

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวม
ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



RELATIONSHIP BETWEEN GEOMAGNETIC FIELD AND TOTAL ELECTRON
CONTENT VARIATION IN IONOSPHERE

วิษณุพล สิทธิชัย
WISHAPOL SITTICHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RELATIONSHIP BETWEEN GEOMAGNETIC FIELD AND TOTAL ELECTRON
CONTENT VARIATION IN IONOSPHERE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN INDUSTRIAL EDUCATION PROGRAM
IN ELECTRICAL COMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF INDUSTRIAL EDUCATION AND TECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024

COPYRIGHT OF SCHOOL OF INDUSTRIAL EDUCATION AND TECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ชื่อเรื่อง	ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
นักศึกษา	วิชญ์พล สิทธิชัย
รหัสประจำตัว	66036029
ปริญญา	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร
ปีการศึกษา	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เคนพันค้อ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Field) และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวม (Total Electron Content) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ นำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กโลก และจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นรายวัน และรายฤดูกาล พร้อมหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ผลสรุปจากการวิจัยพบว่าค่า GPS TEC, IGS TEC และ IRI TEC ที่ได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กของโลกจากแนวพื้นดินไปยังทิศเหนือ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กโลกมีการเหนี่ยวนำกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

คำสำคัญ: พายสนามแม่เหล็ก, สนามแม่เหล็กโลก, จำนวนอิเล็กตรอนรวม, GPS TEC, IGS TEC, IRI TEC

Title RELATIONSHIP BETWEEN GEOMAGNETIC FIELD AND TOTAL
ELECTRON CONTENT VARIATION IN IONOSPHERE

Student WISHAPOL SITTICHAJ

Student ID 66036029

Degree Master of Science in Industrial Education Program in
Electrical Communications Engineering

Academic Year 2024

Advisor Associate Professor Dr. PRASERT KENPANKHO

ABSTRACT

This thesis presents the relationship between geomagnetic field and total electron content variation in the ionosphere. By using data from satellite receivers in the GNSS system and the magnetometer at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, be used to analyze changes in the geomagnetic field and total electron content in the ionosphere on a daily and seasonal basis, and to find the relationship between geomagnetic field and total electron content variation in the ionosphere. As the results, we found that there is the positive correlation between GPS TEC, IGS TEC and IRI TEC from ionosphere and geomagnetic field at the north direction which shows evidence the coupling on ionosphere and geomagnetic field.

Keywords: Geomagnetic storm, Geomagnetic field, Total electron content, GPS TEC, IGS TEC, IRI TEC

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ก็ด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เคนพันคือ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนติดตามความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ทางด้านการศึกษา เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ Space, Satellite, and Study Laboratory หรือ SSS Lab ในการใช้สถานที่สำหรับการทำงานวิจัย รวมไปถึงองค์การความร่วมมือด้านอวกาศเอเชียแปซิฟิก (APSCO) สาธารณรัฐประชาชนจีน และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการติดตั้งเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

วิษณุพล สิทธิชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สนามแม่เหล็กโลก.....	6
2.2 เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	12
2.3 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	16
2.4 ดาวเทียม GNSS.....	32
2.5 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก.....	51
2.6 ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์.....	60
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	71
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	76
3.1 ศึกษาสนามแม่เหล็กโลก.....	76
3.2 ศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือประเทศไทย.....	77
3.3 ศึกษาการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางแบบหลายความถี่.....	78
3.4 การรับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมนำทาง.....	80
3.5 วิธีดำเนินการวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูล.....	82
3.6 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	87
4.1 การวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กโลก	87
4.2 การวิเคราะห์ค่า GPS TEC เปรียบเทียบกับค่า IRI TEC และ IGS TEC	88
4.3 เปรียบเทียบ และหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	91
5.1 สรุปผลการวิจัย	91
5.2 อภิปรายผล	92
5.3 ข้อเสนอแนะ	92
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก บทความภาษาอังกฤษ เรื่อง The study on the relationship between ionospheric delay and low-cost localizing robots ตีพิมพ์ในวารสาร Advances in Space Research ในฐานะข้อมูล Web of Science ระดับ Q1	100
ภาคผนวก ข เกียรติบัตรนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการ ศึกษา ครั้งที่ 14	109
ภาคผนวก ค รางวัลบทความยอดเยี่ยมในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14	111
ภาคผนวก ง บทความ เรื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลง ของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการ ประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14	113
ภาคผนวก จ เครื่องมือ และสถานที่ใช้ในการวิจัย	122
ภาคผนวก ฉ การนำเสนอผลงาน และกิจกรรมต่าง ๆ	127
ประวัติผู้เขียน	132

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก.....	53
2.2 พารามิเตอร์ในไฟล์การนำทาง RINEX.....	58
3.1 เกณฑ์ที่ใช้ในการแปลความหมายของสหสัมพันธ์อย่างง่าย	86
4.1 ค่าสนามแม่เหล็กโลก ในช่วงเวลาระหว่างเดือนกรกฎาคม-เดือนธันวาคม พ.ศ. 2566.....	87
4.2 ค่าสนามแม่เหล็กโลก ในช่วงเวลาระหว่างเดือนมกราคม-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567.....	87
4.3 ค่า TEC ในช่วงเวลาระหว่างเดือนมกราคม-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567.....	89
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC.....	89



สารบัญรูปร่าง

ภาพที่	หน้า
2.1 จุดดวงอาทิตย์ประจำปีและค่า AA	8
2.2 กราฟดัชนี Ap.....	9
2.3 แผนภูมิเปรียบเทียบวันค่าสูงและวันปกติของดัชนี AE	10
2.4 กราฟดัชนี Dst รายเดือน.....	11
2.5 แผนภูมิดัชนี Kp.....	11
2.6 เส้นเซอร์ฟลักซ์เกตแบบ Schonsted และแกนวางแหวน	14
2.7 สนามกระตุ้นของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กฟลักซ์เกตสลับกันขับเคลื่อนแกนให้มีความอิมตัว เป็นบวกหรือลบ	14
2.8 การกำหนดค่าวงจรทั่วไปสำหรับเครื่องวัดสนามฟลักซ์เกตแมกนีโตมิเตอร์	15
2.9 แผนภาพบล็อกของ FGM	16
2.10 ความดันอากาศและการแบ่งชั้นบรรยากาศตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	17
2.11 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแนวตั้งทั่วไปจากฐานของไอโอโนสเฟียร์ถึงระดับความ สูง 2,000 กม. (ซ้าย) และมุมมองที่ขยายของไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง (ขวา)	18
2.12 โครงสร้างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวัน-กลางคืน และโปรไฟล์ความหนาแน่น ของไอโอโนสเฟียร์.....	19
2.13 ไอโอโนแกรมแบบปกติ และไอโอโนแกรมแบบที่มี Es	20
2.14 การเปลี่ยนแปลงของ TEC ตามกลางวันกลางคืนในวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2566 ณ สถานี SIET KMITL.....	21
2.15 แกนโลกเอียง 23.5° และเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ทำให้เกิดฤดูกาลที่แตกต่างกัน	22
2.16 การเปลี่ยนแปลงของละติจูด	23
2.17 การเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรสุริยะในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2566.....	23
2.18 แผนภาพบล็อกไอโอโนซอนด์ถูกใช้ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์	24
2.19 เทคนิคการสังเกตไอโอโนสเฟียร์ (ไอโอโนซอนด์)	25
2.20 พารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์บนไอโอโนแกรม	25
2.21 การหักเหของสัญญาณดาวเทียม GNSS เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเป็น ชั้นบรรยากาศที่มีปริมาณอิเล็กตรอนสูง และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กตรอนตลอด เวลา	27
2.22 ไอโอโนแกรม ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขต ชุมพรเขตรอุดมศักดิ์	30
2.23 การทำแผนที่ TEC ในแนวเอียงไปแนวตั้ง	31
2.24 การวางตำแหน่ง GNSS 2D	34

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.25 สถาปัตยกรรม GNSS	34
2.26 ดาวเทียม GNSS.....	37
2.27 สถานีตรวจสอบส่วนควบคุม GPS ภาคพื้นดิน.....	38
2.28 สถานีตรวจสอบส่วนควบคุม Glonass ภาคพื้นดิน	39
2.29 ส่วนควบคุมดาวเทียม Galileo	40
2.30 ส่วนควบคุมดาวเทียม BeiDou.....	41
2.31 ส่วนพื้นที่ IRNSS และพื้นที่ครอบคลุมบริการ.....	42
2.32 ส่วนควบคุมดาวเทียม QZSS.....	43
2.33 แผนภาพบล็อกของความถี่ดาวเทียม GPS.....	45
2.34 แผนภาพบล็อกของการส่งสัญญาณ GPS ที่ความถี่ต่าง ๆ.....	46
2.35 ความถี่ GNSS.....	49
2.36 สัญญาณทั้งหมดของ GNSS.....	50
2.37 แผนผังตัวรับสัญญาณจากดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก.....	55
2.38 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการรับสัญญาณหลายความถี่ของระบบนำทางทั่วโลก	55
2.39 ไฟล์สังเกตการณ์ RINEX.....	56
2.40 การสูญเสียการล็อกและความแรงของสัญญาณ GPS.....	58
2.41 ไฟล์ข้อมูลอุทุนิยมวิทยา RINEX version 2	59
2.42 การคำนวณ VTEC ที่ได้จากตัวรับสัญญาณ GPS.....	64
2.43 GPS TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	64
2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวลาดเอียง STEC และแนวตั้ง VTEC	65
2.45 เราคาดณิตของมุม χ ที่อยู่เหนือแนวเส้นตั้งฉากของเครื่องรับสัญญาณ R_x กับดาวเทียม GPS	67
2.46 เราคาดณิตในการหาความยาวของด้าน.....	68
2.47 สถานี IGS ณ จังหวัดชุมพร	70
2.48 สถานี IGS ที่มีให้บริการในประเทศไทย	70
2.49 หน้าหลักของแบบจำลอง IRI ของ จังหวัดชุมพร	71
3.1 รูปแบบการติดตั้งสถานีสังเกตการณ์ Geomagnetic station	76
3.2 พื้นที่สถานีสังเกตการณ์ Geomagnetic station.....	77
3.3 อุปกรณ์ตรวจจับค่าสนามแม่เหล็กโลกของ FGM.....	77
3.4 อุปกรณ์ในห้องสังเกตการณ์บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่จังหวัดชุมพร	78
3.5 เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียม BG2s GNSS Ionospheric.....	79
3.6 การเชื่อมต่อ BG2s GNSS Ionospheric Monitor	79

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7 RX Control โปรแกรมควบคุมหลัก.....	80
3.8 ส่วนการดูข้อมูลดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกแต่ละระบบ.....	80
3.9 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC.....	82
3.10 การรวบรวมข้อมูลค่าสนามแม่เหล็กโลก.....	83
3.11 การรวบรวมข้อมูล GPS TEC ในรูปแบบไฟล์ Rinex.....	83
3.12 กระบวนการรวบรวมข้อมูล IGS TEC.....	84
3.13 กระบวนการคำนวณ IRI TEC.....	85
4.1 ค่า TEC จากการเปรียบเทียบ GPS TEC, IGS TEC และ IRI TEC ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ eV/m}^2$).....	88



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic field) มีความสำคัญอย่างมากในการปกป้องโลกจากการถูกทำลายจากอวกาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากแสงและรังสีของดวงอาทิตย์ ทั้งนี้ สนามแม่เหล็กโลกประกอบไปด้วยขั้วแม่เหล็กสองขั้ว คือ ขั้วเหนือและขั้วใต้ และมีเส้นแรงแม่เหล็กชี้จากขั้วเหนือไปขั้วใต้ สนามแม่เหล็กโลกสามารถเกิดพายุสนามแม่เหล็กได้เมื่อได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของระบบสุริยะจักรวาลจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของดวงอาทิตย์ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวม (Total Electron Content: TEC) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้เกิดผลกระทบกับการสื่อสารสัญญาณดาวเทียมในระบบ Global Navigation Satellite System (GNSS) เกิดการผิดพลาดเกิดขึ้นได้

จากการศึกษาแนวทางวิจัยเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กโลกและค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้มีจำนวนการศึกษาและวิจัยแสดงถึงความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดต่าง ๆ (สูง กลาง ต่ำ และเส้นศูนย์สูตร) โดยใช้ Global Positioning Satellite (GPS) ในระบบ GNSS ตัวอย่างเช่น Kenpankho et al. (2011, pp. 365-370) เปรียบเทียบการวัด GPS TEC กับการคาดการณ์ IRI TEC ที่สถานีละติจูดเส้นศูนย์สูตร จังหวัดชุมพร ประเทศไทย Rao et al. (2013, pp. 1-6) ศึกษาความแปรปรวนของ TEC ละติจูดต่ำที่ศึกษาจากตำแหน่งที่พกผันของแม่เหล็กตามลองจิจูด 73°E Nava et al. (2016, pp. 3421-3438) วิจัยการตอบสนองของไอโอโนสเฟียร์ละติจูดกลางและต่ำต่อพายุแม่เหล็กของโลกในวันเซนต์แพทริกปี พ.ศ. 2558 Chen et al. (2017, pp. 3632-3639) ผลของกิจกรรมทางธรณีแม่เหล็กจากข้อมูล TEC การเปรียบเทียบระหว่างสี่สเปกตรัมกับค่ามัธยฐาน 28 วัน Reddybattula et al. (2019, pp. 283-292) วิเคราะห์ TEC ไอโอโนสเฟียร์จาก GPS, Global Ionosphere Map (GIM) และแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกในช่วงพายุแม่เหล็กระดับปานกลาง แรงแรง และรุนแรงเหนือภูมิภาคอินเดีย de Paula et al. (2019, pp. 1-15) วิเคราะห์พฤติกรรมความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ในช่วงพายุแม่เหล็ก 6-10 กันยายน พ.ศ. 2560 เหนือเส้นศูนย์สูตร-ละติจูดต่ำของประเทศบราซิล Dugassa et al. (2019, pp. 1161-1180) ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างการไล่ระดับสี่เชิงพื้นที่ของปริมาณอิเล็กตรอนรวมทั้งหมด (TEC) ระหว่างสองสถานีใกล้เคียง และการเกิดความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ Chernyshov et al. (2020, pp. 1-13) รายงานความสัมพันธ์ระหว่างการพุ่งสูงของ TEC และพายุย่อยออโรราในไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดสูง

Ratovsky et al. (2022, pp. 1-15) ตรวจสอบความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงกับกิจกรรมทางธรณีวิทยาและอุตุนิยมวิทยา Klimenko et al. (2022, pp. 923-938) รายงานเกี่ยวกับความเหมือนและความแตกต่างในสัญญาณวิทยาและกลไกของการรบกวน foF2 และ TEC ในช่วงพายุแม่เหล็กโลกเมื่อวันที่ 26-30 กันยายน พ.ศ. 2554 Bojilova et al. (2023, pp. 1-23) เปรียบเทียบและวิเคราะห์การตอบสนองของไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกและระดับภูมิภาคในช่วงพายุแม่เหล็กของโลกสองครั้งในวันที่ 3 และ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565

หลังจากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้ว ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับงานวิจัยเกี่ยวกับการรบกวนของ TEC ณ ตำแหน่งที่ละติจูดต่ำที่มุ่งเน้นทั่วบริเวณเหนือจังหวัดชุมพร (บริเวณละติจูดต่ำ) ประเทศไทย โดยการรวบรวมและเปรียบเทียบข้อมูลจากแหล่งข้อมูล TEC ทั้ง 3 แหล่งข้อมูล ได้แก่ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในระบบ GNSS เรียกว่า GPS TEC, International GNSS Service (IGS) เรียกว่า IGS TEC และ International Reference Ionosphere (IRI) เรียกว่า IRI TEC สำหรับการวิจัยที่เกี่ยวข้อง Kenpankho et al. (2011, pp. 365-370) เปรียบเทียบการวัด ค่าอิเล็กทรอนิกส์รวมจากดาวเทียม GPS กับการคาดการณ์ IRI TEC ที่สถานีละติจูดเส้นศูนย์สูตร จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ซึ่งนำข้อมูลในรูปแบบไฟล์ Receiver Independent Exchange Format (RINEX) จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม มาหาค่า GPS TEC และเปรียบเทียบกับค่า IRI TEC เพื่อให้ได้ค่า TEC ที่เป็นค่ามาตรฐานโลก Chen et al. (2017, pp. 3632-3639) ได้ศึกษาผลของกิจกรรมทางแม่เหล็กของโลกจากข้อมูล TEC การเปรียบเทียบระหว่างสี่สเปกตรัมและค่ามัธยฐานใน 28 วัน พบว่าการแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในระหว่างสภาวะที่เงียบ และถูกรบกวนได้รับการวิเคราะห์โดยทั้งแบบ Spectral Whitening Method (SWM) และ Running Median Centered (RMC) ผลลัพธ์ที่ได้จาก RMC เมื่อเทียบกับจาก SWM มีการประเมินค่าสูงแสดงว่าเกิดการรบกวนประมาณ 5-20% ในช่วงพายุสนามแม่เหล็กโลก และสูงถึง 35% ในช่วงเวลาที่เงียบสงบ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลก และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในระบบ GNSS ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบ GPS TEC กับ IGS TEC และ IRI TEC จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวน TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

เมื่อเกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพิ่มจำนวนมากยิ่งขึ้น

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

กรอบแนวความคิดในการวิจัยใช้หลักการของ Kenpankho et al. (2011, pp. 365-370) และ Chen et al. (2017, pp. 3632-3639) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567

1.5 ขอบเขตการวิจัย

นำข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กโลก และจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นรายวัน ช่วงเวลา

1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อความเข้าใจที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์การวิจัย จึงกำหนดความหมายของคำต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย ดังนี้

1.6.1 ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) คือ ชั้นบรรยากาศของโลกที่กลายเป็นไอออนเนื่องจากการแผ่รังสีสุริยะ อยู่ภายในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่ปกป้องโลกจากรังสี

ของดวงอาทิตย์ไม่ให้เข้ามาและป้องกันคลื่นรังสีจากขั้วโลกทั้งสองไม่ให้เข้ามารบกวนคลื่นในโลก
ชั้นนี้เป็นชั้นที่ติดกันกับชั้นขอบอวกาศนอกโลก ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีอีกชื่อหนึ่งว่า เทอริโมสเฟียร์

1.6.2 สนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic field) คือ แม่เหล็กสองขั้วชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขั้ว
ด้านหนึ่งอยู่ใกล้ตำแหน่งขั้วโลกเหนือ (ขั้วแม่เหล็กเหนือ) และขั้วอีกด้านหนึ่งอยู่ใกล้ตำแหน่งขั้วโลกใต้
(ขั้วแม่เหล็กใต้) เส้นที่เชื่อมระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสองด้านมีความเอียงประมาณ 11.3° กับแกนการ
หมุนของโลก

1.6.3 พายุสนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic storm) คือ พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง
จากลมสุริยะในสภาพแวดล้อมของอวกาศที่อยู่ล้อมรอบโลก ซึ่งเป็นการรบกวนสนามแม่เหล็กโลก
พายุที่เกิดขึ้นเป็นผลจากความแตกต่างของลมสุริยะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ของกระแส
พลาสมา และเส้นแรงแม่เหล็กของโลก

1.6.4 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก (Magnetometer) คือ เครื่องมือที่ใช้ตรวจจัดการมืออยู่
ของวัตถุที่เป็นโลหะหรือวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก วัดความแรงและทิศทางของสนามแม่เหล็ก
รวมทั้งสนามที่อยู่บนพื้นโลกหรือใกล้โลกและในอวกาศ

1.6.5 Global Navigation Satellite System (GNSS) คือ ระบบนำทางด้วยดาวเทียม
หรือระบบ Satnav เป็นระบบที่ใช้ดาวเทียมเพื่อระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์เชิงพื้นที่แบบอิสระ ช่วย
ให้อุปกรณ์นำทางด้วยดาวเทียมสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำสูงโดยใช้สัญญาณเวลาที่ส่งไป
ตามแนวสายตาด้วยวิทยุจากดาวเทียม ระบบนำทางด้วยดาวเทียมที่ครอบคลุมทั่วโลกอาจเรียกว่า
ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (GNSS) รวมถึง GPS (สหรัฐอเมริกา) GLONASS (รัสเซีย) Galileo
(สหภาพยุโรป) BeiDou (จีน) QZSS (ญี่ปุ่น) และ IRNSS (อินเดีย)

1.6.6 Total Electron Content (TEC) คือ จำนวนรวมของอิเล็กตรอนที่รวมกันระหว่าง
จุดสองจุด ตามทอที่มีหน้าตัด 1 m^2 นั่นคือ ความหนาแน่นของจำนวนอิเล็กตรอนแบบเรียงเป็นแนว
TEC เป็นปริมาณเชิงพรรณนาที่สำคัญสำหรับบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ของโลก

1.6.7 The Receiver Independent Exchange Format (RINEX) คือ รูปแบบการ
แลกเปลี่ยนอิสระของตัวรับ เป็นข้อมูลของการรับค่าสัญญาณดาวเทียม จากดวงต่าง ๆ จะจัดเก็บไฟล์
ในลักษณะของเครื่องรับที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างอิสระ Receiver Independent Exchange
(RINEX) โดยภายในไฟล์ที่ทำการจัดเก็บจะประกอบไปด้วย ข้อมูล observation data ephemeris
data และ navigation ที่มีรูปแบบของข้อมูลเป็นมาตรฐานสากลเรียกว่า RINEX file

1.6.8 Global Positioning System (GPS) คือ ระบบดาวเทียมเพื่อระบุข้อมูลของตำแหน่งและเวลาโดยอาศัยการคำนวณจากความเร็วสัญญาณนาฬิกาที่ส่งมาจากตำแหน่งของดาวเทียมต่าง ๆ ที่โคจรรอบโลกทำให้สามารถระบุตำแหน่ง ณ จุดที่สามารถรับสัญญาณได้ทั่วโลก โดยใช้เครื่องรับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เพื่อตรวจสอบตำแหน่ง (ลองจิจูด ละติจูดและความสูง) โดยใช้ข้อมูลที่ถูกส่งมาจากดาวเทียม เครื่องรับสัญญาณจะทำการคำนวณเวลาและ ตำแหน่งซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการทดลองทางวิทยาศาสตร์

1.6.9 International GNSS Service (IGS) คือ การให้บริการข้อมูลระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (GNSS) แบบสากลสามารถเข้าถึงข้อมูลแบบเปิด ข้อมูล GNSS ที่มีคุณภาพความแม่นยำสูงที่ได้ทำการจัดเก็บไว้ตั้งแต่ปี 2537 ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้สามารถเข้าถึงข้อมูลการอ้างอิง TEC ระดับสากลทั่วโลก โดยการนำข้อมูลในรูปแบบ RINEX File ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกมาให้ IGS ทำการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของ TEC

1.6.10 International Reference Ionosphere (IRI) คือ โครงการระดับนานาชาติที่ได้รับการสนับสนุนโดยคณะกรรมการวิจัยอวกาศ (COSPAR) และสหภาพวิทยุวิทยาศาสตร์ระหว่างประเทศ (URSI) เพื่อผลิตแบบจำลองมาตรฐานเชิงประจักษ์ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นอกจากนี้แล้วยังสามารถหาค่าอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้จากแบบจำลอง IRI ที่มีชื่อว่า IRI TEC และแบบจำลอง IRI TEC จะทำการบันทึกข้อมูลใหม่ ๆ ไว้ทุกครั้งที่มีการใช้งาน โดยข้อมูลที่ได้จาก IRI TEC ถูกนำไปอ้างอิงในงานวิจัยเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่า TEC ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณระบบนำทางที่มีอยู่ทั่วทุกภูมิภาค

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ผู้วิจัยได้ศึกษาเรื่องเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กโลก เครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ดาวเทียม GNSS เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบหลายความถี่ ปริมาณอิเล็กตรอนรวม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 สนามแม่เหล็กโลก

สนามแม่เหล็กโลก เป็นสนามแม่เหล็กที่ขยายจากภายในของโลกออกสู่อวกาศซึ่งทำปฏิกิริยากับลมสุริยะซึ่งเป็นกระแสของอนุภาคที่มีประจุที่เล็ดลอดออกมาจากดวงอาทิตย์ สนามแม่เหล็กโลกถูกสร้างขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสพาความร้อนของส่วนผสมของเหล็กหลอมเหลวและนิกเกิลในแกนนอกของโลก กระแสพาความร้อนเหล่านี้เกิดจากความร้อนที่ไหลออกจากแกนกลางซึ่งเป็นกระบวนการทางธรณีวิทยาที่เรียกว่าธรณีพลศาสตร์

ขนาดของสนามแม่เหล็กโลกที่พื้นผิวอยู่ในช่วง 25 ถึง 65 μT (0.25 ถึง 0.65 G) ในการประมาณค่าจะแสดงด้วยสนามแม่เหล็กไดโพลที่ปัจจุบันเอียงที่มุมประมาณ 11° เมื่อเทียบกับแกนหมุนของโลกราวกับว่ามีแม่เหล็กแท่งขนาดมหึมาวางอยู่ที่มุมนั้นผ่านจุดศูนย์กลางของโลก ขั้วแม่เหล็กเหนือเป็นตัวแทนของขั้วใต้ของสนามแม่เหล็กโลกและในทางกลับกันขั้วแม่เหล็กใต้สอดคล้องกับขั้วเหนือของสนามแม่เหล็กโลก (เพราะขั้วแม่เหล็กตรงข้ามดึงดูดและปลายด้านเหนือของแม่เหล็กเช่นเข็มทิศชี้ไปที่สนามแม่เหล็กใต้ของโลกเช่นขั้วแม่เหล็กเหนือใกล้ขั้วโลกเหนือทางภูมิศาสตร์) ในปี พ.ศ. 2558 ขั้วแม่เหล็กโลกเหนือตั้งอยู่บนเกาะเอลส์เมียร์ อนุทวีป ประเทศแคนาดา

ในขณะที่ขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้มักจะตั้งอยู่ใกล้กับขั้วภูมิศาสตร์พวกมันเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ และต่อเนื่องผ่านมาตราส่วนเวลาทางธรณีวิทยา แต่ช้าพอสำหรับเข็มทิศธรรมดาที่จะยังคงมีประโยชน์สำหรับการนำทาง อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ไม่สม่ำเสมอโดยเฉลี่ยหลายแสนปีสนามของโลกจะย้อนกลับและขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ตามลำดับสลับที่อย่างกะทันหัน การกลับตัวของขั้วแม่เหล็กของโลกเหล่านี้ทิ้งบันทึกไว้ในหินที่มีค่าสำหรับนักบรรพชีวินวิทยาในการคำนวณสนามแม่เหล็กโลกในอดีต ข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของทวีปและพื้นมหาสมุทรในกระบวนการของแผ่นเปลือกโลก

แมกนีโตสเฟียร์ คือ พื้นที่เหนือไอโอโนสเฟียร์ที่กำหนดโดยขอบเขตของสนามแม่เหล็กโลกในอวกาศ ซึ่งขยายออกไปหลายหมื่นกิโลเมตร (กม.) ในอวกาศปกป้องโลกจากอนุภาคที่มีประจุของลมสุริยะและรังสีคอสมิกที่จะตัดชั้นบรรยากาศชั้นบนออกไปรวมถึงชั้นไอโซนที่ปกป้องโลกจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นอันตราย

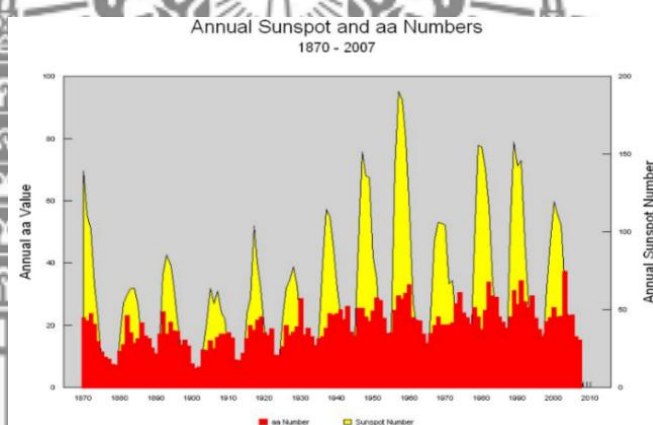
2.1.1 ดัชนีสนามแม่เหล็กโลก

ดิน น้ำ ท้องฟ้า อวกาศ และดวงดาวล้วนมีปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกันซึ่งมีมากมาย ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อดาวเคราะห์ดวงอื่นในระบบสุริยะ ตัวอย่างเช่นกิจกรรมแสงอาทิตย์จะปล่อยอนุภาคออกสู่อวกาศจนกว่าสภาพอากาศในอวกาศจะเปลี่ยนแปลงชั่วคราว พายุ Geomagnetic เป็นรูปแบบหนึ่งของกิจกรรมสุริยะที่เปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กโลก โดยปกติสนามแม่เหล็กโลกจะทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันอนุภาคที่ขึ้นสู่อวกาศ อย่างไรก็ตามพายุสุริยะมีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กโลกในบางพื้นที่เป็นเวลาหลายวัน การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตบนโลก แต่อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์มีตัวชี้วัดหลายอย่างเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลก รวมถึง AA, AE, Ap, Dst และ Kp ตัวชี้วัดเหล่านี้ยังสามารถใช้เพื่อทำนายความเป็นไปได้ที่แสงออโรราบนโลกจะเกิดขึ้น เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกลดลงอนุภาคจากอวกาศจะถูกดูดซับโดยโลก สิ่งนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนรวมของไอโอโนสเฟียร์เมื่อชั้นบรรยากาศถูกรบกวน ต่อไปนี้เป็น Scintillation ไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเป็นปัญหาใน GNSS ซึ่งทำให้เกิด GPS บนพื้นผิวโลกถูกขึ้นน้ำผิ International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) รับรองดัชนีแม่เหล็ก AA, Ap, AE, Dst และ Kp จาก National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2023, Online) อย่างเป็นทางการ ดังนี้

2.1.1.1 ดัชนี AA

ดัชนี AA เป็นพายุแม่เหล็กที่สำคัญ ดัชนีกิจกรรมแม่เหล็กทั่วโลกอย่างง่ายผลิตในฝรั่งเศสจากดัชนี K ของหอดูดาวแม่เหล็กเกือบด้านโพลสองแห่งในอังกฤษและออสเตรเลีย ดัชนี AA นี้เป็นดัชนีแอนติโพลแอมพลิจูดที่เทียบเท่า 3 ชั่วโมง AA เฉลี่ยรายวันอาจได้มาคล้ายกับ Ap ข้อได้เปรียบทางประวัติศาสตร์ในการใช้ AA มากกว่า Ap ซึ่งดัชนีเหล่านี้ได้รับการขยายย้อนเวลากลับไปผ่านการปรับขนาดของกิจกรรมแม่เหล็กจากแมกนีโตแกรมของการสังเกตก่อนหน้านี้ ดัชนี AA ได้มาจากปี พ.ศ. 2411 ถึงปัจจุบัน ดัชนี AA ได้มาซึ่งเป็นคู่ของ Ap แต่สามารถใช้ได้นานกว่าหลายปี อย่างไรก็ตาม AA ได้มาจากดัชนีจากหอดูดาวแม่เหล็กเพียงสองแห่งในขณะที่ Ap รวมดัชนีจากหอดูดาวเพิ่มเติม เนื่องจากความแตกต่างในหน่วยการนำเสนอค่าของ AA และ Ap จึงไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงใช้ค่าการโจมตีของพายุแม่เหล็กที่สำคัญและค่าเกณฑ์สิ้นสุดที่แตกต่างกันสำหรับทั้งสองชุด อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบของพวกเขาสำหรับปีของการรายงานข่าวที่ทับซ้อนกันแสดงให้เห็นว่าความถี่

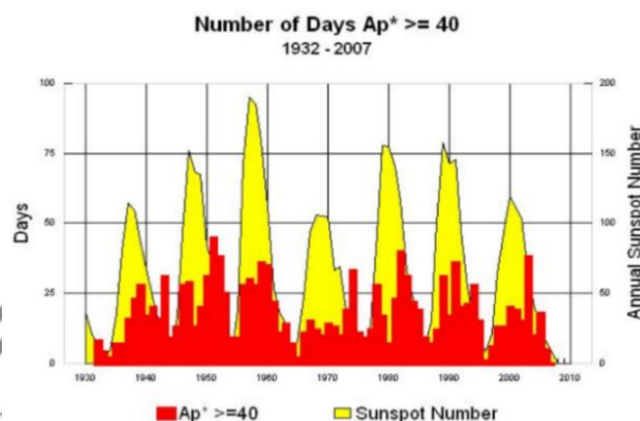
สัมพันธ์ของการเกิดพายุใหญ่ต่อปีมีความคล้ายคลึงกัน อีกเหตุผลหนึ่งของความแตกต่างคือดัชนีที่ได้จากค่าการบิดเบือนแม่เหล็กที่หอดูดาวเพียงสองแห่งจะประสพกับค่าที่รุนแรงมากขึ้นได้อย่างง่ายดายหากใช้สถานีพุดตาตำแหน่งหนึ่งตั้งอยู่อย่างดีกับไอโอโนสเฟียร์เหนือศีรษะ หรือระบบปัจจุบันที่จัดแนวสนามทำให้เกิดผลกระทบจากพายุแม่เหล็ก แม้ว่าจะไม่ได้บันทึกไว้ที่นี้ แต่ก็เป็นที่น่าสนใจที่จะทราบว่าระดับโดยรวมของการรบกวนแม่เหล็กในแต่ละปีได้เพิ่มขึ้นอย่างมากจากระดับต่ำสุดประมาณปี พ.ศ. 2443 นอกจากนี้ระดับของ AA เฉลี่ยต่อปีตอนนี้สูงขึ้นมาก ดังนั้นปีของการรบกวนแม่เหล็กขั้นต่ำในขณะนี้มักจะถูกรบกวนมากกว่าปีที่ระดับการรบกวนสูงสุดก่อนปี พ.ศ. 2443 กราฟของจุดดวงอาทิตย์ประจำปีและหมายเลข AA แสดงเป็นภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กราฟแสดงจุดดวงอาทิตย์ประจำปีและค่า AA
ที่มา : NOAA (2024, Online)

2.1.1.2 ดัชนี Ap

ดัชนี Ap เป็นพายุแม่เหล็กที่สำคัญเช่นเดียวกับดัชนี AA แต่ Ap ถูกกำหนดให้เป็นค่าสูงสุด 24 ชั่วโมงที่เกิดขึ้นเร็วที่สุดที่ได้รับจากการคำนวณค่าเฉลี่ยการทำงาน 8 จุดของดัชนี Ap 3 ชั่วโมงต่อเนื่องระหว่างเหตุการณ์พายุแม่เหล็กของโลกโดยไม่คำนึงถึงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของวัน UT มันมีความเกี่ยวข้องกับเหตุการณ์พายุโดยเฉพาะ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาค่าของ Ap ให้การวัดการรบกวนสูงสุดซึ่งมีประโยชน์ในการระบุพายุแม่เหล็กที่สำคัญตามลำดับเวลา (ตามวันที่และเวลาเริ่มต้น) และโดยแอมพลิจูดจากใหญ่สุดไปเล็กที่สุด ค่าแรกสุดที่เป็นไปได้คือปี 1932 เนื่องจากเป็นปีแรกที่มีการผลิตดัชนี Kp และ Ap มาตรฐาน เนื่องจากเจ้าหน้าที่ NGDC หรือคนอื่น ๆ มีเวลาอัปเดต Ap ตารางค่าจะพร้อมใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2475 จนถึงครั้งล่าสุด ตัวอย่างของแผนภูมิดัชนี Ap มีดังนี้ภาพที่ 2.2

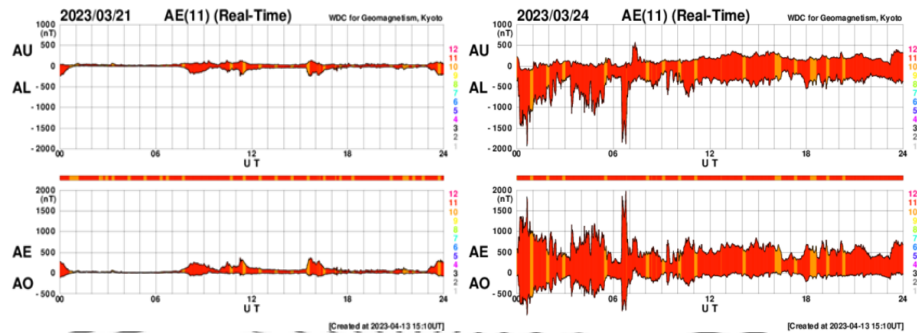


ภาพที่ 2.2 กราฟดัชนี Ap
ที่มา : NOAA (2024, Online)

2.1.1.3 ดัชนี AE

Auroral Electrojet (AE) index เป็นข้อมูลความละเอียดสูงรายชั่วโมง ถูกออกแบบมาเพื่อให้ทั่วโลก การวัดเชิงปริมาณของกิจกรรมแม่เหล็กโซนออโรราที่ผลิตโดยกระแสไอโอโนสเฟียร์ที่เพิ่มขึ้นไหลด้านล่างและภายในวงรีออโรรา. ตามหลักการแล้วมันคือช่วงรวมของความเบี่ยงเบนในทันทีจากค่าวันที่เทียบสงบของสนามแม่เหล็กแนวนอน (H) รอบวงรีออโรรา กำหนดและพัฒนาโดย Davis และ Sugiura (1966, pp.785-801) AE ถูกนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพและเชิงปริมาณเป็นดัชนีสหสัมพันธ์ในการศึกษาสัมพันธ์ของพายุย่อยพฤติกรรมของดาวเทียมสื่อสาร การแพร่กระจายของวิทยุ Scintillation วิทยุและการเชื่อมต่อระหว่างสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และแมกนีโตสเฟียร์ของโลก สำหรับการใช้งานที่หลากหลายเหล่านี้ AE มีข้อได้เปรียบเหนือดัชนีสนามแม่เหล็กโลกอื่น ๆ หรืออย่างน้อยก็แบ่งปันคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ ดังนี้ สามารถได้มาทันทีหรือจากค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงที่คำนวณในช่วงเวลาที่เลือก เป็นดัชนีเชิงปริมาณซึ่งโดยทั่วไปเกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการที่สร้างความแปรปรวนของแม่เหล็กที่สังเกตได้ วิธีการไดมานั้นค่อนข้างง่ายดิจิทัลและมีวัตถุประสงค์และเหมาะสมสำหรับการนำเสนอเทคนิคการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ และอาจใช้เพื่อศึกษาเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งของผลรวมทางสถิติ

ข้อมูลรายวันจาก World Data Center (WDC) สำหรับ Geomagnetism คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น แสดงในภาพที่ 2.3



(ก) วันปกติ

(ข) วันค่าสูง

ภาพที่ 2.3 แผนภูมิเปรียบเทียบวันค่าสูงและวันปกติของดัชนี AE
ที่มา : WDC for Geomagnetism (2024, Online)

2.1.1.4 ดัชนี Dst

ดัชนี Dst เป็นดัชนีของแม่เหล็กที่ได้มาจากเครือข่ายของหอดูดาวสนามแม่เหล็กโลกใกล้เส้นศูนย์สูตรที่วัดความเข้มของอิเล็คโทรเจ็ทเส้นศูนย์สูตรสมมาตรทั่วโลก (กระแสแหวน) ดัชนีการรบกวนแม่เหล็กเส้นศูนย์สูตรเทียบเท่า Dst ได้มาจากการปรับขนาดรายชั่วโมงของความผันแปรของแม่เหล็กแนวอนละติจูดต่ำ พวกเขาแสดงผลกระทบของกระแสแหวนเส้นศูนย์สูตรระดับความสูงที่ไหลไปทางทิศตะวันตกที่สมมาตรทั่วโลกซึ่งทำให้เกิดภาวะซึมเศร้า "เฟสหลัก" ทั่วโลกในสนาม H-component ในช่วงพายุแม่เหล็กขนาดใหญ่ แผ่นดินเกิดครั้งนี้มีดัชนีรายชั่วโมงสำหรับช่วงวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2500 ถึงกันยายน 30 มกราคม พ.ศ. 2535 ซึ่งได้มาจาก Sugiura และ Kamei (WDC for Geomagnetism, 2024, Online) สำหรับ Geomagnetism คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ประเทศญี่ปุ่น

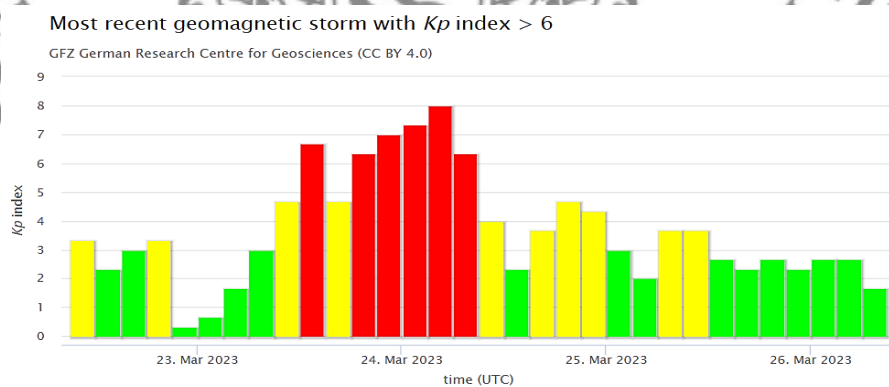
มีการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแม่เหล็กรายชั่วโมงเพื่อลบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทางโลกประจำปีออกจากบันทึกของหอดูดาวละติจูดต่ำทั่วโลก ปัจจัยโคไซน์ของละติจูดของไซต์จะเปลี่ยนความแปรปรวนที่เหลือให้เทียบเท่ากับเส้นศูนย์สูตรและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะแยกค่าที่ใช้เป็นดัชนี Dst ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟดัชนี Dst รายเดือน
ที่มา : WDC for Geomagnetism (2024, Online)

2.1.1.5 ดัชนี Kp

การผันแปรของสนามแม่เหล็กในทุกวันเกิดขึ้นจากระบบปัจจุบันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรังสีของดวงอาทิตย์ ระบบกระแสที่ผิดปกติอื่น ๆ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการปฏิสัมพันธ์ของลมสุริยะกับแมกนีโตสเฟียร์ โดยการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์ ดัชนีกิจกรรมแม่เหล็กได้รับการออกแบบมาเพื่ออธิบายความผันแปรของสนามแม่เหล็กโลกที่เกิดจากระบบกระแสที่ผิดปกติเหล่านี้ ดัชนี Kp เป็นดัชนีที่อิงถึงลอการิทึมของช่วง 3 ชั่วโมงในกิจกรรมแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับเส้นโค้งวันที่เจียบสงบสำหรับไซต์หอดูดาวแม่เหล็กเดียว เปิดตัวครั้งแรกโดย Bartels ในปี พ.ศ. 2481 (WDC for Geomagnetism, 2023, Online) ประกอบด้วยตัวเลข 0-9 หลักสำหรับแต่ละช่วงเวลา 3 ชั่วโมงของวันเวลาสากล (UTC) ตัวอย่างของเส้นโค้งดัชนี Kp คือภาพที่ 2.5 ดังนี้



ภาพที่ 2.5 แผนภูมิดัชนี Kp
ที่มา : WDC for Geomagnetism (2024, Online)

2.2 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก (Magnetometer)

ความแรงของสนามแม่เหล็กโลกวัดโดยใช้เทคโนโลยีที่หลากหลาย แต่ละเทคนิคมีคุณสมบัติเฉพาะที่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะ สิ่งนี้มีตั้งแต่การตรวจจับการมีอยู่หรือการเปลี่ยนแปลงในสนามไปจนถึงการวัดคุณสมบัติสเกลาร์และเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กอย่างแม่นยำ เครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กโดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความแรงแม่เหล็กและการวางแนว ตัวอย่างยอดนิยมของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก คือ เข็มทิศซึ่งใช้ในการวัดทิศทางของสนามแม่เหล็กโดยรอบ (เช่น ในกรณีนี้คือสนามแม่เหล็กโลก) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กอื่น ๆ วัดช่วงเวลาไดโพลแม่เหล็ก ไดโพลแม่เหล็กคือขั้ว จำกัด ของกระแสไฟฟ้าแบบวงปิดหรือขั้วคู่ เนื่องจากขนาดของแหล่งกำเนิดจะลดลงเป็นศูนย์ในขณะที่รักษาช่วงเวลาแม่เหล็ก-ความแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กและการวางแนวคงที่ Ferromagnetic ใช้เพื่อบันทึกผลกระทบของไดโพลแม่เหล็กนี้ต่อกระแสเหนี่ยวนำในขดลวด

2.2.1 ประเภทของแมกนีโตมิเตอร์

แมกนีโตมิเตอร์ส่วนใหญ่จัดอยู่ในสองประเภท สเกลาร์และมาโนมิเตอร์เวกเตอร์ มาโนมิเตอร์สเกลาร์ใช้เพื่อวัดค่าสเกลาร์ของความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กอย่างแม่นยำ เครื่องวัดสนามแม่เหล็กสเกลาร์เหล่านี้สามารถแยกความแตกต่างเพิ่มเติมได้เช่นโปรตอนก่อนหน้าผลยกเครื่องและเครื่องวัดสนามแม่เหล็กก๊าซไอออนซ์ ในทางกลับกันมาโนมิเตอร์เวกเตอร์ใช้เพื่อวัดขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็ก สิ่งเหล่านี้สามารถจัดเรียงเป็นประเภทต่าง ๆ เช่นขดลวดหมุน, Hall Effect, magneto resistive, fluxgate, search coil, SQUID และ SERF magnetometers

2.2.1.1 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กสเกลาร์

(1) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กโปรตอน เครื่องวัดสนามแม่เหล็กนี้วัดความถี่เรโซแนนซ์ของโปรตอนในสนามแม่เหล็กโดยใช้เรโซแนนซ์แม่เหล็กนิวเคลียร์ (NMR) เมื่อกระแสดีซีโพลารไรซ์ถูกส่งผ่านโซลินอยด์มันจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กสูงรอบ ๆ เชื้อเพลิงที่อุดมด้วยไฮโดรเจนเช่นน้ำมันก๊าดและโปรตอนบางตัวจะสอดคล้องกับฟลักซ์นี้ เมื่อปล่อยฟลักซ์โพลารไรซ์ความถี่ของพีเรียดของโปรตอนไปยังตำแหน่งปกติจะถูกใช้เพื่อวัดสนามแม่เหล็ก

(2) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กเอฟเฟกต์ Overhauser ใช้สัญญาณความถี่วิทยุพลังงานต่ำแทนโซลินอยด์เพื่อจัดตำแหน่งโปรตอน ดังนั้นเมื่อของเหลวที่อุดมด้วยอิเล็กตรอนรวมกับไฮโดรเจนมันจะถูกส่งสัญญาณความถี่วิทยุ (RF) ด้วยเอฟเฟกต์ที่ยกเครื่องโปรตอนจะเชื่อมต่อกับนิวเคลียสของของเหลว เมื่อพิจารณาถึงความถี่ก่อนหน้าเป็นเส้นตรงกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจึงสามารถใช้วัดความแรงของสนามแม่เหล็กได้ ยิ่งไปกว่านั้นด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่างที่เร็วขึ้นเครื่องวัดสนามแม่เหล็กเหล่านี้ต้องการพลังงานน้อยกว่ามาก

(3) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กก๊าซไอออนซ์ แม่นยำกว่าเครื่องวัดสนามแม่เหล็กของโปรตอนเครื่องวัดสนามแม่เหล็กก๊าซไอออนซ์ประกอบด้วยห้องโอระเหยที่เต็มไปด้วยโอระเหยเช่นซีเซียมฮีเลียมและรูบิเดียมและแสงตัวปล่อยโพตอน เมื่ออะตอมซีเซียมตรงกับโพตอนของหลอดไฟระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะผันผวนที่ความถี่ที่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กภายนอก จึงช่วยวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

2.2.1.2 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบเวกเตอร์

(1) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กฟลักซ์เกต ใช้สำหรับการใช้งานความไวสูงโทรศัพท์ เซ็นเซอร์ฟลักซ์เกตประกอบด้วยแผ่นแกนที่ไวต่อแม่เหล็กโดยขดลวดสองม้วนมีกระแสไฟฟ้าสลับที่ใช้วัสดุหลักที่ซึมผ่านได้ ขดลวดหนึ่งตัวที่มีกระแส AC ไหลผ่านและสนามที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่สอง การเปลี่ยนแปลงปัจจุบันนี้ขึ้นอยู่กับฟลักซ์พื้นหลัง ดังนั้นสนามแม่เหล็กสลับและกระแสเอาต์พุตเหนี่ยวนำจึงไม่สอดคล้องกับกระแสอินพุตและขอบเขตจะแตกต่างกันไปตามความแรงของสนามแม่เหล็กพื้นหลัง

(2) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบต้านทาน Magneto ประกอบด้วยอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ที่ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กที่ใช้หรือโดยรอบ

(3) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กปลาหมึก ประกอบด้วยตัวนำยวดยิ่งสองตัวคั่นด้วยชั้นฉนวนบาง ๆ เพื่อสร้างทางแยกคู่ขนานสองจุด เมื่อพิจารณาถึงความไวต่อสนามความเข้มช่วงต่ำพวกเขามักจะใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กที่ผลิตโดยสมองหรือหัวใจในการใช้งานทางการแพทย์

(4) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบค้นหาขดลวด ตามหลักการของกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์เครื่องวัดสนามแม่เหล็กเหล่านี้ประกอบด้วยขดลวดทองแดงที่พันรอบแกนแม่เหล็ก แกนกลางได้รับแม่เหล็กจากเส้นสนามแม่เหล็กที่ผลิตภายในขดลวดและความผันผวนของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า มันคือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากกระแสที่วัดและบันทึกโดยแมกนีโตมิเตอร์

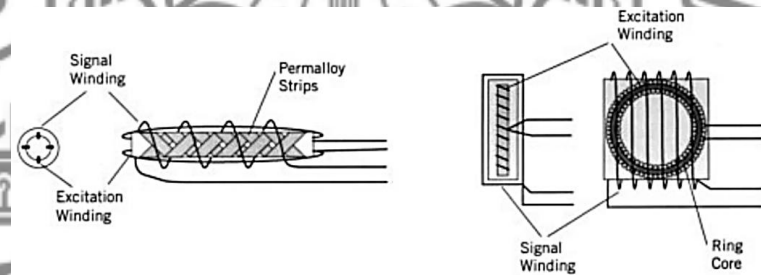
(5) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กขดลวดหมุน เมื่อขดลวดหมุนสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำสัญญาณคลื่นไซน์ในขดลวด เนื่องจากแอมพลิจูดของสัญญาณนี้เป็นสัดส่วนกับความแรงของสนามแม่เหล็กแมกนีโตมิเตอร์จึงสามารถวัดค่าหลังได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ล้าสมัยในปัจจุบัน

2.2.2 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบฟลักซ์เกต

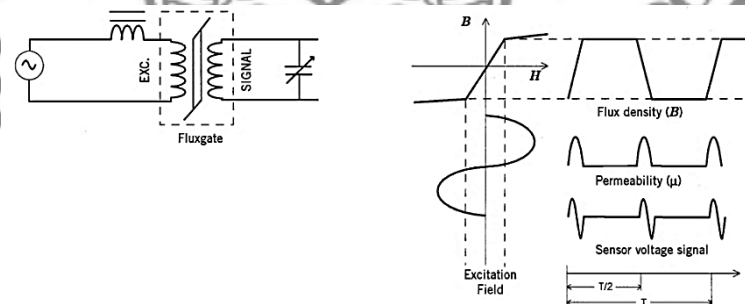
กล่าวถึงเครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบฟลักซ์เกต Flux Gate Magnetometer (FGM) ที่ใช้ในการวิจัยนี้ เครื่องวัดสนามแม่เหล็กฟลักซ์เกตเป็นและเป็นเครื่องมือวัดความแรงของสนามแม่เหล็กทั้งบนโลกและในอวกาศ มีความทนทานเชื่อถือได้มีขนาดเล็กทางกายภาพและต้องการพลังงานน้อยมากในการทำงาน คุณสมบัติเหล่านี้พร้อมกับความสามารถในการวัดส่วนประกอบเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กในช่วง 0.1 nT ถึง 1 mT จาก dc ถึงหลาย kHz ทำให้เป็นเครื่องมือที่หลากหลายมาก

นักธรณีวิทยาใช้สำหรับการสำรวจและนักธรณีฟิสิกส์ใช้เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กโลก (ประมาณ 20 μT ถึง 75 μT บนพื้นผิวโลก) วิศวกรดาวเทียมใช้เพื่อกำหนดและควบคุมทัศนคติของยานอวกาศ นักวิทยาศาสตร์ใช้ในการวิจัยของพวกเขาและกองทัพใช้พวกเขาในการทำงานหลายอย่างรวมถึงการตรวจจับทุ่นระเบิดการตรวจจับยานพาหนะและการจดจำเป้าหมาย ระบบรักษาความปลอดภัยของสนามบินบางแห่งใช้เพื่อตรวจจับอาวุธ

หัวใจของแมกนีโตมิเตอร์คือฟลักซ์เกต เป็นตัวแปลงสัญญาณที่แปลงสนามแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้า มีการกำหนดค่าฟลักซ์เกตที่แตกต่างกันมากมาย สองรายการที่ได้รับความนิยมมากแสดงในภาพที่ 2.6 คำอธิบายเกี่ยวกับหลักการของฟลักซ์เกตและการกำหนดค่าฟลักซ์เกตที่แตกต่างกันแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.6 เซ็นเซอร์ฟลักซ์เกตแบบ Schonsted และแกนวงแหวน
ที่มา : Macintyre (1999, Online)



ภาพที่ 2.7 สนามกระตุ้นของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กฟลักซ์เกตสลับกันขับเคลื่อนแกน
ให้มีความอิ่มตัวเป็นบวกหรือลบ

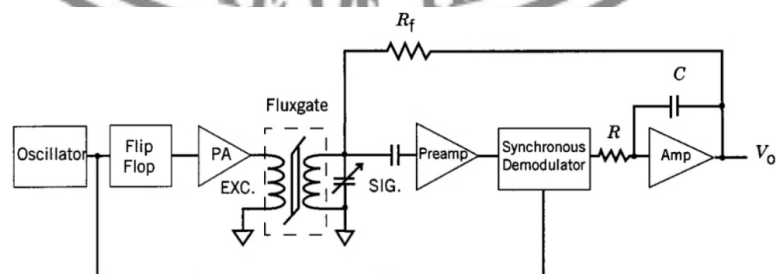
ที่มา : Macintyre (1999, Online)

ดังแสดงในภาพที่ 2.7 กระแสสลับถูกนำไปใช้ผ่านขดลวดที่เป็นผลเกี่ยวกับโทรอยด์ สิ่งนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กที่ไหลเวียนรอบแกนแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กนี้ทำให้ฟลักซ์ในวัสดุเหล็กอิ่มตัวเป็นระยะก่อนตามเข็มนาฬิกาแล้วทวนเข็มนาฬิกา ไชลานรทกระบะ (สัญญาณ) ถูกพันรอบด้านนอกของโทรอยด์ ในขณะที่วัสดุเหล็กอยู่ระหว่างความอิ่มตัวสุดขีด แต่ก็รักษาความสามารถในการซึมผ่านเฉลี่ยได้มากกว่าอากาศ เมื่อแกนกลางอยู่ในความอิ่มตัวการซึมผ่านของแกนกลางจะเท่ากับอากาศ หากไม่มีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กตามแกนของขดลวดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ที่เห็นโดยขดลวดจะเป็นศูนย์ ในทางกลับกันหากมีส่วนประกอบสนามอยู่ตามแกนที่คิดเคี้ยวสัญญาณทุกครั้งวัสดุเหล็กเปลี่ยนจากความอิ่มตัวหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่งฟลักซ์ภายในแกนจะเปลี่ยนจากระดับต่ำเป็นระดับสูง ตามกฎของฟาราเดย์ฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงจะผลิตแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ สำหรับสนามแม่เหล็ก dc และความถี่ต่ำแรงดันไฟฟ้าที่คิดเคี้ยวของสัญญาณ คือ

$$e(t) = nA \frac{d(\mu_0 \mu_c H)}{dt} = nA \mu_0 H \frac{d\mu_c(t)}{dt} \quad (2.1)$$

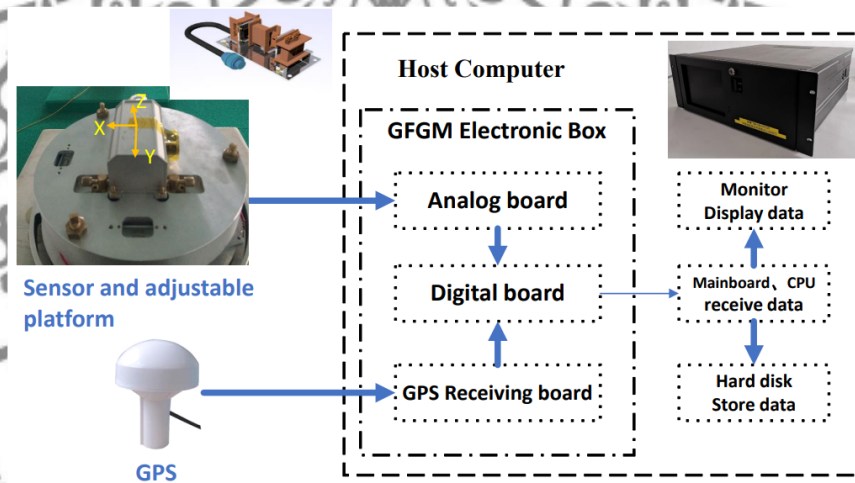
- โดยที่ H คือ ส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กที่กำลังวัด
- n คือ จำนวนรอบบนขดลวดสัญญาณ
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดสัญญาณ
- $\mu_c(t)$ คือ การซึมผ่านสัมพัทธ์ที่มีประสิทธิภาพของแกนกลาง

ในภาพที่ 2.8 เอาต์พุตเซ็นเซอร์จะถูกขยาย AC, demodulated แบบซิงโครนัสและกรองสนามแม่เหล็กที่ทำให้สนามโดยรอบที่เซ็นเซอร์เป็นโมฆะนั้นผลิตขึ้นโดยการเชื่อมต่อ RF ตัวต้านทานระหว่างเอาต์พุตและขดลวดสัญญาณ



ภาพที่ 2.8 การกำหนดค่าวงจรทั่วไปสำหรับเครื่องวัดสนามฟลักซ์เกตแมกนีโตมิเตอร์
ที่มา : Macintyre (1999, Online)

เมื่อการซึมผ่านของแกนกลางสลับจากค่าต่ำเป็นค่าสูง ซึ่งจะสร้างพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตที่คิดเคี้ยวสัญญาณที่มีแอมพลิจูดตามสัดส่วนของขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกและเฟสที่ระบุทิศทางของสนาม ความถี่ของสัญญาณเป็นสองเท่าของความถี่การกระตุ้นเนื่องจากการเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่เกิดขึ้นสองครั้งในแต่ละช่วงเวลาการกระตุ้น การอธิบายเกี่ยวกับการซึมผ่านที่มีประสิทธิภาพในส่วนขดลวดเหนี่ยวนำใช้ที่นี้เช่นกัน ปรึกษาสำหรับการอธิบายที่ครอบคลุมเกี่ยวกับการซึมผ่านที่มีประสิทธิภาพของ Fluxgate และลักษณะสัญญาณเนื่องจากเกี่ยวข้องกับระดับสนามกระตุ้นรูปคลื่นกระตุ้นและเรขาคณิตที่คิดเคี้ยว ดังภาพที่ 2.9 FGM ประกอบด้วยโฮสต์คอมพิวเตอร์ (IPC) เซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็กฟลักซ์เกต เซ็นเซอร์ GPS แทนติดตั้งแบบปรับได้ และสายเคเบิลเซ็นเซอร์



ภาพที่ 2.9 แผนภาพบล็อกของ FGM

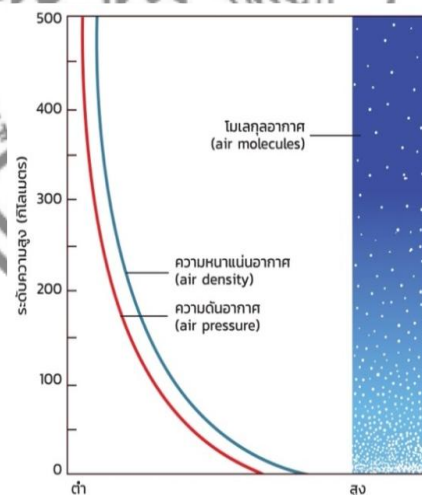
2.3 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศของโลกมีความสำคัญต่อชีวิตบนโลกเป็นอย่างมาก ซึ่งช่วยให้สิ่งมีชีวิตหายใจและอยู่รอดได้ ไอโอโนสเฟียร์จึงเป็นหนึ่งชั้นบรรยากาศที่แตกต่างกันไปตามเวลาและฤดูกาล มีหน้าที่กรองรังสีและอนุภาคต่าง ๆ จากดวงอาทิตย์และวัตถุนอกโลกอื่น ๆ เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือ อุกกาบาต นอกจากนี้ยังช่วยปรับอุณหภูมิบนโลก ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันอนุภาคอันตรายเหล่านี้ นอกจากนี้ไอโอโนสเฟียร์ยังมีบทบาทสำคัญในการสื่อสารทางโทรคมนาคม โดยรายละเอียดของชั้นบรรยากาศที่หลากหลายมีดังนี้

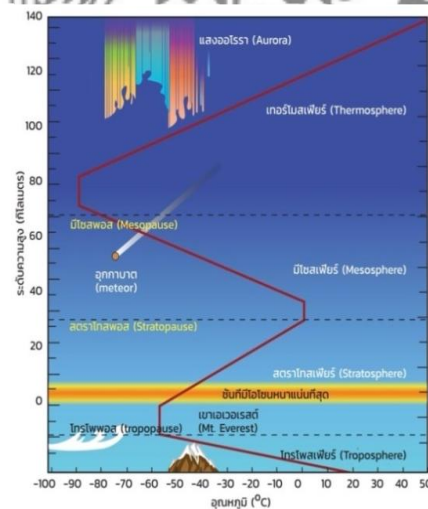
2.3.1 บรรยากาศ

ชั้นบรรยากาศคือก๊าซที่ล้อมรอบโลกในชั้นประมาณ 1,000 กม. เหนือพื้นผิวถึงระดับความลึกประมาณ 800 กม. องค์ประกอบของชั้นนี้มีทั้งที่มองเห็นได้และมองไม่เห็นด้วยสายตาของมนุษย์ อนุภาคมีขนาดเล็กมากจนมองไม่เห็น อย่างไรก็ตามเราสามารถเห็นแสงผ่านมัน และสิ่งนี้ทำให้ท้องฟ้าเป็นสีฟ้า และพระอาทิตย์สีส้ม ซึ่งประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของอากาศอยู่ห่างจากพื้นผิวโลกประมาณ 5 กม. อีก 25 เปอร์เซ็นต์สูงกว่า 5 กม. และชั้นบรรยากาศจะบางลงอีกครั้งหนึ่งทุก ๆ 5 กม. ชั้นบรรยากาศทั้งหมดรอบโลกจะอยู่ที่ประมาณหนึ่งในล้านของน้ำหนักของตัวเอง บรรยากาศของโลกสามารถจำแนกได้ตามลักษณะที่แตกต่างกันโดยใช้เกณฑ์ที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิ องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติของก๊าซในชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้ยังมีวิธีการจำแนกบรรยากาศที่ต่างกันอย่างเช่นตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าและไม่ว่าจะเป็นก๊าซหรือของเหลวเป็นหลัก การแบ่งชั้นอุณหภูมิที่มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลสามารถแบ่งออกเป็น 5 ชั้นโดยมีรายละเอียดดังนี้ โทรโพสเฟียร์ สตราโตสเฟียร์ เมโสสเฟียร์ เทอร์โมสเฟียร์และเอ็กโซสเฟียร์ มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความแตกต่างของความดันและความหนาแน่นของอากาศใช้เพื่อแบ่งบรรยากาศ แต่ละระดับความสูงในภาพที่ 2.10 แสดงถึงชั้นบรรยากาศที่ต่างกันอย่าง

การแบ่งชั้นบรรยากาศตามเกณฑ์คุณสมบัติของแก๊สในบรรยากาศ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชั้น ดังนี้ โทรโพสเฟียร์, โอโซโนสเฟียร์, ไอโอโนสเฟียร์, เอ็กโซสเฟียร์



(ก) ความดันอากาศตามความสูง



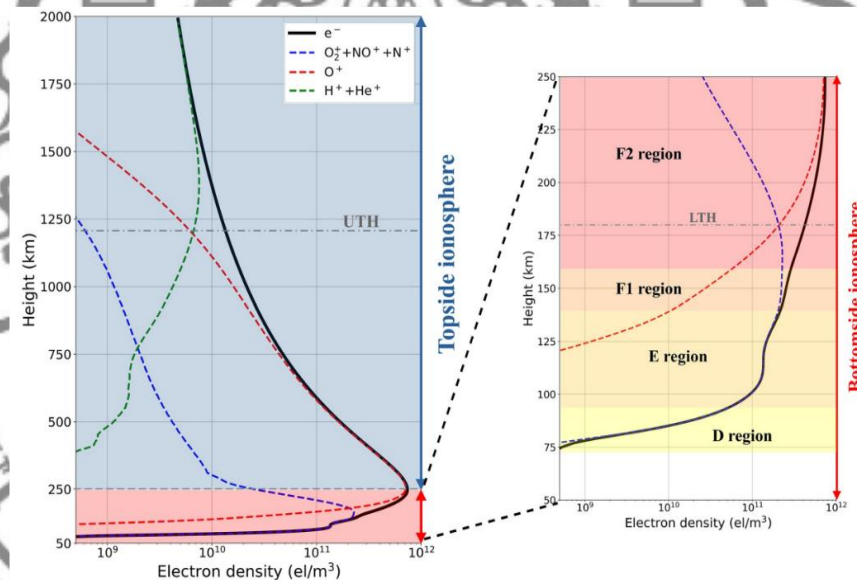
(ข) การแบ่งชั้นบรรยากาศ

ภาพที่ 2.10 ความดันอากาศและการแบ่งชั้นบรรยากาศตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ที่มา : Pailoplee (2021, pp. 10-17)

2.3.2 ลักษณะของไอโอโนสเฟียร์

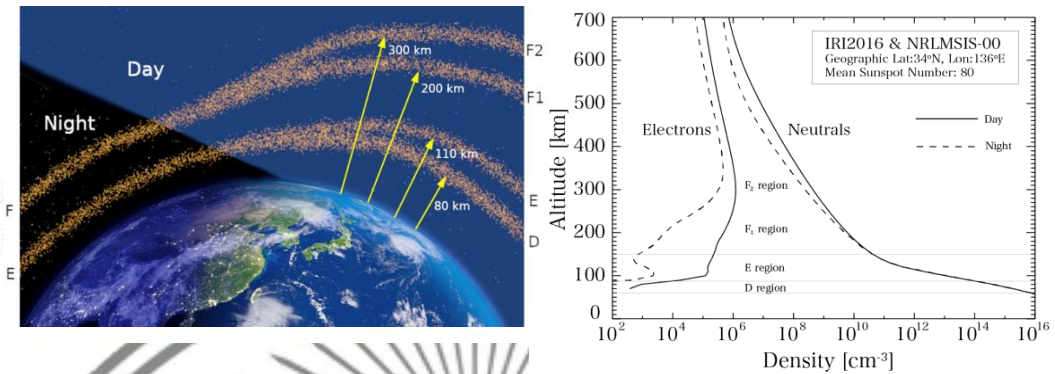
ชั้นบรรยากาศชั้นบนของโลกแตกตัวเป็นไอออนบางส่วนเนื่องจากการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์และรังสีเอกซ์และผลกระทบของอนุภาคที่มีพลังงาน บรรยากาศที่แตกตัวเป็นไอออนเรียกว่าไอโอโนสเฟียร์ ไอโอโนสเฟียร์ขยายตัวในช่วงระดับความสูงตั้งแต่ 60-1,000 กม. ไอโอโนสเฟียร์เป็นเปลือกที่มีประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน อะตอม และโมเลกุลรอบโลก มันแตกตัวเป็นไอออนโดยรังสีดวงอาทิตย์และมีบทบาทสำคัญในไฟฟ้าไอโอโนสเฟียร์ รังสีของดวงอาทิตย์มีความรุนแรงน้อยกว่าในเวลากลางคืน ประจุไฟฟ้าเหล่านี้มีความรุนแรงน้อยกว่า นี่เป็นเพราะมีไอออนที่สร้างขึ้นในตอนกลางคืนน้อยกว่าในช่วงเวลากลางวันปกติ มันมีความสำคัญในทางปฏิบัติเพราะในหน้าที่อื่น ๆ มันมีอิทธิพลต่อการเผยแพร่วิทยุไปยังสถานที่ห่างไกลบนโลก ภาพที่ 2.11 ได้แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแนวตั้งทั่วไปจากฐานของไอโอโนสเฟียร์



ภาพที่ 2.11 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแนวตั้งทั่วไปจากฐานของไอโอโนสเฟียร์ถึงระดับความสูง 2,000 กม. (ซ้าย) และมุมมองที่ขยายของไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง (ขวา)

ที่มา : Bilitza et al. (2022, p. 4)

ไอออโนสเฟียร์ที่เพิ่มขึ้นนี้ได้รับการสำรวจและรายงานในภาพที่ 2.12 โดยแสดงให้เห็นชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันและกลางคืน จากข้อมูลของ National Institute of Information and Communications Technology (NICT)



(ก) เวลากลางวัน-กลางคืน

(ข) ความหนาแน่น

ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวัน-กลางคืน และโปรไฟล์ความหนาแน่นของไอโอโนสเฟียร์

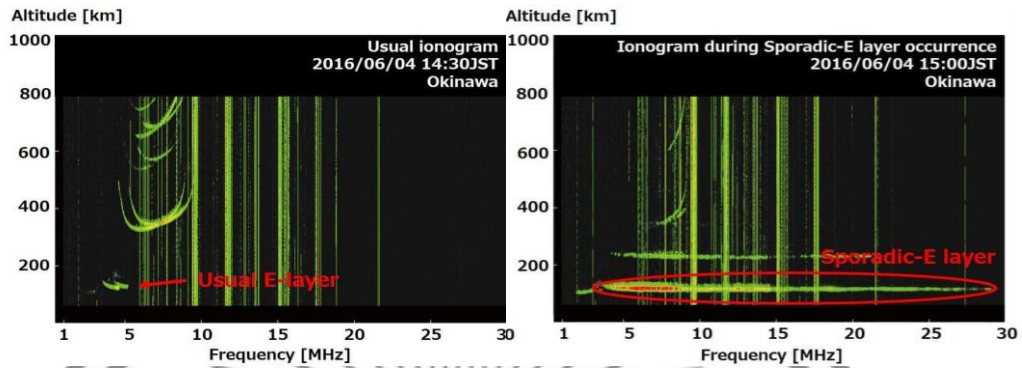
ที่มา : NICT (2024, Online)

2.3.3 การแบ่งชั้นของไอโอโนสเฟียร์

ไอโอโนสเฟียร์มี 3 ชั้นที่แตกต่างกันคือ ชั้น D ชั้น E และชั้น F ในระหว่างวันชั้น E และชั้น D จะเพิ่มขึ้นในการแตกตัวเป็นไอออนในขณะที่ชั้น F จะถูกแบ่งออกมากขึ้น เรียกว่าชั้น F1 และ F2 พวกเขาถูกทำเครื่องหมายด้วยการแตกตัวเป็นไอออนอย่างมีนัยสำคัญในขณะที่กลางวันมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเพียงชั้นเดียว โดยแต่ละชั้นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีดังนี้

ชั้น D อยู่ห่างจากพื้นผิวโลกประมาณ 48-90 กม. เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของชั้นบรรยากาศของเรา ในระหว่างวันรังสีเอกซ์จากดวงอาทิตย์จะกระตุ้นการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุลออกซิเจนและไนโตรเจนรวมถึงไนตริกออกไซด์ที่สร้างอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เมื่อตกกลางคืนอิเล็กตรอนและไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกันใหม่อย่างรวดเร็วด้วยโมเลกุลที่เป็นกลางเพื่อให้ชั้นยังคงมีอยู่ในช่วงกลางวันเท่านั้น กลไกนี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่าคลื่นวิทยุสามารถส่งข้ามทวีปได้อย่างง่ายดายในช่วงเวลากลางวัน แต่ถูกปิดกั้นในเวลากลางคืน

ชั้น E หรือภูมิภาค E ตั้งอยู่ที่ระดับความสูง 90-150 กม. เหนือพื้นผิวโลก รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ทำให้ออกซิเจนไนโตรเจนและไนตริกออกไซด์กลายเป็นไอออนในชั้นนี้ เนื่องจากระดับความสูงที่สูงขึ้นอนุภาคเหล่านี้จึงกระจายออกไปและรวมกันในอัตราที่ช้าลงในช่วงกลางคืน สิ่งนี้ทำให้ชั้น E สามารถอยู่ได้ตลอดทั้งคืนแม้ว่าจะอ่อนตัวลงเมื่อเทียบกับระดับเวลากลางวันที่ละติจูดสูง ในช่วงกลางวันปริมาณของมันสามารถลดลงได้ถึง 10,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตรเมื่อเทียบกับประมาณ 200 ในช่วงเวลากลางวัน



(ก) แบบปกติ

(ข) แบบมี ES

ภาพที่ 2.13 ไอโอโนแกรมแบบปกติ และไอโอโนแกรมแบบที่มี Es
ที่มา : NICT (2024, Online)

ชั้น Sporadic-E (Es) เป็นชั้นบาง ๆ และมีความหนาแน่นของพลาสมาสูงซึ่งปรากฏเป็นระยะ ๆ ที่ระดับความสูงประมาณ 100 กม. มันมีแนวโน้มที่จะปรากฏในตอนกลางวันและตอนเย็นในฤดูใบไม้ผลิถึงฤดูร้อนทั่วประเทศญี่ปุ่น ชั้น Es ที่รุนแรงสะท้อนคลื่นวิทยุ VHF และทำให้เกิดการรบกวนเนื่องจากการขยายพันธุ์ที่ผิดปกติ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.13 ความถี่วิกฤตจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเลเยอร์ Es ปรากฏขึ้น ลมเป็นกลางที่ระดับความสูงประมาณ 100 กม. มีบทบาทสำคัญในการสร้างชั้น Es ชั้น Es เป็นปรากฏการณ์ที่ได้รับความนิยมในหมู่ผู้ประกอบการวิทยุสมัครเล่นเนื่องจากช่วยให้สามารถแพร่กระจาย HF/VHF ทางไกลได้

ชั้น F ตั้งอยู่ที่ระดับความสูง 150-300 กม. เป็นส่วนที่บางแต่สำคัญของไอโอโนสเฟียร์ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยไอออนออกซิเจนซึ่งก่อตัวขึ้นเพื่อตอบสนองต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ ในช่วงเวลากลางวัน ชั้น F มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงถึง 100,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและสถานะไอออนิกยังคงอยู่ตลอดทั้งวันและกลางคืนแม้จะมีชั้นอื่น ๆ ในไอโอโนสเฟียร์ที่ผันผวนกับองค์ประกอบทั้งสองนี้ ลักษณะเฉพาะของเลเยอร์นี้คือแยกออกเป็นสองชั้นย่อยที่แตกต่างกัน F1 และ F2 ในช่วงกลางวันในช่วงฤดูร้อน แต่รวมกันเป็นชั้นเดียวในเวลากลางคืน

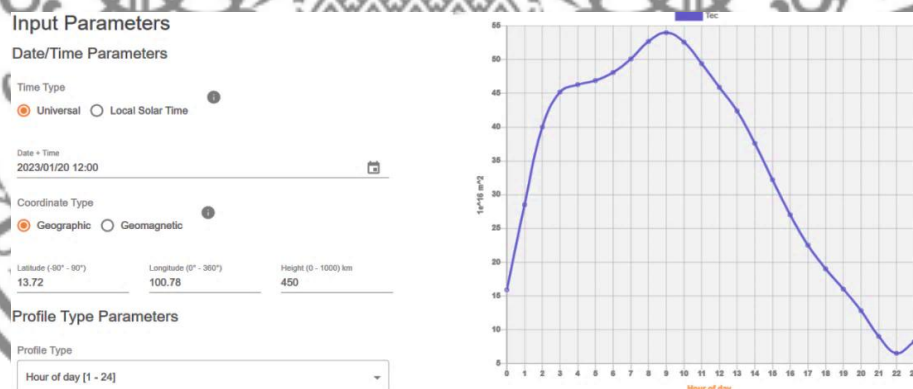
2.3.4 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

แต่ละภูมิภาคมีความแตกต่างกันทั้งทางโลกและเชิงพื้นที่เพื่อตอบสนองต่อความผันแปรของความเข้มของรังสีจากแสงอาทิตย์และในสถานะของบรรยากาศที่เป็นกลาง เช่นเดียวกับในบริเวณใกล้เคียงของญี่ปุ่นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่ขึ้นที่ละติจูดต่ำ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีความแปรปรวนชั่วคราวเป็นประจำ เช่น วัฏจักรรายวันและตามฤดูกาล และวัฏจักรประมาณ 11 ปีที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมสุริยะ นอกจากความผันแปรเป็นระยะแล้วยังมีการ

รบกวนที่ผิดปกติอีกด้วย ตัวอย่างเช่นทันทีหลังจากเกิดเปลวไฟพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ “ปรากฏการณ์ Dellinger” ซึ่งบางครั้งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในภูมิภาค D เพิ่มขึ้นอย่างผิดปกติซึ่งอาจขัดขวางการสื่อสารทางวิทยุ เมื่อแมกนีโตสเฟียร์ถูกรบกวนอาจเกิด “พายุไอโอโนสเฟียร์” ซึ่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในภูมิภาค F เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ความผันผวนในท้องถิ่นบางอย่างเช่น ชั้น E ประปราย และฟองพลาสมาเส้นศูนย์สูตร มักเกิดขึ้นในบางฤดูกาล ไอโอโนสเฟียร์มันเปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานของดวงอาทิตย์ การแตกตัวเป็นไอออนขึ้นอยู่กับแสงแดดเป็นหลัก การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญมีสาเหตุและรายละเอียดดังนี้

2.3.4.1 กลางวันและกลางคืน

เมื่อโลกหมุนกลางวันและกลางคืนจะผันผวนอย่างมาก ในช่วงเวลากลางวันความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากอัตราการรวมตัวกันใหม่ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระดับกลางคืน ที่จุดสูงสุดประมาณ 14.00 น. ของทุกป้ายเมื่อรังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นผิวโลกของเราแรงที่สุดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะถึงขีดสุดก่อนที่จะลดลงหลังจากพระอาทิตย์ตกดิน ดังแสดงในภาพที่ 2.14



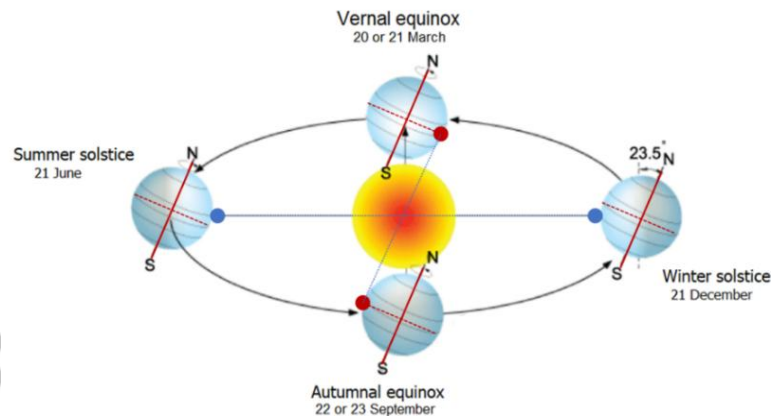
ภาพที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของ TEC ตามกลางวันกลางคืนในวันที่ 20 มกราคม

พ.ศ. 2566 ณ สถานี SIET KMITL

ที่มา : IRI (2024, Online)

2.3.4.2 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเกิดจากการเคลื่อนที่ของโลกหมุนรอบตัวเองและโคจรในมุมเอียง 23.5° รอบดวงอาทิตย์ซึ่งนำไปสู่ความผันผวนของแสงและความร้อนในภูมิภาคต่าง ๆ ทำให้เกิดการสลับตามฤดูกาลเป็นประจำทุกปีดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แกนโลกเอียง 23.5° และเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ทำให้เกิดฤดูกาลที่แตกต่างกัน

ที่มา : Lesa (2023, Online)

ผลกระทบตามฤดูกาลแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน (Kenpankho, 2014, p. 15) โดยมีรายละเอียดดังนี้

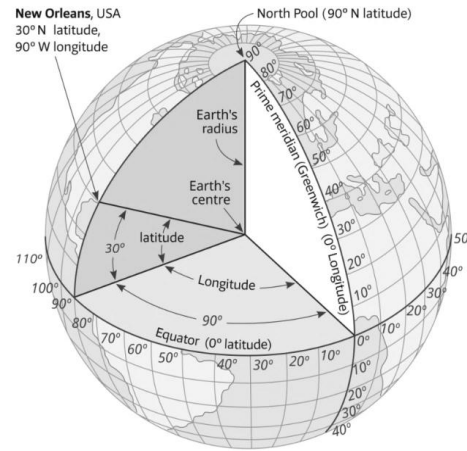
(1) ปีละสองครั้งดวงอาทิตย์เรียงตัวอย่างสมบูรณ์แบบสอดคล้องกับเส้นศูนย์สูตรของโลกและสร้างปรากฏการณ์ที่น่าตื่นเต้นสองอย่างคือ Spring Equinox (เกิดขึ้นประมาณวันที่ 20-21 มีนาคม พ.ศ. 2566) และ Fall Equinox (ประมาณวันที่ 22-23 กันยายน พ.ศ. 2566) ในช่วงเวลาของการกระจายวัน/กลางคืนที่เท่าเทียมกันในทั้งสองซีกโลกของเราเฉลิมฉลองของขวัญที่น่าทึ่งจากธรรมชาติ

(2) June Solstice หรือ Cremayan เป็นงานประจำปีเมื่อกลางวันยาวกว่ากลางคืน ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นทุกปีระหว่างเดือนพฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม และสิงหาคมโดยปกติจะอยู่ในหรือประมาณวันที่ 20 หรือ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2566

(3) ครีษมายันหรือครีษมายัน เป็นคืนที่ยาวที่สุดของปี (ระหว่างเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม มกราคมและกุมภาพันธ์) เกิดขึ้นระหว่างวันที่ 20-21 ธันวาคมของทุกปี

2.3.4.3 การเปลี่ยนแปลงละติจูด

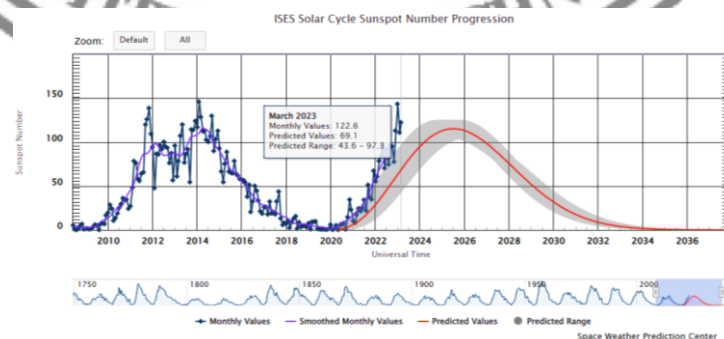
ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่สัมพันธ์กับชั้นบรรยากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการแปรผันของละติจูด ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แตกต่างกันไปตามมุมสุยอด (หมายถึงมุมจากจุดแนวตั้งที่สังเกตได้ไปยังดวงอาทิตย์) การเปลี่ยนแปลงของละติจูดแบ่งออกเป็น 4 ช่วงเวลา ได้แก่ 1. ละติจูดเส้นศูนย์สูตรประมาณ 0° 2. ละติจูดต่ำ 0° - 30° 3. ละติจูดกลาง 30° - 60° และ 4. ละติจูดสูง 60° - 90° ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของละติจูด
ที่มา : Sailingissues (2023, Online)

2.3.4.4 วัฏจักรสุริยะ

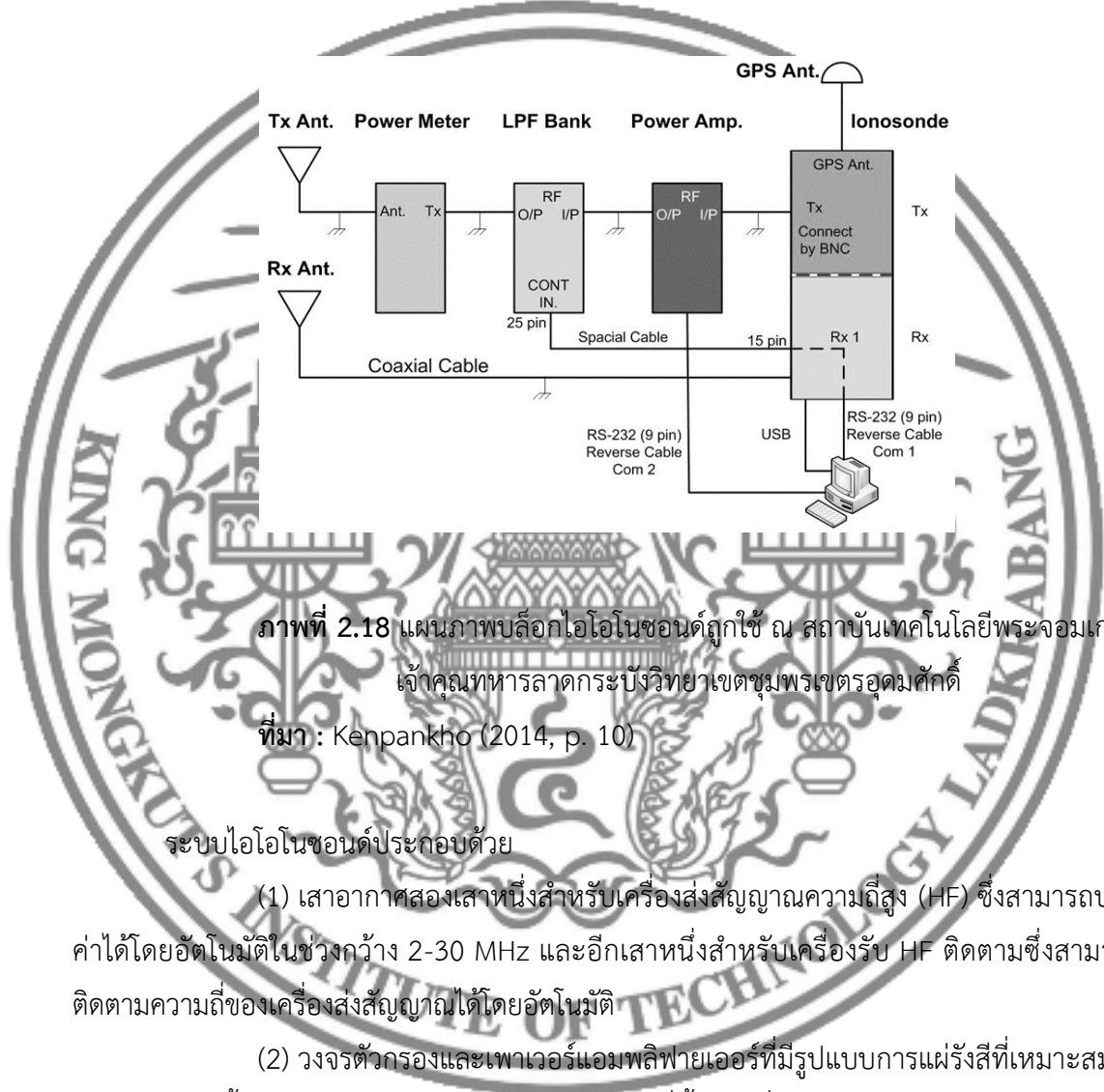
สนามแม่เหล็กสุริยะเกิดจากการหมุนของดวงอาทิตย์ โดยเส้นศูนย์สูตรใช้เวลาประมาณ 25 วันในการหมุนหนึ่งครั้งและบริเวณขั้วโลกใช้เวลา 35 วัน ความแตกต่างของอัตราการหมุนนี้ทำให้นิวแมกเนติกบิดเบี้ยวและทวีความรุนแรงขึ้นในบางพื้นที่ สนามแม่เหล็กแรงสูงจะผลักวัตถุที่ร้อนกว่าออกจากโฟโตสเฟียร์ทำให้เกิดแถบสีเข้มหรือที่เรียกว่าจุดดวงอาทิตย์ จุดดวงอาทิตย์เหล่านี้มีวัฏจักรที่ใช้เวลาประมาณ 11 ปีจึงจะเสร็จสมบูรณ์ ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรสุริยะในเดือนมีนาคม 2023 จาก Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration (SWPC NOAA) ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรสุริยะในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2566
ที่มา : SWPC NOAA (2024, Online)

2.3.5 การวัดไอโอโนสเฟียร์

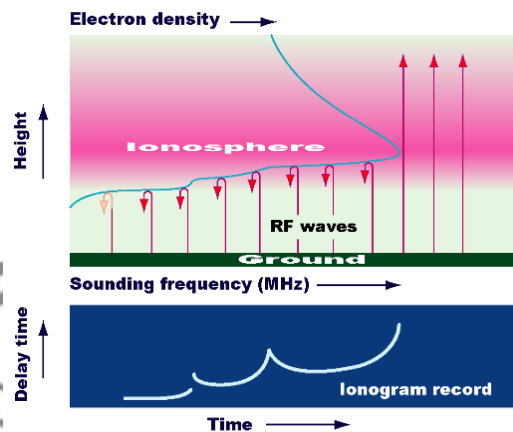
ในการวัดไอโอโนสเฟียร์ไอโอโนซอนด์เป็นเรดาร์พิเศษสำหรับการตรวจสอบไอโอโนสเฟียร์ ภาพที่ 2.18 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบไอโอโนซอนด์ที่ติดตั้ง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์



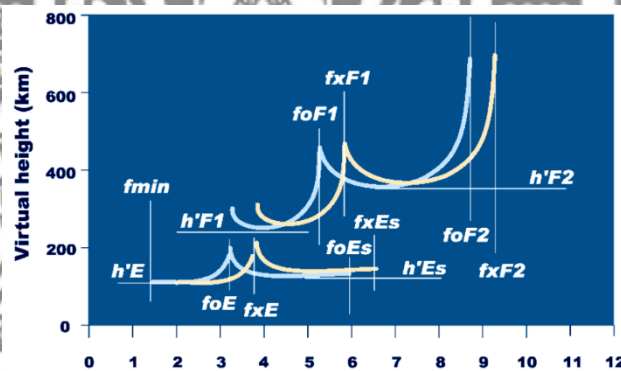
ภาพที่ 2.18 แผนภาพบล็อกไอโอโนซอนด์ที่ใช้ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ที่มา : Kenpankho (2014, p. 10)

ระบบไอโอโนซอนด์ประกอบด้วย

- (1) เสาอากาศสองเสาหนึ่งสำหรับเครื่องส่งสัญญาณความถี่สูง (HF) ซึ่งสามารถปรับค่าได้โดยอัตโนมัติในช่วงกว้าง 2-30 MHz และอีกเสาหนึ่งสำหรับเครื่องรับ HF ติดตามซึ่งสามารถติดตามความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณได้โดยอัตโนมัติ
- (2) วงจรตัวกรองและเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์ที่มีรูปแบบการแผ่รังสีที่เหมาะสมซึ่งส่งผ่านในแนวตั้งได้ดีและมีประสิทธิภาพตลอดช่วงความถี่ทั้งหมดที่ใช้
- (3) เสาอากาศ GPS ที่ใช้สำหรับสัญญาณซิงโครนัส
- (4) ชุดคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสำหรับการบันทึกข้อมูล
- (5) ส่วนประกอบเชื่อมต่อเช่นสายโคแอกเซียล, RS-232 และสายเคเบิล 25 พิน



ภาพที่ 2.19 เทคนิคการสังเกตไอโอโนสเฟียร์ (ไอโอโนซอนด์)
ที่มา : Kenpankho (2014, p. 10)



ภาพที่ 2.20 พารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์บนไอโอโนแกรม
ที่มา : Kenpankho (2014, p. 11)

ในภาพที่ 2.19 เครื่องส่งสัญญาณจะกวาดช่วงความถี่ HF ทั้งหมดหรือบางส่วนโดยส่งพัลส์สั้น ๆ พัลส์เหล่านี้สะท้อนให้เห็นที่ชั้นต่าง ๆ ของไอโอโนสเฟียร์ที่ความสูง 80-500 กม. และเสียงสะท้อนของพวกเขาจะได้รับจากเครื่องรับและวิเคราะห์โดยระบบควบคุม ผลลัพธ์จะแสดงในรูปแบบของไอโอโนแกรมกราฟความสูงสะท้อน (เวลาจริงระหว่างการส่งและรับพัลส์) เทียบกับความถี่ของผู้ให้บริการ ภาพที่ 2.20 แสดงภาพไอโอโนแกรมที่บันทึกพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ดังนี้ ความถี่ต่ำสุดสำหรับ E-layer หรือ F-layer echoes (f_{min}), E-layer เกินความถี่วิกฤต (f_{xE}), E-layer critical frequency (f_{oE}), E-layer virtual height ($h'E$), Sporadic E-layer critical frequency (f_{oEs}), Sporadic E-layer exceeding critical frequency (f_{xEs}), Sporadic-layer virtual height ($h'Es$), F-layer

critical frequency (foF1), ชั้น F1 เกินความถี่วิกฤต (fxF1), ความสูงเสมือนชั้น F1 (h'F1), ความถี่วิกฤตชั้น F2 (foF2), ชั้น F2 เกินความถี่วิกฤต (fxF2) และความสูงเสมือนชั้น F2 (h'F2)

2.3.6 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับไอโอโนสเฟียร์

2.3.6.1 ปริมาณอิเล็กตรอนรวม TEC

TEC คือปริมาณอิเล็กตรอนรวมตามเส้นทางรังสีสัญญาณระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับซึ่งสันนิษฐานว่ารวมอิเล็กตรอนรวมในคอลัมน์ที่มีหน้าตัด 1 m^2 และขยายจากเครื่องรับไปยังดาวเทียม TEC วัดเป็นหน่วย TEC ด้วย $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ eL/m}^2$ ซึ่งช่วยให้เราสามารถคำนวณค่านี้ได้ (Kenpankho, 2014, p. 11)

$$TEC = \int_0^{\infty} n(s) ds \quad (\text{TECU}) \quad (2.2)$$

โดยที่ TEC คือ ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในไอโอโนสเฟียร์ (TECU)
 n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (eL/m^3)
 s คือ ความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (km)

การใช้ค่าประมาณสำหรับดัชนีการหักเหของแสงปริมาณความล่าช้าของกลุ่ม (Δt) ที่กำหนดให้กับสัญญาณวิทยุของความถี่จะได้รับจาก

$$\Delta t = \frac{e^2}{8\pi^2 m \epsilon_0 c f^2} \int_s n ds \quad (2.3)$$

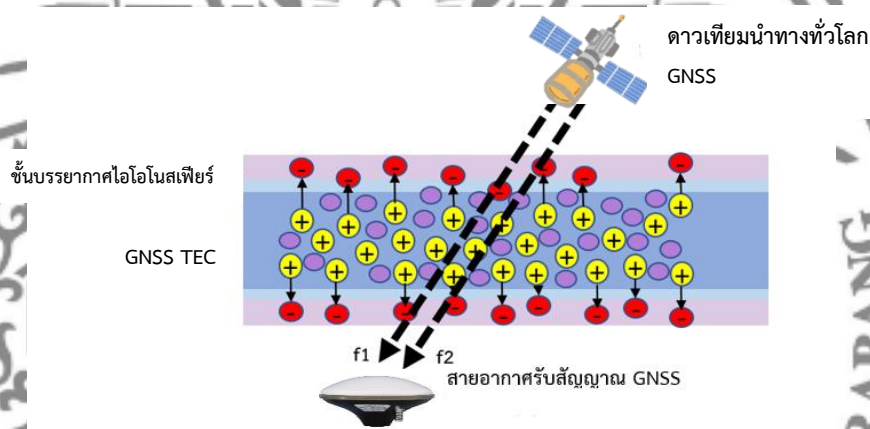
โดยที่ e คือ ประจุพื้นฐาน ($1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$)
 m คือ มวลของอิเล็กตรอนคงที่ ($1.6605 \times 10^{-31} \text{ kg}$)
 ϵ_0 คือ การอนุญาตพื้นที่ว่าง ($8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)
 c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ ($2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$)
 f คือ ความถี่ GNSS ที่ได้รับ
 n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

ได้สมการสำหรับการวิเคราะห์คือสมการที่ 2.4

$$\Delta t = \frac{A}{cf^2} TEC \quad (2.4)$$

$$A = \frac{e^2}{8\pi^2 m \epsilon_0} \quad (2.5)$$

ระดับความสูงเหนือประเทศไทยของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อยู่ที่ประมาณ 400-450 กม. (Ma & Maruyama., 2003, pp. 2084; Kenpankho et al., 2011, p. 366) แสดงดังภาพที่ 2.21 ซึ่งเป็นจุดสูงสุดที่พบความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรวม



ภาพที่ 2.21 การหักเหของสัญญาณดาวเทียม GNSS เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่มีปริมาณอิเล็กตรอนสูง และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กตรอนตลอดเวลา

ที่มา : Kenpankho (2011, p. 13-14)

2.3.6.2 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในภูมิภาค F2 (NmF2)

NmF2 คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดในภูมิภาค F2 (e/m^3) ซึ่งคำนวณโดยใช้นิพจน์ (Goodwin et al., 1995 pp. 1723-1732.; Kenpankho, 2011, p. 12)

$$NmF2 = 1.24 \times 10^{16} (foF2)^2 \quad (e/m^3) \quad (2.6)$$

โดยที่	NmF2	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูงที่สุดในชั้น F2
	foF2	คือ	ความถี่วิกฤตของไอโอโนสเฟียร์ F2 ซึ่งวัดเป็น MHz

2.3.6.3 ความหนาของแผ่นไอโอโนสเฟียร์

ความหนาของแผ่นไอโอโนสเฟียร์หรือความหนาของแผ่นพื้น (τ) หมายถึง อัตราส่วนของ TEC ต่อความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของภูมิภาค F ($NmF2$) ตามสัดส่วนของกำลังสองของความถี่วิกฤตชั้น F2 ($foF2$) (Kenpankho et al., 2014 p. 12) ความหนาของแผ่นไอโอโนสเฟียร์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเนื่องจากมีข้อมูลเกี่ยวกับทั้งด้านบนและด้านล่างของไอโอโนสเฟียร์ ความหนาของแผ่นไอโอโนสเฟียร์อาจถือได้ว่าเป็นความลึกของไอโอโนสเฟียร์ในจินตนาการที่มี TEC เดียวกันกับไอโอโนสเฟียร์จริงและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สม่ำเสมอซึ่งเท่ากับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของไอโอโนสเฟียร์จริง TEC และ $NmF2$ สามารถใช้ในการคำนวณความผันแปรของความหนาของแผ่นพื้นเป็นกม. (Kenpankho, 2011, p. 12-13). ความหนาของแผ่นพื้นสามารถคำนวณได้เป็น

$$\tau = \frac{TEC}{NmF2} \quad (2.7)$$

โดยที่ TEC หน่วยเป็น TECU (10^{16} eV/m²) และ $NmF2$ อยู่ในหน่วย 1/m³

2.3.6.4 ความถี่วิกฤต

ความถี่วิกฤตเป็นความถี่สูงสุดที่คลื่นพัลส์ที่ส่งในแนวตั้งไปยังไอโอโนสเฟียร์ถูกสะท้อนเกิดขึ้นเมื่อได้รับความถี่สูงสุด เนื่องจากความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ F2 เรียกว่า $foF2$ ซึ่งมีผลต่อการสื่อสารความถี่วิทยุ เช่นการหักเหของคลื่นวิทยุการดูดซับการรบกวน GPS และความล่าช้าของสัญญาณ การสะท้อนของคลื่นพัลส์เกิดขึ้นที่เรโซแนนซ์ความถี่วิกฤตความถี่วิกฤตเป็นหน้าที่ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความถี่วิกฤตสามารถคำนวณได้ด้วยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่กำหนดโดยสมการที่ 2.8

$$fc = 9\sqrt{N_m} \quad (2.8)$$

โดยที่ fc คือ ความถี่วิกฤตมีหน่วย Hz

N_m คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรวมมีหน่วย eV/m³

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$N_m = (fc/9)^2 \quad (2.9)$$

โดยที่ N_m คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรวมมีหน่วย e/m^3
 fc คือ ความถี่วิกฤตมีหน่วย Hz

Critical Frequency เป็นฟังก์ชันของสูตร Maximum Usable Frequency (MUF) สามารถคำนวณได้โดย

$$F_c = MUF \times \sec \theta \quad (2.10)$$

โดยที่ MUF คือ ความถี่สูงสุดที่ใช้งานได้
 θ คือ มุมตกกระทบ

ความสัมพันธ์กับความถี่พลาสมาการพึ่งพาความถี่วิกฤตที่เกี่ยวกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสามารถเกี่ยวข้องผ่านแนวคิดการสั้นของพลาสมาโดยเฉพาะกลไกอิเล็กตรอน “เย็น”

$$\omega_{pe} = 9 \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \epsilon_0}} \quad (\text{rad/s}) \quad (2.11)$$

โดยที่ e คือ 1.602×10^{-19} c
 m คือ $9.109388356 \times 10^{-31}$ kg
 ϵ_0 คือ $8.854187817 \times 10^{-12}$ A² s⁴-m³ kg⁻¹

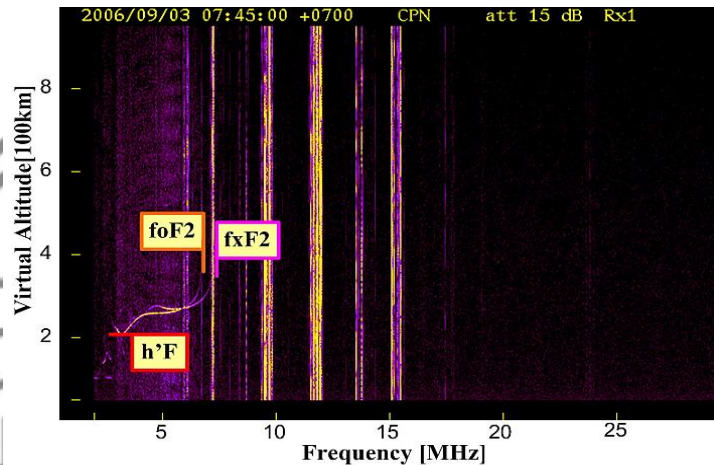
$$\omega_{pe} = 2\pi f = 56.415 \sqrt{n_e} \quad (2.12)$$

และการแก้สมการสำหรับหาความถี่

$$f_c = 8.979 \sqrt{Nm} \approx 9 \sqrt{Nm} \quad (2.13)$$

foF2 วัดจากคลื่นต่อเนื่องปรับความถี่ (FMCW) ไอโอโนซอนด์ซึ่งได้มาจากไอโอโนแกรมที่บันทึกในจังหวัด 15 นาที ความถี่วิกฤตของไอโอโนสเฟียร์สามารถวัดได้โดยเครื่องไอโอโนซอนด์โดยการส่งความถี่ FMCW และรับสัญญาณคลื่นสะท้อนแสงอย่างต่อเนื่องซึ่งถูกบันทึกเป็นไอโอโนแกรมดังภาพที่ 2.22 ไอโอโนแกรมเป็นการแสดงข้อมูลที่เกิดจากการวัดไอโอโนซอนด์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ในปี พ.ศ. 2546 วันที่บันทึกคือ 07:45 น. ของวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2549 (เวลาท้องถิ่น) แผนภาพกำหนดความถี่วิกฤตของ ชั้น F2

(foF2) เกินความถี่วิกฤต ชั้น F2 (fxF2) และความสูงเสมือน ชั้น F2 (h'F) ค่าโดยประมาณมีดังนี้ 6 MHz (foF2), 7 MHz (fxF2) และ 200 km (h'F)



ภาพที่ 2.22 ไอโอโนแกรม ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ที่มา : Kenpankho (2014, p. 12)

2.3.7 แบบจำลองไอโอโนสเฟียร์

2.3.7.1 ฟังก์ชัน Chapman

ฟังก์ชัน Chapman มักใช้เพื่ออธิบายความแปรปรวนตามฤดูกาลเวลาท้องถิ่นและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแบบ latitudinal (Kenpankho, 2014, p. 13-14)

$$N(z) = \frac{Ne(z)}{NmF2} \quad (2.14)$$

โดยที่ $Ne(z)$ คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนซึ่งใช้ที่มุมสุดยอดของดวงอาทิตย์ของ χ คือ

$$N(z, \chi) = e^{\frac{1}{2}[1-z-e^{-z \sec \chi}]} \quad (2.15)$$

$Ne(z)$ คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้น F2 และ Z คือความสูงปกติที่กำหนด

โดย

$$z = \frac{h'}{H} \quad (2.16)$$

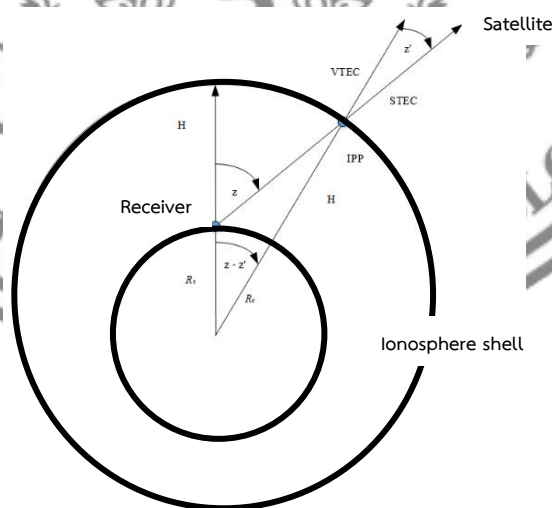
h' คือ ระยะทางเหนือจุดสูงสุดชั้น F2 และ H คือความสูงของสเกล

$$H = \frac{kT}{mg} \quad (2.17)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann
 T คือ อุณหภูมิเคลวิน
 m คือ มวลโมเลกุลของก๊าซ
 g คือ ความเร่งโน้มถ่วง

2.3.7.2 แบบจำลองรูนเปลือบบาง

ในการทำแผนที่ทางภูมิศาสตร์ของการวัด TEC แบบจำลองเปลือบบางจะใช้เป็นไอโอโนสเฟียร์ทรงกลมที่ความสูงของเปลือก (H) ฟังก์ชันการทำแผนที่ระดับความสูงอย่างง่ายถูกนำไปใช้เพื่อแปลงการวัด TEC เอียงเป็นค่า TEC แนวตั้ง การวัด TEC แนวตั้งจะถูกกำหนดให้กับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่ Ionospheric Pierce Point (IPP) แบบจำลองที่แตกต่างกันใช้ความสูงของเปลือกที่แตกต่างกันซึ่งใกล้เคียงกับความสูงความหนาแน่นสูงสุด F2 (h_mF2) ประมาณ 300-450 กม.เหนือโลก ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 การทำแผนที่ TEC ในแนวเอียงไปแนวตั้ง
 ที่มา : Kenpankho (2014, p. 15)

สันนิษฐานว่าความสูงของเปลือกไอโอโนสเฟียร์ H สอดคล้องกับความสูงความหนาแน่นสูงสุด F2 ทั่วไป ($hmF2 \sim 300-450$ กม.) VTEC ที่ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของ IPP ซึ่งแตกต่างจากตำแหน่งผู้รับ ฟังก์ชันการทำแผนที่ระดับความสูงสำหรับการแปลงการวัด TEC แบบเอียงเป็นแนวตั้งจะได้รับจาก

$$STEC = \frac{VTEC}{\cos z'} \quad (2.18)$$

$$\sin z' = \frac{R_e}{R_e + H} \sin z \quad (2.19)$$

โดยที่ z คือ มุมซีไนท์ของดาวเทียม
 R_e คือ รัศมีเส้นศูนย์สูตรโลก (6,378.134 km)
 H คือ ความสูงของเปลือกไอโอโนสเฟียร์

2.4 ดาวเทียม GNSS

GNSS เกี่ยวข้องกับกลุ่มดาวเทียมที่โคจรรอบโลกส่งสัญญาณอย่างต่อเนื่องซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถกำหนดตำแหน่งสามมิติ (3D) ของพวกเขาด้วยการครอบคลุมทั่วโลก เป็นเวลาหลายปีที่ระบบ GNSS ที่ใช้งานได้อย่างสมบูรณ์เพียงระบบเดียวคือ US Global Positioning System (GPS) กาลิเลโอเป็นระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกของยุโรป ระบบดาวเทียม Global Navigation ของรัสเซีย (GLONASS) ได้รับการฟื้นฟูให้ใช้งานได้เต็มรูปแบบในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2544 ระบบ BeiDou ของจีนและกาลิเลโอยุโรปกำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา แม้ว่า BeiDou จะเริ่มให้บริการปฏิบัติการเบื้องต้น (ระยะที่ 3) ในปลายเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ระบบดาวเทียมนำทางระดับภูมิภาคของอินเดีย (IRNSS) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการองค์การวิจัยอวกาศอินเดีย (ISRO) ได้เปิดศูนย์นำทางด้วยดาวเทียมแห่งใหม่ภายในวิทยาเขตของ ISRO Deep Space Network (DSN) ที่ Byalalu ในรัฐกรณาฏกะ เมื่อวันที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เครือข่ายสถานี 21 แห่งทั่วประเทศจะให้ข้อมูลสำหรับการกำหนดดวงโคจรของดาวเทียมและการตรวจสอบสัญญาณนำทาง ระบบดาวเทียม Quasi-Zenith (QZSS) หรือที่เรียกว่า Michibiki ดาวเทียมดวงแรก Michibiki เปิดตัวเมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2553 คาดว่าจะมีสถานะการดำเนินงานเต็มรูปแบบภายในปี พ.ศ. 2556 ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2556 สำนักงานคณะรัฐมนตรีของญี่ปุ่นได้ประกาศขยาย QZSS จากดาวเทียมสามดวงเป็นสี่ดวง การก่อสร้างดาวเทียมสามดวงมีกำหนดเปิดตัวก่อนสิ้นปี พ.ศ. 2560 ดาวเทียมดวงที่สามถูกปล่อยขึ้นสู่วงโคจรเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ. 2560 และดวงที่สี่เปิดตัวเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ระบบดาวเทียมสี่ดวงพื้นฐานได้รับการประกาศให้ใช้งานได้เมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

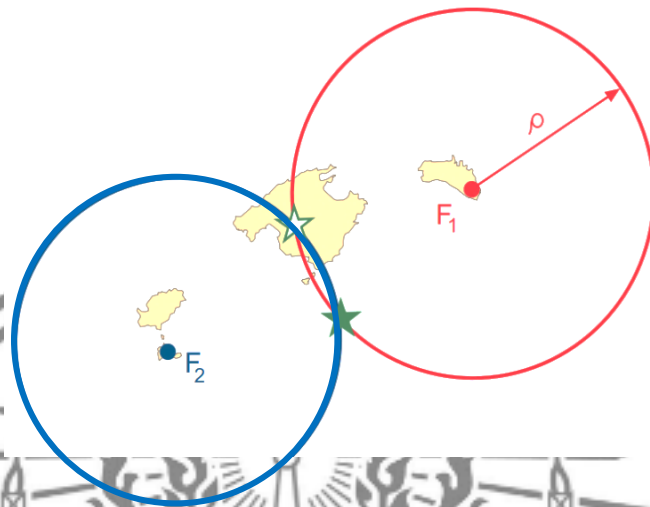
หลักการกำหนดตำแหน่งขึ้นอยู่กับ การแก้ปัญหาทางเรขาคณิตของธาตุซึ่งเกี่ยวข้องกับ ระยะทาง (ช่วง) ของผู้ใช้ไปยังชุดดาวเทียม GNSS อย่างน้อยสี่ดวงที่มีพิกัดที่รู้จัก ช่วงและพิกัด ดาวเทียมเหล่านี้ถูกกำหนดโดยเครื่องรับของผู้ใช้โดยใช้สัญญาณและข้อมูลการนำทางที่ส่งโดย ดาวเทียม พิกัดผู้ใช้ที่ได้สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำหลายเมตร อย่างไรก็ตามการวางตำแหน่ง ระดับเซนติเมตรสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคขั้นสูง

2.4.1 แนวทางการวางตำแหน่ง GNSS

พื้นฐานที่สังเกตได้ใน GNSS คือ เวลาที่ต้องใช้สำหรับสัญญาณที่จะเดินทางจากดาวเทียม (เครื่องส่งสัญญาณ) ไปยังเครื่องรับ เวลาเดินทางนี้คูณด้วยความเร็วแสงให้การวัดระยะทางที่ชัดเจน (Pseudorange) ระหว่างพวกเขา ตัวอย่างต่อไปนี้จะได้รับแรงบันดาลใจจาก Kaplan) สรุปสำหรับ กรณีสองมิติ (2D) แนวคิดพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวางตำแหน่ง GNSS สมมติว่าประชากรปล่อย สัญญาณอะคูสติกในช่วงเวลาปกติ 10 นาทีและรุนแรงพอที่จะได้ยินห่างออกไปหลายกม.

สมมติว่าเรือที่มีนาฬิกาเชิงโครโนซออย่างสมบูรณ์แบบกับเรือในประชากรกำลังรับสัญญาณ เหล่านี้ในเวลาที่ไม่ใช่พหุคูณที่แน่นอนของ 10 นาทีเช่น 20 วินาทีต่อมา ($t = n \times 10m + 20s$) 20 วินาทีจะสอดคล้องกับเวลาการแพร่กระจายของเสียงจากประชากร (เครื่องส่งสัญญาณ) ไปยังเรือ (เครื่องรับ) ระยะห่าง (ระหว่างพวกเขาสามารถรับได้โดยการคูณค่านี้ด้วยความเร็วของเสียง 340 m/s) นั่นคือ $20 \text{ วินาที} \times 340 \text{ เมตร/วินาที} = 6.8 \text{ กม.}$ เห็นได้ชัดว่าด้วยประชากรเดียวกันมันเป็นไปได้ ที่จะกำหนดระยะทางเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังนั้นเรืออาจอยู่ที่จุดใดก็ได้บนวงกลมรัศมีในภาพที่ 2.26

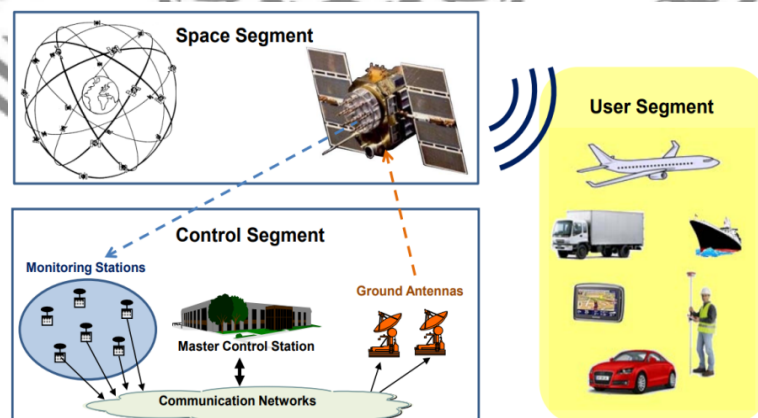
ในภาพที่ 2.24 ในการวางตำแหน่ง 2 มิติด้วยประชากรเดียวมีวงกลมของตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเรือ ด้วยประชากรสองแห่งการแก้ปัญหาที่เป็นไปได้จะลดลงเหลือสอง ในรูปหนึ่งของพวกเขา สามารถตัดออกเพราะมันตกอยู่บนเกาะ ด้วยประชากรที่สองตำแหน่งของเรือจะได้รับจากจุดตัดของ วงกลมสองวงที่มีศูนย์กลางอยู่ที่ประชากรทั้งสองและตามรัศมีที่กำหนดโดยระยะทางไปยังเรือ (วัด โดยใช้สัญญาณอะคูสติก) ในกรณีนี้เรืออาจอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งในสองจุดของส่วนตัดที่แสดงในภาพที่ 2.24 ประชากรที่สามจะแก้ไขความคลุมเครือนี้ อย่างไรก็ตามความรู้คร่าว ๆ เกี่ยวกับตำแหน่งของ เรืออาจทำให้เราสามารถดำเนินการต่อไปได้โดยไม่ต้องมีประชากรที่สาม



ภาพที่ 2.24 การวางตำแหน่ง GNSS 2D
ที่มา : Subirana et al. (2013, p. 2)

2.4.2 สถาปัตยกรรม GNSS

GNSS เป็นคำทั่วไปที่แสดงถึงระบบนำทางด้วยดาวเทียม (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, IRNSS และ QZSS) ที่ให้ตำแหน่งอย่างต่อเนื่องทั่วโลก โดยทั่วไป GNSS ประกอบด้วยสามส่วนหลัก: ส่วนอวกาศซึ่งประกอบด้วยดาวเทียม ส่วนควบคุม (เรียกอีกอย่างว่าส่วนภาคพื้นดิน) ซึ่งมีหน้าที่รับผิดชอบในการทำงานที่เหมาะสมของระบบ และกลุ่มผู้ใช้ซึ่งรวมถึงตัวรับสัญญาณ GNSS ที่ให้ตำแหน่งความเร็วและเวลาที่แม่นยำแก่ผู้ใช้ดังแสดงในภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 สถาปัตยกรรม GNSS
ที่มา : Subirana et al. (2013, p. 8)

2.4.2.1 GNSS segments

(1) Space segment

หน้าที่หลักของส่วนพื้นที่คือการสร้างและส่งสัญญาณรหัสและเฟสของผู้ให้บริการและเพื่อจัดเก็บและออกอากาศข้อความนำทางที่อัปเดตโดยส่วนควบคุม การส่งสัญญาณเหล่านี้ถูกควบคุมโดยนาฬิกาอะตอมที่มีความเสถียรสูงบนดาวเทียม ส่วนอวกาศ GNSS ถูกสร้างขึ้นโดยกลุ่มดาวดาวเทียมที่มีดาวเทียมเพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าผู้ใช้จะมีดาวเทียมอย่างน้อยสี่ดวงในมุมมองพร้อมกันจากจุดใด ๆ บนพื้นผิวโลกได้ตลอดเวลา

(1.1) Satellite constellations

ดาวเทียม GPS ถูกจัดเรียงในระนาบวงโคจรที่มีระยะห่างเท่ากันหกวงโคจรโดยแต่ละวงมีช่องสี่ช่องที่ครอบครองโดยดาวเทียมพื้นฐาน การจัดเรียง 24 ช่องนี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่ามีดาวเทียมอย่างน้อยสี่ดวงในมุมมองจากแทบทุกจุดบนโลกใบนี้ ดาวเทียมถูกวางไว้ในวงโคจรโลกขนาดกลาง (MEO) ที่ระดับความสูง 20,200 กม. และความเอียง 55° เมื่อเทียบกับเส้นศูนย์สูตร วงโคจรเกือบเป็นวงกลม โดยมีความเยื้องศูนย์กลางน้อยกว่า 0.02 แกนกึ่งเอก 26,560 กม. และระยะเวลาเล็กน้อย 11 ชั่วโมง 58 นาที 2 วินาที (12 ชั่วโมงด้านข้าง) ทำซ้ำเรขาคณิตในแต่ละวัน

GLONASS constellations ประกอบด้วยดาวเทียม MEO 24 ดวงที่ประจำการในระนาบวงโคจรสามระนาบโดยมีดาวเทียมแปดดวงเว้นระยะห่างเท่ากันในแต่ละระนาบวงโคจรเป็นวงกลมโดยประมาณโดยมีความเอียงประมาณ 64.8° และที่ระดับความสูง 19,100 กม. โดยมีระยะเวลาเล็กน้อย 11 ชั่วโมง 15 นาที 44 วินาทีทำซ้ำรูปทรงเรขาคณิตทุก ๆ แปดวันด้านข้าง เนื่องจากปัญหาด้านเงินทุนจำนวนดาวเทียมลดลงจาก 24 ดวงในปี พ.ศ. 2539 เหลือเพียง 6 ดวงในปี พ.ศ. 2544 ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2544 รัฐบาลรัสเซียมุ่งมั่นที่จะกู้คืนกลุ่มดาวและปรับปรุงระบบให้ทันสมัยอนุมัติเงินทุนใหม่ ดาวเทียมปฏิบัติการทั้งหมด 24 ดวงบวกกับการบำรุงรักษา 2 ดวงพร้อมใช้งานอีกครั้งในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2554 เพื่อฟื้นฟูกลุ่มดาวทั้งหมด

Galileo constellation ในเฟสความสามารถในการปฏิบัติการเต็มรูปแบบ (FOC) ประกอบด้วยดาวเทียม MEO สำรอง 27 ดวงและดาวเทียม MEO สำรอง 3 ดวงที่ระดับความสูง 23,222 กม. และมีความเยื้องศูนย์กลางของวงโคจร 0.002 ดาวเทียมสิบดวงจะครอบครองระนาบวงโคจรทั้งสามลำเอียงที่มุม 56° ตามเส้นศูนย์สูตร ดาวเทียมจะกระจายไปทั่วแต่ละระนาบและจะใช้เวลาประมาณ 14 ชั่วโมง 4 นาที 45 วินาทีในการโคจรรอบโลกทำซ้ำเรขาคณิตแต่ละ 17 รอบซึ่งเกี่ยวข้องกับ 10 วัน sidereal กลุ่มดาวนี้รับประกันภายใต้การดำเนินการเล็กน้อยดาวเทียมอย่างน้อยหกดวงในมุมมองจากจุดใด ๆ บนพื้นผิวโลกได้ตลอดเวลาโดยมีระดับความสูงเหนือขอบฟ้ามากกว่า 10°

BeiDou constellation (ระยะที่ 3) ประกอบด้วยดาวเทียม 35 ดวง รวมถึงดาวเทียม Geostationary Orbit (GEO) 5 ดวง และดาวเทียมที่ไม่ใช่ GEO 30 ดวงในวงโคจรเกือบเป็นวงกลม ดาวเทียมที่ไม่ใช่ GEO ประกอบด้วยดาวเทียม Geosynchronous Satellite Orbit (IGSO) แบบเอียง 3 ดวงโดยมีความเอียงประมาณ 55° และดาวเทียม MEO 27 ดวงโคจรที่ระดับความสูง 21,528 กม. ในระนาบวงโคจรสามารถที่มีความเอียงประมาณ 55° และมีระยะเวลาวงโคจรประมาณ 12 ชั่วโมง 53 นาที ทำซ้ำการติดตามภาคพื้นดินทุกเจ็ดวัน ดาวเทียม GEO ซึ่งโคจรที่ระดับความสูงประมาณ 35,786 กม. อยู่ในตำแหน่ง $58.75^\circ E$, $80^\circ E$, $110.5^\circ E$, $140^\circ E$ และ $160^\circ E$ ตามลำดับ และคาดว่าจะให้บริการนำทางทั่วโลกภายในปี พ.ศ. 2563 ระยะที่ 2 ก่อนหน้านี้เกี่ยวข้องกับกลุ่มดาว MEO สี่ดวงดาวเทียม GEO ห้าดวงและดาวเทียม IGSO ห้าดวงเพื่อให้ครอบคลุมภูมิภาคของจีนและพื้นที่โดยรอบ เริ่มให้บริการระยะที่ 2 ด้วยดาวเทียม 10 ดวง เริ่มให้บริการเมื่อวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2554

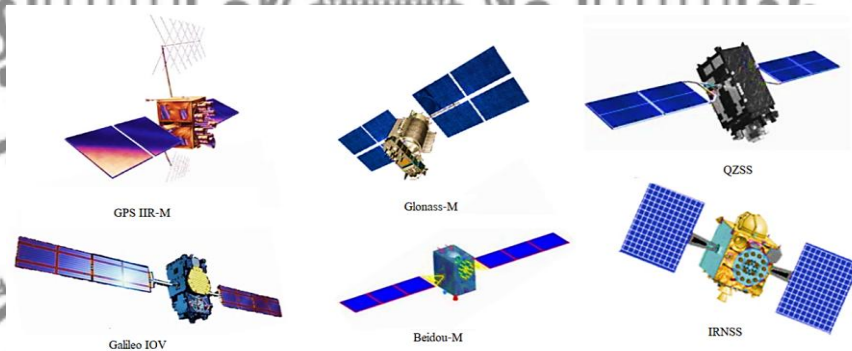
QZSS หรือที่เรียกว่า Michibiki เป็นระบบนำทางไอออนเวลาในภูมิภาคดาวเทียมและระบบเสริมด้วยดาวเทียมที่พัฒนาโดยรัฐบาลญี่ปุ่นเพื่อปรับปรุงระบบระบุตำแหน่งทั่วโลก (GPS) ที่ดำเนินการโดยสหรัฐอเมริกาในภูมิภาคเอเชีย-โอเชียเนียโดยเน้นที่ญี่ปุ่น เป้าหมายของ QZSS คือการให้บริการระบุตำแหน่งที่แม่นยำและมีเสถียรภาพสูงในภูมิภาคเอเชีย-โอเชียเนียเข้ากันได้กับ GPS บริการ QZSS สี่ดาวเทียมให้บริการบนพื้นฐานการทดลอง ณ วันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2561 และเริ่มอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ระบบนำทางด้วยดาวเทียมที่เป็นอิสระจาก GPS มีการวางแผนสำหรับปี พ.ศ. 2566 ด้วยดาวเทียมเจ็ดดวง QZSS ใช้ดาวเทียม geostationary หนึ่งดวงและดาวเทียมสามดวงในวงโคจรรูปไข่และ geosynchronous แบบทวนราวงโคจรแต่ละดวงห่างกัน 120° จากอีกสองวงโคจร เนื่องจากความโน้มเอียงนี้พวกเขาจึงไม่ใช่ Geostationary พวกเขาไม่ได้อยู่ในที่เดียวกันบนท้องฟ้า แต่ร่องรอยพื้นดินของพวกเขาเป็นรูปแบบที่ไม่สมมาตรซึ่งออกแบบมาเพื่อให้แน่ใจว่ามีเกือบเหนือศีรษะโดยตรง (ระดับความสูง 60° ขึ้นไป) เหนือญี่ปุ่นตลอดเวลา

IRNSS ชื่อปฏิบัติการของ Navigation Indian Constellation (NavIC) เป็นระบบนำทางด้วยดาวเทียมระดับภูมิภาคอิสระที่ให้บริการระบุตำแหน่งและกำหนดเวลาแบบเรียลไทม์ที่แม่นยำ ครอบคลุมอินเดียและภูมิภาคที่ทอดยาว 1,500 กม. โดยรอบ โดยมีแผนจะขยายเพิ่มเติม พื้นที่ให้บริการเพิ่มเติมอยู่ระหว่างพื้นที่ให้บริการหลักและพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าล้อมรอบด้วยเส้นขนานที่ 30° ใต้ถึงเส้นขนานที่ 50° เหนือและเส้นเมริเดียนที่ 30° ทางตะวันออกถึงเส้นเมริเดียนที่ 130° ซึ่งอยู่ห่างจากเส้นขอบ 1,500-6,000 กม. ซึ่งสามารถมองเห็นดาวเทียม NavIC บางส่วนได้ แต่ตำแหน่งไม่สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำเสมอไป ปัจจุบันระบบประกอบด้วยกลุ่มดาวดาวเทียมแปดดวงโดยมีดาวเทียมอีกสองดวงอยู่บนพื้นดินเป็นสแตนด์บาย กลุ่มดาวอยู่ในวงโคจร

ในปี พ.ศ. 2561 NavIC จะให้บริการสองระดับคือ “บริการระบุตำแหน่งมาตรฐาน” ซึ่งจะเปิดสำหรับการใช้งานพลเรือนและ “บริการที่ถูกจำกัด” (บริการที่เข้ารหัส) สำหรับผู้ใช้ที่ได้รับอนุญาต (รวมถึงทหาร) ตัวติดตามที่ใช้ NavIC เป็นภาคบังคับสำหรับรถยนต์เพื่อการพาณิชย์ในอินเดียและโทรศัพท์มือถือสำหรับผู้บริโภคบางรุ่นที่รองรับมีให้บริการตั้งแต่ครั้งแรกของปี พ.ศ. 2563 มีแผนที่จะขยายระบบ NavIC โดยเพิ่มขนาดกลุ่มดาวจาก 7 เป็น 11 กลุ่มดาวประกอบด้วยดาวเทียมเจ็ดดวงดาวเทียมสามในเจ็ดดวงตั้งอยู่ในวงโคจร Geostationary (GEO) ที่ลองจิจูด 32.5° E, 83° E และ 131.5° E ประมาณ 36,000 กม. เหนือพื้นผิวโลก ดาวเทียมที่เหลืออีกสี่ดวงอยู่ในวงโคจรแบบ Geosynchronous (GSO) สองตัวข้ามเส้นศูนย์สูตรที่ 55° E และสองตัวที่ 111.75° E

(1.2) โครงสร้างดาวเทียม

ดาวเทียมมีโครงสร้างและกลไกต่าง ๆ เพื่อให้อยู่ในวงโคจรสื่อสารกับส่วนควบคุมและส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับ นาฬิกาดาวเทียมเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญของ GNSS ด้วยเหตุนี้ดาวเทียมจึงติดตั้งนาฬิกาอะตอมที่มีความเสถียรสูงมาก (รูบิเดียม, ซีเซียม, ไฮโดรเจน) รูปร่างของดาวเทียมในระบบ GNSS มีดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 ดาวเทียม GNSS

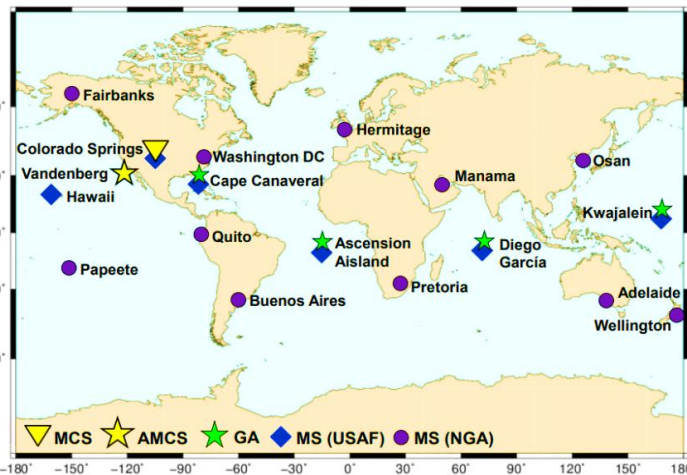
ที่มา : Subirana et al. (2013, p. 9)

(2) ส่วนควบคุม

ส่วนควบคุม (เรียกอีกอย่างว่าส่วนภาคพื้นดิน) มีหน้าที่รับผิดชอบในการทำงานที่เหมาะสมของ GNSS หน้าที่พื้นฐานของมันคือ: เพื่อควบคุมและรักษาสถานะและการกำหนดค่าของกลุ่มดาวดาวเทียม เพื่อทำนายวิวัฒนาการของนาฬิกาและนาฬิกาดาวเทียม เพื่อรักษามาตราส่วนเวลา GNSS ที่สอดคล้องกัน (ผ่านนาฬิกาอะตอม) และเพื่ออัปเดตข้อความการนำทางสำหรับดาวเทียมทั้งหมด

(2.1) ส่วนควบคุมดาวเทียม GPS

ส่วนการควบคุม GPS ประกอบด้วยเครือข่ายของสถานีตรวจสอบ (MS), สถานีควบคุมหลัก (MCS) และเสาศาอากาศภาคพื้นดิน (GA) Master Control Station ซึ่งตั้งอยู่ในโคโลราโดสปริงส์สหรัฐอเมริกาเป็นแกนหลักของส่วนการควบคุม มีหน้าที่รับผิดชอบในการใช้งานระบบและให้บริการสั่งการควบคุมและบำรุงรักษาแก่ส่วนพื้นที่ สถานีสำรองแห่งใหม่ที่ทำงานได้อย่างสมบูรณ์หรือที่เรียกว่า Alternate Master Control Station (AMCS) ถูกจัดตั้งขึ้นโดยเป็นส่วนหนึ่งของแผนการปรับปรุงให้ทันสมัยที่ฐานทัพอากาศ Vandenberg สถานีตรวจสอบกระจายอยู่ทั่วโลก แสดงดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 สถานีตรวจสอบส่วนควบคุม GPS ภาคพื้นดิน
ที่มา : Subirana et al. (2013, p. 15)

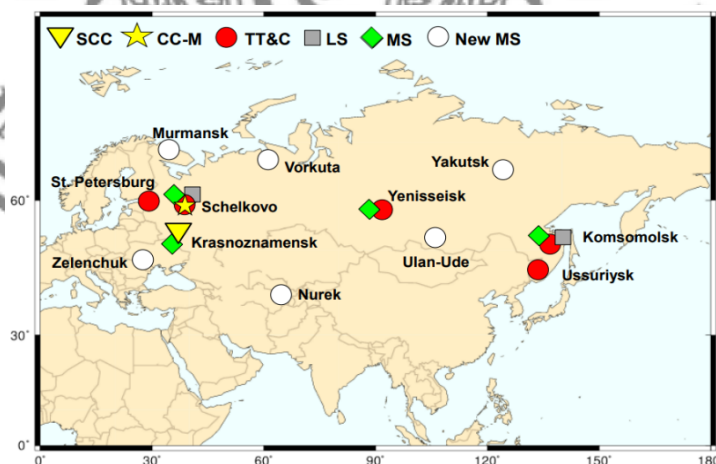
ติดตั้งมาตรฐานนาฬิกาอะตอมและเครื่องรับ GPS เพื่อรวบรวมข้อมูล GPS อย่างต่อเนื่องสำหรับดาวเทียมทุกดวงในมุมมองจากตำแหน่งของพวกเขา ข้อมูลที่รวบรวมจะถูกส่งไปยัง Master Control Station ซึ่งจะถูกระมวลผลเพื่อประเมินวงโคจรดาวเทียม (ephemerides) และข้อผิดพลาดของนาฬิกา รวมถึงพารามิเตอร์อื่น ๆ และเพื่อสร้างข้อความนำทาง เครือข่าย MS ประกอบด้วยห้าไซต์จากกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา (USAF) ซึ่งตั้งอยู่ในฮาวายโคโลราโดสปริงส์ (โคโลราโด) เกาะแอสเซนชัน (แอตแลนติกใต้) ดิเอโกการ์เซีย (มหาสมุทรอินเดีย) และควาจาเลน (แปซิฟิกเหนือ) Cape Canaveral (ฟลอริดา) ก่อตั้งขึ้นในปีพ.ศ. 2544 และจาก USAF ในปี พ.ศ. 2548 โครงการปรับปรุงให้ทันสมัยได้ขยายเครือข่ายนี้ให้รวมถึง MS หกตัวที่ดำเนินการโดย National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) ของกระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ แอดิเลด (ออสเตรเลีย)

บัวโนสไอเรส (อาร์เจนตินา) Hermitage (สหราชอาณาจักร) มานามา (บาห์เรน) กีโต (เอกวาดอร์) และวอชิงตัน ดี.ซี. (สหรัฐอเมริกา) หลังจากนั้นมีการเพิ่มสถานีอีกห้าสถานีในปี พ.ศ. 2549 Fairbanks (อลาสก้า) Osan (เกาหลีใต้) Papeete (ตาฮิติ) Pretoria (แอฟริกาใต้) และ Wellington (นิวซีแลนด์)

(2.2) ส่วนควบคุมดาวเทียม GLONASS

ส่วนการควบคุมดาวเทียม GLONASS (หรือสิ่งอำนวยความสะดวกการควบคุมภาคพื้นดิน) จะตรวจสอบสถานะของดาวเทียมกำหนดการชดเชยชั่วคราวและนาฬิกา ดาวเทียมตามเวลาของ Glonass และเวลาสากลเชิงพิกัด (UTC) และอัปเดตข้อมูลการนำทางไปยัง ดาวเทียมวันละสองครั้ง ส่วนการควบคุมดาวเทียม GLONASS ประกอบด้วยศูนย์ควบคุมระบบ (SCC) ซึ่งตั้งอยู่ใน Krasnoznamensk (ภูมิภาคมอสโก) เครือข่ายสถานีบัญชาการและติดตามซึ่งตั้งอยู่ ภายในดินแดนอดีตสหภาพโซเวียตและ Central Synchronizer (CC-M) ระบบนาฬิกาใน Schelkovo (ภูมิภาคมอสโก)

SCC ประสานงานฟังก์ชันและการดำเนินงานทั้งหมดในระดับระบบ มันประมวลผลข้อมูลจากสถานีคำสั่งและสถานีติดตามเพื่อกำหนดนาฬิกาดาวเทียมและสถานะวงโคจรและอัปเดตข้อความนำทางสำหรับดาวเทียมแต่ละดวง สถานีบัญชาการและติดตามประกอบด้วย เครือข่ายหลักของสถานี Telemetry, Tracking and Control (TT&C) ห้าแห่งที่กระจายอยู่ทั่ว ดินแดนรัสเซีย (St. Petersburg, Schelkovo, Yeniseisk, Komsomolsk และ Ussuriysk) ดังภาพ ที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 สถานีตรวจสอบส่วนควบคุม GLONASS ภาคพื้นดิน
ที่มา : Subirana et al. (2013, p. 16)

(2.3) ส่วนควบคุมดาวเทียม Galileo

ส่วนภาคพื้นดินของดาวเทียม Galileo ประกอบด้วย Galileo Control Centers (GCC) สองแห่งที่ตั้งอยู่ใน Oberpfaffenhofen (เยอรมนี) และ Fucino (อิตาลี) แต่ละ GCC จัดการฟังก์ชันควบคุมที่สนับสนุนโดยส่วนควบคุมภาคพื้นดิน (GCS) และฟังก์ชัน ซึ่งได้รับการสนับสนุนโดยส่วนภารกิจภาคพื้นดิน (GMS) โดยเฉพาะ GCS จัดการทำความสะอาดยานอวกาศและการบำรุงรักษากลุ่มดาวโดยใช้เครือข่ายสถานี Telemetry, Tracking & Control stations (TT&C) ที่กระจายอยู่ทั่วโลก ขอบเขตของฟังก์ชันนี้รวมถึงการควบคุมและตรวจสอบดาวเทียมและน้ำหนักบรรทุกการวางแผนและฟังก์ชันอัตโนมัติที่ช่วยให้การดำเนินงานที่ปลอดภัยและถูกต้องเกิดขึ้นและการสนับสนุนการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุก GMS กำหนดส่วนข้อมูลการนำทางและเวลาของข้อความการนำทางโดยใช้เครือข่ายของ GSS, GMS สื่อสารกับดาวเทียมกาลิเลโอผ่านเครือข่ายของ ULSS, GMS และ GCS เชื่อมต่อดาวเทียมกับเครือข่ายสถานีภาคพื้นดินทั่วโลกที่ใช้ฟังก์ชันการตรวจสอบและควบคุม Galileo SIS (GSS) ซึ่งรวบรวมและส่งต่อการวัดและข้อมูล Galileo SIS ไปยัง GCC แบบเรียลไทม์ Galileo Uplink Stations (ULS) ซึ่งกระจายและอัปลิงค์ข้อมูลภารกิจไปยังกลุ่มดาวกาลิเลโอ ซึ่ง TT&C รวบรวมและส่งต่อข้อมูล telemetry สร้างโดยดาวเทียมกาลิเลโอที่แจกจ่ายและอัปลิงค์คำสั่งควบคุมที่จำเป็นสำหรับการบำรุงรักษา Galileo satellites และ Constellation โดยมี European Union Agency for the Space Programme (EUSPA) สนับสนุน ดังภาพที่ 2.29

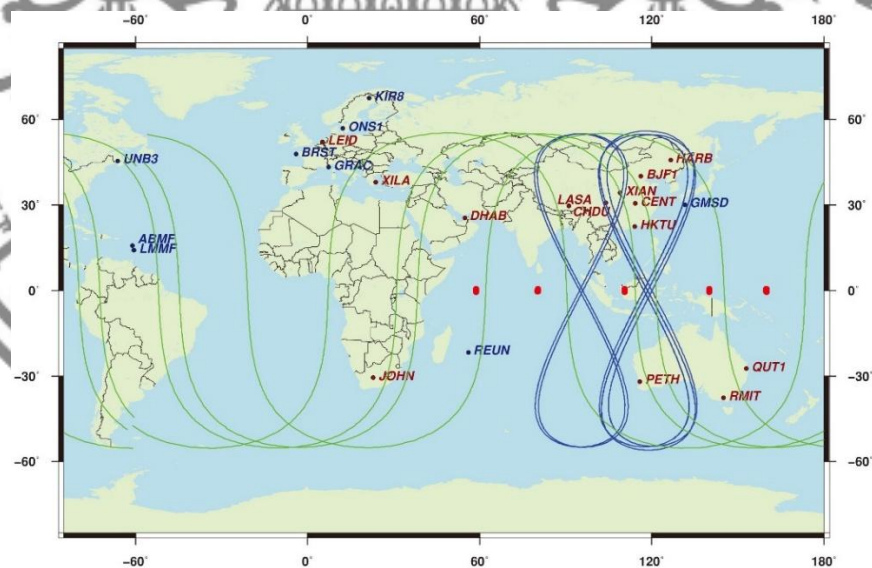


ภาพที่ 2.29 ส่วนควบคุมดาวเทียม Galileo

ที่มา : EUSPA (2024, Online)

(2.4) ส่วนควบคุมดาวเทียม BeiDou

ส่วนควบคุมดาวเทียม BeiDou ประกอบด้วย Master Control Station (MCS), สถานีอับโพลสองแห่ง (US) และเครือข่ายสถานีตรวจสอบ (MS) ที่กระจายอย่างกว้างขวาง 30 แห่ง เช่นเดียวกับการควบคุมกลุ่มดาว GNSS อื่น ๆ MCS ได้รับความข้อมูลจาก MS ซึ่งติดตามกลุ่มดาวอย่างต่อเนื่อง สถานีอับโพลจะส่งข้อมูลที่สร้างโดย MCS ไปยังดาวเทียม MCS มีหน้าที่รับผิดชอบในการควบคุมการทำงานของระบบรวมถึงการกำหนดวงโคจรข้อความนำทางและ ephemerides ซึ่งขึ้นอยู่กับ China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000) เป็นกรอบพิกัดของระบบ BeiDou และอยู่ห่างจาก ITRF เพียงไม่กี่เซนติเมตร MCS ยังประสานงานการวางแผนภารกิจการจัดกำหนดการและการซิงโครไนซ์เวลากับ BeiDou Time (BDT) BDT ถูกซิงโครไนซ์ภายใน 100ns ของ UTC (NTSC) ตามที่ดูแลโดย National Time Service Center, China Academy of Science BDT ไม่รวมวินาทีอธิกสุรทิน การชดเชยครั้งที่สองแบบก้าวกระโดดออกอากาศโดยดาวเทียม BeiDou ในข้อความนำทาง ยุคเริ่มต้นของ BDT คือ 00:00:00 UTC ในวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2549 การชดเชยระหว่าง BDT และ GPST/GST จะถูกวัดและออกอากาศในข้อความนำทาง ดังภาพที่ 3.30



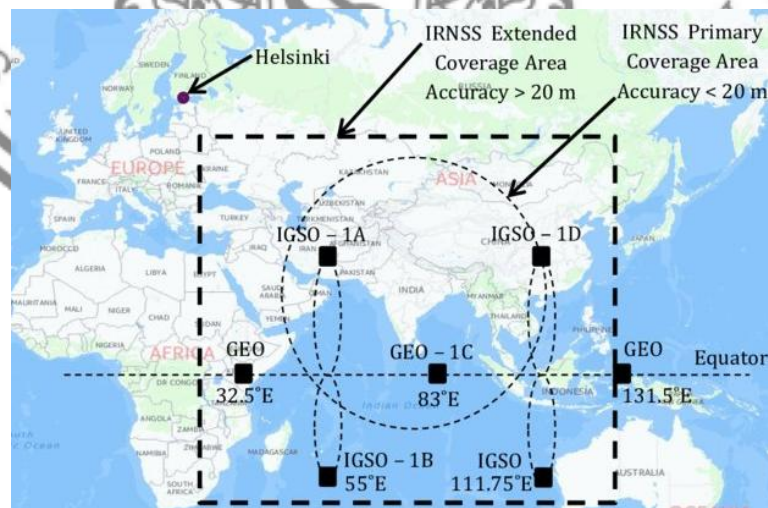
ภาพที่ 2.30 ส่วนควบคุมดาวเทียม BeiDou

ที่มา : Lou et al. (2014, p. 2)

(2.5) ส่วนควบคุมดาวเทียม IRNSS

ส่วนควบคุมดาวเทียม IRNSS มีหน้าที่รับผิดชอบในการบำรุงรักษาและ การดำเนินงานของกลุ่มดาว IRNSS ส่วนภาคพื้นดินประกอบด้วย: IRNSS Spacecraft Control Facility (IRSCF), ISRO Navigation Centre (INC), IRNSS Range and Integrity Monitoring Stations (IRIMS), IRNSS Network Timing Centre (IRNWT), IRNSS CDMA Ranging Stations (IRCDR), Laser Ranging Stations และ IRNSS Data Communication Network (IRDCN)

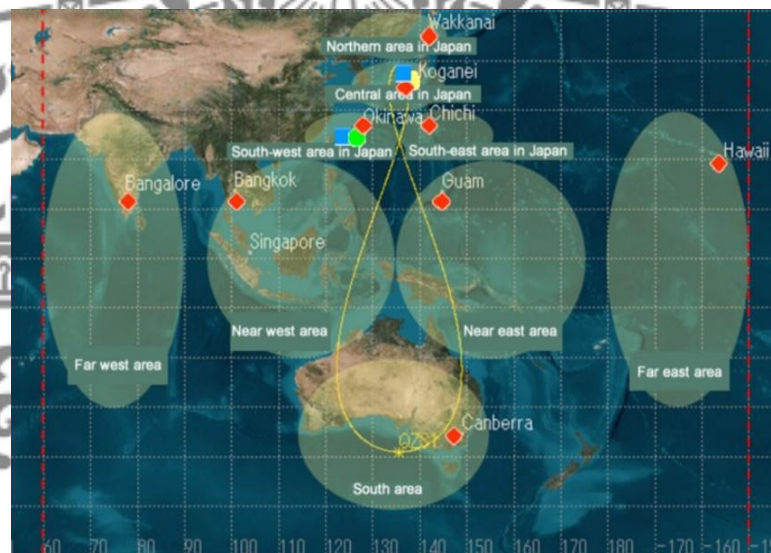
INC ที่จัดตั้งขึ้นที่ Byalalu ดำเนินการปฏิบัติการระยะไกลและการ รวบรวมข้อมูลกับสถานีภาคพื้นดินทั้งหมด ปัจจุบัน IRIMS 14 แห่งเปิดให้บริการและสนับสนุนการ ดำเนินงานของ IRNSS ช่วง CDMA จะดำเนินการโดยสถานี IRCDR สี่แห่งเป็นประจำสำหรับดาวเทียม IRNSS ทั้งหมด IRNWT ได้รับการจัดตั้งขึ้นและให้เวลาระบบ IRNSS ด้วยความแม่นยำ 20 ns (2 sigma) w.r.t UTC มีการทำเลเซอร์ด้วยการสนับสนุนของสถานี ILRS ทั่วโลก ซอฟต์แวร์นำทางเปิด ให้บริการที่ INC ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2556 พารามิเตอร์การนำทางทั้งหมด ได้แก่ ดาวเทียม ephemeris การแก้ไขนาฬิกาพารามิเตอร์ความสมบูรณ์และพารามิเตอร์รอง ได้แก่ การแก้ไขการ หน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์และเวลา w.r.t UTC และ GNSS อื่น ๆ ปุ่มข้อความและพารามิเตอร์การวาง แนวโลกจะถูกสร้างขึ้นและอัปเดตของยานอวกาศโดยอัตโนมัติ IRDCN ได้สร้างการเชื่อมโยง ภาคพื้นดินและ VSAT ระหว่างสถานีภาคพื้นดิน FCA ขนาด 7.2 ม. จำนวน 7.2 ม. จำนวน 7 เครื่อง และ FMA ขนาด 11 ม. จำนวน 2 เครื่อง ของ IRSCF กำลังดำเนินการสำหรับ LEOP และระบบวง โคจรของดาวเทียม IRNSS ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 ส่วนพื้นที่ IRNSS และพื้นที่ครอบคลุมบริการ
ที่มา : Thombre et al. (2015, p. 246-256)

(2.6) ส่วนควบคุมดาวเทียม QZSS

มีส่วนภาคพื้นดินและพื้นที่ที่มี QZSS ส่วนบนพื้นดินประกอบด้วย สถานีควบคุมหลัก (MCS) สถานีควบคุมการติดตามหลาย (TT&C) สถานีเลเซอร์ และสถานีตรวจสอบต่าง ๆ เครือข่ายสถานีตรวจสอบครอบคลุมภูมิภาคต่อไปนี้ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงและโอเชียเนีย สถานีในญี่ปุ่น (โอกินาวา ซาโรเบ็ตสึ โคคาเนอิ และโอคาซาวาระ) สถานีในต่างประเทศ ได้แก่ บังกอลอร์ (อินเดีย) กวม แคนเบอร์รา (ออสเตรเลีย) กรุงเทพมหานคร (ไทย) และฮาวาย (สหรัฐอเมริกา) MSC รับผิดชอบการสร้างข้อความนำทางที่สื่อสารกับดาวเทียมถึงสุดยอดผ่านสถานี TT&C ของเกาะ โอกินาวา ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 ส่วนควบคุมดาวเทียม QZSS

ที่มา : GPSBeam (2024, Online)

(3) กลุ่มผู้ใช้

กลุ่มผู้ใช้ประกอบด้วยตัวรับสัญญาณ GNSS หน้าที่หลักของพวกเขาคือการรับสัญญาณ GNSS กำหนด Pseudoranges และแก้สมการการนำทางเพื่อให้ได้พิกัดและให้เวลาที่แม่นยำมาก องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องรับ GNSS ทั่วไปคือเสาอากาศที่มีการขยายลวงหน้าส่วนความถี่วิทยุไมโครโปรเซสเซอร์ออสซิลเลเตอร์ที่มีความแม่นยำปานกลางแหล่งป้อนหน่วยความจำบางส่วนสำหรับการจัดเก็บข้อมูลและอินเทอร์เฟซกับผู้ใช้ ตำแหน่งที่คำนวณได้จะอ้างถึงศูนย์กลางเสาอากาศ

2.4.3 สัญญาณ GNSS

ดาวเทียม GNSS ส่งสัญญาณนำทางอย่างต่อเนื่องที่ความถี่สองความถี่ขึ้นไปในย่านความถี่ L สัญญาณเหล่านี้มีรหัสที่หลากหลายและข้อมูลการนำทางเพื่อให้ผู้ใช้สามารถคำนวณทั้งเวลาเดินทางจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับและพิกัดดาวเทียมได้ทุกยุคทุกสมัย ส่วนประกอบสัญญาณหลักอธิบายได้ดังนี้ ผู้ให้บริการ สัญญาณโซนความถี่วิทยุที่ความถี่ที่กำหนดรหัสช่วง ลำดับของศูนย์และตัวที่อนุญาตให้เครื่องรับกำหนดเวลาเดินทางของสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับ พวกเขาเรียกว่าลำดับ PRN หรือรหัส PRN ข้อมูลการนำทาง ข้อความรหัสไบนารีที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ Ephemeris ดาวเทียม (องค์ประกอบหลัก Keplerian หรือตำแหน่งดาวเทียมและความเร็ว) พารามิเตอร์อคตินาฬิกา ปุ่ม (พร้อมชุดข้อมูล Ephemeris ความแม่นยำลดลง) สถานะสุขภาพของดาวเทียมและข้อมูลเสริมอื่น ๆ ปัจจุบันมี GNSS หลายตัวที่ทำงานอยู่โดยแต่ละเครื่องมีความถี่เฉพาะของตนเองสำหรับการส่งข้อมูลการนำทางและเวลา ความถี่ GNSS รายละเอียดของความถี่ดาวเทียม GNSS ได้แก่

2.4.3.1 ความถี่ GPS

GPS ดำเนินการโดยรัฐบาลสหรัฐอเมริกาและใช้ความถี่ที่หลากหลายเพื่อส่งข้อมูลการนำทางและเวลาไปยังเครื่องรับ GPS มีรายละเอียดเกี่ยวกับความถี่ GPS

(1) ความถี่ L1: 1,575.42 MHz นี่คือนิวเคลียสหลักที่ GPS ใช้สำหรับการนำทางและเวลา ความถี่ L1 ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส C/A และ P(Y) รหัส C/A เป็นรหัสพลเรือนที่มีให้สำหรับผู้ใช้งาน GPS ทุกคน ในขณะที่รหัส P(Y) เป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น

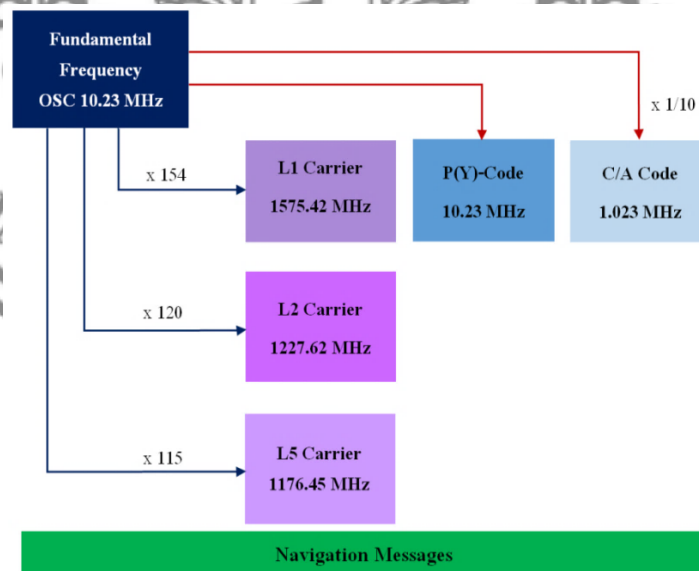
(2) ความถี่ L2: 1,227.60 MHz ความถี่นี้ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส P(Y) ซึ่งเป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น ความถี่ L2 ยังใช้ในการส่งสัญญาณ L2C ซึ่งเป็นสัญญาณทางแพ่งที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน มีความแม่นยำมากกว่ารหัส C/A และความถี่ L1

(3) ความถี่ L5: 1,176.45 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ L5 ซึ่งเป็นสัญญาณโยธาที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ L5 มีไว้สำหรับการนำทางและเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนต่อสัญญาณรบกวนและหลายเส้นทางได้มากขึ้น นอกจากนี้ GPS ยังใช้ความถี่ L3, L4 และ L6 แต่ความถี่เหล่านี้ไม่ได้ใช้สำหรับการนำทางและเวลาจะใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นเช่นระบบตรวจจับการระเบิดนิวเคลียร์ (NDS) และแอปพลิเคชันทางทหารอื่น ๆ สิ่งสำคัญคือต้องทราบว่าดาวเทียม GPS ส่งผ่านหลายความถี่พร้อมกันทำให้เครื่องรับสามารถใช้สัญญาณที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานเฉพาะและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องรับ ความถี่ L1 เป็นความถี่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในบรรดาความถี่ GPS ทั้งหมด ใช้สำหรับการนำทางและกำหนดเวลารวมถึงวัตถุประสงค์อื่น ๆ เช่นการซิงโครไนซ์เครือข่ายเซลลูลาร์และระบบการสื่อสารอื่น ๆ แผนภาพบล็อกของความถี่ดาวเทียม GPS

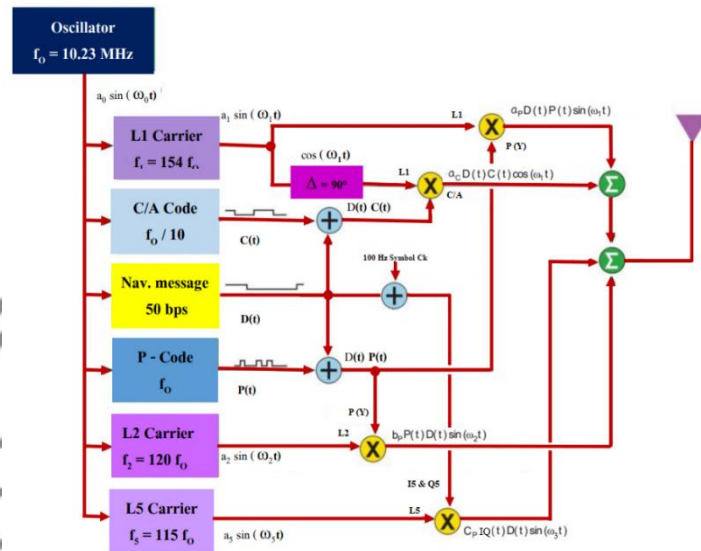
จะส่งคลื่นวิทยุที่มี 3 ความถี่ ความถี่ที่กำหนด L1 คือ 1,575.42 MHz ที่มีความยาวคลื่น 19.03 เซนติเมตร นอกจากนี้ความถี่ที่ระบุว่า L2 ส่งที่ความถี่ 1,227.60 MHz และความยาวคลื่นที่สอดคล้องกันคือ 24.42 เซนติเมตร สุดท้าย แต่ไม่ท้ายสุดความถี่ที่สามที่ส่งโดย GPS เรียกว่า L5 สื่อนี้ทำงานที่ 1,176.45 MHz ที่ 154 เท่า 120 เท่าและเหนือสิ่งอื่นใด 115 เท่าตามลำดับของความถี่พื้นฐานที่ 10.23 MHz คลื่นวิทยุจะถูกมอดูเลตด้วยรหัสข้อมูลดาวเทียมและรหัสที่ใช้สำหรับการมอดูเลต มีสองประเภทดังนี้

(1) P (รหัสที่แม่นยำ) คือการเข้ารหัสสองเฟสของรหัส Y (รหัสเข้ารหัส) ซึ่งมีความถี่พื้นฐาน 10.23 MHz ที่ 30 เมตรต่อวินาทีความยาวคลื่นของมันคือรหัส P มีกุญแจที่ช่วยให้อุปกรณ์ทางทหารทำงานได้ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัย ต้องรีเซ็ตคีย์ทุกสัปดาห์เพื่อป้องกันแฮกเกอร์

(2) ความถี่ของรหัส C/A (Clear Access หรือ Coarse Acquisition Code) คือ 1.023 MHz หรือ 1/10 เท่าของความถี่พื้นฐาน ความยาวคลื่นของมันคือ 300 เมตร รหัส C/A นั้นฟรีสำหรับการใช้งานพลเรือนในขณะที่รหัส P มีไว้สำหรับทหารและหน่วยงานของรัฐบางแห่งเท่านั้น L1 ได้รับอิทธิพลจากสองรหัส แต่ L2 ได้รับอิทธิพลจากรหัส P เท่านั้น ข้อมูลดาวเทียมถูกปล่อยออกมาในทั้งสองความถี่ L1 และ L2 ข้อมูลการนำทางประกอบด้วยข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (ดาวเทียมชั่วคราว) และการอ้างอิงเวลาดาวเทียม การแก้ไขเวลาดาวเทียมและสถานะดาวเทียมแสดงในภาพที่ 2.33 และ 2.34



ภาพที่ 2.33 แผนภาพบล็อกของความถี่ดาวเทียม GPS



ภาพที่ 2.34 แผนภาพบล็อกของการส่งสัญญาณ GPS ที่ความถี่ต่าง ๆ

2.4.3.2 ความถี่ GLONASS

GLONASS ดำเนินการโดยรัฐบาลรัสเซียและใช้ความถี่ที่หลากหลายเพื่อส่งข้อมูลการนำทางและเวลาไปยังเครื่องรับ GLONASS นี้คือรายละเอียดความถี่ GLONASS

(1) ความถี่ L1: 1,602 MHz นี้คือความถี่หลักที่ GLONASS ใช้สำหรับการนำทางและเวลา ความถี่ L1 ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส C/A และ P(Y) รหัส C/A เป็นรหัสพลเรือนที่มีให้สำหรับผู้ใช้งาน GLONASS ทุกคน ในขณะที่รหัส P(Y) เป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้ที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น

(2) ความถี่ L2: 1,246 MHz ความถี่นี้ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส P(Y) ซึ่งเป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้ที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น ความถี่ L2 ยังใช้ในการส่งสัญญาณ L2C ซึ่งเป็นสัญญาณทางแพ่งที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน มีความแม่นยำมากกว่ารหัส C/A และความถี่ L1 สิ่งสำคัญคือต้องทราบว่าดาวเทียม GLONASS ส่งสัญญาณหลายความถี่พร้อมกันทำให้เครื่องรับสามารถใช้สัญญาณที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานเฉพาะและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องรับ ความถี่ L1 เป็นความถี่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในบรรดาความถี่ GLONASS ทั้งหมด ใช้สำหรับการนำทางและกำหนดเวลารวมถึงวัตถุประสงค์อื่น ๆ เช่น การซิงโครไนซ์เครือข่ายเซลลูลาร์และระบบการสื่อสารอื่น ๆ นอกจากนี้ GLONASS ยังใช้ความถี่ L3 แต่ไม่ได้ใช้สำหรับการนำทางและเวลามันถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น ๆ เช่น บริการค้นหาและกู้ภัยและเพื่อปรับปรุงความแม่นยำและความสมบูรณ์ของสัญญาณนำทาง การกล่าวถึง GLONASS อยู่ในกระบวนการปรับปรุงระบบให้ทันสมัยและเพิ่มความถี่

และสัญญาณใหม่ เช่น L1C, L2C และ L5 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความแม่นยำและความสมบูรณ์ของสัญญาณนำทางและให้ความทนทานต่อระบบมากขึ้น

2.4.3.3 ความถี่ Galileo

ระบบนำทางด้วยดาวเทียม Galileo ดำเนินการโดยสหภาพยุโรปและใช้ความถี่ที่หลากหลายเพื่อส่งข้อมูลการนำทางและเวลาไปยังเครื่องรับ Galileo นี่คือรายละเอียดความถี่ Galileo

(1) ความถี่ E1: 1,575.42 MHz นี้คือความถี่หลักที่ Galileo ใช้สำหรับการนำทางและเวลา ความถี่ E1 ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส C/A และ P(Y) รหัส C/A เป็นรหัสพลเรือนที่มีให้สำหรับผู้ใช้งาน Galileo ทุกคน ในขณะที่รหัส P(Y) เป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น

(2) ความถี่ E5a: 1,176.45 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ E5a ซึ่งเป็นสัญญาณทางแพ่งที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ E5a มีไว้สำหรับการนำทางและการจับเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนทานต่อการรบกวนและหลายเส้นทาง

(3) ความถี่ E5b: 1,207.14 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ E5b ซึ่งเป็นสัญญาณโยธาที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ E5b มีไว้สำหรับการนำทางและการจับเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนทานต่อการรบกวนและหลายเส้นทาง

(4) ความถี่ E6: 1,278.75 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ E6 ซึ่งเป็นสัญญาณโยธาที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ E6 มีไว้สำหรับการนำทางและการจับเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนต่อสัญญาณรบกวนและหลายเส้นทางได้มากขึ้น

สิ่งสำคัญคือต้องทราบว่าดาวเทียม Galileo ส่งสัญญาณหลายความถี่พร้อมกันทำให้เครื่องรับสามารถใช้สัญญาณที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานเฉพาะและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องรับ แต่แต่ละความถี่ให้ระดับความแม่นยำและความสมบูรณ์ที่แตกต่างกันและสามารถใช้ในการใช้งานที่แตกต่างกันตามนั้น นอกจากนี้ Galileo ยังใช้ความถี่เพิ่มเติมเพื่อความปลอดภัยในชีวิตและบริการเชิงพาณิชย์เช่นสัญญาณ E5ab และ E5ab-AltBOC สัญญาณเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความแม่นยำและความสมบูรณ์ในระดับสูงสุดสำหรับการใช้งานที่สำคัญด้านความปลอดภัยเช่นการบิน การขนส่ง และการค้นหาและกู้ภัย

2.4.3.4 ความถี่ BeiDou

BeiDou Navigation Satellite System (BDS) ดำเนินการโดยจีนและใช้ความถี่ที่หลากหลายเพื่อส่งข้อมูลการนำทางและเวลาไปยังเครื่องรับ BeiDou รายละเอียดความถี่ BeiDou มีดังนี้

(1) ความถี่ B1: 1,561.098 MHz นี้คือความถี่หลักที่ BeiDou ใช้สำหรับการนำทางและเวลา ความถี่ B1 ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส C/A และ P(Y) รหัส C/A เป็นรหัสพลเรือนที่มีให้สำหรับผู้ใช้งาน BeiDou ทุกคน ในขณะที่รหัส P (Y) เป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น

(2) ความถี่ B2: 1,207.14 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ B2 ซึ่งเป็นสัญญาณโยธาที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ B2 มีไว้สำหรับการนำทางและกำหนดเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนต่อการรบกวนและหลายเส้นทางได้มากขึ้น

(3) ความถี่ B3: 1,268.52 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ B3 ซึ่งเป็นสัญญาณโยธาที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ B3 มีไว้สำหรับการนำทางและการจับเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนต่อสัญญาณรบกวนและหลายเส้นทางได้มากขึ้น

2.4.3.5 ความถี่ QZSS

QZSS ดำเนินการโดยญี่ปุ่นและใช้ความถี่ที่หลากหลายเพื่อส่งข้อมูลการนำทางและเวลาไปยังเครื่องรับ QZSS นี้คือรายละเอียดความถี่ QZSS

(1) ความถี่ L1: 1,575.42 MHz นี้คือความถี่หลักที่ QZSS ใช้สำหรับการนำทางและเวลา ความถี่ L1 ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส C/A และ P(Y) รหัส C/A เป็นรหัสพลเรือนที่มีให้สำหรับผู้ใช้งาน QZSS ทุกคน ในขณะที่รหัส P(Y) เป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น

(2) ความถี่ L2: 1,227.60 MHz ความถี่นี้ใช้เพื่อส่งสัญญาณรหัส P(Y) ซึ่งเป็นรหัสทหารที่เข้ารหัสและใช้ได้เฉพาะกับผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น ความถี่ L2 ยังใช้ในการส่งสัญญาณ L2C ซึ่งเป็นสัญญาณทางแพ่งที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน มีความแม่นยำมากกว่ารหัส C/A และความถี่ L1

(3) ความถี่ L5: 1,176.45 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ L5 ซึ่งเป็นสัญญาณโยธาที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ L5 มีไว้สำหรับการนำทางและเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนต่อสัญญาณรบกวนและหลายเส้นทางได้มากขึ้น

(4) ความถี่ L6: 1,278.75 MHz ความถี่นี้ใช้ในการส่งสัญญาณ L6 ซึ่งเป็นสัญญาณโยธาที่มีให้สำหรับผู้ใช้งานทุกคน สัญญาณ L6 มีไว้สำหรับการนำทางและเวลาที่มีความแม่นยำสูงและทนต่อสัญญาณรบกวนและหลายเส้นทางได้มากขึ้น

สิ่งสำคัญคือต้องทราบว่าดาวเทียม QZSS ส่งผ่านหลายความถี่พร้อมกันทำให้เครื่องรับสามารถใช้สัญญาณที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานเฉพาะ และปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องรับแต่ละความถี่ให้ระดับความแม่นยำ และความสมบูรณ์ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ QZSS ยัง

ได้รับการออกแบบมาเพื่อทำงานเป็นระบบระดับภูมิภาคเสริม GPS และระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกอื่น ๆ โดยให้บริการระบุตำแหน่งและกำหนดเวลาที่แม่นยำยิ่งขึ้นในภูมิภาคเอเชีย-โอเชียเนีย

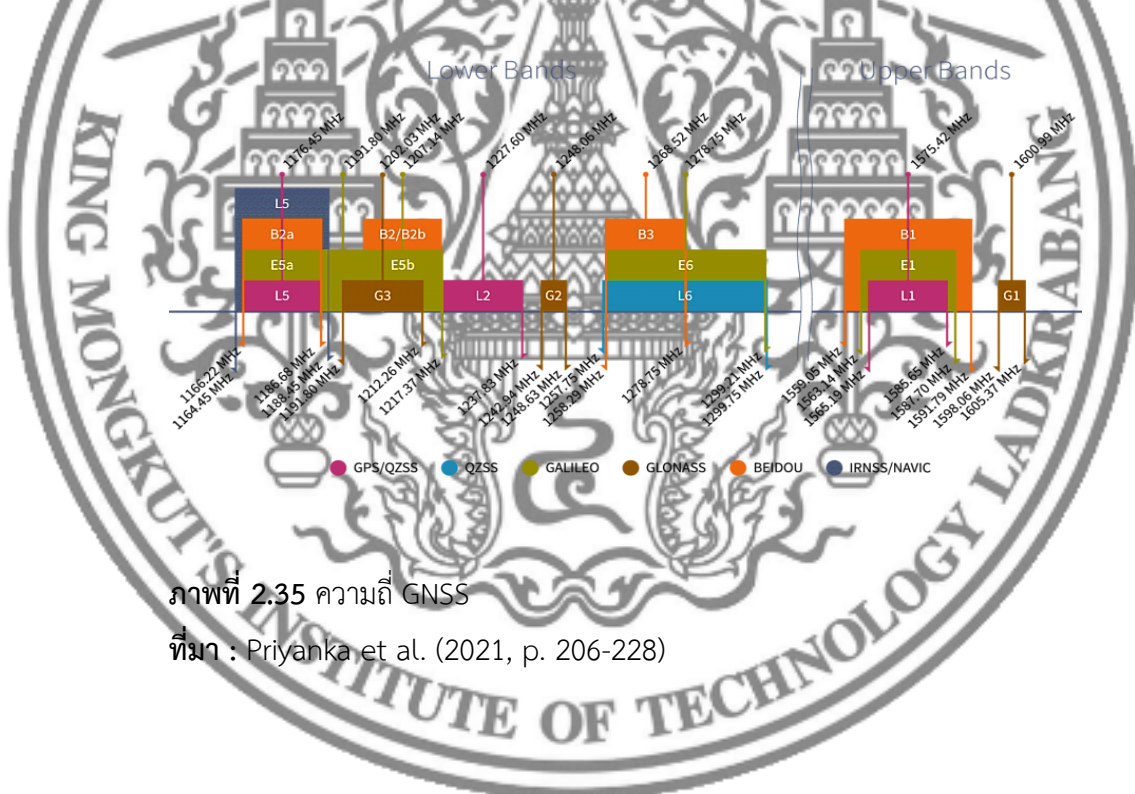
2.4.3.6 ความถี่ IRNSS

IRNSS เป็นโซลูชัน GNSS ที่พัฒนาโดยอินเดีย มันทำงานในสองย่านความถี่ที่มีความถี่กลาง 1,176.45 MHz และ 2,492.028 MHz

(1) IRNSS-1, L5 ความถี่: 1,164.45 MHz-1,188.45 MHz เช่น ความถี่กลาง 1,176.45 MHz พร้อมแบนด์วิดท์ 24 MHz

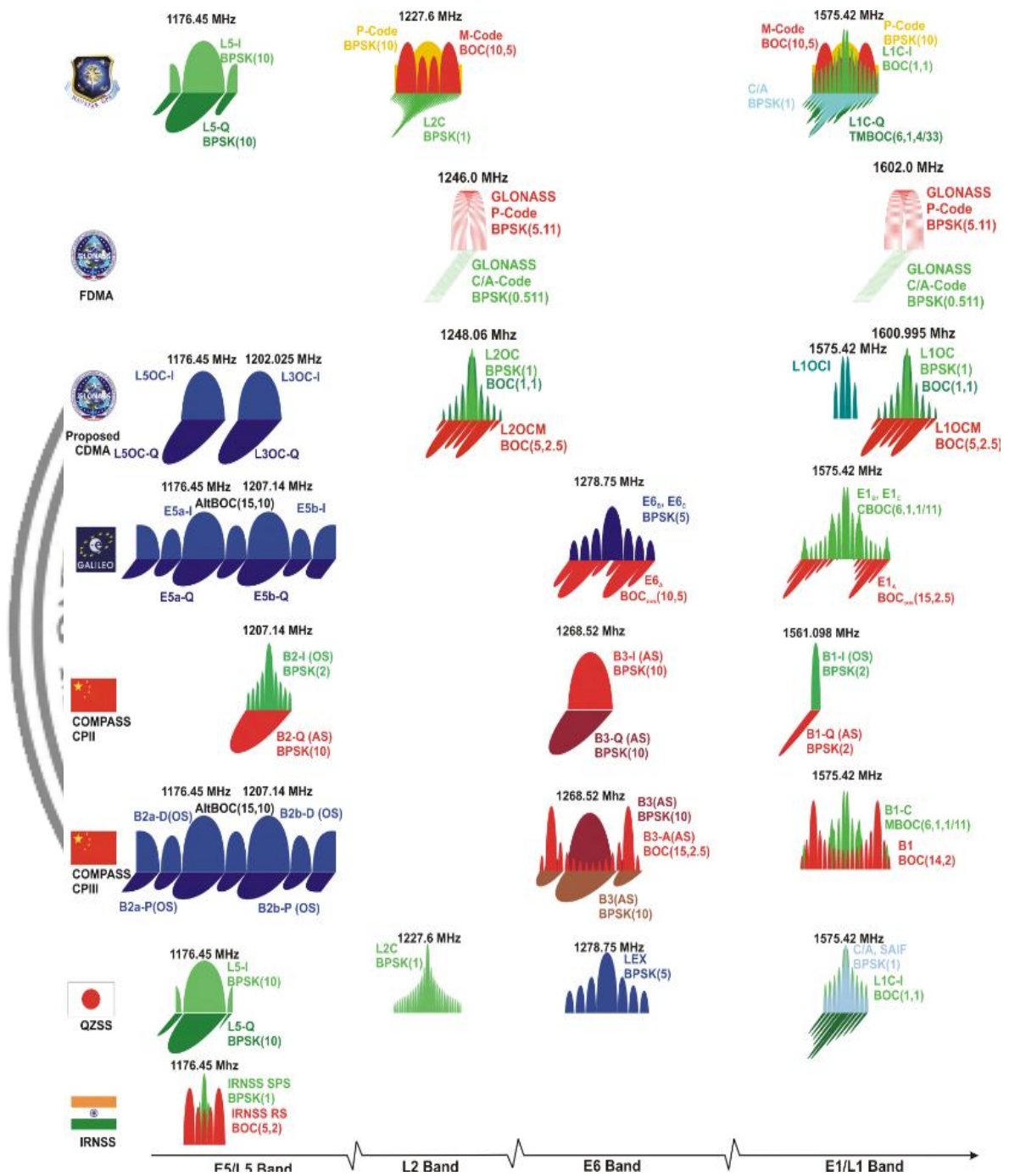
(2) IRNSS-1, S-Band: 2,483.778 MHz-2,500.278 MHz เช่น ความถี่กลาง 1,176.45 MHz พร้อมแบนด์วิดท์ 16.5 MHz

ความถี่และสัญญาณ GNSS สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2.35 และ 2.36



ภาพที่ 2.35 ความถี่ GNSS

ที่มา : Priyanka et al. (2021, p. 206-228)



ภาพที่ 2.36 สัญญาณทั้งหมดของ GNSS
 ที่มา : Subirana et al. (2013, p. 38)

2.5 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก (GNSS Receiver) คือ ระบบรับสัญญาณความถี่ของดาวเทียมในระบบนำทางด้วยดาวเทียม โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อประมวลผลเชิงตำแหน่ง ณ จุดที่อุปกรณ์รับสัญญาณตั้งอยู่ เทคโนโลยีนี้กำลังได้รับความนิยมอย่างมากในงานด้านสำรวจและการวิจัย ซึ่งปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาระบบนำทางด้วยดาวเทียมขึ้นมาหลายระบบ เช่น GPS (USA), GLONASS (Russia), Galileo (Europe), BeiDou (China), QZSS (Japan) และ IRNSS ซึ่งปกติดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก จะแยกระบบของดาวเทียมนำทางทั่วโลกออกจากกัน GPS ก็ใช้เฉพาะในส่วนของ GPS ระบบของ GLONASS ก็ใช้ในส่วนของ GLONASS ใช้ด้วยกันไม่ได้ ยกเว้นแต่ชิปจะถูกออกแบบให้สามารถรับสัญญาณทั้งสองพร้อมกันได้ แต่ถ้าเป็นดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก ที่มีความถี่ทับกันอย่าง BeiDou ของจีน กับ Galileo ของสหภาพยุโรป ก็อาจจะใช้สองคลื่นพร้อมกันไม่ได้เลย เทคโนโลยีความถี่ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกหลายความถี่ (Multi-frequency GNSS technology) ดาวเทียมแต่ละดวงจะใช้ความถี่มากกว่า 1 ความถี่ขึ้นไปในการใช้งานที่หลากหลาย ถ้าหากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมมีความละเอียดในการรับมากเท่าไร ก็จะสามารถรวบรวมข้อมูลได้มากขึ้น การนำข้อมูลมาใช้งานก็จะมีหลากหลายและชัดเจนเชื่อถือได้มากขึ้นเท่านั้น

2.5.1 แบบความถี่เดียว

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกแบบความถี่เดียวซึ่งถูกจำกัดไว้โดยความแม่นยำในด้านการระบุตำแหน่งจากเครื่องรับสัญญาณแบบเอียงสำหรับการบริการระบุตำแหน่งแบบเดิม จุดทำเครื่องหมายบนแผนที่และตำแหน่งโดยประมาณที่สามารถโฟกัสได้ ซึ่งอาจมีความผิดพลาดของตำแหน่งออกไป 2-4 เมตร เครื่องรับความถี่เดียวมีหลายประเภท ได้แก่

2.5.1.1 เครื่องรับความถี่เดียวที่ใช้พลังงานสูง อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถพกพาได้สามารถทำงานได้จากแบตเตอรี่ขนาดเล็ก และจำกัดการใช้พลังงานโดยการปิดเครื่องโดยอัตโนมัติ หากตำแหน่งปรากฏสองครั้งภายในหนึ่งนาที จะเหมาะสำหรับการจัดตำแหน่งส่วนตัว ข้อเสียคือความแม่นยำของตำแหน่งต่ำ ไม่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นได้ และไม่สามารถใช้วัดความเร็วได้

2.5.1.2 เครื่องรับแบบช่องความถี่เดียว เป็นเครื่องรับสัญญาณช่องเดียว มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดระยะห่างจากดาวเทียมทั้งหมดและการรับสัญญาณอย่างต่อเนื่อง วิธีการนี้เพื่อให้ได้ความแม่นยำที่สูงขึ้นในการวัดความเร็ว

2.5.1.3 เครื่องรับความถี่เดียวแบบหลายดาวในเวลาเดียวกัน (Fast-multiplexing single receiver) เครื่องรับนี้สามารถรับดาวเทียมได้หลายดวงพร้อมกัน สามารถปรับเปลี่ยนการรับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เครื่องทำงานอย่างต่อเนื่อง

2.5.1.4 เครื่องรับสัญญาณความถี่เดี่ยวแบบสองช่องสัญญาณ การเพิ่มช่องรับสัญญาณอีกหนึ่งช่องสามารถเพิ่มความสามารถของตัวรับสัญญาณในการรับสัญญาณที่แรงขึ้น

2.5.2 แบบหลายความถี่

เครื่องรับ GNSS แบบหลายความถี่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถรับดาวเทียมได้พร้อมกันตั้งแต่ 4 ดวงขึ้นไป โดยแสดงค่าตำแหน่งและความเร็วตามต้องการทันทีทันใด มีความแม่นยำสูงรวมกับประโยชน์ของการตรวจจับตำแหน่งอย่างต่อเนื่อง เครื่องรับแบบหลายความถี่ สามารถลดผลกระทบของชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ โดยลดข้อผิดพลาดลง ผู้ใช้สามารถได้รับความแม่นยำระดับเซนติเมตรและอัตราการลู่เข้าที่เร็วขึ้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่แม่นยำ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบหลายมีการใช้พลังงานมากเนื่องจาก มีความจำเป็นในการประมวลผล การรับ การติดตาม และการวางตำแหน่ง มีราคาแพงกว่าและต้องใช้ฮาร์ดแวร์พิเศษพร้อมกับสายอากาศที่สามารถรับได้หลายความถี่ ข้อดีอีกประการของการใช้ความถี่หลายความถี่ คือแม้ว่าความถี่หนึ่งจะหายไป แต่อีกความถี่หนึ่งจะยังคงทำงานเป็นข้อมูลสำรองได้

เครื่องรับสัญญาณจะทำการคำนวณเวลาและ ตำแหน่งซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการทดลองทางวิทยาศาสตร์ ระบบนำทางด้วยดาวเทียมที่ครอบคลุมได้ทั่วโลกเรียกว่า ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก GNSS ที่ประกอบด้วยดาวเทียมอยู่ด้วยกันหลายดวง ซึ่งดาวเทียมแต่ละดวงก็จะมีประสิทธิภาพในการทำงานแตกต่างกันออกไป เมื่อมีความถี่ของดาวเทียมอยู่หลายดวงทำให้มีความถี่จำนวนมากขึ้น โดยที่ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกหรือในภูมิภาคมีอยู่ทั้งหมด 6 ระบบ ประกอบด้วย GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS และ IRNSS แต่ระบบก็มีความถี่ที่ต่างกันจึงเรียกความถี่ของระบบนำทางทั่วโลกว่า ความถี่ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกหลายความถี่

เมื่อมีจำนวนระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกมากขึ้นความถี่ก็จะมากขึ้น การรับสัญญาณก็จะต้องมีความแม่นยำในการรับสัญญาณความถี่จากระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก ในการนำอุปกรณ์มารับสัญญาณดาวเทียมนั้นจะต้องเป็นเครื่องรับที่มีประสิทธิภาพสูงในการรับสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่ส่งลงมาจากดาวเทียมมีข้อมูลจำนวนมากและมีความรวดเร็วในการส่งแต่ละครั้ง ถ้าหากต้องการใช้งานในงานระบบอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันก็สามารถที่จะเลือกใช้ตัวรับสัญญาณระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลกได้ไม่ยากนัก ซึ่งมีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาด เพราะส่วนใหญ่จะเป็นการใช้งานในความถี่เดี่ยวและเป็นการใช้งานแบบเฉพาะเจาะจงและไม่ซับซ้อนในการเลือกรับสัญญาณ แต่ถ้าหากใช้ในการรับสัญญาณเพื่อมาทำงานวิจัยหรืองานที่ต้องอาศัยข้อมูลที่มีความละเอียดสูงเพื่อนำข้อมูลมาใช้นั้นจะต้องเลือกเครื่องรับสัญญาณความถี่ดาวเทียมนำทางทั่วโลกที่มีประสิทธิภาพที่ดีมีความไว ความแม่นยำ ความละเอียดสูง ในการรับข้อมูลทุกครั้ง โดยสามารถแสดงเป็นข้อมูลของภาคการรับสัญญาณ GNSS และ ชนิดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนำทางทั่วโลกได้ตามการใช้งาน เครื่องรับดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก (GNSS receiver) มีแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก

เครื่องรับสัญญาณ	รองรับระบบดาวเทียม
 <p>SATLAB สัญญาณดาวเทียม GNSS รุ่น SLX1-NG ที่มา : Gnsurveythai (2024, Online)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - GPS (L1C/A, L1C, L2C, L2P, L5) - GLONASS (L1C/A, L2C/A, L2P, L3, L5) - Galileo (E1, E5 AltBOC, E5A, E5B, E6) - BeiDou (B1, B2, B3) - IRNSS (L5) แบบ QZSS (L1C/A, L1C, L2C, L5, L6) - SBAS (L1, L5) - L-Band (up to 5 channels)
 <p>ComNav สัญญาณดาวเทียม GNSS รุ่น M300 Pro ที่มา : Comnavtech (2024, Online)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - GPS (L1, L2, L2C, L5) - GLONASS (L1, L2, L3) - Galileo (E1, E5 AltBOC, E5a, E5b) - BeiDou (B1, B2, B3)
 <p>Novatel GNSS รุ่น PwrPak7D™ ที่มา : Hexagon (2024, Online)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - GPS (L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5) - GLONASS (L1, L2, L3) - Galileo (E1, E5 AltBOC, E5a, E5b) - BeiDou (B1I, B1C, B2I, B2a, B2b) - QZSS (L1 C/A, L1C, L1S, L2C, L5)

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)



VERIPOS GNSS receiver
รุ่น LD900

ที่มา : Hexagon (2024, Online)

- GPS (L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5)
- GLONASS (L1, L2, L3)
- Galileo (E1, E5 AltBOC, E5a, E5b)
- BeiDou (B1I, B1C, B2I, B2a, B2b)
- QZSS (L1 C/A, L1C, L1S, L2C, L5)



Bynav Technology GNSS receiver
รุ่น X1-6 RTK

ที่มา : Geo-matching (2024, Online)

- GPS (L1 C/A, L2C, L2P)
- GLONASS (G1,G2)
- Galileo (E1, E5b)
- BDS (B1I,B2I)
- BDS-3 (B1C, B2a)
- QZSS (L1 C/A, L2C)
- IRNSS (L5)



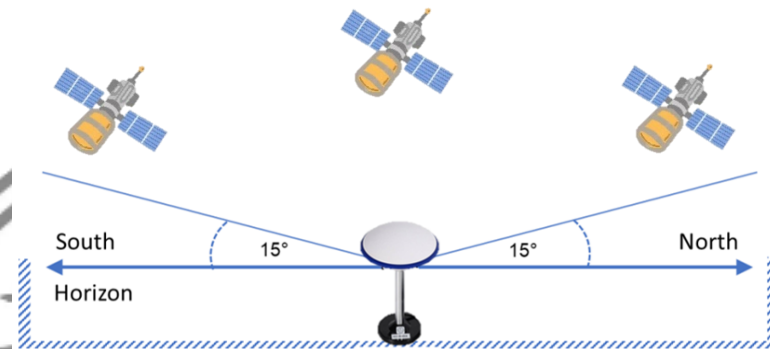
CHCNAV AVAZADA GNSS
รุ่น P5E

ที่มา : Chcnv (2024, Online)

- GPS (L1 C/A, L2C, L2E, L5)
- GLONASS (G1,G2)
- Galileo (E1, E5A, E5B, E5AltBOC, E6⁽²⁾)
- BDS (B1, B2, B3⁽²⁾)
- BDS-3 (B1C, B2a)
- QZSS (L1 C/A, L2C)

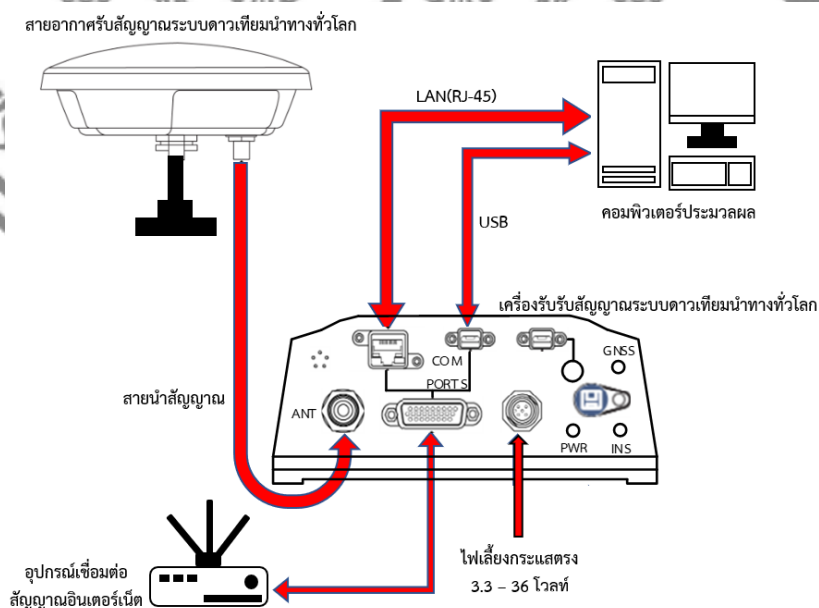
จากตัวอย่างเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก ในตารางที่ 2.1 ยังมีอีกหลายแบบตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปทั้งแบบเครื่องรับสัญญาณแบบหนึ่งความถี่ และเครื่องรับสัญญาณแบบ 2 ความถี่ ที่มีขนาดและรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้วในการตั้งสถานีรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก 1 สถานีจะต้องอาศัยพื้นที่โล่งในการติดตั้งสายอากาศ

รับสัญญาณดาวเทียมที่ไม่มีต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างอยู่ใกล้กึ่งกลางการทำมุมรับ 15° ของแนวระนาบสายอากาศขึ้นไปในแนวตั้งฉากของสายอากาศ แสดงดังภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.37 การติดตั้งสายอากาศเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก

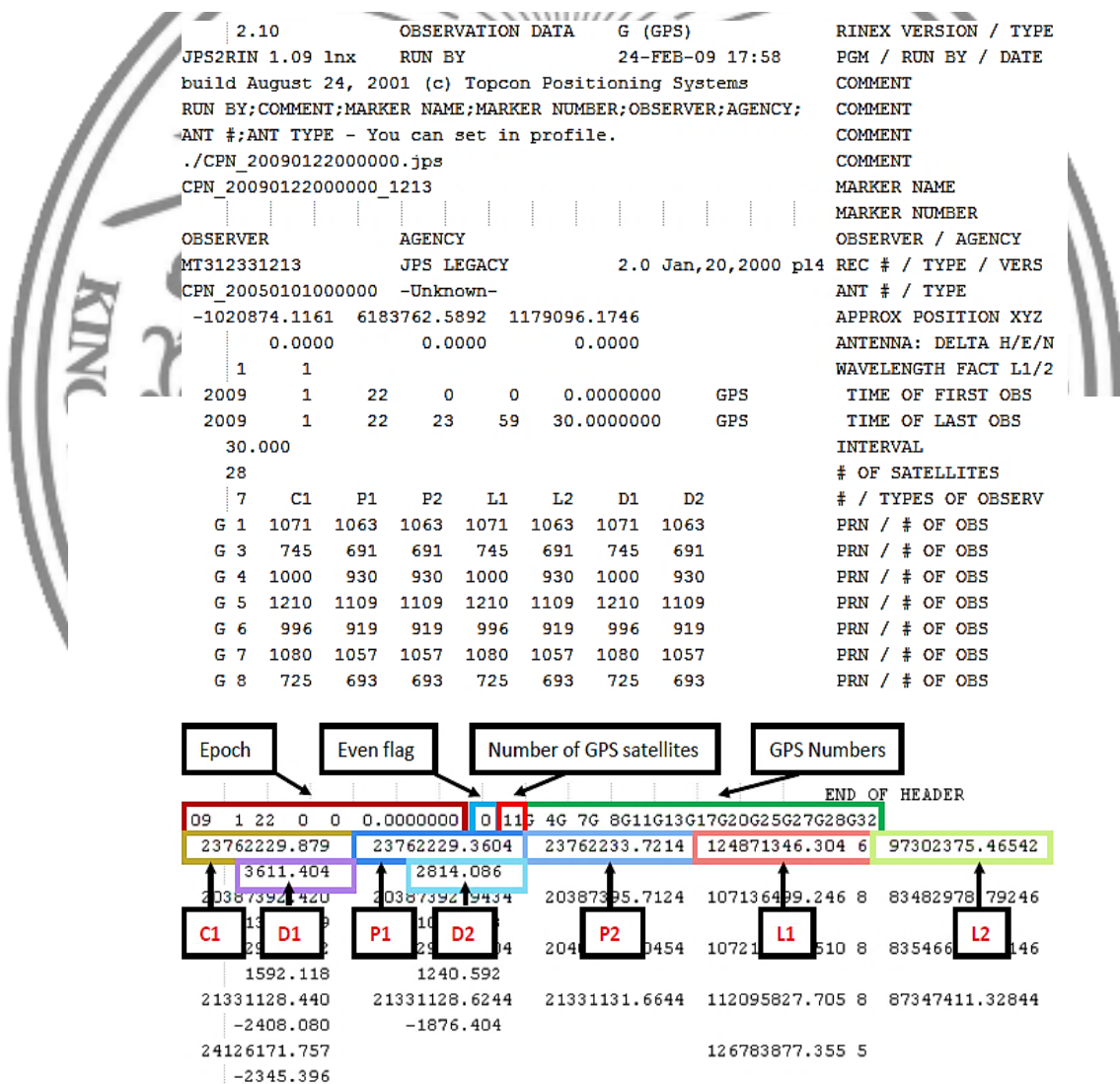
ในส่วนประกอบของการติดตั้งสถานีรับสัญญาณระบบนำทางทั่วโลกจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่จำเป็นต้องมีดังนี้ 1. เครื่องรับสัญญาณแบบหลายความถี่ 2. สายอากาศในการรับสัญญาณ 3. สายนำสัญญาณ 4. เครื่องรับสัญญาณ 5. มีคอมพิวเตอร์ในการควบคุมซอฟต์แวร์และบันทึกข้อมูล 6. ระบบสื่อสารอินเทอร์เน็ต และ 7. ระบบไฟฟ้า สามารถนำมาเขียนเป็นภาพแบบการเชื่อมต่อเป็นระบบในการรับสัญญาณดาวเทียมนำทางทั่วโลก ได้ดังภาพที่ 2.38



ภาพที่ 2.38 การเชื่อมต่อในการรับสัญญาณหลายความถี่ของระบบนำทางทั่วโลก

2.5.3 RINEX format

รูปแบบ Receiver Independent Exchange (RINEX) ได้รับการพัฒนาโดยสถาบันดาราศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเบิร์นเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูล GPS ที่จะรวบรวมในช่วง EUREF 89 ซึ่งเกี่ยวข้องกับเครื่องรับ GPS มากกว่า 60 เครื่องจากผู้ผลิต 4 รายที่แตกต่างกัน ต้นฉบับ RINEX นำเสนอและยอมรับโดยการประชุมวิชาการ Geodetic Nานาชาติครั้งที่ 5 เกี่ยวกับการวางตำแหน่งดาวเทียมใน Las Cruces พ.ศ. 2532 ตัวอย่างแฟ้มสังเกตการณ์แสดงดังภาพที่ 2.39



ภาพที่ 2.39 ไฟล์สังเกตการณ์ RINEX

ที่มา : Kenpankho (2014, p. 29)

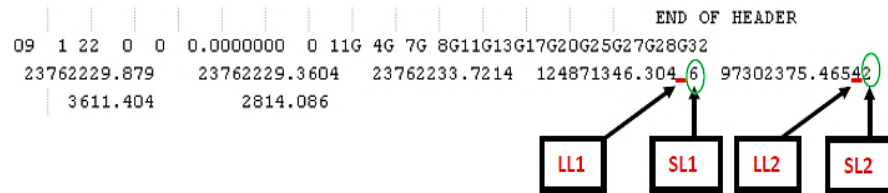
ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้รูปแบบ RINEX เวอร์ชัน 2 และ 3 สำหรับการรับไฟล์ข้อมูล GNSS จาก 6 GNSS ทั่วประเทศไทย รูปแบบ RINEX ประกอบด้วยไฟล์ ASCII สามประเภท ไฟล์ข้อมูลการสังเกต ไฟล์ข้อความการนำทางและไฟล์ข้อมูลอุทุนิยมวิทยา

ไฟล์แต่ละประเภทประกอบด้วยส่วนหัวและส่วนข้อมูล ส่วนหัวประกอบด้วยข้อมูลส่วนกลางสำหรับไฟล์ทั้งหมดและวางไว้ที่จุดเริ่มต้นของไฟล์ ส่วนส่วนหัวประกอบด้วยป้ายชื่อส่วนหัวในคอลัมน์ 61-80 สำหรับแต่ละบรรทัดที่อยู่ในส่วนส่วนหัวเป็นข้อบังคับ และต้องปรากฏตรงตามที่ระบุไว้ในคำอธิบายตัวอย่างนี้

รูปแบบ RINEX ได้รับการปรับให้เหมาะสมสำหรับความต้องการพื้นที่ขั้นต่ำโดยไม่ขึ้นกับจำนวนประเภทการสังเกตที่แตกต่างกันของเครื่องรับสัญญาณหรือระบบดาวเทียมเฉพาะโดยระบุประเภทของการสังเกตที่จะเก็บไว้สำหรับเครื่องรับนี้และระบบดาวเทียมที่สังเกตได้ในส่วนหัว ในระบบคอมพิวเตอร์ที่อนุญาตให้บันทึกความยาวตัวแปรบันทึกการสังเกตอาจถูกเก็บไว้ให้สั้นที่สุด ช่องว่างต่อท้ายสามารถลบออกจากระเบียบได้ ไม่มีการจำกัดความยาวสูงสุดของบันทึกสำหรับบันทึกการสังเกต

ตัวอย่างแฟ้มสังเกตการณ์จากสถานี KMITL ชุมพร แสดงภาพที่ 2.39 มีเจ็ดพารามิเตอร์ในไฟล์การสังเกต RINEX ได้แก่ C1, P1, P2, L1, L2, D1 และ D2 ส่วน L1 และ L2 เป็นการวัดเฟสบนความถี่ L1 และ L2 ของสัญญาณ GPS ตามลำดับ C1 เป็น Pseudoranges โดยใช้ C/A-Code บนความถี่ L1 ส่วน P1 และ P2 เป็น Pseudoranges ที่ใช้ P-Code บนความถี่ L1 และ L2 ตามลำดับ D1 และ D2 เป็นความถี่ Doppler บนความถี่ L1 และ L2

ในไฟล์ RINEX ภาพที่ 2.40 แสดงการสูญเสียการล็อกและความแรงของสัญญาณของสัญญาณ GPS ซึ่งสามารถบันทึกได้โดยใส่หมายเลขรหัสที่ L1 และ L2 LL1 และ LL2 มีไว้สำหรับการสูญเสียการล็อกบนความถี่ L1, L2 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลระบุต่อไปนี้เป็น 0 คือ ตกลง 1 คือ สลึกรอบ 4 คือ ป้องกันการปลอมแปลง และว่างเปล่า คือไม่ทราบ SL1 คือ ความแรงของสัญญาณบนความถี่ L1 และ SL2 คือ ความแรงของสัญญาณสำหรับความถี่ L2 มีระดับช่วงเวลา 1-9 ระดับความแรงของสัญญาณ ความแรงของสัญญาณสูงสุดคือ 9 และความแรงของสัญญาณต่ำสุดคือ 1 ค่า 0 หรือ Blank ไม่เป็นที่รู้จักความแรงของสัญญาณ



ภาพที่ 2.40 การสูญเสียการล็อกและความแรงของสัญญาณ GPS

ที่มา : Kenpankho (2014, p. 30)

ไฟล์นำทาง RINEX แสดงในภาพที่ 2.40 ไฟล์นำทาง RINEX ถูกออกอากาศไปยังผู้ใช้โดยเป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณ GPS ในข้อความนำทาง ซึ่งไฟล์การนำทาง RINEX ประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่อไปนี้ดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ในไฟล์การนำทาง RINEX

PRN	GPS PRN number
M0	Mean anomaly
sqrt(a)	Sqrt (semi-major axis)
Delta n	Variation of mean angular velocity
e	Eccentricity
omega	Argument of perigee
OMEGA	Right ascension
Omega dot	Rate of right ascension
i0	Inclination
idot	Rate of inclination
toe	Time of ephemeris
IODE	Issue of data ephemeris
IODC	Issue of data clock
Cus, Crs, Cic, Crs, Cus, Cis	Correction coefficients
af0, af1, af2	GPS clock bias, clock drift, clock drift rate
toe	Time of ephemeris

ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ใช้ไฟล์ข้อมูลอตุณิยวิทยา อย่างไรก็ตามในภาพที่ 2.41 มีตัวอย่างของไฟล์ข้อมูลอตุณิยวิทยา RINEX version 2

```

2 METEOROLOGICAL DATA RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXM V9.9 AIUB 3-APR-96 00:10 PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MET DATA FILE COMMENT
A 9080 MARKER NAME
3 PR ID HR # / TYPES OF OBSERV
PAROSCIENTIFIC 740-16B 0.2 PR SENSOR MOD/TYPE/ACC
HAENNI 0.1 TD SENSOR MOD/TYPE/ACC
ROTRONIC I-240W 5.0 HR SENSOR MOD/TYPE/ACC
0.0 0.0 0.0 1234.5678 PR SENSOR POS XYZ/H
END OF HEADER

96 4 1 0 0 15 987.1 10.6 89.5
96 4 1 0 0 30 987.2 10.9 90.0
96 4 1 0 0 45 987.1 11.6 89.0

```

ภาพที่ 2.41 ไฟล์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา RINEX version 2

ที่มา : Kenpankho (2014, p. 32)

2.5.4 การหน่วงเวลากลุ่ม GPS และเฟสล่วงหน้า

เฟสและความเร็วกลุ่มของสัญญาณ GPS มีการกำหนดดังนี้

$$v_p = \lambda f \quad (2.20)$$

$$v_g = -\frac{df}{f\lambda} \lambda^2 \quad (2.21)$$

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda} \quad (2.22)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่น และ f คือ ความถี่ ซึ่งไอโอโนสเฟียร์เป็นสื่อกระจายตัวมีผลต่อการแพร่กระจายของสัญญาณจีพีเอส ดังนั้นดัชนีการหักเหของแสงเฟสจะถูกนำเสนอโดย

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \approx 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (2.23)$$

โดยที่ c_i ($i = 2, 3, 4, \dots$) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่ GPS แต่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณ GPS ในขณะที่ดัชนีการหักเหของแสงของกลุ่มเป็นค่าประมาณโดย

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (2.24)$$

โดยที่ c_2 เป็นค่าโดยประมาณ (Seeber, 2003, pp. 88-99) เป็น $c_2 = -40.28Ne [Hz^2]$ จากสมการ 2.23 และ 2.24 แสดงให้เห็นว่า เนื่องจากความเร็วเป็นสัดส่วนผกผันกับดัชนีการหักเหของแสงจึงเห็นได้ชัดว่า เป็นผลให้อิออโนสเฟียร์ทำให้เกิดความล่าช้าของกลุ่มและเฟสชั้นสูง ทั้งระยะล่วงหน้าและความล่าช้าของกลุ่มจะถูกนำมาพิจารณาสำหรับความล่าช้าของไอออโนสเฟียร์ซึ่งทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการสังเกตของ GPS ซึ่งรายละเอียดของการสังเกต GPS จะแสดงในส่วนถัดไป

2.6 ปริมาณอิเล็กตรอนรวม (Total Electron Content)

2.6.1 GNSS TEC

GNSS TEC ย่อมาจาก Global Navigation System Satellite Total Electron Content สามารถได้มาจากความล่าช้าของเวลาเดินทางของสัญญาณ GNSS หลายความถี่ที่ส่งที่เครื่องรับ GNSS รวมถึง Pseudorange และเฟสของผู้ให้บริการ การวัดระยะทางจากดาวเทียม GNSS ไปยังเครื่องรับ GNSS สามารถประมาณได้จากการสังเกตเหล่านั้น ความแม่นยำของการสังเกตทั้งสองขึ้นอยู่กับระบบภายในของดาวเทียมและเครื่องรับ แต่ยังคงรวมถึงสภาพแวดล้อม เช่น ไอออโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์และมัลติพาร์ เฟส Pseudorange และพาหะที่ความถี่ L1 และ L2 ทั้งสองวัดในช่วงดังนี้

$$P_1 = p + c(\tau_{p_1}^r - \tau_{p_1}^s) + I_{p_1} + T + \varepsilon_{p_1} \quad (2.25)$$

$$P_2 = p + c(\tau_{p_2}^r - \tau_{p_2}^s) + I_{p_2} + T + \varepsilon_{p_2} \quad (2.26)$$

โดยที่	P_1	คือ	Pseudorange วัดจากความถี่ L1 ตามรหัส
	P_2	คือ	Pseudorange วัดจากความถี่ L2 ตามรหัส
	p	คือ	ช่วงทางเรขาคณิตจากดาวเทียม S ถึงเครื่องรับ R
	τ^r	คือ	ข้อผิดพลาด Receiver clock
	τ^s	คือ	ข้อผิดพลาดของ Satellite clock
	T	คือ	ค่าหน่วงเวลา Tropospheric
	$I_{p_{1/2}}$	คือ	ค่าหน่วงเวลาของไอออโนสเฟียร์ในการวัดโค้ดบน L1/2
	$\varepsilon_{p_{1/2}}$	คือ	ค่าหน่วงเวลาหลายเส้นทางและค่าหน่วงเวลา/ ข้อผิดพลาดอื่น ๆ ในการวัดรหัสบน L1/L2

$$L_1 = p - I_{p_1} + c(\tau_{p_1}^r - \tau_{p_1}^s) + T + \lambda_1 n_1 + \varepsilon_{L_1} \quad (2.27)$$

$$L_2 = p - I_{p_2} + c(\tau_{p_2}^r - \tau_{p_2}^s) + T + \lambda_2 n_2 + \varepsilon_{L_2} \quad (2.28)$$

โดยที่	L_1	คือ	เฟสของผู้ให้บริการวัดจากความถี่ L_1
	L_2	คือ	เฟสของผู้ให้บริการวัดจากความถี่ L_2
	p	คือ	ช่วงทางเรขาคณิตจากดาวเทียม S ถึงเครื่องรับ R
	τ^r	คือ	ข้อผิดพลาด Receiver clock
	τ^s	คือ	ข้อผิดพลาดของ Satellite clock
	T	คือ	ค่าหน่วงเวลา Tropospheric
	I_{p_2}	คือ	ค่าหน่วงเวลาของไอโอโนสเฟียร์ในการวัดโค้ดบน L_1/L_2
	$\lambda_{1/2} n_{1/2}$	คือ	ความคลุมเครือของวงจรถ่ายจำนวนเต็ม
	ε_{p_2}	คือ	ค่าหน่วงเวลาหลายเส้นทางและค่าหน่วงเวลา/ ข้อผิดพลาดอื่น ๆ ในวัฏรหัสบน L_1/L_2

L_1 , L_2 , P_1 และ P_2 สามารถแยกได้จากไฟล์การสังเกต RINEX ซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 3 ค่า L_1 , L_2 , P_1 (C1 สำหรับรหัส C/A) และค่า P_2 สำหรับดาวเทียม GPS แต่ละดวงจะได้รับจากไฟล์ RINEX ทุก ๆ 30 วินาที จากนั้น TEC ใดๆ สามารถคำนวณได้ในส่วนถัดไป

2.6.2 ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในแนวลาดเอียง (Slant TEC)

ในระบบ GNSS ดาวเทียมทุกดวงส่งสัญญาณที่ความถี่สองความถี่เช่นระบบ GPS, $f_1 = 1575.42$ MHz และ $f_2 = 1227.60$ MHz เครื่องรับ GNSS รับสัญญาณ GPS อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ 4 ถึง 12 สัญญาณซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณค่า Slant TEC (STEC)

STEC จากดาวเทียมไปยังเครื่องรับสามารถรับได้จากความแตกต่างระหว่าง Pseudoranges (P_1 และ P_2) และความแตกต่างระหว่างเฟส L_1 และ L_2 ของความถี่ทั้งสอง (Blewitt, 1990, pp. 199-202; Kenpankho et al., 2014, p. 35) แสดงเป็นสมการที่ 2.29 และ 2.30

$$STEC_P = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (P_2 - P_1) \quad (2.29)$$

$$STEC_L = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \quad (2.30)$$

โดยที่	k	คือ	การหักเหของไอโอโนสเฟียร์คือ $80.62 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$
	λ_1 และ λ_2	คือ	ความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับ f_1 และ f_2 ตามลำดับ

การแก้ไขความคลุมเครือของจำนวนเต็มและอคตินาฬิกาดีฟเฟอเรนเชียลสำหรับ STEC วิธีการที่ง่ายกว่าจะกำจัดความคลุมเครือโดยใช้การปรับระดับเฟสซึ่งเกี่ยวข้องกับการปรับส่วนโค้งต่อเนื่องของ $STEC_L$ เป็นค่าเฉลี่ยของค่า $STEC_p$ ที่สอดคล้องกัน (Mannucci et al., 1998, pp. 565-582; Kenpankho et al., 2014, p. 35) แสดงเป็นสมการที่ 2.31

$$STEC_L = STEC_L + (STEC_p - STEC_L) \quad (2.31)$$

โดยที่ $STEC_p$ และ $STEC_L$ คือ ค่าเฉลี่ยรหัสและเฟสบนค่า STEC

2.6.3 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวตั้ง (Vertical TEC)

Vertical TEC (VTEC) ถูกกำหนดให้เป็นอิเล็กตรอนรวม (eU/m^2) ในแนวตั้งของหน้าตัด $1 m^2$ (Goodwin et al., 1995, pp. 1723-1732) คำจำกัดความนี้สำหรับ GPS TEC คือ VTEC ผ่านจุดเจาะด้วยปัจจัย obliquity (Brunini et al., 2004, pp. 415-429.) VTEC ใน eU/m^2 สามารถคำนวณได้จาก (Ma & Maruyama, 2003, p. 2084; Kenpankho et al., 2014, p. 35) แสดงในสมการ 2.32 ดังนี้

$$VTEC = STEC_L \times \cos \chi \quad (2.32)$$

โดยที่ χ คือ

$$\chi = \arcsin \left(\frac{R_E \cos \alpha}{R_E + h} \right) \quad (2.33)$$

โดยที่ α คือ มุมเงยของดาวเทียม

R_E คือ รัศมีเฉลี่ยของโลก

h คือ ความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็น 400 กม. (Ma & Maruyama, 2003, p. 2084; Kenpankho et al., 2011, p. 366)

STEC ที่คำนวณตามเฟสพาหะในสมการ 2.29 โดยทั่วไปจะมีเสียงดังน้อยกว่าจากสมการ 2.30 อย่างไรก็ตาม ความคลุมเครือในค่าจำนวนเต็มของ L หรือที่เรียกว่าการลื่นไถลของวัฏจักรมักเกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปการแก้ไขสามารถทำได้ด้วยความช่วยเหลือของข้อมูลความแตกต่าง เพื่อให้ได้มาซึ่ง VTEC ดังสมการ 2.34

$$VTEC = (STEC_L - b_s - b_r) \times \cos \chi \quad (2.34)$$

โดยที่ b_s และ b_r คือ ออกติของดาวเทียมและตัวรับสัญญาณโดยประมาณ ออกติของดาวเทียมได้มาจาก NICT ตาม GPS Earth Observation Network (GEONET) ซึ่งจัดตั้งขึ้นโดย Geographical Survey Institute (GSI) ของประเทศญี่ปุ่นซึ่งมีเครื่องรับ GPS มากกว่า 1,000 เครื่องกระจายอยู่ทั่วประเทศญี่ปุ่น (Miyazaki et al., 1997 pp. 23-24; Kenpankho et al., 2014, p. 36) ซึ่งในภาพที่ 2.42 เป็นการคำนวณ VTEC ที่ได้จากเครื่องรับ GPS สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ค่า L_1 , L_2 , P_1 (C_1 สำหรับรหัส C/A) และค่า P_2 สำหรับดาวเทียม GPS แต่ละดวงจะได้รับจากไฟล์สังเกตการณ์ RINEX ทุก ๆ 30 วินาที ค่า L_1 , L_2 , P_1 และ P_2 แสดงดังสมการที่ 2.35 และ 2.36

$$STEC_{P,u}^m = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (P_{2,u}^m(n) - P_{1,u}^m(n)) \quad (2.35)$$

$$STEC_{L,u}^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (L_{1,u}^m(n)\lambda_1 - L_{2,u}^m(n)\lambda_2) \quad (2.36)$$

(2) จัดความคลุมเครือ-ชดเชย โดยวิธีการปรับระดับเฟสดังนี้

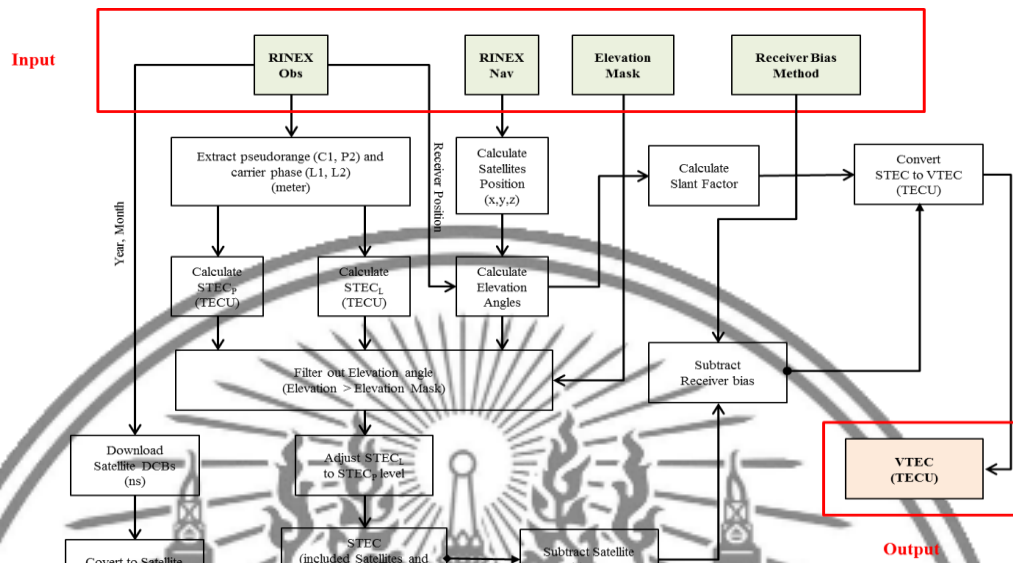
$$STEC_u^m(n) = STEC_{L,u}^m(n) + \left(\overline{STEC_{P,u}^m(n)} - \overline{STEC_{L,u}^m(n)} \right) \quad (2.37)$$

(3) สำหรับการคำนวณมุมสุดยอดข้อมูล ephemeris ดาวเทียมจะได้รับจากไฟล์นำทาง RINEX

(4) ออกติดาวเทียม GPS ได้มาจากรหัส DCB ของดาวเทียมในไฟล์ IONEX

(5) VTEC คำนวณโดยใช้

$$VTEC_u^m(n) = (STEC_u^m(n) - b_s^m - b_r) \times \cos \chi_m \quad (2.38)$$

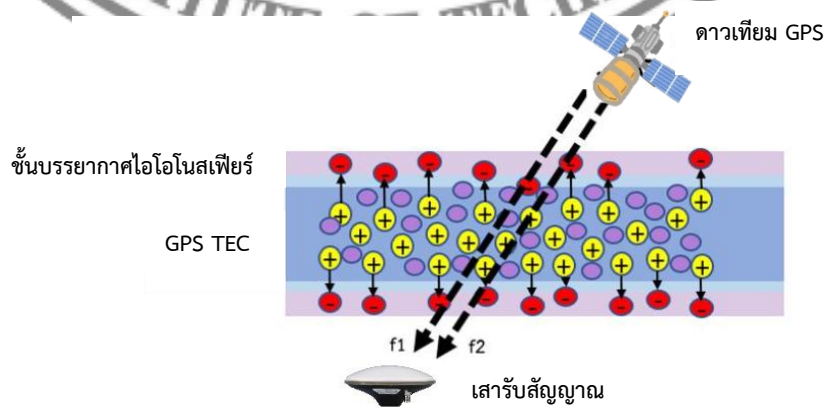


ภาพที่ 2.42 การคำนวณ VTEC ที่ได้จากตัวรับสัญญาณ GPS
ที่มา : Kenpankho (2011, p. 38)

สำหรับมุมมองนี้ VTEC คือ TEC เมื่อ TEC ได้รับจากสัญญาณ GPS TEC จะเรียกว่า GPS TEC ในโครงสร้างของการคำนวณ VTEC จำเป็นต้องแก้ไขอคติตัวรับสัญญาณ GPS (br)

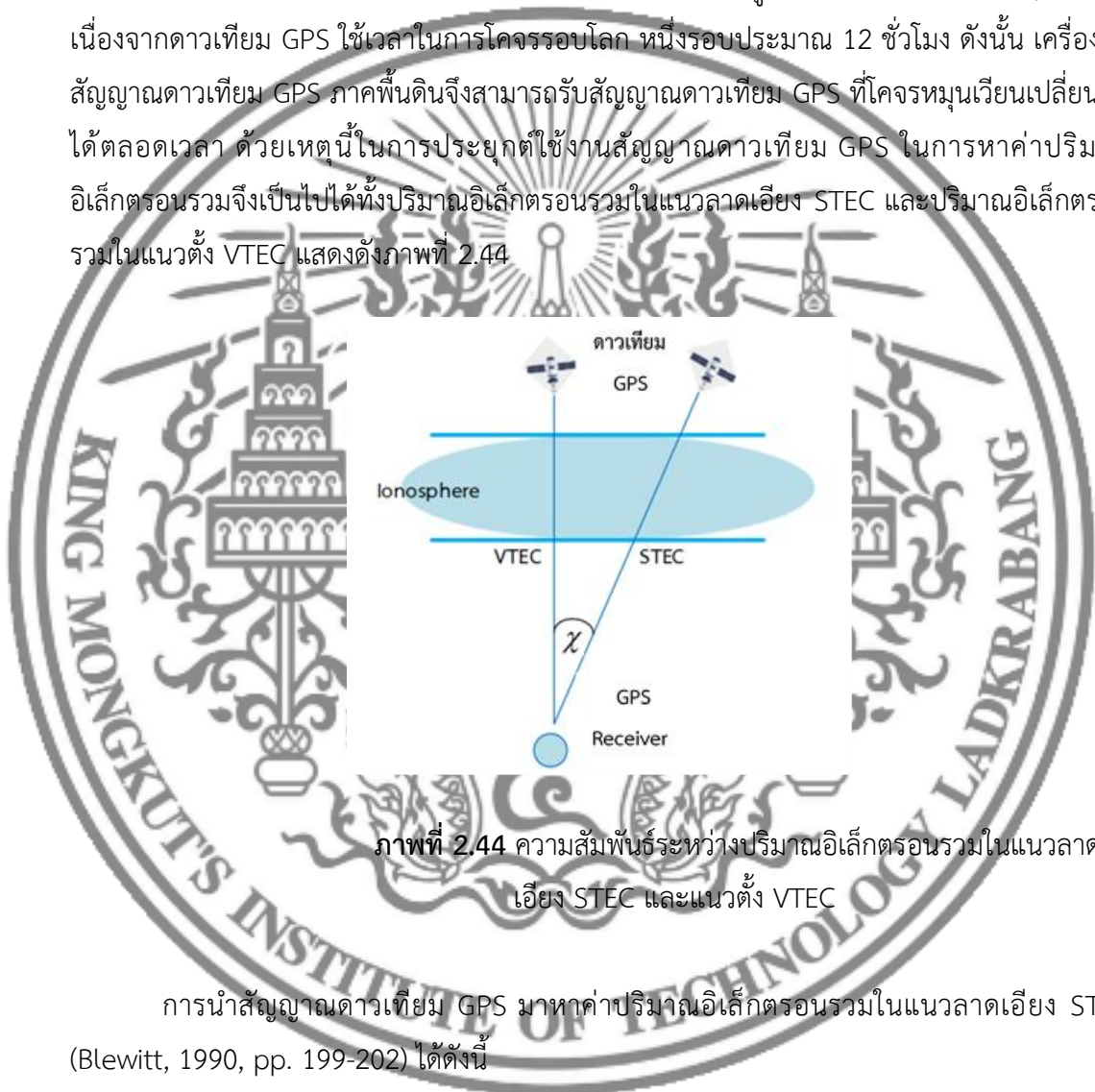
2.6.4 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมจากดาวเทียม (GPS TEC)

จากการศึกษาค่าหน่วงเวลาของสัญญาณดาวเทียม GPS เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้เราสามารถนำค่าหน่วงเวลาของสัญญาณดาวเทียม GPS มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ดังภาพที่ 2.43



ภาพที่ 2.43 GPS TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากภาพที่ 2.43 แสดงสัญญาณดาวเทียม GPS ที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วยปริมาณอิเล็กตรอนรวม ซึ่งปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้ สามารถหาได้จากสัญญาณดาวเทียม GPS เนื่องจากดาวเทียม GPS ที่ใช้งานหลักมี 24 ดวง และสำรองอีก 6 ดวง ดาวเทียม GPS มีความสูงจากพื้นโลกประมาณ 20,200 กม. เนื่องจากดาวเทียม GPS ใช้เวลาในการโคจรรอบโลก หนึ่งรอบประมาณ 12 ชั่วโมง ดังนั้น เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ภาคพื้นดินจึงสามารถรับสัญญาณดาวเทียม GPS ที่โคจรหมุนเวียนเปลี่ยนกันได้ตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ในการประยุกต์ใช้งานสัญญาณดาวเทียม GPS ในการหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมจึงเป็นไปได้ทั้งปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวลาดเอียง STEC และปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวตั้ง VTEC แสดงดังภาพที่ 2.44



การนำสัญญาณดาวเทียม GPS มาหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวลาดเอียง STEC (Blewitt, 1990, pp. 199-202) ได้ดังนี้

$$STEC = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \quad \text{eV/m}^2 \quad (2.39)$$

โดยที่ $STEC$ คือ ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแนวลาดเอียง มีหน่วยอิเล็กตรอนต่อตารางเมตร (eV/m^2)

k	คือ	ดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีค่าเท่ากับ 80.62
f_1	คือ	ความถี่ 1,575.42 MHz
f_2	คือ	ความถี่ 1,227.60 MHz
L_1	คือ	เฟสของสัญญาณ f_1
L_2	คือ	เฟสของสัญญาณ f_2
λ_1	คือ	ความยาวคลื่นของสัญญาณ f_1 เท่ากับ 0.1904 m
λ_2	คือ	ความยาวคลื่นของสัญญาณ f_2 เท่ากับ 0.2444 m

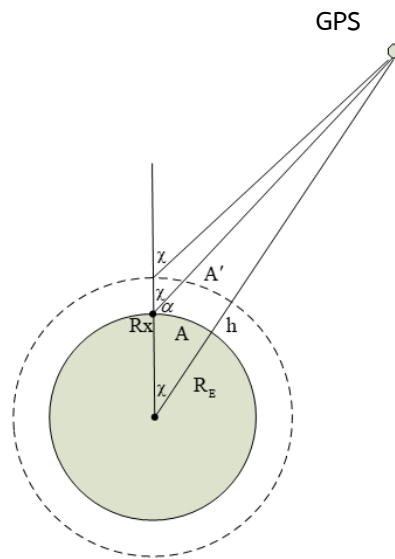
จากการพิจารณาภาพที่ 2.45 เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในแนวลาดเอียง STEC และแนวตั้ง VTEC (Ma & Maruyama, 2003, pp. 2083-2093) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$VTEC = STEC \times \cos x \quad \text{eU/m}^2 \quad (2.40)$$

เหตุผลที่ต้องทำการเปลี่ยนปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในแนวลาดเอียงเป็นปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในแนวตั้ง เนื่องจากการหาค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมนั้นต้องทำให้พื้นที่ของชั้นบรรยากาศที่สัญญาณดาวเทียมผ่านนั้นมีขนาดใกล้เคียงกับหนึ่งตารางเมตรทุกระยะทางที่สัญญาณดาวเทียมดาวเทียม GPS ผ่าน เพราะฉะนั้นปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในแนวตั้ง จะให้ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมที่เที่ยงตรง และเป็นไปตามนิยามมากที่สุดทำให้สามารถกำหนดได้ว่า ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในแนวตั้ง VTEC คือ ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวม TEC ที่เราต้องการหาค่านั้นเอง ดังนั้นเราจะได้ $VTEC = TEC$ สามารถเขียนสมการปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมได้ใหม่ดังนี้

$$TEC = STEC \times \cos x \quad \text{eU/m}^2 \quad (2.41)$$

เมื่อ x คือ มุมเซนทิที่อยู่เหนือแนวเส้นตั้งฉากของเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียม GPS สามารถหาได้โดยการพิจารณาจากภาพที่ 2.45



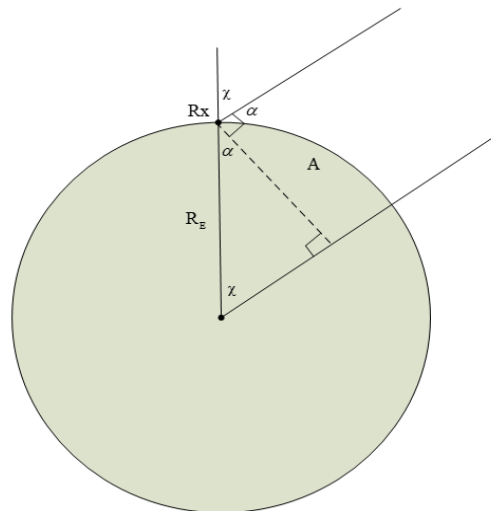
ภาพที่ 2.45 เรขาคณิตของมุม x ที่อยู่เหนือแนวเส้นตั้งฉากของ
เครื่องรับสัญญาณ R_x กับดาวเทียม GPS

จากภาพที่ 2.45 เราจะได้

$$\sin x = \frac{A'}{R_E + h} \quad (2.42)$$

โดยที่ h คือ ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เท่ากับ 400 กม. R_x คือ รัศมีของโลก เท่ากับ 6,371 กม. และ A' คือ ด้านที่ตรงกันข้ามกับมุม x

เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่า ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงของดาวเทียม GPS ดังนั้นเมื่อดาวเทียมมองลงมาผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มายังพื้นโลก จะเห็นเสมือนความยาวของด้าน A' เท่ากับความยาวของด้าน A และเราสามารถ หาความยาวโดยประมาณของด้าน A ได้เมื่อพิจารณารูปทรงเรขาคณิตดังภาพที่ 2.46



ภาพที่ 2.46 เรขาคณิตในการหาความยาวของด้าน

จากภาพที่ 2.46 จะได้ความยาวของด้านตามสมการ

$$A = R_E \cos \alpha \quad (2.43)$$

เมื่อ α คือมุมเงยของเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียม GPS แทนค่าความยาวของด้าน A ลงในสมการเรขาคณิตของมุม x เราจะได้

$$\sin x = \frac{A'}{R_E + h} = \frac{A}{R_E + h} = \frac{R_E \cos \alpha}{R_E + h} \quad (2.44)$$

ดังนั้นเราสามารถหามุม x ได้จาก

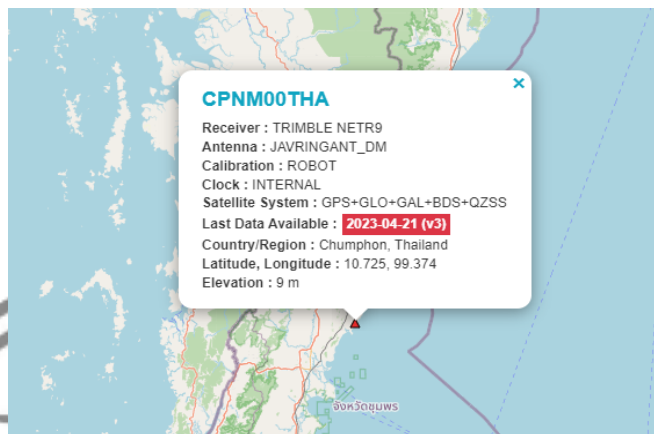
$$x = \arcsin \left(\frac{R_E \cos \alpha}{R_E + h} \right) \quad \text{องศา} \quad (2.45)$$

ประโยชน์ในการศึกษาปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือทำให้เรารู้ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวม และช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่มีผลกระทบต่อการสื่อสารผ่านสัญญาณดาวเทียม และปริมาณอนุภาคของอิเล็กทรอนิกส์ที่

อาจจะทำให้ระบบการทำงานของอุปกรณ์หรือวงจรมีลักษณะต่าง ๆ เกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหายขึ้นได้

2.6.5 ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมจาก International GNSS Service (IGS TEC)

IGS TEC ได้รับการดูแลและตรวจสอบโดย International GNSS Service (IGS) อาศัยเครือข่ายระหว่างประเทศที่มีสถานีรับข้อมูล GNSS หลายความถี่คุณภาพสูง 514 แห่ง ให้บริการสำหรับสมาชิกเครือข่ายของ International Association of Geodesy (IAG), Global Geodetic Observing System (GGOS), International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) และ International Science Council (ISC) World Data System (WDS) สำนักงานกลางในการบริการตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการขับเคลื่อนด้วยไอพ่น ซึ่งดูแลระบบข้อมูลสำนักกลาง (CBIS) และรับประกันการเข้าถึงผลิตภัณฑ์และข้อมูลของ IGS คณะกรรมการกำกับดูแลระหว่างประเทศจะดูแลทุกด้านของ IGS ได้รับการอนุมัติจาก International Association of Geodesy ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 และได้รับการยอมรับในฐานะสมาชิกของ Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services (FAGS) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 ซึ่ง IGS รวบรวม เก็บถาวร และแจกจ่ายชุดข้อมูลการสังเกตการณ์ GPS IGS ให้ข้อมูลแผนที่ TEC และพร้อมใช้งานบน File Transfer Protocol (FTP) สามารถเข้าถึงข้อมูล IGS TEC ได้จาก FTP : <https://igs.org/> ที่ตั้งสถานี IGS มีให้บริการในประเทศไทย และระยะทางที่ใกล้กับแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวมากที่สุด ได้แก่ เชียงใหม่ (18.761° N, 98.932° E), ชุมพร (10.725° N, 99.374° E) และปทุมวัน (13.736° N, 100.534° E) ซึ่งมีที่ตั้งสถานี IGS ในประเทศไทย ดังภาพที่ 2.47 และกระจายชุดข้อมูลการสังเกต GPS IGS ให้ข้อมูลแผนที่ TEC และพร้อมใช้งานบน FTP สามารถเข้าถึงข้อมูล IGS TEC ได้จากไซต์ FTP : <https://igs.org/> ที่ตั้งสถานี IGS มีให้บริการในประเทศไทย และระยะทางที่ใกล้กับแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวมากที่สุด ได้แก่ เชียงใหม่ (18.761° N, 98.932° E), ชุมพร (10.725° N, 99.374° E) และปทุมวัน (13.736° N, 100.534° E) ที่ตั้งสถานี IGS ที่มีอยู่ในประเทศไทย ดังภาพที่ 2.48



ภาพที่ 2.47 สถานี IGS ณ จังหวัดชุมพร
ที่มา : IGS (2024, Online)

Site	Country/Reg...	Latitude	Longit...	Heigh...	Receiver
CPNM00THA	Thailand	10.725	99.374	9.143	TRIMBLE NETR9
CUSV00THA	Thailand	13.736	100.534	76.060	JAVAD TRE_3 DELTA
CUUT00THA	Thailand	13.736	100.534	74.296	TRIMBLE NETR9
CMUM00THA	Thailand	18.761	98.932	308.962	TRIMBLE NETR9

ภาพที่ 2.48 สถานี IGS ที่มีให้บริการในประเทศไทย
ที่มา : IGS (2024, Online)

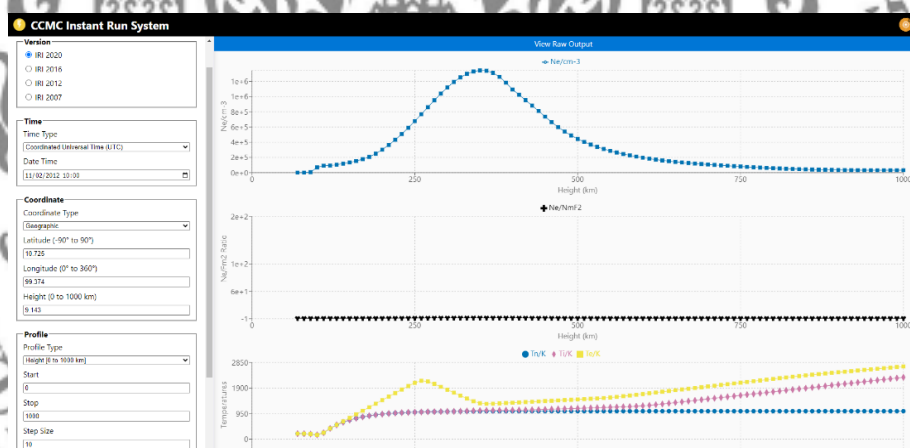
2.6.6 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมจาก International Reference Ionosphere (IRI TEC)

International Reference Ionosphere (IRI) เป็นโครงการระดับนานาชาติที่ได้รับการสนับสนุนโดยคณะกรรมการวิจัยอวกาศ (COSPAR) และสหภาพวิทยาศาสตร์ระหว่างประเทศ (URSI) องค์กรเหล่านี้จัดตั้งคณะกรรมการ ในช่วงปลายทศวรรษที่ 60 เพื่อผลิตแบบจำลองมาตรฐานเชิงประจักษ์ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 8 ด้าน คือ 1. การศึกษาอวกาศของพื้นผิวโลกอุตุนิยมวิทยาและสภาพภูมิอากาศ 2. การศึกษาอวกาศของระบบโลก-ดวงจันทร์ ดาวเคราะห์ และวัตถุขนาดเล็กของระบบสุริยะ 3. การศึกษาอวกาศชั้นบรรยากาศชั้นบนของโลกและดาวเคราะห์รวมถึงชั้นบรรยากาศอ้างอิง 4. พลาสมาอวกาศในระบบสุริยะรวมถึงแมกนีโตสเฟียร์ของดาวเคราะห์ 5. การวิจัยด้านฟิสิกส์ดาราศาสตร์จากอวกาศ 6. วิทยาศาสตร์เพื่อชีวิตที่เกี่ยวข้องกับอวกาศ 7. วัสดุศาสตร์ในอวกาศ และ 8. ฟิสิกส์พื้นฐานในอวกาศ ได้รับการสนับสนุนโดย Committee on

space Research (COSPAR) และ International Union of Radio Science (URSI) ให้ใช้ฟรีผ่านเว็บไซต์ผู้ใช้งานสามารถระบุพารามิเตอร์อินพุต และเลือกพารามิเตอร์เอาต์พุตที่ต้องการได้

นอกจากนี้แล้วยังสามารถหาค่าอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้จากแบบจำลอง IRI ที่มีชื่อว่า IRI TEC และแบบจำลอง IRI TEC จะทำบันทึกข้อมูลใหม่ ๆ ไว้ทุกครั้งที่มีการใช้งาน โดยข้อมูลที่ได้จาก IRI TEC ถูกนำไปอ้างอิงในงานวิจัยของ IRI หลายผลงาน สามารถใช้งานแบบจำลอง IRI (2020) | Community Coordinated Modeling Center: CCMC (nasa.gov) ที่ <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/IRI~2020/>

หากต้องการข้อมูลที่อัปเดตถึงปี พ.ศ. 2565 ให้เข้าหน้าหลัก IRI : Instant Run (nasa.gov) หรือ <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/iri/> จะปรากฏหน้าหลักของ IRI ภาพที่ 2.49 ตัวอย่างหน้าหลักของแบบจำลอง IRI ของ จ.ชุมพร (10.725° N, 99.374° E) ที่เป็นข้อมูลปี พ.ศ. 2567



ภาพที่ 2.49 หน้าหลักของแบบจำลอง IRI ของ จังหวัดชุมพร
ที่มา : CCMC (2024, Online)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีดังนี้

Ansari et al. (2023, pp. 226-234) ได้มีการศึกษาลักษณะ TEC เชิงปริภูมิของไอโอโนสเฟียร์จากสิ่งที่สังเกตได้จากดาวเทียม GPS ในภูมิภาคหมู่เกาะสفالบาร์ดในช่วงปีพ.ศ. 2563-2565 และความสัมพันธ์กับแผนที่ไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกแบบอินเทอร์โพลตบิลิเนียร์ (GIM) และแบบจำลอง

ไอโอโนสเฟียร์อ้างอิงระหว่างประเทศ (IRI-2020) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทั้ง GPS-TEC และ GIM-TEC มี TEC ในไอโอโนสเฟียร์น้อยที่สุดในช่วงฤดูหนาว และ TEC เกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงฤดูร้อน และฤดูใบไม้ผลิ โดยมีความแตกต่างของขนาดที่สูงกว่า จึงต้องข้อสังเกตว่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว อาจเกิดจากความไม่แน่นอนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการประมาณค่าการสอดแทรก GIM-TEC ในภูมิภาค

Bojilova et al. (2023, pp. 1-23) เปรียบเทียบและวิเคราะห์การตอบสนองของไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกและระดับภูมิภาคในช่วงพายุแม่เหล็กโลก 2 ครั้งในวันที่ 3-4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ใน การศึกษานี้ ได้มีการเปรียบเทียบการตอบสนองของไอโอโนสเฟียร์โดยอิงจากสถานีไอโอโนสเฟียร์ 6 สถานีและข้อมูล TEC ที่ใกล้ที่สุดตามจุดพิกัดจากฐานข้อมูล CODE และ Madrigal ผลการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่าภูมิภาคที่ศึกษาในช่วง 40° N และ 54° N มีลักษณะการตอบสนองเชิงบวกในช่วงเวลา ใกล้เที่ยงวันและเชิงลบในช่วงเวลาใกล้พระอาทิตย์ตก ในเวลากลางคืน การตอบสนองจะใกล้เคียงกับ ศูนย์เนื่องจากพายุแม่เหล็กโลกสงบลง

Ratovsky et al. (2022, pp. 1-15) ตรวจสอบความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ไอโอโนสเฟียร์ที่ รุนแรงกับกิจกรรมทางธรณีวิทยาและอุตุนิยมวิทยา จากชุดการสังเกตการณ์ระยะยาวที่ Irkutsk (52° N, 104° E) และ Kaliningrad (54° N, 20° E) จึงได้ชุดข้อมูลของการรบกวนในชั้นบรรยากาศไอโอ โนสเฟียร์ ซึ่งถือเป็นค่าเบี่ยงเบนสัมพันธ์ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดที่สังเกตได้จาก ความถี่ฐานเคลื่อนที่ตลอด 27 วัน สำหรับการรบกวนที่รุนแรงที่สุด พิจารณาจากกรณีที่ค่าการ รบกวนนั้นมากกว่า 150% สำหรับแหล่งที่อาจเกิดการรบกวนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง พิจารณาถึงภาวะโลกร้อนฉับพลันในชั้นสตราโตสเฟียร์ พายุแม่เหล็กโลกตามเกณฑ์ Dst 30 nT และ พายุแม่เหล็กโลกที่เกิดซ้ำซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามเกณฑ์ Dst

Kenpankho et al. (2021, pp. 2152-2159) ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าตัวรับสัญญาณ GPS แบบเรียลไทม์ สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการประมาณค่าตัวรับ สัญญาณ GPS พหุนามการลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวิธีการประมาณค่าตัวรับสัญญาณ GPS และ วิธีการแก้ไขแบบ Lagrange แสดงให้เห็นว่าเวลาที่คำนวณได้สำหรับการแก้ไข Lagrange นั้นสั้นกว่า เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ และสามารถได้รับจุดเวลาในการค้นหาคัดตัวรับสัญญาณ GPS มากกว่าวิธีอื่น

Maltseva (2021, pp. 261-268) ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ TEC และค่า foF2 โดยใช้ข้อมูลจากระบบดาวเทียม GPS ในเดือนมีนาคม ระหว่างปี พ.ศ. 2553-2560 ที่มีการรบกวน มากที่สุดจากสถานีแอนตาร์กติกในซีกโลกใต้ (ไม่มีการรบกวนในเดือนมีนาคม 2014) งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่อิทธิพลของสภาพอากาศในอวกาศที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของไอโอโนส เฟียร์ TEC และ foF2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงในพารามิเตอร์ของทั้ง TEC และ foF2 สะท้อน ถึงธรรมชาติของการรบกวนในไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงในกรณีของการขยายสัญญาณในระยะยาวของ TEC และ foF2 ซึ่งไม่เกี่ยวข้องข้อกับพายุแม่เหล็กโลก จุดเน้นอยู่ที่ความเป็นไปได้ในการสร้างช่องว่าง

foF2 ขึ้นใหม่โดยใช้แบบจำลอง IRI และความหนาที่เทียบเท่าของไอโอโนสเฟียร์ จะเห็นได้ว่าในความหมายทางภูมิอากาศแบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ ตอบสนองต่อการรบกวนเชิงลบที่รุนแรง แต่ไม่ได้ประสานกับความแปรผันเชิงบวกของ foF2 การใช้ตัวเลือกต่าง ๆ สำหรับการกำหนดค่า τ (ค่ามัธยฐานของสถานีที่กำหนด ค่ามัธยฐานของสถานีอื่น ค่ามัธยฐานของปีต่าง ๆ) ร่วมกับค่าของ TEC จะช่วยปรับปรุงความสอดคล้องกับfoF2 ซึ่งเป็นจริงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับช่วงเวลาที่ยาวนานของการเพิ่มของ TEC (5-7 วัน) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพายุแม่เหล็กโลก ความสอดคล้องที่ดีระหว่าง TEC และ foF2 บ่งชี้ว่า TEC สะท้อนถึงธรรมชาติของความแปรผันใน foF2

Nishioka et al. (2021, pp. 1-12) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณอิเล็กตรอนรวมไอโอโนสเฟียร์ (TEC) การประมาณการระยะยาวของ TEC ที่รุนแรงในญี่ปุ่น การศึกษาคือการประมาณค่า TEC ที่รุนแรงด้วยการเกิดขึ้นปีละครั้ง 10 ปี และ 100 ปี ในญี่ปุ่น เพื่อประเมินค่าที่รุนแรงของ TEC ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของ TEC รายวันได้มาจากการใช้ข้อมูล TEC รวม 22 ปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 ถึง พ.ศ. 2561 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า TEC หนึ่งครั้งต่อ 100 ปีอยู่ที่ประมาณ 150-190 TECU ที่โตเกียว ค่านี้ยังอยู่ที่ประมาณ 180-230 TECU ในคาโกชิม่าและ 120-150 TECU ในฮอกไกโดทางตอนใต้และตอนเหนือของญี่ปุ่น ตามลำดับ

Chernyshov et al. (2020, pp. 1-13) รายงานความสัมพันธ์ระหว่างการพุ่งสูงของ TEC และพายุย่อยออโรราในไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดสูง ผลที่ได้คือความสัมพันธ์นี้เกิดขึ้นในช่วงการฟื้นตัวของพายุย่อยแม่เหล็กโลก ซึ่งมีแนวโน้มสูงที่เกี่ยวข้องกับวิวัฒนาการของความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของพลาสมาในไอโอโนสเฟียร์ละติจูดสูงที่ถูกกระตุ้นระหว่างกิจกรรมแม่เหล็กโลก

Dugassa et al. (2019, pp. 1161-1180) ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความชันเชิงพื้นที่ของปริมาณอิเล็กตรอนรวม (TEC) ระหว่างสองสถานีใกล้เคียง (ASAB: 4.34° N, 114.39° E และ DEBK: 3.71° N, 109.34° E) ซึ่งอยู่ภายในบริเวณเส้นศูนย์สูตร เหนือเอธิโอเปีย ผลการศึกษาเผยให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพและการลดลงสูงสุดส่วนใหญ่ในความชันเชิงพื้นที่ของ TEC สังเกตได้ในช่วงเวลาระหว่าง 19:00-24:00 น. LT ในบางกรณี ค่าสูงสุดในการไล่ระดับเชิงพื้นที่ของ TEC ยังสังเกตได้ในช่วงเวลากลางวันและหลังเที่ยงคืน ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของดัชนีที่ได้จาก TEC (ROTI, ROTI_{ave}) ถูกนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความชันเชิงพื้นที่ของ TEC และ ROTI_{ave} มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ $C=0.7975$ และ $C=0.7915$ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ ASAB และ DEBK ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นและลดลงสูงสุดส่วนใหญ่ที่สังเกตพบในช่วงเวลาเย็นอาจเกี่ยวข้องกับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือพองพลาสมาบริเวณเส้นศูนย์สูตร นอกจากความชันในละติจูดแล้ว ความชันในลองจิจูดของ TEC ยังมีส่วนสำคัญต่อความผันผวนของ TEC

Reddybattula et al. (2019, pp. 283-292) การวิเคราะห์ TEC ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จาก GPS แผนที่ไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลก (GIM) และแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกระหว่างพายุแม่เหล็กโลกระดับปานกลาง รุนแรง และรุนแรงเหนือภูมิภาคอินเดีย จากการศึกษาเผยให้เห็นว่าเหตุการณ์ทางไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงประมาณครึ่งหนึ่งอาจเกี่ยวข้องกับพายุทางธรณีแม่เหล็กตามเกณฑ์ $Dst \leq 30$ nT หรือภาวะโลกร้อนฉับพลันในชั้นสตราโตสเฟียร์ การพิจารณาพายุทางธรณีแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทำให้สามารถค้นหาแหล่งที่มาของเหตุการณ์ทางไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงเกือบทั้งหมดได้ โดยความแตกต่างในแต่ละครั้งที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้ด้วยละติจูดแม่เหล็กโลกที่สูงกว่าในแต่ละพื้นที่และด้วยอัตราการรวมตัวที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นภายใต้สภาวะพายุ

de Paula et al. (2019, pp. 1-15) วิเคราะห์พฤติกรรมความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ในช่วงพายุแม่เหล็กโลกวันที่ 6-10 กันยายน พ.ศ. 2560 เหนือเส้นศูนย์สูตรละติจูดต่ำของประเทศบราซิล พบว่ามีความผันผวนอย่างมากในคืนที่มีพายุในวันที่ 7-8 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบในละติจูดของพายุต่อความผิดปกติของพลาสมา จึงใช้ข้อมูล GPS จากเครื่องรับ Novatel จำนวน 6 เครื่อง การเคลื่อนที่ของพลาสมาในแนวตั้งในช่วงกลางวันถูกกำหนดโดยใช้ข้อมูลแมกนีโตมิเตอร์ และในช่วงเย็นโดยใช้ข้อมูลไอโอโนแกรม เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงวันที่เงียบสงบในเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 ดัชนีประกายแสงของแอมพลิจูด VHF และ GPS S4 เพิ่มขึ้นอย่างมากในคืนวันที่ 7-8 เมื่อมีการเพิ่มความเข้มขึ้นอย่างมากในครีฟต์พลาสมาแนวตั้ง เนื่องจากการแทรกซึมอย่างรวดเร็วภายใต้สนามไฟฟ้าแมกนีโตสเฟียร์ที่ป้องกันของขั้วตะวันออก ในทางกลับกัน ในคืนวันที่ 8-9 ประกายแสงของไอโอโนสเฟียร์ถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์เนื่องจากสนามไฟฟ้าไดนาโมรบกวนของขั้วตะวันตกที่เกี่ยวข้องกับพายุลูกแรกและลูกที่สอง การเคลื่อนที่แบบโซนที่ผิดปกติที่วัดโดยเครื่องรับ VHF รอบ ๆ 24 UT (21 LT) นั้นเคลื่อนไปทางตะวันออกในคืนวันที่ 5-6 และวันที่ 6-7 อย่างไรก็ตาม ในคืนวันที่ 7-8 การเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นทิศตะวันตก

Chen et al. (2017, pp. 3632-3639) ผลของกิจกรรมทางธรณีแม่เหล็กจากข้อมูล TEC การเปรียบเทียบระหว่างสี่สเปกตรัมกับค่ามัธยฐาน 28 วัน การวิเคราะห์ TEC ไอโอโนสเฟียร์จาก GPS, Global Ionosphere Map (GIM) และแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกในช่วงพายุแม่เหล็กระดับปานกลาง แรงแรง และรุนแรงเหนือภูมิภาคอินเดีย พวกเขาพบว่าความแปรปรวนของไอโอโนสเฟียร์ในระหว่างสภาวะที่เงียบ และถูกรบกวนได้รับการวิเคราะห์โดยทั้ง Spectral Whitening Method (SWM) และ Running Median Centered (RMC) ผลลัพธ์จาก RMC เมื่อเทียบกับจาก SWM ประเมินค่าสูงแสดงว่าเกิดการรบกวนประมาณ 5-20% ในช่วงพายุ Geomagnetic และสูงถึง 35% ในช่วงเวลาที่เงียบสงบ

Klimenko et al. (2017, pp. 923-938) วิเคราะห์การสังเกตภาคพื้นดินและการจำลองแบบจำลองของการรบกวนความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในสามภาคส่วน

ตามยาว (ยุโรปตะวันออก ไซบีเรีย และอเมริกา) ระหว่างพายุแม่เหล็กโลกที่เกิดขึ้นในวันที่ 26–30 กันยายน พ.ศ. 2554 โดยใช้แบบจำลองเทอร์โมสเฟียร์ ไอโอโนสเฟียร์ และโปรโตโนสเฟียร์แบบสอดคล้องกันทั่วโลก (GSM TIP) เพื่อเปิดเผยกลไกหลักที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของปริมาณอิเล็กตรอนรวม (TEC) และความถี่วิกฤตสูงสุดของ F2 ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (foF2) ในช่วงต่าง ๆ ของพายุแม่เหล็กโลก ผลคือการรบกวนเชิงลบใน TEC และ foF2 ที่ละติจูดสูงนั้นเกิดจากการลดลงของอัตราส่วน $n(O)/n(N_2)$ ตลอดช่วงพายุเกือบทั้งหมด ในเวลากลางคืน แม้ว่า $n(N_2)$ จะลดลง แต่ผลกระทบต่อเชิงลบใน foF2 ที่ละติจูดกลาง และละติจูดต่ำนั้นเกิดจากการที่หลอดพลาสมาเต็มไม่เพียงพออันเป็นผลจากการหมดลงของหลอดพลาสมาในช่วงหลักของพายุแม่เหล็กโลก

Nava et al. (2016, pp. 3421-3438) วิจารณ์การตอบสนองของไอโอโนสเฟียร์ละติจูดกลางและต่ำต่อพายุแม่เหล็กของโลกในวันเซนต์แพทริกปี พ.ศ. 2558 โดยเปรียบเทียบสถานีละติจูดกลางสองแห่ง ได้แก่ wuhn (ซีกโลกเหนือ) และ yar2 (ซีกโลกใต้) และสถานีละติจูดต่ำ cusv (ซีกโลกเหนือ) ซึ่งสังเกตเห็นการลดลงอย่างมากของ TEC ในช่วงหลายวันหลังจากเกิดพายุที่ละติจูดกลาง พบว่า TEC เพิ่มขึ้นในวันที่เกิดพายุ และไม่ลดลงในวันต่อมาที่ละติจูดต่ำ การสังเกตเหล่านี้สอดคล้องกับแผนที่ของภาคเอเชีย และแผนที่ระบุว่าในวันหลังจากเกิดพายุไอออโนสเฟียร์จะถูกจำกัดไว้ที่ละติจูดต่ำใกล้เส้นศูนย์สูตร และเกือบจะหายไปที่ละติจูดกลาง

Rao et al. (2013, pp. 1-6) เปรียบเทียบความแปรผันของปริมาณอิเล็กตรอนรวม (TEC) โดยใช้การสังเกตจากเครื่องรับ GPS สองเครื่องที่ตั้งอยู่ที่สถานีที่มีสนามแม่เหล็กเชื่อมกันใกล้กับยอดของความผิดปกติของการแตกตัวของไอออนบริเวณเส้นศูนย์สูตร ได้แก่ สถานีอู๋ตยู่ ประเทศอินเดียในซีกโลกเหนือ และสถานีดิเอโก การ์เซียในซีกโลกใต้ ซึ่งตั้งอยู่ในลองจิจูดทางภูมิศาสตร์ที่ใกล้เคียงกัน การศึกษาเผยให้เห็นว่า TEC มีความแปรผันแบบ semi-annual ที่สูงขึ้นในช่วง equinoxes ซึ่งมากกว่าช่วง solstices การค้นพบที่สำคัญประการหนึ่งของงานนี้คือในซีกโลกเหนือแอมพลิจูดของดวงอาทิตย์ในฤดู winter จะเล็กกว่าช่วงฤดู summer ในขณะที่แอมพลิจูดของดวงอาทิตย์ในฤดู winter จะใกล้เคียงหรือสูงกว่า (ซึ่งโดยปกติเรียกว่า “ความผิดปกติของฤดู winter” ในละติจูดกลาง) จึงสรุปได้ว่า “ความผิดปกติของฤดู winter” ที่ละติจูดต่ำนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่แตกต่างอย่างสิ้นเชิงจากปรากฏการณ์ที่สังเกตได้ในละติจูดกลาง

Kenpankho et al. (2011, p. 365-370) นำเสนอเกี่ยวกับการเปรียบเทียบการวัด GPS TEC กับการคาดการณ์ IRI TEC ที่สถานีละติจูดเส้นศูนย์สูตรจังหวัดชุมพรประเทศไทยพวกเขาพบว่า TEC ที่ได้มาจากแบบจำลอง IRI-2007 สอดคล้องกับข้อมูล GPS TEC ส่วนใหญ่ในเวลาเช้า แต่โดยทั่วไปจะประเมินค่า GPS TEC ต่ำเกินไป ความแตกต่างสูงสุดคือประมาณ 15 TECU ในช่วงกลางวันและ 5 TECU ในเวลากลางคืน การประเมินค่าต่ำเกินไปจะเห็นได้ชัดในเวลากลางวันมากกว่าในเวลากลางคืน

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยของความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมในระบบ GNSS และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร นำมาวิเคราะห์ พร้อมหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ศึกษาสนามแม่เหล็กโลก

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กโลกโดยสถานีสังเกตการณ์ Geomagnetic station การติดตั้งเครื่องวัดสนามแม่เหล็กฟลักซ์เกต ในโครงการวิจัยแผ่นดินไหว APSCO ระยะที่ 2 การบูรณาการดาวเทียมและพื้นดิน KMITL ชุมพร ได้รับเลือกให้เป็นสถานีสังเกตการณ์ทางธรณีวิทยา ตามสถานการณ์ปัจจุบันของสถานที่เบื้องต้นจำเป็นต้องมีการก่อสร้าง 2 แห่ง ที่แรกอาคารสังเกตการณ์ที่วางเซ็นเซอร์ อีกแห่งหนึ่งคืออาคารบันทึกที่วางหน่วยอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องสร้างเสาสัญญาณเหนือในระยะห่างจากเสาเซ็นเซอร์ฟลักซ์เกตซึ่งลงนามด้วยสัญญาณเหนือทางภูมิศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 3.1 และ 3.2



ภาพที่ 3.1 รูปแบบการติดตั้งสถานีสังเกตการณ์ Geomagnetic station



ภาพที่ 3.2 พื้นที่สถานีสังเกตการณ์ Geomagnetic station

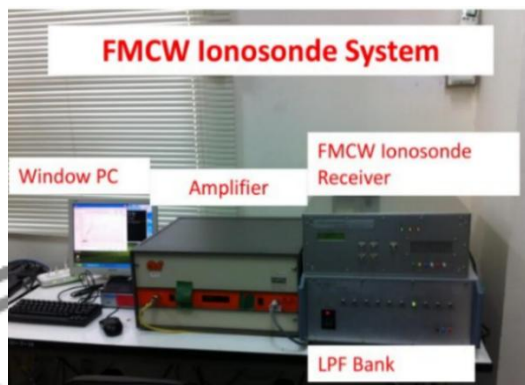


(ก) ปิดฝาครอบ (ข) อุปกรณ์ตรวจจับมุมบน (ค) อุปกรณ์ตรวจจับมุมข้าง

ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ตรวจจับค่าสนามแม่เหล็กโลกของ FGM

3.2 ศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือประเทศไทย

จากการศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในการเปรียบเทียบข้อมูล GPS TEC IGS TEC และจาก IRI TEC จากนั้นนำค่า TEC ที่ได้ไปทำการหาสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กโลกในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ดาวเทียมในระบบ GNSS ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อให้เข้าใจในระบบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากงานวิจัยที่มีการศึกษาการแบ่งชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากข้อมูลจากแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ทั้งลงพื้นที่เพื่อทำการศึกษาระบบชั้นบรรยากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา และจากนักวิจัยเกี่ยวกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สถานีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ในการทดสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร จะประกอบด้วยอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ในห้องสังเกตการณ์บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่จังหวัดชุมพร

จากภาพที่ 3.4 เป็นเครื่อง FMCW Ionosonde System ที่สถานี Chumphon Space Station และการทำงานร่วมกันระหว่าง KMITL และ NICT ใช้ในการทดสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพรเพื่อศึกษาข้อมูลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือประเทศไทยมีอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานได้แก่ 1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 2. เครื่องขยายสัญญาณ 3. เครื่องรับ FMCW Ionosonde และ 4. LPF Bank

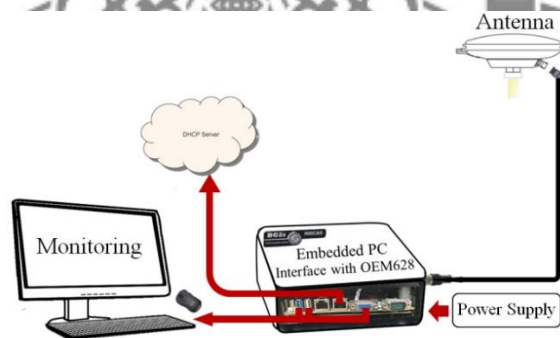
3.3 ศึกษาการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางแบบหลายความถี่

ในการศึกษานี้เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียม GNSS หลายความถี่ (เช่น BG2s GNSS Ionospheric Monitor model) ถูกใช้เพื่อรวบรวมข้อมูล GNSS TEC จอภาพไอโอโนสเฟียร์ BG2s GNSS ได้รับการสนับสนุนโดย Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (IGGCAS) การเชื่อมต่อระบบจอภาพไอโอโนสเฟียร์ GNSS แสดงในภาพที่ 3.5 และ 3.6



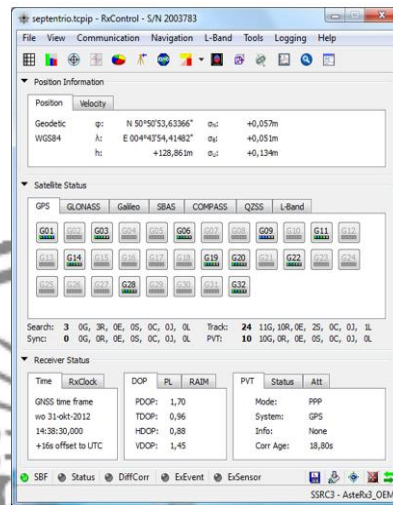
(ก) เสารับสัญญาณ (ข) BG2s GNSS Ionospheric Monitor

ภาพที่ 3.5 เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียม BG2s GNSS Ionospheric Monitor

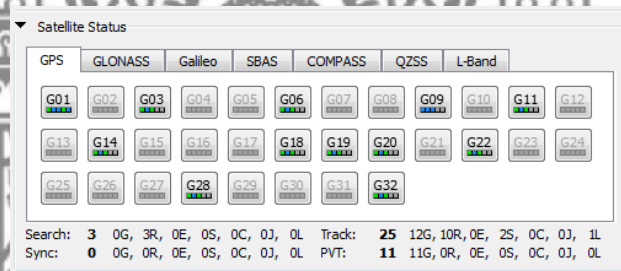


ภาพที่ 3.6 การเชื่อมต่อ BG2s GNSS Ionospheric Monitor

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกแบบหลายความถี่ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสังเกตการณ์ดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก GNSS มีชื่อรุ่นว่า BG2s GNSS Ionospheric Monitor ที่พัฒนาโดย IGGCAS ที่มีขนาดเล็กและใช้พลังงานต่ำโดยใช้แหล่งจ่ายไฟ 12 DCV ผลิตมาเพื่อใช้ในการตรวจสอบสภาพอากาศ ที่มีส่วนประกอบของสายอากาศ GPS และ GNSS ที่มีความแม่นยำสูงและสามารถรับสัญญาณดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกได้ทุกระบบ มีการรวมเมนบอร์ดกับตัวรับ NovAtel OEM628 เข้าด้วยกัน มีหน่วยประมวลผลในตัวสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่รับได้จากดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกได้รวดเร็วยิ่งขึ้น สามารถติดตามความถี่ L_1 , L_2 และ L_5 ของ GPS ประเทศสหรัฐอเมริกา จากสัญญาณความถี่ L_1 , L_2 และ L_3 ของ GLONASS ประเทศรัสเซีย จากสัญญาณความถี่ E5a/b ของ GARILAO ของสหภาพยุโรป จากสัญญาณความถี่ B1, B2 ของ BeiDou ประเทศจีน จากสัญญาณความถี่ L_1 , L_2 , L_5 ของ QZSS ประเทศญี่ปุ่น และติดตามความถี่จาก IRNSS ประเทศอินเดีย นอกจากนี้มีโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการใช้งานของเครื่องรับ สามารถบันทึกไฟล์ข้อมูลดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการมีลักษณะการใช้งานดังนี้



ภาพที่ 3.7 RX Control โปรแกรมควบคุมหลัก



ภาพที่ 3.8 ส่วนการดูข้อมูลดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกแต่ละระบบ

มีส่วนประกอบในการแสดงตัวย่อ G : GPS, R : GLONASS, S : SBAS, E : Galileo, C : BeiDou, J : QZSS และ I : IRNSS ที่ใช้ในการสังเกตดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลก สามารถอ่านค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถรับค่า RINEX file ดูตำแหน่งดาวเทียม ค่าข้อมูลการเคลื่อนที่ของดาวเทียม ถึงค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ

3.4 การรับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมนำทาง

ข้อมูล RINEX จากตัวรับสัญญาณ GNSS ใช้สำหรับการคำนวณ TEC ในระบบ GNSS ดาวเทียมส่งสัญญาณอย่างน้อย 2 ความถี่ (F_1 และ F_2) เครื่องรับ GNSS รับสัญญาณดาวเทียมอย่างต่อเนื่องจาก 4 ถึง 12 สัญญาณที่นำไปสู่การคำนวณค่า STEC จากดาวเทียมไปยังเครื่องรับสามารถรับได้จากความแตกต่างระหว่าง Pseudoranges (P_1 และ P_2) และความแตกต่างระหว่างเฟส L_1 และ

L_2 ของเครื่องรับ GNSS 2 ความถี่ สมการ STEC แสดงเป็น (3.1) และ (3.2) (Blewitt, 1990, pp. 199-202; Kenpankho et al., 2011, p. 366)

$$STEC_P = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (P_2 - P_1) \quad (3.1)$$

$$STEC_L = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \quad (3.2)$$

โดยที่ k ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าหักเหของไอโอโนสเฟียร์คือ $80.62 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$ ดาวเทียม GPS โดยมี f_1 คือ 1575.42 MHz f_2 คือ 1227.60 MHz P_1 และ P_2 เป็น Pseudoranges (P_1 วัดบน L_1 และ P_2 วัดบน L_2) λ_1 และ λ_2 คือความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับ f_1 และ f_2 ตามลำดับ ($\lambda_1 = 0.1902 \text{ m}$ และ $\lambda_2 = 0.2442 \text{ m}$) L_1 คือเฟสของ f_1 และ L_2 คือเฟสของ f_2 (Keokhumcheng, 2022, pp. 16-18)

TEC ถูกกำหนดให้เป็นอิเล็กตรอนทั้งหมด (e/m^2) ในคอลัมน์แนวตั้งของหน้าตัด 1 m^2 (Goodwin et al., 1995, pp. 1723-1732) ค่าจำกัดความนี้สำหรับ TEC คือ VTEC ผ่านจุดเจาะด้วยปัจจัย obliquity (Brunini et al., 2004, pp. 415-429) VTEC ใน e/m^2 สามารถคำนวณได้จาก (Ma & Maruyama, 2003, p. 2084; Kenpankho et al., 2011, p. 366) แสดงในสมการ (3.3) ดังนี้

$$VTEC = STEC_L \times \cos \chi \quad (3.3)$$

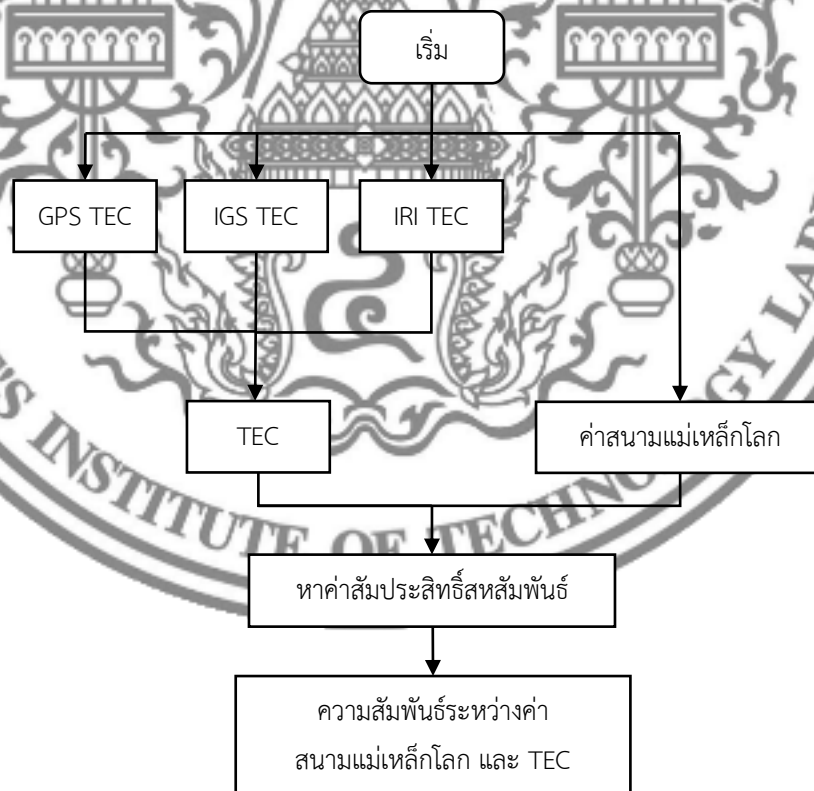
โดยที่มุม χ แสดงเป็น

$$\chi = \arcsin \left(\frac{R_E \cos \alpha}{R_E + h} \right) \quad (3.4)$$

โดยที่ α คือมุมเงยของดาวเทียม R_E คือรัศมีเฉลี่ยของโลก และ h คือความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งสันนิษฐานว่าอยู่ที่ 450 กม. (Ma & Maruyama, 2003, p. 2084; Kenpankho et al., 2011, p. 366)

3.5 วิธีดำเนินการวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทางผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลทั้งหมด 1 ปี ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 เนื่องจากการเก็บข้อมูลของสนามแม่เหล็กโลก ณ สถานีตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย สามารถบันทึกข้อมูลที่มีความครบถ้วนเพียงพอที่จะเปรียบเทียบกับจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งประกอบไปด้วย GPS TEC IGS TEC และ IRI TEC เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและจำนวนอิเล็กตรอนรวมชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้การวิเคราะห์การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทางสถิติ โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้



ภาพที่ 3.9 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC

3.5.1 การรวบรวมข้อมูลค่าสนามแม่เหล็กโลก

รวบรวมค่าสนามแม่เหล็กโลกจากสถานีตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การรวบรวมข้อมูลค่าสนามแม่เหล็กโลก

ค่าสนามแม่เหล็กโลกจะประกอบด้วย 3 แกน ได้แก่ แกน X, Y และ Z โดยแกน X จะแสดงทิศทางไปยังทิศเหนือสู่ชั้นบรรยากาศ แกน Y จะแสดงทิศทางในแนวราบไปยังภาคพื้นดิน และแกน Z จะแสดงทิศทางไปยังทิศใต้ลงสู่แกนกลางของโลก

3.5.2 การรวบรวมข้อมูล GPS TEC

รวบรวมค่า GPS TEC จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในรูปแบบไฟล์ RINEX ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ดังภาพที่ 3.11

```

3.03 OBSERVATION DATA G (GPS) RINEX VERSION / TYPE
FreeFlyer a.i. solutions 20211208 194359 UTC PGM / RUN BY / DATE
MARKER MARKER NAME
FFUser FFUser OBSERVER / AGENCY
RECNUM RECTYPE RECVERS REC # / TYPE / VERS
ANTNUM ANTTYPE ANT # / TYPE
0.0000 0.0000 0.0000 APPROX POSITION XYZ
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
E 3 C7X C8X C1B SYS / # / OBS TYPES
G 3 C1C C2X C5X SYS / # / OBS TYPES
5.000 INTERVAL
2020 3 11 0 0 0.00000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER

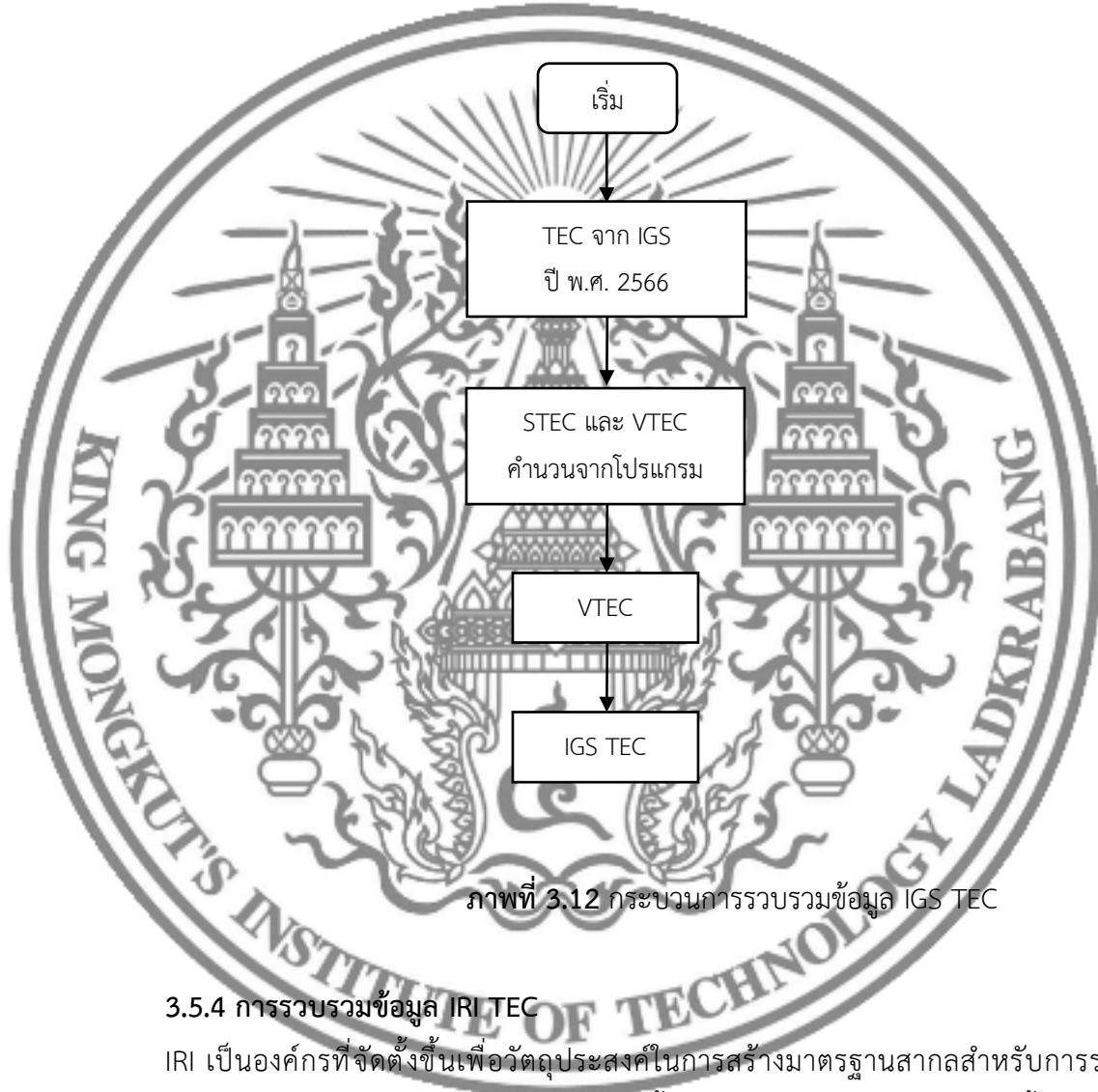
> 2020 03 11 00 00 23.00000000 0 12
G10 21174855.31600 21174854.83900 21174865.47100
G12 21949684.39800 21949682.03100 21949691.20300
G15 23628922.50700 23628912.13100 23628913.32500
G20 19532355.26300 19532344.60900 19532340.10300
G21 22136216.92700 22136216.73800 22136217.06400
G25 19768344.04900 19768343.48300 19768346.87400
G26 24384546.18700 24384550.17900 24384549.59000
G29 22584553.10600 22584549.22400 22584548.84500
G31 23629075.68700 23629093.20500 23629078.84500

```

ภาพที่ 3.11 การรวบรวมข้อมูล GPS TEC ในรูปแบบไฟล์ RINEX

3.5.3 การรวบรวมข้อมูล IGS TEC

ผู้วิจัยใช้ค่า TEC จาก IGS ซึ่งได้รับการดูแลและตรวจสอบโดย International GNSS Service (IGS) อาศัยเครือข่ายระหว่างประเทศของสถานี GNSS ความถี่คู่ที่ทำงานอย่างต่อเนื่องกว่า 514 สถานี (International GNSS Service, 1998, Online) จาก IGS มีกระบวนการดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 กระบวนการรวบรวมข้อมูล IGS TEC

3.5.4 การรวบรวมข้อมูล IRI TEC

IRI เป็นองค์กรที่จัดตั้งขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการสร้างมาตรฐานสากลสำหรับการระบุพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ตามข้อมูลที่มีอยู่ทั่วโลกทั้งหมดจากการสังเกตการณ์ภาคพื้นดินและดาวเทียมโดยคณะกรรมการวิจัยอวกาศ Committee on Space Research (COSPAR) และโดยสหภาพวิทยาศาสตร์วิทยุระหว่างประเทศ International Union of Radio Science (URSI) ในช่วงปลายทศวรรษที่ 60 TEC สามารถรับได้จากฐาน IRI เรียกว่า IRI TEC โมเดล IRI ได้รับการอัปเดตอย่างต่อเนื่องเมื่อมีข้อมูลใหม่และวิธีการสร้างแบบจำลองใหม่ ปัจจุบัน IRI-2020 ซึ่งเป็นแบบจำลองมาตรฐานได้รับการปรับปรุงจากข้อจำกัด ของรุ่นก่อนหน้า IRI-2020 สามารถเข้าถึงได้บน <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instrun/iri> โดยมีกระบวนการดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 กระบวนการคำนวณ IRI TEC

3.6 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 ค่าเฉลี่ย (Arithmetic mean)

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

(3.5)

โดยที่ \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ย
 $\sum x$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด
 N คือ จำนวนข้อมูล

Projectcubicle (2024, Online)

3.6.2 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

(3.6)

โดยที่ s คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 \sum คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด
 \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
 x คือ ค่าของข้อมูล
 n คือ จำนวนข้อมูล

Questionpro (2024, Online)

3.6.3 ค่ามัธยฐาน (Median)

คือ การวัดแนวโน้มสู่ส่วนกลางชนิดหนึ่ง ที่ใช้อธิบายจำนวนหนึ่งจำนวนที่แบ่งข้อมูลตัวอย่างหรือประชากร หรือการแจกแจงความน่าจะเป็นออกเป็นครึ่งส่วนบนกับครึ่งส่วนล่าง สามารถหาได้โดยการเรียงลำดับข้อมูลจากน้อยไปมาก (หรือมากไปน้อยก็ได้) แล้วถือเอาตัวเลขที่อยู่ตรงกลางเป็นค่ามัธยฐาน ถ้าหากจำนวนสิ่งที่สังเกตการณ์เป็นจำนวนคู่ ทำให้ค่าที่อยู่ตรงกลางมีสองค่า ดังนั้นเรามักจะหาค่าเฉลี่ย (Mean) ของสองจำนวนนั้นเพื่อให้ได้มัธยฐานเพียงหนึ่งเดียว Wikipedia (2024, Online)

3.6.4 การหาค่าความสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวขึ้นไป ได้จากสมการที่ 3.7 และสามารถเปรียบเทียบระดับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Kenpankho et al., 2011, p. 366) ดังสมการที่ 3.7

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (3.7)$$

โดยที่ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ x และ y
 x_i คือ ค่าตัวแปร x ณ จุดข้อมูลที่ i
 \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร x
 y_i คือ ค่าตัวแปร y ณ จุดข้อมูลที่ i
 \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร y

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์ที่ใช้ในการแปลความหมายของสหสัมพันธ์อย่างง่าย

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ระดับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ระดับของความสัมพันธ์
ค่า r เป็น -	-0.01 ถึง -1.00	x และ y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกัน
ค่า r เป็น 0	0.00	x และ y ไม่มีความสัมพันธ์กัน
ค่า r เป็น +	0.01 ถึง 1.00	x และ y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 จากข้อมูลที่ครอบคลุมทั้ง 2 แหล่ง ได้แก่ ค่าสนามแม่เหล็กโลก จากสถานีตรวจวัดสนามแม่เหล็กโลกจังหวัดชุมพร ประเทศไทยและข้อมูล GPS TEC จากสถานีตรวจวัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ได้ผลดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กโลก

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 เป็นระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี ข้อมูลค่าสนามแม่เหล็กโลก ที่ได้จากสถานีตรวจวัดสนามแม่เหล็กโลกจังหวัดชุมพร ประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าสนามแม่เหล็กโลก ในช่วงเวลาระหว่างเดือนกรกฎาคม-เดือนธันวาคม พ.ศ. 2566

nT	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม
แกน X	36,574	36,586	36,576	36,497	36,171	36,248
แกน Y	15,025	15,034	15,024	15,003	14,622	14,658
แกน Z	8,107	8,121	8,112	8,116	7,514	7,650

ตารางที่ 4.2 ค่าสนามแม่เหล็กโลก ในช่วงเวลาระหว่างเดือนมกราคม-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567

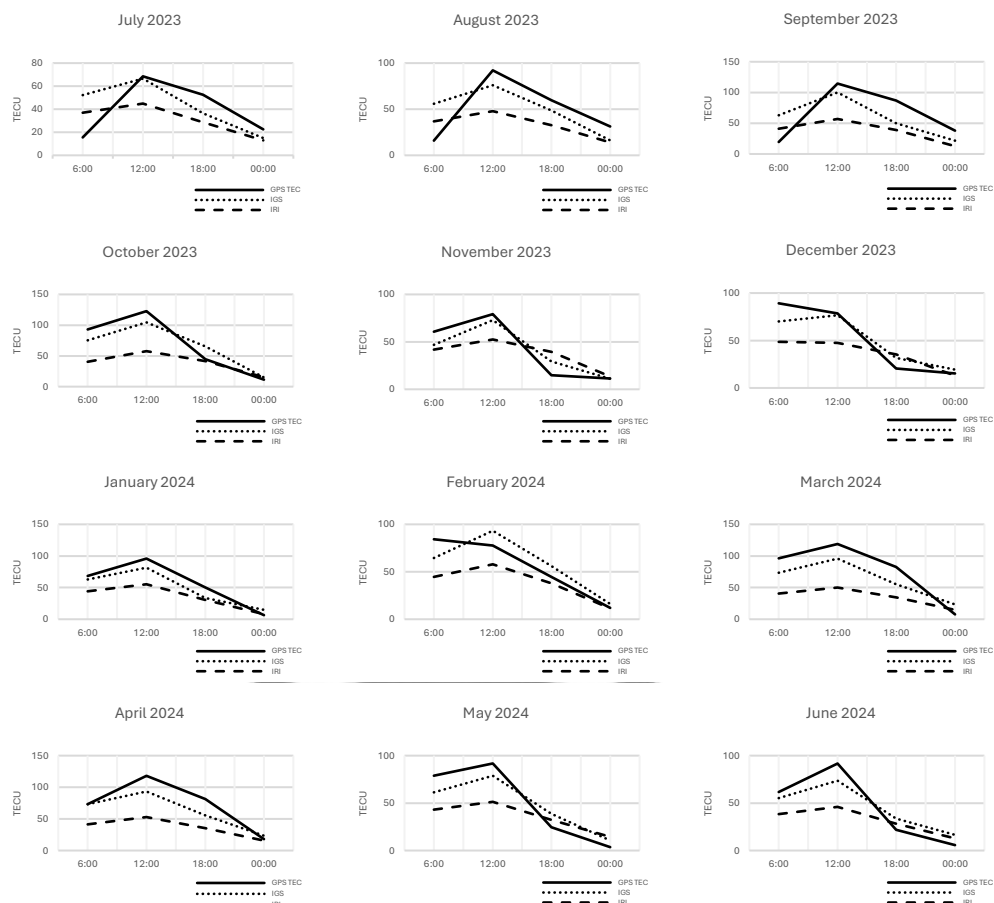
nT	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม	มิถุนายน
แกน X	36,284	36,276	36,282	36,240	36,324	36,413
แกน Y	14,678	14,699	14,701	14,686	14,646	14,746
แกน Z	7,671	7,706	7,716	7,628	7,652	7,802

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่ามีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน X มากที่สุดที่ 36,586 nT ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และน้อยที่สุดที่ 36,171 nT ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 ส่วนค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน Y มากที่สุดที่ 15,034 nT ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และน้อยที่สุดที่ 14,622 nT ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 ค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน Z มากที่สุดที่ 8,121 nT ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และมีค่า น้อยที่สุดที่ 7,514 nT ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 จึงสรุปได้

ว่าค่าสนามแม่เหล็กแกน X Y และ Z จะมีค่ามากที่สุดในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และค่าสนามแม่เหล็กแกน X Y และ Z จะมีค่าน้อยที่สุดในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566

4.2 เปรียบเทียบ GPS TEC IGS TEC และ IRI TEC

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 เป็นระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี โดยรวบรวมค่า GPS TEC จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ณ สถานีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับ IGS TEC และ IRI TEC เพื่อให้ได้ค่า TEC เป็นที่น่าเชื่อถือและเป็นค่ามาตรฐานโลก โดยแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ค่า TEC จากการเปรียบเทียบ GPS TEC, IGS TEC และ IRI TEC ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ eU/m}^2$)

จากภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบ GPS TEC IGS TEC และ IRI TEC ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 เป็นระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี มีปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า TEC ในช่วงเวลาระหว่างเดือนมกราคม-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567

ค่า TEC (TECU) และช่วงเวลา	กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
GPS TEC	15	68	52	22	15	92	59	31	19	114	87	38
IGS TEC	52	66	36	15	56	76	58	16	63	100	50	21
IRI TEC	36	44	28	13	36	47	32	14	41	56	39	12
ค่า TEC (TECU) และช่วงเวลา	ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
GPS TEC	92	122	44	11	60	79	14	11	89	78	20	15
IGS TEC	75	104	65	14	47	72	29	11	70	76	31	19
IRI TEC	40	57	41	15	41	52	39	13	48	47	35	13
ค่า TEC (TECU) และช่วงเวลา	มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
GPS TEC	68	95	50	6	84	77	44	11	96	118	82	7
IGS TEC	62	81	33	14	64	93	56	16	73	95	55	23
IRI TEC	44	55	30	8	44	57	37	11	40	50	34	14
ค่า TEC (TECU) และช่วงเวลา	เมษายน				พฤษภาคม				มิถุนายน			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
GPS TEC	73	118	81	17	78	91	24	3	61	91	21	5
IGS TEC	73	93	55	23	61	78	38	10	55	73	33	16
IRI TEC	41	52	35	15	43	51	32	14	38	46	28	12

4.3 เปรียบเทียบ และหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าสนามแม่เหล็กโลก ที่ได้จากสถานีตรวจวัดสนามแม่เหล็กโลก และการเปรียบเทียบ GPS TEC IGS TEC และ IRI TEC จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 ระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี จากนั้นนำค่าที่ได้หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC มีผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
แกน X - TEC	0.99	0.99	0.80	0.98	0.85	0.32	0.54	0.99	0.99	-0.84	0.96	0.30
แกน Y - TEC	0.71	-0.87	-0.98	-0.97	0.67	-0.99	-0.99	-0.94	0.67	-0.97	-0.96	-0.96
แกน Z - TEC	0.49	-0.89	-0.98	-0.90	0.60	-0.98	-0.96	-0.95	0.74	-0.96	-0.98	-0.96

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และช่วงเวลา	ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
แกน X - TEC	0.96	0.71	0.31	0.09	-0.95	0.97	0.88	0.91	0.93	0.85	-0.26	-0.47
แกน Y - TEC	0.98	0.45	0.31	0.93	-0.63	0.83	0.80	-0.08	0.32	-0.54	-0.96	-0.68
แกน Z - TEC	0.98	-0.96	-0.60	-0.57	0.77	0.91	-0.91	0.91	0.62	0.82	-0.99	-0.65
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และช่วงเวลา	มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
แกน X - TEC	0.95	0.91	0.57	0.34	0.86	0.89	0.36	0.58	-0.99	-0.98	-0.99	0.83
แกน Y - TEC	-0.67	0.23	-0.74	0.24	-0.65	0.48	-0.55	-0.57	-0.57	-0.50	-0.71	-0.87
แกน Z - TEC	0.69	-0.46	0.73	-0.05	0.68	0.64	-0.98	-0.34	-0.99	-0.98	-0.99	0.45
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และช่วงเวลา	เมษายน				พฤษภาคม				มิถุนายน			
	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00	6:00	12:00	18:00	00:00
แกน X - TEC	0.99	0.99	0.99	0.68	0.99	0.99	0.99	0.63	0.60	-0.95	0.99	0.81
แกน Y - TEC	-0.94	-0.13	0.55	0.61	-0.99	0.48	0.44	0.16	-0.65	0.21	-0.06	-0.15
แกน Z - TEC	-0.49	-0.78	0.89	0.68	-0.53	0.98	0.76	0.93	-0.96	-0.95	0.64	0.64

จากตารางที่ 4.4 พบว่า การเปรียบเทียบ และหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 ระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี มีผลการวิเคราะห์ดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC มีค่าสูงสุดที่ 0.99 ในแกน X ซึ่งมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (6:00) และช่วงเวลาเที่ยงวัน (12:00) ซึ่งจะเกิดขึ้นในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 เวลาเที่ยงคืน (00:00) ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (6:00) ในเดือนกันยายน พ.ศ. 2566 และ ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (6:00) เวลาเที่ยงวัน (12:00) เวลาพระอาทิตย์ตก (18:00) ในเดือนเมษายน-พฤษภาคม พ.ศ. 2567 และเวลาพระอาทิตย์ตก (18:00) ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC มีค่าต่ำสุดที่ -0.99 มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกันได้แก่ เวลาเที่ยงวัน (12:00) เวลาพระอาทิตย์ตก (18:00) ของเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 ในแกน Y ช่วงเวลาพระอาทิตย์ตก (18:00) เดือนธันวาคม พ.ศ. 2566 ในแกน Z ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (6:00) เวลาพระอาทิตย์ตก (18:00) เดือนมีนาคม พ.ศ. 2567 ในแกน X และ Z และ ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (6:00) เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2567 ในแกน Y

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยการหาค่าสนามแม่เหล็กโลก พบว่ามีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน X มากที่สุดที่ 36,586 nT ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และมีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน X น้อยที่สุดที่ 36,171 nT ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 ค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน Y มากที่สุดที่ 15,034 nT ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และมีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน Y น้อยที่สุดที่ 14,622 nT ในเดือนพฤศจิกายน ค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน Z มากที่สุดที่ 8,121 nT ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 และมีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน Z น้อยที่สุดที่ 7,514 nT ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 จากผลการวิจัยการหาค่า TEC ระหว่าง GPS TEC, IGS TEC และ IRI TEC พบว่า ค่า TEC ในช่วงเวลาเที่ยงวัน (12:00) มีค่ามากที่สุดที่ 122 TECU ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2566 และช่วงเวลาเที่ยงคืน (00:00) มีค่าน้อยที่สุดที่ 3 TECU ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2566 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง GPS TEC และ IGS TEC ปรากฏว่าค่า GPS TEC จะมีความมากกว่า IGS TEC ในเวลาเที่ยงวัน (12:00) และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง TEC ที่คล้ายคลึงกันในแต่ละช่วงเวลา เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง GPS TEC และ IRI TEC ปรากฏว่าค่า GPS TEC จะมีความมากกว่า IRI TEC ในทุกช่วงเวลา ยกเว้นเดือนกรกฎาคม-กันยายน พ.ศ. 2566 ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (6:00) IRI TEC จะมีความมากกว่า GPS TEC และเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2566 ช่วงเวลาพระอาทิตย์ตก (18:00) IRI TEC จะมีความมากกว่า GPS TEC จากผลการวิจัยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ TEC พบว่า ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (6:00) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.99 และต่ำสุดเท่ากับ -0.99 ในช่วงเที่ยงวัน (12:00) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.99 และต่ำสุดเท่ากับ -0.99 ในเวลาพระอาทิตย์ตก (18:00) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.99 และต่ำสุดเท่ากับ -0.99 ในเวลาเที่ยงคืน (00:00) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.99 และต่ำสุดเท่ากับ -0.96 ผลสรุปจากการวิจัยพบว่าค่า TEC ที่ได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกจากแนวพื้นดินไปยังทิศเหนือ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า ค่าสนามแม่เหล็กโลกมีการเหนี่ยวนำกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

5.2 อภิปรายผล

จากผลการวิจัยค่า GPS TEC สูงสุดที่ 122 TECU ต่ำสุดที่ 3 TECU ค่า IGS TEC สูงสุดที่ 104 TECU ต่ำสุดที่ 10 TECU และค่า IRI TEC สูงสุดที่ 57 TECU ต่ำสุดที่ 8 TECU ได้ค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kenpankho et al. (2011, pp. 365-370) เปรียบเทียบการวัด ค่าอิเล็กทรอนิกส์รวมจากดาวเทียม GPS กับการคาดการณ์ IRI TEC ที่สถานีละติจูดเส้นศูนย์สูตร จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ซึ่งนำข้อมูลในรูปแบบไฟล์ RINEX จากเครื่องรับสถานีรับสัญญาณดาวเทียม มาหาค่า GPS TEC และเปรียบเทียบกับค่า IRI TEC เพื่อให้ได้ค่า TEC ที่เป็นค่ามาตรฐานโลก และจากผลการวิจัยค่าสนามแม่เหล็กโลก ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566-เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567 รวมระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี ซึ่งได้ข้อมูลมากกว่า Chen, et al. (2017, pp. 3632-3639) ที่ตรวจสอบผลกระทบของการเกิดสนามแม่เหล็กโลกจากข้อมูล TEC และเปรียบเทียบค่าใน 28 วัน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าพายุสนามแม่เหล็กโลกและ TEC มีความคล้ายคลึงกันที่ละติจูดต่ำ และค่าสนามแม่เหล็กโลกมีการเหนี่ยวนำกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

5.3 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ทำให้ทราบถึงจำนวนอิเล็กทรอนิกส์รวมที่อยู่ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดจากสนามแม่เหล็กโลกซึ่งมีผลกระทบต่อการใช้งานดาวเทียม GPS โดยมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. สามารถประยุกต์ใช้ข้อมูลในการสร้างระบบในการลดความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งของดาวเทียม GPS เพื่อที่จะทำให้การระบุตำแหน่งมาความแม่นยำขึ้น
2. สามารถประยุกต์ใช้ในระบบแจ้งเตือนภัยธรรมชาติต่าง ๆ เช่น แผ่นดินไหว สึนามิ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- Ansari, K., Walo, J., & Wezka, K. (2023). Ionospheric TEC variation over Svalbard archipelago, Norway and assessment of Bilinear interpolated GIM model. *Acta Astronautica*, 212, 226-234.
- Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., & Arikan, O. (2008). Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC. *Radio Science*, 43(4), 1-13.
- Bilitza, D., Pezzopane, M., Truhlik, V., Altadill, D., Reinisch, B. W., Pignalberi, A. (2022). The International Reference Ionosphere Model: A Review and Description of an Ionospheric Benchmark. *Reviews of Geophysics*, 60, 4.
- Blewitt, G. (1990). An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 17(3), 199-202.
- Bojilova, R., & Mukhtarov, P. (2023). Comparative analysis of global and regional ionospheric responses during two geomagnetic storms on 3 and 4 February 2022. *Remote Sensing*, 15(7), 1739. <https://doi.org/10.3390/rs15071739>.
- Brunini, C., Meza, A., Azpilicuata, F., Van zele, M. A., Gende, M., & Diaz, A. (2004). A new ionosphere monitoring technology based on GPS. *Astrophys. Space Sci*, 290, 415-429. <https://doi.org/10.1023/B:ASTR.0000032540.35594.64>.
- Bynav. (2024). X1-6 RTK. <https://geo-matching.com/products/bynav-x1-5>.
- CCMC. (2024). *IRI 2020 model*. <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/iri>.
- Chcnav. (2024). P5E GNSS. <https://chcnav.com/product-detail/p5e-gnss>.
- Chen, Z., Wang, J. S., Deng, Y., & Huang, C. M. (2017). Extraction of the geomagnetic activity effect from TEC data: A comparison between the spectral whitening method and 28 day running median. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 3632-3639.
- Chernyshov, A. A., Miloch, W. J., Jin, Y., & Zakharov, V. I. (2020). Relationship between TEC jumps and auroral substorm in the high-latitude ionosphere. *Scientific Reports*, 10(6363), 1-13.

บรรณานุกรม (ต่อ)

Comnavtech. (2024). *M300 Pro*.

https://www.comnavtech.com/News_details/163.html.

de Paula, E. R., de Oliveira, C. B. A., Caton, R. G., Negreti, P. M., Batista, I. S., Martinon, A. R. F., Neto, A. C., Abdu, M. A., Monico, J. F. G., Sousasantos, J., & Moraes, A. O. (2019). Ionospheric irregularity behavior during the September 6-10, 2017, magnetic storm over Brazilian equatorial–low-latitudes. *Earth, Planets and Space*, 71(42), 1-15.

Dugassa, T., Habarulema, J. B., & Nigussie, M. (2019). Investigation of the relationship between the spatial gradient of total electron content (TEC) between two nearby stations and the occurrence of ionospheric irregularities. *Annales Geophysicae*, 37, 1161-1180.

EUSPA. (2024). *Galileo*. <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/galileo>.

Gnsssurveythai. (2024). *SLX1-NG*. <https://gnsssurveythai.com/product/gnss-slx1-ng>.

Goodwin, G. L., Silby, J. H., Lynn, K. J., Breed, A. M., & Essex, E. A. (1995). GPS satellite measurements: ionospheric slab thickness and total electron content. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*, 57(14), 1723-1732.

Hexagon. (2024). *LD900 Receiver*. <https://veripos.com/products/ld900-receiver>.

Hexagon. (2024). *PwrPak7D™*. <https://novatel.com/products/receivers/enclosures/pwrpak7d>.

International GNSS Service. (2024). *Ionospheric Products*. <https://igs.org/products/#ionosphere>.

Kenpankho, P. (2014). *Study of Total Electron Content from GPS Satellite at The Equatorial Magnetic Latitude Station, Chumphon, Thailand* [Doctoral dissertation], King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Kenpankho, P., Chaichana, A., Trachu, K., Supnithi, P., & Hozumi, K. (2021). Real-time GPS receiver bias estimation: Advances in Space Research. *Advances in Space Research*, 685, 2152-2159. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.032>.
- Kenpankho, P., Supnithi, P., & Nagatsuma, T. (2013). Comparison of observed TEC values with IRI-2007 TEC and IRI-2007 TEC with optional foF2 measurements predictions at an equatorial region, Chumphon, Thailand. *Advances in Space Research*, 52, 1820-1826. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.08.012>.
- Kenpankho, P., Watthanasangmechai, K., Supnithi, P., Tsugawa, T., & Maruyama, T. (2011). Comparison of GPS TEC measurements with IRI TEC prediction at the equatorial latitude station, Chumphon, Thailand. *Earth Planet*, 63, 365-370. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.01.010>.
- Keokhumcheng, T., & Pansong, C. (2022). MULTI FREQUENCY GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GNSS). *International Journal of Industrial Education and Technology*, 4(1), 16-18.
- Lesá. (2023). Season change. http://www.lesa.in.th/atmosphere/atm_circulation/atm_circulation/atm_circulation.html.
- Lou, Y., Liu, Y., Shi, C., Yao, X., & Zheng, F. (2014). Precise orbit determination of BeiDou constellation based on BETS and MGEX network. *Scientific Reports*, 4, 2. <https://doi.org/10.1038/srep04692>.
- Ma, G., & Maruyama, T. (2003). Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Ann. Geophys*, 21, 2083-2093. <https://doi.org/10.5194/angeo-21-2083-20>.
- Macintyre. (1999). *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Simplified-schematic-of-a-field-feedback-second-harmonic-fluxgate-magnetometer-after_fig16_333154327.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Maltseva, O. (2021). The Influence of Space Weather on the Relationship Between the Parameters TEC and foF2 of the Ionosphere. *IEEE J. Radio Freq. Identif*, 5, 261-268.
- Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., Runge, T. F. (1998). A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*, 33(3), 565-582. <https://doi.org/10.1029/97RS02707>.
- Miyazaki, S., Saito, T., Sasaki, M., Hatanaka, Y., Iimura, Y. (1997). Expansion of GSI's nationwide GPS array. *Scopus*, 43, 23-34.
- Nava, B., Rodríguez-Zuluaga, J., Alazo-Cuartas, K., Kashcheyev, A., Migoya-Orué, Y., Radicella, S. M., Amory-Mazaudier, C., & Fleury, R. (2016). Middle- and low-latitude ionosphere response to 2015St. Patrick's Day geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 3421-3438.
- Nishioka, M., Saito, S., Tao, C., Shiota, D., Tsugawa, T., & Ishii, M. (2021). Statistical analysis of ionospheric total electron content (TEC): long-term estimation of extreme TEC in Japan. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 1-12.
- NICT. (2024). *Ionosphere*. <https://swc.nict.go.jp/en/knowledge/ionosphere.html>.
- NOAA. (2024). *Geomagnetic field index*. <https://www.ncei.noaa.gov/products/geomagnetic-indices>.
- Pailoplee, S. (2021). Earthquake Activities along the Ranong-Klong Marui Fault Zone, Southern Thailand: Implication from the Seismicity Data. *Bulletin of Earth Sciences of Thailand*, 6(1), 10-17.
- Priyanka, C., Ratnam, V. D., & Santosh, G. K. S. (2021). A Review on design of low noise amplifiers for global navigational satellite system. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 5(3), 206-228. <https://doi.org/10.3934/electreng.2021012>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Projectcubicle. (2024). *Unlocking the Secrets of Arithmetic Mean: The Ultimate 2023 Guide*. <https://www.projectcubicle.com/arithmetic-mean>.
- Quasi-Zenith Satellite System (QZSS). (2024). *QZSS control segment*. <https://gpsbeam.com/quasi-zenith-satellite-system-qzss>.
- Questionpro. (2024). *Standard deviation*. <https://www.questionpro.com/blog/standard-deviation>.
- Rao, S. S., Galav, P., Sharma, S., & Pandey, R. (2013). Low-latitude TEC variability studied from magnetically conjugate locations along 73°E longitude. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 104, 1-6.
- Ratovsky, K. G., Klimenko, M. V., Dmitriev, A. V., & Medvedeva, I. V. (2022). Relation of extreme ionospheric events with geomagnetic and meteorological activity. *Atmosphere*, 13, 1-15.
- Reddybattula, K. D., Panda, S. K., Ansari, K., & Peddi, V. S. R. (2019). Analysis of ionospheric TEC from GPS, GIM and global ionosphere models during moderate, strong, and extreme geomagnetic storms over Indian region. *Acta Astronautica*, 161, 283-292.
- Sailingissues. (2023). *Navigation courses: longitude, latitude*. <https://jp.pinterest.com/pin/817895982347959058>.
- Seeber, G. (2003). Study of Ionospheric Variability Using GNSS Observations. *Satellite Geodesy*, 9(4), 88-99. <https://doi.org/10.1515/9783110200089>.
- Subirana, S. J., Zornoza, J. M. J., & Hernández-Pajares, M. (2013). The GNSS DATA PROCESSING. *ESA Communications Publisher*, 23(1), 2-38.
- SWPC NOAA. (2024). *Solar Cycle Progression*. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

Thombre, S., Bhuiyan, H. Z. M., Söderholm, S., Jaakkola, K. M., Ruotsalainen, L., & Kuusniemi, H. (2015). A Software Multi-GNSS Receiver Implementation for the Indian Regional Navigation Satellite System. *IETE Journal of Research*, 62, 246-256. <https://doi.org/10.1080/03772063.2015.1093968>.

WDC for Geomagnetism. (2024). *Geomagnetic Data Service*. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.

Wikipedia. (2024). *Median*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Median>.

Zhang, B., Hou, P., Liu, T., & Yuan, Y. (2020). A single-receiver geometry-free approach to stochastic modeling of multi-frequency GNSS observables. *J Geod*, 94, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01366-8>.



ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก บทความภาษาอังกฤษ เรื่อง The study on the relationship between ionospheric delay and low-cost localizing robots ตีพิมพ์ในวารสาร Advances in Space Research ในฐานะข้อมูล Web of Science ระดับ Q1
- ภาคผนวก ข เกียรติบัตรนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14
- ภาคผนวก ค รางวัลบทความยอดเยี่ยมในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14
- ภาคผนวก ง บทความ เรื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14
- ภาคผนวก จ เครื่องมือ และสถานที่ใช้ในการวิจัย
- ภาคผนวก ฉ การนำเสนอผลงาน และกิจกรรมต่าง ๆ



ภาคผนวก ก

บทความภาษาอังกฤษ เรื่อง The study on the relationship between
ionospheric delay and low-cost localizing robots ตีพิมพ์ในวารสาร
Advances in Space Research ในฐานะข้อมูล Web of Science

ระดับ Q1

บทความภาษาอังกฤษ เรื่อง The study on the relationship between
ionospheric delay and low-cost localizing robots ตีพิมพ์ในวารสาร
Advances in Space Research ในฐานข้อมูล Web of Science
ระดับ Q1



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Advances in Space Research 75 (2025) 4386–4393

**ADVANCES IN
SPACE
RESEARCH**
(a COSPAR publication)

www.elsevier.com/locate/asr

The study on the relationship between ionospheric delay and low-cost localizing robots [☆]

Patiphan Sumniang, Wishapol Sittichai, Prasert Kenpankho ^{*}

*Department of Engineering Education, School of Industrial Education and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok
10520 Thailand*

Received 2 April 2024; received in revised form 3 December 2024; accepted 5 December 2024
Available online 9 December 2024

Abstract

The dispersive and anisotropic nature of the ionosphere above certain regions particularly on Thailand's low – nearly equatorial – latitude, positioning accuracy is seriously affected when using a precision limited model. Change in ionospheric delay is a key factor impacting the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) positioning and navigation accuracy. We studied the effect of ionospheric delay on localizing low-cost robots. We investigated the positioning error using ionospheric delay from a GNSS receiver, IRI and our campus, KMITL, in Bangkok, to guide our 'G-LOC' robot. There were eight target points, set from 3 to 50 m at the same meridian with varying latitudes. Impacts on a robot moving on low solar activity days, high solar activity days, daytime, and nighttime were measured over 12 months in 2023. We found that high solar activity day impacts a robot moving on highest accuracy error up to 363 cm at high speed. In addition, we found that daytime impacts a robot moving on highest accuracy error up to 154.05 cm at high speed as well. Ionospheric delay according to high and low solar activities, and daytime, and nighttime effects on the GNSS interference transmitted to a low-cost localizing robot was expected to affect moving errors, but it did not seem to lead to a significant difference in error between the low and high solar activity days.

© 2024 COSPAR. Published by Elsevier B.V. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

Keywords: Ionospheric delay; Low-cost localizing robots; GNSS; TEC

1. Introduction

Nowadays, the Global Navigation Satellite System (GNSS) system is used in many areas. Traveling to target places is more convenient than before because a GNSS system that tells you the coordinates, directions, and routes to reach your destination correctly and is used for logistic

robots, pilotage of commercial aircraft, military, maritime and precision guided missile systems. The positioning signals from orbiting GNSS satellites orbiting to the earth's surface can see interference in the atmosphere, which causes the GNSS signal to be received incorrectly. The Earth's atmosphere is affected by ionospheric and tropospheric anomalies which delay signal propagation causing atmospheric effects due to high electron density. GNSS receivers are widely used in low-cost robots for cost effectiveness, as they can capture the positioning signals from GNSS systems.

Ma and Maruyama (2003) investigated the origin of TEC and estimator from GEONET in Japan, proposed a method to quantify total electron content (TEC) and

[☆] This article is part of a special issue entitled: 'IRI with satellite data' published in Advances in Space Research.

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: 65036065@kmitl.ac.th (P. Sumniang), 66036029@kmitl.ac.th (W. Sittichai), prasert.ke@kmitl.ac.th (P. Kenpankho).

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.011>

0273-1177/© 2024 COSPAR. Published by Elsevier B.V. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

evaluated discrepancies from GPS satellites and dual frequency GPS receivers using the GEONET network in Japan. [Bilitza and Reinisch \(2008\)](#) improved this and derived new parameters for the International Reference Ionosphere (IRI) 2007 with two options for the topside electron density, a model for the topside ion composition, a model for the spread F, a model for auroral E-region electron densities, a model for the plasmaspheric electron temperature, and the International Geomagnetic Reference Field (IGRF). [Kenpankho et al. \(2011\)](#) compared GPS TEC measurements with data recorded in the IRI TEC system at the equatorial latitude station, Chumphon Province, Thailand (10.7244 °N, 99.3744 °E) between the years 2004 to 2006. Daily, monthly, and seasonal changes in TEC were compared with TEC derived from IRI-2007 and TEC derived from IGS TEC data at Chumphon station. [Vuković and Kos \(2011\)](#) created an ionospheric delay model for GNSS and improved the Klobuchar model. [Kenpankho et al. \(2013\)](#) compared the observed TEC values with TEC IRI-2007 and TEC IRI-2007 with the predicted foF2 (definition) frequencies from equatorial regions, in particular, Chumphon Province, Thailand. Recent research has focused on understanding ionospheric delays, yielding several studies in this field. [Klobuchar \(1987\)](#) presented an algorithm for delay time in the ionosphere for single frequency GPS users. [Liu et al. \(2010\)](#) studied time delay and duration of ionospheric total electron content responses to geomagnetic disturbances. [Kenpankho et al. \(2011\)](#) compared GPS TEC measurements with IRI TEC predictions at the equatorial latitude station Chumphon Station. [Ratnam et al. \(2011\)](#) evaluated performance of selected ionospheric delay models during geomagnetic storm conditions at low latitudes. [Mansoori et al. \(2015\)](#) studied ionospheric influences on GPS signals based on range delay. [Zhang et al. \(2016\)](#) modeled the effect of delay on GNSS signals, addressing the timing error between GNSS and delayed navigation clearly limited the integration in connected systems. [Hadas et al. \(2017\)](#) established an optimal stochastic model for estimating real-time atmospheric GNSS delays. They proposed to take advantage of numerical weather forecasting models to determine the best signal in the traveling process of random signals. [Maggiolo et al \(2017\)](#) investigated delayed time response of geomagnetic activity to the solar wind. [Saito et al. \(2017\)](#) studied an ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region. [Zhang et al. \(2018\)](#) studied the higher-order ionospheric terms on GPS tropospheric delay and gradient estimates. [Pan and Guo \(2018\)](#) investigated real-time tropospheric delay retrieval with GPS, GLONASS, Galileo and BDS data. [Ansaria et al. \(2019\)](#) studied linear time-series models of the GNSS based TEC variations over Southwest Japan during 2011–2018 compared against ARMA and GIM models. [Garcez et al. \(2019\)](#) studied the location of delay estimation in a multi-frequency GNSS receiver and proposed a subspace

tracking structure to reduce overall computational complexity. [Li et al. \(2020\)](#) proposed multi-frequency GNSS methods for acquiring TEC data in the ionosphere and the daily variability of receivers were studied and adjusted to reduce the reception of faulty TEC signals. [Marini-Pereira et al. \(2020\)](#) studied regional ionospheric delay mapping for low-latitudes. [Zhang et al. \(2020a, 2020b\)](#) statistically studied of the time delay of ionospheric TEC storms to geomagnetic storms in Taoyuan, Taiwan. [Zhu et al. \(2020\)](#) studied absolute calibration of GNSS receiver delay through a clock-steering characterization. [Zhang et al. \(2020a, 2020b\)](#) statistically studied of loss of GPS signals caused by severe and great geomagnetic storms. [Kenpankho et al. \(2021\)](#) investigated real-time GPS receiver bias estimation. [Zbankov et al. \(2022\)](#) studied the influence of the ionosphere on the accuracy of the satellite navigation system. Based on low-cost GNSS, [Chen et al. \(2014\)](#) designed and built an autonomous mobile robot based on GNSS outdoors. [Zhang and Hong \(2015\)](#) studied the navigation of mobile robot using low-cost GPS. [Francisco et al. \(2015\)](#) ran a variety of experiments to determine the scope of GNSS solutions as a key component of the navigation systems of new farm robots: they showed that the quality of the receiver using multiple paths and other uncontrollable errors eventually occur in the field, so the signal consistency must be continuously monitored by the robot navigation tools. [Hamza et al. \(2021\)](#) compared low-cost receivers with calibrated low-cost antennas and proven geodetic instruments with geodetic tools, however, considering their cost, they demonstrate excellent performance that was good enough for various geodetic applications. [Rajapakse and Hettiarachchi \(2022\)](#) also designed, built, and developed a research-focused low-cost GPS robotic platform with a novel dynamic global route planning approach. In addition, [Zhao et al. \(2023\)](#) developed methodology of agricultural robot navigation system working in GNSS-denied environment.

Here, we studied GNSS based on ionospheric delay in low-cost localizing robots following on research by [Chen et al. \(2014\)](#), [Francisco et al. \(2015\)](#), [Hamza et al. \(2021\)](#), [Rajapakse and Hettiarachchi \(2022\)](#), [Zhang and Hong \(2015\)](#), and [Zhao et al. \(2023\)](#) who compared low-cost GNSS receivers in experiments on geodetic instruments that were accurate enough for various geodetic applications with a variety of experiments to determine the scope of GNSS solutions as a key component of navigation systems for new farm robots.

Our objective was to study the relationship between ionosphere delay and the ionospheric delay according to the atmospheric electron density using low latitude GNSS satellites to navigate low-cost robots. Specifically, we investigated GNSS interference in transmitted to a low-cost robot without modern and high-quality equipment to navigate the robot.

2. Data and methodology

2.1. Research method

We developed our low-cost localizing robot “G-LOC” shown in Fig. 1. The minimum components needed to build this robot included an Arduino nano CPU, motor, wheel, motor drive, robot body, tracker and GNSS receiver, power supply and some minor parts – nuts, switch, light bulb and wiring. GNSS receiver was a standalone GNSS module, which is built on the functions of the u-blox NEO-M8N GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou, QZSS, SBAS and Galileo). It receives several frequencies, including GPS L1C/A, 1575.42 MHz, GLONASS L1OF, 1602 MHz, BeiDou B1, 1561.098 MHz, QZSS L1C/A, 1575.42 MHz, SBAS L1C/A, 1575.42 MHz and Galileo E1B/C, 1575.42 MHz. The total cost of our G-LOC robot was only approximately 8,150 Baht (about \$US 241). The site for the experiment was a road on the KMITL campus (13.7300 °N 100.7812 °E). Nine points at the same longitude, 100.7812 °E, were marked, starting at 13.73000 °N and 3 m intervals with a further point at 50 m at 13.7305 °N, 100.7812 °E. Measurements were taken at different intervals, including low solar activity days, high solar activity days, day and night times over 12 months in 2023.

2.2. Ionospheric delay time

We calculated the ionospheric delay (Δt) as Klobuchar (1987) and Kenpankho et al. (2021).

$$\Delta t = \frac{A}{f^2} \int N_e ds = \frac{A}{f^2} TEC \quad (1)$$

where A is the coefficient of medium refraction; $A = \frac{e^2}{8\pi^2 m_0}$, e is equal to 1.6022×10^{-19} C for the electric charge, m is 1.6605×10^{-31} kg for electron mass, and ϵ_0

is 8.8542×10^{-12} F/m for free space permittivity, giving $A = 40.3$ and f is a GNSS frequency. For GPS L1C/A, we assumed $f = 1575.42$ MHz in Eq. (2).

$$\Delta t = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (2)$$

where $\frac{1}{f^2} = 4.0291 \times 10^{-19}$

$$\Delta t = 1.6237 \times 10^{-17} TEC \quad (3)$$

For the ionospheric delay time, we used 2023 TEC data from three different sources – GNSS receiver at G-LOC, IRI model, and our experimental site in KMITL. IRI TEC was found at <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instrun/iri/>, which hosted the 2020 version of the model providing daily and monthly TEC averages, along with ion and electron temperatures, and ion properties at specified locations, times, and dates. The IRI model allows selection of desired output parameters by inputting location, date and time parameters. We extracted 2023 TEC data for our site at KMITL Bangkok (13.730°N, 100.78°E).

2.3. Solar activity, daytime, and nighttime

We used F10.7 cm (2800 MHz) solar radio flux, rate of TEC index (ROTI), and the ionospheric scintillation (S4) index classifying solar activity as low or high. Before collecting data in each month, we used the 27-day forecast of F10.7 cm solar flux activities from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Space Weather Prediction Center at <https://www.swpc.noaa.gov/products/27-day-outlook-107-cm-radio-flux-and-geomagnetic-indices>, which includes a complete summary of weekly activity and 27-day forecasts since 1997, plus an extensive description. Following NOAA, we defined the averaged solar activity into low or high solar activity days using

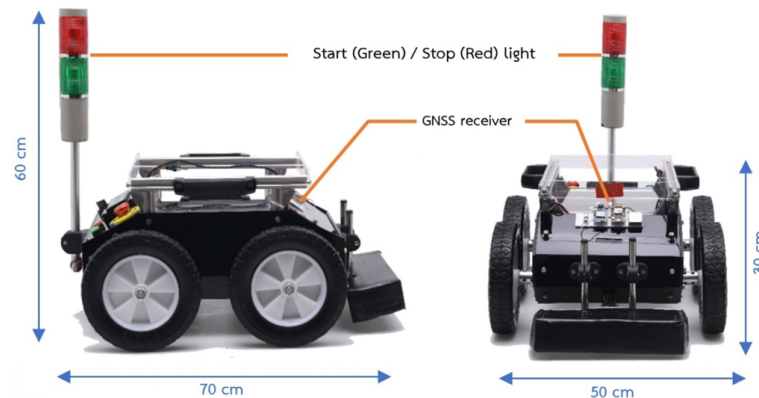


Fig. 1. G-LOC low-cost localizing robot.

the F10.7 cm solar radio flux data, classifying > 150 solar flux units (s.f.u.) as a “high” solar activity and ≤ 150 s.f.u. as a “low” activity day. We chose the experiment days from 27-forecast of F10.7 index depending on low or high activity days. Fig. 2 shows the complete solar activity from the F10.7 index in 2023 which can be accessed at <https://www.spaceweather.gc.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-flux-en.php?year=2023>. Then, we used ROTI and S4 from KMITL Bangkok station at <https://sss-lab.kmitl.ac.th/> and <https://iono-gnss.kmitl.ac.th/> for selection of low and high activities. In 2023, there were 63 days classed as high solar activity and 302 days as low. The maximum average solar activity was 235 s.f.u. on January 15, day 15 in 2023 and the minimum was 118 s.f.u. on day 321 in November. We selected 64 experimental days – 51 days for low solar activity and 13 for high activity. However, there were no days for low solar activity in July, confirmed by ROTI and S4 indices. Similarly, there were no days for high solar activity in March, May, July or October. The numbers of solar activity days and selected experiment days in low solar activity and high solar activity are shown in Table 1. The selected days for doing experiments are divided into low solar activity days and high solar activity days. For daytime experiments, we did the experiments at local time between 6 AM and 5 PM by using local time at 12 AM and 5 PM. For nighttime experiments, we experimented at local time during the period of 6 PM to 5 AM by choosing the local time at 6 PM and 12 PM.

2.4. Rough estimation of G-LOC robot speeds

To estimate robot speeds, we used revolutions per minute (rpm) of a DC 12 motor starting at maximum (100 %) 150 rpm for a high speed, medium (75 %) 105 rpm for a

medium speed and low (50 %) 75 rpm for a low speed. Our G-LOC robot wheels had a circumference of 62.8 cm (cm). So, we can find G-LOC robot distance (d) by Eq. (4) as

$$d = \text{rpm} \times 62.8 \text{ cm} \quad (4)$$

So, low speed was 471 cpm (centimeters per minute), medium was 6,594 cpm and high was 9,420 cpm.

3. Results

3.1. Ionospheric delay over Bangkok

We investigated the ionospheric delay over Bangkok using three sources, the GNSS receiver at our G-LOC robot, IRI and a reference location on our KMITL campus. We calculated TEC and used it in Eq. (3) to find ionospheric delay over each month in 2023. Table 2 shows that the average ionospheric delays from our KMITL site in Bangkok were the largest at 26.79 ns and the smallest was 18.82 from IRI. The GNSS receiver at G-LOC had an average at 24.95 ns. The ionospheric delay from all resources was larger than the ionospheric delay at night. During the day, the largest value was 27.96 ns for the G-LOC receiver, and the smallest was 20.34 for IRI at night, the largest was 12.11 ns on the KMITL campus, and the smallest was 7.88 for IRI. Overall, the ionospheric delays from KMITL campus were the largest and the smallest came from IRI. Possible explanations for the large differences between delay from IRI model and G-LOC GNSS receivers and the KMITL station were the profiles of the height, topside electron density, ion composition, electron densities and electron temperature in the IRI model was up to 2,000 km but the altitude from GNSS satellites was up to 20,200 km.

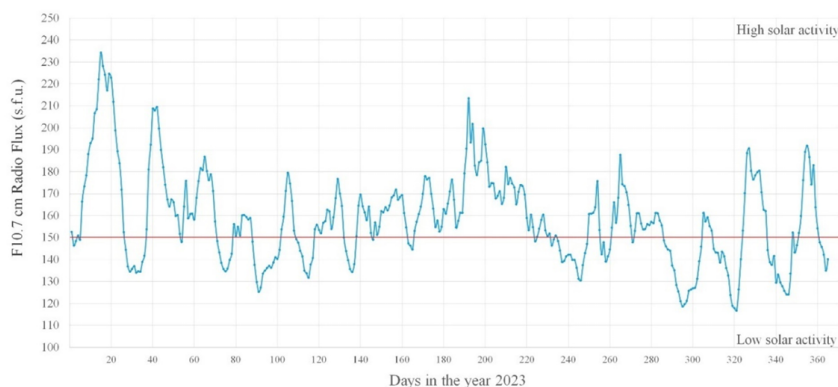


Fig. 2. Complete solar activity by F10.7 index in 2023.

Table 1
Selected solar activity days in 2023.

Months	Numbers of solar activity days		Selected experiment days (Day in year)	
	Low	High	Low	High
Jan	29	2	27, 28, 29, 30, 31	15
Feb	23	5	32, 33, 34, 35, 54	47, 52
Mar	28	3	71, 72, 73, 88, 89	–
Apr	26	4	91, 92, 100, 101, 117	118
May	27	4	132, 133, 134, 137, 146	–
Jun	24	6	163, 164, 165	166, 167
Jul	27	4	–	–
Aug	26	5	232, 233, 235, 236, 237	214
Sep	21	9	247, 248, 249, 256, 271	255
Oct	23	8	286, 287, 288, 289, 290	–
Nov	23	7	312, 313, 321	308, 309
Dec	25	6	345, 346, 347, 349, 350	348, 351, 352
	302	63	51	13

Table 2
Ionospheric delay over Bangkok in 2023.

Months	Ionospheric delay (ns)								
	G-LOC GNSS receiver			IRI			KMITL campus		
	Average	Day	Night	Average	Day	Night	Average	Day	Night
Jan	24.52	28.02	10.51	15.76	19.26	7.00	26.27	19.26	7.00
Feb	28.02	31.52	12.26	17.51	21.01	8.76	28.02	21.01	10.51
Mar	29.77	31.52	17.51	19.26	21.01	7.00	28.72	21.01	8.76
Apr	28.02	30.82	17.51	19.26	22.76	7.00	29.77	22.06	12.26
May	22.76	24.52	10.51	19.26	21.01	7.00	26.27	22.06	7.00
Jun	21.01	24.52	8.76	17.51	19.26	7.00	22.76	20.31	7.00
Jul	17.51	21.01	8.76	17.51	19.26	8.76	21.01	17.51	7.00
Aug	24.52	26.27	10.51	19.26	21.71	8.76	24.52	21.01	5.25
Sep	28.02	31.52	14.01	21.01	24.52	8.76	29.77	22.76	5.25
Oct	29.77	35.02	14.01	22.76	24.52	10.51	29.77	21.01	7.00
Nov	21.01	22.76	7.00	19.26	8.76	7.00	21.01	21.01	3.50
Dec	24.52	28.02	10.51	17.51	21.01	7.00	26.27	19.26	5.25
Average	24.95	27.96	11.82	18.82	20.34	7.88	26.79	29.80	12.11

3.2. Moving accuracy of G-LOC robot

Fig. 3 shows the moving accuracy with speed of our G-LOC robot at different target point distances and at different speeds. Each line represents different speeds, blue for

low speed, orange for medium speed, and green for high speed. Its vertical axis represents the moving error in cm.

At low speed, the error in moving accuracy was lowest at the 3 to 15 m target points but increased from 15 m to 50 m points. Especially at 50 m, there was a significant

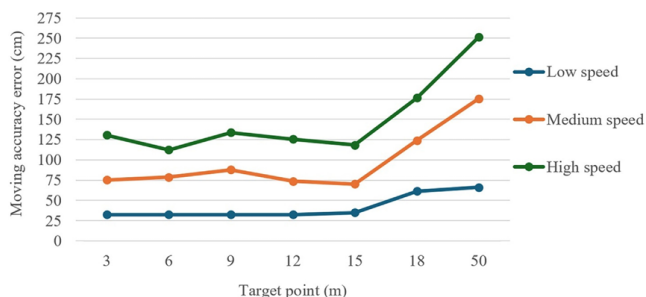


Fig. 3. Moving accuracy with speed of G-LOC robot.

increase in moving error at 70 cm. At medium speed, at 15 m, the error was minimum at 72 cm and was maximum at 175 cm at 50 m. For high speed, the error was higher compared to low and medium speed starting at the 15 m point. The error increased from 113 cm to 250 cm for high speed. Overall, the higher the speed the higher the error for G-LOC. The error was almost constant for the first few target points and then increased significantly.

Using measured 2023 solar activities, we investigated the relationship between ionospheric delay and our robot accuracy for high and low solar activity days. Fig. 4 shows the average error of G-LOC on high solar activity days. At low speed, the error increased with distance, it was smaller at 3 to 15 m target points but increased from 15 m to 50 m points. Especially at 50 m, there was a significant increase

to 100 cm. At medium speed, at the 3 m target point, the error was minimum, whereas at 50 m, the error was maximum at 220 cm. For high speed, the error higher than low or medium speeds starting at the 15 m point. The error increased to 160 cm to 363 cm at high speed.

Fig. 5 plots the moving error on low solar activity days for all target points. At low speed, the error increased with distance – smaller at 3 to 15 m points but increased at 15 m to 50 m points.

There was a significant increase at 50 m for 75 cm. At medium speed, at 6 m, the error was minimum at 100 cm, but at 50 m, the error increased to 200 cm. For high speed, the error was even higher starting at the 15 m to 50 m point where the error increased to from 200 cm to 315 cm.

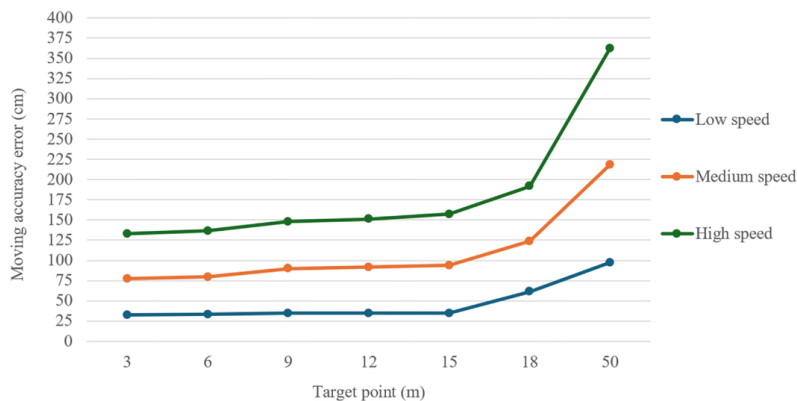


Fig. 4. Average errors on high solar activity days in 2023.

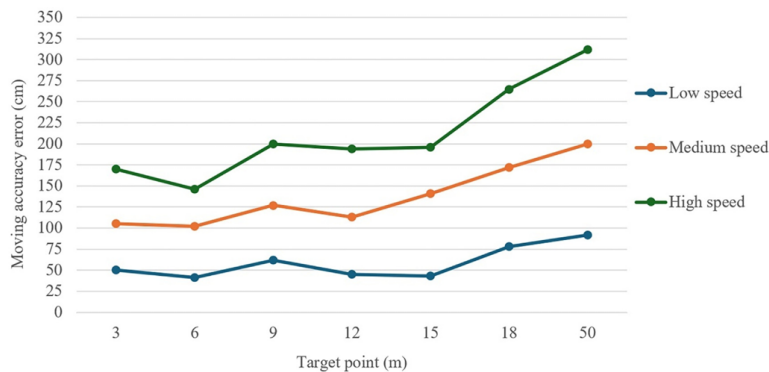


Fig. 5. Average errors on low solar activity day in 2023.

Table 3
Average moving accuracy error results in daytime in 2023.

Target point (m)	Moving error (cm)		
	Speed		
	Low	Medium	High
3	8.31	42.20	49.61
6	25.86	48.32	54.80
9	33.15	59.05	68.06
12	37.60	62.44	77.84
15	41.11	66.30	85.41
18	54.91	71.29	86.93
50	78.00	124.80	154.05

Table 4
Average moving error at night in 2023.

Target point (m)	Moving error (cm)		
	Speed		
	Low	Medium	Low
3	38.48	50.09	61.43
6	45.36	50.99	68.00
9	59.85	54.09	72.23
12	63.00	57.38	74.52
15	69.30	58.95	75.33
18	78.15	88.90	93.00
50	85.50	121.50	126.00

In Table 3 shows average daytime errors in the year 2023 for seven target points. The largest error was 154 cm for the 50 m target point. The lowest error was 8.3 cm at the 3 m point. All errors started relatively low at the 3 m point but increased significantly at 50 m.

Table 4 depicts the average moving errors for different speeds, low, medium, and high across target points ranging from 3 m to 50 m, captured at night. At low speed, errors started at 38 cm at the 3 m point, slightly increased up to 18 m, and then increased more significantly at 50 m to 86 cm. At medium speed, the lowest error was at the 3 m point with 50 cm and the highest was at 121 cm at 50 m. For high speed, the lowest error was at 3 m target at 61 cm and the highest was at 126 cm at 50 m.

4. Discussions

We determined accuracy of a low-cost GNSS receiver supported robot in a variety of experiments to determine the applicability of GNSS devices as a key component of robot navigation systems. The success of GNSS systems for navigating low-cost robotic platforms was highlighted, similar to previous studies of GNSS based on ionospheric delay and low-cost localizing robots by Hamza et al. (2021), Chen et al. (2014), Zhang and Hong (2015), Zhao et al. (2023), Rajapakshe and Hettiarachchi (2022), and Francisco et al. (2015). We found that the moving accuracy of G-LOC robot decreased with speed and distance. The moving accuracy stayed almost constant lower distances and then increased significantly. We did not observe significant differences between the low and high solar activity sit-

uations – contrary to expectation because the densities are significantly higher during high solar activity. For using a G-LOC GNSS receiver in a low-cost robot, the ionospheric delay was highest at 30 ns in March and October at Bangkok, Thailand. The lowest delay was in July at 18 ns. Those ionospheric delays caused a moving error in high solar activity days which was higher than in low activity days. Moreover, the low cost robot showed larger moving errors during the day than at night.

5. Conclusion

In conclusion, we successfully found the relationship on ionospheric delay and moving accuracy for a low-cost localizing robot using a GNSS receiver during 2023. Ionospheric delay according to TEC disturbance in ionosphere, high and low solar activities, and daytime, and nighttime effects on the GNSS interference transmitted to a low-cost localizing robot was expected to affect moving errors, however, it did not seem to lead to a significant difference in error between the low and high solar activity days.

CRedit authorship contribution statement

Patiphan Summiang: Writing – original draft, Software, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Wishapol Sitichai:** Investigation, Formal analysis, Data curation. **Prasert Kenpankho:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

We thank the Space, Satellite, and Study (SSS) Laboratory at Department of Engineering Education, School of Industrial Education and Technology (SIET), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), for support and technical guidance, encouragement, and support over the years. We also thank IRI, NOAA and the SIET KMITL Bangkok station for their data in 2023. This work was financially supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund: KREF016614.

References

- Ansaria, K., Parka, K.-D., Kubob, N., 2019. Linear time-series modeling of the GNSS based TEC variations over Southwest Japan during 2011–2018 and comparison against ARMA and GIM models. *Acta Astronaut.* 165, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.017>.

- Bilitza, D., Reinisch, B., 2008. International Reference Ionosphere 2007: improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 42, 599–609. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.048>.
- Chen, J., Qiang, H., Wu, J., Xu, G., Wang, Z., 2014. Autonomous navigation of a mobile robot based on GNSS/DR integration in outdoor environments. *J. Rob. Mechatron.* 26 (2), 214–224. <https://doi.org/10.20965/jrm.2014.p0214>.
- Francisco, R.-M., Ishani, C., Veronica, S.-R., 2015. The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots. *Comput. Electron. Agric.* 112, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.017>.
- Garcez, C., Daniel, V., Ricardo, K., Fábio, M., João, P., André, L., Rafael, T., 2019. Tensor-based subspace tracking for time-delay estimation in GNSS multi-antenna receivers. *Sensors* 19 (23), 1–15. <https://doi.org/10.3390/s19235076>.
- Hadas, T., Teferle, F., Kazmierski, K., Hordyniec, P., Bosty, J., 2017. Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time. *GPS Solut.* 21 (3), 1069–1081. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0595-0>.
- Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., 2021. Testing the performance of multi-frequency low-cost GNSS receivers and antennas. *Sensors* 21 (6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s21062029>.
- Kenpankho, P., Watthanasangmechai, K., Supnithi, P., Tsugawa, T., Maruyama, T., 2011. Comparison of GPS TEC measurements with IRI TEC prediction at the equatorial latitude station, Chumphon, Thailand. *Earth Planet* 63 (4), 365–370. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.01.010>.
- Kenpankho, P., Supnithi, P., Nagatsuma, T., 2013. Comparison of observed TEC values with IRI-2007 TEC and IRI-2007 TEC with optional foF2 measurements predictions at an equatorial region, Chumphon, Thailand. *Adv. Space Res.* 52 (10), 1820–1826. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.08.012>.
- Kenpankho, P., Chaichana, A., Trachu, K., Supnithi, P., Hozumi, K., 2021. Real-time GPS receiver bias estimation. *Adv. Space Res.* 68, 2152–2159. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.032>.
- Klobuchar, J.A., 1987. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* AES-23 (3), 325–331. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>.
- Li, M., Yuan, Y., Zhang, X., Zha, J., 2020. A multi-frequency and multi-GNSS method for the retrieval of the ionospheric TEC and intraday variability of receiver DCBs. *J. Geod.* 94 (10), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01437-w>.
- Liu, J., Zhao, B., Liu, L., 2010. Time delay and duration of ionospheric total electron content responses to geomagnetic disturbances. *Ann. Geophys.* 28 (3), 795–805. <https://doi.org/10.5194/angeo-28-795-2010>.
- Ma, G., Maruyama, T., 2003. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Ann. Geophys.* 21 (10), 2083–2093. <https://doi.org/10.5194/angeo-21-2083-2003>.
- Maggiolo, R., Hamrin, M., De Keyser, J., Pitkänen, T., Cessateur, G., Gunell, H., Maes, L., 2017. The delayed time response of geomagnetic activity to the solar wind. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 122, 11109–11127. <https://doi.org/10.1002/2016JA023793>.
- Mansoori, A.A., Khan, P.A., Atulkar, R., Purohit, P.K., Gwal, A.K., 2015. Ionospheric influences on GPS signals in terms of range delay. *Russ. J. Earth Sci.* 15 (3), 1–9. <https://doi.org/10.2205/2015ES000555>.
- Marini-Pereira, L., Lourenço, L.F.D., Sousasantos, J., Moraes, A.O., Pullen, S., 2020. Regional ionospheric delay mapping for low-latitude environments. *Radio Sci.* 55, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2020RS007158>.
- Pan, L., Guo, F., 2018. Real-time tropospheric delay retrieval with GPS, GLONASS, Galileo and BDS data. *Sci. Rep.* 8 (17067), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35155-3>.
- Rajapakse, S., Hettiarachchi, R., 2022. Design and development of a research oriented low-cost robotics platform with a novel dynamic global path planning approach. In: 2022 8th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). IEEE, pp. 71–76. <https://doi.org/10.1109/ICCAR55106.2022.9782663>.
- Ratnam, V.D., Sarma, A.D., Srinivas, V.S., Sreelatha, P., 2011. Performance evaluation of selected ionospheric delay models during geomagnetic storm conditions in low-latitude region. *Radio Sci.* 46, 1–6. <https://doi.org/10.1029/2010RS004592>.
- Saito, S., Sunda, S., Lee, J., Pullen, S., Supriadi, S., Yoshihara, T., Terkildsen, M., Lecat, F., 2017. Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region. *GPS Solut.* 21, 1937–1947. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0662-1>.
- Vuković, J., Kos, T., 2011. Ionospheric time-delay models for GNSS. *Proc. ELMAR-2011*, 191–194. <https://doi.org/10.1109/ELMAR59410.2023>.
- Zhang, Z., Guo, F., Zhang, X., 2018. The effects of higher-order ionospheric terms on GPS tropospheric delay and gradient estimates. *Remote Sens. (Basel)* 10 (1561), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs10101561>.
- Zhang, S., He, L., Wu, L., 2020a. Statistical study of loss of GPS signals caused by severe and great geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JA027749>.
- Zhang, Y., Hong, D.-P., 2015. Navigation of mobile robot using low-cost GPS. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 16 (4), 847–850. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0111-4>.
- Zhang, Y., Wu, Z., Feng, J., Xu, T., Deng, Z., Zhen, W., 2020b. Statistical study of the time delay of ionospheric TEC storms to geomagnetic storms in Taoyuan, Taiwan. *Adv. Space Res.* 65 (1), 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.017>.
- Zhang, T., Zhang, H., Lin, T., Yan, K., Xiaoji, N., 2016. Modeling and verifying the impact of Time delay on INS-aided GNSS PLLs. *GPS Solut.* 20 (4), 725–736. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0484-y>.
- Zhao, R.-M., Zhu, Z., Chen, J.-N., Yu, T.-J., Jun-Jie Ma, J.-M., Fan, G.-S., Wu, M., Huang, P.-C., 2023. Rapid development methodology of agricultural robot navigation system working in GNSS-denied environment. *Adv. Manuf.* 11 (8), 601–617. <https://doi.org/10.1007/s40436-023-00438-0>.
- Zhbankov, G.A., Danilkin, N.P., Maltseva, O.A., 2022. Influence of the ionosphere on the accuracy of the satellite navigation system. *Acta Astronaut.* 190, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.10.004>.
- Zhu, F., Zhang, H., Huang, L., Li, X., Feng, P., 2020. Research on absolute calibration of GNSS receiver delay through clock-steering characterization. *Sensors* 20 (6063), 1–14. <https://doi.org/10.3390/s20216063>.



เกียรติบัตรนำเสนอผลงานวิจัย
ในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14

DALE
2024

SIET **KNIFE**
FIGHT TOGETHER
การประชุมนานาชาติระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14
การพัฒนาประสบการณ์การเรียนรู้ในวิถีชีวิตจริง พหุวัฒนธรรมสู่สังคม
และเทคโนโลยีในอนาคตอย่างยั่งยืน

เกียรติบัตรนำเสนอผลงานวิจัย

วิษณุพล สัทธีชัย ชลดา ปานสง และ ประเสริฐ เคนพันคือ

นำเสนอบทความเรื่อง

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวม
ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ให้ไว้ ณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2567

Prasert

(ศาสตราจารย์ ดร.ปรียากรณ์ ตั้งคุณานันต์)
คณบดีคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
ประธานกรรมการประชุมวิชาการ

DALE
2024

SIET **KNIFE**
FIGHT TOGETHER
International Conference 20th
Developing Real-Life Learning Experiences, Learning Dynamic
Toward Innovation and Technology for Future Sustainability

CERTIFICATE OF PRESENTATION

This is to certify that

**Chollada Pansong, Wishapol Sittichai,
and Prasert Kenpankho**
presented a paper titled

**SIGNATURES OF THE AURORAL ELECTROJET (AE) INDEX ASSOCIATED WITH EARTHQUAKES
AND GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS (GNSS) AT LOW LATITUDE**

held at the School of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
May 31, 2024

Pariyaporn

Professor Dr. Pariyaporn Tungkunanan
Dean of School of Industrial Education and Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



ภาคผนวก ค

รางวัลบทความยอดเยี่ยมในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา

ครั้งที่ 14

รางวัลบทความยอดเยี่ยมในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา
ครั้งที่ 14



ประกาศนียบัตร รางวัลบทความยอดเยี่ยม

เพื่อประกาศเกียรติคุณแก่บทความ เรื่อง

**ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลก
และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กทรอนิกส์รวม
ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์**

นำเสนอโดย

**วิชญ์พล สิกธิชัย ชลดา ปานสง
และ ประเสริฐ เคนพันค้อ**

ณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ปริญญาเส

(ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญาเส ตั้งคุณานันต์)

คณบดีคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
ประธานกรรมการประชุมวิชาการ





ภาคผนวก ง

บทความ เรื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลง
ของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
ในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14

บทความ เรื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวน
อิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
ในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14

DRLE 2024 “การพัฒนาประสบการณ์การเรียนรู้ในชีวิตจริง: พลวัตการเรียนรู้สู่นวัตกรรมและเทคโนโลยีในอนาคตอย่างยั่งยืน”

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวม
ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
RELATIONSHIP BETWEEN GEOMAGNETIC FIELD AND TOTAL
ELECTRON CONTENT VARIATION

วิษณุพล สิทธิชัย* ชลดา ปานสง และประเสริฐ เคนพันก่อ
Wishapol Sittichai*, Chollada Pansong, and Prasert Kenpankho
66036029@kmitl.ac.th*, chollada_p@mutt.ac.th, and prasert.ke@kmitl.ac.th

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
Department of Engineering Education, School of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

*Corresponding Author: 66036029@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic field) และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวม (Total Electron Content: TEC) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมในระบบ (Global Positioning Satellite System: GPS) และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ นำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กโลก และจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นรายวัน และรายฤดูกาล พร้อมหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ผลสรุปจากการวิจัยพบว่า GPS TEC ที่ได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกจากแนวพื้นดินไปยังทิศเหนือ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า ค่าสนามแม่เหล็กโลกมีการเหนี่ยวนำกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

คำสำคัญ: พายุสนามแม่เหล็ก, สนามแม่เหล็กโลก, จำนวนอิเล็กตรอนรวม, GPS TEC, ละติจูดต่ำ

ABSTRACT

In this study, we examined the relationship between geomagnetic field and total electron content (TEC) variation in the ionosphere. By using data from satellite receivers in the Global Positioning Satellite System (GPS) and the magnetometer at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus. be used to analyze changes in the geomagnetic field and total electron content in the ionosphere on a daily and seasonal basis, and to find the relationship between geomagnetic field and total electron content variation in the ionosphere. As the results, we found that there is the positive correlation between GPS TEC from ionosphere and geomagnetic field at the north direction which shows evidence the coupling on ionosphere and geomagnetic field.

Keywords: Geomagnetic storm, Geomagnetic field, Total electron content, GPS TEC, Low-latitude

1. ความเป็นมาของปัญหา

สนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic field) มีความสำคัญอย่างมากในการปกป้องโลกจากการถูกทำลายจากอวกาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากแสงและรังสีของดวงอาทิตย์ ทั้งนี้ สนามแม่เหล็กโลกประกอบไปด้วยขั้วแม่เหล็กสองขั้ว คือ ขั้วเหนือและขั้วใต้ และมีเส้นแรงแม่เหล็กชี้จากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ สนามแม่เหล็กโลกสามารถเกิดเป็นพายุสนามแม่เหล็กได้เมื่อได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของระบบสุริยะจักรวาลจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของดวงอาทิตย์ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวน

อิเล็กตรอนรวม (Total Electron Content: TEC) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้เกิดผลกระทบต่อการสื่อสารสัญญาณดาวเทียมในระบบ Global Navigation Satellite System (GNSS) เกิดการผิดพลาดเกิดขึ้นได้

จากการศึกษาแนวทางวิจัยเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กโลกและค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้มีจำนวนการศึกษาและวิจัยแสดงถึงความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดต่าง ๆ (สูง กลาง ต่ำ และเส้นศูนย์สูตร) โดยใช้ Global Positioning Satellite (GPS) ในระบบ GNSS ตัวอย่างเช่น Kenpankho et al. [1] เปรียบเทียบการวัด GPS TEC กับการคาดการณ์ IRI TEC ที่สถานีละติจูดเส้นศูนย์สูตรชุมพรประเทศไทย Ma and Maruyama [2] ซึ่งได้ทำการตรวจสอบที่มาของ TEC และการประมาณค่าของเครื่องมือจากเครือข่าย GPS ของ GEONET ในประเทศญี่ปุ่น Arikan et al. [3] การประมาณค่าตัวรับสัญญาณระหว่างสถานีเดียวโดยใช้ GPS TEC Rao et al. [4] ศึกษาความแปรปรวนของ TEC ละติจูดต่ำที่ศึกษาจากตำแหน่งที่ผกผันของแม่เหล็กตามลองจิจูด 73°E Nava et al. [5] วิจัยการตอบสนองของไอโอโนสเฟียร์ละติจูดกลางและต่ำต่อพายุแม่เหล็กของโลกในวันเฮนดแพทริกปี ค.ศ. 2015 Chen et al. [6] ผลของกิจกรรมทางธรณีแม่เหล็กจากข้อมูล TEC การเปรียบเทียบระหว่างสี่สเปกตรัมกับค่ามัธยฐาน 28 วัน การวิเคราะห์ TEC ไอโอโนสเฟียร์จาก GPS, Global Ionosphere Map (GIM) และแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกในช่วงพายุแม่เหล็กระดับปานกลาง แรง และรุนแรงเหนือภูมิภาคอินเดีย Reddybattula et al. [7] de Paula et al. [8] วิเคราะห์พฤติกรรมความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ในช่วงพายุแม่เหล็ก 6-10 กันยายน ค.ศ. 2017 เหนือเส้นศูนย์สูตรละติจูดต่ำของประเทศบราซิล Dugassa et al. [9] ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างการไล่ระดับเชิงพื้นที่ของปริมาณอิเล็กตรอนรวมทั้งหมด (TEC) ระหว่างสองสถานีใกล้เคียง และการเกิดความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ Chernyshov et al. [10] รายงานความสัมพันธ์ระหว่างการพุ่งสูงของ TEC และพายุย่อยออโรราในไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดสูง Ratovsky et al. [11] ตรวจสอบความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงกับกิจกรรมทางธรณีวิทยาและอุตุนิยมวิทยา Klimenko et al. [12] รายงานเกี่ยวกับความเหมือนและความแตกต่างในสัญญาณวิทยุและกลไกของการรบกวน foF2 และ TEC ในช่วงพายุแม่เหล็กโลกเมื่อวันที่ 26-30 กันยายน ค.ศ. 2011 Bojilova et al. [13] เปรียบเทียบและวิเคราะห์การตอบสนองของไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลกและระดับภูมิภาคในช่วงพายุแม่เหล็กของโลกสองครั้งในวันที่ 3 และ 4 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2022 Ansari et al. [14] ได้การศึกษาการกระจายเชิงพื้นที่ของปริมาณค่า TEC ในหมู่เกาะสفالบาร์โดยใช้สถานีติดตาม ระบบ GPS ระหว่างปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ. 2022 Maltseva [15] ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ TEC และค่า foF2 โดยใช้ข้อมูลจากระบบดาวเทียม GPS ในเดือนมีนาคม ระหว่างปี ค.ศ. 2010 ถึง ค.ศ. 2017 ที่มีการรบกวนมากที่สุดจากสถานีแอนตาร์กติกในซีกโลกใต้โดยการให้ความหนาของแผ่นพื้นเทียบเท่ากับไอโอโนสเฟียร์เพื่อกำหนดค่า foF2

หลังจากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้ว คณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่ศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบงานวิจัยการเปลี่ยนแปลงของ TEC ณ ตำแหน่งที่ละติจูดต่ำเหนือบริเวณพื้นที่จังหวัดชุมพร (บริเวณละติจูดต่ำ) ประเทศไทย ในช่วงเกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกที่รุนแรงในปี ค.ศ. 2023 โดยการรวบรวมและเปรียบเทียบข้อมูล TEC จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในระบบ GNSS หรือเรียกว่า GPS TEC สำหรับการวิจัยที่เกี่ยวข้อง Chen et al. [6] ได้ศึกษาผลของกิจกรรมทางแม่เหล็กของโลกจากข้อมูล TEC การเปรียบเทียบระหว่างสี่สเปกตรัมและค่ามัธยฐาน 28 วัน คณะผู้วิจัยพบว่าการแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในระหว่างสภาวะที่เจ็บบ และถูกรบกวนได้รับการวิเคราะห์โดยทั้งแบบ Spectral Whitening Method (SWM) และ Running Median Centered (RMC) ผลลัพธ์ที่ได้จาก RMC เมื่อเทียบกับจาก SWM มีการประเมินค่าสูงแสดงว่าเกิดการรบกวนประมาณ 5-20% ในช่วงพายุสนามแม่เหล็กโลก และสูงถึง 35% ในช่วงเวลาที่เจ็บบ Nava et al. [5] ศึกษาการตอบสนองของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ละติจูดกลางและต่ำ ต่อพายุสนามแม่เหล็กของโลกในวันเฮนดแพทริกปี ค.ศ. 2015 สำหรับภูมิภาคเอเชีย คณะผู้วิจัยก็ได้เปรียบเทียบสถานี ณ ละติจูดกลาง 2 แห่ง ได้แก่ Wuhn (ซีกโลกเหนือ) และ Yar2 (ซีกโลกใต้) และสถานีละติจูดต่ำ Cusv (ซีกโลกเหนือ) คณะผู้วิจัยสังเกตเห็นการลดลงอย่างมากของ TEC ในช่วงหลายวันหลังจากเกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกที่ตำแหน่งละติจูดกลาง อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยพบว่า TEC เพิ่มขึ้นในวันที่เกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกและไม่ลดลงในวันต่อมาที่ละติจูดต่ำ การสังเกตเหล่านี้สอดคล้องกับบริเวณของภูมิภาคเอเชีย และลักษณะการเกิดระบุว่าเป็นวันหลังจากเกิดพายุสนามแม่เหล็กโลก การรวมตัวและการกระจายตัวของ TEC (ไอออนเชพม์) จะถูกจำกัดไว้ที่ตำแหน่งละติจูดต่ำใกล้บริเวณเส้นศูนย์สูตร และจะสลายไปที่ตำแหน่งละติจูดกลาง

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกที่วัดได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ จังหวัดชุมพร บริเวณละติจูดต่ำ และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในระบบ GNSS คือ GPS TEC จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวน TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของโลก

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อหาค่าความเชื่อมโยงระหว่างชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของโลก โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกที่วัดได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ จังหวัดชุมพร บริเวณละติจูดต่ำ และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในระบบ GNSS คือ GPS TEC จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวน TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และสรุปเป็นข้อมูลอ้างอิงในบริเวณละติจูดต่ำ

3. กรอบแนวคิดและสมมติฐาน

กรอบแนวความคิดในการวิจัยใช้หลักการของ Chen et al. [4] และ Nava et al. [3] การหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในระบบ GNSS และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ และสมมติฐานเมื่อเกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพิ่มจำนวนมากยิ่งขึ้น

3.1 การหาค่า GPS TEC

ค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวลาดเอียง Slant Total Electron Content (STEC)

$$STEC = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \quad (1)$$

เมื่อ STEC แทน ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแนวลาดเอียง มีหน่วยอิเล็กตรอนต่อตารางเมตร (e/m^2)

k แทน ดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีค่าเท่ากับ 80.62

f_1 แทน ความถี่ 1575.42 MHz

f_2 แทน ความถี่ 1227.60 MHz

L_1 แทน เฟสของสัญญาณ f_1

L_2 แทน เฟสของสัญญาณ f_2

λ_1 แทน ความยาวคลื่นของสัญญาณ f_1 เท่ากับ 0.1904 เมตร

λ_2 แทน ความยาวคลื่นของสัญญาณ f_2 เท่ากับ 0.2444 เมตร

ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวตั้ง Vertical Total Electron Content (VTEC)

$$VTEC = STEC \times \cos x \quad e/m^2 \quad (2)$$

$$x = \arcsin\left(\frac{R_E \cos \alpha}{R_E + h}\right) \quad (3)$$

เมื่อ x แทน มุม zenith ที่อยู่เหนือแนวเส้นตั้งฉากของเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียม GPS

α แทน มุมเงยของเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียม GPS

h แทน ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เท่ากับ 400 กิโลเมตร

R_E แทน รัศมีของโลก เท่ากับ 6,371 กิโลเมตร

3.2 การหาค่าความสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวขึ้นไป ได้จากสมการที่ 4 และสามารถเปรียบเทียบระดับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังสมการที่ 4

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (4)$$

เมื่อ r แทน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ x และ y
 x_i แทน ค่าตัวแปร x ณ ชุดข้อมูลที่ i
 \bar{x} แทน ค่าเฉลี่ยของตัวแปร x
 y_i แทน ค่าตัวแปร y ณ ชุดข้อมูลที่ i
 \bar{y} แทน ค่าเฉลี่ยของตัวแปร y

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทางผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลทั้งหมด 3 เดือน ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนกรกฎาคม – เดือนกันยายน ค.ศ. 2023 เนื่องจากการเก็บข้อมูลของสนามแม่เหล็กโลก ณ สถานีตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย สามารถบันทึกข้อมูลที่มีความครบถ้วนเพียงพอที่จะเปรียบเทียบกับจำนวนอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

- 4.1 รวบรวมค่าสนามแม่เหล็กโลกจากสถานีตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย
- 4.2 รวบรวมค่า GPS TEC จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย
- 4.3 นำข้อมูลในรูปแบบไฟล์ RINEX จากเครื่องรับสถานีรับสัญญาณดาวเทียม มาหาค่า GPS TEC เพื่อให้ได้ค่า TEC ที่เป็นค่ามาตรฐานโลก
- 4.4 นำค่าสนามแม่เหล็กโลกทั้ง 3 แกน มาเปรียบเทียบกับหาความสัมพันธ์ของค่าสนามแม่เหล็กโลก และค่า TEC ที่ได้รับจากเครื่องรับสถานีรับสัญญาณ GPS

5. ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นระยะเวลาทั้งหมด 3 เดือน ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนกรกฎาคม–เดือนกันยายน ค.ศ. 2023 จากข้อมูลที่ครอบคลุมทั้ง 2 แหล่ง ได้แก่ ค่าสนามแม่เหล็กโลก จากสถานีตรวจวัดสนามแม่เหล็กโลกจังหวัดชุมพร ประเทศไทย และข้อมูล GPS TEC จากสถานีตรวจวัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ได้ผลดังนี้

5.1 ค่าสนามแม่เหล็กโลก

จากตารางที่ 1 ค่าสนามแม่เหล็กโลก ในช่วงเวลาระหว่างเดือนกรกฎาคม–เดือนกันยายน ค.ศ. 2023 ได้ผลดังนี้

เดือนกรกฎาคม ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น วัดค่าแกน X ได้ 36653 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15063 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8140 nT ในเวลาเที่ยงวัน วัดค่าแกน X ได้ 36568 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15026 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8120 nT ในวันพระอาทิตย์ตก วัดค่าแกน X ได้ 36540 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 14996 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8085 nT ในเวลาเที่ยงคืน วัดค่าแกน X ได้ 36534 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15016 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8083 nT

เดือนสิงหาคม ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น วัดค่าแกน X ได้ 36671 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15068 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8159 nT ในเวลาเที่ยงวัน วัดค่าแกน X ได้ 36583 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15038 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8136 nT ในวันพระอาทิตย์ตก วัดค่าแกน X ได้ 36549 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15002 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8098 nT ในเวลาเที่ยงคืน วัดค่าแกน X ได้ 36540 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15027 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8092 nT

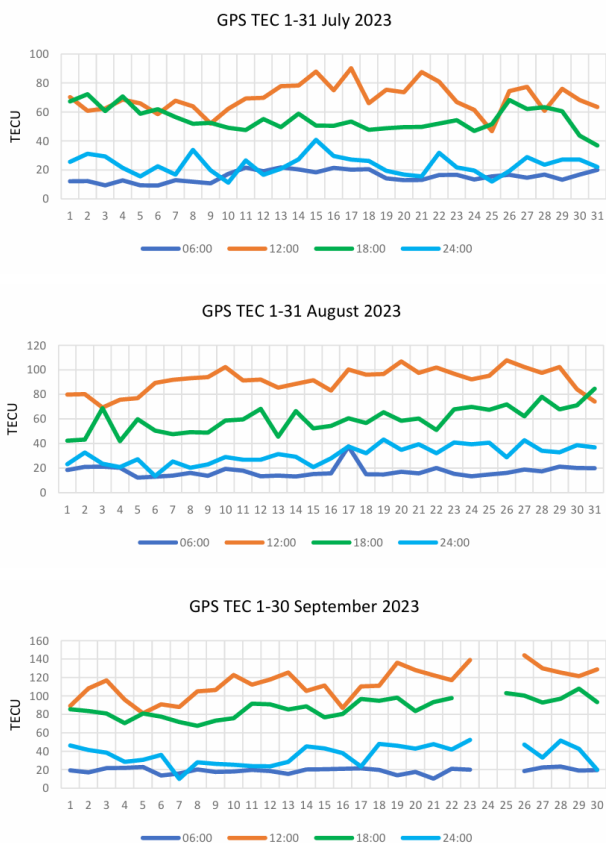
เดือนกันยายน ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น วัดค่าแกน X ได้ 36670 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15054 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8151 nT ในเวลาเที่ยงวัน วัดค่าแกน X ได้ 36562 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15022 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8118 nT ในวันพระอาทิตย์ตก วัดค่าแกน X ได้ 36543 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15002 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8095 nT ในเวลาเที่ยงคืน วัดค่าแกน X ได้ 36528 nT, วัดค่าแกน Y ได้ 15018 nT และวัดค่าแกน Z ได้ 8086 nT

DRLE 2024 “การพัฒนาประสบการณ์การเรียนรู้ในชีวิตจริง: พลวัตการเรียนรู้สู่นวัตกรรมและเทคโนโลยีในอนาคตอย่างยั่งยืน”

ตารางที่ 1 ค่าสนามแม่เหล็กโลก ในช่วงเวลาระหว่างเดือนกรกฎาคม – เดือนกันยายน ค.ศ. 2023

nT	กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน			
	06:00	12:00	18:00	24:00	06:00	12:00	18:00	24:00	06:00	12:00	18:00	24:00
แกน X	36653	36568	36540	36534	36671	36583	36549	36540	36670	36562	36543	36528
แกน Y	15063	15026	14996	15016	15068	15038	15002	15027	15054	15022	15002	15018
แกน Z	8140	8120	8085	8083	8159	8136	8098	8092	8151	8118	8095	8086

5.2 GPS TEC



ภาพที่ 1 ค่า TEC จากสัญญาณดาวเทียมของ GPS เป็นรายวันระหว่างเดือนกรกฎาคม-เดือนกันยายน ค.ศ. 2023 (1 TECU = 10^{16} e/m²)

จากภาพที่ 1 ในการรับสัญญาณดาวเทียม GPS เป็นรายวันระหว่างเดือนกรกฎาคม – เดือนกันยายน ค.ศ. 2023 มีปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ดังนี้

เดือนกรกฎาคม ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น GPS TEC มีค่า 15 TECU, เวลาเที่ยงวัน GPS TEC มีค่า 68 TECU, เวลาพระอาทิตย์ตก GPS TEC มีค่า 52 TECU และเวลาเที่ยงคืน GPS TEC มีค่า 22 TECU

เดือนสิงหาคม ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น GPS TEC มีค่า 15 TECU, เวลาเที่ยงวัน GPS TEC มีค่า 92 TECU, เวลาพระอาทิตย์ตก GPS TEC มีค่า 59 TECU และเวลาเที่ยงคืน GPS TEC มีค่า 31 TECU

เดือนกันยายน ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น GPS TEC มีค่า 19 TECU, เวลาเที่ยงวัน GPS TEC มีค่า 114 TECU, เวลาพระอาทิตย์ตก GPS TEC มีค่า 87 TECU และเวลาเที่ยงคืน GPS TEC มีค่า 38 TECU

5.3 เปรียบเทียบ และหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลก และ GPS TEC

จากตารางที่ 2 พบว่า เดือนกรกฎาคม ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ 0.43, เวลาเที่ยงวัน ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ 0.11, เวลาพระอาทิตย์ตกค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ -0.35 และเวลาเที่ยงคืน ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ -0.08 และ -0.07 ตามลำดับ เดือนสิงหาคม ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ 0.36, 0.08 และ 0.19 ตามลำดับ, เวลาเที่ยงวัน ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ 0.35, 0.41 และ 0.35 ตามลำดับ, เวลาพระอาทิตย์ตกค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ 0.42, 0.4 และ 0.13 ตามลำดับ และเวลาเที่ยงคืน ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ 0.45, 0.35 และ 0.13 ตามลำดับ, เดือนกันยายน ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ 0.05, -0.14 และ -0.16 ตามลำดับ, เวลาเที่ยงวันค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ -0.2, -0.01 และ 0.1 ตามลำดับ, เวลาพระอาทิตย์ตกค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ -0.26, -0.29 และ -0.27 ตามลำดับ และเวลาเที่ยงคืน ค่าสนามแม่เหล็กโลกตามแกน X, Y และ Z มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า GPS TEC เท่ากับ -0.11, 0.06 และ -0.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าสนามแม่เหล็กโลกและ GPS TEC

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และช่วงเวลา	กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน			
	06:00	12:00	18:00	24:00	06:00	12:00	18:00	24:00	06:00	12:00	18:00	24:00
แกน X-GPS TEC	0.43	0.11	-0.35	-0.08	0.36	0.35	0.42	0.45	0.05	-0.2	-0.26	-0.11
แกน Y-GPS TEC	0.43	0.11	-0.35	-0.08	0.08	0.41	0.4	0.35	-0.14	-0.01	-0.29	0.06
แกน Z-GPS TEC	0.43	0.11	-0.35	-0.07	0.19	0.35	0.13	-0.13	-0.16	0.1	-0.27	-0.17

6. อภิปรายและสรุปผล

จากผลการวิจัยการหาค่าสนามแม่เหล็กโลก ช่วงพระอาทิตย์ขึ้นมีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน X สูงที่สุดอยู่ในช่วงระหว่าง 36653 nT ถึง 36671 nT และต่ำสุดที่แกน Z อยู่ในช่วงระหว่าง 8140 nT ถึง 8159 nT ช่วงเวลาเที่ยงวันมีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน X สูงที่สุดอยู่ในช่วงระหว่าง 36562 nT ถึง 36583 nT และต่ำสุดที่แกน Z อยู่ในช่วงระหว่าง 8118 nT ถึง 8136 nT ช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกมีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน X สูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 36540 nT ถึง 36549 nT และต่ำสุดที่แกน Z อยู่ในช่วงระหว่าง 8085 nT ถึง 8098 nT ช่วงเวลาเที่ยงคืนมีค่าสนามแม่เหล็กโลกแกน X สูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 36528 nT ถึง 36540 nT และต่ำสุดที่แกน Z อยู่ในช่วงระหว่าง 8083 nT ถึง 8092 nT ค่า GPS TEC ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้น GPS TEC สูงสุดมีค่า 19 TECU และต่ำสุดที่ 15 TECU ในช่วงเที่ยงวัน GPS TEC สูงสุดมีค่า 114 TECU และต่ำสุดที่ 68 TECU ในเวลาพระอาทิตย์ตก GPS TEC สูงสุดมีค่า 87 TECU และต่ำสุดที่ 52 TECU ในเวลาเที่ยงคืน GPS TEC สูงสุดมีค่า 38 TECU และต่ำสุดที่ 22 TECU และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กโลกและ GPS TEC ในเวลาพระอาทิตย์ขึ้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.43 และต่ำสุดเท่ากับ -0.16 ในช่วงเที่ยงวัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.41 และต่ำสุดเท่ากับ -0.2 ในเวลาพระอาทิตย์ตก มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.42 และต่ำสุดเท่ากับ -0.29 ในเวลาเที่ยงคืน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.45 และต่ำสุดเท่ากับ -0.17 ผลสรุปจากการวิจัยพบว่า GPS TEC ที่ได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กของโลกจากแนวพื้นดินไปยังทิศเหนือ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า ค่าสนามแม่เหล็กโลกมีการเหนี่ยวนำกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากผลการวิจัยสามารถอภิปรายและเปรียบเทียบผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen, et al. [6] ซึ่งตรวจสอบผลกระทบของการเกิดสนามแม่เหล็กโลกจากข้อมูล TEC และเปรียบเทียบค่าใน 28 วัน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าพายุสนามแม่เหล็กโลกและ TEC มีความคล้ายคลึงกันที่ละติจูดต่ำ กับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ละติจูดกลางต่อพายุแม่เหล็กโลก และค่าสนามแม่เหล็กโลกมีการเหนี่ยวนำกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nava et al. [5] ที่ได้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลพวงของพายุสนามแม่เหล็กโลกที่ละติจูดกลางกับการลดลงอย่างเห็นได้ชัดกับค่า TEC

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม และ Space, Satellite, and Study Laboratory หรือ SSS Lab ในการใช้สถานที่สำหรับการทำงานวิจัย รวมไปถึงองค์การความร่วมมือด้านอวกาศเอเชียแปซิฟิก (APSCO) สาธารณรัฐประชาชนจีน และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการติดตั้งเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kenpangkho, P., Watthanasangmechai, K., Supnithi, P., Tsugawa, T., & Maruyama, T. (2011). Comparison of GPS TEC measurements with IRI TEC prediction at the equatorial latitude station, Chumphon, Thailand. *Earth Planet*, 63, pp. 365–370. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.01.010>.
- [2] Ma, G., & Maruyama, T. (2003). Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Ann. Geophys*, 21, pp. 2083–2093. doi: <https://doi.org/10.5194/angeo-21-2083-20>.
- [3] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., & Arikan, O. (2008). Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC. *Radio Science*, 43(4), pp. 1-13
- [4] Rao, S. S., Galav, P., Sharma, S. B., & Pandey, R. (2013). Low-latitude TEC variability studied from magnetically conjugate locations along 73°E longitude. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 104, pp. 1-6.
- [5] Nava, B., Rodríguez-Zuluaga, J., Alazo-Cuartas, K., Kashcheyev, A., Miçoya-Orué, Y., Radicella, S. M., Amory-Mazaudier, C., & Fleury, R. (2016). Middle- and low-latitude ionosphere response to 2015St. Patrick's Day geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, pp. 3421-3438.
- [6] Chen, Z., Wang, J., S., Deng, Y., & Huang, C. M. (2017). Extraction of the geomagnetic activity effect from TEC data: A comparison between the spectral whitening method and 28 day running median. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, pp. 3632–3639.
- [7] Reddybattula, K. D., Panda, S. K., Ansari, K., & Peddi, V., S. R. (2019). Analysis of ionospheric TEC from GPS, GIM and global ionosphere models during moderate, strong, and extreme geomagnetic storms over Indian region. *Acta Astronautica*, 161, pp. 283-292.
- [8] de Paula, E. R., de Oliveira, C. B., A., Caton, R. G., Negreti, P. M., Batista, I. S., Martinon, A. R. F., Neto, A. C., Abdu, M. A., Monico, J. F. G., Sousasantos, J., & Moraes, A. O. (2019). Ionospheric irregularity behavior during the September 6-10, 2017, magnetic storm over Brazilian equatorial–low-latitudes. *Earth, Planets and Space*, 71 (42), pp. 1-15.
- [9] Dugassa, T., Habarulema, J. B., & Nigussie, M. (2019). Investigation of the relationship between the spatial gradient of total electron content (TEC) between two nearby stations and the occurrence of ionospheric irregularities. *Annales Geophysicae*, 37, pp. 1161-1180.
- [10] Chernyshov, A., A., Miloch, W., J., Jin, Y., & Zakharov, V., I. (2020). Relationship between TEC jumps and auroral substorm in the high-latitude ionosphere. *Scientific Reports*, 10 (6363), pp. 1-13.
- [11] Ratovsky, K. G., Klimenko, M. V., Dmitriev, A. V., & Medvedeva, I. V. (2022). Relation of extreme ionospheric events with geomagnetic and meteorological activity. *Atmosphere*, 13, pp. 1-15.

- [12] Klimenko, M., V., Klimenko, V., V., Zakharenkova, I., E., Ratovsky, K., G., Korenkova, N., A., Yasyukevich, Y., V., Mylnikova, A., A., & Chemiak, I., V. (2017). Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26-30 September 2011. *Annales Geophysicae*, 35, 923-938.
- [13] Bojilova, R., & Mukhtarov, P. (2023). Comparative analysis of global and regional ionospheric responses during two geomagnetic storms on 3 and 4 February 2022. *Remote Sensing*, 15, pp. 1-23.
- [14] Ansari, K., Walo, J., & Wezka, K. (2023). Ionospheric TEC variation over Svalbard archipelago, Norway and assessment of Bilinear interpolated GIM model. *Acta Astronautica*, 161, pp. 226-234
- [15] Maltseva, O. (2021). The Influence of Space Weather on the Relationship Between the Parameters TEC and foF2 of the Ionosphere. *IEEE J. Radio Freq. Identif*, 5, pp. 261-268.





ภาคผนวก จ
เครื่องมือ และสถานที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ และสถานที่ใช้ในการวิจัย

สถานีตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic station) ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย



ภาพที่ จ.1 อาคารสถานีตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก



ภาพที่ จ.2 เครื่องวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก



ภาพที่ จ.3 บริเวณจัดเก็บคอมพิวเตอร์แสดงผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก



ภาพที่ จ.4 การเก็บค่าสนามแม่เหล็กโลก

สถานีตรวจวัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ชุมพร (Chumphon Ionosphere Observation Station) ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ประเทศไทย



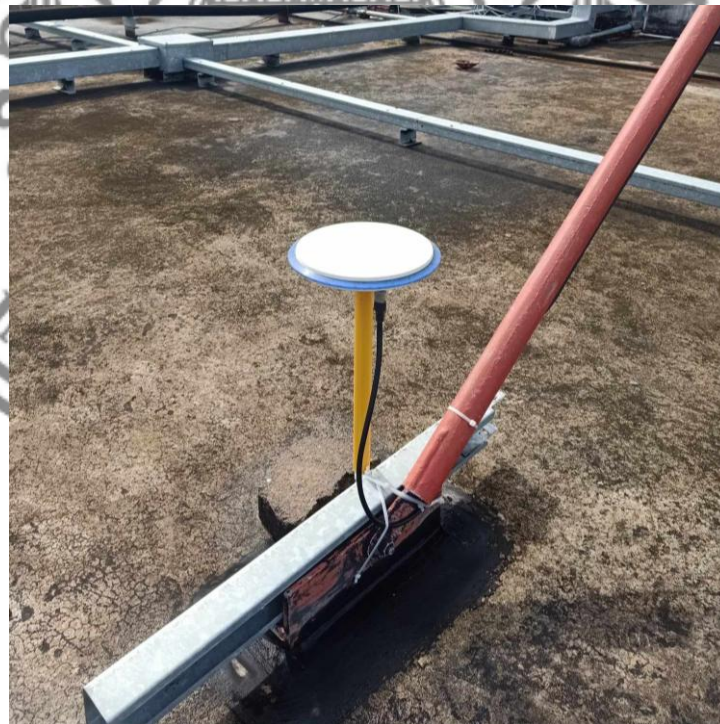
ภาพที่ จ.5 ห้องสถานีตรวจวัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



ภาพที่ จ.6 คอมพิวเตอร์จัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



ภาพที่ จ.7 เครื่องมือตรวจวัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



ภาพที่ จ.8 เสารับสัญญาณดาวเทียม ณ ด่านฟ้า KMITL ชุมพร

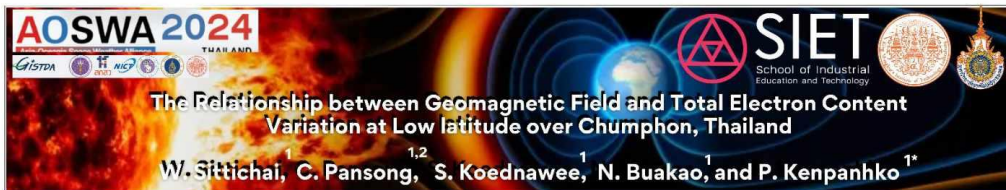


ภาคผนวก จ

การนำเสนอผลงาน และกิจกรรมต่าง ๆ

การนำเสนอผลงาน และกิจกรรมต่าง ๆ

การประชุมเชิงปฏิบัติการ Asia-Oceania Space Weather Alliance Workshop (AOSWA) ครั้งที่ 7 ในวันที่ 8-11 ตุลาคม พ.ศ. 2567 ณ โรงแรมโนโวเทล สุวรรณภูมิ จ.สมุทรปราการ



Department of Engineering Education, School of Industrial Education and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand. Department of Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, 12110, Thailand. (E-mail: 66036029@kmitl.ac.th, chollada_p@rmutt.ac.th, 65036040@kmitl.ac.th, 66036079@kmitl.ac.th, and prasert.ke@kmitl.ac.th)

INTRODUCTION:

This research focuses on the relationship between geomagnetic field and Total Electron Content (TEC) in the ionosphere, particularly at low-latitude regions, such as Chumphon, Thailand. Previous studies have examined TEC variations during geomagnetic storms using GPS TEC data from GNSS systems, highlighting the differences in ionospheric responses across latitudes. The research aims to analyze TEC changes during severe geomagnetic storms in 2023 and investigate the correlation between geomagnetic field measurements and TEC variations at low latitudes. The study uses TEC data from GPS satellites to better understand how geomagnetic disturbances affect ionospheric electron content and to explore the ionosphere's response to space weather events.

METHODOLOGY:

The research framework is based on the principles outlined by Chen et al. (2017) and Nava et al. (2016), which focus on the correlation between the geomagnetic field and changes in the Total Electron Content (TEC) in the ionosphere. This study utilizes data from GPS receivers in the GNSS system and geomagnetic field measurements at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Chumphon Campus. The hypothesis suggests that during geomagnetic storms, there will be a significant increase in the Total Electron Content in the ionosphere.

The STEC values, including STECP and STECL, this calculation is described by Equations (1)(Blewitt, 1990; Kenpankho et al., 2011).

STEC_L = (2(f1f2) / (k(f1^2 - f2^2))) * (L1λ1 - L2λ2), (1)

where k is 80.62 (m^3/s^2), l1, and l2 (l1 = 0.1904 m, l2 = 0.2444 m) are the wavelengths corresponding to f1 and f2, respectively. The VTEC, can be calculated from the GPS STEC measurement by considering the obliquity factor (Goodwin et al., 1995; Brunini et al., 2004; Ma & Maruyama, 2003; Kenpankho et al., 2011). It is shown in Equation (2) as below.

VTEC = STEC * cos χ, (2)

The zenith angle (χ) is the angle between a given location on the Earth's surface and the vertical direction pointing directly overhead. The zenith angle (χ) is expressed from Equation (3) as

χ = arcsin (RE cos α / (RE + h)), (3)

where RE is the mean radius of the Earth approximately 6,371 km, α is the elevation angle of the satellite, and h is the height of the ionospheric layer, which is assumed to be 400 km (Ma & Maruyama, 2003; Kenpankho et al., 2021). To obtain the VTEC with biases, as

VTEC = (STEC - b_s - b_r) * cos χ, (4)

where b_s and b_r are the estimated satellite and receiver biases. (Kenpankho et al., 2021).

The correlation between the geomagnetic field and TEC variations in the ionosphere, the researchers collected data over a three-month period from July to September 2023. Data was obtained from the geomagnetic monitoring station at KMITL, Chumphon Campus, Thailand. The study involved the following steps: (1) Collecting geomagnetic field data from the monitoring station; (2) Gathering GPS TEC data from satellite receivers at the same location; (3) Processing RINEX files to calculate standard global TEC values; and (4) Comparing the three-axis geomagnetic field values with TEC to analyze their correlation.

RESULTS:

Table 1: Geomagnetic field values from July to September 2023

Table with 3 columns for months (July, August, September) and 4 rows for X, Y, Z axes. Each cell contains values for 06:00, 12:00, 18:00, and 24:00.

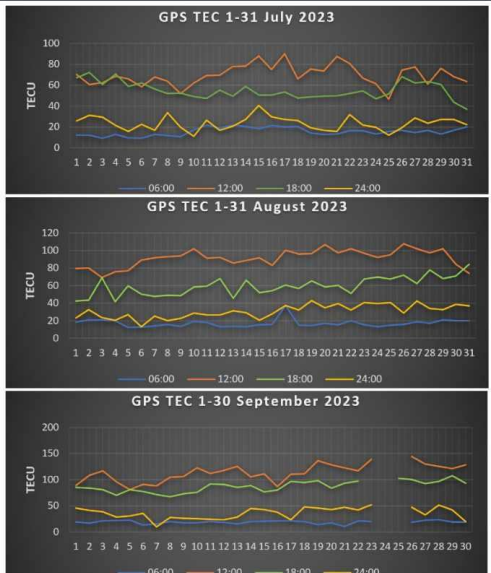


Figure 1. Daily TEC values from GPS satellite signals between July and September 2023.

Table 2: Correlation coefficient between geomagnetic field values and GPS TEC

Table with 3 columns for months (July, August, September) and 4 rows for X, Y, Z axes. Each cell contains correlation coefficients for 06:00, 12:00, 18:00, and 24:00.

CONCLUSION AND DISCUSSION:

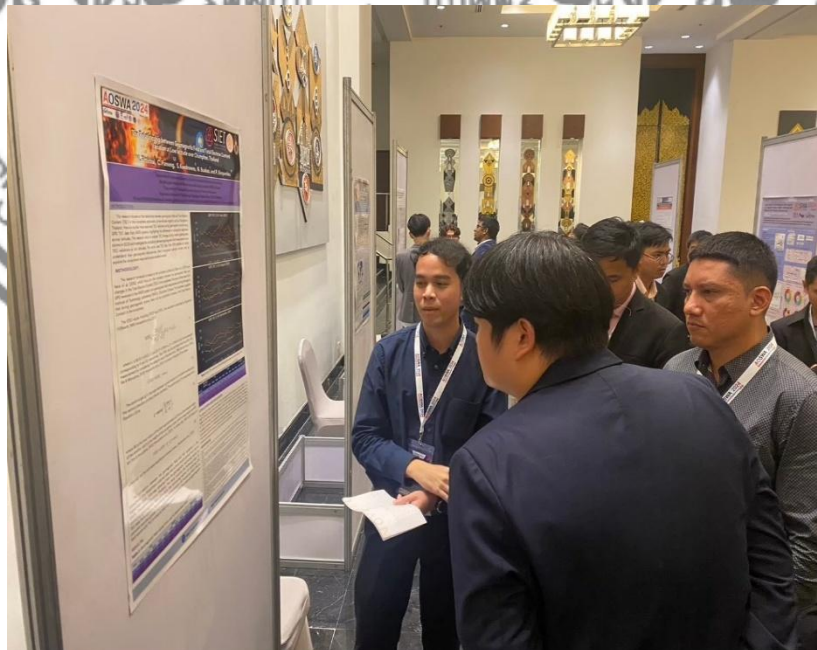
The research findings show that the X-axis geomagnetic field is highest at sunrise (36653 nT to 36671 nT) and lowest on the Z-axis (8140 nT to 8159 nT). At noon, the X-axis reaches 36562 nT to 36583 nT, and the Z-axis is lowest between 8118 nT and 8136 nT. The GPS TEC values range from 19 TECU at sunrise to a peak of 114 TECU at noon, and 38 TECU at midnight. The highest correlation between the geomagnetic field and GPS TEC occurs at midnight (0.45). The study concludes that there is a relationship between geomagnetic field variations and ionospheric TEC, which aligns with the findings of Chen et al. (2017) and Nava et al. (2016), indicating a correlation between geomagnetic storms and TEC variations at low latitudes.

REFERENCES:

List of references including Blewitt (1990), Chen et al. (2017), Goodwin et al. (1995), Brunini et al. (2004), Ma & Maruyama (2003), Kenpankho et al. (2011, 2021), and various other scientific papers related to geomagnetic fields and ionospheric TEC.



ภาพที่ ฉ.1 คณะผู้วิจัยนำโดย รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เคนพันค้อ
ณ AOSWA 2024



ภาพที่ ฉ.2 การนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์

โครงการสัมมนาวิทยานิพนธ์ การฝึกอบรมทางวิชาการ และการศึกษาดูงานนอกสถานที่
ระหว่างวันที่ 24-25 สิงหาคม พ.ศ. 2567



ภาพที่ ฉ.3 คณะผู้วิจัยร่วมกันถ่ายภาพหมู่ก่อนเดินทางไปสัมมนาวิทยานิพนธ์



ภาพที่ ฉ.4 รับเกียรติบัตรจบการสัมมนาวิทยานิพนธ์

โครงการจัดการความรู้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS เพื่อสังเกตความแปรปรวนใน
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ บริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
ณ กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร
วันเสาร์ที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2567




ภาพที่ ฉ.5 คณะผู้วิจัยร่วมกันถ่ายภาพหมู่หลังจบการแลกเปลี่ยนความรู้



ภาพที่ ฉ.6 การนำเสนอผลงานวิจัย ณ กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวิษณุพล สิทธิชัย	
วัน เดือน ปี เกิด	10 กรกฎาคม พ.ศ. 2543	
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร	
ประวัติการศึกษา	<p>พ.ศ. 2562 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนสมุทรปราการ</p> <p>พ.ศ. 2565 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรมแขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</p>	
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 128/9 ถ. หน้าเรือนจำ ต. กาฬสินธุ์ อ. เมืองกาฬสินธุ์ จ. กาฬสินธุ์ 46000	
ผลงานตีพิมพ์	<p>บทความภาษาอังกฤษ เรื่อง The study on the relationship between ionospheric delay and low-cost localizing robots ตีพิมพ์ในวารสาร Advances in Space Research ในฐานะข้อมูล Web of Science ระดับ Q1</p> <p>บทความเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14</p>	
รางวัลที่ได้รับ	ประกาศนียบัตรรางวัลบทความยอดเยี่ยม ในการประชุมวิชาการระดับชาติทางการศึกษา ครั้งที่ 14	