



การศึกษาความแปรปรวนของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาลในประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลจีพีเอสในช่วงปี 2566

**A STUDY OF SEASONAL IONOSPHERIC DISTURBANCES IN THAILAND
USING GPS DATA DURING 2023**

ศุภสัณห์ วรรณายุวัฒน์¹, และชัยยุทธ เจริญผล²

¹นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author, E-Mail: 6572086521@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศของโลกที่มีความสำคัญต่อการสื่อสาร และการระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System) เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระในชั้นบรรยากาศนี้มีผลกระทบต่อการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ ทำให้เกิดการบิดเบือนหรือการสูญเสียสัญญาณได้ การศึกษาความแปรปรวนของชั้นไอโอโนสเฟียร์ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาระบบสื่อสารและการสำรวจและทำแผนที่ด้วยระบบดาวเทียม GNSS ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ประเทศไทย จากข้อมูล GNSS ในปี 2566 จากโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Station, CORS) จำนวน 12 สถานีจากหน่วยงานกรมแผนที่ทหาร ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในประเทศไทย มีความสัมพันธ์กับภูมิภาคของประเทศและฤดูกาล พบว่าความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนรวมทั้งหมด (Total Electron Content, TEC) และดัชนีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด (Rate of Total Electron Content index, ROTI) เกิดขึ้นมากที่สุดในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยและเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงฤดูร้อน และช่วงเวลาที่เกิดความแปรปรวนของค่า ROTI มากที่สุดมักจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 19.00-23.00 น. ซึ่งผลของการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการระบุช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนในระดับต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในประเทศไทยและเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความแม่นยำในการระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS ต่อไป

คำสำคัญ: ไอโอโนสเฟียร์, การระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS, โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่อง, ปริมาณอิเล็กตรอนรวมทั้งหมด, ดัชนีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด

Abstract

The ionosphere is a layer of Earth's atmosphere that plays a crucial role in communication and Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning. The free electrons within this layer can affect the propagation of radio signals, leading to distortions or signal loss. Therefore, studying ionospheric disturbances is essential for the development of communication systems and satellite-based surveying and mapping. This research investigated ionospheric disturbances in Thailand using GNSS data from 12 Continuously Operating Reference Stations (CORS) managed by the Royal Thai Survey Department in 2023. Results indicate that the disturbance of the ionosphere in Thailand is correlated with both region and season. The highest variability in Total Electron Content (TEC) and Rate of Total Electron Content index (ROTI) was observed in the northern region and during the summer. Furthermore, the highest ROTI disturbance often occurred between 7:00 PM and 11:00 PM. These findings can be applied to identify periods with varying levels of ionospheric disturbance in Thailand and to study their impact on GNSS positioning accuracy.

Keywords: Ionosphere, GNSS, CORS, Total Electron Content (TEC), Rate of TEC Index (ROTI)

1. บทนำ

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศของโลกที่อยู่ในระดับ 50 ถึง 1000 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเล เป็นหนึ่งในชั้นบรรยากาศที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ GNSS [1] ได้พบว่าการคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีความแปรปรวนสูงในเขตพื้นที่ศูนย์สูตรรวมถึงประเทศไทย เมื่อสัญญาณ GNSS เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของจำนวนอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถวัดได้จากปริมาณรวมของอิเล็กตรอนอิสระในชั้นบรรยากาศ Total Electron Content (TEC) การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดการกระเจิงของสัญญาณดาวเทียม เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการรับสัญญาณ และในกรณีที่ความแรงของสัญญาณต่ำในบางดาวเทียมขณะทำการรับสัญญาณจะทำให้เกิดการหลุดของสัญญาณดาวเทียม และอาจมีผลถึงขั้นไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้เลย (Fixed Ambiguity) ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้งานที่รับสัญญาณดาวเทียมด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS เป็นอย่างมาก [2]

ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละวันจะแตกต่างกันไปตามเวลา ฤดูกาล กิจกรรมของสุริยะ และปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอื่นๆ สามารถอธิบายได้ด้วยความผันผวนของสัญญาณ GNSS ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่า TEC การวิเคราะห์ค่า TEC ในปัจจุบันนิยมใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลา เรียกว่า Rate of TEC (ROT) และคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ROT เพื่อสร้างดัชนีอีกค่าหนึ่งชื่อดัชนีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด Rate Of TEC Index (ROTI) [3]

มีการศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น [4] ได้ศึกษาการสังเกตการณ์ ROTI ทั่วโลกโดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ของสถานี International GNSS Service (IGS) ทั่วโลก ผลการศึกษาพบว่าค่า ROTI สัมพันธ์กับกิจกรรมสุริยะ โดยค่า ROTI ในพื้นที่ละติจูดสูงมีความเข้มข้นมากกว่าในพื้นที่ละติจูดต่ำ

และกลาง ในพื้นที่ละติจูดต่ำพบค่า ROTI สูงในช่วงวิษุวัต (equinox) คือเดือนมีนาคมและกันยายน ช่วงเวลาที่พบค่า ROTI สูง เริ่มต้นที่ 19:30-21:00 LT ในขณะที่ [5] ได้วิเคราะห์การแปรผันของอิเล็กตรอนรวมในประเทศไทยในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 24 (พ.ศ. 2552-2555) พบว่าความแปรปรวนของชั้นไอโอโนสเฟียร์มีค่าสูงสุดในช่วงเดือน มีนาคม-เมษายน และกันยายน-ตุลาคม โดยเฉพาะในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางของประเทศไทย

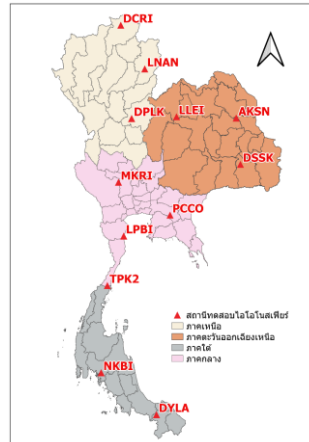
ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาระบบโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS) จากหลายหน่วยงานของภาครัฐเพื่อพัฒนาการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมอย่างต่อเนื่อง โดยขยายจำนวนสถานีให้ครอบคลุมทั่วประเทศมากกว่า 290 แห่ง ข้อมูลจากระบบ GNSS ที่ได้จากโครงข่ายดังกล่าว นอกจากจะนำไปใช้ประโยชน์ในงานรังวัดแล้ว ยังสามารถนำมาวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางชั้นบรรยากาศได้อีกมากมาย งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูล GNSS ปี 2566 จากสถานี CORS จำนวน 12 สถานี ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายสถานี CORS ของกรมแผนที่ทหาร โดยแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 4 ภูมิภาค และเลือกสถานี CORS เพื่อศึกษาความแปรปรวนภูมิภาคละ 3 สถานี ประมวลผลข้อมูลค่า TEC และค่า ROTI จากนั้นนำเสนอในรูปแบบอนุกรมเวลา เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละภูมิภาคแต่ละฤดูกาลและแต่ละเดือน ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับกิจกรรมสุริยะในการคัดเลือกช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อการรังวัดด้วย GNSS ในช่วงเวลาดังกล่าวต่อไป

2. ข้อมูลและวิธีการที่ใช้ในการวิจัย

2.1 ข้อมูล GNSS และพื้นที่ศึกษาวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการบูรณาการด้าน GNSS ของหลายหน่วยงานเช่น กรมแผนที่ทหาร กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง และสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ ในการติดตั้งโครงข่ายสถานี CORS กว่า 290 สถานีทั่วประเทศเพื่อใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานเกี่ยวกับระบบโครงข่ายงานรังวัดด้วยระบบดาวเทียม ให้บริการประชาชนได้ใช้งานในด้านการรังวัดด้วยระบบดาวเทียม การคมนาคมขนส่ง การบริหารจัดการภัยพิบัติและอุตสาหกรรมด้านต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งพื้นที่ศึกษาของประเทศไทยออกเป็น 4 ภูมิภาค คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ แสดงดังรูปที่ 1 ใช้ข้อมูล GNSS จากสถานี CORS ของกรมแผนที่ทหาร จำนวน 12 สถานี จากทั้งหมด 80 สถานีทั่วประเทศ (จำนวน 3 สถานีต่อภูมิภาค ดังแสดงในตารางที่ 1) ข้อมูล GNSS ที่ใช้ในการประมวลผลจัดเก็บอยู่ในรูปแบบ Rinex (Receiver Independent Exchange Format) เวอร์ชัน 3.02 ข้อมูลมีความถี่ในการจัดเก็บทุกๆ 15 วินาที ในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2566 ถึง วันที่ 31 ธันวาคม 2566



รูปที่ 1 ตำแหน่งสถานี CORS ที่ใช้ข้อมูล GNSS ในการศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จำนวน 12 สถานี

ตารางที่ 1 รายละเอียดสถานี CORS ที่ใช้ศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จำนวน 12 สถานี

ลำดับ	ชื่อ	สถานที่ตั้ง	ภูมิภาค	เครื่องรับสัญญาณ	เสาอากาศเครื่องรับ
1	DCRI	เชียงใหม่	เหนือ	LEICA GR50	LEIAR20
2	DPLK	พิษณุโลก			
3	LNAN	น่าน			
4	LPBI	เพชรบุรี	กลาง	LEICA GR50	LEIAR20
5	MKRI	กาญจนบุรี			
6	PCCO	ฉะเชิงเทรา			
7	AKSN	กาฬสินธุ์	ตะวันออกเฉียงเหนือ	LEICA GR50	LEIAR20
8	DSSK	ศรีสะเกษ			
9	LLEI	เลย			
10	DYLA	ยะลา	ใต้	LEICA GR50	LEIAR20
11	NKBI	กระบี่			
12	TPK2	ประจวบคีรีขันธ์			

2.2 ข้อมูล Differential code biases (DCB)

Differential Code Biases (DCB) คือ ข้อมูลความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ หรือ ความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นระหว่างการวัดสัญญาณจากดาวเทียมสองดวงที่มีความถี่เดียวกันหรือต่างกัน ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความแตกต่างของอุปกรณ์บนดาวเทียม เช่น นาฬิกาอะตอม ตัวส่ง และเครื่องขยายสัญญาณ ผลกระทบจากการแพร่กระจายสัญญาณเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศจะเกิดการหน่วงและผิดเพี้ยน ซึ่งผลกระทบนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณและสถานะของชั้นบรรยากาศ ความแตกต่างของอุปกรณ์รับสัญญาณ GNSS เช่น เสาอากาศ เครื่องขยายสัญญาณ ข้อมูล DCB เป็นสิ่งจำเป็น

สำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้โค้ดของเครื่องรับสัญญาณ GNSS และการดึงข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ข้อมูล DCB ที่ใช้ในการประมวลผลของงานวิจัยนี้คือ PIC1 เป็นข้อมูล DCB ของกลุ่มดาวเทียม GPS และ PIP2 เป็นข้อมูล DCB ของกลุ่มดาวเทียม GNSS โดยสามารถดาวน์โหลดข้อมูล DCB ผ่านทางเว็บไซต์ <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>

2.3 การคำนวณค่าอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ (Total Electron Content)

ปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมดในชั้นบรรยากาศหรือ Total Electron Content (TEC) คือจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่มีอยู่ตามเส้นทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ ยังมีปริมาณอิเล็กตรอนมากก็จะส่งผลให้คลื่นสัญญาณเดินทางได้ช้า สำหรับการสื่อสารภาคพื้นดินกับดาวเทียมและการนำทางด้วยดาวเทียม TEC เป็นพารามิเตอร์ที่ดีในการตรวจสอบผลกระทบจากสภาพอากาศในอวกาศที่อาจเกิดขึ้น โดยค่า TEC วัดเป็นอิเล็กตรอนต่อตารางเมตร โดย 1 TEC Unit TECU = 10^6 อิเล็กตรอน/ตร.ม. [6] ค่า TEC ที่วัดได้จากสัญญาณ GNSS จะเป็นตามแนวเส้นทางของดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณเรียกว่า Slant TEC [7] โดย Slant TEC สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$TEC = \int_s^R N_e ds \quad (1)$$

โดยที่ N_e คือ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน s คือ ระยะทางระหว่างดาวเทียม GPS กับเครื่องรับสัญญาณ GPS

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประมวลผลค่า TEC จากไฟล์ Rinex ร่วมกับไฟล์ DCB โดยใช้โปรแกรม GPS-TEC Ver 3.5 ได้รับการพัฒนาโดย [8] ในการตั้งค่าการประมวลผลใช้มุมเงย 20 องศา (elevation mask 20°) เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดจากคลื่นหลายวิถี การเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตของดาวเทียม และผลกระทบจากชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ ผลลัพธ์จะได้ไฟล์ ASCII (.CMN file) แสดงดังรูปที่ 2 ข้อมูลที่ประมวลผลได้จะเป็นข้อมูล TEC ของดาวเทียม GPS แต่ละดวง มีความถี่ในการจัดเก็บทุกๆ 15 วินาที สอดคล้องกับข้อมูล Rinex ที่ใช้ในการประมวลผลโดยถูกจัดเก็บทุกๆ 15 วินาทีเช่นกัน ข้อมูลบรรทัดแรกคือข้อมูลสถานีและลองจิจูดของสถานีที่ประมวลผล บรรทัดที่สองคือข้อมูลอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

Unknown_station, "E:\16CORS\DCRI1170.23o"									
20.10768	99.88169	435.59305							
MJdatet	Time	PRN	Az	Ele	Lat	Lon	Stec	Vtec	S4
60061.052083	1.250000	1	162.66	20.84	13.614	101.959	54.72	30.13	-99.000
60061.052257	1.254167	1	162.59	20.92	13.639	101.961	54.86	30.24	-99.000
60061.052604	1.262500	1	162.45	21.09	13.688	101.964	54.86	30.35	-99.000
60061.052778	1.266667	1	162.37	21.18	13.712	101.965	53.01	29.54	-99.000
60061.052951	1.270833	1	162.30	21.27	13.737	101.967	53.01	29.59	-99.000
60061.053125	1.275000	1	162.23	21.35	13.761	101.968	53.01	29.64	-99.000
60061.053299	1.279167	1	162.16	21.44	13.785	101.969	52.96	29.67	-99.000
60061.053472	1.283333	1	162.08	21.52	13.810	101.970	52.92	29.70	-99.000
60061.053646	1.287500	1	162.01	21.61	13.834	101.972	52.82	29.71	-99.000
60061.053819	1.291667	1	161.94	21.70	13.858	101.973	52.79	29.75	-99.000
60061.053993	1.295833	1	161.87	21.78	13.882	101.974	52.77	29.79	-99.000
60061.054167	1.300000	1	161.79	21.87	13.905	101.975	52.77	29.84	-99.000
60061.054861	1.316667	1	161.50	22.22	14.000	101.980	52.77	30.05	-99.000
60061.055035	1.320833	1	161.43	22.31	14.023	101.981	53.69	30.55	-99.000
60061.055208	1.325000	1	161.36	22.39	14.047	101.982	53.67	30.59	-99.000
60061.055382	1.329167	1	161.28	22.48	14.070	101.983	53.69	30.66	-99.000
60061.055556	1.333333	1	161.21	22.57	14.093	101.984	53.65	30.69	-99.000
60061.055729	1.337500	1	161.14	22.66	14.116	101.985	53.64	30.74	-99.000
60061.056424	1.354167	1	160.84	23.01	14.208	101.988	53.64	30.95	-99.000
60061.056771	1.362500	1	160.69	23.18	14.253	101.990	53.64	31.06	-99.000
60061.056944	1.366667	1	160.62	23.27	14.275	101.991	53.62	31.11	-99.000
60061.057118	1.370833	1	160.55	23.36	14.298	101.991	53.59	31.15	-99.000
60061.057292	1.375000	1	160.47	23.45	14.320	101.992	53.52	31.17	-99.000
60061.057639	1.383333	1	160.33	23.63	14.364	101.994	53.52	31.28	-99.000
60061.057813	1.387500	1	160.25	23.72	14.387	101.994	53.87	31.51	-99.000
60061.057986	1.391667	1	160.18	23.80	14.409	101.995	54.39	31.82	-99.000
60061.058160	1.395833	1	160.10	23.89	14.431	101.995	54.39	31.88	-99.000
60061.058333	1.400000	1	160.03	23.98	14.452	101.996	52.58	31.03	-99.000
60061.058507	1.404167	1	159.96	24.07	14.474	101.997	52.45	31.02	-99.000
60061.058681	1.408333	1	159.88	24.16	14.496	101.997	52.41	31.06	-99.000

รูปที่ 2 ผลลัพธ์ TEC ที่ประมวลผลด้วยโปรแกรม GPS-TEC ของสถานี DCRI

ตารางที่ 2 อธิบายรายละเอียดของ ASCII ไฟล์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม GPS-TEC

ชื่อหัวข้อ	คำอธิบาย
MJdatet	Modified Julian date เป็นมาตรฐานเวลาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านดาราศาสตร์และสาขาอื่นๆ เป็นการนับวันอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่วันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2391 เวลา 12:00 UT MJD
Time	เวลาในระบบ UT (เป็นทศนิยม หมายถึง ชั่วโมง + นาที/60 + วินาที/3600)
PRN	หมายเลขดาวเทียม
Az	มุม Azimuth ของดาวเทียมในหน่วยองศา
Ele	มุม Elevation ของดาวเทียมในหน่วยองศา
Lat, Lon	ตำแหน่งละติจูดและลองจิจูด
Stec, Vtec	ค่า TEC แนวเอียงและแนวตั้งตามลำดับ
S4	ค่า S4 index

2.4 การคำนวณค่า Rate of TEC Index (ROTI)

ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถอธิบายได้ด้วยความผันผวนของสัญญาณ GNSS สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของ TEC โดยคำนวณจาก Rate of TEC (ROT) โดยที่ ROT คืออัตราส่วนระหว่างผลต่างของค่า TEC กับผลต่างช่วงเวลาของค่า TEC ที่ระบุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) ส่วนค่า Rate of TEC Index (ROTI) คำนวณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ROT ของเวลาทุก 5 นาที [3] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$ROT = \frac{TEC_k - TEC_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \quad (2)$$

$$ROTI = \sigma_{ROT} \quad (3)$$

โดยที่ i คือ ดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ k คือ เวลา σ_{ROT} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ROT ของเวลาทุก 5 นาที

ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูล STEC ในการคำนวณค่า ROTI โดยนำข้อมูล STEC จากไฟล์ ASCII ที่ได้รับการประมวลผลด้วยโปรแกรม GPS-TEC มาคำนวณหา ROT จากสมการที่ (2) คำนวณหาอัตราส่วนระหว่างผลต่างของค่า STEC ณ ช่วงเวลาอ้างอิงแรกกับช่วงเวลาอ้างอิงถัดไป เทียบกับผลต่างเวลาของค่า STEC ณ ช่วงเวลาอ้างอิงนั้น ผลลัพธ์จะได้ค่า ROT ทุก 15 วินาที จากนั้นคำนวณค่า ROTI จากสมการที่ (3) โดยคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อมูล ROT ทั้งหมด 5 ค่า โดยใช้ข้อมูล ROT ณ ช่วงเวลาอ้างอิงแรกและช่วงเวลาที่อยู่ถัดไป 1 นาที, 2 นาที, 3 นาที และ 4 นาที ตามลำดับ ผลลัพธ์จะได้ค่า ROTI ทุก 15 วินาที ค่า ROTI ที่ได้บ่งบอกถึงความแปรปรวนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของดาวเทียม GPS แต่ละดวงในแต่ละวัน

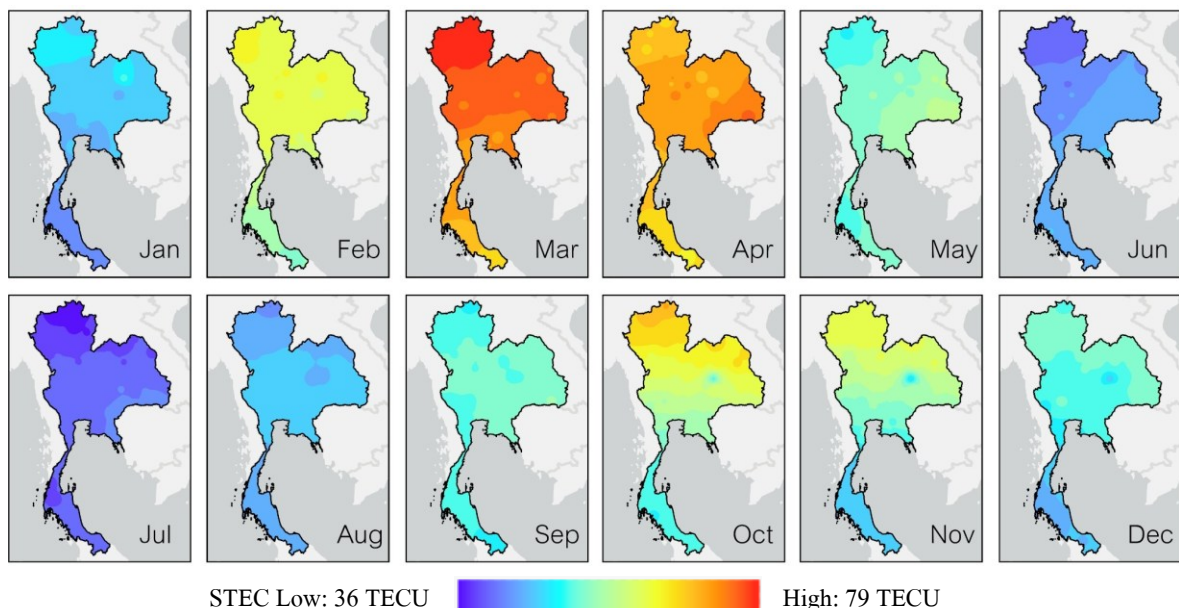
3. ผลการศึกษาวิจัยและอภิปรายผล

ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการประมวลผล TEC และการคำนวณค่า ROTI สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกวิเคราะห์พฤติกรรมของไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นในปี 2566 จากแผนที่ STEC และส่วนที่สองวิเคราะห์ถึงช่วงเวลาและภูมิภาคที่เกิดความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากอนุกรมเวลาของค่า STEC และค่า ROTI

3.1 พฤติกรรมของไอโอโนสเฟียร์และแผนที่ STEC

จากข้อมูล STEC เฉลี่ยรายเดือนของสถานี CORS จากกรมแผนที่ทหาร จำนวน 12 สถานี ที่ใช้ศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในงานวิจัยนี้ สามารถประมาณค่า STEC โดยการใช้การแทรกค่าด้วยวิธี Inverse distance weighted (IDW) ในโปรแกรม ArcGIS Pro เพื่อสร้างแผนที่ STEC ของประเทศไทย รูปที่ 3 แสดงแผนที่ STEC ของประเทศไทย โดยแสดงค่า STEC เฉลี่ยในแต่ละเดือนในปี 2566 มีค่า STEC ต่ำสุดคือ 36 TECU และสูงสุดคือ 79 TECU

ปกติโลกของเราจะมีการแบ่งฤดูกาลออกเป็น 4 ฤดู ได้แก่ ฤดูใบไม้ผลิ ฤดูร้อน ฤดูใบไม้ร่วง และฤดูหนาว แต่ประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในเขตร้อนและใกล้เส้นศูนย์สูตร มีฤดูกาลเพียง 3 ฤดูหลักๆ คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ซึ่งฤดูกาลเหล่านี้มีผลต่อค่า STEC อย่างชัดเจน โดยในช่วงฤดูร้อน (กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม) พบว่าค่า STEC เฉลี่ยสูงสุดถึง 79 TECU ในเดือนมีนาคม และส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณภาคเหนือ เมื่อเข้าสู่ฤดูฝน (กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม) ค่า STEC จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ต่ำสุดเพียง 36 TECU ในเดือนกรกฎาคม และในช่วงฤดูหนาว (กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์) ค่า STEC จะเพิ่มสูงขึ้นในระดับปานกลาง โดยมีค่าประมาณ 42 - 67 TECU



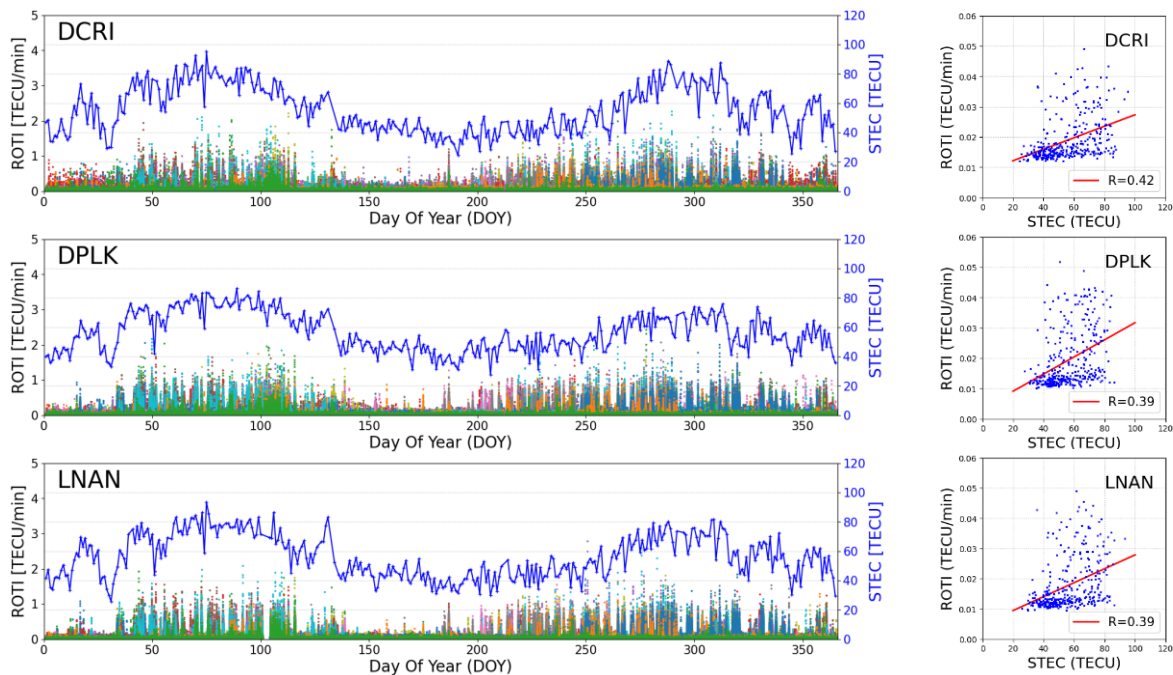
รูปที่ 3 แผนที่ STEC ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในปี 2566 จากข้อมูล GNSS ของสถานี CORS ที่ใช้ศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ผ่านการประมาณค่าโดยการใช้การแทรกค่า STEC ด้วยวิธี Inverse distance weighted (IDW)

3.2 อนุกรมเวลาของค่า STEC และ ROTI

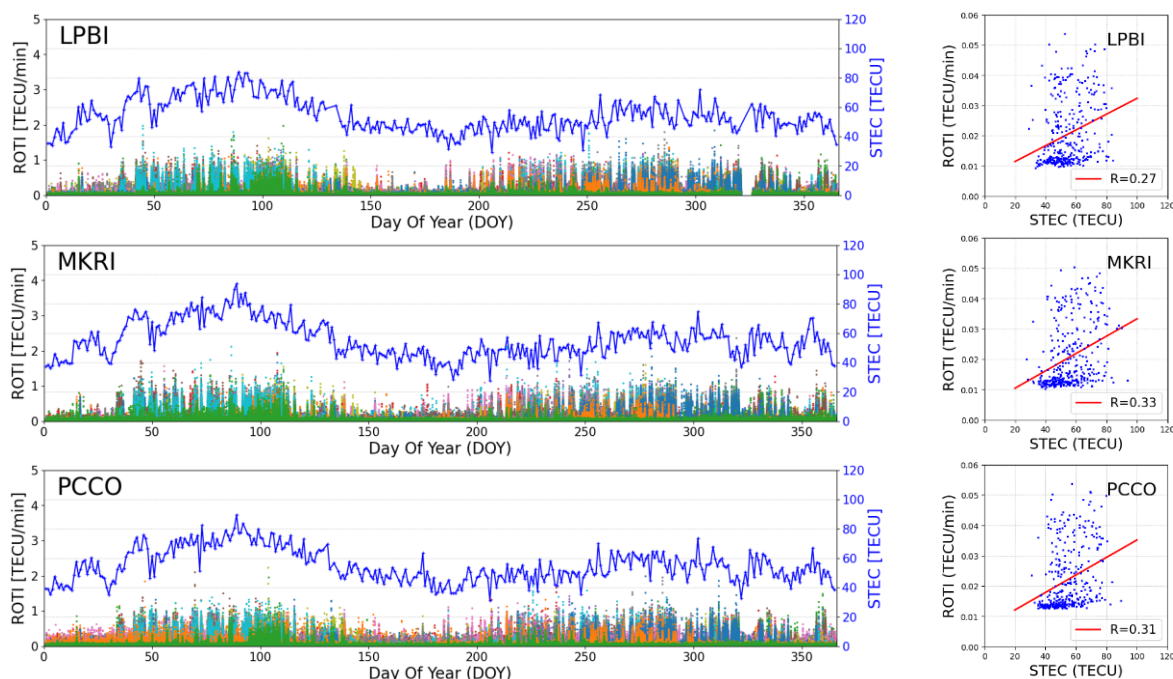
จากข้อมูล STEC เฉลี่ยรายเดือนในหัวข้อที่ 3.1 และค่า ROTI ที่คำนวณได้ของสถานี CORS ทั้ง 12 สถานีจากหัวข้อที่ 2.4 นั้น สามารถแสดงผลเป็นอนุกรมเวลาเพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์และความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือพื้นที่ประเทศไทยที่แตกต่างกันไปตามภูมิภาค วัน เวลา และฤดูกาล งานวิจัยนี้ได้ใช้เกณฑ์ในการจำแนกความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมา ที่ศึกษาเกี่ยวกับความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [9] โดยมีเกณฑ์ในการจำแนกความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ดังนี้ $0.25 \leq ROTI < 0.5$ มีความแปรปรวนน้อย, $0.5 \leq ROTI < 1$ มีความแปรปรวนปานกลาง และ $ROTI \geq 1$ มีความแปรปรวนสูง [10]

สามารถวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของอนุกรมเวลาของค่า STEC และ ROTI ในแต่ละภูมิภาค ได้ดังนี้ รูปที่ 4 (ซ้าย) แสดงอนุกรมเวลาของค่าเฉลี่ย STEC และ ROTI ของพื้นที่ภาคเหนือ (DCRI, DPLK, และ LNaN) รูปที่ 5 (ซ้าย) แสดงอนุกรมเวลาของค่าเฉลี่ย STEC และ ROTI ของพื้นที่ภาคกลาง (LPBI, MKRI, และ PCCO) และรูปที่ 6 (ซ้าย) แสดงอนุกรมเวลาของค่า STEC และ ROTI ของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (AKSN, DSSK, และ LLEI) ภูมิภาคทั้งสามมีความสัมพันธ์ของความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับช่วงเวลาเหมือนกันคือ ช่วงที่มีความแปรปรวนน้อย $0.25 \leq ROTI < 0.5$ เกิดขึ้นช่วงเดือนมกราคม และเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน ช่วงที่มีความแปรปรวนปานกลาง $0.5 \leq ROTI < 1$ เกิดขึ้นเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม และช่วงที่มีความแปรปรวนสูง $ROTI \geq 1$ เกิดขึ้นเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน และเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน ในส่วนของรูปที่ 7 (ซ้าย) นั้นแสดงอนุกรมเวลาของค่าเฉลี่ย STEC และ ROTI ของพื้นที่ภาคใต้ (DYLA, NKBI, และ TPK2) จากรูปแสดงให้เห็นว่า ช่วงที่มีความแปรปรวนน้อย $0.25 \leq ROTI < 0.5$ เกิดขึ้นเดือนมกราคม และเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน ช่วงที่มีความแปรปรวนปานกลาง $0.5 \leq ROTI < 1$ เกิดขึ้นเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน และเดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม ในบริเวณภาคใต้นั้นแทบจะไม่มีค่าความแปรปรวนสูงเกิดขึ้นเลย ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเกตการณ์ ROTI ทั่วโลกโดยเฉพาะพื้นที่ละติจูดต่ำ [4] และงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับค่า TEC ในประเทศไทยในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 24 [5] โดยงานวิจัยทั้งสองพบความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุดหรือค่า ROTI สูงสุด ในช่วงวิษุวัตหรือ equinox คือเดือนมีนาคม (March equinox) และกันยายน (September equinox)

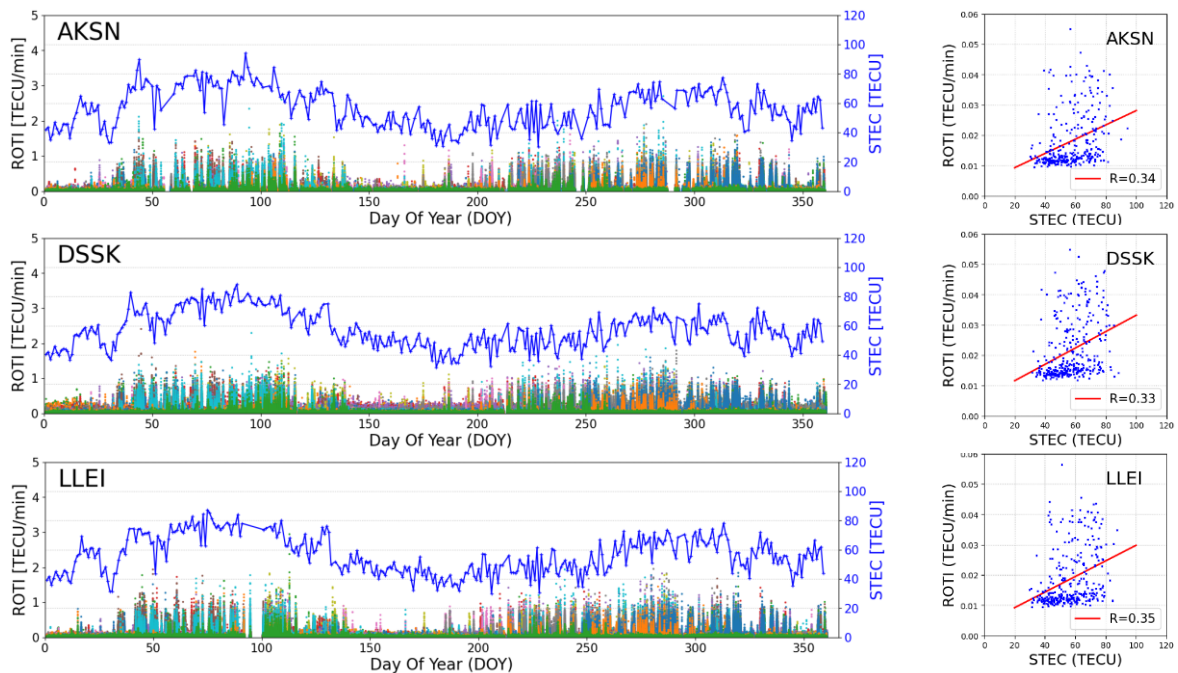
จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย STEC และ ROTI ของสถานี CORS ทั้ง 12 สถานีที่ใช้ศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับต่ำถึงปานกลาง (0.1-0.29) และระดับปานกลางถึงสูง (0.30-0.49) [11] โดยภาพรวมพบว่าสถานีส่วนใหญ่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วงปานกลางถึงสูง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเป็นรายภูมิภาค พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความแตกต่างกันออกไป โดยภาคเหนือได้แก่สถานี DCRI, DPLK, และ LNaN มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.42, 0.39 และ 0.39 ตามลำดับ รูปที่ 4 (ขวา) ภาคกลางได้แก่สถานี LPBI, MKRI, และ PCCO มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.27, 0.33 และ 0.31 ตามลำดับ ตามลำดับรูปที่ 5 (ขวา) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้แก่สถานี AKSN, DSSK, และ LLEI มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.34, 0.33 และ 0.35 ตามลำดับ รูปที่ 6 (ขวา) ภาคใต้ได้แก่สถานี DYLA, NKBI, และ TPK2 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.16, 0.24 และ 0.27 ตามลำดับ รูปที่ 7 (ขวา)



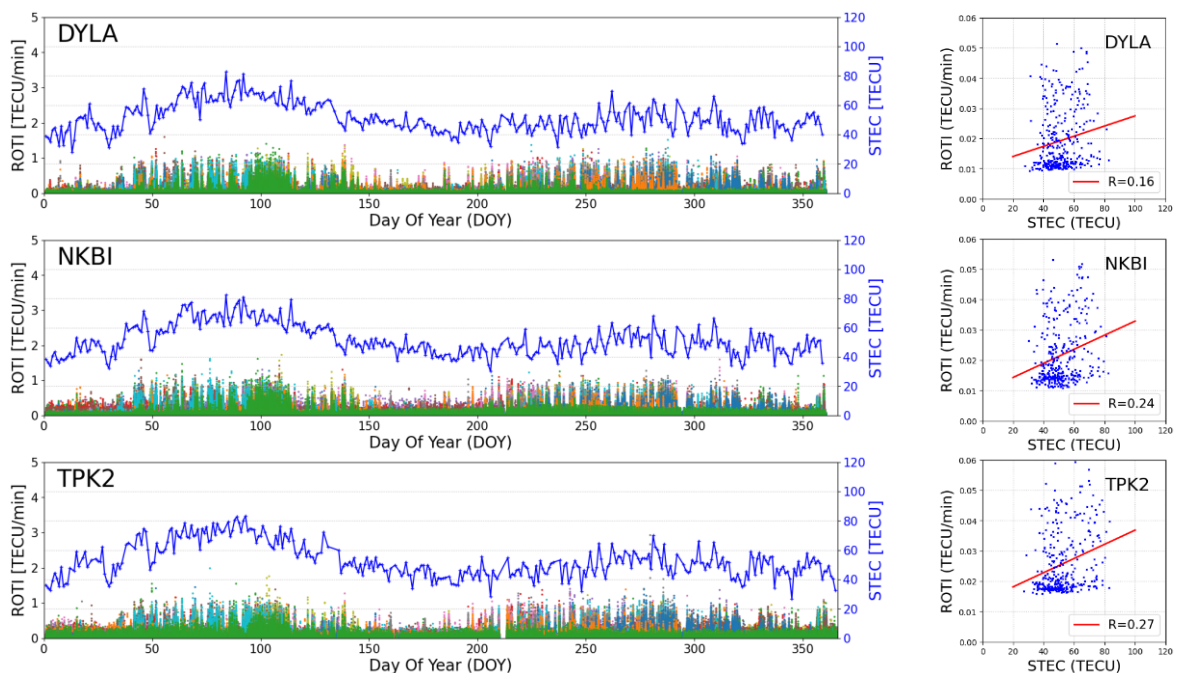
รูปที่ 4 อนุกรมเวลาของค่า STEC และ ROTI บริเวณภาคเหนือ (DCRI, DPLK, และ LNaN) เส้นสีน้ำเงินคือค่าเฉลี่ย STEC และจุดแต่ละสีคือค่า ROTI รายวันของดาวเทียม GPS ทั้ง 32 ดวง (ซ้าย) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ STEC และ ROTI (ขวา)



รูปที่ 5 อนุกรมเวลาของค่า STEC และ ROTI บริเวณภาคกลาง (LPBI, MKRI, และ PCCO) เส้นสีน้ำเงินคือค่าเฉลี่ย STEC และจุดแต่ละสีคือค่า ROTI รายวันของดาวเทียม GPS ทั้ง 32 ดวง (ซ้าย) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ STEC และ ROTI (ขวา)

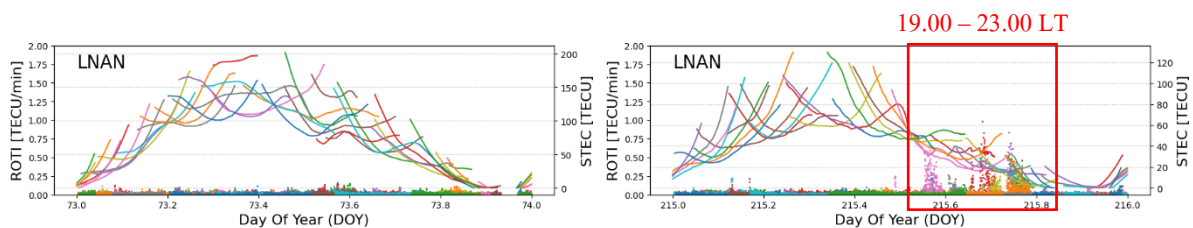


รูปที่ 6 อนุกรมเวลาของค่า STEC และ ROTI บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (AKSN, DSSK, และ LLEI) เส้นสีน้ำเงินคือค่าเฉลี่ย STEC และจุดแต่ละสีคือค่า ROTI รายวันของดาวเทียม GPS ทั้ง 32 ดวง (ซ้าย) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ STEC และ ROTI (ขวา)

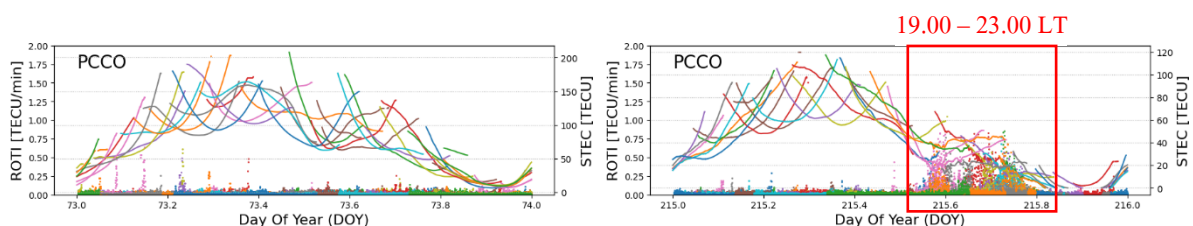


รูปที่ 7 อนุกรมเวลาของค่า STEC และ ROTI บริเวณภาคใต้ (DYLA, NKBI, และ TPK2) เส้นสีน้ำเงินคือค่าเฉลี่ย STEC และจุดแต่ละสีคือค่า ROTI รายวันของดาวเทียม GPS ทั้ง 32 ดวง (ซ้าย) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ STEC และ ROTI (ขวา)

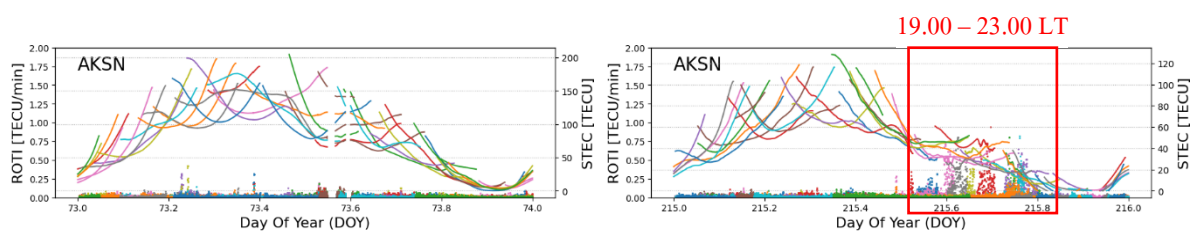
เมื่อพิจารณาค่า STEC และ ROTI ในระดับรายวันของสถานี CORS ทั้ง 4 ภูมิภาค (LNN, PCCO, AKSN และ DYLA) พบความสัมพันธ์ที่น่าสนใจระหว่างค่าเฉลี่ย STEC และความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะในวันที่ 14 มีนาคม 2566 (DOY 73) ซึ่งสถานีทั้ง 4 แห่งมีค่าเฉลี่ย STEC สูง แต่กลับไม่พบความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ชัดเจน ในขณะที่วันที่ 3 สิงหาคม 2566 (DOY 215) สถานีเหล่านี้มีค่าเฉลี่ย STEC ต่ำ แต่พบความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในระดับปานกลางระหว่างเวลา 12.00-16.00 UTC หรือ 19.00-23.00 น. ตามเวลาประเทศไทย แสดงในรูปที่ 8-11 สอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาที่ศึกษาเกี่ยวกับค่า TEC ในประเทศไทยในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 24 พบความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เชิงพื้นที่ทั่วประเทศในช่วงเวลากลางคืน [5] แม้จะพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างค่าเฉลี่ย STEC และ ROTI ในระดับเดือน แต่ในระดับรายวัน ความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจไม่ชัดเจนเสมอไป ปัจจัยอื่น ๆ เช่น กิจกรรมของสุริยะ เวลา ฤดูกาล และปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอื่น ๆ อาจมีอิทธิพลต่อการเกิดความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ร่วมด้วย ซึ่งความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้เป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งานระบบ GNSS [2] ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ NRTK ในประเทศไทยระหว่างเส้นฐาน 10-80 กิโลเมตร ผลการทดสอบพบว่า ยิ่งระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรมากขึ้น ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งยิ่งลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่มีความแปรปรวนของไอโอโนสเฟียร์สูง แม้จะใช้ระยะห่างน้อยที่สุดที่ 10-20 กิโลเมตร ก็ยังไม่สามารถคำนวณหาเลขปริศนา (Fixed Ambiguity) ได้อย่างสม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่าความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ NRTK ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคของการรังวัดด้วย GNSS



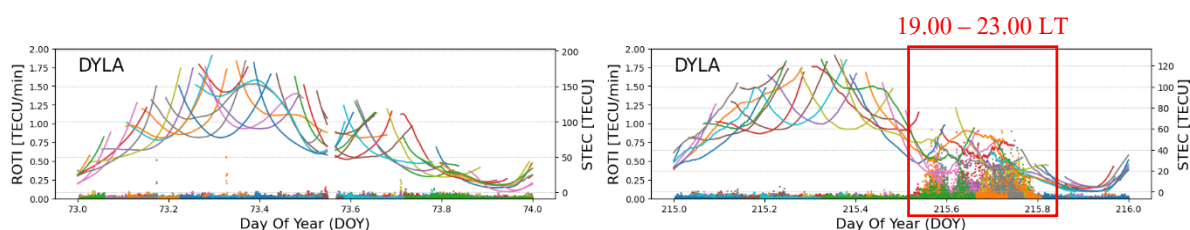
รูปที่ 8 สถานี LNN ในภาคเหนือ วันที่ 14 มีนาคม 2566 (DOY 73) ค่าเฉลี่ย STEC สูง ค่า ROTI ไม่พบความแปรปรวน (ซ้าย)
วันที่ 3 สิงหาคม 2566 (DOY 215) ค่าเฉลี่ย STEC ต่ำ ค่า ROTI เกิดความแปรปรวนในช่วงเวลา 19.00-23.00 LT (ขวา)



รูปที่ 9 สถานี PCCO ในภาคกลาง วันที่ 14 มีนาคม 2566 (DOY 73) ค่าเฉลี่ย STEC สูง ค่า ROTI ไม่พบความแปรปรวน (ซ้าย)
วันที่ 3 สิงหาคม 2566 (DOY 215) ค่าเฉลี่ย STEC ต่ำ ค่า ROTI เกิดความแปรปรวนในช่วงเวลา 19.00-23.00 LT (ขวา)



รูปที่ 10 สถานี AKSN ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ วันที่ 14 มีนาคม 2566 (DOY 73) ค่าเฉลี่ย STEC สูง ค่า ROTI ไม่พบความแปรปรวน (ซ้าย) วันที่ 3 สิงหาคม 2566 (DOY 215) ค่าเฉลี่ย STEC ต่ำ ค่า ROTI เกิดความแปรปรวนในช่วงเวลา 19.00-23.00 LT (ขวา)



รูปที่ 11 สถานี DYLA ในภาคใต้ วันที่ 14 มีนาคม 2566 (DOY 73) ค่าเฉลี่ย STEC สูง ค่า ROTI ไม่พบความแปรปรวน (ซ้าย) วันที่ 3 สิงหาคม 2566 (DOY 215) ค่าเฉลี่ย STEC ต่ำ ค่า ROTI เกิดความแปรปรวนในช่วงเวลา 19.00-23.00 LT (ขวา)

เมื่อนำข้อมูล ROTI ทั้งหมดที่ได้จำแนกประเภทความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามระดับความรุนแรง มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า อัตราการเกิดความแปรปรวนระดับน้อยมีปริมาณเฉลี่ยสูงที่สุดในพื้นที่ภาคใต้ 87.89% ตามด้วยภาคกลาง 86.04% ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 84.90% และภาคเหนือ 83.82% อัตราการเกิดความแปรปรวนระดับปานกลางพบว่ามีปริมาณเฉลี่ยสูงที่สุดในพื้นที่ภาคเหนือ 15.41% ตามด้วยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 14.57% ภาคกลาง 13.67% และภาคใต้ 11.95% และอัตราการเกิดความแปรปรวนระดับสูงพบว่ามีปริมาณเฉลี่ยสูงที่สุดในพื้นที่ภาคเหนือ 0.77% ตามด้วยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 0.53% ภาคกลาง 0.29% และภาคใต้ 0.16%

ตารางที่ 3 อัตราการเกิด ROTI หน่วยเป็น % ของสถานีศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จำนวน 12 สถานี โดยจำแนกเป็น ความแปรปรวนน้อย ความแปรปรวนปานกลาง และความแปรปรวนสูง

ชื่อ สถานี	ภูมิภาค	ความแปรปรวน น้อย (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	ความ แปรปรวนปาน กลาง (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	ความแปรปรวน สูง (%)	ค่าเฉลี่ย (%)
DCRI	เหนือ	83.02	83.82	16.00	15.41	0.98	0.77
DPLK		84.72		14.70		0.58	
LNAN		83.73		15.53		0.74	
LPBI	กลาง	86.51	86.04	13.24	13.67	0.25	0.29
MKRI		85.52		14.12		0.36	
PCCO		86.08		13.64		0.28	

ชื่อ สถานี	ภูมิภาค	ความแปรปรวน น้อย (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	ความ แปรปรวนปาน กลาง (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	ความแปรปรวน สูง (%)	ค่าเฉลี่ย (%)
AKSN	ตะวันออกเฉียงเหนือ	84.55	84.90	14.82	14.57	0.63	0.53
DSSK		85.64		13.98		0.38	
LLEI		84.50		14.90		0.60	
DYLA	ใต้	88.24	87.89	11.64	11.95	0.12	0.16
NKBI		87.85		12.00		0.15	
TPK2		87.59		12.22		0.19	

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในประเทศไทย ใช้ข้อมูล GNSS ปี 2566 จากสถานี CORS ของกรมแผนที่ทหาร จำนวน 12 สถานี จากทั้งหมด 80 สถานีทั่วประเทศ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่แตกต่างกันไปตามภูมิภาค วัน เวลา และฤดูกาล สรุปได้ดังนี้

ฤดูกาลมีผลต่อค่า STEC อย่างชัดเจน ในช่วงฤดูร้อนคือกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคมจะพบค่าเฉลี่ย STEC สูง โดยที่เดือนมีนาคมจะมีค่าเฉลี่ย STEC สูงที่สุดคือ 79 TECU ในบริเวณภาคเหนือ ในช่วงฤดูฝนคือกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคมจะพบค่าเฉลี่ย STEC ต่ำ โดยที่เดือนกรกฎาคมจะมีค่าเฉลี่ย STEC ต่ำที่สุดคือ 36 TECU ในบริเวณภาคเหนือเช่นกัน ในขณะที่ช่วงฤดูหนาวคือกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ค่าเฉลี่ย STEC อยู่ในระดับปานกลางคือ ประมาณ 42-67 TECU

ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในประเทศไทยนอกจากจะขึ้นอยู่กับภูมิภาคแล้ว ยังมีความสัมพันธ์กับฤดูกาล โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนซึ่งตรงกับช่วงวิษุวัตหรือ equinox คือเดือนมีนาคม (March equinox) และเดือนกันยายน (September equinox) เป็นช่วงที่มีความแปรปรวนสูงสุดคือ $ROTI > 1$ โดยเกิดขึ้นมากที่สุดที่ภาคเหนือ 0.77% ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 0.53% ภาคกลาง 0.29% และภาคใต้ 0.16% นอกจากนี้อัตราการเกิดความแปรปรวนระดับปานกลางคือ $0.5 \leq ROTI < 1$ เกิดขึ้นเดือนตุลาคมถึงธันวาคมในทุกภูมิภาคโดยพบมากที่สุดคือภาคเหนือ ในขณะที่การเกิดความแปรปรวนระดับน้อยคือ $0.25 \leq ROTI < 0.5$ เกิดขึ้นช่วงเดือนมกราคม เดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน ในทุกภูมิภาคของประเทศ ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง STEC และ ROTI โดยส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับปานกลางถึงสูงในระดับเดือน แต่เมื่อพิจารณาเป็นรายภูมิภาคจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความแตกต่างกัน โดยภาคเหนือมีค่าสูงสุด รองลงมาคือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง ส่วนภาคใต้มีค่าต่ำสุด สุดท้ายเมื่อพิจารณาค่า STEC และ ROTI ในระดับรายวัน พบว่าความสัมพันธ์เชิงบวกที่คาดการณ์ไว้อาจไม่สอดคล้องกันในช่วงเวลา โดยเฉพาะในวันที่ 3 สิงหาคม 2566 ค่าเฉลี่ย STEC ต่ำ แต่กลับพบความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในระดับปานกลางทั่วทุกภูมิภาคในช่วงเวลา 19.00-23.00 น.

ตามเวลาประเทศไทย ทั้งนี้ นอกจากฤดูกาลและภูมิภาคแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น กิจกรรมของสุริยะ และปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอื่นๆ อาจมีอิทธิพลต่อการเกิดความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

4.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาความแปรปรวนของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในประเทศไทยอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากปรากฏการณ์ Solar Maximum ของ Solar cycle 25 กำลังจะเกิดขึ้นในปี 2568 เป็นปรากฏการณ์ที่มีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณดาวเทียม GNSS ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะทำให้เกิดพายุแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสัญญาณดาวเทียมที่ส่งผ่านในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากกว่าช่วงเวลาปกติ

จากผลลัพธ์ของการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลของกิจกรรมของสุริยะเพื่อคัดเลือกช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบ GNSS ได้อย่างตรงจุด ซึ่งจะประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ กรมแผนที่ทหาร ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล GNSS ปี 2566 ในการนำข้อมูลมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณทีมงานเบื้องหลังงานวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ เจริญผล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ทางทฤษฎีเทคนิคในการจัดการข้อมูลและการประมวลผลข้อมูลที่มีจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Musa, T., Residual Analysis of Atmospheric Delay in Low Latitude Region Using Network-Based GPS Positioning. Ph.D. Thesis, The University of New South Wales, Australia, 2007
- [2] Teeratat, B. Ch. – Chalermchon, S. - Hung-Kyu, L. - Yoon-Soo, Ch.: Performance of Network-Based RTK GPS in Low Latitude Region: A Case Study in Thailand, Engineering Journal, Vol. 16 Issue 5, pp.95-103, 2012. Available from: DOI:10.4186/ej.2012.16.5.95. [Accessed 21 October 2024].
- [3] Pi, X., Mannucci, A. J., Lindqwister, U. J., & Ho, C. M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network. Geophysical Research Letters, 1997, 24(18), 2283-2286. Available from: <https://doi.org/10.1029/97GL02273> [Accessed 21 October 2024].
- [4] Liu, J.Y.; Shih-An, W. Global observations of ROTI by using ground-based GNSS receivers. TAO Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2021, 32,5. Available from: 10.3319/TAO.2021.07.26.03 [Accessed 21 October 2024].
- [5] Jaimun, S., et al., Variations of total electron content in Thailand during January 2009 – December 2012, 2013, Available from: <http://doi.org/10.14457/CU.the.2013.1166> [Accessed 21 October 2024].

- [6] Abdullah, M.; Bahari S. A. & Yatim, B. (2008). TEC determination over single GPS receiver station using PPP technique, International Symposium on GPS/GNSS 2008, November 11-14,2008 Tokyo.
- [7] Misra, P. a. P. E. Global Positioning System (GPS): Signals, Measurements, 2012.
- [8] Seemala, G.K.; Valladares, C.E. Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008. Radio Sci. 2011. Available from: <https://doi.org/10.1029/2011RS004722> [Accessed 21 October 2024].
- [9] Vankadara, R. K., Panda, S. K., Amory-Mazaudier, C., Fleury, R., Devanaboyina, V.R., Pant, T. K., et al. Signatures of equatorial plasma bubbles and ionospheric scintillations from magnetometer and GNSS observations in the Indian longitudes during the space weather events of early September 2017. Remote Sens., 2022 14 (3), 652. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs14030652> [Accessed 21 October 2024].
- [10] Liu, X., Yuan, Y., Tan, B., & Li, M. Observational Analysis of Variation Characteristics of GPS-Based TEC Fluctuation over China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5, 237. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijgi5120237> [Accessed 21 October 2024].
- [11] D. A. De Vaus, Survey in Social Research 5th Edition (New South Wales: Allen and Unwin), 2002.