

การวิเคราะห์ค่าเชิงสถิติของความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
โดยใช้ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและบีคอนบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กต่ำ

STATISTICAL ANALYSIS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES USING GNSS
AND BEACON SATELLITES AT LOW MAGNETIC LATITUDES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2022-EN-M-027-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STATISTICAL ANALYSIS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES USING GNSS
AND BEACON SATELLITES AT LOW MAGNETIC LATITUDES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022

KMITL-2022-EN-M-027-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ค่าเชิงสถิติของความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและปีคอนบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กต่ำ
นักศึกษา	นายคณิติน สีชัย
รหัสประจำตัว	63601108
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric scintillation) เกิดจากการผันผวนของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ การเกิดซินทิลเลชันนั้นทำให้ประสิทธิภาพและคุณภาพของสัญญาณจากในระบบดาวเทียมนำร่องจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) นั้นลดลง ในบริเวณละติจูดต่ำ การเกิดซินทิลเลชันมักเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ ฟองพลาสมาศูนย์สูตร (Equatorial plasma bubble: EPB) หนึ่งในพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจจับ EPB เรียกว่า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนสฟุติ (Rate of TEC change Index: ROTI) ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน (S4 index) และค่า ROTI ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทั้งในเขตกรุงเทพมหานคร และ วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย โดยข้อมูลที่ได้รับมาจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสช่วงปี ค.ศ. 2019 ถึงปี 2021 จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าค่า ROTI และค่าดัชนี S4 มีความสอดคล้องกัน โดยส่วนใหญ่เมื่อค่า ROTI มีค่ามากกว่าเกณฑ์ ค่าดัชนี S4 จะมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดด้วย สัญญาณจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสส่วนใหญ่ได้รับผลกระทบจากความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยจะแตกต่างกันในแต่ละระบบและความถี่ โดยความถี่ที่ต่ำกว่าจะได้รับผลกระทบจากความผิดปกติมากกว่าความถี่ที่สูงกว่า และในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่าดัชนี S4 ที่ได้รับจากเครื่องรับปีคอนย่านความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ และเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส ย่านความถี่ 1,575.42 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย เพื่อศึกษาขนาดและคุณลักษณะของ EPB โดยข้อมูลที่ได้รับจะอยู่ในช่วงเดือนมีนาคม เมษายน กันยายนและตุลาคม ปี ค.ศ. 2021 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลาที่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สัญญาณจากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน

สามารถช่วยในบ่งชี้การเกิด EPB ได้ โดยการโคจรที่ระดับความสูงประมาณ 550 กิโลเมตรซึ่งโคจรที่ความสูงต่ำกว่าดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่โคจรอยู่ที่ความสูง 22,000 กิโลเมตรทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าและสามารถตรวจจับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้เวลาน้อยกว่าดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	STATISTICAL ANALYSIS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES USING GNSS AND BEACON SATELLITES AT LOW MAGNETIC LATITUDES
Student	Mr. Khanitin Seechai
Student ID.	63601108
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Prof. Pornchai Supnithi

ABSTRACT

Ionospheric scintillation is caused by the irregular electron density in the ionosphere. Severe ionospheric scintillation can degrade the signal quality and performance of global navigation satellite system (GNSS). In low-latitude region, the phenomenon that may cause the ionospheric scintillation, called equatorial plasma bubble or EPB frequently arises. The rate of TEC change Index (ROTI) is utilized to detect the EPB occurrences. The effects of EPB on the scintillation at different frequencies and systems need to be analyzed as the study will enhance our EPB understandings. In this work, we aim to determine the relationship between the amplitude scintillation index and the rate of TEC change index (ROTI) at KMITL, Bangkok, Thailand and Chumphon, Thailand. The data are collected from the GNSS receivers between 2019 and 2021. The statistical results show that the relationship between the S_4 index and ROTI are positive. When the ROTI values is higher than the threshold, The S_4 indices will be higher than threshold as well. Most of the GNSS signals are affected by disturbances, but each system and each frequency may experience different levels of ROTI and S_4 . Low frequency signals are affected more than high frequency signals. In addition, we analyze the S_4 index received from the beacon receiver and GNSS receiver at KMITL, Thailand. We aim to study the relationship of the amplitude scintillation index between GNSS and satellite beacon receivers at KMITL, Thailand to determine the size and characteristics of EPB. The GNSS data were

collected in March, April, September, and October 2021. From the analysis, the results show that during locally disturbed time, satellite beacon signals complement the GNSS signals to indicate EPB occurrences because it can capture the EPB over the short period.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาและคำแนะนำที่ดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาของผู้เขียน ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ ผู้เขียนได้รับคำแนะนำแนวทางการทำวิจัย อีกทั้งสนับสนุนให้ผู้เขียนตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการทำให้ผู้เขียนได้รับประสบการณ์มากขึ้น นอกจากนี้ยังสร้างทรศนะคติและวินัยที่ดีในการทำงาน ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณในโอกาสและความเมตตากรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษามอบให้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม และคอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยของผู้เขียน

ผู้เขียนขอขอบพระคุณหน่วยงาน National Institute of Information and Communications Technology (NICT) จากประเทศญี่ปุ่น และ Chinese Academy of Science จากประเทศจีน ที่สนับสนุนทุนวิจัยของผู้เขียน และเอื้อเฟื้อข้อมูลที่ทางผู้เขียนได้นำมาใช้ทดลองในงานวิจัยนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้อง ทุกคน จากห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารและสนเทศศาสตร์ด้านอวกาศและชั้นบรรยากาศ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนทำวิจัย สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่เป็นกำลังใจและแรงผลักดันที่สำคัญของผู้เขียนให้สามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณิติน สีชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน.....	4
2.2 เครื่องรับจีเอ็นเอสเอส.....	6
2.3 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กทรอนิกส์.....	8
2.4 ปฏิกิริยาการขึ้นทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	9
2.5 การคำนวณจุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (IONOSPHERE PIERCE POINT: IPPS).....	12
2.6 ค่าเฉลี่ยเชิงสถิติ.....	13
2.6.1 ตัวแปรสุ่ม (Random Variable).....	13
2.6.2 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean).....	13
2.6.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.).....	14
2.6.4 ความแปรปรวน (Variance: S.D. ²).....	14
2.6.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient).....	14
2.7 การตรวจสอบความผิดปกติและฟองพลาสมาด้วยเซนเซอร์หลากหลายชนิด.....	15
2.7.1 ภาพไอโอโนแกรม.....	15
2.7.2 เรดาร์ย่านวีเอชเอฟ (Very High Frequency: VHF).....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการที่นำเสนอและการออกแบบการทดลอง	20
3.1 โปรแกรมการอ่านค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน.....	21
3.1.1 โปรแกรมอ่านไฟล์ของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส	21
3.1.2 โปรแกรมอ่านไฟล์ของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนของสถานี KMITL	23
3.2 การวิเคราะห์ค่าสถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	25
3.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส	28
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	31
4.1 ผลการคำนวณค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	31
4.2 ผลการวิเคราะห์สถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	37
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน และเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส	44
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	57
5.1 บทสรุปผล	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก	61
ประวัติผู้เขียน	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลดาวเทียมวงโคจรต่ำบีกอนในปัจจุบัน.....	4
3.1 ค่าเกณฑ์ที่ใช้สำหรับค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับบีกอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส.....	25
3.2 สรุปงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการคำนวณค่าความสัมพันธ์ ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4	25
3.3 ข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องรับ Septentrio PolaRx5.....	26
3.4 ค่าเกณฑ์ที่ใช้สำหรับค่า ROTI และค่าดัชนี S_4	27
3.5 สรุปงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแอมพลิจูดซินทิเลชันจากเซนเซอร์หลายชนิด	28
3.6 ค่าดัชนี K_p ในเดือนเมษายน กันยายนและตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021.....	29
4.1 ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าดัชนี S_4 ในช่วงเวลาที่ผิดปกติของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	35
4.2 ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าดัชนี S_4 ในช่วงเวลาที่สงบของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	36
4.3 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2021.....	44
4.4 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2021	44
4.5 ความสำคัญของแต่ละกรณีที่ศึกษาค่าความผิดปกติของค่าดัชนี S_4	50
4.6 จำนวนเหตุการณ์ในแต่ละวันที่เกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส และบีกอนในเมษายน กันยายน และเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021	51
4.7 จำนวนเหตุการณ์เกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส และเครื่องรับบีกอนในเมษายน กันยายน และเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021	52
4.8 จำนวนเหตุการณ์เกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส และเครื่องรับบีกอน ในเมษายน กันยายนและเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน	5
2.2 ส่วนประกอบของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส	6
2.3 ย่านความถี่ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส	7
2.4 การมอดูเลตแบบ BPSK.....	7
2.5 ระยะเวลาเทียมและระยะเวลาจริงเมื่อสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	8
2.6 การเกิดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	10
2.7 เส้นทางการเดินทางของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จากดาวเทียมมายังเครื่องรับ (ก) มุมมองข้างหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง.....	12
2.8 ภาพไอโอโนแกรมจาก ionosonde เวลา 11:25น. ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2016 (ช่วงเวลาที่สงบ)	16
2.9 ภาพไอโอโนแกรมจาก ionosonde เวลา 17:30น. ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2016 (ช่วงเวลาที่ปกติ).....	17
2.10 สถานีเรดาร์ ณ สถานี CPN.....	17
2.11 ลักษณะของปริมจากเรดาร์ย่านวีเอชเอฟ สถานี CPN.....	18
2.12 ภาพจากเรดาร์ย่าน VHF เวลา 14:31น. วันที่ 5 ตุลาคม ค.ศ.2020	18
3.1 การเปรียบเทียบระดับความสูงของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน	20
3.2 ตัวอย่าง sky plot ของค่าดัชนี S_4 เวลา 16:52น. วันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021	21
3.3 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส PolaRX5.....	22
3.4 คำสั่งแปลงไฟล์ข้อมูลของสถานี KMITL	22
3.5 ไฟล์ข้อมูลค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเมื่อผ่านการแปลงไฟล์แล้ว.....	22
3.6 ไฟล์ข้อมูลซินทิลเลชันจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอนของสถานี KMITL ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021	23
3.7 สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน	24
3.8 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน	24
4.1 ค่าดัชนี S_4 ของสถานี KMITL ในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021.....	31
4.2 ค่าดัชนี S_4 ของสถานี KMITL ในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021 เมื่อตัดค่า Elevation cut off ..	32
4.3 ค่าดัชนี S_4 ของสถานี CPNในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021 (วันสงบ).....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
IX
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสของวันที่ 30 มีนาคม ค.ศ. 2021 (วันผิดปกติ).....	33
4.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ของค่าดัชนี S_4 จากสัญญาณจีพีเอส ในวันที่ผิดปกติ ปี 2021.....	34
4.6 ค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS73 ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021 (วันสงบ).....	35
4.7 ค่า ROTI จากสัญญาณจีพีเอส ณ สถานี KMITL ในวันที่ 21 มีนาคม ค.ศ.2021 (วันผิดปกติ) ..	37
4.8 ค่า ROTI จากสัญญาณ GPS ความถี่ L1 ณ สถานี KMITL ในวันที่ 26 มีนาคม ค.ศ.2021 (วันสงบ).....	38
4.9 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ค.ศ. 2019 สถานี KMITL กรุงเทพฯ	39
4.10 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ค.ศ. 2020 สถานี KMITL กรุงเทพฯ	39
4.11 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ตั้งแต่วันที่ 11 พฤศจิกายน ถึงวันที่ 31 ธันวาคม ค.ศ. 2020	40
4.12 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ค.ศ. 2021 สถานี KMITL จังหวัดกรุงเทพฯ.....	41
4.13 ค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2021.....	41
4.14 ค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2021.....	42
4.15 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2021.....	43
4.16 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนเมษายนปี ค.ศ. 2021	43
4.17 ตัวอย่าง Skyplot ของค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณกาลิเลโอ E03 วันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021 ของสถานี KMITL	45
4.18 ข้อมูลค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS73 ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021.....	45
4.19 Skyplot ของค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS73 ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021	46
4.20 ค่าดัชนี S_4 ของเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสในวันที่ 21 มีนาคม ค.ศ. 2021	47
4.21 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอน ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติในวันที่ 30 มีนาคม ค.ศ. 2021	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับ GNSS ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ ในวันที่ 7 ตุลาคม ค.ศ. 2021.....	48
4.23 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ ในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021.....	49
4.24 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอนในช่วงเวลาที่สงบ ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2021	50
4.25 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอน ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021.....	54
4.26 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสในช่วงเวลาหลังจากที่เกิดความผิดปกติ ในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	54
4.27 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอน ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติในวันที่ 17 มีนาคม ค.ศ. 2021	55
4.28 ภาพเรดาร์ย่าน VHF เวลา 13:26น. ที่เกิดความผิดปกติในวันที่ 17 มีนาคม ค.ศ. 2021.....	55
4.29 ค่า spread F จากเครื่องรับ ionosonde ในวันที่ 17 มีนาคม ค.ศ. 2021	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ระบบดาวเทียมนำร่องจีเอ็นเอสเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) จัดเป็นโครงสร้างพื้นฐานรองรับบริการตำแหน่ง การนำร่อง และเวลาแม่นยำ (position, navigation, and timing: PNT) สัญญาณจีเอ็นเอสเอสเอสเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ผิดปกติ อาจเกิดการผันผวนแบบสุ่มรู้จักกันในชื่อซินทิลเลชัน (Ionospheric scintillation) การเข้าใจการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันมีความสำคัญในการประเมินคุณภาพของระบบนำทาง [1] ในเขตละติจูดต่ำ เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเอสส่วนมากจะไม่สามารถวัดการเกิดซินทิลเลชันอย่างเช่นค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน (Amplitude scintillation: S_4 index) ได้ ในขณะที่การคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนสฟุทธิ (the rate of TEC change: ROTI) จะสามารถทำได้ง่ายด้าย ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [2-7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับค่าสหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 พบว่ามีค่าความสัมพันธ์เป็นบวก เพื่อที่จะศึกษาความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ที่ศึกษา มี 2 กรณีที่ใช้ในการตัดสินใจ 1. กรณีที่เกิดความผิดปกติ (disturbed) โดยเกิดจากพองพลาสมาศูนย์สูตร (Equatorial plasma bubble: EPB) และ 2. กรณีที่สงบ (quiet) ในปี ค.ศ. 1999 [2] ได้คำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และดัชนี S_4 โดยใช้การหาอัตราส่วนระหว่างค่า $ROTI/S_4$ ที่เกาะอัสเซนชัน (Ascension Island) ผลการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนอยู่ระหว่าง 2 ถึง 10 ในงานวิจัยที่ [3] ถึง [5] ได้คำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ที่เมืองชานย่า ประเทศจีน บริเวณขั้วโลกเหนือ และที่เขตปกครองพิเศษฮ่องกง ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างค่า $ROTI/S_4$ มีค่าระหว่าง 0.3 และ 0.6 ในปี ค.ศ. 2021 [7] คำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 เหนือบริเวณละติจูดต่ำพบว่าค่าความสัมพันธ์จะแตกต่างกันในแต่ละฤดู โดยค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.95 ในงานวิจัย [8] ได้คำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ที่สถานี CPN ประเทศไทย โดยใช้ค่าสถิติการเกิดระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กันโดยเมื่อค่า ROTI มีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ มีโอกาสที่ค่าดัชนี S_4 จะมากกว่าเกณฑ์ด้วย

ในประเทศไทยนั้นยังมีการศึกษาเกี่ยวกับค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันไม่มากนัก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลงานวิจัย 2 ประเด็นได้แก่ 1. ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 โดยข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเอสได้รับจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเอสที่วิทยาเขตชุมพร สถาบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย (10.65 องศาเหนือ, 99.37 องศาตะวันออก) ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ช่วงระหว่างวันที่ 11 พฤศจิกายน ถึงวันที่ 31 ธันวาคม ปี ค.ศ. 2020 คลื่นความถี่ของดาวเทียมจีพีเอสที่ใช้ในการวิเคราะห์คือความถี่ L1 (1,575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) และความถี่ L5 (1176.45 เมกะเฮิร์ตซ์) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย (13.73 องศาเหนือ, 100.77 องศาตะวันออก) และ 2.ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่าดัชนี S_4 ที่ได้รับจากเครื่องรับดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน (Beacon receiver) และเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย (13.73 องศาเหนือ, 100.77 องศาตะวันออก) ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ช่วงระหว่างเดือนมีนาคม เมษายน กันยายน และตุลาคม ปี ค.ศ. 2021 คลื่นความถี่ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ใช้ในการวิเคราะห์คือความถี่ L1 และความถี่ที่ใช้สำหรับดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอนคือเท่ากับ 150 เมกะเฮิร์ตซ์

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยวิธีการประมาณค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กต่ำ
- 2) เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ในการอ่านค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากไฟล์ที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณ
- 3) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอิเล็กทรอนิกส์
- 4) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการระบุสถานะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ตำแหน่งบริเวณประเทศไทยและโดยรอบในช่วงละติจูดที่ 0 ถึง 25 องศาเหนือและช่วงลองจิจูดที่ 95 ถึง 110 องศาตะวันออก โดยในการวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันนั้นจะใช้สัญญาณจากดาวเทียม GPS และ GALILEO จากสถานี KMITL ณ ประเทศไทยในปี ค.ศ. 2019 – 2021 และได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการอ่านค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันโดยใช้โปรแกรมแมทแลป (Matlab) เพื่อให้สามารถระบุเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาค่า

แอมพลิจูดซินทิลเลชันและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กทรอนิกส์ โดยเก็บสถิติการเกิดความ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดปกติของค่าดังกล่าวรายวันในปี ค.ศ. 2019 2020 และปี ค.ศ. 2021 และคำนวณค่าสหสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสองในเดือนที่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศชั้นบอยครั้ง และเก็บสถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันที่ได้รับจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่โคจรอยู่ที่ความสูง 22,000 กิโลเมตรและดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนที่โคจรอยู่ที่ความสูง 550 กิโลเมตร

1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จัดเรียงเนื้อหาออกเป็น 5 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ขอบเขตการวิจัย และโครงประกอบวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับข้อมูลระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและดาวเทียมวงโคจรระดับต่ำปีคอนรวมถึงพารามิเตอร์จากสัญญาณดาวเทียมที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ และค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน พื้นฐานไปสู่การอธิบายถึงการแปลงตำแหน่งจากมุมเงย (Elevation angle) และมุมกวาด (Azimuth) เป็นจุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere pierce point: IPPs) เพื่อศึกษาความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ใช้ประกอบงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงการอ่านข้อมูลจากไฟล์ที่ได้รับจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอน การออกแบบการวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันร่วมกับค่าอิเล็กทรอนิกส์ และการออกแบบการวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากเครื่องรับหลายชนิด

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน สถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอิเล็กทรอนิกส์และค่าสถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากเครื่องรับหลายชนิด

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของการวิจัย และข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาต่อยอดในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับข้อมูลระบบดาวเทียมวงโคจรระดับต่ำปโคอน (Low Earth Orbit: LEO) และดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่เป็นวงโคจรระดับกลาง (Medium Earth Orbit: MEO) รวมถึงพารามิเตอร์สัญญาณดาวเทียมและข้อมูลจากดาวเทียมที่แตกต่างกันในดาวเทียมแต่ละระบบ ที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ และค่าแอมพลิจูดซินทินเลชันเพื่อสร้างความเข้าใจพื้นฐานไปสู่การอธิบายถึงการแปลงตำแหน่งจากมุมเงย (Elevation angle) และมุมกวาด (Azimuth) เป็นจุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere pierce point: IPPs) และอธิบายเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยเชิงสถิติเพื่อศึกษาความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

2.1 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปโคอน

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปโคอน (Beacon receiver) รับสัญญาณจากดาวเทียมวงโคจรระยะต่ำ (Low Earth Orbit: LEO) โคจรที่ระดับความสูงไม่เกิน 2,000 กิโลเมตร

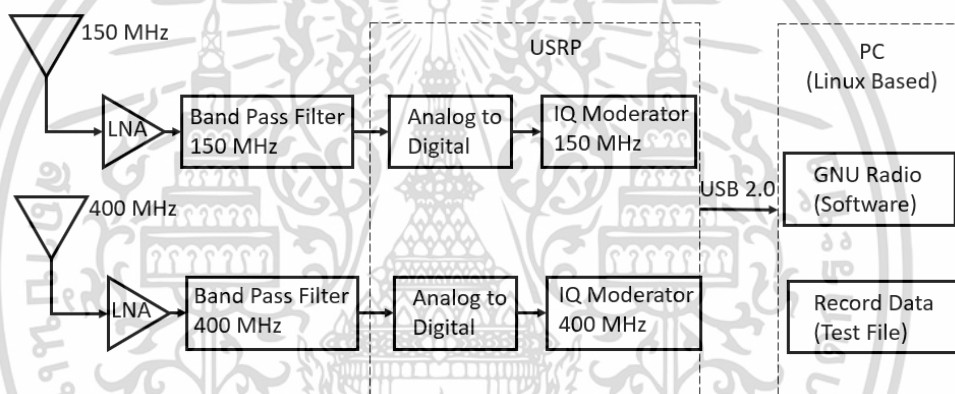
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลดาวเทียมวงโคจรต่ำปโคอนในปัจจุบัน

ชื่อดาวเทียม	ความถี่ (MHz)	ข้อมูลที่ส่งมายังภาครับ
Cosmos	150 และ 400	Positional signal transmissions and store/forward comms
Oscar	150 และ 400	Ionospheric modelling for US military (NIMS)
Nadezhda	150 และ 400	Navigation - plus Search and Rescue monitoring
Tsikada	150 และ 400	Navigation - plus Search and Rescue monitoring
Geosat	150 และ 400	Oceanography - wave height measurement
RADCAL	150 และ 400	Radar calibration
GFO	150 และ 400	Oceanography - wave height measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อดาวเทียม	ความถี่ (MHz)	ข้อมูลที่ส่งมายังภาครับ
ARGOS	150 และ 400	USAF space experiments
USA 147	150 และ 400	Military meteorological satellite
Picosat 9	150 และ 400	USAF Space Test Program (STEP)
Formosat	150 และ 400	Atmospheric studies

สัญญาณที่เครื่องรับปีคอนรับได้จากดาวเทียม FS71-FS76 มีความถี่เท่ากับ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนโคจรจากทิศตะวันตกไปยังทิศ ตะวันออกและใช้เวลาโคจรเหนือหน้าฟ้าเพียงประมาณ 15 นาที โดยได้แสดงบล็อกไดอะแกรมของ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนดังรูปที่ 2.1

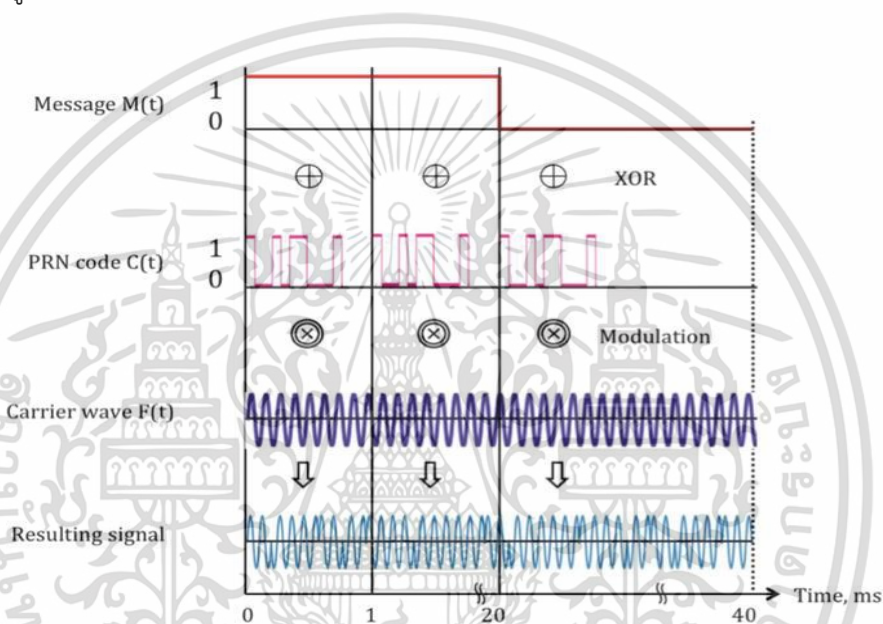


รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน

จากรูปที่ 2.1 แสดงการได้รับค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน เมื่อได้รับสัญญาณจากสายอากาศ สัญญาณจะผ่าน low-noise amplifier (LNA) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับ ขยายสัญญาณที่รับ โดยจะขยายกำลังของสัญญาณและตัดส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนออกไปและผ่าน การกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF) เพื่อรับสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์และความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นสัญญาณที่ได้รับจะผ่านการแปลงจากสัญญาณ แอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลและทำการแปลงข้อมูลจากสัญญาณเบสแบนด์ด้วยค่าที่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์และ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ไปเป็นคลื่นความถี่วิทยุ โดยค่าดัชนี S_4 คำนวณได้จากส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของกำลังของสัญญาณหารด้วยค่าเฉลี่ยของกำลังของสัญญาณ จึงจะได้รับค่าดัชนี S_4 จาก สัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน

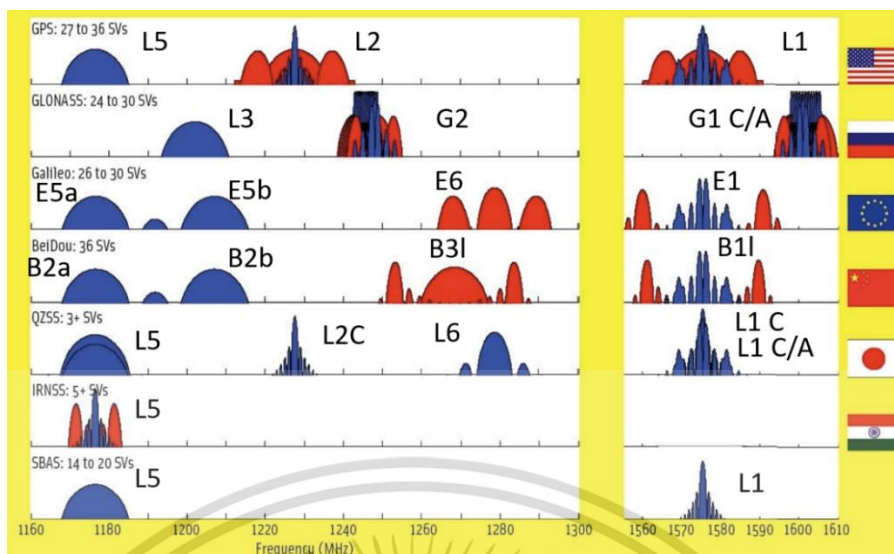
2.2 เครื่องรับจีเอ็นเอสเอส

เครื่องรับจีเอ็นเอสเอส (GNSS receiver) ที่รับสัญญาณจากดาวเทียมวงโคจรระยะปานกลาง (Medium Earth Orbit: MEO) ที่อยู่ความสูงประมาณ 22,000 กิโลเมตร โดยกลุ่มดาวเทียมในช่วงวงโคจรนี้โดยทั่วไปแล้วดาวเทียมหนึ่งดวงจะส่งสัญญาณหลายชนิดพร้อมกัน การส่งสัญญาณดิจิทัลของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสผ่านคลื่นความถี่วิทยุสัญญาณจะประกอบไปด้วยความถี่ของสัญญาณพาห้ (Carrier frequency), สัญญาณ code และข้อมูลนำร่อง (Navigation data) [9] ดังแสดงดังรูปที่ 2.2



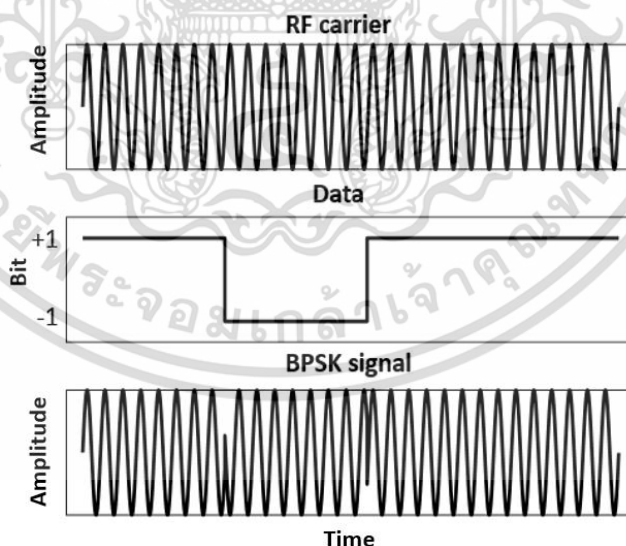
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส [10]

จากรูปที่ 2.2 ข้อมูลที่จะถูกส่งออกไปถูกนำไป XOR กับโค้ด Pseudorandom number (PRN) หรือ $C(t)$ และทำการคูณกับคลื่นพาห้หรือ $F(t)$ โดยทั่วไปแล้วดาวเทียมหนึ่งดวงจะส่งสัญญาณหลายความถี่พร้อมกันเช่น สัญญาณจีพีเอสที่ส่งสัญญาณพร้อมกันถึง 8 ชนิด (L1C / A, L1C, L2C, L5, L1P (Y), L1M, L2P (Y), L2M) ในย่านความถี่ L1, L2 และ L5 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ย่านความถี่ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส [11]

จากรูปที่ 2.3 แต่ละระบบจะใช้คลื่นความถี่ที่ใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน แต่การเข้ารหัสจะไม่เหมือนกัน ในการส่งสัญญาณนั้นจะใช้การมอดูเลตเฟส (Phase modulation) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูล โดยที่การมอดูเลตที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส คือ binary phase shift keying (BPSK) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่สัญญาณใหม่บางชนิดก็จะใช้การมอดูเลตแบบ binary offset carrier (BOC) [12]



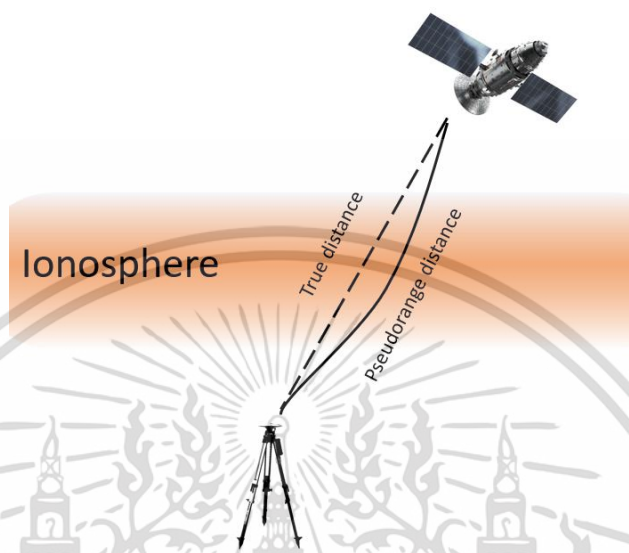
รูปที่ 2.4 การมอดูเลตแบบ BPSK

จากรูปที่ 2.4 ข้อมูลที่ถูกส่งจากดาวเทียมจะถูกนำไปเข้ารหัสกับคลื่นพาห์โดยการเข้ารหัสแบบ BPSK โดยหากข้อมูลไบนารีที่จะส่งเป็นบวก สัญญาณจะเริ่มที่ 0 องศา หากเป็นข้อมูลไบนารีที่จะส่งเป็นลบ สัญญาณจะเริ่มที่ 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนสุทธิ

ระยะทางเทียม (Pseudorange) คือระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับที่คำนวณจากเวลาของสัญญาณที่ได้รับจากดาวเทียมซึ่งมีค่าผิดพลาดอยู่ซึ่งไม่ใช่ระยะทางจริงแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระยะทางเทียมและระยะทางจริงเมื่อสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากรูปที่ 2.5 การที่สัญญาณจีเอ็นเอสเอสเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศช้ากว่าความเร็วในสุญญากาศ ทำให้ระยะทางเทียมระหว่างดาวเทียม และเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสที่วัดได้จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสมีค่ามากกว่าความเป็นจริง ค่าอิเล็กตรอนสุทธิที่ความแม่นยำมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ ช่วยเพิ่มความแม่นยำของการใช้งานด้านอวกาศ เช่นการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม การสื่อสารผ่านดาวเทียม ใช้ตรวจจับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศ เพื่อแจ้งเตือนให้กับผู้ใช้งานระดับทั่วไป เช่น รถเกษตรอัจฉริยะ รถยนต์ไร้คนขับ โดรน และการเดินทางอากาศยาน

อิเล็กตรอนสุทธิ (Total Electron Content: TEC) คือ ปริมาณรวมของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเส้นทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับมีหน่วยเป็น TECU หรือ (electron/m²) กำหนดให้ค่า TEC_p คือค่าอิเล็กตรอนสุทธิที่คำนวณจากการวัดระยะทางเทียมที่คำนวณจากนับค่ารหัสของข้อมูลสัญญาณ (Code pseudorange: $P1$, $P2$) และ TEC_c คือค่าอิเล็กตรอนสุทธิที่คำนวณจากการระยะเฟสของความถี่คลื่นพาห์ (Carrier-phase pseudorange: $L1$, $L2$) ตามลำดับ โดยมีสูตรการคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$TEC_p = k \cdot (P2 - P1) \quad (2.1)$$

$$TEC_c = k \cdot (\lambda_1 L1 - \lambda_2 L2) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\lambda_{1,2} = \frac{c}{f_{1,2}}$ และ $k = 9.5196$

และ P_1 คือ ระยะทางเทียบที่คำนวณจากนับค่ารหัสของข้อมูลสัญญาณความถี่ที่ 1

P_2 คือ ระยะทางเทียบที่คำนวณจากนับค่ารหัสของข้อมูลสัญญาณความถี่ที่ 2

L_1, L_2 คือ ระยะเฟสของความถี่คลื่นพาห์ (หน่วยเป็น เมตร)

ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิล็กตรอนสุทธิ (the rate of TEC change index: ROTI) คำนวณได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเปลี่ยนแปลงของอิล็กตรอนสุทธิ (the rate of TEC: ROT) [13] สมการในการคำนวณค่า ROTI คือ

$$ROTI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ROT(i) - \overline{ROT})^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ ROT คือผลต่างระหว่างค่าอิล็กตรอนสุทธิในแนวเฉียง (slant TEC) ในช่วงเวลาที่ $i+1$ และ i โดยมีสมการคือ

$$ROT = STEC(i+1) - STEC(i) \quad (2.4)$$

เมื่อ $STEC(i+1)$ และ $STEC(i)$ คือ slant TEC ของเวลาที่ $i+1$ และ i ตามลำดับ โดย $STEC$ สามารถคำนวณได้จาก TEC โดยมีสมการคือ

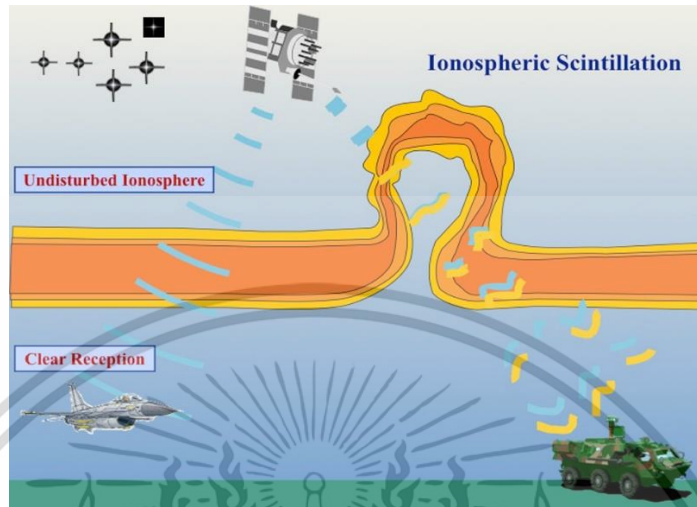
$$STEC[TECu] = TEC_t - \langle TEC_p - TEC_t \rangle \quad (2.5)$$

เมื่อ $\langle . \rangle$ คือค่าเฉลี่ยของค่า TEC ในช่วงเวลาที่สนใจ

2.4 ปรากฏการณ์ซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ปรากฏการณ์ซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation) คือ ความผันผวนอย่างรวดเร็วของค่ามุมเฟสและค่าแอมพลิจูดของคลื่นสัญญาณที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความผิดปกติ โดยจะเกิดขึ้นบริเวณใกล้ ๆ กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกช่วงหลังพระอาทิตย์ตก บริเวณที่มีการเกิดแสงออโรรา และบริเวณขั้วโลก ความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเขตนี้เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง เรียกว่า ฟองพลาสมาศูนย์สูตร (Equatorial plasma bubble: EPB) เป็นบริเวณซึ่งมีความหนาแน่นของพลาสมา (อิล็กตรอนและไอออน) ต่ำกว่าบริเวณโดยรอบ ซึ่งจะเริ่มเกิดที่ด้านล่างชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก

ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ชี้วัดการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันคือแอมพลิจูดซินทิลเลชัน (Amplitude scintillation) หรือค่าดัชนี S_4 และเฟสซินทิลเลชัน (Phase scintillation) โดยแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [15]

จากรูปที่ 2.6 เมื่อเกิดซินทิลเลชันที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณ EPB จะเกิดความผันผวนของค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณ โดยในบริเวณละติจูดต่ำจะสนใจที่ค่าดัชนี S_4 สำหรับแอมพลิจูดซินทิลเลชันสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}} \quad (2.6)$$

โดยที่ SI คือค่าความเข้มของสัญญาณที่ตรวจจับได้มีหน่วยเป็น วัตต์ และ $\langle . \rangle$ คือค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่น่าสนใจ ซึ่งรูปแบบโดยทั่วไปของ SI คำนวณได้จาก [13]

$$SI = \frac{NP - WP}{(NP - WP)_{lpf}} \quad (2.7)$$

เมื่อ NP และ WP คือ กำลังของแถบความถี่แคบ (Narrow Bandwidth Power) และกำลังของแถบความถี่กว้าง (Wide Bandwidth Power) ตามลำดับ $(NP - WP)_{lpf}$ คือส่วนที่เป็นความถี่ต่ำของ $NP - WP$ ซึ่ง $(NP - WP)_{lpf}$ คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของ $NP - WP$ ในช่วงเวลา 1 นาทีโดย NP และ WP สามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$WP = \sum_{i=1}^{20} (I_i^2 + Q_i^2) \quad (2.8)$$

$$NP = \left(\sum_{i=1}^{20} I_i^2 \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{20} Q_i^2 \right)^2 \quad (2.9)$$

ซึ่ง I และ Q คือ สัญญาณ in-phase ที่ให้ค่าเอาต์พุตที่มีเฟสเดียวกันกับอินพุต และ quadrature-phase สัญญาณเอาต์พุตที่มีเฟสต่างกับอินพุต 90 องศา ของสัญญาณที่ได้รับจากดาวเทียมตามลำดับ โดยการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันที่เกิดจากผลกระทบจาก EPB จะสามารถคำนวณ scale size ของ EPB ได้จาก [14]

$$d_F = \sqrt{2\lambda h} \quad (2.10)$$

โดย d_F คือ scale size ที่สามารถตรวจวัดได้ λ คือความยาวคลื่นและ h ความสูงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น โดยที่ความสูง 350 กิโลเมตร ระบบ GNSS ความถี่ 1,575.42 เมกะเฮิร์ตซ์ และระบบดาวเทียมบีคอนความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์สามารถตรวจวัด scale size ได้เท่ากับ 370 เมตรและ 1,180 เมตร ในกรณีเครื่องรับบีคอน (GNU radio beacon receivers: GRBR) ค่าดัชนี S_4 จะคำนวณได้จาก

$$S_{4,beacon} = \frac{Std(P_{beacon})}{avg(P_{beacon})} \quad (2.11)$$

เมื่อ $Std(P_{beacon})$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังจากสัญญาณจากดาวเทียมที่เครื่องรับบีคอนรับได้และ $avg(P_{beacon})$ ค่าเฉลี่ยของกำลังจากสัญญาณจากดาวเทียมที่เครื่องรับบีคอนรับได้ โดยกำลังของสัญญาณจากดาวเทียมที่เครื่องรับบีคอนรับได้คำนวณได้จาก

$$P_{beacon} = I_{beacon}^2 + Q_{beacon}^2 \quad (2.12)$$

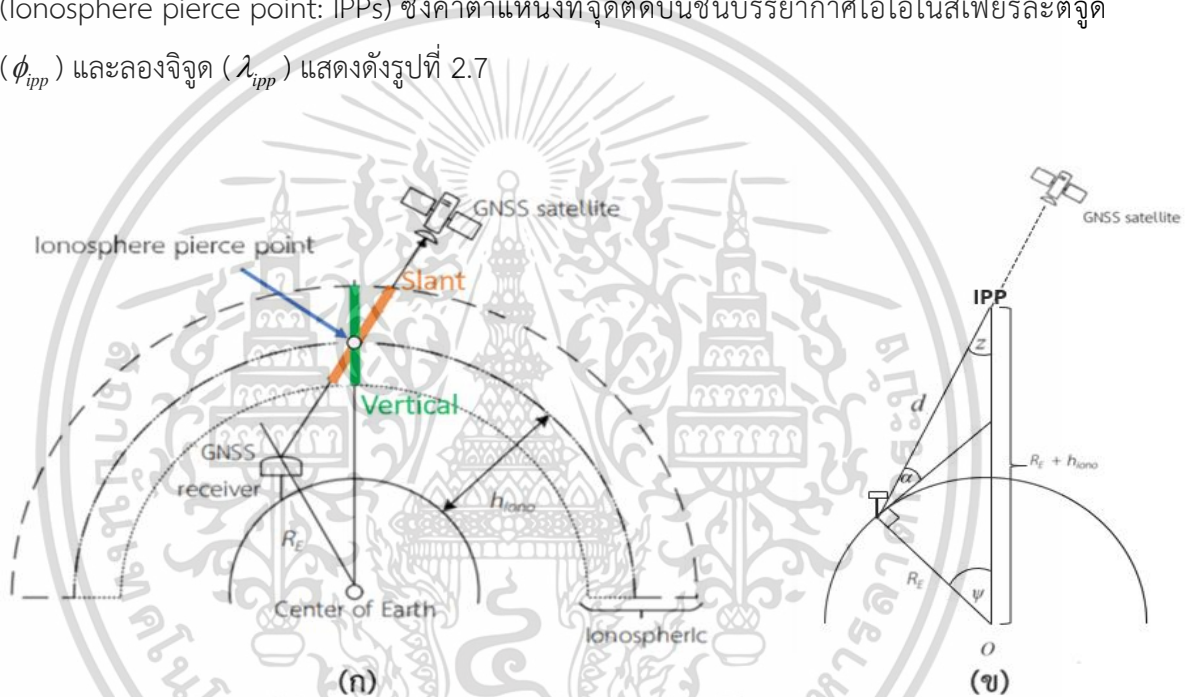
เมื่อ I_{beacon} และ Q_{beacon} คือ สัญญาณ in-phase และ quadrature-phase ของสัญญาณจากดาวเทียมที่เครื่องรับบีคอนรับได้

โดยปกติช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขึ้นบ่อยครั้งคือ ช่วงวิษุวัต (Equinox) ซึ่งช่วงวิษุวัตหมายถึงช่วงที่ดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งตรงได้ฉากกับเส้นศูนย์สูตรของโลกพอดี ซึ่งจะเกิดขึ้นปีละ 2 ครั้ง หรือในหนึ่งรอบที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ ความเอียงของแกนโลกจะเลื่อนมาอยู่ในระนาบที่ได้ฉากกับตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งวันนั้นกลางวันจะเท่ากับกลางคืน โดยจะอยู่

ในช่วงเดือนมีนาคม เมษายน กันยายนและตุลาคมของทุก ๆ ปีซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวจะเกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขึ้นบ่อยครั้ง

2.5 การคำนวณจุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere pierce point: IPPs)

ในการหาความสัมพันธ์ของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน และเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจะศึกษาความสัมพันธ์ที่จุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere pierce point: IPPs) ซึ่งค่าตำแหน่งที่จุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ละติจูด (ϕ_{ipp}) และลองจิจูด (λ_{ipp}) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นทางการเดินทางของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากดาวเทียมมายังเครื่องรับ (ก) มุมมองข้างหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง

จากรูปที่ 2.7 การคำนวณจุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถคำนวณได้โดย

$$\phi_{ipp} = \phi_u + \varphi \cos A \tag{2.13}$$

$$\lambda_{ipp} = \lambda_u + \frac{\varphi \sin A}{\cos \phi_{ipp}} \tag{2.14}$$

$$\varphi = 90 - el - \sin^{-1} \left[\frac{r_e}{r_e + h} \cos(el) \right] \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดของผู้รับ คือ (ϕ_u, λ_u) A คือ คีอุมุมกวาด (Azimuth) และ ρ คือขนาดของมุมจากตำแหน่ง IPPs ถึงเครื่องรับโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของโลก el คือขนาดของมุมเงย r_e คือขนาดของรัศมีโลกมีค่าคงที่เท่ากับ 6,371 กิโลเมตร และ h คือความสูงของจุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ต้องการทราบ เช่น ตำแหน่งของผู้รับอยู่ละติจูดที่ 13.73 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 100.77 องศาตะวันออก ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน FS71 โคจรอยู่ที่กวาด 319 องศา และขนาดของมุมเงยเท่ากับ 30.04 องศา จะได้ค่าขนาดของมุมจากตำแหน่ง IPPs ถึงเครื่องรับโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของโลกเท่ากับ 4.81 ต้องการคำนวณหาตำแหน่งของดาวเทียมดวงนี้ที่ความสูง 350 กิโลเมตร เมื่อแทนค่าในสมการข้างต้น จะได้ตำแหน่งที่จุดตัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ละติจูดที่ 17.36 องศาเหนือและลองจิจูดที่ 97.46 องศาตะวันออก

Magnetic latitude คือ ละติจูดบนสนามแม่เหล็กโลกที่ตั้งฉากกับพื้นผิวโลกบริเวณนั้น แตกต่างจาก geographic latitude คือ ละติจูดในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ใช้ระบุตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นผิวทรงกลมของโลก โดยการอ้างอิงพิกัดที่เกิดจากค่าระยะเชิงมุม ซึ่งเคลื่อนออกจากศูนย์กำเนิด (Origins) ที่กำหนดขึ้น ซึ่งพิกัดทั้งสองระบบมีมุมต่างกันอยู่ประมาณ 11.3 องศา โดยสามารถแปลงค่าผ่านทางเว็บไซต์ <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html> โดยใส่ค่า geographic latitude และปีที่ต้องการแปลงค่าก็จะได้ค่า Magnetic latitude ที่ต้องการ

2.6 ค่าเฉลี่ยเชิงสถิติ

2.6.1 ตัวแปรสุ่ม (Random Variable)

ตัวแปรสุ่ม หมายถึง ตัวแปรที่วัดได้จากกระบวนการสุ่มหรือกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนอยู่ ตัวแปรสุ่มจะเป็นฟังก์ชันที่แปลงจากเหตุการณ์ไปเป็นจำนวนจริง ค่าที่เป็นไปได้ของตัวแปรสุ่มจะแทนผลที่เป็นไปได้ของการทดลองนั้น ๆ

2.6.2 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean)

เป็นค่ากลางที่ได้จากการนำเอาข้อมูลแต่ละตัวของหน่วยสังเกตมารวมกัน แล้วนำผลรวมที่ได้มาหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่าเฉลี่ยของประชากร แทนด้วย μ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง แทนด้วย \bar{x} โดยคำนวณได้จาก

$$\mu = \frac{\sum x_i}{N} \quad (2.16)$$

โดยที่ x_i คือ ค่าสังเกตของหน่วยสังเกตแต่ละหน่วย

$\sum x_i$ คือ ผลรวมของค่าข้อมูลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด

2.6.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.)

เป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของข้อมูลแต่ละตัวกับค่าเฉลี่ย หรือหมายถึง โดยเฉลี่ย ๆ แล้ว ข้อมูลแต่ละตัวมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด ถ้าหากค่ามีความแตกต่างมากแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายมาก ถ้าหากค่ามีความแตกต่างน้อยแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายน้อย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร แทนด้วย สัญลักษณ์ คือ σ โดยคำนวณได้จาก

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2.17)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร
 x_i คือ ค่าสังเกตของหน่วยสังเกตแต่ละหน่วย
 N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด

2.6.4 ความแปรปรวน (Variance: S.D.²)

ค่าความแปรปรวนเป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างกำลังสองของข้อมูลแต่ละตัวกับค่าเฉลี่ย หรือที่เรียกว่า ส่วนเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square deviation) คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง หมายถึง โดยเฉลี่ย ๆ แล้ว ข้อมูลแต่ละตัวมีความแตกต่างกำลังสองจากค่าเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด ถ้าค่านั้นมีความห่างมากแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายมาก ถ้าห่างน้อยแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายน้อย ความแปรปรวนของประชากร แทนด้วย σ^2 ความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่าง แทนด้วย S.D.² โดยคำนวณได้จาก

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N} \quad (2.18)$$

2.6.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

การคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงปริมาณ 2 ชุด หรือมากกว่าด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป และสามารถบอกได้ว่า ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันนั้นมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางใด สหสัมพันธ์เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลหรือตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่า มีความสัมพันธ์กันในระดับใด และมีความสัมพันธ์ในทิศทางใด โดยจะมี 3 ค่าได้แก่ ค่าบวก แสดงว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวก ค่าเหล่านั้นมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ค่าลบ แสดงว่ามีความสัมพันธ์เชิงลบ ค่าเหล่านี้นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางตรงกันข้าม และ ค่าศูนย์ คือ ค่าเหล่านี้นั้นไม่มีความสัมพันธ์กันเลย โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ρ สามารถคำนวณได้จาก

$$\rho = \frac{\text{cov}(x_i - \mu)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.19)$$

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.20)$$

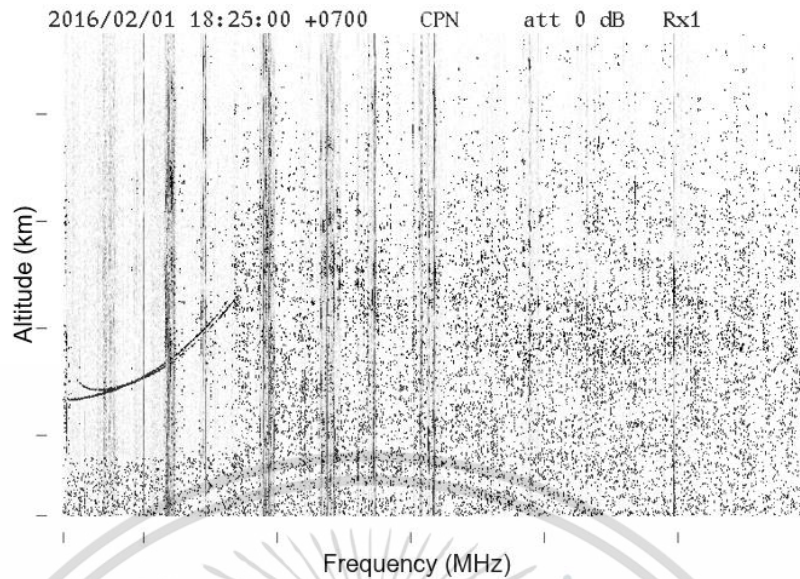
$$\rho = \frac{\sum_1^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum_1^N (x_i - \mu_x)^2 \sum_1^N (y_i - \mu_y)^2}} \quad (2.21)$$

โดยที่ $\text{cov}(x_i - \mu)$ หรือ σ_{xy} คือ ความแปรปรวนร่วมของตัวแปรสุ่ม x และ y
 σ_x, σ_y คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร x และ y ตามลำดับ
 μ_x, μ_y คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร x และ y ตามลำดับ

2.7 การตรวจสอบความผิดปกติและฟองพลาสมาด้วยเซนเซอร์หลากหลายชนิด

2.7.1 ภาพไอโอโนแกรม

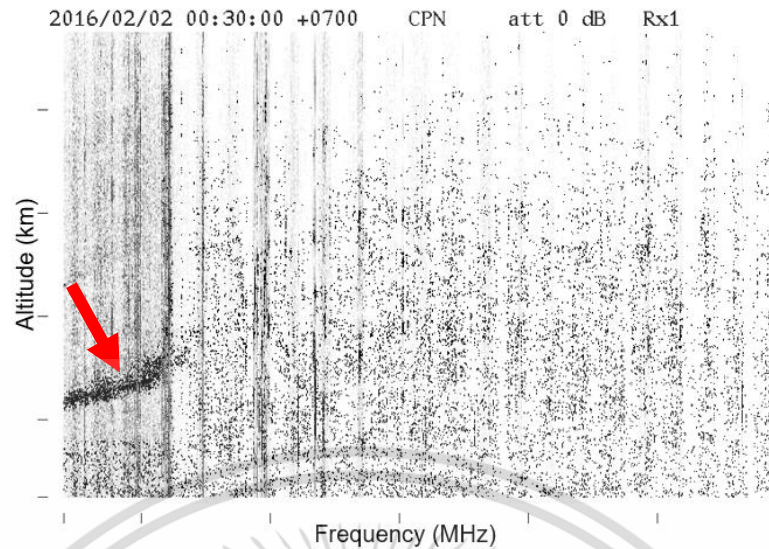
ภาพไอโอโนแกรม คือข้อมูลรูปภาพที่ได้รับจากเครื่องรับ ionosonde โดยจะใช้ย่านความถี่ High Frequency (HF) สามารถรับคลื่นสะท้อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มายังสายอากาศ โดยสามารถรับได้ในช่วงความถี่ 2-30 เมกะเฮิรตซ์ โดยการส่งและรับคลื่น ซึ่งจะบ่งบอกถึงความผิดปกติบริเวณด้านล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยได้แสดงตัวอย่างภาพที่ได้จากเครื่องรับ ionosonde ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพไอโอโนแกรมจาก ionosonde เวลา 11:25น.

ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2016 (ช่วงเวลาที่สงบ)

จากรูปที่ 2.8 แสดงภาพไอโอโนแกรมจาก ionosonde ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2016 เวลา 11:25น. ตามเวลามาตรฐานจีทีเอส ซึ่งเป็นวันที่ไม่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยแกนตั้งคือความสูงและแกนนอนคือความถี่ โดย ionosonde จะส่งคลื่นความถี่ขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศและรับทำให้เห็นถึงความสูงที่คลื่นสามารถส่งไปได้และสะท้อนกลับลงมายังเครื่องรับซึ่งจะเห็นเป็นเส้นชัดเจนบริเวณด้านซ้ายของกราฟ และผู้วิจัยได้แสดงภาพไอโอโนแกรมเมื่อเกิดสเปรตเอฟ (Spread F) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพไอโอโนแกรมจาก ionosonde เวลา 17:30น.

ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2016 (ช่วงเวลาที่ปกติ)

จากรูปที่ 2.9 แสดงภาพไอโอโนแกรมจาก ionosonde ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2016 เวลา 13:30น. ตามเวลามาตรฐานซีทีเอสซึ่งเป็นวันที่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือสเปรตเอฟ สังเกตได้จากคลื่นที่ได้รับมานั้นเกิดการกระจายดังรูป

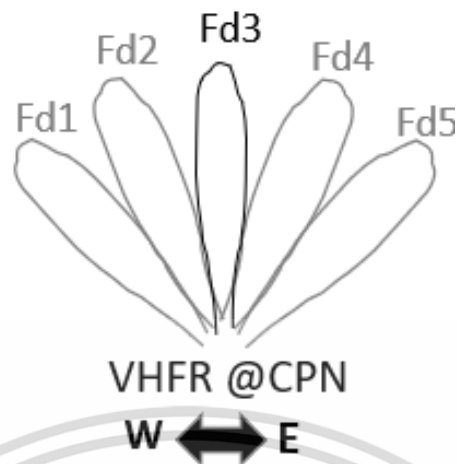
2.7.2 เรดาร์ย่านวีเอชเอฟ (Very High Frequency: VHF)

สถานีเรดาร์ ตั้งอยู่ที่วิทยาเขตชุมพร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย (10.72 องศาเหนือ, 99.37 องศาตะวันออก) โดยติดตั้งสายอากาศยาก็ไว้กับเสาทั้งหมด 18 ต้น ความถี่ที่ใช้คือ 39.65 เมกะเฮิร์ตซ์



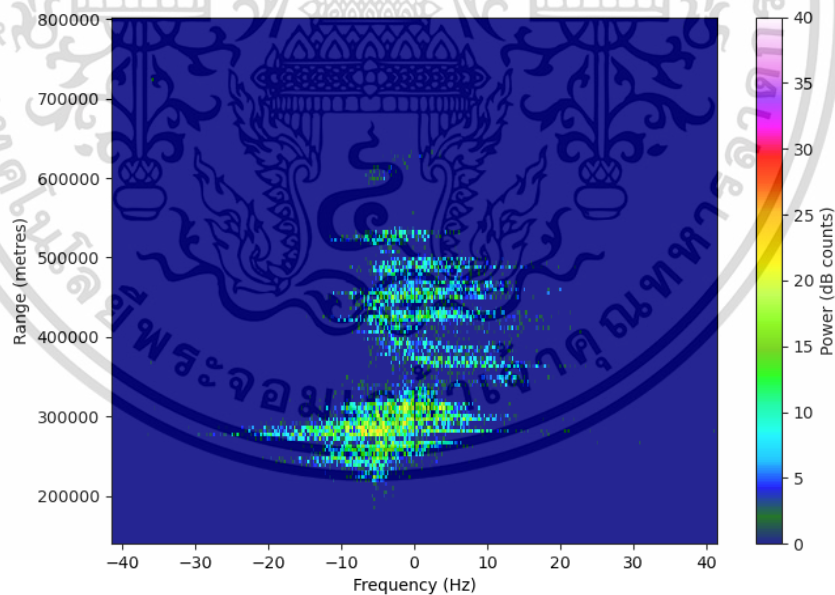
รูปที่ 2.10 สถานีเรดาร์ ณ สถานี CPN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลักษณะของบีมจากเรดาร์ย่านวีเอชเอฟ สถานี CPN

ข้อมูลเรดาร์ย่านวีเอชเอฟ (Very High Frequency: VHF) ที่รับได้จะถูกนำมาแสดงผลในรูปแบบของ 2-D fan plot สามารถพล็อตได้จากค่าพลังงานการกระจายกลับ (Echo power) ที่แต่ละระยะทางของลำคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาเมื่อตรวจจับ EPB โดยแสดงตัวอย่างภาพที่ได้จากเรดาร์ย่าน VHF ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพจากเรดาร์ย่าน VHF เวลา 14:31น. วันที่ 5 ตุลาคม ค.ศ.2020

จากรูปที่ 2.12 แสดงภาพจากเรดาร์ย่าน VHF ช่วงเวลาที่สามารถตรวจจับ EPB ได้ในวันที่ 5 ตุลาคม ค.ศ.2020 เวลา 14:31น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอส โดยแกนตั้งจะเป็นค่าระยะทางจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องรับถึง EPB และแกนนอนแสดงความถี่ และแถบด้านขวาค่าพลังงานการกระจายกลับ (Echo power) ที่แต่ละระยะทางของลำคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาเมื่อตรวจจับ EPB

การใช้ภาพเหล่านี้ พร้อม ๆ กัน โดยมีข้อดีคือ ภาพไอโอโนแกรมและภาพจากเรดาร์ที่ย่าน VHF ช่วยในการยืนยันว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับค่าดัชนี S_4 เกิดจาก EPB ข้อเสียคือไม่สามารถบอกขนาดของ EPB ได้

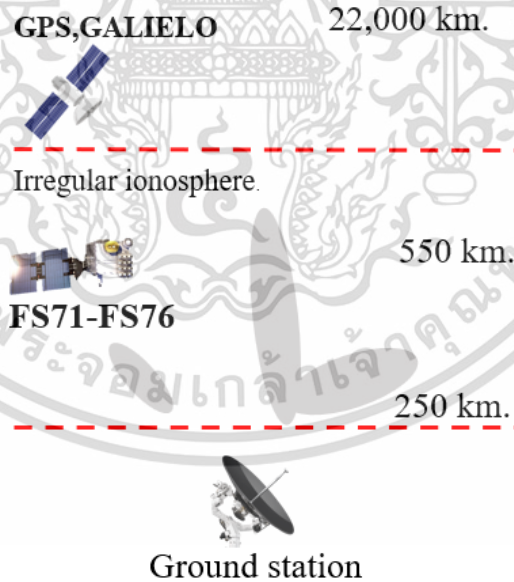


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการที่นำเสนอและการออกแบบการทดลอง

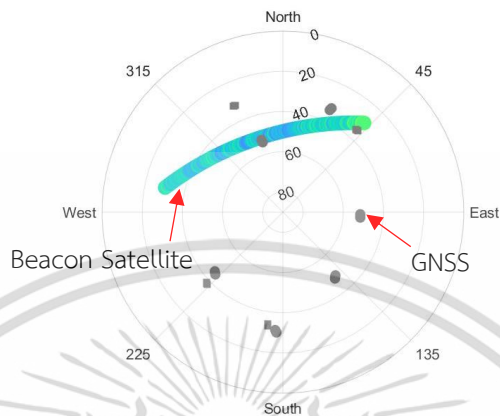
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมก่อนหน้าที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนสุทธิกับการเกิดชั้นทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดชั้นทิลเลชันจากเซนเซอร์หลายชนิด การดำเนินการในการอ่านค่าแอมพลิจูดชั้นทิลเลชัน โดยในหัวข้อที่ 3.1 เกี่ยวกับการอ่านค่าที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอส การแปลงไฟล์ที่ได้รับเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ และการอ่านค่าที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน เกณฑ์ที่ใช้ในจำแนกวันที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของค่าแอมพลิจูดจากเครื่องรับทั้งสอง ในหัวข้อที่ 3.2 กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์สถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดชั้นทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และในหัวข้อที่ 3.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอส โดยแสดงการเปรียบเทียบระดับความสูงของดาวเทียมจีเอ็นเอสและดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบระดับความสูงของดาวเทียมจีเอ็นเอสและดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงระบบความสูงในการโคจรของดาวเทียมทั้งสองระบบที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ โดยดาวเทียมจีเอ็นเอสจะโคจรที่ความสูงประมาณ 22,000 กิโลเมตร โดยเราจะสามารถเห็นดาวเทียมแต่ละดวงอยู่บนท้องฟ้าได้ประมาณ 12 ชั่วโมงและสามารถเห็นดาวเทียมจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบจีเอ็นเอสเอสได้ตลอด 24 ชั่วโมง และดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนจะโคจรที่ความสูงประมาณ 550 กิโลเมตร เราจะสามารถเห็นดาวเทียมแต่ละดวงอยู่บนท้องฟ้าได้ประมาณ 15 นาที และจะเห็นเป็นดาวเทียมเป็นช่วง ๆ ประมาณ 20 ครั้งต่อวัน โดยแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่าง sky plot ของค่าดัชนี S_4 เวลา 16:52น. วันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่าง sky plot ของค่าดัชนี S_4 ที่ได้รับจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน เวลา 16:52น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอส วันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021 จะสามารถเห็นดาวเทียม FS74 ซึ่งเป็นดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนเป็นเส้นเนื่องจากเครื่องที่ได้เร็วกว่าดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส โดยจะเห็นดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเป็นจุดเนื่องจากโคจรได้ช้ากว่า

3.1 โปรแกรมการอ่านค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน

3.1.1 โปรแกรมอ่านไฟล์ของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส

ข้อมูลการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสได้รับจากเครื่องรับ Septentrio PolaRx5 ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้าน GNSS และ Space Weather ดาดฟ้าอาคาร 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส PolaRX5

สัญญาณจีพีเอสที่ใช้มีความถี่ L1 (1.575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) และ L5 (1.176 เมกะเฮิร์ตซ์) เครื่องรับสามารถรับระยะทางเทียม (Pseudorange) ค่า C/N0 ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส โดยความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ใน ปี ค.ศ. 2019 ถึงปี ค.ศ. 2021 ข้อมูลจากดาวเทียมจีพีเอสที่มีมุมเงยมากกว่า 30 องศาจะถูกใช้ในการศึกษาเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของผลกระทบจากคลื่นหลายวิถี (Multipath Effect) โดยข้อมูลที่ได้รับมาจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเป็นข้อมูลไบนารีซึ่งจะต้องทำการแปลงเป็นไฟล์ ionospheric scintillation monitoring records (ISMR) ก่อนเพื่อให้เป็นไปตามแบบฟอร์มที่ใช้ในโปรแกรมอ่านค่าดัชนี S_4 และใช้ค่า elevation cut off เท่ากับ 30 องศา เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนจากสัญญาณคลื่นหลายวิถี (Multipath) โดยเครื่องรับสัญญาณ GNSS จะได้รับสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอสและกาลิเลโอ ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลไบนารีซึ่งมีอยู่ในเซิร์ฟเวอร์ของแลปมาทำการแปลงไฟล์โดยใช้คำสั่งในคอมมานไลน์ของ Linux ดังรูปที่ 3.4

```
basknts@DESKTOP-3DD3321:/mnt/d/Master_degree/S4_KMITL$ ./bin2asc.exe -f D:/Master_degree/S4_KMITL/093/KMIT20210930.sbf -m ISMR -v -x -t -b 2021-04-03_00:00:00 -e 2021-04-03_23:59:59
```

รูปที่ 3.4 คำสั่งแปลงไฟล์ข้อมูลของสถานี KMITL

จากรูปที่ 3.4 ผู้วิจัยได้นำไฟล์ข้อมูลไบนารีของค่าดัชนี S_4 สถานี KMITL ในวันที่ 3 เดือน เมษายน ปี ค.ศ. 2021 มาแปลงไฟล์โดยใช้โปรแกรม bin2asc.exe โดยแปลงไฟล์ข้อมูลไบนารีเป็นไฟล์ ISMR เพื่อใช้ในการพล็อตกราฟอ่านค่าดัชนี S_4 ในแกนเวลาเมื่อทำการแปลงไฟล์ข้อมูลแล้วจะได้ไฟล์ข้อมูล 1 วันตั้งแต่เวลา 00:00น. ถึง 23:59น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอส โดยรูปแบบไฟล์ที่ผ่านการแปลงไฟล์แล้วเป็นดังรูปที่ 3.5

```
-----
File Creation Date/Time: ? ???. ????. ???:??:??
Block Name: ISMR (SBF)
TOW [s],WNC [w],RXChannel,Signal,SVID,S4,SigmaPhi [rad]
-----
521520.000,2151,1,GPS_L1CA,G29,0.345000,0.079000
521520.000,2151,1,GPS_L2C,G29,0.373000,0.097000
521520.000,2151,2,GPS_L1CA,G31,0.085000,0.037000
521520.000,2151,2,GPS_L2C,G31,0.129000,0.044000
521520.000,2151,3,GEO_L1,S130,0.089000,1.225000
521520.000,2151,4,GPS_L1CA,G27,0.112000,0.047000
521520.000,2151,4,GPS_L2C,G27,0.104000,0.038000
521520.000,2151,4,GPS_L5,G27,0.078000,0.031000
521520.000,2151,5,GAL_L1BC,E26,0.153000,
521520.000,2151,7,GAL_L1BC,E31,0.069000,0.029000
521520.000,2151,7,GAL_E5a,E31,0.067000,0.027000
521520.000,2151,8,GAL_L1BC,E19,0.080000,0.031000
521520.000,2151,8,GAL_E5a,E19,0.085000,0.032000
521520.000,2151,9,GPS_L1CA,G26,0.041000,0.025000
521520.000,2151,9,GPS_L2C,G26,0.059000,0.026000
521520.000,2151,9,GPS_L5,G26,0.040000,0.021000
-----
```

รูปที่ 3.5 ไฟล์ข้อมูลค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเมื่อผ่านการแปลงไฟล์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 ไฟล์ที่ทำการแปลงแล้วจะให้ค่าของ GPS week Second of week ช่องของเครื่องรับ ชนิดของสัญญาณที่ได้รับ ดาวเทียมที่ส่งสัญญาณ ค่าดัชนี S_4 และค่าเฟสซินทิลเลชัน เนื่องจากบริเวณละติจูดต่ำ ความผิดพลาดจะขึ้นเฉพาะในค่าดัชนี S_4 ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจเฉพาะค่าดัชนี S_4 แต่ไม่ได้สนใจศึกษาค่าเฟสซินทิลเลชัน ข้อมูลค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนของสถานี KMITL ตั้งแต่วันที่ 19 เดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2019 เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีรูปแบบของไฟล์ที่สามารถใช้โปรแกรมอ่านได้จนถึงปัจจุบัน

3.1.2 โปรแกรมอ่านไฟล์ของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนของสถานี KMITL

ไฟล์ข้อมูลค่าดัชนี S_4 ของสถานี KMITL นั้นจะให้ค่าของเวลาโดยเริ่มจาก 0 วินาทีจากเวลาเริ่มต้นที่ได้รับสัญญาณ พลังงานที่ได้รับและค่าดัชนี S_4 ของความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าของพลังงานที่ได้รับและค่าของดัชนี S_4 ของความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยไฟล์จะมีรูปแบบดังรูปที่ 3.6

```
time (s) 400MHz (pow S4) 150MHz (pow S4) (noise_400=1.38876e-11, noise_150=2.61186e-10)
0.499995, 1.38876e-11, 1.06045, 2.61186e-10, 0.969655
1.49999, 1.08957e-11, 0.933587, 2.83962e-10, 0.811662
2.49999, 1.20413e-11, 0.837944, 3.28114e-10, 0.88137
3.5, 1.22539e-11, 1.04149, 2.95884e-10, 0.790823
4.5, 1.25691e-11, 1.16565, 3.8535e-10, 1.11753
5.5, 1.05806e-11, 0.879324, 2.98254e-10, 0.940437
6.5, 1.63684e-11, 0.779056, 4.07033e-10, 0.959733
7.5, 1.19278e-11, 1.04674, 3.58952e-10, 0.876627
8.5, 1.66245e-11, 0.781196, 2.26433e-10, 0.81366
9.5, 1.00814e-11, 1.2364, 2.7438e-10, 0.812635
10.5, 1.32343e-11, 1.02493, 3.14275e-10, 1.04098
11.5, 1.29379e-11, 0.822336, 4.05396e-10, 0.891637
12.5, 1.75094e-11, 0.863851, 3.34521e-10, 0.830722
13.5, 8.79954e-12, 0.940764, 3.26838e-10, 0.90998
14.5, 1.45783e-11, 0.946118, 3.60641e-10, 1.29791
15.5, 1.1914e-11, 0.814891, 4.35322e-10, 0.922828
16.5, 1.28491e-11, 1.00809, 4.09676e-10, 0.930811
17.5, 1.29324e-11, 1.16433, 2.6939e-10, 0.693208
18.5, 1.16467e-11, 0.978303, 3.32615e-10, 0.75393
19.5, 1.17292e-11, 0.900831, 3.12901e-10, 0.877566
20.5, 1.22707e-11, 1.22089, 2.93377e-10, 0.941094
21.5, 9.33958e-12, 1.13961, 2.81926e-10, 0.975601
22.5, 1.27886e-11, 0.975224, 2.74332e-10, 0.793573
23.5, 1.41046e-11, 0.887231, 2.77538e-10, 0.859527
24.5, 1.27015e-11, 0.846446, 3.46954e-10, 0.959675
25.5, 9.09675e-12, 0.980761, 3.63151e-10, 0.979641
26.5, 1.0698e-11, 0.772278, 3.76682e-10, 1.07346
27.5, 1.32871e-11, 0.859932, 3.64951e-10, 0.915634
```

รูปที่ 3.6 ไฟล์ข้อมูลซินทิลเลชันจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนของสถานี KMITL ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021

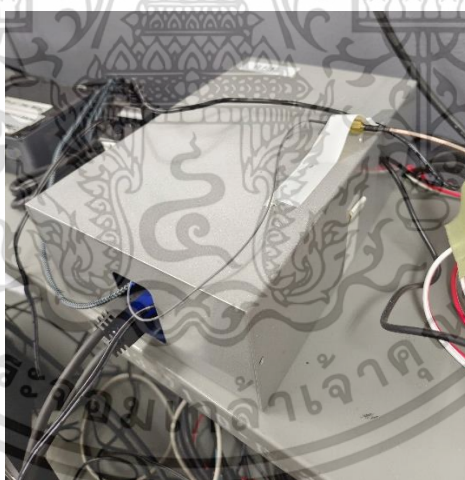
ข้อมูลการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันได้รับจากเครื่องรับปีคอนติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเช่นเดียวกัน สัญญาณปีคอนมีความถี่เท่ากับ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณดาวเทียมที่ได้รับมาจากดาวเทียม FS71 ถึง FS76 ทั้งหมด 6 ดวง โดยดาวเทียมทั้ง 6 ดวงจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออก โคจรที่ความสูงประมาณ 550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลเมตร โดยในแต่ละเวลาจะสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนได้เพียงดวงเดียวเท่านั้น โดยดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนจะใช้เวลาโคจรผ่านน่านฟ้าประมาณ 10 นาที ข้อมูลค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนของสถานี KMITL จะสามารถใช้ได้ตั้งแต่วันที่ 19 เดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2019 เป็นข้อมูลที่มีรูปแบบที่สามารถใช้โปรแกรมอ่านข้อมูลได้จนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 3.7 สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน



รูปที่ 3.8 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน

โดยปกติค่าของดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและปีคอนในวันที่ไม่พบความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าน้อยกว่า 0.2 [21] และ 0.8 ตามลำดับ ดังนั้นจึงได้ตั้งเกณฑ์เมื่อเกิดความผิดปกติของค่า S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและปีคอนเท่ากับ 0.2 และ 0.8 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าเกณฑ์ที่ใช้สำหรับค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส

S_4 index	Disturbed	Quiet
GNSS	≥ 0.2	< 0.2
Beacon	≥ 0.8	< 0.8

จากตารางที่ 3.1 ผู้วิจัยได้การนำค่าดัชนี S_4 ในวันที่มีความความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และวันที่ไม่เกิดความผิดปกติมาทำการคำนวณค่าเกณฑ์ โดยเฉลี่ยค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนนั้นปกติจะมีค่าประมาณ 0.5 และในวันที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ค่าของดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอน โดยเกณฑ์ของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนใช้หลักฐานเชิงประจักษ์จากการสังเกตและวัดค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติและช่วงเวลาที่สงบ มีค่าประมาณ 0.8 จึงได้ตั้งเกณฑ์เมื่อเกิดความผิดปกติไว้ที่ 0.8 และมีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 มากกว่า 1 นาที

3.2 การวิเคราะห์ค่าสถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากการศึกษาแนวโน้มงานวิจัยที่เกี่ยวกับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยสนใจที่ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันซึ่งงานวิจัยก่อนหน้าสนใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กทรอนิกส์กับค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันและค่าเฟสซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปงานบททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการคำนวณค่าความสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4

งานก่อนหน้า	วัตถุประสงค์
[2] B. Santimay et al., Radio Science, 1988.	คำนวณค่าความสัมพันธ์ค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 โดยหาอัตราส่วนระหว่างค่า ROTI/ S_4 ที่เกาะฮัสเซนชัน, 1988
[3] T.E. Humphreys et al., Inside GNSS, 2009.	คำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ที่ซานย่า ประเทศจีน, 2009
[4] X. Pi et al., Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting, April 2013.	คำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ที่บริเวณขั้วโลก, 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[5] Z. Yang and Z. Liu, GPS Solutions, 2015.	คำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง ROTI และ Ionospheric scintillation ที่ฮ่องกง. 2015
[6] C. Li et al., Sensors, 2020.	คำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI multipath และ Ionospheric Scintillation ที่ เซาเปาลู ประเทศบราซิล และแอนตาร์กติกา , 2020
[7] N.A. Manga et al., Progress In Electromagnetics Research M, 2021.	คำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และ Ionospheric Scintillation ที่ประเทศอินเดีย. 2021

จากตารางที่ 3.2 การศึกษาแนวโน้มงานวิจัยที่เกี่ยวกับความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยสนใจที่ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้จะสนใจเกี่ยวกับการคำนวณค่าความสัมพันธ์ของค่า ROTI กับการเกิดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเขตปกครองพิเศษฮ่องกงบริเวณละติจูดและลองจิจูดต่ำ ประเทศบราซิล และบริเวณขั้วโลกเหนือ จากการพิจารณาสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส ในกรณีที่ชั้นบรรยากาศมีความผิดปกติจากปรากฏการณ์ EPB และกรณีที่ชั้นบรรยากาศไม่มีปรากฏการณ์ EPB พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 มีความสอดคล้องกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในงานก่อนหน้านี้สนใจเพียงสัญญาณจากจีพีเอส ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ที่ได้รับจากสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส และในประเทศไทยยังศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 อยู่ไม่มากนัก

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าทางสถิติระหว่างค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ข้อมูลการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันได้รับจากเครื่องรับ Septentrio PolaRx5 โดยข้อมูลที่ได้รับนั้นจะแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องรับ Septentrio PolaRx5

ข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องรับ Septentrio PolaRx5	
สถานี	KMITL ประเทศไทย (13.73 องศาเหนือ, 100.77 องศาตะวันออก) CPN ประเทศไทย (10.65 องศาเหนือ, 99.37 องศาตะวันออก)
สัญญาณจีเอ็นเอสเอส	กาลิเลโอ (GALILEO) เปย์โต่ว (BeiDou) และ จีพีเอส (GPS)
ความถี่ของสัญญาณดาวเทียม	L1 (1,575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) และ L5 (1176.45 เมกะเฮิร์ตซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องรับ Septentrio PolaRx5	
ช่วงเวลาการศึกษา	วันที่ 11 พฤศจิกายน ถึงวันที่ 31 ธันวาคม ปี ค.ศ. 2020 (51 วัน) ณ สถานี CPN และ ปี ค.ศ. 2019 ค.ศ. 2020 และ ค.ศ. 2021 ณ สถานี KMITL
Sampling rate	1 เฮิร์ตซ์
มุมมอง	>30 องศา
ROTI	คำนวณได้จาก STEC
ค่าดัชนี S_4	รับได้จากเครื่องรับโดยตรง

จากตารางที่ 3.3 สัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ใช้ประกอบไปด้วยกาลิเลโอ (GALILEO) เปย์โต่ว (BeiDou) และ จีพีเอส (GPS) ความถี่ L1 (1,575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) และ L5 (1176.45 เมกะเฮิร์ตซ์) เครื่องรับสามารถรับระยะทางเทียม (Pseudorange) ค่า C/N0 ของสัญญาณ GNSS โดยความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ช่วงระหว่างวันที่ 11 พฤศจิกายน ถึงวันที่ 31 ธันวาคม ปี ค.ศ. 2020 ทั้งหมด 51 วัน ของสถานี KMITL วิทยาเขตชุมพร และข้อมูลในปี ค.ศ. 2019 ค.ศ. 2020 และ ค.ศ. 2021 ของสถานี KMITL กรุงเทพฯ ข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ที่มีมุมมองมากกว่า 30 องศา จะถูกใช้ในการศึกษาเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของผลกระทบจากคลื่นหลายวิถี (Multipath effect) ค่า ROTI สามารถคำนวณได้จากค่าอิเล็กทรอนิกส์ ค่าคำนวณได้จากผลต่างของระยะทางเทียมจากโค้ด และคลื่นพาห์ ผู้วิจัยคำนวณค่า ROTI จากข้อมูลจีเอ็นเอสเอสสองความถี่ที่ได้รับทุกๆ 1 วินาทีในช่วงเวลา 5 นาที

ค่าดัชนี S_4 รับได้โดยตรงจากเครื่องรับ Septentrio โดยปกติในวันที่ไม่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือวันสงบ (quiet day) ค่าดัชนี S_4 จะต่ำกว่า 0.2 [23] และค่า ROTI จะต่ำกว่า 0.5 [24,25] ดังนั้นค่าเกณฑ์ที่ใช้จึงมีค่าเท่ากับ 0.2 และ 0.5 ตามลำดับซึ่งแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าเกณฑ์ที่ใช้สำหรับค่า ROTI และค่าดัชนี S_4

	Disturbed	Quiet
S_4 index	≥ 0.2	< 0.2
ROTI	≥ 0.5	< 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส

จากการศึกษาแนวโน้มงานวิจัยที่เกี่ยวกับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยสนใจที่ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้าได้สนใจศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการเกิดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากเซนเซอร์หลายชนิดแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สรุปงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากเซนเซอร์หลายชนิด

งานก่อนหน้า	วัตถุประสงค์
[16] S. M. Buhari et al, Progress In Electromagnetics Research M, 2021.	ศึกษาโครงสร้าง 2 มิติ ของความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากค่า TEC โดยใช้เครือข่ายของเครื่องรับ GNSS, 2021
[17] K. Watthanasangmechai et al, Radio Science, 2014	ศึกษาโครงสร้างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้เครื่องรับ Ionosonde GNSS และ GRBR ร่วมกัน, 2014
[18] K. Watthanasangmechai et al, Journal of Geophysical Research, 2016	ศึกษา predawn plasma bubbles โดยใช้เครื่องรับ Ionosonde GNSS และ GRBR ร่วมกัน, 2016
[19] Y. Y. Liow et al, IconSpace, 2019	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง the large-scale wave structure (LSWS) กับการเกิด EPB , 2019
[20] L. A. Salles, 2021	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบจากการเกิดซินทิลเลชันกับความถี่ของสัญญาณ GNSS, 2021

จากตารางที่ 3.5 การศึกษาแนวโน้มของงานวิจัยที่เกี่ยวกับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากเซนเซอร์หลายชนิด พบว่าส่วนใหญ่จะใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณปีคอนเพื่อยืนยันการเกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และในปี ค.ศ. 2021 [21-22] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำแนกวันที่ค่าดัชนี S_4 เกิดความผิดปกติโดยใช้การเรียนรู้แบบต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) โดยใช้เทคนิค gradient boosting algorithm มาช่วยเป็นหลักซึ่งใช้ข้อมูลจากมณฑลภาพสุริยะ (Solar activity) โดยเปรียบเทียบกับ Neural Network (NN) Support Vector Machine (SVM) และ logistic regression พบว่าการเรียนรู้แบบต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้เทคนิค gradient boosting algorithm นั้นสามารถจำแนกจำนวนได้ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ แต่ยังไม่เคยมีใช้ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนร่วมกันเพื่อศึกษาว่าในวันที่เกิดความผิดปกติของ

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากการเกิด EPB ที่ความสูงที่ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนโคจรอยู่นั้นจะได้รับผลกระทบจาก EPB เหมือนกับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสหรือไม่

ข้อมูลการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันได้รับจากเครื่องรับ Septentrio PolaRx5 ติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย โดยใช้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสความถี่ L1 (1,575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) เครื่องรับสามารถรับระยะทางเทียม (Pseudorange) ค่า C/N0 ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส โดยความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์วันที่ผิดปกติของค่าดัชนี S_4 โดยอยู่ช่วงระหว่างเดือนมีนาคม จำนวน 4 วัน เมษายน จำนวน 4 วัน กันยายน 1 วัน และตุลาคม 12 วัน ทั้งหมด 21 วันในปี ค.ศ. 2021 เนื่องจากเป็นช่วงที่มีโอกาสที่จะเกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากซึ่งจะศึกษาเฉพาะวันที่ค่าดัชนี K_p มีค่าน้อยกว่า 3 [21] เนื่องจากต้องการศึกษาเฉพาะวันที่เกิดผลกระทบจาก EPB เพียงอย่างเดียวโดยแสดงค่าดัชนี K_p ของแต่ละวันที่ศึกษาดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าดัชนี K_p ในเดือนเมษายน กันยายนและตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021

2020	K_p index
DOY 76	3
DOY 77	0
DOY 84	1
DOY 89	0
DOY 92	3
DOY 94	1
DOY 106	3
DOY 118	1
DOY 273	3
DOY 278	0
DOY 279	3
DOY 281	0
DOY 282	1
DOY 283	2
DOY 286	1
DOY 289	1
DOY 290	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2020	K_p index
DOY 294	2
DOY 296	0
DOY 297	2

ข้อมูลจากดาวเทียมจีพีเอส ที่มีมุมเงยมากกว่า 30 องศาจะถูกใช้ในการศึกษาเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากคลื่นหลายวิถี ข้อมูลการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันได้รับจากเครื่องรับปีคอนติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเช่นเดียวกัน สัญญาณปีคอนมีความถี่เท่ากับ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ และ f เท่ากับ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาที่คลื่นความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากว่าความถี่ที่ต่ำกว่าจะได้ผลกระทบจากความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มากกว่า โดยข้อมูลค่าดัชนี S_4 จะได้รับโดยตรงจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอน โดยที่ขนาด scale size ของ EPB ที่เครื่องรับปีคอนตรวจวัดได้มีระดับกิโลเมตร ขนาด scale size ของ EPB ที่เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสสามารถตรวจวัดได้มีระดับหลายร้อยเมตร จะเห็นได้ว่าเครื่องรับปีคอนสามารถตรวจวัด EPB ที่มีขนาด scale size ได้ใหญ่กว่าที่เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสสามารถตรวจวัดได้จึงนำข้อมูลจากเครื่องรับปีคอนมาช่วยในการตรวจจับ EPB และใช้ภาพถ่ายจากเรดาร์ห้วง VHF ช่วยในการยืนยันว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นเกิดจาก EPB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

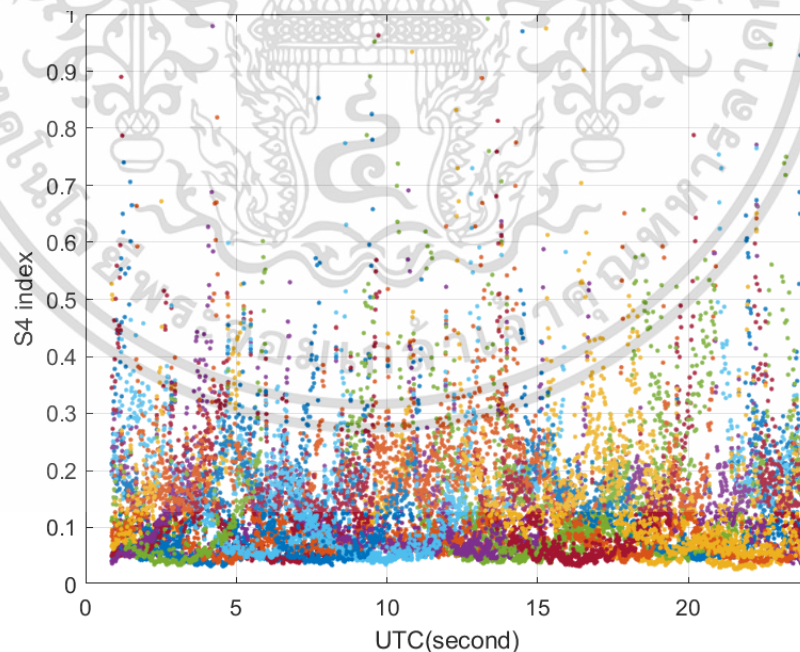
บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากบทที่ 2 และ 3 จะสามารถอ่านค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนและทำการวิเคราะห์ค่าสถิติการเกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์รายวันได้ โดยในหัวข้อที่ 4.1 จะกล่าวถึงผลการคำนวณค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในหัวข้อที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และในหัวข้อที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

4.1 ผลการคำนวณค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

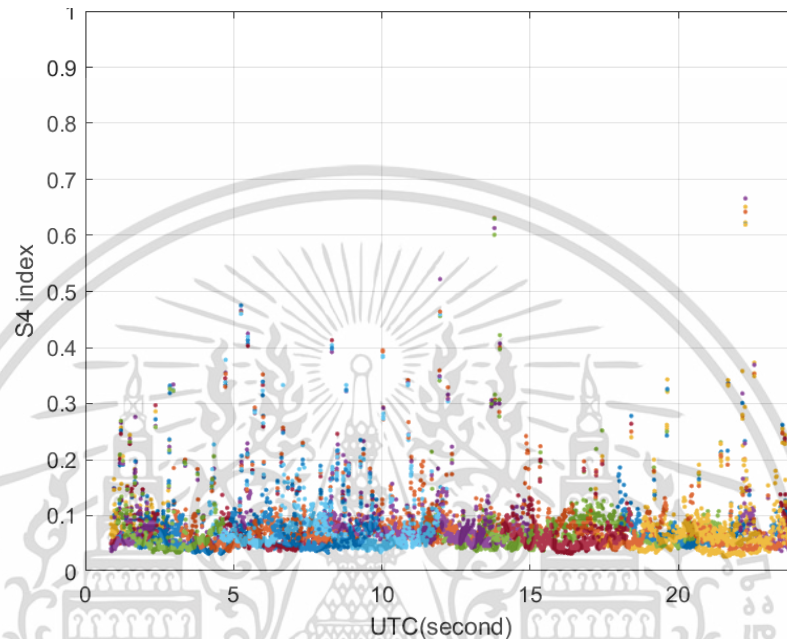
ผู้วิจัยได้นำข้อมูลของค่าดัชนี S_4 จากสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสของวันที่ 3 เมษายน ปี ค.ศ. 2021 โดยเป็นวันที่ไม่พบความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (วันสงบ) เพื่อแสดงค่าโดยทั่วไปของค่าดัชนี S_4 และทำการพล็อตเทียบกับเวลาดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าดัชนี S_4 ของสถานี KMITL ในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021

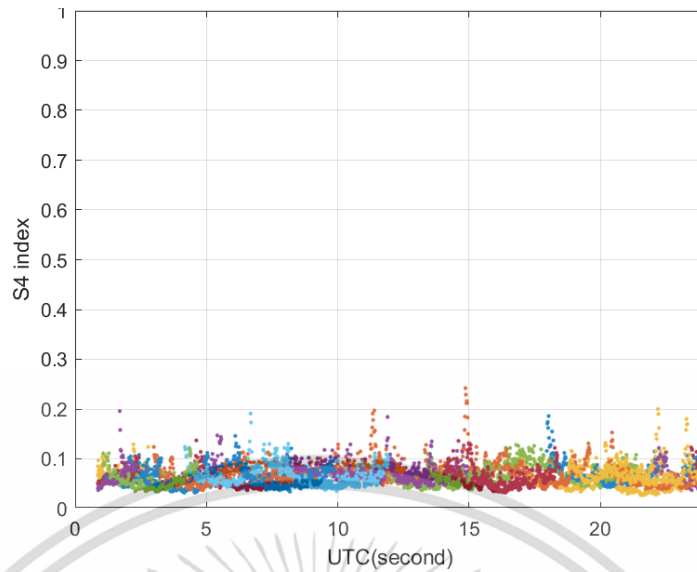
จากรูปที่ 4.1 แสดงค่าดัชนี S_4 จากสัญญาณจีพีเอสความถี่ L1 ของดาวเทียมทุกดวงที่สามารถสังเกตได้ในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021 แขนงนอนคือเวลาตามมาตรฐานเวลาจีพีเอส แขนงตั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือค่าดัชนี S_4 พบว่ามีค่าระหว่าง 0 กับ 1 แต่ละสีที่แตกต่างกันแทนค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมแต่ละดวง โดยข้อมูลจะยังไม่ได้ใช้การตัด elevation cut off ออก หลังจากนั้นได้ดึงข้อมูล elevation angle จาก ไฟล์ RINEX.n เพื่อใช้ในการตัด elevation cut off เมื่อทำการตัด elevation cut off เท่ากับ 30 องศาออกแล้ว จะแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่าดัชนี S_4 ของสถานี KMITL ในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021 เมื่อตัดค่า elevation cut off

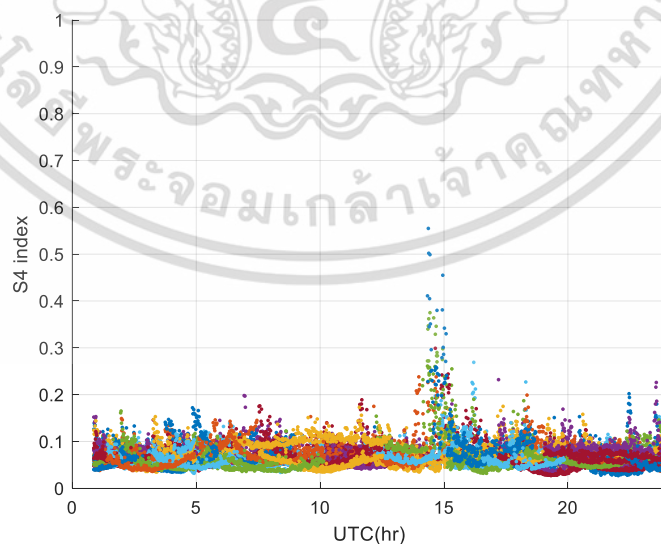
จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณจีพีเอส ความถี่ L1 เมื่อใช้ elevation cut off เท่ากับ 30 องศา โดยค่าของแกนตั้ง จะเป็นค่าดัชนี S_4 พบว่าคลื่นหลายวิธีส่วนใหญ่จะหายไป แต่จะมีค่าดัชนี S_4 บางเวลาจะสูงผิดปกติโดยเกิดจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าสัญญาณรบกวนคลื่นความถี่ (Radio Frequency Interference: RFI) เป็นการรบกวนที่เกิดจากแหล่งภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อวงจรไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า หรือการนำไฟฟ้า การรบกวนอาจทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลงหรือหยุดทำงาน โดยในงานวิจัยนี้ค่า RFI จะทำให้ค่าดัชนี S_4 ทั้งหมดในช่วงเวลานั้นมีค่าสูงขึ้นมากกว่าปกติซึ่งแตกต่างจากคลื่นหลายวิธีที่จะทำให้ค่าดัชนี S_4 สูงขึ้นเพียงเฉพาะดาวเทียมที่มีมุมเงยที่ต่ำเท่านั้น ดังนั้นซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อลบค่า RFI ออกโดยจะวัดจากค่าต่ำสุดของดาวเทียมทุกดวงในช่วงเวลานั้น ๆ โดยหากดาวเทียมทุกดวงมีค่าต่ำสุดมากกว่า 0.07 ในความถี่ L1 และมากกว่า 0.1 ในความถี่ L5 จะทำการตัดข้อมูลในช่วงเวลานั้นทิ้ง และได้ค่าดัชนี S_4 ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าดัชนี S_4 ของสถานี CPN ในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021 (วันสงบ)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อลบค่าความผิดปกติที่เกิดจากค่า RFI ออกไป ค่าดัชนี S_4 ในวันที่ 3 เมษายน ค.ศ. 2021 จะค่อนข้างต่ำกว่าเกณฑ์ และไม่มีช่วงเวลาใดเลยที่ค่าดัชนี S_4 สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นวันนี้จึงเป็นวันที่ไม่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

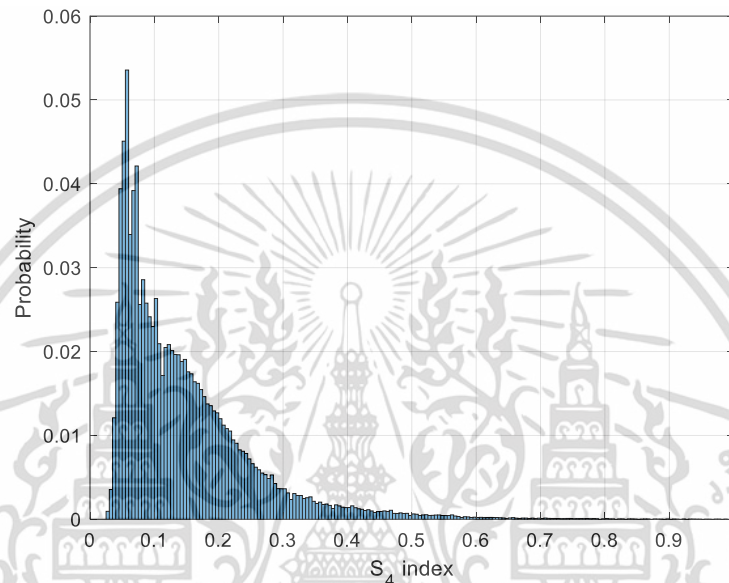
เมื่อทำการพล็อตค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณ GNSS ได้แก่ GPS L1, GPS L5, GALILEO E1 และ GALILEO E5 ในรูปเดียวกันเพื่อดูแนวโน้มของค่าดัชนี S_4 ในแต่ละวัน โดยจะแสดงในวันที่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ วันที่ 30 มีนาคม ค.ศ. 2021 ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสของวันที่ 30 มีนาคม ค.ศ. 2021 (วันผิดปกติ)

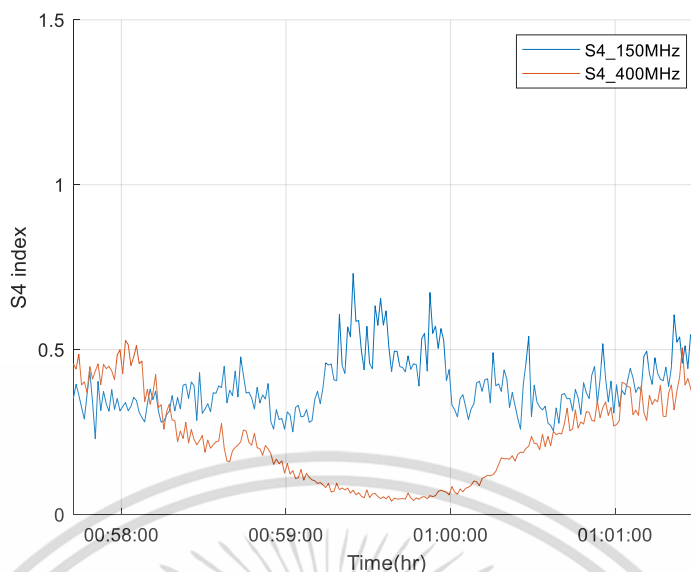
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 ค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจะเห็นว่าดัชนี S_4 มีค่าสูงเกิน 0.2 ในช่วงเวลาประมาณ 13:00-15:00 UTC แสดงว่าวันที่ 19 พฤศจิกายน ค.ศ. 2020 เป็นวันที่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หลังจากนั้นได้ทำการคำนวณค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density function: PDF) ของวันผิดปกติในปี 2021 เพื่อสังเกตการกระจายของค่าดัชนี S_4 โดยแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าดัชนี S_4 จากสัญญาณจีพีเอส ในวันที่ผิดปกติ ปี 2021

จากรูปที่ 4.5 แขนงอนคือค่าดัชนี S_4 แขนงตั้งคือค่าความน่าจะเป็น จากรูปจะเห็นว่าค่าดัชนี S_4 มีการกระจายคล้ายคลึงกับ Rayleigh distribution ซึ่งจะมีการกระจายส่วนใหญ่อยู่ที่ด้านซ้ายของกราฟและวิทยานิพนธ์นี้ได้นำข้อมูลของค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน โดยดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอนจะให้สัญญาณความถี่ 150 เมกะเฮิรตซ์และ 400 เมกะเฮิรตซ์ และมาทำการพล็อตเทียบกับเวลาดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS73 ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021 (วันสงบ)

จากรูปที่ 4.6 จะเป็นการพล็อตค่าของค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ ของดาวเทียม FS73 ช่วงเวลาตั้งแต่ 00:58น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอส เมื่อใช้ elevation cut off เท่ากับ 30 องศา เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากคลื่นหลายวิถี เนื่องจากว่าที่ความถี่ต่ำกว่าจะได้รับผลกระทบมากกว่าจึงทำให้วิทยานิพนธ์นี้ได้สนใจเฉพาะค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนสัญญาณความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์เพียงความถี่เดียว และวิทยานิพนธ์นี้ได้คำนวณค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมวงโคจรต่ำในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติและวันที่สงบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตารางละ 20 เหตุการณ์ โดยแต่ละเหตุการณ์แสดงถึงช่วงเวลาที่เราสามารถได้รับค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนและดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในเวลาเดียวกันดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าดัชนี S_4 ในช่วงเวลาที่ผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เหตุการณ์	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
17/03/2021 14:00 UTC	0.7570	1.2708	0.3811
18/03/2021 12:45 UTC	0.6443	1.4378	0.2462
18/03/2021 13:51 UTC	0.7781	1.3971	0.4651
18/03/2021 16:27 UTC	0.7167	1.3867	0.3376
25/03/2021 13:41 UTC	0.7924	1.4685	0.4159
25/03/2021 14:46 UTC	0.7144	1.2800	0.3443

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุการณ์	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
25/03/2021 15:23 UTC	0.6958	1.1783	0.4342
25/03/2021 17:22 UTC	0.6965	1.2986	0.3341
25/03/2021 18:29 UTC	0.7619	1.2418	0.4794
30/03/2021 12:18 UTC	0.7500	1.3365	0.4506
30/03/2021 14:54 UTC	0.8009	1.2839	0.437
30/03/2021 16:02 UTC	0.8601	1.2561	0.5802
30/03/2021 19:43 UTC	0.8386	1.2693	0.5345
04/04/2021 12:27 UTC	0.7745	1.2261	0.4729
04/04/2021 14:09 UTC	0.6935	1.2291	0.3507
04/04/2021 17:16 UTC	0.8192	1.2449	0.4842
04/04/2021 19:51 UTC	0.6885	1.3106	0.3304
16/04/2021 14:38 UTC	0.7314	1.3207	0.3862
05/10/2021 16:28 UTC	0.7785	1.3436	0.4247
10/10/2021 14:31 UTC	0.7106	1.3046	0.3217

ตารางที่ 4.2 ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าดัชนี S4 ในช่วงเวลาที่สงบของ
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เหตุการณ์	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
17/03/2021 12:19 UTC	0.6286	0.8816	0.4184
17/03/2021 12:54 UTC	0.6119	0.8776	0.3962
17/03/2021 14:36 UTC	0.4684	0.8016	0.2839
17/03/2021 17:40 UTC	0.5251	1.2801	0.2777
17/03/2021 18:17 UTC	0.638	1.0609	0.4186
18/03/2021 12:09 UTC	0.5052	0.9788	0.2605
18/03/2021 14:27 UTC	0.4467	1.0532	0.2575
18/03/2021 15:50 UTC	0.5353	0.7741	0.3573
18/03/2021 17:31 UTC	0.4534	0.7596	0.2849
18/03/2021 18:08 UTC	0.5763	0.8384	0.3725
18/03/2021 19:33 UTC	0.3786	0.5588	0.256
25/03/2021 13:04 UTC	0.472	1.0926	0.2685

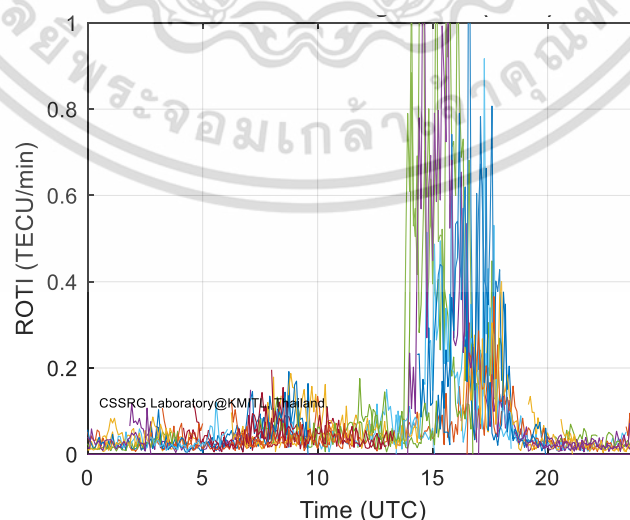
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุการณ์	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
25/03/2021 16:47 UTC	0.5173	0.876	0.2723
25/03/2021 19:04 UTC	0.5749	0.9605	0.318
30/03/2021 14:20 UTC	0.4786	1.0909	0.2079
30/03/2021 16:36 UTC	0.3622	0.5896	0.2078
30/03/2021 18:01 UTC	0.4502	0.8409	0.2601
02/04/2021 12:11 UTC	0.4781	0.7201	0.323
02/04/2021 13:53 UTC	0.5961	1.1897	0.2872
07/10/2021 16:43 UTC	0.4320	0.6912	0.2468

จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 จะพบว่าในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ค่าเฉลี่ยของค่าดัชนี S_4 ที่ได้รับจากดาวเทียม FS71-76 จะมีค่าประมาณ 0.8 ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ตั้งเกณฑ์ของค่าดัชนี S_4 ของค่าดัชนี S_4 จากสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนไว้ที่ 0.8

4.2 ผลการวิเคราะห์สถิติการเกิดความผิดปกติของค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ผลการวิเคราะห์สถิติของความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ผู้วิจัยใช้ข้อมูลค่า ROTI ของสถานี KMITL โดยที่ใช้ elevation cut off เท่ากับ 30 องศา ซึ่งทำการพล็อตดังรูปที่ 4.7

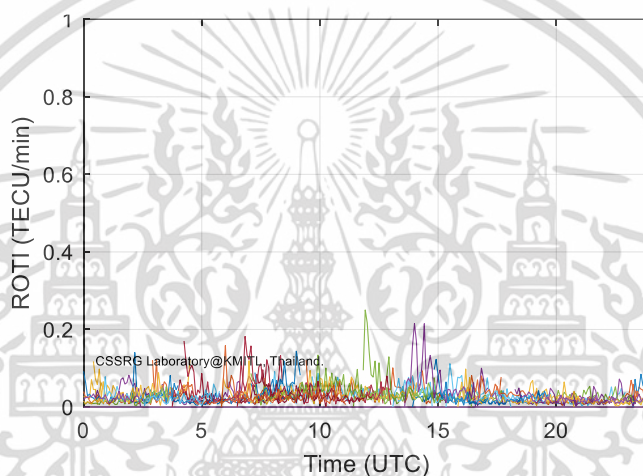


รูปที่ 4.7 ค่า ROTI จากสัญญาณจีพีเอส ณ สถานี KMITL ในวันที่ 21 มีนาคม

ค.ศ.2021 (วันผิดปกติ)

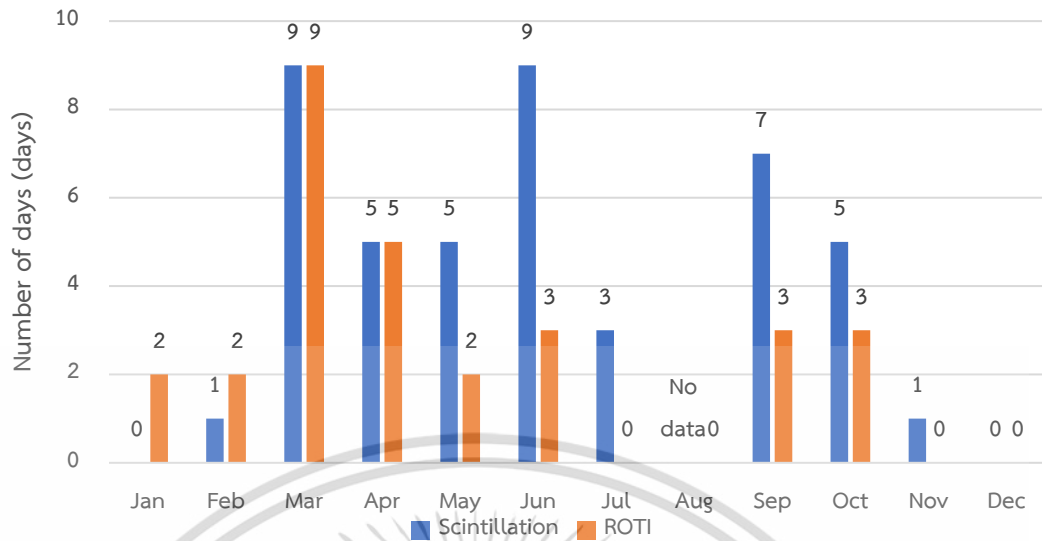
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าของ ROTI สัญญาณจีพีเอสของวันที่ 21 มีนาคม ค.ศ.2021 หรือ day of year (DOY) 80 แกนนอนแสดงค่าของเวลาตามมาตรฐานเวลาจีพีเอส (UTC) และแกนตั้งแสดงค่า ROTI ในหน่วย TECU/minute สีที่ต่างกันแสดงถึงค่า ROTI จากดาวเทียมคนละดวง ในวันดังกล่าวค่าของ ROTI มีค่ามากกว่าค่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ในตารางที่ 1 ดังนั้นวันนี้จึงเป็นวันที่ผิดปกติ จากรูปที่ 4.7 ค่าของ ROTI ที่มากกว่า 0.5 และมากกว่า 1 ดวงได้รับผลกระทบจาก EPB จะเห็นได้ชัดว่าดาวเทียมทุกดวงในช่วงเวลาเดียวกัน (ประมาณ 14:00-20:00 UTC) จะได้รับผลกระทบดังกล่าว รูปที่ 4.8 จะแสดงถึงค่าของ ROTI จากสัญญาณจีพีเอสความถี่ L1 วันที่สงบ ในวันที่ 26 มีนาคม ค.ศ.2021 หรือ DOY 85



รูปที่ 4.8 ค่า ROTI จากสัญญาณ GPS ความถี่ L1 ณ สถานี KMIL
ในวันที่ 26 มีนาคม ค.ศ.2021 (วันสงบ)

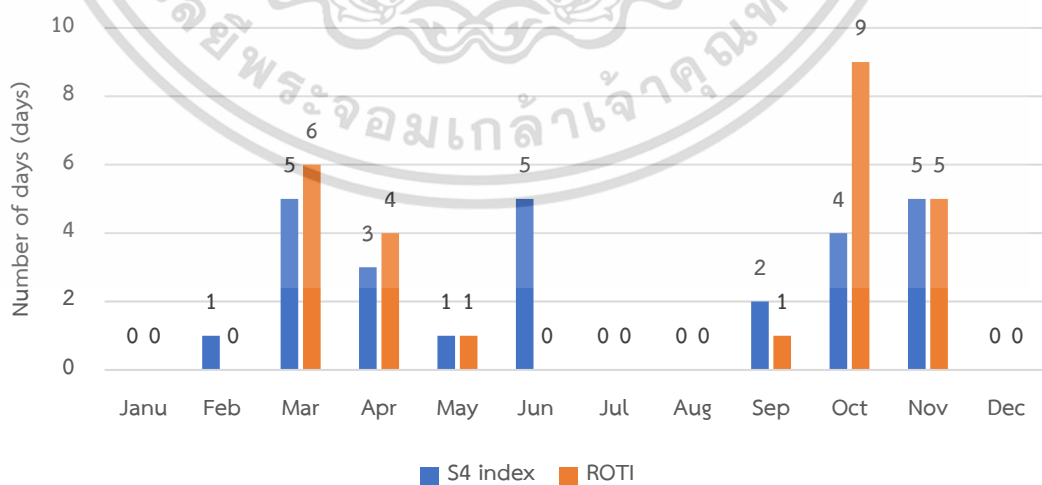
จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาสถิติของจำนวนวันที่ค่า ROTI และดัชนี S_4 จะมากกว่าเกณฑ์ในปี ค.ศ. 2019 ของสถานี KMIL กรุงเทพฯ โดยมีค่าสถิติดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ค.ศ. 2019

สถานี KMITL กรุงเทพฯ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าจำนวนวันที่เกิดความผิดปกติของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ของสถานี KMITL กรุงเทพฯ ปี 2019 มีความใกล้เคียงกัน มีเพียงเดือนมิถุนายนเท่านั้นที่จำนวนของทั้งสองพารามิเตอร์มีจำนวนวันที่ผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ห่างกันถึง 6 วัน จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาสถิติของจำนวนวันที่ค่า ROTI และดัชนี S_4 จะมากกว่าเกณฑ์ในปี ค.ศ. 2020 ของสถานี KMITL กรุงเทพฯ โดยมีค่าสถิติดังรูปที่ 4.10

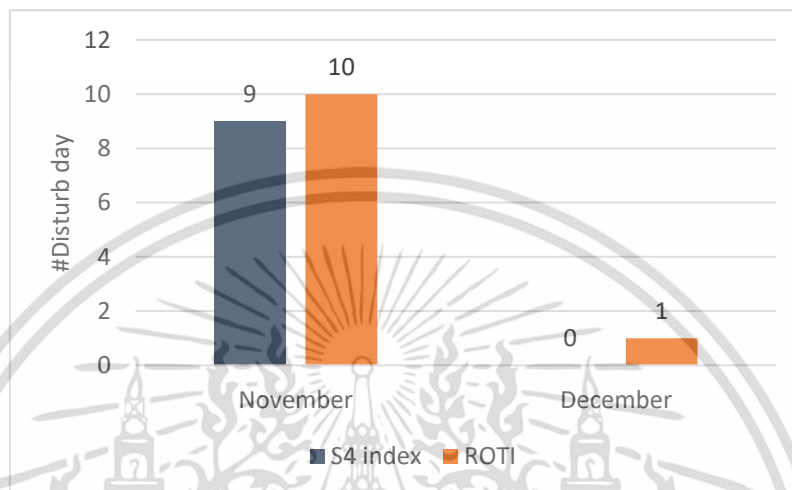


รูปที่ 4.10 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ค.ศ. 2020

สถานี KMITL กรุงเทพฯ

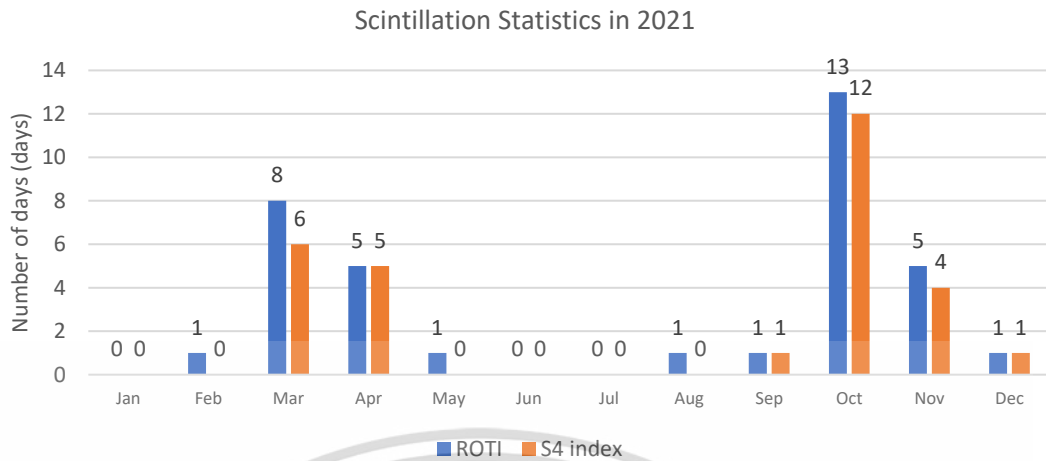
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 พบว่าค่าดัชนี S_4 และค่า ROTI จะมีความผิดปกติบ่อยครั้งในเดือนที่เป็นช่วง equinox จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาสถิติของจำนวนวันที่ค่า ROTI และดัชนี S_4 จะมากกว่าเกณฑ์ในเดือนพฤศจิกายนและเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2020 ของสถานี KMITL วิทยาเขตชุมพร โดยมีค่าสถิติดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ตั้งแต่วันที่ 11 พฤศจิกายน ถึงวันที่ 31 ธันวาคม ค.ศ. 2020

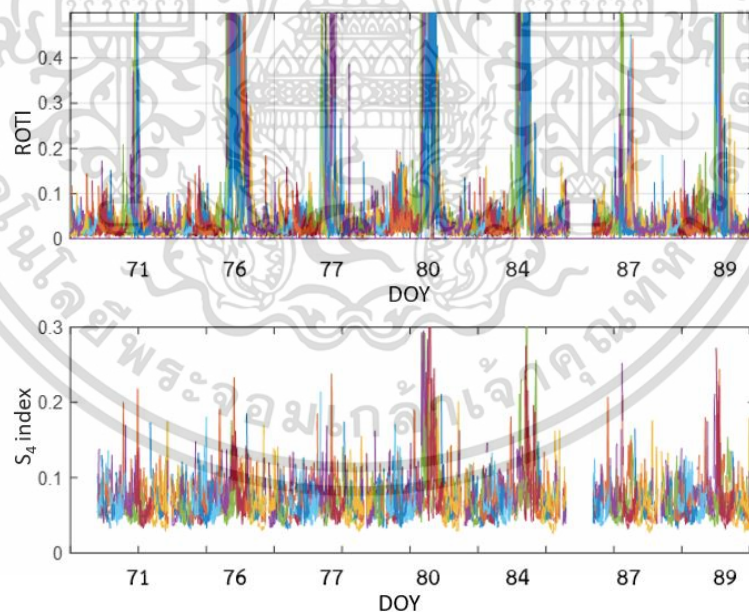
จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าสถิติจำนวนวันของค่าดัชนี S_4 และค่า ROTI ที่เกินค่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ พบว่า จำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และค่า ROTI นั้น มีความใกล้เคียงกัน โดยต่างกันเพียงแค่ 1 วันต่อเดือนที่ ROTI มีความผิดปกติแต่ค่าดัชนี S_4 นั้นมีค่าปกติ จากสถิติพบว่า ค่าดัชนี S_4 และค่า ROTI มีความสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาสถิติของจำนวนวันที่ค่า ROTI และดัชนี S_4 จะมากกว่าเกณฑ์ในปี ค.ศ. 2021 ของสถานีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ โดยมีค่าสถิติดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สถิติจำนวนวันที่มีความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และ ROTI ค.ศ. 2021

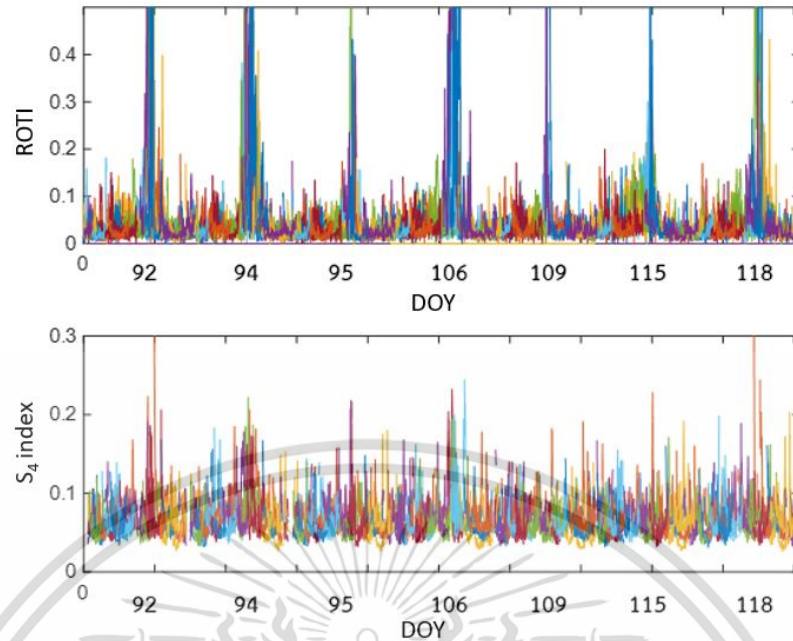
สถานี KMITL จังหวัดกรุงเทพฯ

ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 เมื่อทั้งค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 มากกว่าเกณฑ์ในเดือนมีนาคมและเดือนเมษายน ในปี ค.ศ. 2021 ณ สถานีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพฯ โดยค่า ROTI และ S_4 ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14



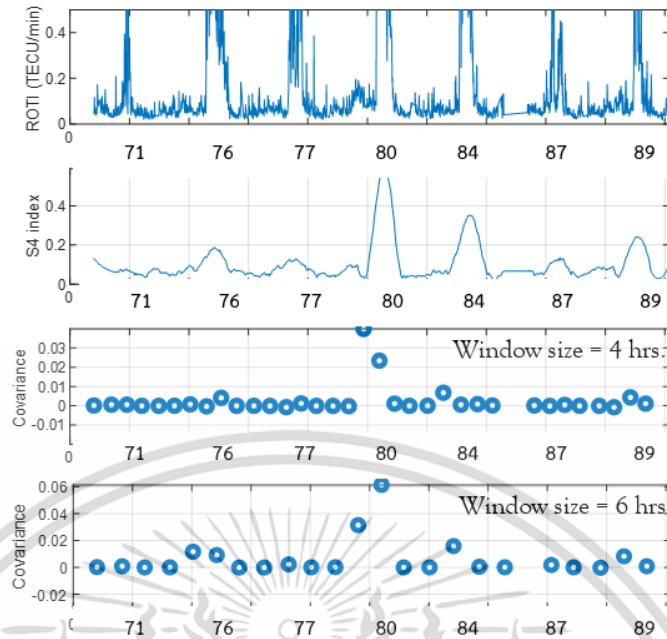
รูปที่ 4.13 ค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

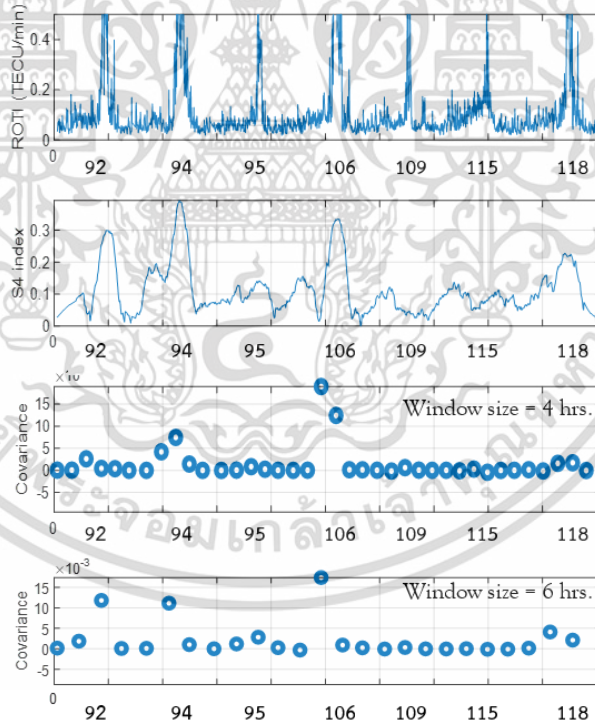


รูปที่ 4.14 ค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงถึงค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในวันที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเมื่อค่า ROTI มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะนำค่า ROTI และดัชนี S_4 มาทำการพล็อตต่อกันและคำนวณค่ามากที่สุดของแต่ละเวลาเพื่อทำการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสอง โดยค่าดัชนี S_4 ที่ได้มานั้นจะมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมากจึงได้ทำการผ่านตัวกรองชื่อว่าฟิลเตอร์ Savitzky-Golay โดยตัวกรองนี้จะมีคุณสมบัติไม่รบกวนค่าแนวโน้มของสัญญาณดั้งเดิม ผู้วิจัยได้ทำการนอโมไลต์และทำการคำนวณค่า window size ของตัวกรองเพื่อคำนวณค่าที่ดีที่สุดในการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และดัชนี S_4 โดยจากการทดลองพบค่า window size ของตัวกรองที่สามารถเห็นการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี S_4 ได้ชัดเจนเท่ากับ 120 แซมเปิล โดย ในเดือนมีนาคมและเมษายน ปี ค.ศ. 2021 และได้แสดงค่าสหสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2021



รูปที่ 4.16 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนเมษายนปี ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 แสดงค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคมและเมษายนปี ค.ศ. 2021 ตามลำดับ โดยใช้ค่า covariance มีค่า window size เท่ากับ 4 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมงโดยจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของค่าสหสัมพันธ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ROTI และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าดัชนี S_4 ทั้งสองนั้นมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ผู้วิจัยได้ทำการนอโมไลต์และทำการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ของแต่ละวันในเดือนมีนาคมและเมษายนโดยแสดงในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2021

DOY	Correlation Coefficient
76	0.7025
77	0.4581
80	0.8746
84	0.6778
89	0.7102

ตารางที่ 4.4 ค่าสหสัมพันธ์ของค่า ROTI และค่าดัชนี S_4 ในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2021

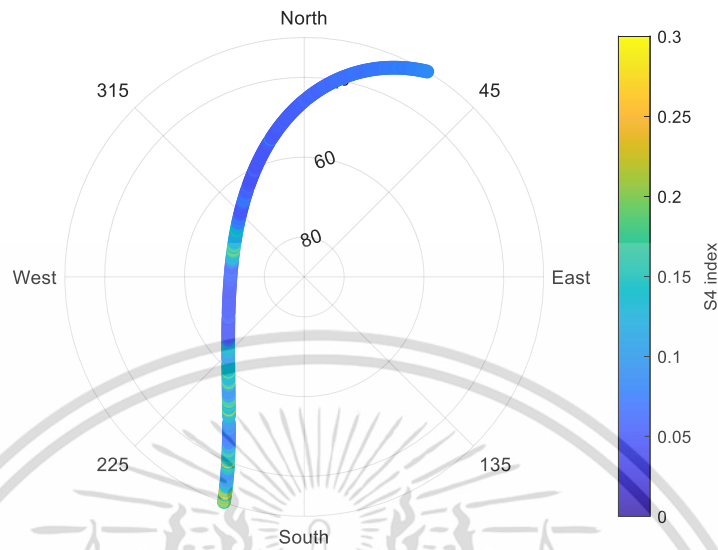
DOY	Correlation Coefficient
92	0.6598
94	0.8574
106	0.8464
118	0.7120

จากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 พบว่าในเดือนมีนาคมและเมษายน ปี ค.ศ. 2021 ในแต่ละวันมีค่าสหสัมพันธ์ที่สูง โดยส่วนใหญ่จะเกิน 0.5 แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนี S_4 และค่า ROTI มีความสัมพันธ์กันในเชิงบวก

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

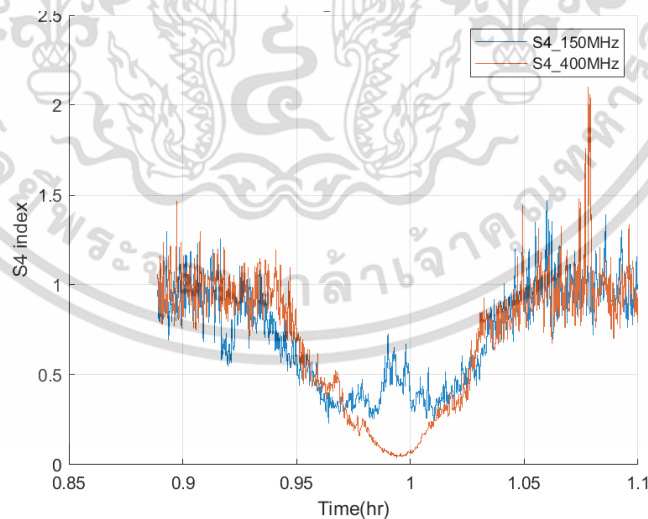
ในหัวข้อนี้จะศึกษาเปรียบเทียบระหว่างดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนกับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส เนื่องจาก ข้อดีของดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนคือจะสามารถเก็บข้อมูลค่าดัชนี S_4 เหนือ่านฟ้าจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออกได้ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งจะช่วยในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนจะช่วยบอกถึงคุณลักษณะของ EPB โดยผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสที่สถานี KMITL

ในปี ค.ศ. 2021 ผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนข้อมูลค่าดัชนี S_4 ในแกนเวลาเพื่อนำไปพล็อต skyplot ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละดวงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ตัวอย่าง skyplot ของค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณกาลิเลโอ E03 วันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021 ของสถานี KMITL

ไฟล์ข้อมูลดัชนี S_4 จากเครื่องรับบีคอนของสถานี KMITL ผู้วิจัยได้ดึงข้อมูลของค่าดัชนี S_4 และทำการพล็อตเทียบกับเวลาดังรูปที่ 4.18

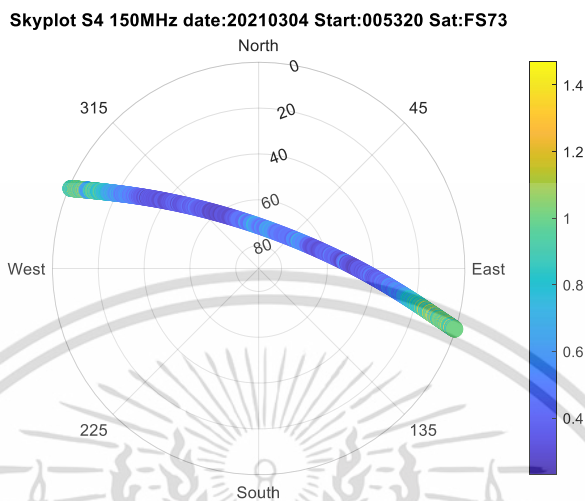


รูปที่ 4.18 ข้อมูลค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS73 ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.18 จะเป็นการพล็อตค่าของค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณความถี่เท่ากับ 150 เมกะเฮิรตซ์ และ 400 เมกะเฮิรตซ์ ของดาวเทียม FS73 ช่วงเวลาตั้งแต่ 00:53น. ตามเวลามาตรฐาน

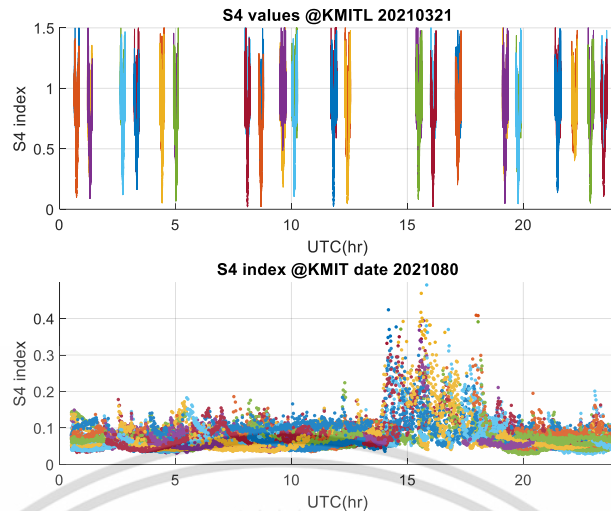
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จีพีเอสและนำค่าของดัชนี S_4 ความถี่ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ที่ได้จากเครื่องรับปีคอนมาพล็อต skyplot เพื่อดูบริเวณที่ได้รับผลกระทบดังรูปที่ 4.19



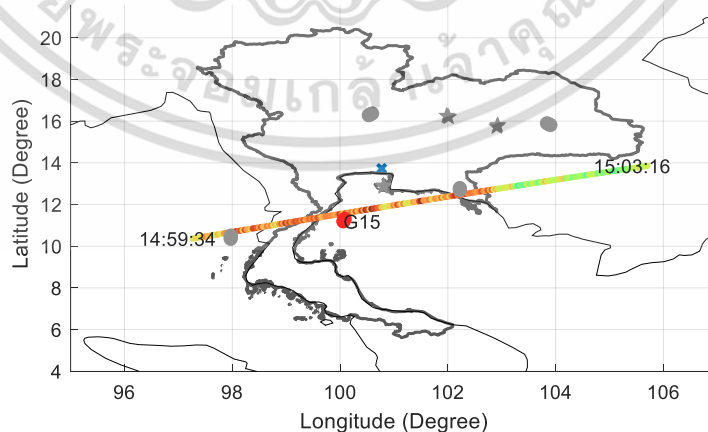
รูปที่ 4.19 Skyplot ของค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS73 ในวันที่ 4 มีนาคม ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.19 จะเป็นการพล็อต skyplot ค่าดัชนี S_4 ของสัญญาณความถี่ เท่ากับ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ ของดาวเทียม FS73 ช่วงเวลาตั้งแต่ 00:53น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอส โดยปกติระยะเวลาที่สามารถเห็นดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน และดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสอยู่เหนือฟ้าต่างกันคือ ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนจะใช้เวลาผ่านน่านฟ้าประมาณ 15 นาที ส่วนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจะใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ทำให้เราสามารถเห็นความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนได้ในระยะเวลาอันสั้น จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการพล็อตค่าดัชนี S_4 ในวันที่ 21 มีนาคม ค.ศ. 2021 ของเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเพื่อหาช่วงเวลาที่ค่าดัชนี S_4 เกิดความผิดปกติและสามารถเห็นดาวเทียมได้จากทั้งสองเครื่องรับดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ค่าดัชนี S_4 ของเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสในวันที่ 21 มีนาคม ค.ศ. 2021

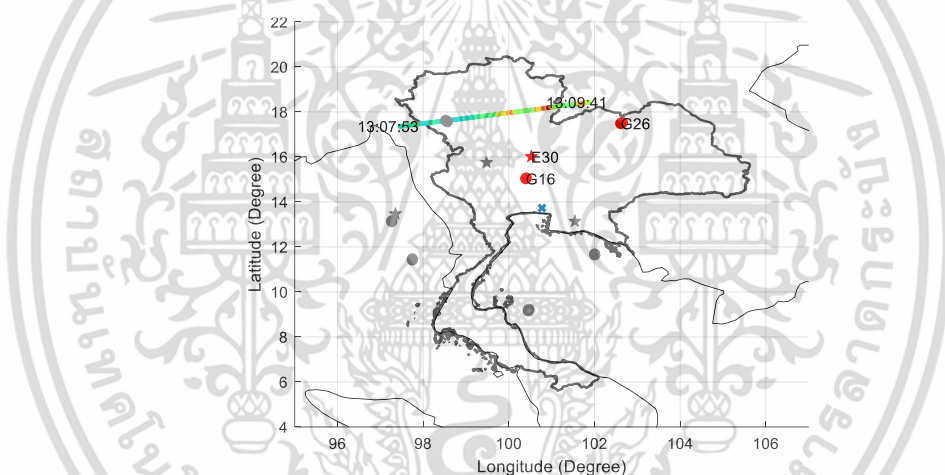
จากรูปที่ 4.20 เป็นการพล็อตค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนเทียบกับจีเอ็นเอสเอสโดยจะเห็นว่าในวันนี้เรามองเห็นดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนจำนวน 21 ครั้ง แต่ละครั้งมีระยะเวลาประมาณ 15 นาที ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติประมาณ 14:00-20:00น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอส จะมีดาวเทียมจากเครื่องรับปีคอนในช่วงเวลานั้นทั้งหมด 5 ดวง ดังนั้นจึงสนใจช่วงเวลาดังกล่าวในการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างดาวเทียมจากเครื่องรับปีคอนและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส จึงได้พล็อตค่าดัชนี S_4 บนตำแหน่ง IPPs ที่ความสูง 350 กิโลเมตร เหนือ่านฟ้าของประเทศไทย ในช่วงเวลา 12:00-20:00น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอส ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศ โดยใช้ค่า elevation cut off เท่ากับ 30 องศา เพื่อลดผลกระทบจากคลื่นหลายวิถีดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอนในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ ในวันที่ 30 มีนาคม ค.ศ. 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

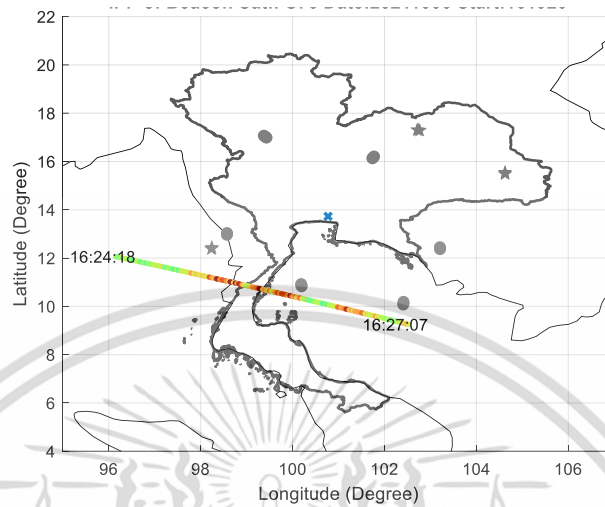
จากรูปที่ 4.21 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนจะเป็นค่าจริงและค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสจะเป็นสีแดงเมื่อค่ามากกว่าเกณฑ์และเป็นสีเทาเมื่อค่าน้อยกว่าเกณฑ์ โดยดาวเทียมจีพีเอสจะเป็นรูปวงกลม และดาวเทียมกาลิเลโอจะเป็นรูปดาว เนื่องจากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนเคลื่อนได้เร็วกว่าจึงใช้เวลาโคจรบนน่านฟ้า น้อยกว่าดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ดังนั้นจึงเห็นค่า S_4 จากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนเป็นเส้น จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาตั้งแต่ 14:59น. ถึง 15:03น. ข้อมูลค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียมทั้งสองนั้นมีความผิดปกติเกิดขึ้น แสดงว่าเกิด EPB บริเวณนั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาทั้งหมด 3 กรณี โดยกรณีนี้เป็นกรณีที่ 1 เมื่อค่าดัชนี S_4 ของเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอนมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดและผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมอีก 2 กรณีคือ เมื่อค่าดัชนี S_4 ของเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเท่านั้นที่มีค่ามากกว่าเกณฑ์และค่าดัชนี S_4 ของเครื่องรับปีคอนเท่านั้นที่มีค่ามากกว่าเกณฑ์ โดยรูปที่ 4.22 แสดงข้อมูลเมื่อค่าดัชนี S_4 ของเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเท่านั้นที่มีค่ามากกว่าเกณฑ์



รูปที่ 4.22 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับ GNSS ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ
ในวันที่ 7 ตุลาคม ค.ศ. 2021

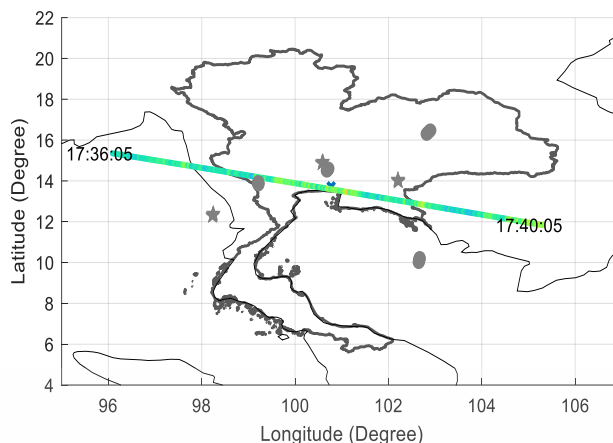
จากรูปที่ 4.22 แสดงค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับปีคอนและจีเอ็นเอสเอสช่วงเวลาระหว่าง 13:07-13:09น. เป็นกรณีเมื่อค่าดัชนี S_4 ของ GNSS เท่านั้นที่มีค่ามากกว่าเกณฑ์ โดยค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียมจีพีเอส G16 และ G26 และดาวเทียมกาลิเลโอ E30 นั้นเกิดความผิดปกติ แต่ดาวเทียม FS71 จากเครื่องรับปีคอนนั้นไม่เกิดความผิดปกติ ซึ่งหมายถึง EPB นั้นเพิ่งเกิดทำให้เคลื่อนที่ไปยังไม่ถึงบริเวณที่สัญญาณจากดาวเทียม FS71 นั้นอยู่ในละติจูดที่สูงจึงทำให้สามารถตรวจจับ EPB ได้ค่อนข้างยากหากความผิดปกตินั้นไม่รุนแรง ซึ่งจากรูปที่ 4.22 นี้ค่าดัชนี S_4 ได้มีความผิดปกติเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ทั้งหมด 2 ครั้ง ถึงแม้ว่า EPB จะอยู่ในละติจูดที่ต่ำแต่ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนก็ยัง

ได้รับผลกระทบและรูปที่ 4.23 แสดงข้อมูลเมื่อค่าดัชนี S_4 ของเครื่องรับบีคอนเท่านั้นที่มีค่ามากกว่าเกณฑ์



รูปที่ 4.23 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับบีคอนในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ
ในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS76 ที่ได้รับจากเครื่องรับบีคอนมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 16:24–16:27น. ในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021 โดยช่วงเวลาดังกล่าว EPB นั้นเกิดขึ้นมานานแล้ว และเคลื่อนตัวจากทิศตะวันตกไปยังตะวันออก แต่เนื่องจากว่าเกิดมานาน กระแสลมทำให้การเคลื่อนที่กลับทำให้สัญญาณจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสที่อยู่ทางด้านตะวันออกของประเทศไทยและละติจูดที่สูงกว่า EPB จึงไม่สามารถเห็นความผิดปกติได้ โดยอาจเกิดจากที่ชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ยกตัวสูงขึ้นทำให้พลาสมาเบี่ยงเบนอยู่ระดับที่สูง ดาวเทียม FS76 ที่เคลื่อนที่ผ่านอาจเครื่องที่ผ่านช่วงด้านล่างหรือตรงกลางของ EPB และรูปที่ 4.24 แสดงข้อมูลเมื่อค่าดัชนี S_4 ของทั้งสองเครื่องรับมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์



รูปที่ 4.24 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอนในช่วงเวลาที่สงบ
ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าดัชนี S_4 ของดาวเทียม FS73 และดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในช่วงเวลาประมาณ 17:38น. เมื่อทั้งสองระบบไม่ได้รับผลกระทบจาก EPB โดยสามารถสังเกตได้จากค่าดัชนี S_4 ของทั้งสองระบบไม่มีค่าเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้

เมื่อพิจารณาค่า scale size ของ EPB (ตามสมการ (2.10)) ที่วัดได้จากระบบ GNSS และระบบดาวเทียมปีคอน เท่ากับ 370 เมตรและ 1,180 เมตรตามลำดับ และได้แสดงความสำคัญของแต่ละกรณีดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสำคัญของแต่ละกรณีที่ศึกษาค่าความผิดปกติของค่าดัชนี S_4

กรณี	ความสำคัญ
1. ค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและปีคอนมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่โคจรที่ความสูง 22,000 กิโลเมตร สามารถตรวจจับความผิดปกติได้และดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนที่โคจรที่ความสูง 550 กิโลเมตร ช่วยยืนยันว่าความผิดปกตินี้เกิดจาก EPB ในสถานการณ์นี้อันุมานได้ว่าพบ EPB ที่มีขนาดหลายร้อยเมตร และระดับกิโลเมตร
2. ค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	EPB อาจเกิดขึ้นที่ความสูงที่อยู่เหนือดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนโคจรอยู่ EPB เกิดขึ้นบริเวณที่ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนไม่ได้เคลื่อนที่ผ่าน หรือ EPB มี scale size ขนาดเล็ก ทำให้ปีคอนสังเกตไม่พบ ในสถานการณ์นี้อันุมานได้ว่าพบเฉพาะที่มีขนาดหลายร้อยเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี	ความสำคัญ
3. ค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนใช้ความถี่ 150 เมกะเฮิรตซ์ (Scale size ของ EPB ที่ตรวจจับได้ประมาณ 1,180 เมตร) ซึ่งสามารถตรวจจับ EPB ที่มีขนาดใหญ่กว่าดาวเทียมจีเอ็นเอสที่ใช้ความถี่ 1,575.42 เมกะเฮิรตซ์ (Scale size ของ EPB ที่ตรวจจับได้ประมาณ 370 เมตร) หรือ EPB เกิดขึ้นบริเวณที่ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสไม่ได้เคลื่อนที่ผ่านในสถานการณ์นี้อันหมายความว่าพบเฉพาะที่มีขนาดระดับกิโลเมตร
4. ค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและปีคอนน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	ไม่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากนั้นได้แสดงจำนวนเหตุการณ์ที่ศึกษาในแต่ละวันที่ทำการศึกษาของเดือนมีนาคม เมษายน กันยายน และเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021 ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 จำนวนเหตุการณ์ในแต่ละวันที่เกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส และปีคอนใน เมษายน กันยายน และเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021

DOY	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่ามากกว่าเกณฑ์	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS มีค่ามากกว่า 0.2	ค่าดัชนี S_4 ของ beacon มีค่ามากกว่า 0.8	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์
76	0	0	1	5
77	0	0	3	6
84	1	0	3	4
89	1	1	4	3
92	0	0	4	3
94	0	0	4	4
106	2	0	1	3
118	0	2	1	5
273	4	0	1	3
278	0	0	2	5
279	1	0	4	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DOY	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่ามากกว่าเกณฑ์	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS มีค่ามากกว่า 0.2	ค่าดัชนี S_4 ของ beacon มีค่ามากกว่า 0.8	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์
280	3	1	1	3
281	2	1	2	1
282	0	0	1	4
283	3	1	0	4
286	1	0	4	2
289	2	0	1	4
290	2	0	1	5
294	2	1	2	3
296	0	1	3	3
297	1	0	0	4
รวม	25	8	43	78

และแสดงข้อมูลการเกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 ของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาในเดือน มีนาคม เมษายน กันยายน และเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021 ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 จำนวนเหตุการณ์เกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส และ เครื่องรับบีคอนใน เมษายน กันยายน และเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021

เดือน	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่ามากกว่าเกณฑ์	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS มีค่ามากกว่า 0.2	ค่าดัชนี S_4 ของ beacon มีค่ามากกว่า 0.8	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์
มีนาคม	2	1	11	18
เมษายน	2	2	10	15
กันยายน	4	0	1	3
ตุลาคม	17	5	21	42
รวม	25	8	43	78

จากตารางที่ 4.7 จำนวนเหตุการณ์ที่ความผิดปกติของดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม เมษายน กันยายน และเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021 พบว่าโดยส่วนใหญ่ความผิดปกติที่เกิดขึ้นจะเกิดกับ สัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอนมากกว่า (ทั้งหมด 43 เหตุการณ์) จากทั้งหมด 154 เหตุการณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

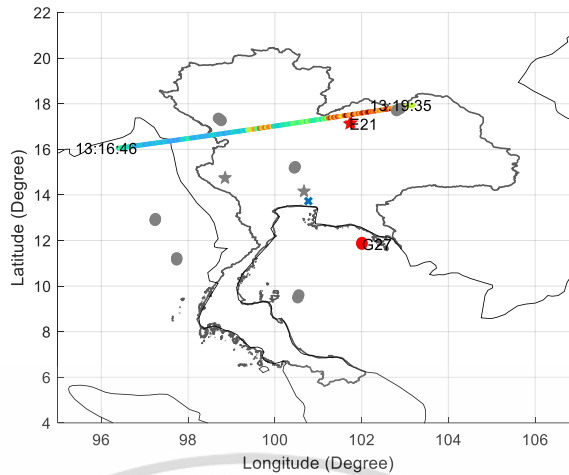
แสดงว่า EPB จะเกิดขึ้นที่ระดับความสูงที่ต่ำกว่า 550 กิโลเมตรเป็นส่วนมาก และ EPB ยังไม่ได้เคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสอยู่ ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มระยะเวลาการศึกษาจากปกติจะศึกษาช่วงเวลาระหว่าง 12:00-20:00 น. ตามเวลามาตรฐานจีพีเอสได้เพิ่มเป็นระหว่าง 11:00-23:00 น. เพื่อให้ครอบคลุมทั้งช่วงเวลากลางคืน โดยใช้ข้อมูลค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสจากสถานี KMITL โดยสัญญาณจากจีเอ็นเอสเอสจะใช้เฉพาะความถี่ L1 เท่านั้น ในปี ค.ศ. 2021 ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 จำนวนเหตุการณ์เกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส และเครื่องรับบีคอน ในเมษายน กันยายนและเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021

เดือน	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่ามากกว่าเกณฑ์	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS มีค่ามากกว่า 0.2	ค่าดัชนี S_4 ของ beacon มีค่ามากกว่า 0.8	ค่าดัชนี S_4 ของ GNSS และ beacon มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์
มีนาคม	2	1	16	25
เมษายน	2	2	12	24
กันยายน	4	0	1	7
ตุลาคม	17	5	28	98
รวม	25	8	57	154

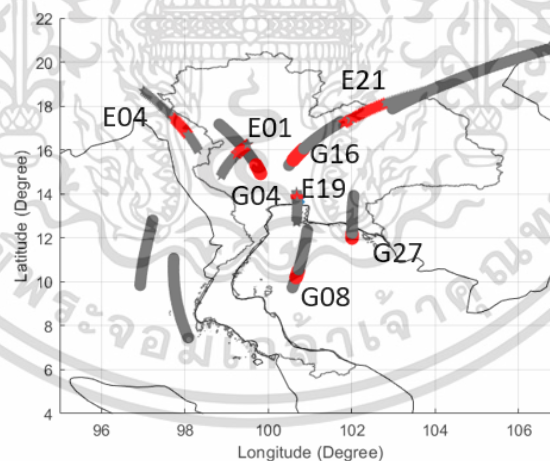
จากตารางที่ 4.8 จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 ในเดือนมีนาคม เมษายน กันยายนและเดือนตุลาคม ในปี ค.ศ. 2021 พบว่าเมื่อเพิ่มช่วงเวลาที่ศึกษามากขึ้นจาก 12:00-20:00น. (8 ชั่วโมง) เป็นตลอดทั้งช่วงระยะเวลากลางวันตั้งแต่ 11:00-23:00น. พบว่ามีเพียงกรณีที่ 3 และ 4 เท่านั้นที่มีจำนวนเหตุการณ์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนั้นพบความผิดปกติมากกว่าค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส โดยจำนวนกรณีที่ 3 คิดเป็น 23.36% จากเหตุการณ์ทั้งหมด และผู้วิจัยได้สนใจช่วงเวลาหลังจากกรณีที่ 1 และ 3 เมื่อดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนเคลื่อนที่ผ่านไปแล้วหลังจากนั้น 1 ชั่วโมง เราจะสามารถเห็นความผิดปกติจากค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสได้หรือไม่ โดยแสดงตัวอย่างของเคสที่ 1 ในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021 ดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอนในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ ในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.25 แสดงค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับปีคอนในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติในช่วงเวลาระหว่าง 13:16น. ถึง 13:19น. วันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021 โดยเป็นช่วงที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศบริเวณด้านตะวันออกของประเทศไทย โดยทั้งดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนและจีเอ็นเอสเอส E21 และ G27 จะเห็นความผิดปกติ ผู้วิจัยได้ทำการพล็อตค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส หลังจากนั้น 1 ชม. เพื่อดูความผิดปกติดังรูปที่ 4.26

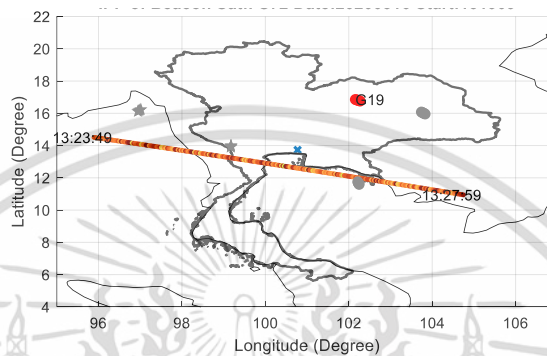


รูปที่ 4.26 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสในช่วงเวลาหลังจากที่เกิดความผิดปกติในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

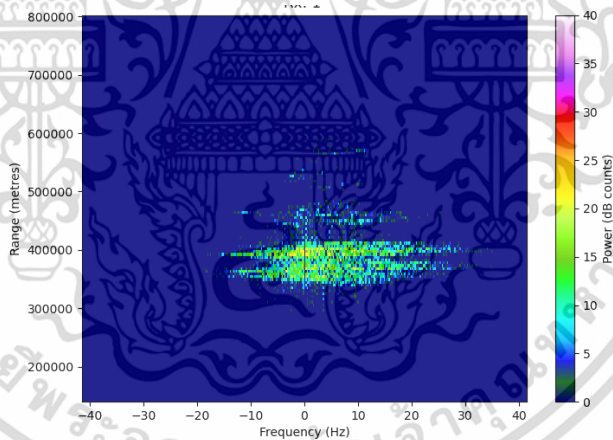
จากรูปที่ 4.26 แสดงค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากที่เกิดความผิดปกติในวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2021 พบว่ามีความผิดปกติจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสทั้งกาลิเลโอและจีเอ็นเอสเอสแสดงว่าหลังจากที่สามารถพบความผิดปกติบริเวณทางตะวันออกนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดปกติหลังจากนั้นอีก คาดว่าเกิดจาก EPB อีกกลุ่มมาจากทิศตะวันตกทำให้ดาวเทียมหลายดวง เกิดความผิดปกติ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน ใช้ค่า ionogram จาก ionosonde และภาพเรดาร์จากสถานีเรดาร์ห่มพร้อมเพื่อยืนยันว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นเกิดจาก EPB โดยผู้วิจัยได้ศึกษาช่วงเวลาที่มิข้อมูลทุกพารามิเตอร์ตรงกันโดยแสดงในรูปที่ 4.27 รูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29



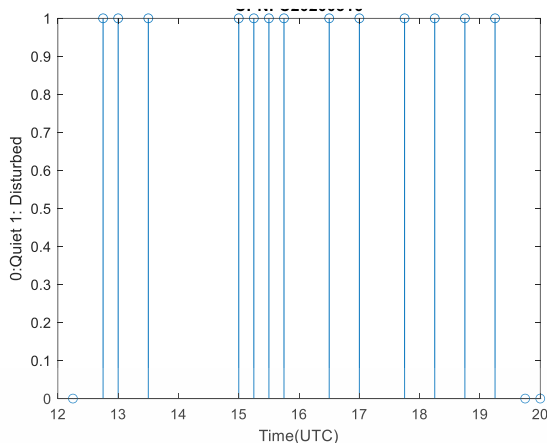
รูปที่ 4.27 ค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับบีคอนในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ ในวันที่ 17 มีนาคม ค.ศ. 2021



รูปที่ 4.28 ภาพเรดาร์ห่มย่าน VHF เวลา 13:26น.

ที่เกิดความผิดปกติในวันที่ 17 มีนาคม ค.ศ. 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ค่า spread F จากเครื่องรับ ionosonde ในวันที่ 17 มีนาคม ค.ศ. 2021

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเกิดความผิดปกติทุกช่วงเวลาที่ดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอน F72 เคลื่อนที่ผ่านตั้งแต่ลองจิจูดที่ 96 จนถึงลองจิจูดที่ 104 และดาวเทียมจีพีเอส G19 พบความผิดปกติของค่าดัชนี S_4 และรูปที่ 4.28 แสดงภาพจากเรดาร์หย่าน VHF จากสถานี CPN โดยแกนนอนคือความถี่จากจุดศูนย์กลางและแกนตั้งคือระยะห่างระหว่าง EPB กับเรดาร์โดยเวลาประมาณ 13:26น. เรดาร์หย่าน VHF พบความผิดปกติและอยู่ที่ความสูงประมาณ 300-400 กิโลเมตร และรูปที่ 4.29 แสดงค่าของ spread F โดยหากเกิดความผิดปกติจะมีค่าเป็น 1 หากไม่มีความผิดปกติจะมีค่าเป็น 0 โดยเวลา 13:00น. ค่า spread F มีความผิดปกติในช่วงเวลาดังกล่าว แสดงว่าช่วงเวลาดังกล่าวความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดจากพลาสมาเบิลที่บริเวณดังกล่าวในช่วงเวลานั้น จึงเป็นการยืนยันว่าดาวเทียมวงโคจรต่ำบีคอนสามารถช่วยในการศึกษาความผิดปกติของชั้นบรรยากาศที่เกิดจาก EPB ได้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยสองส่วน ในส่วนแรกคือการศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนสุทธิและค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ณ สถานี KMITL และสถานี CPN ประเทศไทย ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 2019 ถึงปี ค.ศ. 2021 พบว่าค่าทั้งสองพารามิเตอร์นั้นมีความสอดคล้องกัน โดยเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หากค่า ROTI มีค่ามากกว่าเกณฑ์มีแนวโน้มที่ค่าดัชนี S_4 จะมากกว่าเกณฑ์ด้วยและในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ค่าสหสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสองนั้นจะมีค่าเป็นบวกและมากกว่า 0.5 และในส่วนที่สองคือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (ดาวเทียมโคจรที่ความสูงประมาณ 22,000 กิโลเมตร) และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอน (ดาวเทียมโคจรที่ความสูงประมาณ 550 กิโลเมตร) พบว่าค่าดัชนี S_4 จากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสนั้นไม่ได้มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดแต่ ณ เวลานั้นอยู่ในช่วงที่เกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แสดงให้เห็นว่าช่วงนั้นมีความผิดปกติเกิดขึ้น บริเวณนั้นอาจยังไม่ได้รับผลกระทบจาก EPB เพราะ EPB เคลื่อนตัวมาไม่ถึง หรืออนุมานได้ว่า scale size ของ EPB ที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดใหญ่กว่าที่สัญญาณจีเอ็นเอสเอสจะตรวจจับได้แต่ดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนที่อยู่ในวงโคจรต่ำใช้ความถี่ที่ต่ำกว่าสามารถตรวจวัด scale size ของ EPB ที่ระดับกิโลเมตรและเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าจึงเห็นนานฟ้าในเวลานั้นได้มากกว่าจึงอาจเห็นความผิดปกติของชั้นบรรยากาศได้มากกว่า ทำให้กรณีที่ 3. ที่ค่าดัชนี S_4 จากดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดมีจำนวนเหตุการณ์ที่มากกว่ากรณีอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนสามารถช่วยในการวิเคราะห์และตรวจจับการเกิด EPB ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระบบดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนเพียงระบบเดียวโดยจะโคจรจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออกและจะสังเกตเห็นดาวเทียมระบบนี้เฉลี่ย 21 ครั้งต่อวัน ซึ่งเป็นเวลาช่วงเวลาที่สั้นมากต่อการศึกษาการเกิดความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ใน 1 วัน แนวทางในการแก้ไขคือการเพิ่มการรับสัญญาณดาวเทียมวงโคจรต่ำปีคอนจากระบบอื่นเพื่อให้เห็นความผิดปกติในเวลาอื่นและบริเวณละติจูดและลองจิจูดอื่นมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Yedukondalum, A. D. Sarma, and V. Satya Srinivas, "Estimation and mitigation of GPS multipath interference using adaptive filtering," **Progress In Electromagnetics Research M**, Vol. 21, 133–148, 2011.
- [2] B. Santimay, E. Macken, B. Sunanda, "Ionospheric Constraints on VHF/UHF Communications Links During Solar Maximum and Minimum Periods," **Radio Science**, vol. 23, no. 3, pp. 363–78, 1988.
- [3] T.E. Humphreys, M.L. Psiaki, J.C. Hinks, B. O'Hanlon, P.M. Kintner, "GNSS and Ionospheric Scintillation How to Survive the Next Solar Maximum," **Inside GNSS**, 2009.
- [4] X. Pi, A.J. Mannucci, B. Valant-Spaight, Y. Bar-Sever, L. J. Romans, S. Skone, L. Sparks, G. Martin Hall, "Observations of Global and Regional Ionospheric Irregularities and Scintillation Using GNSS Tracking Networks," **Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting**, Honolulu, Hawaii, pp. 752-761, April 2013.
- [5] Z. Yang and Z. Liu, "Correlation between ROTI and Ionospheric Scintillation Indices using Hong Kong Low-Latitude GPS data," **GPS Solutions**, vol. 20, no. 4, pp. 815-824, 2015.
- [6] C. Li, C.M. Hancock, N.A.S. Hamm, S.V. Veetil, C. You, "Analysis of the Relationship between Scintillation Parameters, Multipath and ROTI," **Sensors**, vol. 20, 2877, 2020.
- [7] N.A. Manga, K. Lakshmana, A.D. Sarma, and T.K. Pant, "Analysis of Correlation between ROTI and S4 Using GAGAN Data," **Progress In Electromagnetics Research M**, vol. 99, pp 23-34, 2021
- [8] K. Seechai, P. Jamjareegulgarn, N. Wang and P. Supnithi, "Statistical Analysis of Scintillation Index and ROTI based on Multi-GNSS Data at Chumphon, Thailand," **2021 36th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)**, pp. 1-4, 2021.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] T. Mohamed ,K. Malek et al., “GNSSs, Signals, and Receivers,” **Multifunctional Operation and Application of GPS**, 2018.
- [10] M. Karaim, T. Karamat, A. Noureldin, M. Tamazin, and M. Atia, "Real-Time Cycle-Slip Detection and Correction for Land Vehicle Navigation Using Inertial Aiding" , **Proceedings of the ION GNSS**, 2013.
- [11] Inside GNSS, “**Something Old, Something New.**” [Online]. Available: <https://insidegnss.com/something-old-something-new/>, 2022.
- [12] orolia, “**GNSS Terminology Explained**” [Online]. Available: <https://www.rolia.com/gnss-terminology-explained/>, 2022.
- [13] X. Pi, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, C. M. Ho, “Monitoring of Global Ionospheric Irregularities Using the Worldwide GPS Network,” **Geophysical Research Letters**, vol. 24, no. 18, pp. 2283-2286, 1997.
- [14] K. Yeh and C Liu, "Radio wave scintillations in the ionosphere," in **Proceedings of the IEEE**, vol. 70, no. 4, pp. 324-360, 1982.
- [15] NASA. “**Ionospheric Scintillation.**” [Online]. Available: https://www.nasa.gov/mission_pages/cindi/scintillation.htm. 2022.
- [16] S. M. Buhari, M. Abdullah, A. M. Hasbi, Y. Otsuka, T. Yokoyama, M. Nishioka and T. Tsugawa, “Continuous generation and two-dimensional structure of equatorial plasma bubbles observed by high-density GPS receivers in Southeast Asia,” **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 119(12), 10,569-510,580, 2014
- [17] K. Watthanasangmechai, M. Yamamoto, A. Saito, T. Tsugawa, T. Yokoyama, P. Supnithi and C. Y. Yatini, "Latitudinal GRBR-TEC estimation in Southeast Asia region based on the two-station method," in **Radio Science**, vol. 49, no. 10, pp. 910-920, Oct. 2014

- [18] K. Watthanasangmechai, M. Yamamoto, A. Saito, R. Tsunoda, T. Yokoyama, P. Supnithi, M. Ishii and C. Yatini, "Predawn plasma bubble cluster observed in Southeast Asia", **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, vol. 121, no. 6, pp. 5868–5879, 2016
- [19] Y. Y. Liow, S. M. Buhari, M. Abdullah, T. A. Musa and T. Sundarsanam, "The Observation of Ionospheric Large-Scale Wave Structure In Southeast Asia," **2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)**, pp. 192-196, 2019
- [20] L. A. Salles, B. C. Vani, A. Moraes, E. Costa, and E. R. de Paula, "Investigating Ionospheric Scintillation Effects on Multifrequency GPS Signals," **Surveys in Geophysics**, 1-27, 2021
- [21] A. Dey, M. Rahman, D. V. Ratnam and N. Sharma, "Automatic Detection of GNSS Ionospheric Scintillation Based on Extreme Gradient Boosting Technique," in **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 8014605,
- [22] X. Zhao, G. Li, H. Xie, L. Hu, W. Sun, S. Yang, Y. Li, B. Ning and H. Takahashi, "The prediction of day-to-day occurrence of low latitude ionospheric strong scintillation using gradient boosting algorithm." **Space Weather**, Nov 2021
- [23] P. Abadi, S. Saito and W. Srigutomo, "Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia" **Ann. Geophys.**, no. 32, pp. 7–17, 2014.
- [24] G. Ma and T. Maruyama, "A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes" **Geophys. Res. Lett.**, vol. 33, 2006.
- [25] I. I. Shagimuratov, A. Krankowski, I. Ephishov, Yu. Cherniak, P. Wielgosz and I. Zakharenkova, "High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms." **Earth Planet Sp** **64**, pp. 521–529, 2012.

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Statistical Analysis of Scintillation Index and ROTI based on Multi-GNSS Data at Chumphon, Thailand

Khanitin Seechai¹, Punyawit Jamjareegulgarn², Ningbo Wang³ and Pornchai Supnithi⁴

^{1,4}*School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

²*King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon 86160, Thailand*

³*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, No 9 Dengzhuang South Road, Beijing, China*

E-mail: ¹63601108@kmitl.ac.th, ²kjpunyawit@gmail.com, ³wangningbo@aoe.ac.cn, ⁴pornchai.su@kmitl.ac.th

Abstract

Ionospheric scintillation is caused by the fluctuation of electron density in the ionosphere. Severe ionospheric scintillation can degrade the Global Navigation Satellite System (GNSS) signal quality and performance. In low-latitude region, the phenomenon that may cause the ionospheric scintillation, called equatorial plasma bubble or EPB frequently arise. Rate of TEC change Index (ROTI) is utilized to detect the EPB occurrence. In this work, we aim to determine the relationship between the amplitude scintillation index (S_4) and the rate of TEC change index (ROTI) at Chumphon, Thailand. The data are collected from a multi-constellation multi-frequency GNSS receiver from 11 November to 31 December 2020. From the analysis, the results show that the percentage of enhanced ROTI and S_4 events are 21.57% and 17.65%, respectively. Moreover, the statistical number of simultaneous enhancements of ROTI and S_4 show the good correspondence. Refer to GALILEO and BeiDou, the S_4 index of low frequency signal is disturbed more frequently than that of high frequency signal. However, this phenomenon cannot be seen in GPS.

Keywords: Global Navigation Satellite System (GNSS), Ionospheric scintillation, Rate of TEC change Index (ROTI).

1. Introduction

Global Navigation Satellite System (GNSS) applications are widely used in positioning. The GNSS signal may experience rapid random fluctuations when it passes through the irregular ionosphere. Understanding scintillation is important for assessing the performance of a navigation system [1], the businesses that require high accuracy positioning and time such as aviation, exploration,

military, navigation, time identification or even entertainment, particularly, in low-latitude region. In previous works [1-6], they studied the correlation between rate of TEC change index (ROTI) and scintillation index and found that the correlation coefficient is positive. To study the irregular ionosphere, there are 2 cases to be considered: one is disturbed condition caused by equatorial plasma bubble (EPB) and other local, global phenomena, and the other is the quiet condition. In 1999, [2] evaluated the relationship between ROTI and S_4 index by the ratio of ROTI/ S_4 at Ascension Island. The results show that the values of the ratio are between 2 and 10. In [3-5], the authors evaluated the relationship between ROTI and S_4 at Sanya, China, and Polar region and Hok Tsui, Hong Kong, respectively indicating that the ROTI/ S_4 ratios are varied between 0.3 and 6.

Obviously, only the GPS constellation is utilized in previous works. But in reality, new GNSS constellations as well as new frequencies, e.g., L5 band (the bandnumber may be different for each constellation), will be used in real applications. As such, therefore the understanding of scintillation and disturbance parameter such as ROTI are crucial to users. In addition, the statistical analysis of scintillation over Thailand has not been well studied. In this work, the GNSS data are obtained from GNSS receiver on our Chumphon campus, Thailand (10.65°N, 99.37°E). The data period is from 11 November to 31 December 2020 are analyzed. The constellation of GPS, GALILEO, and BeiDou on the frequencies of L1 (1,575.42 MHz) and L5 (1,176.45 MHz) are used to analyze the relationship.

The paper is organized as follow. Section 2 and 3 describe the methodology and experimental setup used to measure and compute the ROTI and S_4 . The statistical result between S_4 and ROTI is given and discussed in section 4.

2. Method

Equatorial plasma bubble (EPB) is known to originate from the bottom side of ionosphere, particularly, near the magnetic equator and polar region, after sunset [2-3]. As the GNSS signal passes through the disturbance region/altitudes, it may be rapidly fluctuated by ionospheric scintillation. The multi-constellation and multi-frequency GNSS receiver can measure the scintillation parameters which are the amplitude and phase scintillations. In this work, we focus on amplitude scintillation (S_4) index commonly studied in low-latitude region as opposed to phase scintillation in mid/high-latitude regions. The S_4 can be calculated by [5]

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}}, \quad (1)$$

where SI is the signal intensity and $\langle \cdot \rangle$ indicates the average process over the interval of time. The basic formula of SI is

$$SI = \frac{NP - WP}{(NP - WP)_{lpf}}, \quad (2)$$

where NP and WP are narrow and wide bandwidth power, respectively, $(NP - WP)_{lpf}$ is the low-frequency filtered part of the $NP - WP$. It can be calculated from the average value of $NP - WP$ over 1 minute, for example.

The rate of TEC change index (ROTI) is computed from the standard deviation of the rate of change in TEC. It is often used to determine the irregularity in the ionosphere, and it can be estimated based on the dual-frequency GNSS data with the time interval of 5 min [7]. The ROTI index can be expressed as

$$ROTI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ROT(i) - \overline{ROT})^2}, \quad (3)$$

where ROT , the rate of TEC, is the difference of slant TEC between epoch index $i+1$ and i , i.e.,

$$ROT = STEC(i+1) - STEC(i), \quad (4)$$

where $STEC(i+1)$ and $STEC(i)$ denote slant TECs at epoch $i+1$ and i .

3. Experimental setup

In this Section, ionospheric scintillation data are collected from a Septentrio PolaRx5 receiver that is installed on Chumphon campus of KMITL. We use

the GNSS signals including GALILEO E1, GALILEO E5a, BeiDou B1C, BeiDou B2a, GPS L1 and GPS L5. This receiver is capable of recording GNSS pseudorange and C/N0 data at 1 Hz sampling rate. The obtained data are in the period of 11 November to 31 December 2020, a total of 51 days is used in the analysis. To reduce the multipath effects, only signals from GNSS satellites with elevation angles above 20 degrees are considered. ROTI can be calculated from total electron content (TEC), that are derived from the code and carrier phase pseudoranges. We estimate ROTI from 1 Hz dual-frequency GNSS phase data over 5-min period.

The S_4 index is obtained directly from the receiver. Table 1 shows the defined threshold for the disturbed and quiet day conditions. Normally S_4 and ROTI are below than 0.2, then make the threshold set to 0.2 and 0.3, respectively.

Table 1: Thresholds of ROTI and S_4 index

	Disturbed day	Quiet day
S_4	> 0.2	≤ 0.2
ROTI	> 0.3	≤ 0.3

4. Results and Discussion

In this Section, the analysis of relationship between ROTI and S_4 index will be presented. At first, we show the example of a disturbed day as indicated by ROTI which are computed based on GPS, GALILEO and BeiDou as shown in Fig. 1.

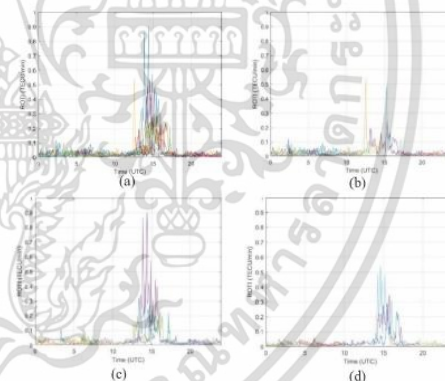


Figure 1: ROTI values from GNSS data at Chumphon station on November 11, 2020

Figure 1 (a) shows the ROTI values from GNSS signals on Day of Year (DOY) 316 or November 11, 2020. The horizontal axis represents time in UTC and the vertical axis represents the ROTI in TECU/minute.

The different colors indicate the ROTI which are calculated from different satellites, and we separately show ROTI by the different constellations which are GPS, GALILEO and BeiDou on a disturbed day as shown in Fig. 1 (b), (c), and (d), respectively.

In Figure 1 (b), 1 (c), and 1 (d) show the ROTI levels on November 11, 2020. The ROTI values on this day are higher than the defined threshold in Table 1, therefore, this day is considered disturbed. The values of ROTI are higher than 0.2 and more than 1 satellite are affected by EPB. These results clearly show that all the constellations are affected at same time (about 11.00-16.00 UTC), but each system will experience different levels of ROTI values.

Next, Fig. 2 shows the computed ROTI levels for all GNSS signals on a quiet, DOY 325 or November 20, 2020.

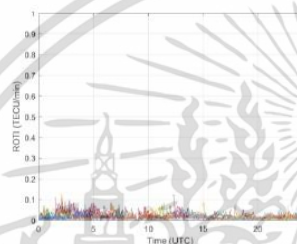


Figure 2: ROTI values from GNSS data at Chumphon station on November 20, 2020

The values of ROTI from all satellites consists of L1 and L5. Then, the amplitude scintillation (S_4) on 11 and 20 November 2020 are shown in Fig. 3 and 4, respectively.

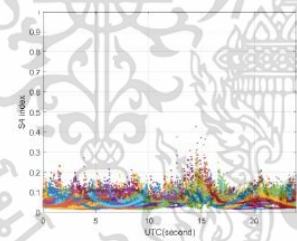


Figure 3: S_4 values from GNSS data at Chumphon station on November 11, 2020

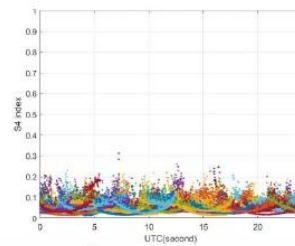


Figure 4: S_4 values from GNSS data at Chumphon station on November 20, 2020

In Fig. 3, S_4 values are higher than the defined threshold of 0.2 at around 15.00 UTC. Therefore, this day is a disturbed day. In Fig. 4, The enhancement of S_4 index is not clearly seen, so, this day can be considered a quiet day. Because low frequency is typically affected more than high frequency, therefore, we will separately show the S_4 index by the different constellations including GPS, GALILEO and BeiDou at L5 frequency on a disturbed day as shown in Fig. 5 to 7, respectively.

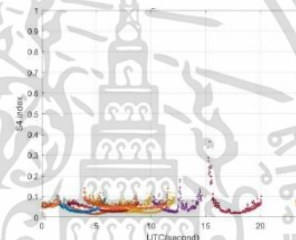


Figure 5: S_4 values from GPS L5 data at Chumphon station on November 20, 2020

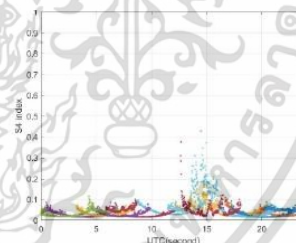


Figure 6: S_4 values from GALILEO E5a data at Chumphon station on November 20, 2020

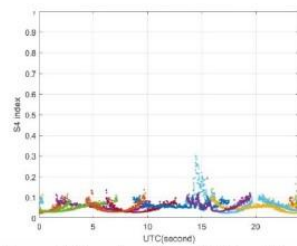


Figure 7: S_4 values from BeiDou B2a data at Chumphon station on November 20, 2020

Then, we compare the statistics of amplitude scintillation (S_4) with ROTI when they are disturbed in Fig. 8.



Figure 8: Statistics of S_4 vs ROTI between 11 November and 31 December 2020

Figure 8 shows the number of disturbed days between 11 November and 31 December 2020. There are 9 days in which the S_4 index is disturbed in November. For ROTI values, it can be observed that there are 10 days and 1 day when the ROTI values are higher than 0.2 in November and December, respectively. The ROTI and S_4 index are disturbed by about 21.57% and 17.65%, respectively. From above, sometimes ROTI is disturbed only, but S_4 is not. We can see the good correspondence between S_4 and ROTI. In this case, the number of days in which both ROTI and S_4 are disturbed is 9 days.

5. Conclusions

This work examines the relationship between ROTI and amplitude scintillation (S_4) index analyzing the ionospheric ROTI and scintillation data collected from a GNSS receiver installed at Chumphon, Thailand on 11 November - 31 December 2020.

The statistical results show that the S_4 index and ROTI are related. All GNSS signals are affected by disturbance, but each system and each frequency may experience different levels of ROTI and S_4 . The S_4 index is clearly seen in GALILEO and BeiDou, but not in GPS. The ROTI and S_4 statistics will be useful for disturbance prediction.

Acknowledgement

This work has been partially supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and Research Fund KREF116301.

References

- [1] N.A. Manga, K. Lakshmana, A.D. Sarma, and T.K. Pant, "Analysis of Correlation between ROTI and S_4 Using GAGAN Data," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 99, pp. 23-34, 2021.
- [2] B. Santimay et al., "Ionospheric Constraints on VHF/UHF Communications Links During Solar Maximum and Minimum Periods," *Radio Science*, vol. 23, no. 3, pp. 363-78, 1988.
- [3] T.E. Humphreys, M.L. Psiaki, J.C. Hinks, B. O'Hanlon, P.M. Kintner, "GNSS and Ionospheric Scintillation How to Survive the Next Solar Maximum," *Inside GNSS*, 2009.
- [4] X. Pi, A.J. Mannucci, B. Valant-Spaight, Y. Bar-Sever, L. J. Romans, S. Skone, L. Sparks, G. Martin Hall, "Observations of Global and Regional Ionospheric Irregularities and Scintillation Using GNSS Tracking Networks," *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*, Honolulu, Hawaii, pp. 752-761, April 2013.
- [5] Z. Yang and Z. Liu, "Correlation between ROTI and Ionospheric Scintillation Indices using Hong Kong Low-Latitude GPS data," *GPS Solutions*, vol. 20, no. 4, pp. 815-824, 2015.
- [6] C. Li, C.M. Hancock, N.A.S. Hamm, S.V. Veetil, C. You, "Analysis of the Relationship between Scintillation Parameters, Multipath and ROTI," *Sensors*, vol. 20, 2877, 2020.
- [7] X. Pi, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, C. M. Ho, "Monitoring of Global Ionospheric Irregularities Using the Worldwide GPS Network," *Geophysical Research Letters*, vol. 24, no. 18, pp. 2283-2286, 1997.

Comparison study of amplitude scintillation between GNSS and satellite beacon receivers in Thailand

Khanitin Seechai
School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand.
63601108@kmitl.ac.th

Kornyanat Hozumi
National Institute of Information and
Communications Technology
Koganei, Tokyo, 184-8795, Japan.
kukkai@mict.go.jp

Lin Min Min Myint
School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand.
linminmin.my@kmitl.ac.th

Pornchai Supnithi
School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand.
pomchai.su@kmitl.ac.th

Abstract—Ionospheric scintillation is caused by irregular electron density in the ionosphere. Severe ionospheric scintillation can degrade the Global Navigation Satellite System (GNSS) signal quality and system performance. In low-latitude region, the phenomenon that may cause the ionospheric scintillation, called equatorial plasma bubble or EPB frequently arise. The effects of EPB on the scintillation at different frequencies and systems need to be analyzed as the study will enhance our EPB understandings. In this work, we aim to study the relationship of the amplitude scintillation index between from GNSS and satellites beacon receivers at KMITL, Thailand to determine the size and characteristics of EPB. The GNSS data were collected in March, April, September, and October 2021. From the analysis, the results show that during locally disturbed time, satellite beacon signals complement the GNSS signals to indicate EPB occurrences.

Keywords—Global Navigation Satellite System (GNSS), Ionospheric scintillation, Ionospheric pierce point (IPP)

I. INTRODUCTION

The Global Navigation Satellite System (GNSS) is widely used for positioning, navigation, and timing (PNT) services for many applications. The GNSS signals may experience rapid random fluctuations when they pass through the irregular ionosphere. Understanding the scintillation is therefore important for assessing the performance of the GNSS system in low-latitude regions [1]. Conventionally, the amplitude scintillation of the signal is measured by the S_4 index which is defined as the ratio of the standard deviation of the signal and the mean of the signal intensity [2].

The causes of irregular ionosphere at low-latitude and equatorial regions are due to local conditions such as equatorial plasma bubble (EPB) occurrences and other ionospheric events, as well as due to the global geomagnetic and solar storms. In the literature, the irregular ionospheric structure related to EPB events was studied using the data based on the GNSS (medium-earth orbits: MEO) and Satellite beacon signals (low-earth orbits: LEO). In [3], the two-dimensional structure of ionospheric irregularities associated with EPBs was investigated using the total electron content (TEC) data from a dense GNSS receiver network. The researchers in [4-5] studied latitudinal ionosphere structure

and predawn plasma bubbles using the ionograms from Ionosonde system and TEC from GNSS receivers and GNU Radio Beacon Receivers (GRBR) together. On the observed periods, they can detect the primary and secondary plasma bubbles only one event that EPB is occur. Moreover, the relationship between the large-scale wave structure (LSWS) at the bottom side of F layer and EPB occurrence was examined with the beacon signals from low earth orbiting satellites (LEOS) called Communications/Navigation Outage Forecasting System (C/NOFS) [6]. However, EPB expansion is not always accompanied by the existence of LSWS. In 2021, the authors have studied the modernized L2C (1,227.6 MHz) and L5 (1,176.45 MHz) signals affected by scintillations compare to L1 signal of GPS. They found that L2C and L5 are more susceptible to the intense scintillations because those wavelengths are longer than that of the L1 (1,575.42 MHz) signal [7]. However, the scintillation effects over Thailand still need to be further studied.

In this work, we analyze the different EPB events based on the scintillations S_4 indices from the GNSS receiver at the frequencies of 1,575.42 MHz and the beacon receiver at the frequency of 150 MHz located at KMITL station (13.73°N, 100.77°E), Bangkok, Thailand.

This paper is organized as follow. Sections 2 and 3 describe the methodology and experimental setup used to measure and compute the S_4 , respectively. The relationship between S_4 index from GNSS and Beacon receiver is given and then discussed in Section 4.

II. METHODOLOGY

EPB is known to originate at the bottom side of ionosphere at the magnetic equator and polar regions, particularly after sunset [8-9] until pre-sunrise periods. As GNSS signals from a satellite pass through the EPB, they may rapidly fluctuate due to ionospheric irregularity resulting inaccurate positioning. Some specific multi-frequency GNSS receivers can measure the scintillation parameters such as amplitude and phase scintillations. The amplitude scintillation is normally used to detect the scintillation in low-latitude region, but the phase scintillation is used in mid/high-latitude regions. In this work, we focus on amplitude scintillation (S_4) index to

study EPB events. The S_4 index (scintillation index) can generally be computed from [2]

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}}, \quad (1)$$

where SI is the signal intensity and $\langle \cdot \rangle$ indicates the average over the interval of time. The SI values are calculated by

$$SI = \frac{NP - WP}{(NP - WP)_{pf}}, \quad (2)$$

where NP and WP are narrow and wide bandwidth powers, $(NP - WP)_{pf}$ is the low-frequency filtered part of the $NP - WP$ that can be calculated from the average value of $NP - WP$ over a period, for example, 1 minute.

III. EXPERIMENTAL SETUP

In this work, we use two S_4 index values measured from 1) the GNSS signals recorded by a Septentrio PolaRx5 receiver and 2) the satellite beacon signal recorded by GRBR receiver. Both receivers are installed at KMITL station, Bangkok (13.73°N, 100.77°E). In the GNSS receiver, the S_4 index is generated based on the L1 frequency (1,575.42 MHz) signal from GPS and GALILEO satellites (22,000-km altitude). The S_4 index from GRBR receiver is computed from the signal of 150 MHz from LEOS satellite (FS71-76) (550-km altitude). The sampling rate is at 1 Hz. We considered a total of 21 days with EPB events in March, April, September and October 2021. To reduce the multipath effects, the elevation angles above 30 degrees are considered.

To determine the locally disturbed periods, the thresholds of the S_4 index from the GNSS and beacon receivers are set to 0.2 similar to [10] and 0.8 based on the empirical study as defined in Table 1.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this Section, the analysis of relationship between S_4 index values from the GNSS and beacon receiver will be presented. An example of a day with disturbed event as indicated by S_4 index from GNSS on Day of Year (DOY) 89 or March 30, 2021, is shown in Fig. 1 (a). The horizontal axis represents the time in Coordinated Universal Time (UTC) and the vertical axis represents the S_4 values from the beacon receiver. From 12:00-20:00 UTC (19:00-3:00 LT), as 9 satellites are visible. As each LEO satellite is visible over a short window of 5 minutes or less, in the figure, the S_4 plots appear like a straight vertical line. Fig. 1(b) shows the S_4 index from GNSS receiver. The different colors indicate the S_4 indices which are received from different satellites. The S_4 values from GNSS receiver from 14:00 to 17:00 UTC (21:00 to 24:00 LT) are higher than the defined threshold of 0.2, therefore, this day is considered a locally disturbed day. It is evident that more than one satellite are affected by EPB. All the constellations are affected at the same time, but each satellite experiences different levels of S_4 values. Fig. 2 shows an example of a quiet day on DOY 96 or 6 April 2021. On that day, the S_4 index from GNSS is less than 0.2.

TABLE I. THRESHOLDS OF S_4 INDEX TO DETERMINE QUIET OR DISTURBED PERIODS

S_4 index	Disturbed	Quiet
GNSS	> 0.2	≤ 0.2
Beacon	> 0.8	≤ 0.8

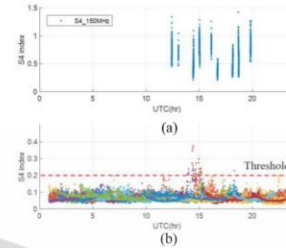


Fig. 1. (a) S_4 index from Beacon receiver and (b) S_4 index from GNSS receiver on DOY 89 2021.

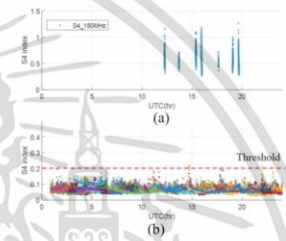


Fig. 2. (a) S_4 index from Beacon receiver and (b) S_4 index from GNSS receiver on DOY 96 2021.

We can receive the beacon signal several times on each day, but we can only see one beacon satellite at a time. Then, in Figs. 3 and 4, we show examples of S_4 values from the beacon receivers on 30th March 2021 for disturbed events and 6th April 2021 for quiet events.

In Fig. 3, S_4 values are higher than 0.8 at around 15.00 UTC, thus, it is considered a locally disturbed event. In Fig. 4, The enhancement of S_4 index never reaches above 0.8, so that this time period is considered a quiet event. Next, we investigate the EPB characteristics and the area of the disturbance by observing the S_4 levels from the GNSS and the beacon signals at the Ionospheric pierce points (IPPs) (at 350-km height) during the time when we can see both the GNSS and the Beacon satellites simultaneously. In this study we will consider three cases of EPB events.

Fig. 5 shows the IPPs of S_4 index from the beacon (line), GPS (circle) and GALILEO (star) systems on DOY 89 at around 15 UTC. The situation when the S_4 values from GNSS are above the threshold is indicated in the red color. In this figure, only S_4 index from the GPS satellite G15 is affected by scintillation. The S_4 index from the beacon satellite at around 15:00 UTC is also in red. Interestingly, the beacon satellites can capture the cluster of EPB between 98 degrees and 103 degrees. The satellite G15 also confirmed that EPB occurs in that area. We considered this situation the case #1 (when S_4 values from both the GNSS and beacon signals in the same area are affected by scintillation).

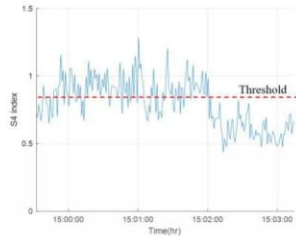


Fig. 3. S_4 index from Beacon receiver on DOY 89 2021 around 15:00 UTC.

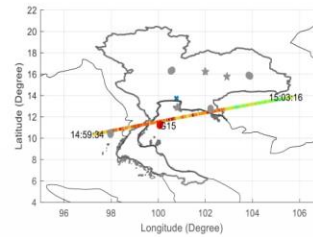


Fig. 5. IPP of S_4 index from Beacon (line) and S_4 index from GPS (circle) and GALILEO (star) on DOY 89 around 15:00 UTC.

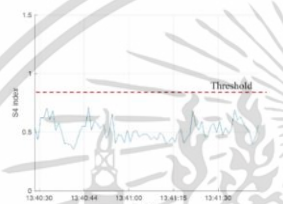


Fig. 4. S_4 index from Beacon receiver on DOY 96 2021 around 13:40 UTC.

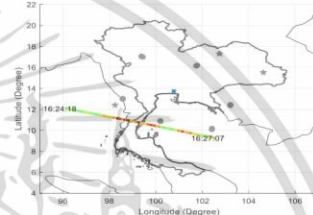


Fig. 6. IPP of S_4 index from Beacon (line) and S_4 index from GPS (circle) and GALILEO (star) on DOY 280 around 13:00 UTC.

Fig. 6 shows the satellite IPPs on DOY 280 at around 13 UTC (20:00 LT). The situation when the S_4 values from GNSS are above the threshold is indicated in the red color, otherwise the gray color. In this figure, only the S_4 index from the PRN G15, G26 (GPS) and E30 (GALILEO) are affected by scintillation. However, satellite beacon signals are not affected by scintillation. This event is considered the case #2 (when only S_4 indices from GNSS is affected by scintillation).

In Fig. 7, the satellite IPPs on DOY 279 at around 16:25 UTC are shown. The situation when the S_4 values from satellites beacon is above the threshold is indicated in the red color. In this figure, the GNSS signals are not affected by scintillation, but the satellite beacon signals are affected. According to the figure, long period of EPB occur around 16:25 UTC and it can be considered as the bottom side of EPB is detected by the beacon signals during F layer is gone up at the midnight time. Therefore, we can observe that the GNSS signals at higher latitudes than beacon satellite do not capture any disturbance.

Finally, we summarize the statistics of each case in Fig. 8 whereby 21 days with the disturbed events associated with EPB event day in March (4days), April (4days), September (1days), and October (12days) 2021. 25, 8 and 43 events of case 1, 2, and 3 respectively were observed in 2021. From the results, the S_4 index from Beacon signal can detect the disturbances due to EPB more often than that from GNSS signals because it can capture the EPB over the short period.

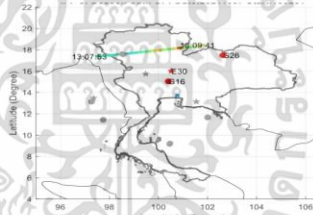


Fig. 7. IPP of S_4 index from Beacon (line) and S_4 index from GPS (circle) and GALILEO (star) on DOY 279 around 16:25 UTC.

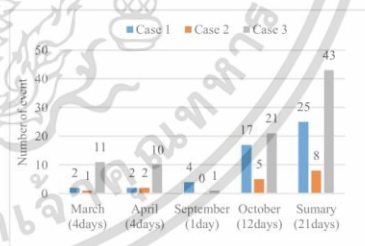


Fig. 8. Statistics of each case in March, April, September, and October 2021.

V. CONCLUSIONS

This work examines the EPB events by analyzing the amplitude scintillation (S_4) index from the beacon and GNSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

signals as well as and studying the relationship between those two S4 indices. We use the ionospheric scintillation data in March, April, September, and October 2021 as obtained at KMITL, Thailand.

The results show that during locally disturbed time, the percentages of case 1 to 3 occurrences are 56.58%, 10.53% and 32.89%, respectively.

ACKNOWLEDGMENT

This work received funding support from the NSRF via the Program Management Unit for the Human Resources & Institutional Development, Research and Innovation (grant no. B05F640197) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (grant no. RE-KRIS/FF65/35). The ASEAN IVO (http://www.nict.go.jp/en/asean_ivo/index.html) project, GNSS and Ionospheric Data Products for Disaster Prevention and Aviation in Magnetic Low-latitude Regions (Phase II), was involved in the production of the contents of this work and financially supported by NICT (<http://www.nict.go.jp/en/index.html>).

REFERENCES

- [1] N. Manga, K. Lakshmana, A. Sarma, and T. Pant, "Analysis of correlation between ROTI and S4 using GAGAN Data," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 99, pp. 23-34, 2021
- [2] Z. Yang and Z. Liu, "Correlation between ROTI and Ionospheric scintillation indices using Hong Kong low-latitude GPS data," *GPS Solutions*, vol. 20, no. 4, pp. 815-824, 2015
- [3] S. M. Buhari, M. Abdullah, A. M. Hasbi, Y. Otsuka, T. Yokoyama, M. Nishioka and T. Tsugawa, "Continuous generation and two-dimensional structure of equatorial plasma bubbles observed by high-density GPS receivers in Southeast Asia," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(12), 10,569-510,580, 2014
- [4] K. Watthanasangmechai, M. Yamamoto, A. Saito, T. Tsugawa, T. Yokoyama, P. Supnithi and C. Y. Yatini, "Latitudinal GRBR-TEC estimation in Southeast Asia region based on the two-station method," in *Radio Science*, vol. 49, no. 10, pp. 910-920, Oct. 2014
- [5] K. Watthanasangmechai, M. Yamamoto, A. Saito, R. Tsunoda, T. Yokoyama, P. Supnithi, M. Ishii and C. Yatini, "Predawn plasma bubble cluster observed in Southeast Asia", *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, vol. 121, no. 6, pp. 5868-5879, 2016
- [6] Y. Y. Liow, S. M. Buhari, M. Abdullah, T. A. Musa and T. Sundarsanam, "The Observation of ionospheric large-scale wave structure in Southeast Asia," 2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), pp. 192-196, 2019
- [7] L. A. Salles, B. C. Vani, A. Moraes, E. Costa, and E. R. de Paula, "Investigating ionospheric scintillation effects on multifrequency GPS signals," *Surveys in Geophysics*, 1-27, 2021
- [8] B. Santimay et al., "Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods," *Radio Science*, vol. 23, no. 3, pp. 363-78, 1988
- [9] T.E. Humphreys, M.L. Psiaki, J.C. Hinks, B. O'Hanlon, P.M. Kintner, "GNSS and ionospheric scintillation how to survive the next solar maximum," *inside GNSS*, 2009
- [10] P. Abadi et al., "Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia" *Ann. Geophys.*, no. 32, pp. 7-17, 2014

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายคณิติน สีชัย
วัน เดือน ปีเกิด	23 พฤษภาคม 2540
ที่อยู่	29 ถนนพรหมราช ซอย 1/1 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000 โทร. 08-7424-6757
ประวัติการศึกษา	2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการ	
พ.ศ. 2564	Statistical Analysis of Scintillation Index and ROTI based on Multi-GNSS Data at Chumphon, Thailand, 2021 36th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)
พ.ศ. 2565	Comparison study of amplitude scintillation between Gns and satellite beacon receivers in Thailand, 2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้