน้ำในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สถานที่ทำการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งทำการเก็บข้อมูลทุกระบบและทำการทดสอบที่ละเครือข่าย

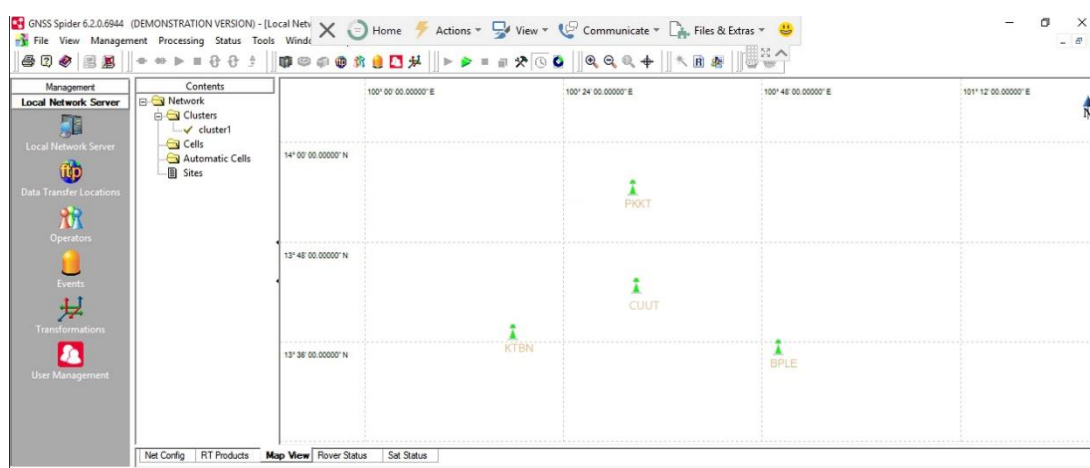


รูปที่ 3.4 สถานที่การรังวัดแบบจลน์บริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

ในการเก็บข้อมูลแบบที่มีการเคลื่อนที่ได้ทำการเดินเก็บข้อมูลรอบสระน้ำ โดยทำการเก็บข้อมูล 1 ระบบต่อ 2 รอบสระน้ำเนื่องจากการทดสอบมี 2 เครือข่าย

3.2 Software ที่ใช้ในการวิจัย

ในการสร้างค่าแก้เพื่อส่งให้กับผู้ใช้ได้ใช้ Software ของ SpiderNet ของผู้ผลิต Leica ในการประมวลผลเชื่อมต่อสถานีฐานด้วย IP Address, Port, Mountpoint, Username และ Password หรือ TCP/IP ออกให้โดยผู้ดูแลระบบ ค่าแก้ถูกสร้างด้วย Software โดยศูนย์ควบคุมใช้ข้อมูลของ GPS และ GLONASS ในการสร้างค่าแก้ให้กับผู้ใช้รูปแบบ Software แสดงดังรูปที่ 3.5 ในการทดสอบในเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE ได้กำหนดสถานี CUUT เป็นสถานี Master และ เครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN กำหนดสถานี PKKT เป็นสถานี Master



รูปที่ 3.5 รูปแบบ Software SpiderNet ของผู้ผลิต Leica

3.3 การเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลทำการเก็บข้อมูลที่กรมโยธาธิการและผังเมือง (พระราม 9) และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ บางเขน โดยในแต่ละที่นั้นได้มีการตั้งรับสัญญาณแบบสถิต (Static) ก่อนแล้วทำการประมวลผลเส้นฐานเพื่อให้ได้ค่าพิกัดมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการรังวัดแบบจันท์ NRTK การทดสอบได้ทำการตั้งรับสัญญาณนาน 1 วัน ใช้เครื่องรับสัญญาณยี่ห้อ Leica รุ่น GS15 ที่สถานี DPT9 (กรมโยธาธิการและผังเมือง พระราม 9) ทำการทดสอบระหว่างวันที่ 3 พฤษภาคม 2560 ถึงวันที่ 13 พฤษภาคม 2560 และ Leica รุ่น GS10 ที่สถานี GISTDA (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ บางเขน) ทำการทดสอบระหว่างวันที่ 6 กรกฎาคม 2560 ถึงวันที่ 18 กรกฎาคม 2560 แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ระบบสื่อสารระหว่างสถานีผู้ให้กับศูนย์ควบคุมด้วยระบบอินเทอร์เน็ตทำการรับสัญญาณ ในแต่ละระบบโดยที่อัตราการเก็บข้อมูลทุก 1 วินาที ในช่วงเช้าจนถึงช่วงเช้าของอีกวันหรือประมาณ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 การเก็บข้อมูลที่กรมโยธาธิการและผังเมือง (ซ้าย) และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ บางเขน (ขวา)

3.4 การวิเคราะห์ผล

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้โดยทำการเปรียบเทียบอัตราผลสำเร็จของพิกัดที่ได้ทำได้จากสมการที่ 3.1

$$\frac{N_{ENh}}{n} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่

N_{ENh} คือ จำนวนผลสำเร็จของการได้ค่าพิกัด

n คือ จำนวน Epoch ทั้งหมดที่ทำการรับสัญญาณ

หลังจากทำการเก็บข้อมูลที่มีการตั้งเครื่องรับอยู่กับที่ได้นำข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบผลกับพิกัดอ้างอิงสถานีที่ได้จากการประมวลผลแบบสถิติและหาค่าทางสถิติ Root Mean Square Error ของค่าพิกัดทาง Easting Northing ทางราบและทางตั้ง (FGDC, 1998)

$$RMSE_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n dE_i^2}{n}} \quad (3.2)$$

$$RMSE_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n dN_i^2}{n}} \quad (3.3)$$

โดยที่

dE คือ ค่าคลาดเคลื่อนทางตะวันออก

dN คือ ค่าคลาดเคลื่อนทางเหนือ

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ความถูกต้องของทางตำแหน่งทางราบหาได้จากสมการที่ 3.4 และความถูกต้องของทางตำแหน่งทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หาได้จากสมการที่ 3.5 (FGDC, 1998)

$$RMSE_R = \sqrt{RMSE_E^2 + RMSE_N^2} \quad (3.4)$$

$$Accuracy_r = 1.7308(RMSE_R) \quad (3.5)$$

โดยที่

$RMSE_E$ คือ ค่า Root Mean Square Error ของพิกัดทางตะวันออก

$RMSE_N$ คือ ค่า Root Mean Square Error ของพิกัดทางเหนือ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ตั้งเครื่องรับแบบอยู่กับที่และการเก็บข้อมูลแบบมีการเคลื่อนที่

4.1 ผลการทดสอบแบบตั้งเครื่องรับอยู่กับที่

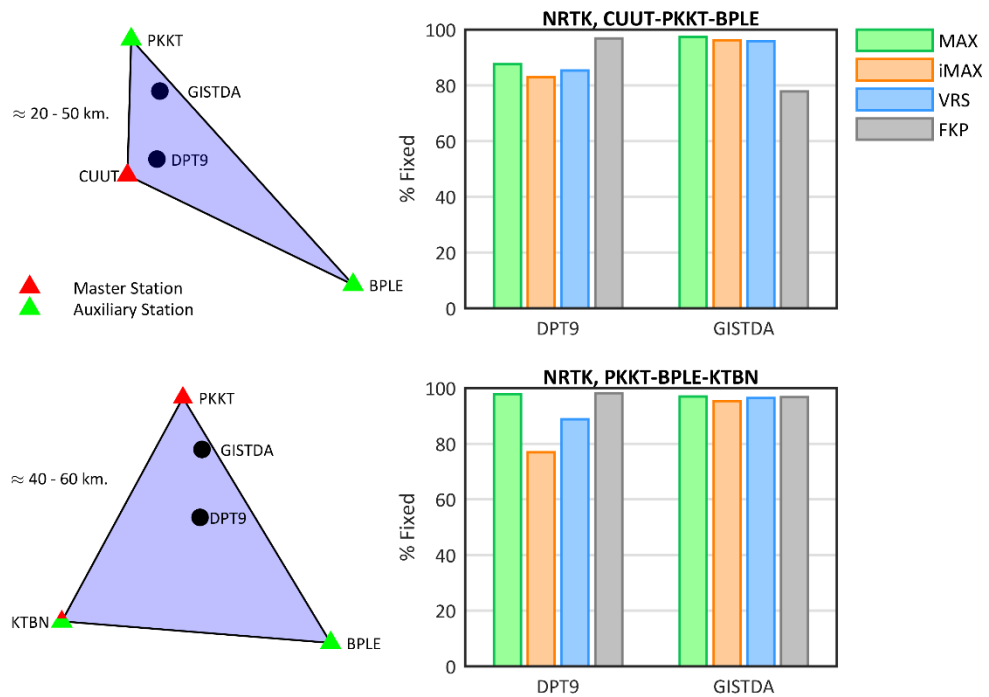
จากการทดสอบโดยการตั้งรับสัญญาณ 1 วัน ทุกวินาทีพบว่าเปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกระบวนการประมวลผลได้โดยทำการคัดกรองข้อมูลที่มีปัญหาจากการเชื่อมต่อทางอินเทอร์เน็ตซึ่งอยู่ในโหมด Fixed Solution จากการรับสัญญาณทั้งหมดมีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ทั้งหมด 4 รูปแบบ ข้อมูลสรุปได้ตารางที่ 4.1 ที่สถานี DPT9 และตารางที่ 4.2 ที่สถานี GISTDA ข้อมูลสรุปโดยรวมทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปปริมาณผลการทดสอบค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution ที่สถานี DPT9

วิธีการ	NETWORK CUUT-PKKT-BPLE (%)	NETWORK PKKT-BPLE-KTBN (%)
MAX	87.7	98.1
i-MAX	83.1	77.2
VRS	85.4	88.8
FKP	97.3	98.5

ตารางที่ 4.2 สรุปปริมาณผลการทดสอบค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution ที่สถานี GISTDA

วิธีการ	NETWORK CUUT-PKKT-BPLE (%)	NETWORK PKKT-BPLE-KTBN (%)
MAX	97.4	97.0
i-MAX	96.2	95.4
VRS	95.9	96.5
FKP	77.9	96.8



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบอยู่ใน Fixed Solution ที่สถานี DPT9 และ GISTDA

การรับสัญญาณในสนามพบว่าเกิดปัญหาทางด้านการสื่อสารจึงได้ทำการคัดกรองข้อมูลที่อยู่ในโหมด Fixed Solution แล้วทำการหาค่ากระจายตัวเชิงตำแหน่งของทางค่าพิกัดทาง Easting, Northing และ Height ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE และ PKKT-BPLE-KTBN หาได้จากสมการที่ 2.24 ดูได้จากตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.6 พบว่าในแต่ละระบบที่ทำการทดสอบพบว่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัดทาง Easting และ Northing อยู่ในระดับเซนติเมตรทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ MAX ที่สถานี DPT9 และ GISTDA

STATION	MAX (CUUT-PKKT-BPLE, 20-50 km)			MAX (PKKT-BPLE-KTBN, 40-60 km)		
	E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
DPT9	0.011	0.009	0.020	0.008	0.008	0.019
GISTDA	0.017	0.015	0.034	0.067	0.037	0.163

ตารางที่ 4.4 ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ i-MAX ที่สถานี DPT9 และ GISTDA

STATION	i-MAX (CUUT-PKKT-BPLE, 20-50 km)			i-MAX (PKKT-BPLE-KTBN, 40-60 km)		
	E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
DPT9	0.021	0.027	0.127	0.015	0.017	0.036
GISTDA	0.013	0.016	0.048	0.052	0.040	0.137

ตารางที่ 4.5 ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ VRS ที่สถานี DPT9 และ GISTDA

STATION	VRS (CUUT-PKKT-BPLE, 20-50 km)			VRS (PKKT-BPLE-KTBN, 40-60 km)		
	E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
DPT9	0.006	0.006	0.016	0.008	0.010	0.024
GISTDA	0.012	0.018	0.053	0.012	0.013	0.048

ตารางที่ 4.6 ค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัด Easting, Northing และ Height ของ FKP ที่สถานี DPT9 และ GISTDA

STATION	FKP (CUUT-PKKT-BPLE, 20-50 km)			FKP (PKKT-BPLE-KTBN, 40-60 km)		
	E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
DPT9	0.014	0.014	0.042	0.016	0.011	0.025
GISTDA	0.012	0.015	0.032	0.011	0.013	0.062

ในการเปรียบเทียบความถูกต้องได้มีการเก็บข้อมูลแบบ Static และทำการประมวลผลเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่ใช้ในการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 พิกัดของสถานี DPT9 และ GISTDA จากการทำ Static

STATION	COORDINATES		
	EASTING	NORTHING	H
DPT9	670 084.251	1 521 390.922	32.940
GISTDA	670 503.547	1 531 155.536	-6.418

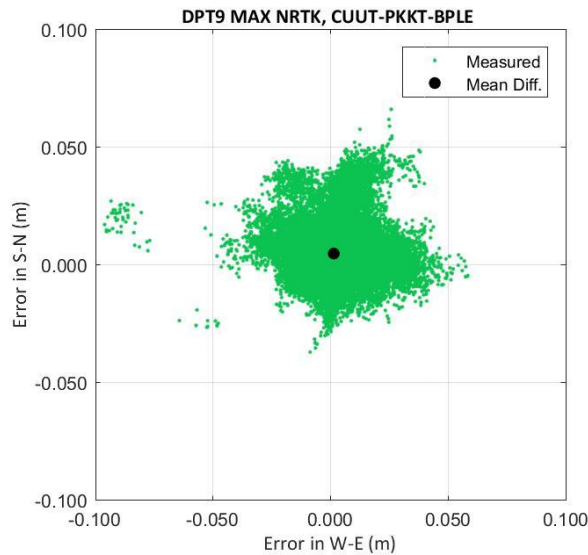
ในการเปรียบเทียบความถูกต้องได้ทำการใช้สมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3 สำหรับหาค่า RMSE ของค่าพิกัดทาง Easting และ Northing ในส่วนการประเมินความถูกต้องทางราบได้ใช้สมการที่ 3.4 และใช้สมการ 3.5 ในการหาค่าความถูกต้องทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์แสดงดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความถูกต้องของพิกัดทางราบที่ได้แต่ละระบบที่สถานี DPT9

วิธีการ	CUUT-PKKT-BPLE, 20-50 km		PKKT-BPLE-KTBN, 40-60 km	
	RMSE _R (m)	RMSE _{R95} (m)	RMSE _R (m)	RMSE _{R95} (m)
MAX	0.016	0.028	0.013	0.023
i-MAX	0.035	0.061	0.023	0.040
VRS	0.009	0.016	0.014	0.025
FKP	0.048	0.084	0.020	0.035

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความถูกต้องของพิกัดทางราบที่ได้แต่ละระบบที่สถานี GISTDA

วิธีการ	CUUT-PKKT-BPLE, 20-50 km		PKKT-BPLE-KTBN, 40-60 km	
	RMSE _R (m)	RMSE _{R95} (m)	RMSE _R (m)	RMSE _{R95} (m)
MAX	0.023	0.040	0.079	0.137
i-MAX	0.023	0.040	0.066	0.115
VRS	0.024	0.042	0.019	0.033
FKP	0.021	0.037	0.019	0.033



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการทดสอบ MAX ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE

4.2 ผลการทดสอบแบบที่มีการเคลื่อนที่ ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

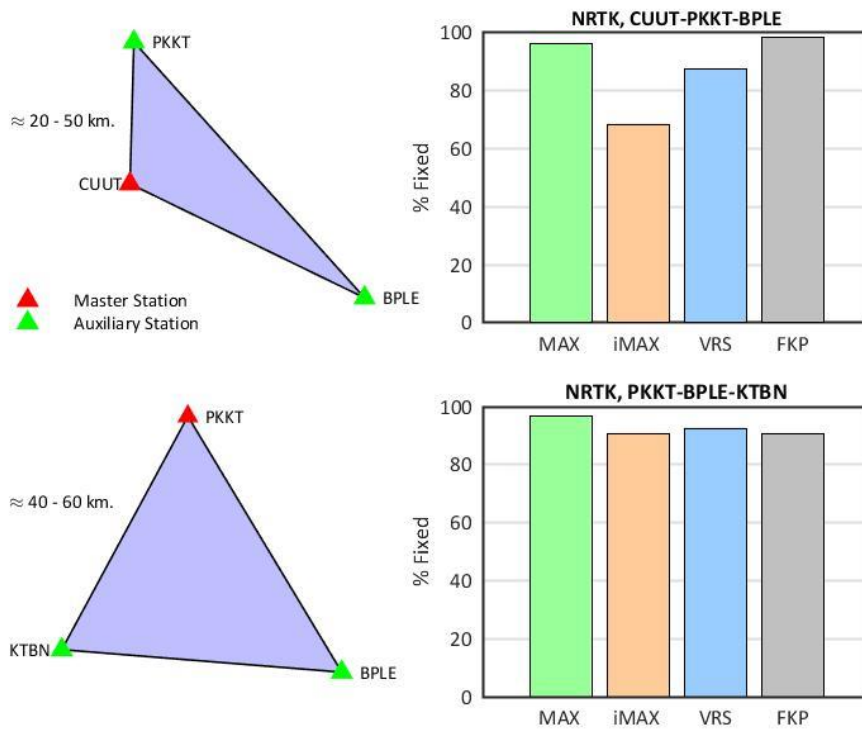
ในการเก็บข้อมูลแบบมีการเคลื่อนที่ได้ทำการเดินรอบสระน้ำโดยมีอัตราความเร็วเฉลี่ยแต่ละระบบแสดงดังตารางที่ 4.10 สำหรับผลการทดสอบแบบมีการเคลื่อนที่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์พบว่าผลทดสอบที่อยู่ในโหมด Fixed Solution มีค่ามากกว่า 50% ทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.3 สำหรับตัวอย่างตำแหน่งที่ได้จากทดสอบ NRTK ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ MAX ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE แสดงดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.10 อัตราความเร็วเฉลี่ยในการเก็บข้อมูลแบบมีการเคลื่อนที่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

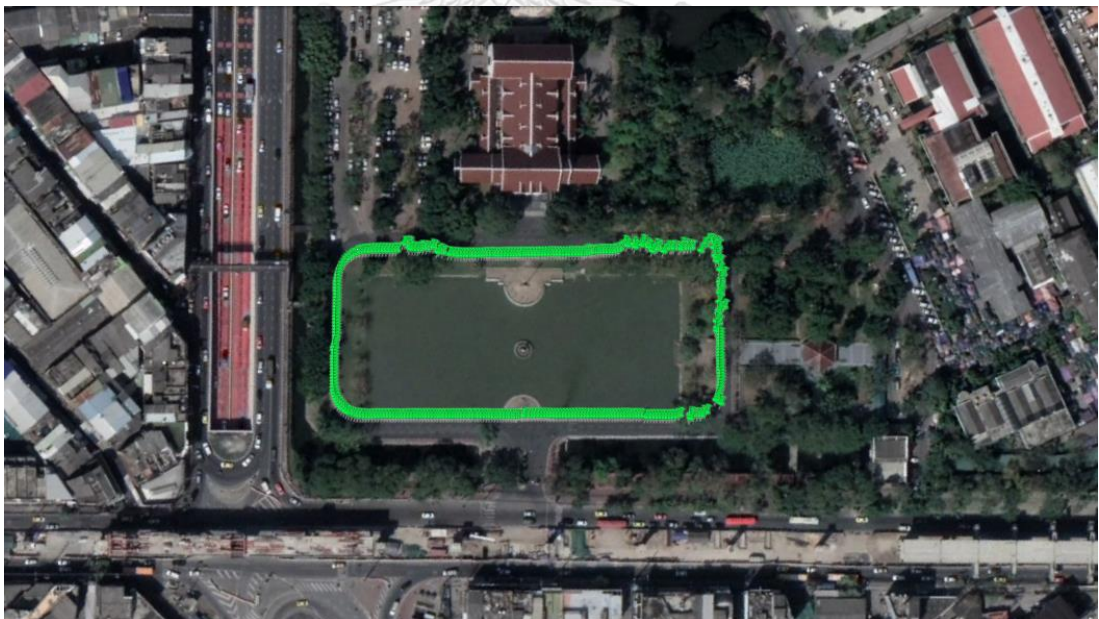
NETWORK CUUT-PKKT-BPLE (m/s)				NETWORK PKKT-BPLE-KTBN (m/s)			
MAX	i-MAX	VRS	FKP	MAX	i-MAX	VRS	FKP
1.328	1.530	1.463	1.372	1.404	1.400	1.498	1.393

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบแบบที่มีการเคลื่อนที่จำนวนของค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

NETWORK CUUT-PKKT-BPLE (% Fixed)				NETWORK PKKT-BPLE-KTBN (% Fixed)			
MAX	i-MAX	VRS	FKP	MAX	i-MAX	VRS	FKP
96.0	68.4	87.5	98.1	96.6	90.8	92.6	90.7



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบอยู่ใน Fixed Solution การทำ NRTK ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบ NRTK ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
MAX เครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 วิจัยและสรุปผล

จากการทดสอบในส่วนที่หนึ่งพบว่าผลที่ได้เครือข่ายที่ทำการทดสอบมีความยาวของเส้นฐาน 2 ขนาด ได้แก่ 20 – 50 กิโลเมตรประกอบด้วยสถานีอ้างอิง CUUT-PKKT-BPLE และ 40 – 60 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีอ้างอิง PKKT-BPLE-KTBN ที่สถานี DPT9 และ GISTDA ทั้ง 2 สถานีที่ทำการทดสอบเก็บข้อมูลโดยการตั้งเครื่องรับสัญญาณอยู่กับที่และทำการเก็บข้อมูลทุก 1 วินาทีพบว่าเปอร์เซ็นต์ในโหมด Fixed Solution มีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ทั้งหมด ในส่วนของผลเปอร์เซ็นต์ในโหมด Fixed Solution น้อยอย่างเห็นได้ชัดจนอาจเกิดจากที่ Software ศูนย์ควบคุมนั้นไม่สามารถประมวลผล Fixed Ambiguity ที่สถานีในเครือข่ายได้เป็นเวลาบางช่วง สำหรับค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งได้มีการคัดกรองข้อมูลก่อนนำมาคำนวณค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งและค่า Root Mean Square Error, RMSE อันเนื่องมาจากการทำงานในสนามนั้นมีปัญหาเรื่องการสื่อสารหรือการเชื่อมต่อทางอินเทอร์เน็ตทำให้เกิดค่าพิกัดกระโดดค่อนข้างมาก จากค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของพิกัดทางราบของแต่ละระบบนั้นโดยรวมนั้นอยู่ในระดับเซนติเมตรทั้งหมดซึ่งพบว่า VRS นั้นให้ความแม่นยำของค่าพิกัดทาง Easting และ Easting มากที่สุด จากค่าเฉลี่ยของค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งจากการทดสอบทั้งหมดที่ให้ค่าน้อยที่สุด สำหรับการประเมินความถูกต้องจากการทดสอบเมื่อนำค่าพิกัดที่ได้จากการทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับพิกัดอ้างอิงจากการประมวลผลแบบ Static แล้วพบว่าค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการเฉลี่ยของค่า RMSE ทั้งหมดพบว่า VRS นั้นให้ค่าน้อยที่สุดแสดงดังตารางที่ 5.1 ความแตกต่างเรื่องความยาวของเส้นฐานนั้นกับของความถูกต้องทางตำแหน่งในวิธีเดียวกันนั้นให้ผลยังไม่แตกต่างกันมากนักจึงยังไม่มียุทธศาสตร์

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ย RMSE จากการทดสอบการตั้งเครื่องรับแบบอยู่กับที่ทั้งหมด

วิธีการ	AVERAGE RMSE _{R95} (m)
MAX	0.057
i-MAX	0.064
VRS	0.029
FKP	0.047

สำหรับผลการทดสอบโดยเก็บข้อมูลโดยมีการเก็บข้อมูลแบบเคลื่อนที่ซึ่งเก็บข้อมูลทุก 1 วินาที ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์โดยการเดินเก็บข้อมูลรอบบริเวณสระน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์พบว่าในระบบ MAX นั้นให้ผลของค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution 96.0 เปอร์เซ็นต์และ 96.6 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 2 เครือข่ายประกอบด้วยสถานี CUUT-PKKT-BPLE และ PKKT-BPLE-KTBN ตามลำดับซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในขณะที่ i-MAX ให้ผลของค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution 68.4 เปอร์เซ็นต์และ 90.8 เปอร์เซ็นต์ทั้งสองเครือข่ายประกอบด้วยสถานี CUUT-PKKT-BPLE และ PKKT-BPLE-KTBN ตามลำดับซึ่งมีค่าเฉลี่ยต่ำสุด สาเหตุที่ i-MAX ให้ผลของค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution 68.4 เปอร์เซ็นต์ซึ่งค่อนข้างน้อยอาจเกิดจากการที่มีการเคลื่อนที่ค่อนข้างเร็วซึ่งมีความเร็วเฉลี่ย 1.530 เมตร/วินาที ซึ่งเร็วที่สุดในการทดสอบทั้งหมดและเนื่องจาก i-MAX นั้นต้องมีการส่งตำแหน่งของตัวเองไปยังศูนย์ควบคุมก่อนอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการประมวลผล ระบบอื่นนี้ได้แก่ ระบบ VRS และ FKP ให้ผลของค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ทั้งสองเครือข่ายที่ทำการทดสอบ

จากการทดสอบทั้งสองส่วนนี้ ได้แก่ การตั้งเครื่องรับแบบอยู่กับที่และการเก็บข้อมูลที่มีการเคลื่อนที่สามารถสรุปได้ว่าการตั้งเครื่องรับแบบอยู่กับที่โดยรวมมีการกระจายตัวทางตำแหน่งอยู่ในระดับเซนติเมตรทุกระบบแต่ระบบ VRS นั้นให้ผลของความถูกต้องและความแม่นยำของค่าพิกัดทางราบดีที่สุด ในต่างประเทศมีการทดสอบเช่นกันและประเมินว่าโดยรวม NRTK ทั้ง 4 ระบบนี้อยู่ในระดับเดียวกันและมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกัดทางราบอยู่ในระดับเซนติเมตรแต่เป็นการรับสัญญาณทุก 1 วินาทีนาน 2 นาที (Berber & Arslan, 2013) สำหรับการเก็บข้อมูลแบบ Kinematic ที่ต้องมีการเคลื่อนที่นั้นแบบ MAX นั้นให้ผลดีที่สุด เนื่องจากค่าพิกัดที่อยู่ในโหมด Fixed Solution โดยเฉลี่ยมีค่าสูงสุดจากทั้งสองเครือข่าย

ข้อสรุปนี้เกิดจากผลการทดลองในจุดทดลองเบื้องต้นเท่านั้น อาจจะไม่สามารถใช้เป็นข้อสรุปที่ชัดเจนได้และจำเป็นต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมทั้งจำนวนจุดและระยะเวลาที่เก็บข้อมูล

5.2 ข้อจำกัด

- 5.2.1 ในการวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากเรื่องของเครื่องมือและเป็นการประมวลผลแบบ Real Time รวมทั้งเป็นการทดสอบในสนาม
- 5.2.2 การเปรียบเทียบผลอาจทำไม่ได้ชัดเจนเนื่องจากผลการทดสอบได้มานั้นไม่ได้ใช้ข้อมูลเดียวกัน เวลาเดียวกันมาทำการประมวลผลเหมือนกับการประมวลผลย้อนหลัง
- 5.2.3 ขนาดความยาวของเส้นฐานที่ทำการทดสอบมีการเปรียบเทียบกันเพียง 2 ขนาด

- 5.2.4 พื้นที่ทำการทดสอบอยู่ในบริเวณกรุงเทพมหานครและใช้สถานีอ้างอิงในเครือข่ายอยู่ในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล
- 5.2.5 ในงานวิจัยนี้มีการใช้ Software และเครื่องรับของผู้ผลิต Leica ปัจจุบันหน่วยงานต่างๆ มีการใช้ Network-Based Real-Time กันมากขึ้นแต่ใช้ของผู้ผลิตอื่นอาจมีความแตกต่างในเรื่องของอัลกอริทึมของผู้พัฒนา Software ของผู้ผลิตนั้นๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบการรังวัดแบบ Network Real Time Kinematic, NRTK ต่างๆ นี้เป็นการทดสอบขนาดของเครือข่ายปานกลางดังนั้นควรมีการทดสอบในขนาดของเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและการรังวัดในสนามจริงอาจจะเจอปัญหาเรื่องการสื่อสารของอินเทอร์เน็ตซึ่งจะทำให้เกิดค่าพิกัดกระโดดค่อนข้างมาก ดังนั้นในการเก็บข้อมูลควรมีการเก็บให้มีจำนวนเพียงพอต่อการนำข้อมูลมาตรวจสอบและทำการคัดกรองก่อนนำข้อมูลไปใช้ รวมทั้งการขยายพื้นที่ทดสอบออกไปยังต่างจังหวัดเนื่องจากปัจจุบันหน่วยงานต่างๆ มีสถานีที่ต่างจังหวัดด้วย ผลการทดสอบเป็นการทดสอบในภาคสนามซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลา การเข้าพื้นที่ทำการทดสอบและเครื่องมือที่นำมาทดสอบ จึงไม่สามารถทดสอบในแต่ละระบบในเวลาเดียวกันได้ ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้ทำการทดสอบแบบประมวลผลย้อนหลังเพื่อให้ได้สภาพแวดล้อมเดียวกัน เวลาเดียวกัน ที่ทำให้สามารถเปรียบเทียบกันได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

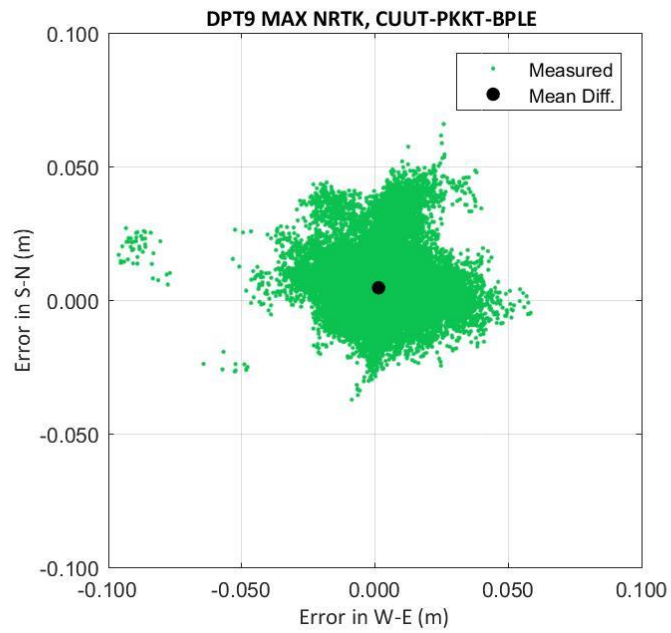
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2547). เอกสารคำสอนวิชา 2108631 *Advance GPS Satellite Surveying* งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีทัต เจริญกาลัญญา. (2555). ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อ ประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่าย สถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์. (2556). สถิติวิศวกรรม (*Engineering Statistics*). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2554). การสำรวจ : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2559). การสำรวจทางวิศวกรรม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

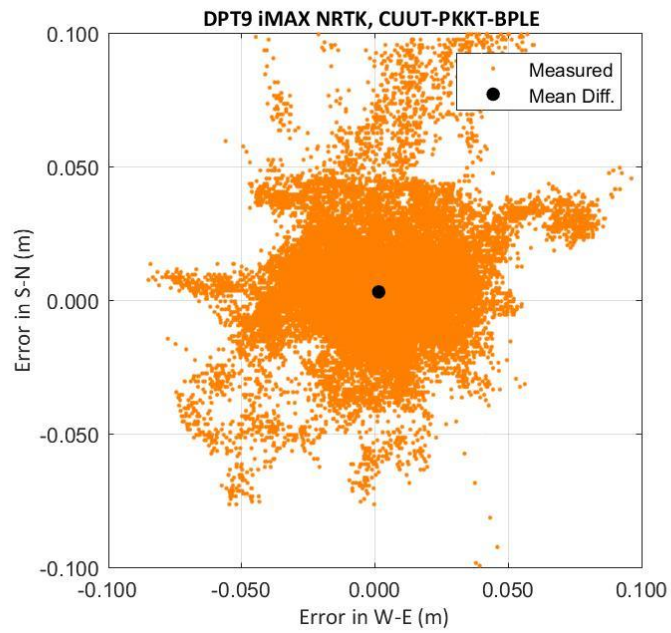
- Berber, M., & Arslan, N. (2013). Network RTK: A case study in Florida. *Measurement*, 46(8), 2798-2806.
- Brown, N., Keenan, R., Richter, B., & Troyer, L. (2005). *Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM V3. 0 Master-Auxiliary messages*. Paper presented at the Proceedings of ION GNSS.
- Charoenkalunyuta, T., Satirapod, C., Lee, H.-K., & Choi, Y.-S. (2012). Performance of network-based RTK GPS in low-latitude region: A case study in Thailand. *Engineering Journal (Eng. J.)*, 16(5), 95-104.
- El-Mowafy, A. (2012). Precise real-time positioning using Network RTK. In *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*: InTech.
- Euler, H., Keenan, C., Zebhauser, B., & Wübbena, G. (2001). *Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays*. Paper presented at the ION GPS.

- FGDC. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards, part 3: National standard for spatial data accuracy. *Subcommittee for Base Cartographic Data*, 25p.
- GPS World. (2013). Network RTK for Intelligent Vehicles. Retrieved from <http://gpsworld.com/network-rtk-for-intelligent-vehicles/>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*: Springer Science & Business Media.
- Leica Geosystems (Producer). (2008). RTK Networks – Difference Methods, System 1200 Newsletter No.53. Retrieved from http://incors.in.gov/System1200_53_RTK_Networks_-_The_Different_Methods.pdf
- USGS. (2016). Real-Time Network (RTN) Surveying. Retrieved from https://water.usgs.gov/osw/gps/real-time_network.html
- Wu, S. (2009). *Performance of regional atmospheric error models for NRTK in GPSnet and the implementation of a NRTK system*. (Doctor of Philosophy (PhD)), RMIT University,
- Wübbena, G., Bagge, A., & Schmitz, M. (2001). *RTK networks based on Geo++ GNSMART—concepts, implementation, results*. Paper presented at the Proceedings of the National Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake, UT, USA.

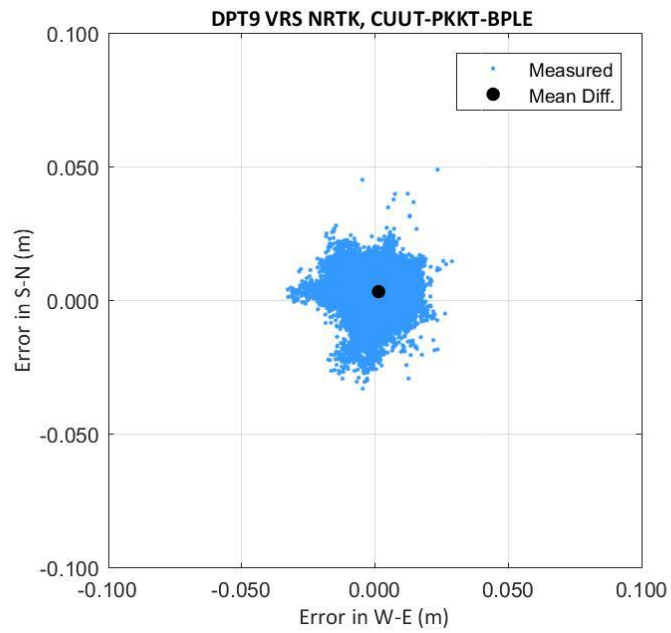




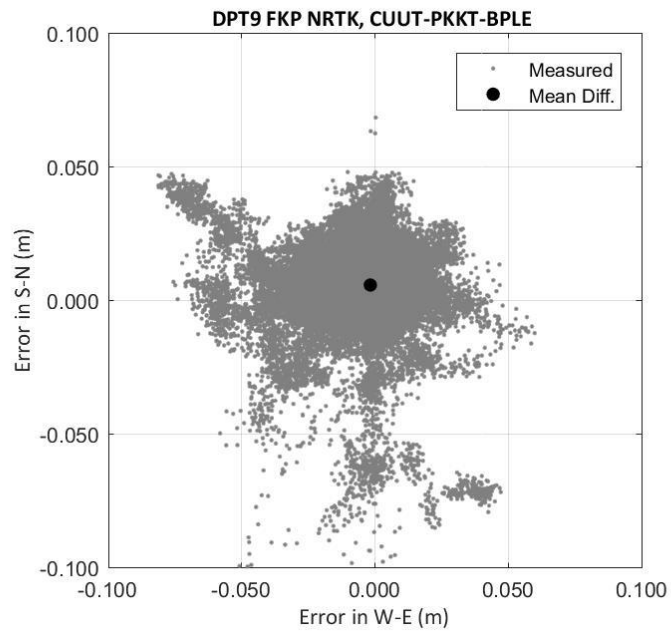
รูปที่ 1 ผลการทดสอบ MAX ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



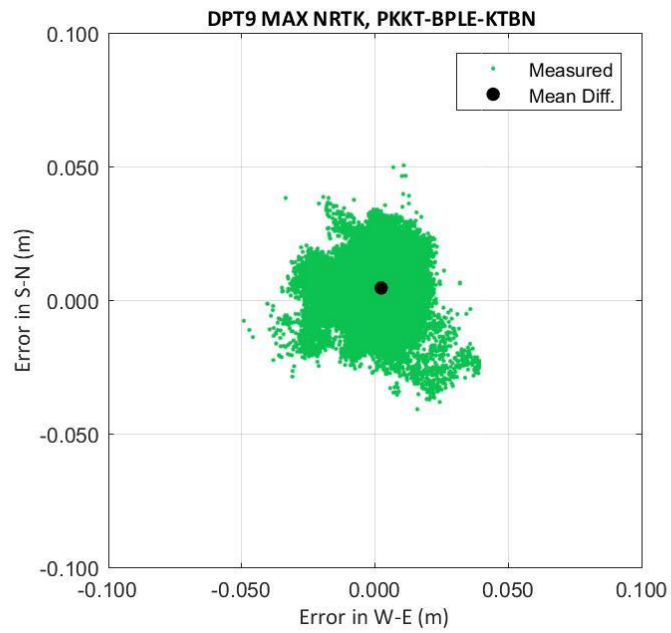
รูปที่ 2 ผลการทดสอบ i-MAX ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



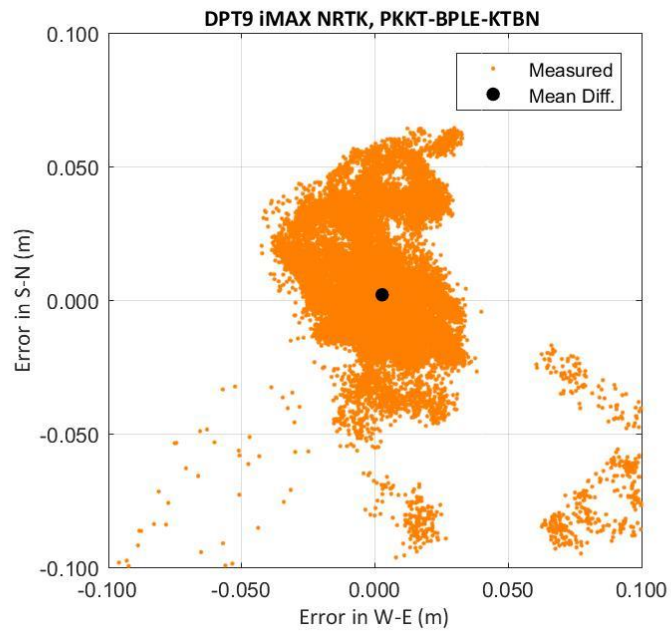
รูปที่ 3 ผลการทดสอบ VRS ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



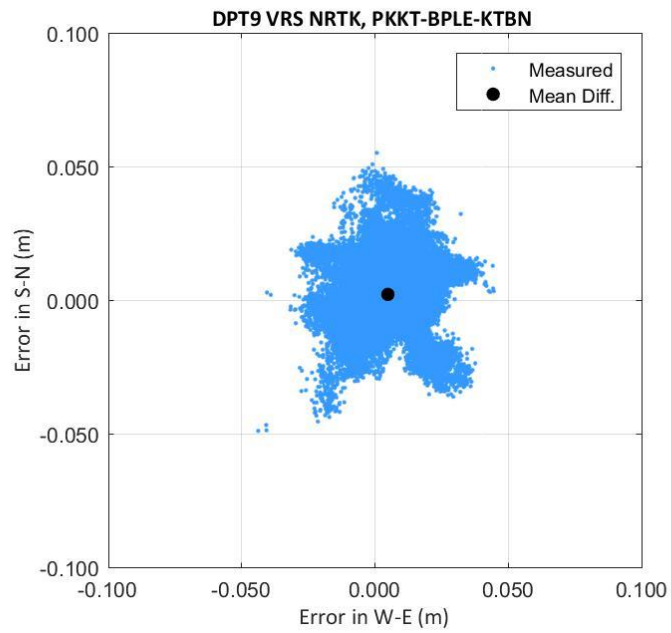
รูปที่ 4 ผลการทดสอบ FKP ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



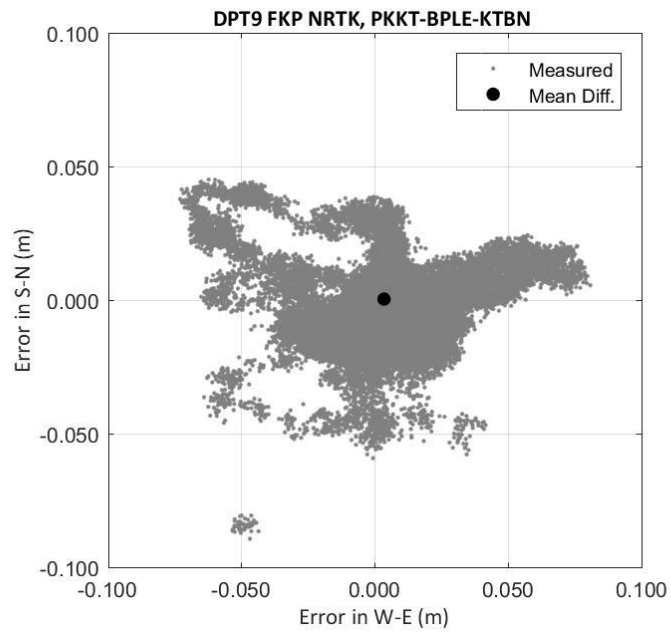
รูปที่ 5 ผลการทดสอบ MAX ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



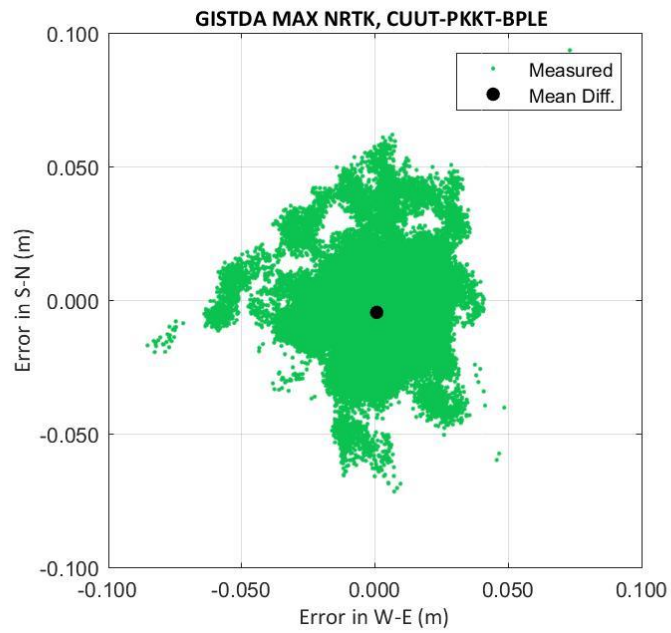
รูปที่ 6 ผลการทดสอบ i-MAX ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



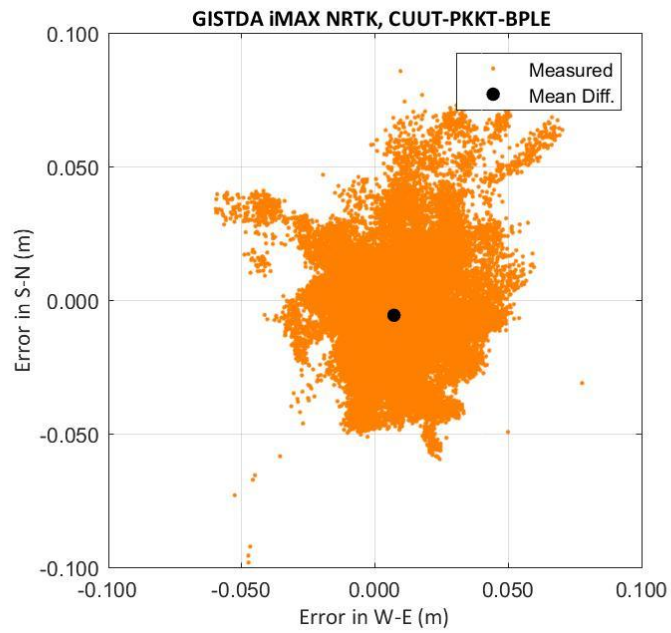
รูปที่ 7 ผลการทดสอบ VRS ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



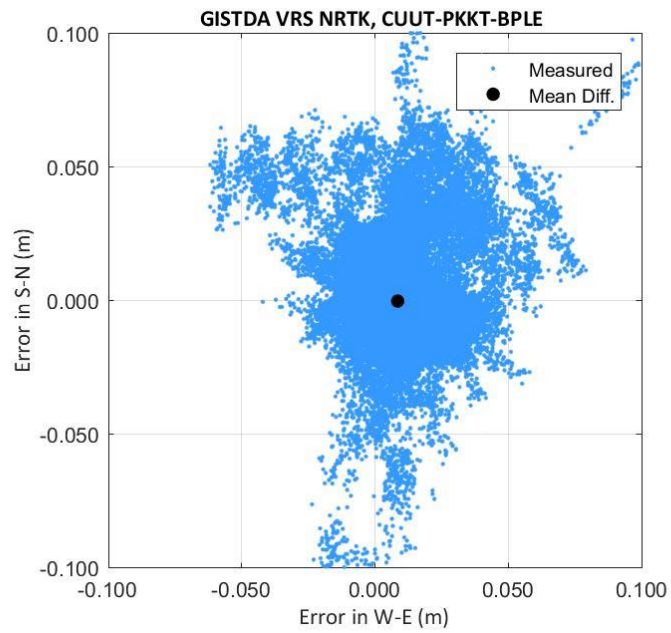
รูปที่ 8 ผลการทดสอบ FKP ที่สถานี DPT9 ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



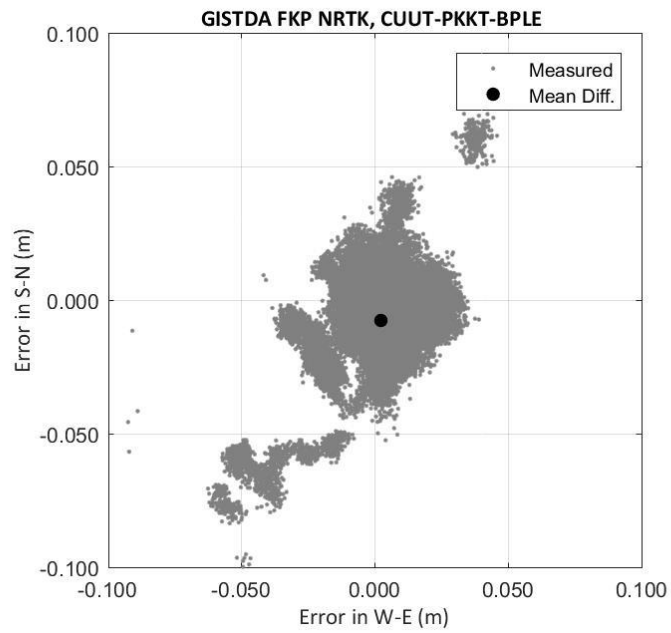
รูปที่ 9 ผลการทดสอบ MAX ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



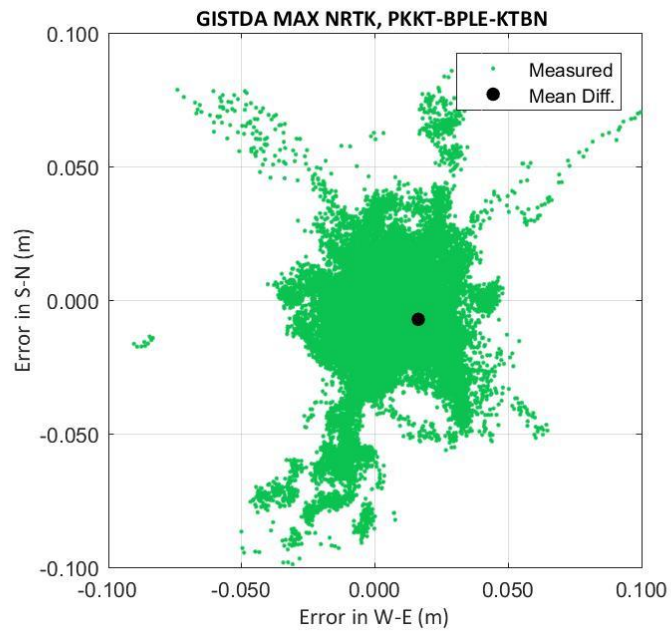
รูปที่ 10 ผลการทดสอบ i-MAX ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



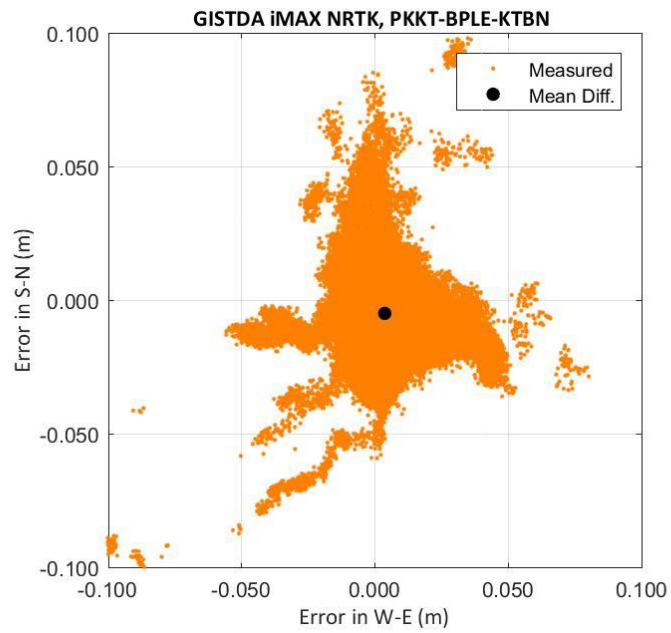
รูปที่ 11 ผลการทดสอบ VRS ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



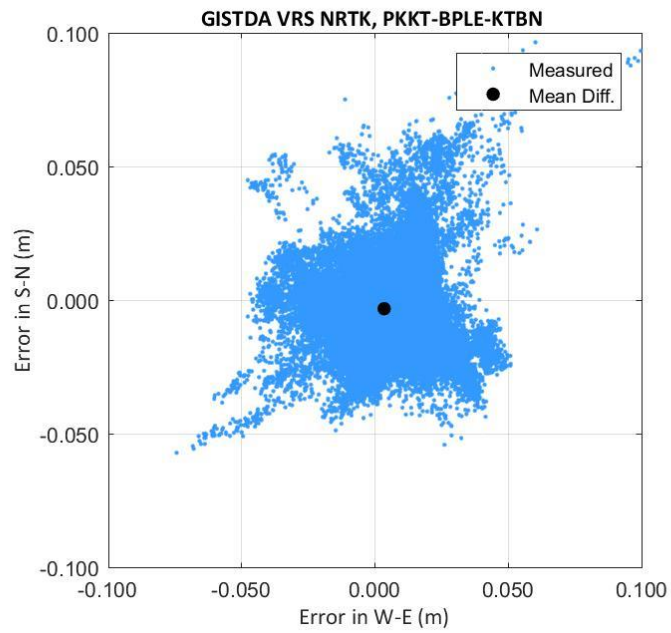
รูปที่ 12 ผลการทดสอบ FKP ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย CUUT-PKKT-BPLE



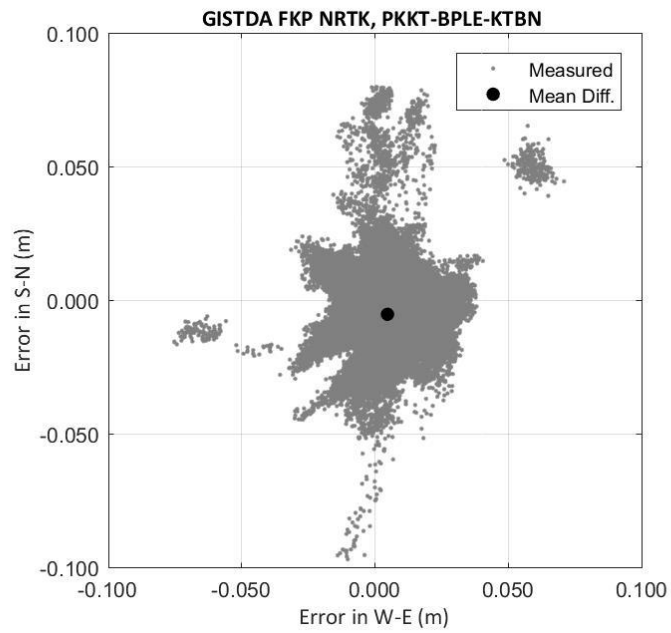
รูปที่ 13 ผลการทดสอบ MAX ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



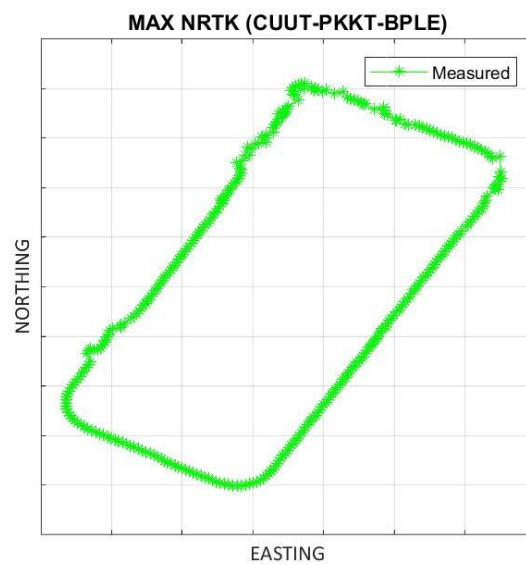
รูปที่ 14 ผลการทดสอบ i-MAX ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



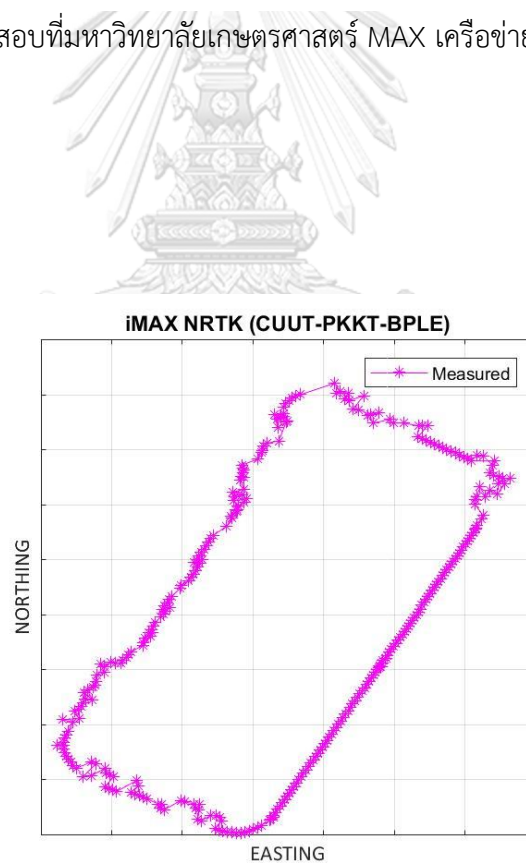
รูปที่ 15 ผลการทดสอบ VRS ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



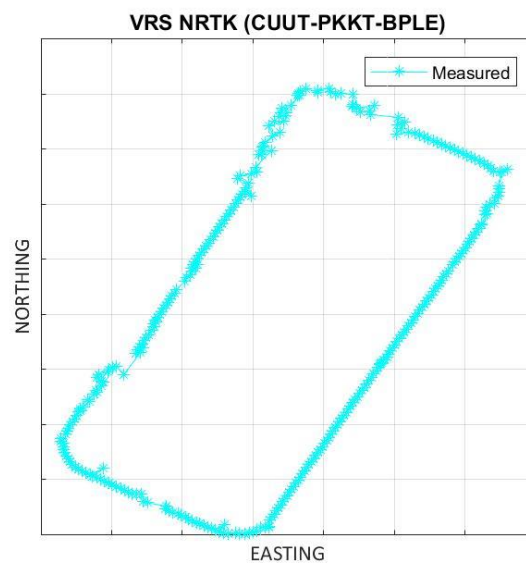
รูปที่ 16 ผลการทดสอบ FKP ที่สถานี GISTDA ของเครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



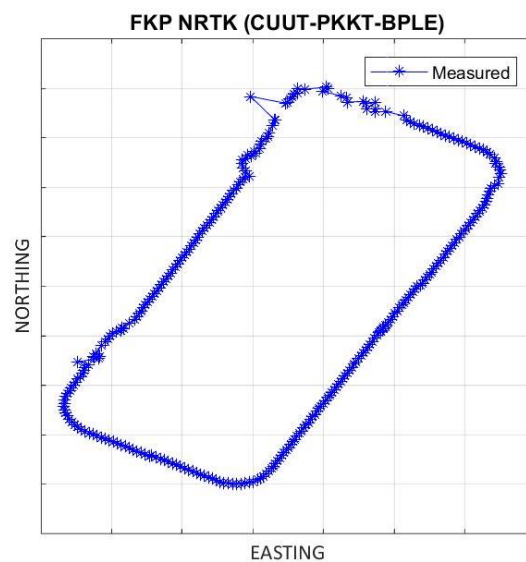
รูปที่ 17 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ MAX เครื่องข่าย CUUT-PKKT-BPLE



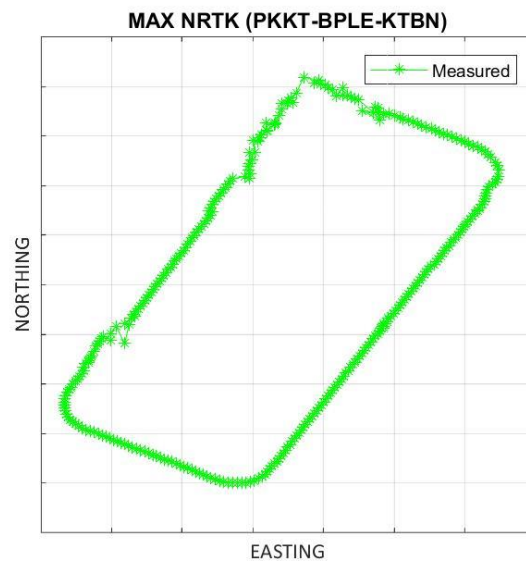
รูปที่ 18 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ i-MAX เครื่องข่าย CUUT-PKKT-BPLE



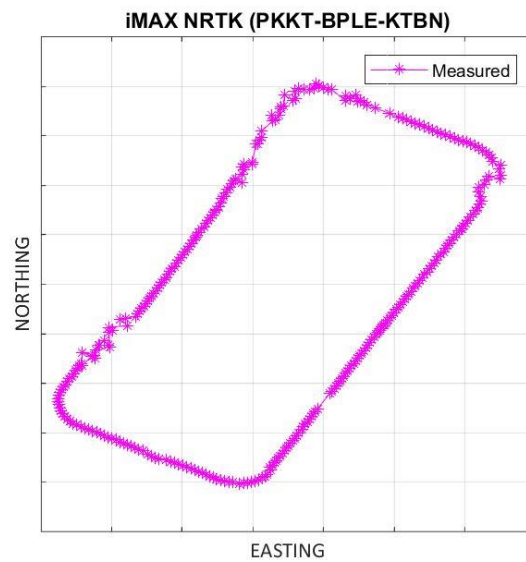
รูปที่ 19 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ VRS เครื่องข่าย CUUT-PKKT-BPLE



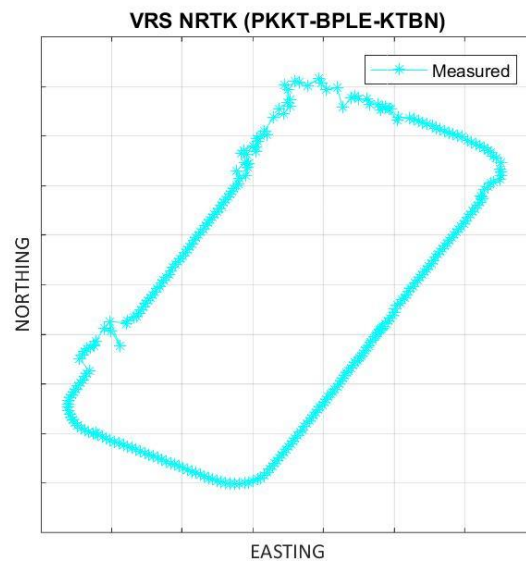
รูปที่ 20 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ FKP เครื่องข่าย CUUT-PKKT-BPLE



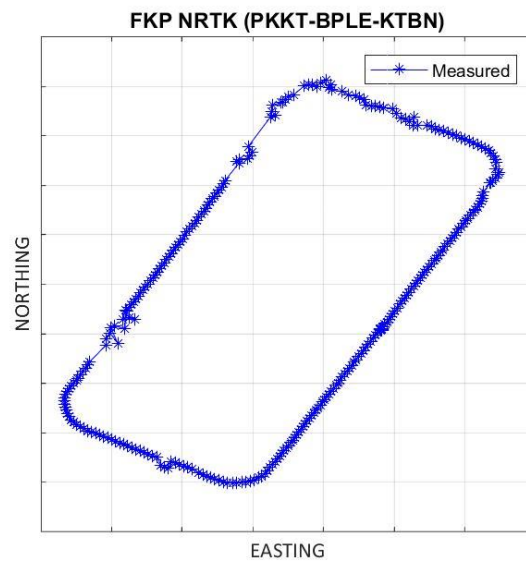
รูปที่ 21 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ MAX เครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



รูปที่ 22 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ i-MAX เครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



รูปที่ 23 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ VRS เครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN



รูปที่ 24 ผลการทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ FKP เครือข่าย PKKT-BPLE-KTBN

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา เกิดเมื่อวันที่ 31 มกราคม 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ สาขาเทคโนโลยีเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตภาคพายัพ เชียงใหม่ ปีการศึกษา 2553 และในปีการศึกษา 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

