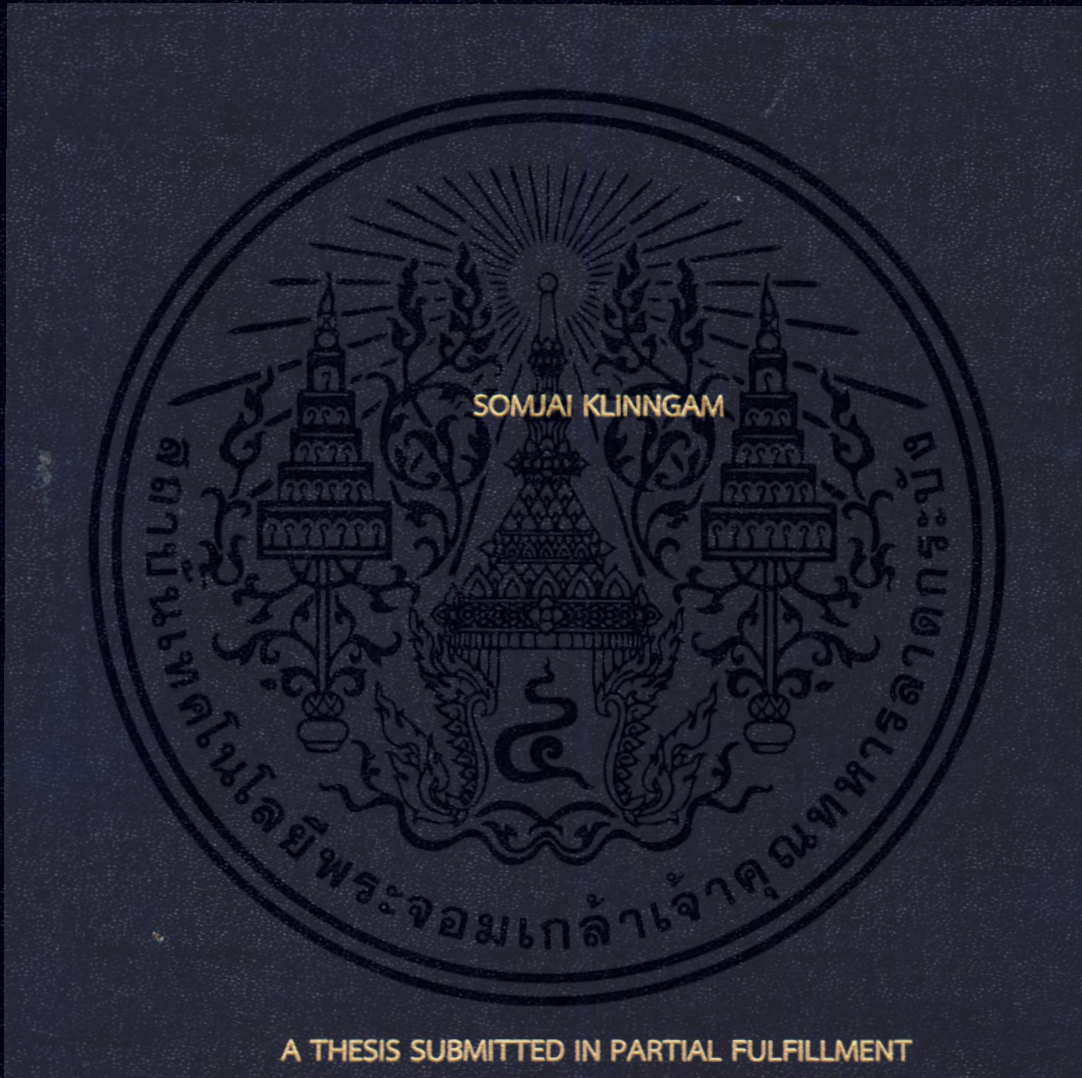


ADJUSTED SPHERICAL HARMONIC MODEL AND DATA AGGREGATION FOR
IONOSPHERIC VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT MAP OVER THAILAND



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-EN-D-018-126

ADJUSTED SPHERICAL HARMONIC MODEL AND DATA AGGREGATION FOR
IONOSPHERIC VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT MAP OVER THAILAND



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-D-018-126



COPYRIGHT 2018

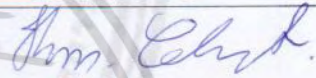


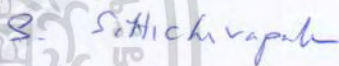

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THESIS CERTIFICATION
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

Thesis Title Adjusted Spherical Harmonic Model and Data Aggregation for Ionospheric Vertical Total Electron Content Map over Thailand
Student Mrs. Somjai Klinngam
Student Id. 55610127
Degree Doctor of Engineering
Program Electrical Engineering
Thesis Advisor Prof. Dr.Pornchai Supnithi
Thesis Reference Number KMITL-2018-EN-D-018-126

EXAMINERS		SIGNATURES
Prof. Dr. Kosin Chamnongthai		
Asst. Prof. Dr.Tulaya Limpiti		
Asst. Prof. Dr. Somkiat Lerkvaranyu		
Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichivapak		
Prof. Dr. Pornchai Supnithi		

Date 25th July 2018 **Time** 02:00-04:00 PM

Place Building A , 5th Floor Conference room no.4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(Assoc. Prof. Dr. Komsan Maleesee)
Dean, Faculty of Engineering
25th July 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยด้วยวิธีการผสมข้อมูลและแบบจำลองฮาร์โมนิกทรงกลม
นักศึกษา	นางสมใจ กลิ่นงาม
รหัสประจำตัว	55610127
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ

บทคัดย่อ

ระบบดาวเทียมนำร่องและการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณประเทศไทยที่ตั้งอยู่ในเขตละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ซึ่งปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณนี้จะมีค่าแปรปรวนสูง โดยทั่วไปในการศึกษาคุณลักษณะและความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะนิยมศึกษาจากแผนที่สองมิติของค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ และถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีแบบจำลองมาตรฐานสากลจำนวนมากที่สามารถประมาณการและจำลองแผนที่ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ของทั่วโลกหรือของบริเวณภูมิภาคใดๆ ได้ แต่เพื่อให้การศึกษาคุณลักษณะและความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยมีความละเอียดและถูกต้องมากขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งในประเทศไทยด้วยแบบจำลองฮาร์โมนิกทรงกลม และการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยด้วยวิธีการผสมข้อมูลระหว่างค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งที่ตรวจวัดได้จากสถานีจีพีเอสที่ติดตั้งในประเทศไทยกับค่าประมาณการปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งของแบบจำลอง IRI-2012 พร้อมทั้งนำเสนอ Latitude-dependent factor (LDF) ซึ่งเป็นแฟคเตอร์ที่ใช้สำหรับปรับลดค่าความแตกต่างของค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งที่แบบจำลอง IRI-2012 ประมาณการได้ในแต่ละแนวละติจูดก่อนที่จะทำการผสมข้อมูล ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้แผนที่ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยนั้นถูกสร้างขึ้นอยู่ในช่วงละติจูดที่ 0 ถึง 25 องศาเหนือ และช่วงลองจิจูดที่ 95 ถึง 110 องศาตะวันออก โดยมีขนาดของกริดเท่ากับ 2 องศาในแนวละติจูด และ 5 องศาในแนวลองจิจูด และทำการสร้างแผนที่ทุกๆ 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฮาร์โมนิกทรงกลมที่มีค่าดีกรีสูงสุดเท่ากับ 3 สามารถช่วยคำนวณค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งในตำแหน่งที่ต้องการในบริเวณประเทศไทยได้ และในส่วนของ การสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งด้วยวิธีการผสมข้อมูลนั้น พบว่าแผนที่สามารถแสดงคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยได้ โดยแผนที่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตาม ช่วงเวลา วัน ฤดูกาล ปี วัฏจักรสุริยะ และตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด และเมื่อมีการนำแฟคเตอร์ LDF มาช่วยในการปรับค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งที่แบบจำลอง IRI-2012 ประมาณการได้ ก่อนที่จะทำการผสมข้อมูล พบว่าค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แนวตั้งของแบบจำลอง IRI-2012 ได้ถูกปรับลดลงมากที่สุดประมาณ 13 TECU ในช่วงเวลากลางวันของฤดูมีนาคมอิควินอกซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Adjusted Spherical Harmonic Model and Data Aggregation for Ionospheric Vertical Total Electron Content Map over Thailand
Student	Mrs. Somjai Klinngam
Student Id.	55610127
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Prof. Dr. Pornchai Supnithi

ABSTRACT

The satellite navigation and high frequency (HF) communications through the ionosphere are generally impacted by the ionospheric irregularities, particularly when the signal is transmitted over Thailand, which is located in the low latitude region and near the magnetic equator known as the equatorial ionization anomaly (EIA) region. Because the electron density in the EIA region is relatively more fluctuated, the two-dimension (2D) map of ionospheric total electron content (TEC) is a useful tool for studying the ionospheric characteristics and irregularities. Although numerous international ionospheric models can produce the global and regional TEC maps, the regional TEC map based on local observation is indispensable since it can give a more effective VTEC map in regional scale. Therefore, this thesis implements an adjusted spherical harmonic model (ASHM) to calculate the vertical TEC (VTEC) at the desired locations in Thailand. Furthermore, this thesis constructs the VTEC map of Thailand using the data aggregation between the observed VTEC at global positioning system (GPS) stations and the estimated VTEC of the IRI-2012 model. In addition, this thesis proposes the latitude-dependent factor (LDF), which is the median proportion between GPS VTEC and IRI VTEC on the same latitude band for discrepancy adjustment. The range of Thailand map is defined as 0° – 25° N in latitude and 95° – 110° E in longitude. The VTEC map is produced every 2 hours with the spatial resolutions of 2.5° and 5° in latitude and longitude, respectively. The results show that the coefficients of the ASHM with the maximum degree of three can calculate the VTEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

at desired locations in Thailand. For the VTEC map of Thailand, the aggregated VTEC maps properly exhibit the ionospheric characteristics over Thailand that the VTEC level depends on the time, day, season, year and solar cycle and location. Moreover, the proposed LDF can adjust the estimated VTEC of IRI-2012 model at the maximum VTEC value of about 13 TECU during daytime in March equinox.



ACKNOWLEDGEMENTS

Firstly, I would like to express my greatest gratitude to my advisor, Prof. Dr. Pornchai Supnithi for his precious guidance and kindness over many years. Not only he suggests and supports me about the study and the research work, he always motivates and gives me the valuable advices and attitudes.

In addition, I would like to thank all members of Space & Atmospheric Communication and Informatics Research Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) for their friendships and supports.

Besides, I would like to thank the National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan for the technical supports and the SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network (SEALION) data, the International Reference Ionosphere (IRI) committee for the IRI-2012 data, and the Town Planning Engineering Bureau Department of Public Works and Towns and Country Planning (DPT), Thailand, for the global positioning system (GPS) data.

The financial support of my study is the scholarship of the Ministry of Science and Technology of Thailand (MOST), Thailand together with the approval of my university, Phranakhon Rajabhat University.

Finally, I would like to express my sincere thanks to my lovely family for their encouragement and supports.

Somjai Klinngam

TABLE OF CONTENTS

	Page
Abstract (Thai).....	I
Abstract (English).....	III
Acknowledgements.....	V
Table of Contents.....	VI
List of Tables.....	IX
List of Figures.....	X
Chapter 1 INTRODUCTION	
1.1 Background and motivation.....	1
1.2 Objectives of thesis.....	2
1.3 Scope of thesis.....	2
1.4 Thesis outline.....	3
Chapter 2 IONOSPHERIC OBSERVATION	
2.1 Ionosphere.....	4
2.2 Ionospheric observation.....	5
2.3 Ionospheric parameter.....	9
2.4 Equatorial spread-F.....	11
Chapter 3 IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) MODEL	
3.1 Total electron content (TEC).....	15
3.2 Ionospheric delay.....	17
3.3 Rate of TEC change index.....	18
3.4 International TEC model.....	19
3.4.1 MIT Automated Processing of GPS (MAPGPS).....	19
3.4.2 Space Weather Service (SWS).....	20
3.4.3 Dense Regional and Worldwide International GNSS-TEC Observation (DRAWING-TEC).....	21
3.4.4 European Space Agency (ESA).....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE OF CONTENTS (cont.)

	Page
3.4.5 Jet Propulsions Laboratory (JPL).....	23
3.4.6 Center for Orbit Determination Europe (CODE).....	24
3.4.7 International Reference Ionosphere (IRI) model.....	26
Chapter 4 ADJUSTED SPHERICAL HARMONIC MODEL	
4.1 Adjusted spherical harmonic model.....	28
4.2 Least square method.....	32
4.3 Bounding the estimated error.....	37
4.4 VTEC calculation by ASHM.....	40
Chapter 5 LATITUDE-DEPENDENT FACTOR	
5.1 Latitude-dependent factor.....	43
5.2 VTEC grid of Thailand.....	44
5.3 Observational data.....	47
5.4 IGS VTEC map of Thailand.....	49
5.5 IRI VTEC map of Thailand.....	52
5.6 Comparison of VTEC map of Thailand.....	56
5.7 Aggregated VTEC map of Thailand.....	58
Chapter 6 VTEC MAP OF THAILAND	
6.1 VTEC data.....	63
6.2 Comparison between the GPS VTEC and IRI VTEC.....	65
6.3 Observed VTEC.....	69
6.4 Median VTEC map.....	72
6.5 IRI-2012 VTEC map.....	74
6.6 Aggregated VTEC map.....	77
6.7 Validation of VTEC aggregation.....	83

TABLE OF CONTENTS (cont.)

	Page
Chapter 7 CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS	
7.1 Conclusions.....	85
7.2 Suggestions for future works.....	86
List of References.....	87
List of Publications.....	92
Author Biography.....	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIST OF TABLES

Table	Page
2.1 Parameter of ionosonde system.....	7
4.1 Location of the DPT stations in Thailand.....	36
5.1 Observational periods and times.....	48
6.1 Location of the GPS stations in Thailand.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIST OF FIGURES

Figure	Page
2.1 Ionospheric effects on radio applications	5
2.2 Ionosonde stations at (a) Chumphon station and (b) Chiangmai station.....	6
2.3 Observation sites and methods of SEALION project.....	7
2.4 Ionosonde observation at Chumphon station.....	8
2.5 Ionospheric observation technique.....	9
2.6 Schematic illustration of ionogram and ionospheric parameters	10
2.7 Sample of ionograms recorded in (a) daytime: March 25, 2009 and (b) nighttime : September 1, 2008.....	10
2.8 Equatorial ionization anomaly (EIA).....	12
2.9 Multiple reflection of radio wave signal in ionosphere is recorded as the diffused trace on the ionogram as spread-F phenomenon.....	13
2.10 examples of ionograms showing (a) FSF trace (b) RSF trace and (c) MSF trace....	13
2.11 Location of the Chiangmai, Chumphon and Kototabang stations.....	14
2.12 Ionogram data availability at Chiangmai (CMU), Chumphon (CPN) and Kototabang (KTB) stations from September 2008 to April 2009.....	14
2.14 Monthly mean percentage of RSF occurrence from September 2008 to April 2009 at (a) CMU station, (b) CPN station and (c) KTB station.....	15
2.15 Same as figure 2.14 but for FSF occurrence.....	16
2.16 Same as figure 2.14 but for MSF occurrence.....	16
3.1 Total electron content (TEC).....	18
3.2 Single layer model (SLM).....	19
3.3 Ionospheric delay time.....	20
3.4 ROTI at KMITL on (a) quiet day: July 8, 2012 and (b) disturbance day: September 1, 2012.....	21
3.5 GPS TEC map of MIT Automated Processing of GPS (MAPGPS) on October 29, 2003 at 21.20UT.....	22
3.6 Global TEC map by SWS on June 12, 2018 at 13.02UT.....	23
3.7 Regional TEC map by SWS on June 12, 2018 at 13.00UT.....	23

LIST OF FIGURES (cont.)

Figure	Page
3.8 Global TEC map of DRAWING-TEC on September 26, 2011 at 21UT.....	24
3.9 Regional TEC map of DRAWING-TEC on September 26, 2011 at 21UT for (a) Europe (b) Japan and (c) North America.....	24
3.10 Forecast of TEC by ESA on June 12, 2018 at 10.30UT.....	25
3.11 Global map by JPL on June 26, 2018 at 15.50UT.....	26
3.12 International GNSS Service (IGS) Tracking Network.....	27
3.13 IONEX file on July 8, 2012 (DOY190).....	27
3.14 Global VTEC map by CODE on June 29, 2012 (DOY181) at 10UT.....	28
3.15 IRI-2012 model website for online access.....	29
4.1 Flow chart of ASHM.....	35
4.2 Observation at KMIT station on July 8, 2012 (a) STEC (b) VTEC (c) IPP latitude (d) IPP longitude.....	36
4.3 Median VTEC at KMIT station on July 8, 2012.....	37
4.4 Location of 11 GPS stations of DPT.....	38
4.5 VTEC on July 8, 2012 at 15.00 LT (a) OBS VTEC, (b) EST VTEC at the desired IPP#1 (c) EST VTEC at the desired IPP#2 and (d) ALL VTEC.....	39
4.6 GPS VTEC (blue line) and EST VTEC (red line) by ASHM with the maximum degree of 5, 7, 9, 11, 13 and 15.....	40
4.7 Hourly median, maximum, minimum, peak-to-peak and number of GPS VTEC recorded at 12 stations on July 8, 2012.....	40
4.8 Error boundary for VTEC calculation by ASHM.....	41
4.9 GPS VTEC (blue line) and ESB VTEC (black line) by ASHM with the maximum degree of 5, 7, 9, 11, 13 and 15.....	41
4.10 GPS VTEC, EST VTEC and ESB VTEC on July 8, 2012, 15LT.....	42
4.11 GPS VTEC and EST VTEC at 4 desired locations.....	43
4.12 ALL VTEC, ESG VTEC and ESG VTEC map on July 8, 2012, 15LT.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIST OF FIGURES (cont.)

Figure	Page
4.13 ESG VTEC map comparison between the spatial resolution of (a) $2.5^\circ \times 5^\circ$ (b) $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (c) $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ and (d) $1^\circ \times 1^\circ$	44
5.1 Flow chart of proposed methodology for regional VTEC map.....	46
5.2 Thailand with (a) geographic area (b) grids with a spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively.....	47
5.3 OBS VTEC from 12 stations over Thailand on July 8, 2012 in (a) daytime (11LT), (b) before sunset (17LT), (c) night time (23LT) and (d) before sunrise (05LT).....	49
5.4 VTEC from 12 stations in Thailand on July 8, 2012 at 15LT (a) OBS VTEC, (b) MED VTEC and (c) MED VTEC map.....	50
5.5 Regional VTEC map over Thailand by CODE on July 8, 2012 (DOY190) at 10UT....	51
5.6 Global Ionospheric Maps (GIMs) by CODE on July 8, 2012 (DOY190) at every 2 hours.....	52
5.7 IGS VTEC on July 8, 2012 at 15.00LT (a) IGS VTEC (b) IGS VTEC map.....	52
5.8 IGS VTEC maps over Thailand region on July 8, 2012 at every 2 hours.....	53
5.9 Comparison between the estimated VTEC of the IRI-2012 model and the observed VTEC at 12 stations in Thailand on July 8, 2012.....	54
5.10 Monthly median VTEC estimation by IRI-2012 model on July 8, 2012.....	55
5.11 IRI VTEC on July 8, 2012 at 15.00 LT (a) IRI VTEC (b) IRI VTEC map.....	55
5.12 IRI VTEC maps over Thailand region on July 8, 2012 at every 2 hours.....	56
5.13 VTEC and 2D map comparison on July 8, 2012 at 15.00 LT between (a) MED VTEC, (b) IRI VTEC and (c) IGS VTEC.....	57
5.14 Comparison between the MED VTEC, IRI VTEC and IGS VTEC on July 8, 2012 at 15LT.....	58
5.15 Same as Figure 5.14 but for (a) 11LT, (b) 17LT, (c) 23LT and (d) 05LT.....	58
5.16 Data aggregation between MED VTEC and IRI VTEC with the LDF on July 8, 2012 at 15LT.....	59

LIST OF FIGURES (cont.)

Figure	Page
5.17 Same as Figure 5.16 but without the LDF.....	60
5.18 Data aggregation between MED VTEC and IGS VTEC with the LDF on July 8, 2012 at 15LT.....	60
5.19 Same as Figure 5.18 but without the LDF.....	61
5.20 Data aggregation between MED VTEC and IRI VTEC with the LDF on July 8, 2012 at every 2 hours.....	62
5.21 Data aggregation between MED VTEC and IGS VTEC with the LDF on July 8, 2012 at every 2 hours.....	63
6.1 Location of the 10 GPS stations.....	64
6.2 Observation at DPT9 station on February 9, 2016 (a) IPP latitude, (b) IPP longitude, (c) GPS VTEC and (d) median GPS VTEC.....	66
6.3 Comparison between the estimated VTEC of the IRI-2012 model (red) and the median observed VTEC (blue) at DPT9 station in (a) December solstice, (b) March equinox, (c) June solstice and (d) September equinox.....	68
6.4 VTEC estimation of the IRI-2012 model for CHMA (blue), DPT9 (red) and SOKA (black) stations in (a) December solstice, (b) March equinox, (c) June solstice and (d) September equinox.....	69
6.5 VTEC estimation of the IRI-2012 model for grid at latitude of 0°, 12.5° and 25°, and longitude of 95°, 100°, 105° and 110°.....	70
6.6 OBS VTEC over Thailand in December solstice with the temporal of 2 hours.....	71
6.7 Same as Figure 6.6 but for March equinox.....	71
6.8 Same as Figure 6.6 but for June solstice.....	72
6.9 Same as Figure 6.6 but for September equinox.....	72
6.10 MED VTEC map over Thailand in December solstice.....	73
6.11 Same as Figure 6.10 but for March equinox.....	74
6.12 Same as Figure 6.10 but for June solstice.....	74

LIST OF FIGURES (cont.)

Figure	Page
6.13 Same as Figure 6.10 but for September equinox.....	75
6.14 IRI VTEC map over Thailand in December solstice.....	76
6.15 Same as Figure 6.14 but for March equinox.....	76
6.16 Same as Figure 6.14 but for June solstice.....	77
6.17 Same as Figure 6.14 but for September equinox.....	77
6.18 VTEC map comparison between MED VTEC (first row), IRI VTEC (second row) and AGG VTEC (third row) during daytime (11LT), before sunset (17LT), night time (23LT) and before sunrise (05LT) in December solstice.....	79
6.19 Same as Figure 6.18 but for March equinox.....	80
6.20 Same as Figure 6.18 but for June solstice.....	80
6.21 Same as Figure 6.18 but for September equinox.....	81
6.22 AGG VTEC map over Thailand in December solstice at every 2 hours and the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively.....	82
6.23 Same as Figure 6.22 but for March equinox.....	82
6.24 Same as Figure 6.22 but for June solstice.....	83
6.25 Same as Figure 6.22 but for September equinox.....	83
6.26 Regional map over Thailand in 4 seasons: December solstice (first row), March equinox (second row), June solstice (third row) and September equinox (fourth row) in daytime (11LT), before sunset (17LT), night time (23LT) and before sunrise (05LT).....	85
6.27 Comparison between MED VTEC, IRI VTEC and IRF VTEC in March equinox during (a) daytime, (b) before sunset, (c) night time and (d) before sunrise.....	86
6.28 Mean different between MED VTEC and IRI VTEC (blue line) and between MED VTEC and AGG VTEC (red line) in (a) December solstice, (b) March equinox, (c) June solstice and (d) September equinox.....	87

CHAPTER 1

INTRODUCTION

1.1 Background and motivation

The Global Navigation Satellite System (GNSS) refers to a collection of navigation of a satellite system, which are currently in operation such as the Global Positioning System (GPS), the Global Navigation Satellite System (GLONASS), the GALILEO. At present, the GNSS is extensively used and applied in various applications: land surveying, precision farming, vehicle tracking, aeronautical navigation. However, the GNSS and high frequency (HF) radio wave communications are generally impacted by the ionospheric effects such as radio absorption, interference, scintillation and propagation delay since the ionosphere is a dispersive medium. The electron density in ionosphere is fluctuated, especially in the low latitude region and near the magnetic equator called the equatorial ionization anomaly (EIA) region (Kelly, 2009; Appleton, 1946). Therefore, the total electron content (TEC) should be studied because it is an important ionospheric parameter which can demonstrate the ionospheric characteristics and behaviors.

Since Thailand is in the EIA region, the influence of ionosphere affects the satellite and radio wave communications over the region. Besides, the sparse GPS sites cause the destitute data for ionosphere investigation in Thailand. Although there are several international global models which can estimate the TEC values at anytime and anywhere around the world, the estimation performance of these models in regional scale should be improved, especially the estimation for the EIA region such as Thailand. The regional TEC observation is indispensable for studying the regional ionospheric variation and aggregating with estimated TEC of the international models for expanding the regional TEC map.

1.2 Objectives of thesis

1. To calculate the VTEC in Thailand by the adjusted spherical harmonic model (ASHM).
2. To develop the two-dimensional (2D) map of vertical total electron content (VTEC) over Thailand using the data aggregation technique with the proposed latitude-dependent factor (LDF).

1.3 Scope of thesis

This thesis presents the study about the ionospheric characteristics over Thailand using the ionospheric vertical total electron content (VTEC) observation on the quiet days during the periods of low and moderate solar activity in four seasons: December solstice, March equinox, June solstice and September equinox. The range of Thailand area is defined as 0° – 25° N in latitude and 95° – 110° E in longitude. The VTEC map is developed with the temporal resolution of 2 hours and the spatial resolution of 2.5° x 5° in the latitude and longitude, respectively.

Furthermore, in the case that there is no observed GPS data for ionospheric investigation, the adjusted spherical harmonic model (ASHM) with the maximum degree of three is used to calculate the VTEC at the desired locations over Thailand.

Besides, the estimated VTEC of the International Reference Ionosphere (IRI) model, version 2012, is used to compare and ingest to the observed VTEC for expanding the VTEC map of Thailand to cover some areas of adjacent countries including Myanmar, Laos, Cambodia, Malaysia and Indonesia. However, due to the incorrect estimation of IRI model, the latitude-dependent factor (LDF) is proposed to reduce the discrepancy between the IRI VTEC and the observed VTEC before data aggregation.

1.4 Thesis outline

The contents of this thesis are divided into 7 chapters.

Chapter 1 introduces the background and motivation of this work, objectives of thesis and scope of thesis.

Chapter 2 describes the ionosphere, ionospheric parameters and observations, especially the ionosonde station in Thailand. Besides, one of the important ionospheric irregularities, an equatorial spread-F occurrence, is also presented in Chapter 2.

Chapter 3 presents the ionospheric international models for global and regional TEC maps, particularly the International Reference Ionosphere (IRI) model and the Center for Orbit Determination in Europe (CODE).

Chapter 4 demonstrates the concept of the TEC calculation over Thailand by the adjusted spherical harmonic model (ASHM).

Chapter 5 explains the concept of the proposed latitude-dependent factor (LDF). The aggregated VTEC maps between the observed VTEC and the estimated VTEC of the International Reference Ionosphere (IRI) model, and the calculated VTEC from the IONEX data of the International GNSS (IGS) are also presented.

Chapter 6 shows the regional TEC map over Thailand and the seasonal variation. The VTEC map is developed by the data aggregation technique together with the proposed LDF.

Chapter 7 includes the conclusions and suggestions of this thesis.

CHAPTER 2

IONOSPHERIC OBSERVATION

In this chapter, the ionosphere, the ionospheric parameters and observations are presented. For instance, the equatorial spread-F occurrence observed at the conjugated ionosode stations in the Southeast Asia under the South East Asia Low-latitude ionospheric Network (SEALION) project.

2.1 Ionosphere

The upper atmosphere from about 50 km up to 1,000 km altitude is called an ionosphere. The ionizing action of the sun's radiation produces sufficient free electrons in this region, which affects radio wave propagation. The ionosphere is divided into 3 layers: D (60-90 km), E (90-150 km) and F (150-600 km) layers (Kelly, 2009). However, the F layer is separated into F1 and F2 layers in the daytime. The F2 layer is the important part of the ionosphere because it is effective for radio wave propagation, especially the satellite and high frequency (HF) communications over long distances. Nevertheless, the HF communications including the global navigation satellite system (GNSS) and the global positioning system (GPS) are generally impacted by the ionospheric effects, such as ionospheric storm, radio absorption, interference, propagation delay and scintillation as shown in Figure 2.1.

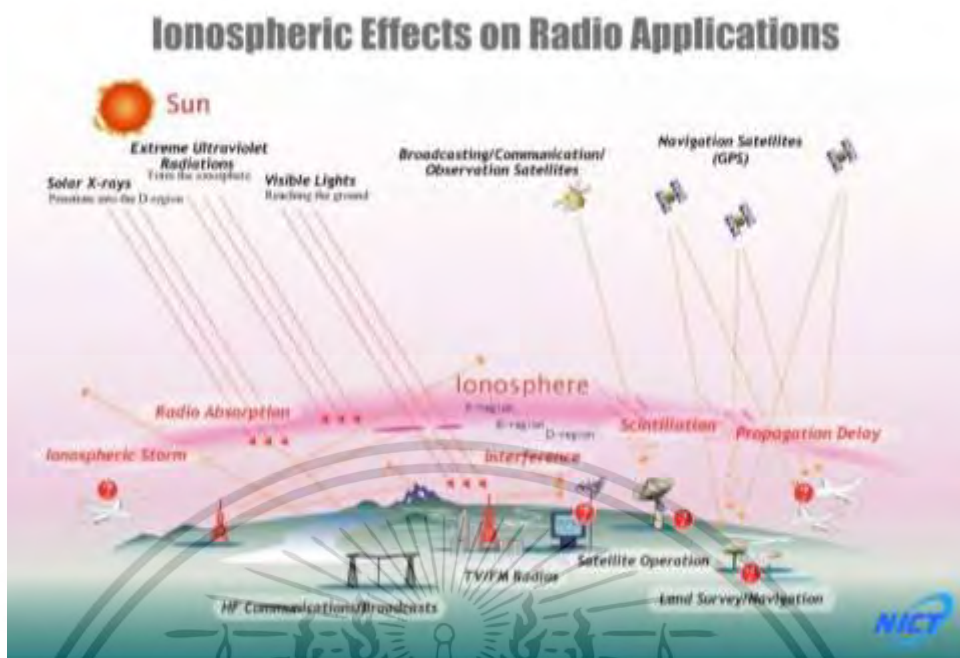


Figure 2.1 Ionospheric effects on radio applications.

(http://wdc.nict.go.jp/IONO/index_E.html)

2.2 Ionospheric observation

The ground-based observation and space-based observation are implemented in various regions to understand the nature and mechanism of the ionosphere. In Thailand, the ionospheric observation by ionosonde is installed at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Chumphon campus (Chumphon station: CPN, 10.72°N, 99.37°E) and at Chiang Mai University (Chiangmai station: CMU, 18.76°N, 98.93°E) as shown in Figure 2.2. These two ionosondes are installed under the South East Asia Low-latitude ionospheric Network (SEALION) project, which has been conducted by National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan, since 2003. The SEALION project has the purpose to observe the ionospheric irregularity in Southeast Asia such as the equatorial spread-F (ESF) occurrence, the equatorial plasma bubble (EPB) phenomenon. The observation sites and methods of SEALION project are shown in Figure 2.3. The parameters of the ionosonde system are in the Table 2.1. (Saito and Maruyama, 2006).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Chumphon station



(b) Chiangmai station

Figure 2.2 Ionosonde stations at (a) Chumphon station and (b) Chiangmai station.



Figure 2.3 Observation sites and methods of SEALION project.

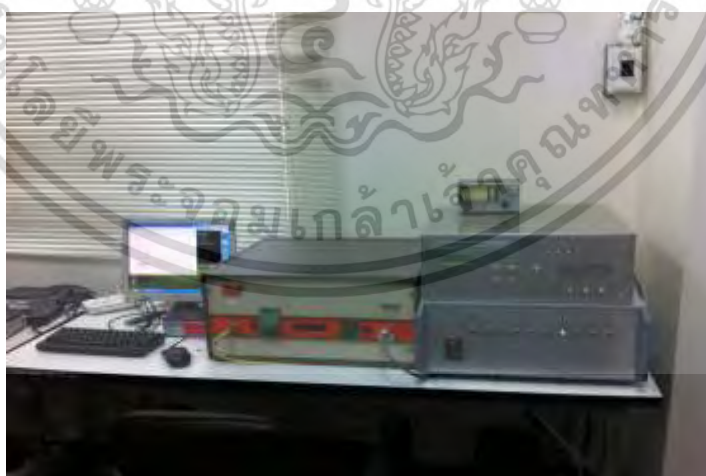
(<http://seg-web.nict.go.jp/sealion/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2.1 Parameter of ionosonde system.

System	Frequency Modulated–Continuous Wave (FM/CW) with pseudo-random Tx/Rx switching
Peak Tx power	20 Watts
Average Tx power	10 Watts
Frequency range	2–30 MHz
Sweep rate	100 kHz per second
Sweep repetition period	5 minutes
Antenna	Folded dipole

The ionosonde system includes the Frequency Modulated Continuous Wave (FM/CW) ionosonde and the ionospheric sounding antenna as shown in Figure 2.4 (a) and (b), respectively. The radio wave in the range of 2 - 30 MHz is transmitted from the FM/CW ionosonde to the ionosphere by the ionospheric sounding antenna. The reflected pulse is received, and its delay time is recorded as a trace on the ionogram as shown in Figure 2.5 (Maruyama, 2012).



(a) Frequency Modulation Continuous Wave (FM/CW) ionosonde.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) Ionosphere sounding antenna.

Figure 2.4 Ionosonde observation at Chumphon station.

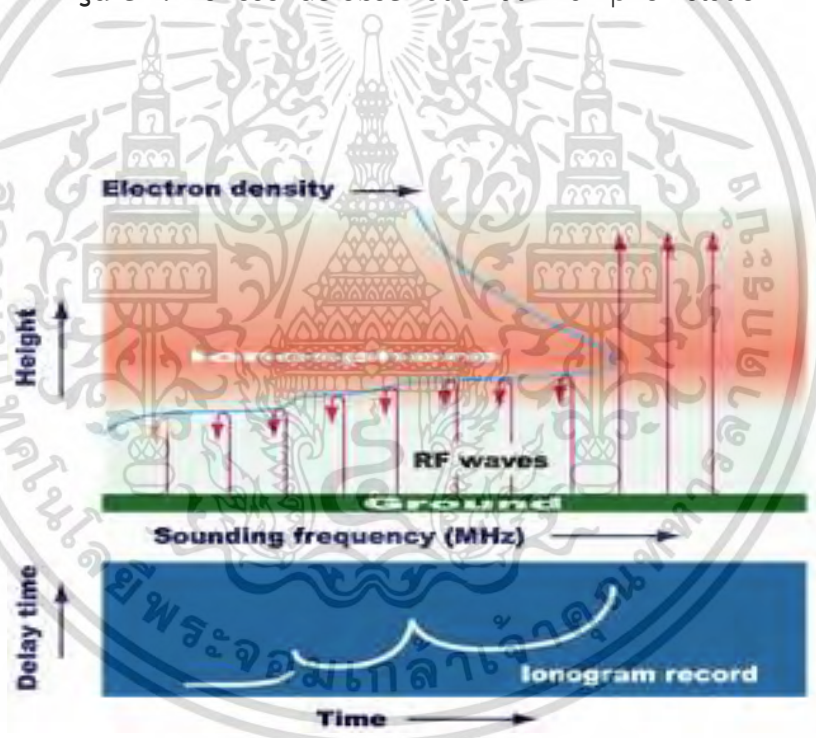


Figure 2.5 Ionospheric observation technique.

(Reproduced with permission from Maruyama, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Ionospheric parameter

Figure 2.6 shows the schematic illustration of ionogram and ionospheric parameters: minimum frequency for E-layer or F-layer echoes (f_{min}), critical frequency, exceeding critical frequency and virtual height of each layer that including E layer (f_oE , f_xE , $h'E$), Sporadic E layer (f_oEs , f_xEs , $h'Es$), F1 layer (f_oF1 , f_xF1 , $h'F1$) and F2 layer (f_oF2 , f_xF2 , $h'F2$), respectively (Maruyama, 2012).

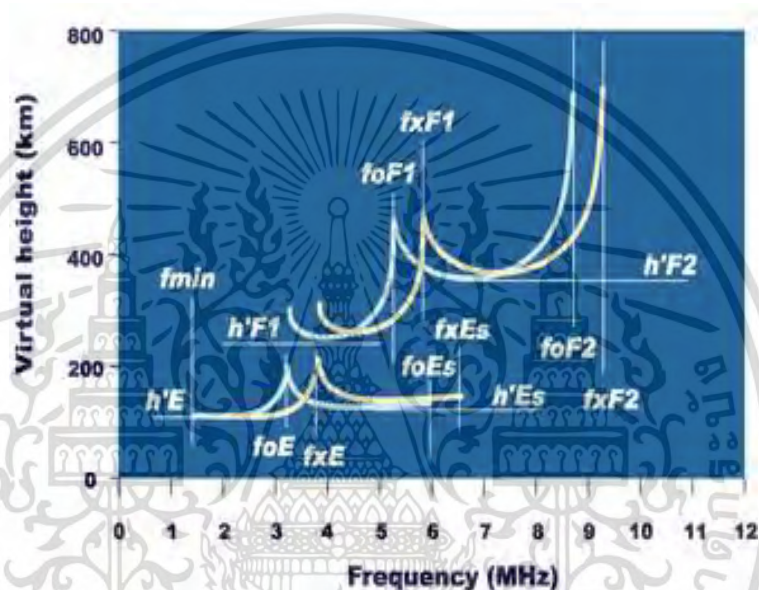


Figure 2.6 Schematic illustration of ionogram and ionospheric parameters.

(Reproduced with permission from Maruyama, 2012)

Figure 2.7 (a) and (b) show the samples of the ionogram recorded on March 25, 2009 in daytime and on September 1, 2008 in the nighttime by FM/CW ionosonde at Chumphon station. It can be seen that the radio echoes are observed being split into two traces (the ordinary and extraordinary components corresponding to lower and higher frequency traces, respectively). The echo traces indicate the different ionospheric profiles between in the daytime and the nighttime. The traces of E, sporadic E, F1, F2, layers appear on ionogram observed during daytime whereas only the F layer trace appears on ionogram observed during nighttime.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

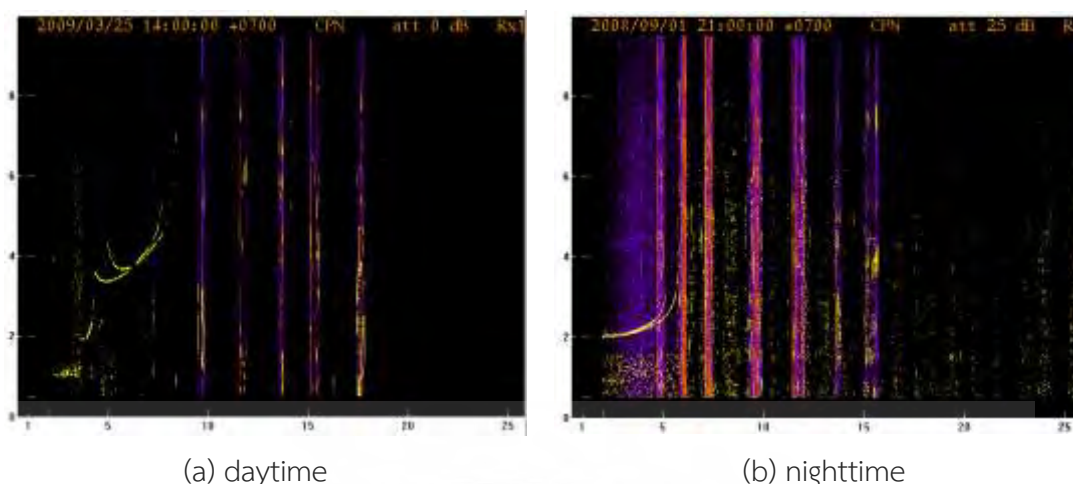


Figure 2.7 Sample of ionograms recorded in (a) daytime: March 25, 2009 and (b) nighttime: September 1, 2008.

The $M(3000)F2$ is the ratio of the maximum useable frequency reflected from the F2 layer which can be received at 3,000 km (MUF) to the F2 layer critical frequency ($foF2$). The $foF2$ and MUF are well-known ionospheric parameters for operating the HF communication system. The $M(3000)F2$ is computed by

$$M(3000)F2 = \frac{MUF}{foF2}. \quad (2.1)$$

The F2 layer peak height ($hmF2$) is the F2 peak electron density height (km), computed using the expression (Shimazaki, 1955), i.e.,

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176. \quad (2.2)$$

The ionospheric parameters observed from the ionogram can describe the ionospheric characteristics and the ionospheric irregularities which affect the satellite navigation and high frequency (HF) communications. In the next section, the ionospheric irregularity namely equatorial spread-F (ESF) is described.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Equatorial spread-F

The spread-F (SF) phenomenon is one of important ionospheric irregularities which was first investigated on ionograms at Huancaya, Peru, in 1938 (Booker and Wells, 1938). The equatorial spread-F (ESF) was subsequently denominated as a nighttime irregularity of the F region around the equatorial ionosphere and in the low latitude region (Cohen and Bowles, 1961). The ESF phenomenon is frequently associated with the equatorial plasma bubble (EPB) generated by the generalized Rayleigh–Taylor (R–T) instability which is mainly caused by the pre-reversal electric field enhancement (PRE) or $E \times B$ drift indicating the uplift of F-layer bottom side (Abdu et al., 2000). Figure 2.8 shows the $E \times B$ drift center on the magnetic equator and spread across the areas at 10 to 15 degrees north and south of the equator or the equatorial ionization anomaly (EIA) region (Maruyama, 2012). The ESF occurrence around the EIA region influences the quality and performance of HF communication systems and the integrity of GPS satellite accuracy since the radio signals are subject to fluctuation in phase and/or amplitude when they travel through the ionospheric irregularities resulting in scintillation phenomenon (Aaron, 1997). The ESF phenomenon has been widely studied by various techniques during the past three decades such as the ground-based ionosondes, the incoherent scatter radar (ISR), the satellite borne topside sounder and in-situ measurements (Hoang et al., 2010; Maruyama et al., 2007; Mathews et al., 2001; Maruyama and Matuura, 1984). The spread-F phenomenon is continuously investigated in many regions. For example, Hoang et al., (2010) investigate the correlation between the ESF occurrence and height of F layer bottom side ($h'F$) at Ho Chi Minh, Vietnam and Sao Luis, Brazil, stations near the magnetic equator. The results show the ESF characteristics in diurnal and season variation at the longitudinal difference of these two stations. Besides, the ESF investigation at two equatorial ionosonde stations: Cebu and Manila stations, Philippines confirm that the ESF onsets and the statistical occurrences are affected by longitudinal and latitudinal difference (Maruyama et al., 2002). In addition, the monthly average percentage of the RSF and FSF occurrences are obtained by analyzing the ionograms at the conjugate stations: Chiangmai station (CMU), Thailand and Kototabang station (KTB), Indonesia, and near the magnetic equator, Chumphon station (CPN), Thailand as shown in Figure 2.9. These three FM/CW

ionosonde stations are in the SEALION project of NICT, Japan. The results show that เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the percentage of RSF occurrence at CPN is higher than at other stations. The high percentage of RSF occurrence mostly occurs during the equinoctial months. On the other hand, the FSF occurrence at CMU and KTB are higher than at CPN. The percentage of MSF occurrence is much lower than FSF and RSF types at all stations through all observational periods. In addition, the ESF occurrence statistics and characteristics over CMU and KTB are almost symmetrical in that the ESF onsets occur almost at the same time since these two conjugate stations are located along the magnetic meridian of 100°E in northern and southern hemispheres. Furthermore, the RSF occurrence typically has the peaks before midnight, while the maximum occurrence rate of FSF is after midnight. The RSF onsets normally precede the FSF onsets by about 1–2 hours (Klinngam et al., 2015). This observation shows the similar results of the previous ESF study in Thailand, in that the RSF occurrence is observed at CPN (near the magnetic equator) before the FSF occurrence is observed at CMU (in the northern hemisphere). The RSF occurrence rate at CPN is higher than at CMU, particularly in the equinoctial months (Rungraengwajiak et al, 2013).

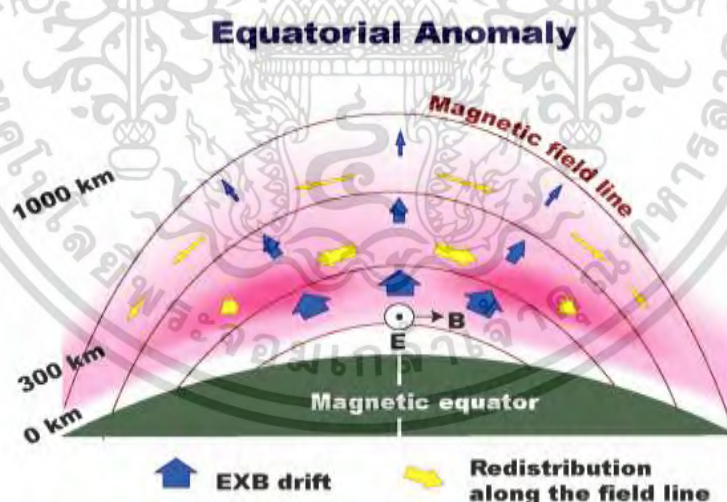


Figure 2.8 Equatorial ionization anomaly (EIA).

(Reproduced with permission from Maruyama, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

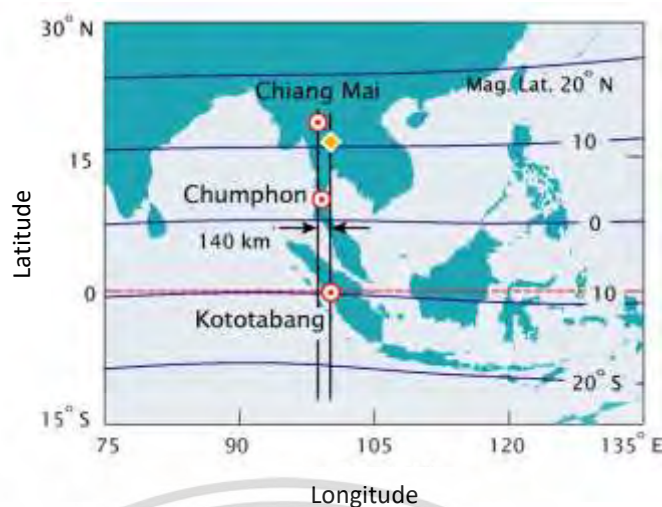


Figure 2.9 Location of Chiangmai, Chumphon and Kototabang stations

(Reproduced with permission from Maruyama, 2012)

In case of the spread-F occurrence, the SF signature on the ionogram is in the form of diffuse traces of the signals reflected/scattered by the ionospheric irregularities. Figure 2.9 shows the SF signature, in which the diffused trace of the reflect pulses is on the ionogram. Therefore, the $foF2$, MUF and some ionospheric parameters cannot be scaled from the diffuse trace on the ionogram when the SF phenomenon occurs (Maruyama, 2012).

The diffuse traces on the ionogram can be categorized into 3 types of spread-F based on U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction (Piggott and Rawer, 1972) as shown in Figure 2.10 (a) the frequency spread-F (FSF), of which the F layer traces near the critical frequency are broadened in frequency and may show additional traces similar to a normal critical frequency, (b) the range spread-F (RSF), of which the traces away from the critical frequency show broadening in range, and (c) the mixed spread-F (MSF), of which the traces on the ionogram are broadened in both the frequency and range and do not show the presence of distinct FSF and RSF types.

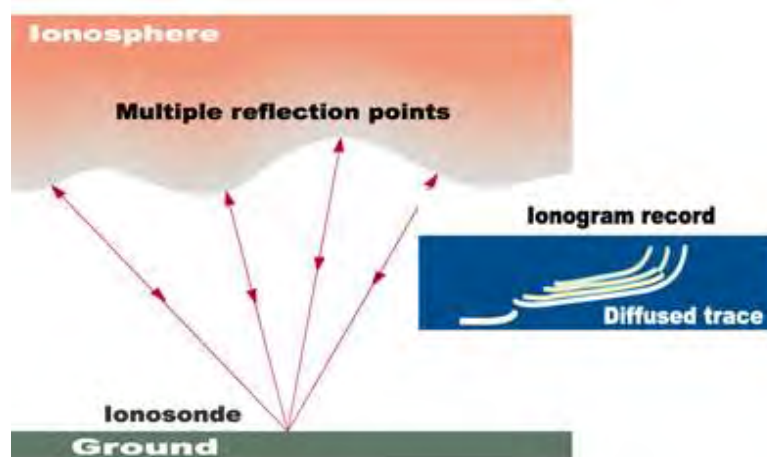


Figure 2.10 Multiple reflection of radio wave signal in ionosphere is recorded as the diffused trace on the ionogram known as spread-F phenomenon.

(Reproduced with permission from Maruyama, 2012)

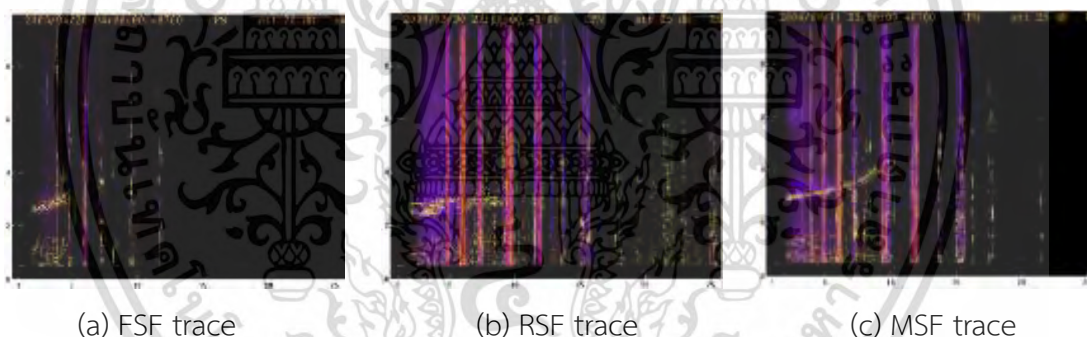


Figure 2.11 Example of ionograms showing (a) FSF trace (b) RSF trace and (c) MSF trace.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER 3

IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC)

MODEL

In this chapter, the ionospheric total electron content (TEC) calculation from the global positioning system (GPS) observation, the TEC observation in Thailand and the International TEC models are presented.

3.1 Total electron content (TEC)

Due to the ionospheric effects on the radio wave communications, the ionospheric total electron content (TEC) is analyzed to study the characteristics of the ionosphere. The TEC is an important ionospheric parameter which can describe the plasma density of the ionosphere, propagation delays as well as the ionospheric instability that affects the satellite navigation and high frequency (HF) communications. The ionospheric TEC map is the useful tool for monitoring and forecasting the space weather in global, local and regional scales. Therefore, the TEC is continuously observed from the GPS stations, particularly, the stations near the magnetic equator and in low latitude region, where the electron content variation is relatively more fluctuated. (Otsuka et al., 2002; Tsugawa et al., 2007; Lee et al., 2008; Okoh et al., 2015; Zheng et al., 2016; Opio et al., 2015; Huy et al., 2014; Leong et al., 2015; Aggarwal, 2011).

The slant TEC (STEC) is the density of free electrons found in a square meter area along the slant path between a global positioning system (GPS) receiver and a satellite as shown in Figure 3.1 (Rungraengwajiake, 2016). The STEC is measured in total electron content unit (TECU), where 1 TECU corresponds to 10^{16} free electrons per square meter. It can be computed as

$$STEC = \int_s N_e ds, \quad (3.1)$$

Where N_e is the electron density (electrons/meter³) and s is the distance between a GPS receiver and a satellite in the unit of meter.

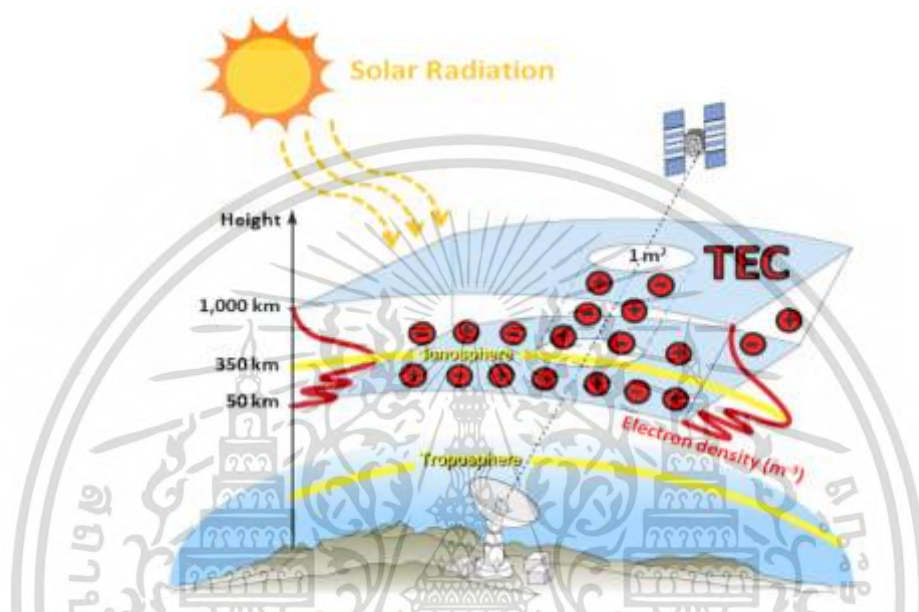


Figure 3.1 Total electron content (TEC). (Rungraengwajaike, 2016)

The single layer model (SLM) is used for the TEC representation as shown in Figure 3.2. The SLM assumes that all free electrons are concentrated in the spherical thin shell at altitude H , R is the radius with respect to the GPS station and R_E is the mean radius of the Earth (6,371 km) (Schaer et al, 1977).

The function $F(z)$ is a single-layer mapping function where is used to convert the $STEC$ to the vertical TEC ($VTEC$) at the ionosphere pierce point (IPP), i.e.,

$$VTEC = F(z)STEC, \quad (3.2)$$

where $F(z) = \cos z'$, $\sin z' = [R / (R_E + H)] \sin z$, z and z' are the (geocentric) zenith distances at the height of the station and the single layer, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

However, the received STEC contains the satellite bias (b_s) and the receiver bias (b_r). Therefore, Eq. (3.2) can be rewritten as

$$VTEC = F(z)(STEC + b_s + b_r). \quad (3.3)$$

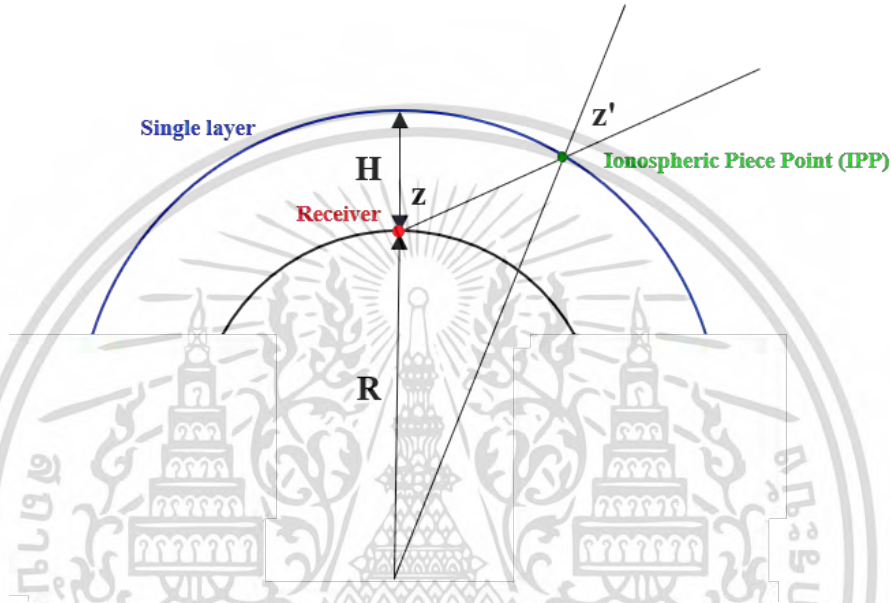


Figure 3.2 Single layer model (SLM).

3.2 Ionospheric delay

From Figure 3.3, the ionospheric delay time ($\Delta\tau$) is the difference of signal traveling time between the ionosphere (t_{s^*}) and the free space (t_s) with the refractive index n_{ion} and $n=1$, respectively. The delay time can be computed by

$$\Delta\tau = t_{s^*} - t_s = \frac{40.3}{cf^2} \int_{s^*} N_e ds, \quad (3.4)$$

or

$$\Delta\tau = \frac{40.3}{cf^2} STEC, \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where c is the speed of light and f is the radio wave frequency (Hz).

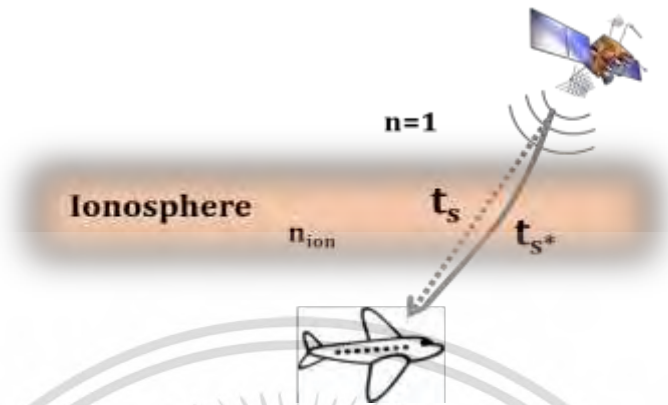


Figure 3.3 Ionospheric delay time. (Rungraengwajjake et al., 2015)

3.3 Rate of TEC change index

The rate of TEC change index (*ROTI*) is a parameter which indicates the disturbance, especially the plasma bubble occurrence (Rungraengwajjake et al., 2015). It is a standard deviation of the rate of STEC change (*ROT*) expressed in TECU/minute and can be computed from

$$ROT(i) = \frac{STEC(i+1) - STEC(i)}{t_{i+1} - t_i}, \quad (3.6)$$

and

$$ROTI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ROT(i) - \overline{ROT})^2}, \quad (3.7)$$

where N is the timing window for *ROTI* computation (minute). The disturbed day can be flagged if the *ROTI* is equal or more than a specified threshold for example, 0.5 TECU/minute.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the grid resolution of $1^\circ \times 1^\circ$ at every 5 minutes. Figure 3.5 shows the global GPS map of MAPGPS on October 29, 2003 at 21.20UT in $\log_{10}(\text{TECU})$. It can be seen that the distribution of TEC is different for various regions around the world due to spatial variation of TEC values.

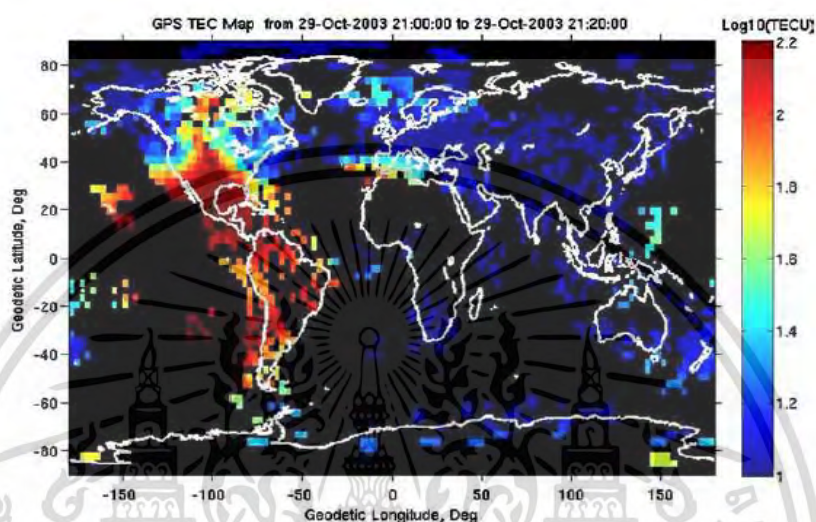


Figure 3.5 GPS TEC map of MIT Automated Processing of GPS (MAPGPS) on October 29, 2003 at 21.20UT. (Rideout and Coster, 2006)

3.4.2 Space Weather Service (SWS)

The Space Weather Service (SWS), Australian Government, Bureau of Meteorology produces the near real time VTEC global map at every 15 minutes using the IRI-2007 ionospheric model with real time global foF2 data. The global and regional VTEC map over Australian region on June 12, 2018 are produced by SWS as shown in Figure 3.6 and 3.7, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

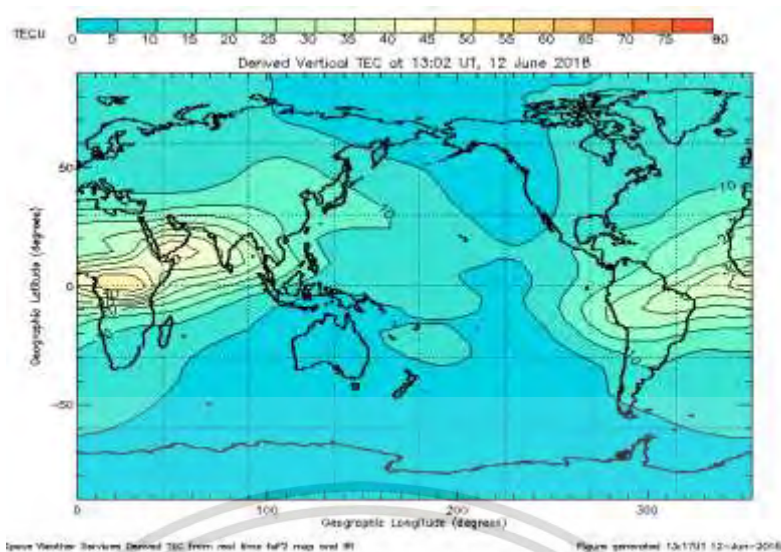


Figure 3.6 Global TEC map by SWS on June 12, 2018 at 13.02UT.

(<http://www.sws.bom.gov.au/Satellite/2/2>)

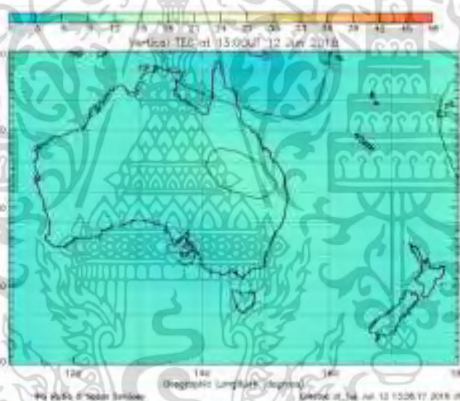


Figure 3.7 Regional TEC map over Australian region by SWS on June 12, 2018 at 13.00UT. (<http://www.sws.bom.gov.au/Satellite/2/1/1>)

3.4.3 Dense Regional and Worldwide International GNSS-TEC observation (DRAWING-TEC)

The Dense Regional and Worldwide International GNSS-TEC observation (DRAWING-TEC) project aims to study the ionospheric effects on the GNSS and produces the high resolution STEC map in global and regional scales. The global TEC map and the regional TEC map of Europe, Japan and North America on September 26, 2011 at 21UT are produced by DRAWING-TEC project as shown in Figure 3.8 and 3.9 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

– (c), respectively. Moreover, DRAWING-TEC project has developed a new standardized TEC format namely GNSS-TEC EXchange (GTEX) format to demonstrate STEC data for each GNSS satellite with file/day/receiver.

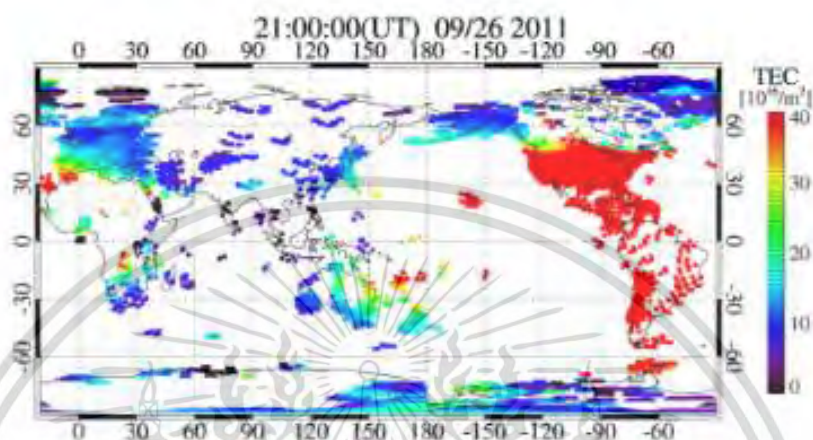
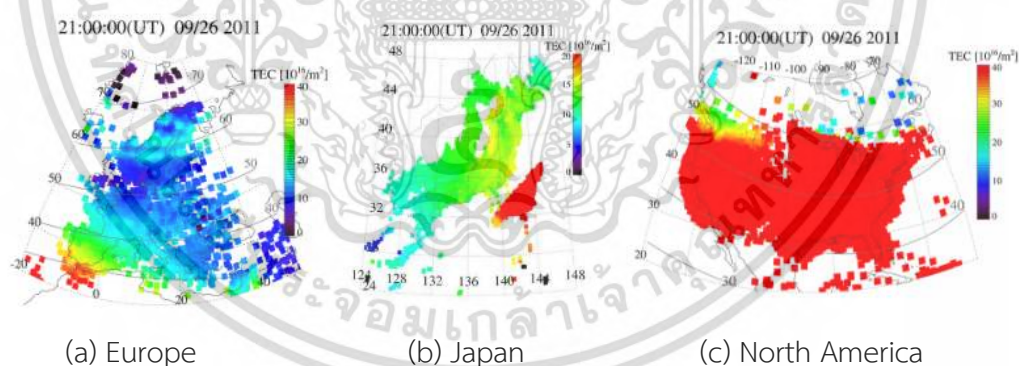


Figure 3.8 Global TEC map of DRAWING-TEC on September 26, 2011 at 21UT.

(<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/>)



(a) Europe

(b) Japan

(c) North America

Figure 3.9 Regional TEC map of DRAWING-TEC on September 26, 2011 at 21UT for (a) Europe (b) Japan and (c) North America.

(<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 European Space Agency (ESA)

The European Space Agency (ESA) is an international organization, which forecast the hourly TEC over Northern Europe region. Figure 3.10 shows the ESA forecast map of TEC and the ionospheric range error of L1 frequency on June 12, 2018 at 10.30UT.

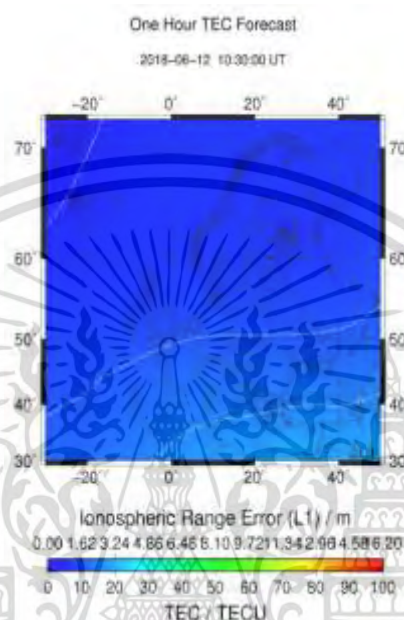


Figure 3.10 Forecast of TEC by ESA on June 12, 2018 at 10.30UT.
(<http://swe.ssa.esa.int/ionospheric-weather>)

3.4.5 Jet Propulsions Laboratory (JPL)

The Jet Propulsions Laboratory (JPL) and the University of Catalonia (UPC) provide the real-time ionospheric map using the pixel-based mapping scheme and the interpolation with the time resolution of 2 hours and the grid resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively (Liu and Chen, 2009). Therefore, only 13 JPL and UPC GIMs per day are produced with the 71 x 73 grids in latitude and longitude, respectively. Figure 3.11 shows the global ionospheric map by JPL on June 26, 2018 at 15.50UT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

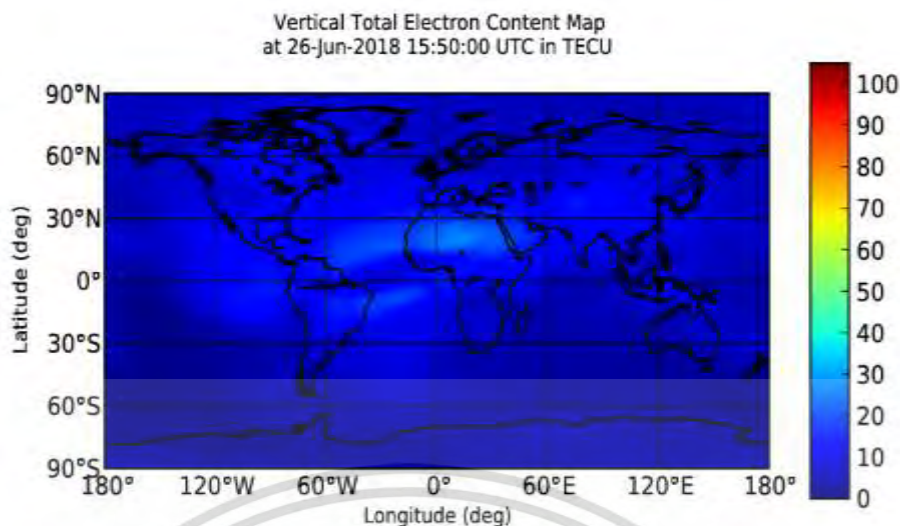


Figure 3.11 Global map by JPL on June 26, 2018 at 15.50UT.

(https://iono.jpl.nasa.gov/latest_rti_global.html)

3.4.6 Center for Orbit Determination Europe (CODE)

The daily global ionosphere maps (GIMs) are continuously generated at the Center for Orbit Determination in Europe (CODE) and the European Space Agency (ESA) using the data from over 200 GPS/GLONASS sites of the International GNSS (IGS) and other institutions in more than 80 countries. The IGS Service Tracking Network is shown in Figure 3.12. The IGS provides the GPS data in the ionosphere map exchange (IONEX) format as shown in Figure 3.13 (Schaer and Gurtner, 1998a and 1998b). The VTEC in the grids are developed by the expansion with the basic functions over the globe based on the spherical harmonic (SH) model. The CODE and ESA GIM range is from -87.5° to 87.5° in latitude and from -180° to 180° in longitude. The GIM is provided daily on the Internet of 2 hours via <http://aiuws.unibe.ch/ionospere/> with the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively (Hernández-Pajares et al., 2009). A sample of VTEC map generated from IONEX on June 29, 2012 (DOY181) at 10UT as shown in Figure 3.14.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Figure 3.12 International GNSS Service (IGS) Tracking Network.

(<http://www.igs.org/network>)

igsg1900.12							
1	1.0	IONOSPHERE MAPS		MIX	IONEX VERSION / TYPE		
2	cmpcmb v1.2	GRL/UWM		26-jul-12 14:20	PGM / RUN BY / DATE		
3	ionex file containing IGS COMBINED Ionosphere maps					COMMENT	
4	global ionosphere maps for day 190, 2012					DESCRIPTION	
5	IONEX file containing the COMBINED IGS TEC MAPS and DCBs					DESCRIPTION	
6	IONEX files of the following IAACs were combined: cod					DESCRIPTION	
7				esa	DESCRIPTION		
8				jpl	DESCRIPTION		
9				upc	DESCRIPTION		
10	Contact address: Andrzej Krankowski					DESCRIPTION	
11	Geodynamics Research Laboratory					DESCRIPTION	
12	University of Warmia and Mazury (GRL/UWM)					DESCRIPTION	
13	Oczapowski St. 1					DESCRIPTION	
14	10-957-Olsztyn, POLAND					DESCRIPTION	
15	e-mail: kand@uwm.edu.pl					DESCRIPTION	
16					DESCRIPTION		
17	2012	7	8	0	0	0	
18	2012	7	9	0	0	0	
19	7200	INTERVAL					
20	13	# OF MAPS IN FILE					
21	COSZ	MAPPING FUNCTION					
22	0.0	ELEVATION CUTOFF					
23	combined TEC calculated as weighted mean of input TEC values					OBSERVABLES USED	
24	425	# OF STATIONS					
25	32	# OF SATELLITES					
26	6371.0	BASE RADIUS					
27	2	MAP DIMENSION					
28	450.0	450.0	0.0	HGT1 / HGT2 / DHGT			
29	87.5	-87.5	-2.5	LAT1 / LAT2 / DLAT			
30	-180.0	180.0	5.0	LON1 / LON2 / DLON			
31	-1	EXPONENT					
32	TEC values in 0.1 tec units; 9999, if no value available					COMMENT	
33	DCB values in nanoseconds, reference is Sum_of_SatDCBs = 0					COMMENT	

Figure 3.13 IONEX file on July 8, 2012 (DOY190).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

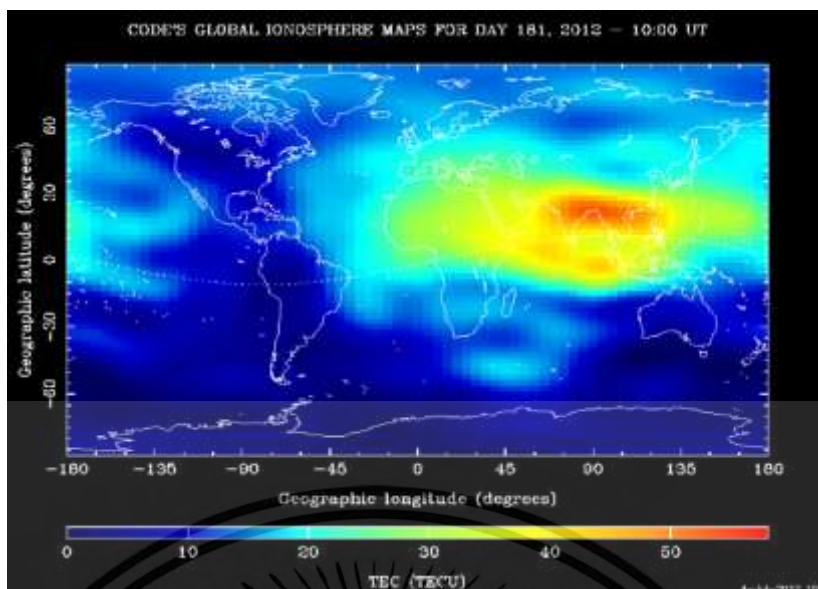


Figure 3.14 Global VTEC map by CODE on June 29, 2012 (DOY181) at 10UT.

(<http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim.gif>)

3.4.7 International Reference Ionosphere (IRI) model

The International Reference Ionosphere (IRI) model is an international project sponsored by the Committee on Space Research (COSPAR) and the International Union of radio Science (URSI) since 1978 (Rawer et al., 1978). The purpose of this model is to predict the ionospheric parameters based on all worldwide available data from the ground-based system and the satellite observation such as the ionosondes, the incoherent scatter radars, the topside sounder satellites (Bilitza, 2015; Bilitza et al., 2017). The IRI performance has been improved during the meetings at every two years (Bilitza, 2014a). The IRI model version 2012 produces the ionospheric parameters such as F2 peak height (hmF2), propagation factor M3000F2, F2 peak plasma frequency (foF2), electron density (NmF2), spread-F probability and vertical ionospheric electron content (VTEC) via http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html as shown in Figure 3.15.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Virtual Ionosphere Thermosphere Mesosphere Observatory (VITMO)
International Reference Ionosphere - IRI-2012

This page enables the computation and plotting of IRI parameters: electron and ion (O⁺, H⁺, He⁺, O²⁺, NO⁺) densities, total electron content, electron, ion and neutral (NRL-MISIS-2002) temperatures, equatorial vertical ion drift and others.

[Go to the IRI description](#)

◆ **Select Date and Time**
Year(1958-2017):
Note:If date is outside the Ap index range (1958-2014/06/30), then STORM model will be turned off.
Month: **Day(1-31):**
Time **Hour of day** (e.g. 1.5):

◆ **Select Coordinates**
Coordinates Type
Latitude(deg., from -90. to 90.): **Longitude**(deg., from 0. to 360.)
Height (km, from 60. to 2000.):

◆ **Select a Profile type and its parameters:**
Hour profile[0.-24.] **Start** **Stop** **Stepsize**

Optional Input:
Sunspot number, Rz12 (0. - 400.)
Ionospheric index, IG12 (-50. - 400.)
F10.7 radio flux, daily (0. - 400.) **F10.7 radio flux, 81-day** (0. - 400.)
Electron content: Upper boundary (km., from 50. - 2000.)

Figure 3.15 IRI-2012 model website for online access.
 (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html)

In this work, the TEC estimation from the well-known empirical IRI-2012 model and the TEC calculation from the IONEX data of the IGS are selected to aggregate with the observed VTEC. The details of VTEC aggregation is described in chapter 5 and 6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER 4

ADJUSTED SPHERICAL HARMONIC MODEL

In this chapter, the adjusted spherical harmonic model (ASHM) is presented. The ASHM is implemented for VTEC calculation over Thailand region using its coefficients. The unknown coefficients of ASHM is determined by the least square method. In addition, this work presents the VTEC calculation with a bound for error reduction.

4.1 Adjusted spherical harmonic model

In 1838, Gauss introduced the classic technique of spherical harmonic analysis (SHA) (Santis et al., 1997). The conventional spherical harmonic expansion is a two-dimensional Fourier Series in longitude multiplied by the Legendre functions in cosine of co-latitude. The adjusted spherical harmonic analysis (ASHA) is a new technique based on the global spherical harmonic (GAHA) methodology used by the CODE. The purposes of ASHA are to improve the time and spatial resolutions of regional map and to investigate the possibility of real-time TEC estimation (Opperman, et al., 2007). In the ASHM, the ionospheric pierce point (IPP) latitude and longitude are changed to be scaled IPP co-latitude and the IPP sun-fixed longitude, respectively. The scaled IPP co-latitude is expressed as

$$\phi = \frac{90^\circ}{\theta} (\phi_c - \phi_0), \quad (4.1)$$

where ϕ is the scaled IPP co-latitude, θ is the spherical angle, ϕ_c is the IPP co-latitude and ϕ_0 is the minimum co-latitude of IPPs.

For the IPPs sun-fixed longitude, λ can be calculated by

$$\lambda = (180^\circ - \Omega_e t) - \lambda_g, \quad (4.2)$$

where Ω_e is the earth rotation rate, t is the time elapsed since midnight UT and λ_g is the geographical longitude.

The conventional spherical harmonic expansion for VTEC can be expressed as

$$VTEC(\lambda, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}[\cos(\phi)] \{a_{nm} \sin(m\lambda) + b_{nm} \cos(m\lambda)\}, \quad (4.2)$$

where n is the SH degree, m is the SH order, N is the maximum degree of SH expansion, \bar{P}_{nm} is normalized associated Legendre functions of degree n and order m , a_{nm} and b_{nm} are unknown SH coefficients, where the number of unknown SH coefficients is equal to $(n+1)^2$. The associated Legendre function, $P_{nm}[\cos \phi]$ is

$$P_{nm}[\cos \phi] = (-1)^m (\sin \phi)^m \frac{d^m}{d(\cos \phi)^m} (P_n[\cos \phi]), \quad (4.3)$$

where $P_n[\cos \phi]$ is the n^{th} degree orthogonal Legendre function, i.e.,

$$P_n[\cos \phi] = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d(\cos \phi)^n} [(\cos^2 \phi - 1)^n]. \quad (4.4)$$

The associated Legendre functions can be efficiently computed by recursion from (Vallado, 1977)

$$P_{n,0}[\cos \phi] = \frac{(2n-1) \cdot \cos \phi \cdot P_{n-1,0}[\cos \phi] - (n-1) \cdot P_{n-2,0}[\cos \phi]}{n} \quad (n \geq 2),$$

$$P_{n,m}[\cos \phi] = P_{n-2,m}[\cos \phi] + (2n-1) \cdot \cos \phi \cdot P_{n-1,m-1}[\cos \phi] \quad (m \neq 0, m < n)$$

and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{n,n}[\cos \phi] = (2n-1) \cdot \cos \phi \cdot P_{n-1,n-1}[\cos \phi], \quad m \neq 0$$

where $P_{0,0}[\cos \phi] = 1$, $P_{1,0}[\cos \phi] = \cos \phi$, $P_{1,1}[\cos \phi] = -\sin \phi$.

Likewise, the trigonometric functions are recursively calculated as follows

$$\sin(m\lambda) = 2 \cos(\lambda) \sin\{(m-1)\lambda\} - \sin\{(m-2)\lambda\}$$

and

$$\cos(m\lambda) = 2 \cos(\lambda) \cos\{(m-1)\lambda\} - \cos\{(m-2)\lambda\}.$$

Then the normalization function is obtained from

$$\bar{P}_{nm}[\cos \phi] = \frac{P_{nm}[\cos \phi]}{\Pi_{nm}}, \quad (4.5)$$

where the normalization operator, Π_{nm} , can be computed from

$$\Pi_{nm} = \sqrt{\frac{(n+m)!}{(n-m)!(2n+1)k}}, \quad (4.6)$$

where $k = 1$ for $m = 0$ and $k = 2$ for $m > 1$.

The SH expansion in Eq. (4.2) can be rewritten to

$$VTEC(\lambda, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}[\cos(\phi)] \cdot a_{nm} \sin(m\lambda) + \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}[\cos(\phi)] \cdot b_{nm} \cos(m\lambda). \quad (4.7)$$

An example of SH expansion when the maximum degree of three ($N = 3$) allows $n=0, 1, 2, 3$ and $m=0, 1, 2, 3$ as follows

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$VTEC(\lambda, \phi) = \sum_{n=0}^3 \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}[\cos(\phi)] \cdot a_{nm} \sin(m\lambda) + \sum_{n=0}^3 \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}[\cos(\phi)] \cdot b_{nm} \cos(m\lambda). \quad (4.8)$$

The sub-equations for each degree n and order m are

$$\bar{P}_{00}[\cos(\phi)] \cdot a_{00} \sin(0\lambda) + \bar{P}_{00}[\cos(\phi)] \cdot b_{00} \cos(0\lambda) \quad , n=0, m=0$$

$$\bar{P}_{10}[\cos(\phi)] \cdot a_{10} \sin(0\lambda) + \bar{P}_{10}[\cos(\phi)] \cdot b_{10} \cos(0\lambda) \quad , n=1, m=0$$

$$\bar{P}_{11}[\cos(\phi)] \cdot a_{11} \sin(1\lambda) + \bar{P}_{11}[\cos(\phi)] \cdot b_{11} \cos(1\lambda) \quad , n=1, m=1$$

$$\bar{P}_{20}[\cos(\phi)] \cdot a_{20} \sin(0\lambda) + \bar{P}_{20}[\cos(\phi)] \cdot b_{20} \cos(0\lambda) \quad , n=2, m=0$$

$$\bar{P}_{21}[\cos(\phi)] \cdot a_{21} \sin(1\lambda) + \bar{P}_{21}[\cos(\phi)] \cdot b_{21} \cos(1\lambda) \quad , n=2, m=1$$

$$\bar{P}_{22}[\cos(\phi)] \cdot a_{22} \sin(2\lambda) + \bar{P}_{22}[\cos(\phi)] \cdot b_{22} \cos(2\lambda) \quad , n=2, m=2$$

$$\bar{P}_{30}[\cos(\phi)] \cdot a_{30} \sin(0\lambda) + \bar{P}_{30}[\cos(\phi)] \cdot b_{30} \cos(0\lambda) \quad , n=3, m=0$$

$$\bar{P}_{31}[\cos(\phi)] \cdot a_{31} \sin(1\lambda) + \bar{P}_{31}[\cos(\phi)] \cdot b_{31} \cos(1\lambda) \quad , n=3, m=1$$

$$\bar{P}_{32}[\cos(\phi)] \cdot a_{32} \sin(2\lambda) + \bar{P}_{32}[\cos(\phi)] \cdot b_{32} \cos(2\lambda) \quad , n=3, m=2.$$

$$\bar{P}_{33}[\cos(\phi)] \cdot a_{33} \sin(3\lambda) + \bar{P}_{33}[\cos(\phi)] \cdot b_{33} \cos(3\lambda) \quad , n=3, m=3.$$

Defining $z = \cos(\phi)$, then $\bar{P}_{nm}[\cos(\phi)] = \bar{P}_{nm}[z]$.

Therefore, the equation (4.8) can be rewritten in matrix form as

$$\mathbf{T} = \mathbf{JX} \quad (4.9)$$

Let \mathbf{T} be the observed VTEC, that is $\mathbf{T} = [VTEC(\lambda, \phi)]$ and \mathbf{J} is the geometry matrix, that is $\mathbf{J} = [\mathbf{J}_a \quad \mathbf{J}_b]$ where

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{J}_a = \begin{bmatrix} \bar{P}_{00}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{10}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{11}[z]\sin(1\lambda) & \bar{P}_{20}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{21}[z]\sin(0\lambda) \\ P_{22}[z]\sin(2\lambda) & \bar{P}_{30}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{31}[z]\sin(1\lambda) & \bar{P}_{32}[z]\sin(2\lambda) & \bar{P}_{33}[z]\sin(3\lambda) \end{bmatrix}$$

and

$$\mathbf{J}_b = \begin{bmatrix} \bar{P}_{00}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{10}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{11}[z]\sin(1\lambda) & \bar{P}_{20}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{21}[z]\sin(0\lambda) \\ P_{22}[z]\sin(2\lambda) & \bar{P}_{30}[z]\sin(0\lambda) & \bar{P}_{31}[z]\sin(1\lambda) & \bar{P}_{32}[z]\sin(2\lambda) & \bar{P}_{33}[z]\sin(3\lambda) \end{bmatrix}$$

\mathbf{X} is the unknown SH coefficient matrix (a_{nm} and b_{nm}) and $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{X}_b \end{bmatrix}$, which,

in this example, are

$$\mathbf{X}_a = [a_{00} \ a_{10} \ a_{11} \ a_{20} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{30} \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33}]^T \text{ and}$$

$$\mathbf{X}_b = [b_{00} \ b_{10} \ b_{11} \ b_{20} \ b_{21} \ b_{22} \ b_{30} \ b_{31} \ b_{32} \ b_{33}]^T.$$

4.2 Least square method

In this work, the least square (LS) method is used for SH coefficients calculation, i.e.,

$$\mathbf{T} = \mathbf{JX}, \quad (4.10)$$

multiply by the transpose of geometry matrix, \mathbf{J}^T , i.e.,

$$(\mathbf{J}^T\mathbf{T}) = (\mathbf{J}^T\mathbf{J})\mathbf{X}, \quad (4.11)$$

then multiply the inverse of $(\mathbf{J}^T\mathbf{T})$ to obtain

$$(\mathbf{J}^T\mathbf{J})^{-1}(\mathbf{J}^T\mathbf{T}) = (\mathbf{J}^T\mathbf{J})^{-1}(\mathbf{J}^T\mathbf{J})\mathbf{X}. \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Therefore, the SH coefficient can be calculated by

$$\mathbf{X} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} (\mathbf{J}^T \mathbf{T}). \quad (4.13)$$

The flow chart of ASHM is shown in Figure 4.1, first the STEC, IPP latitude and longitude are calculated from the RINEX files. Then the VTEC is calculated by mapping function. Next, the normalized associated Legendre function $\bar{P}_{nm}[\cos \phi]$ is calculated and substituted into the spherical harmonic function. The least square method is used for unknown coefficient (a_{nm} and b_{nm}) calculation. Finally, the coefficients of ASHM are used to calculate the VTEC at the desired locations over Thailand.

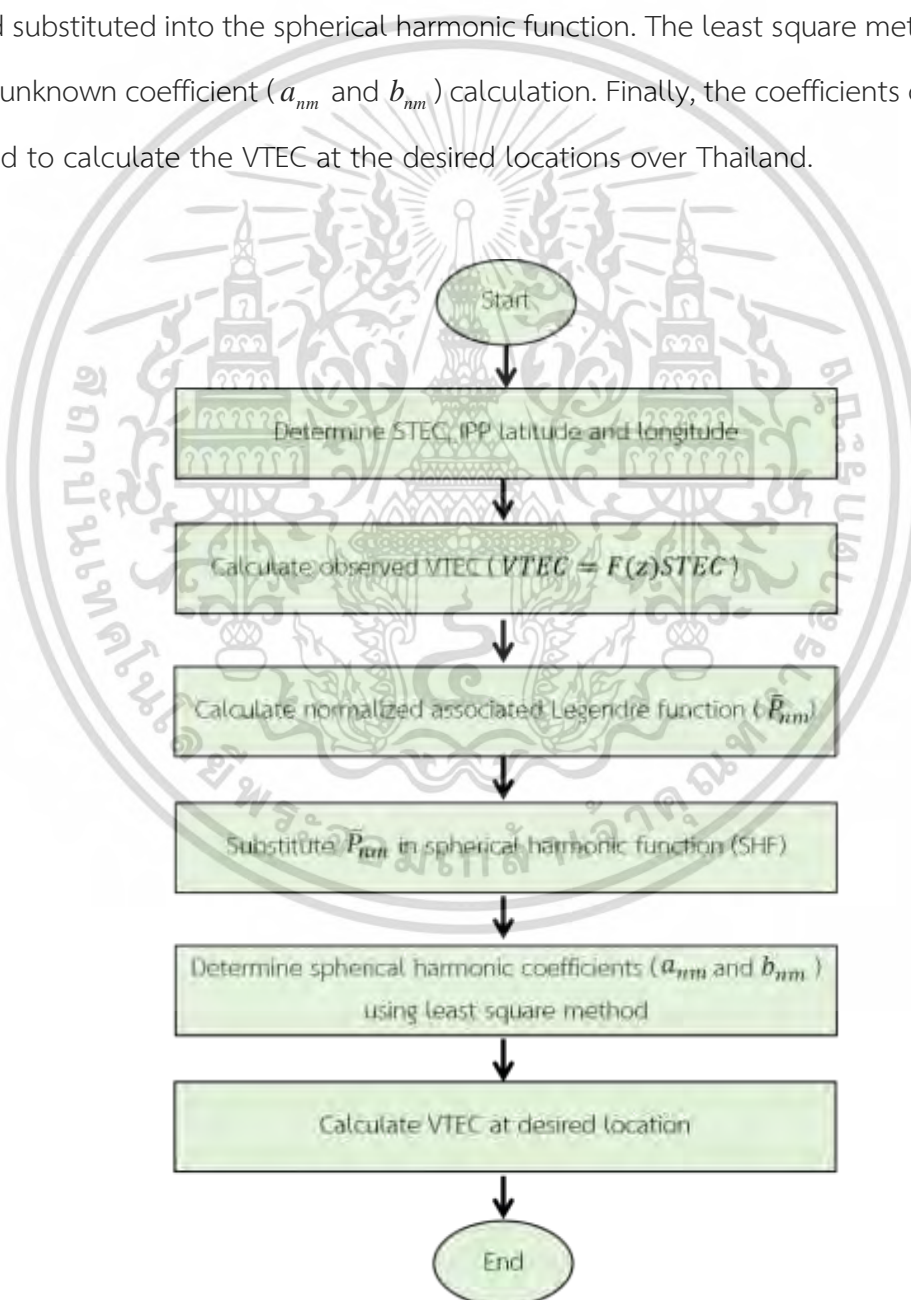


Figure 4.1 Flow chart of ASHM.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In an example shown below, the STEC, VTEC, IPP latitude and longitude are calculated from the RINEX files recorded at KMITL station, Bangkok (13.73°N, 100.78°E) on a quiet day: July 8, 2012 (DOY190) with the elevation angle of 30 degrees and the cycle slip are removed. The receiver bias (b_r) is derived from the GPS observation with the least square fitting method. The bias estimation obtained from the minimum sum of the TEC standard deviation method (Ma and Maruyama, 2003). The satellite bias (b_s) is daily removed by the downloaded bias values from the database of the University of Bern, Switzerland via ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE. The STEC, VTEC, IPP latitude and longitude calculated every 1 second from the 32 satellites are represented in the different color lines as shown in Figure 4.2 (a) – (d), respectively.

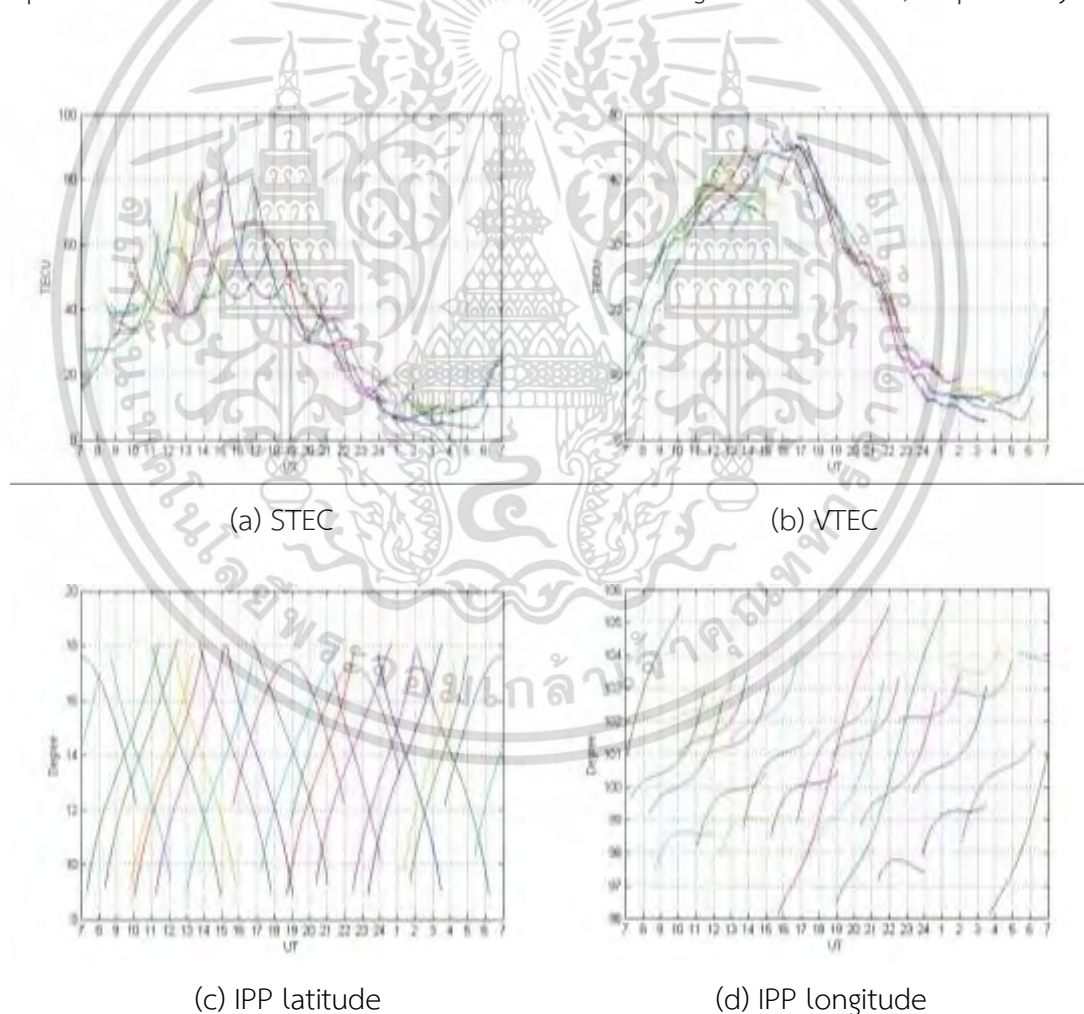


Figure 4.2 Observation at KMITL station on July 8, 2012 (a) STEC (b) VTEC

(c) IPP latitude (d) IPP longitude.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Then the median VTEC is calculated as shown in Figure 4.3. The maximum VTEC is about 45 TECU at 17LT (UT+7 hours) and the minimum VTEC is about 1 TECU at 05LT corresponding to the level of solar activity.

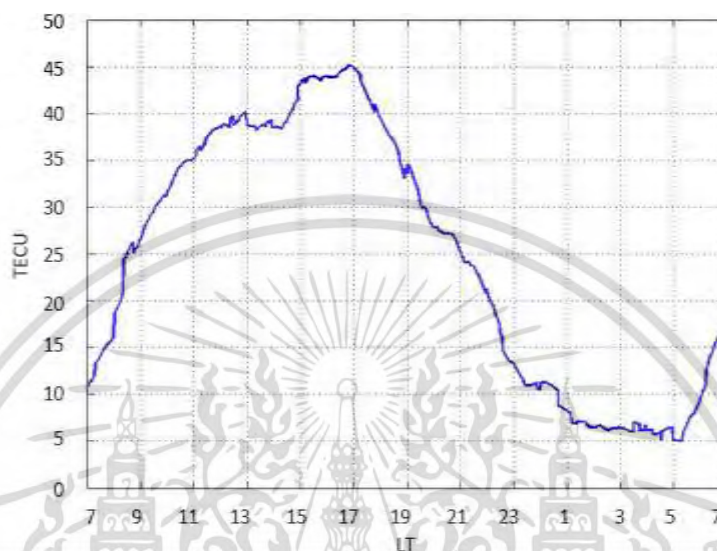


Figure 4.3 Median VTEC at KMITL station on July 8, 2012.

The SH coefficients are calculated from the adjusted spherical harmonic model (ASHM) using the observed VTEC at 12 GPS stations: KMITL station and 11 stations of DPT as shown in Figure 4.4 and Table 4.1, on July 8, 2012 at 15LT with the maximum degree of three ($N=3$). Therefore, there are 16 coefficients of ASHM for VTEC calculation at the desired locations. Then the VTEC (EST VTEC) is calculated using the coefficients at the desired IPPs, which are referred from the original IPP latitude and longitude of the OBS VTEC. The OBS VTEC at original IPP latitude and longitude are shown in Figure 4.5 (a). The EST VTEC at the desired IPP#1 (at the original latitude - 1.25° and at the original longitude -2.5°) and at the desired IPP#2 (at the original latitude +1.25° and at the longitude +2.5°) are shown in Figure 4.5 (b) and (c), respectively. Afterwards, all EST VTECs (ALL VTEC) are shown in Figure 4.5 (d). It can be seen that the amount of VTEC is increased after calculating the VTEC at desired locations by the SH coefficients.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Figure 4.4 Location of 11 GPS stations of DPT.

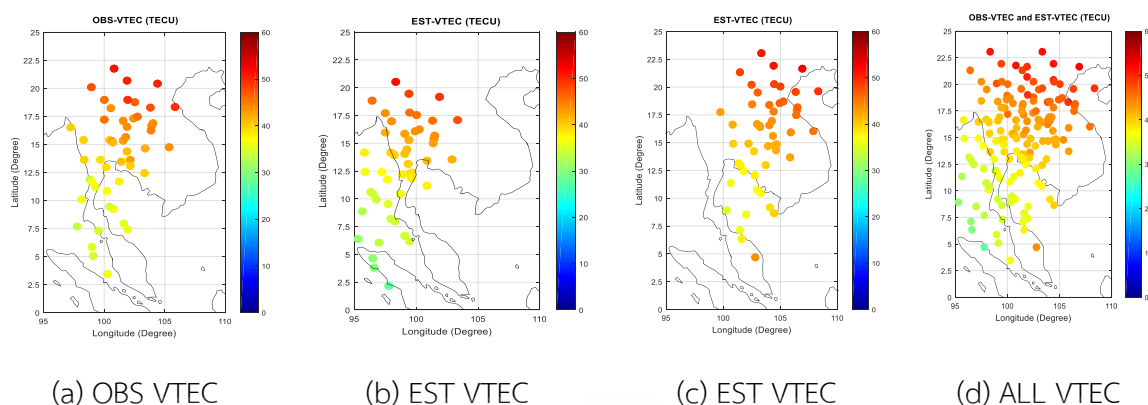
(<http://www.un-ggim-ap.org>)

Table 4.1 Location of the DPT stations in Thailand.

No.	Stations	Stations	Latitude (Degree)	Longitude (Degree)
1	Chanthaburi	(CHAN)	12.61	102.10
2	Chiangmai	(CHMA)	18.84	98.97
3	Nakhonratchasima	(NKRM)	14.99	102.12
4	Nakhonsawan	(NKSU)	15.69	100.11
5	Prachuapkhirikhan	(PJKK)	11.81	99.80
6	Sisaket	(SISK)	15.12	104.29
7	Songkla	(SOKA)	7.21	100.60
8	Suratthani	(SRTN)	9.13	99.33
9	Udonthani	(UDON)	17.41	102.78
10	Uttaradit	(UTTD)	17.63	100.10
11	Bangkok	(DPT9)	13.73	100.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



at the desired IPP#1 at the desired IPP#2

Figure 4.5 VTEC on July 8, 2012 at 15LT (a) OBS VTEC, (b) EST VTEC at the desired IPP#1 (c) EST VTEC at the desired IPP#2 and (d) ALL VTEC.

4.3 Bounding the estimated VTEC error

However, there is some error of the VTEC estimation when the maximum degree of ASHM is increased to 5, 7, 9, 11, 13 and 15, as shown in Figure 4.6. The calculated VTEC (EST VTEC) has strong peaks at some IPPs. We resolve this issue by setting a bound for the estimation error. Figure 4.7 shows the number of OBS VTEC (black line), median (blue line), maximum (red line), minimum (green line) and peak-to-peak of hourly values (purple line) of OBS VTEC recorded at 12 stations on July 8, 2012 at every hour. The boundary of EST VTEC is set to be the median of OBS VTEC at each time $\pm 50\%$ as shown in black dash lines in Figure 4.8. The results after the EST VTEC (blue line) is bounded is ESB VTEC (black line) as shown in Figure 4.9. The error of the EST VTEC is bounded and the number of the estimated VTEC is decreased to be ESB VTEC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

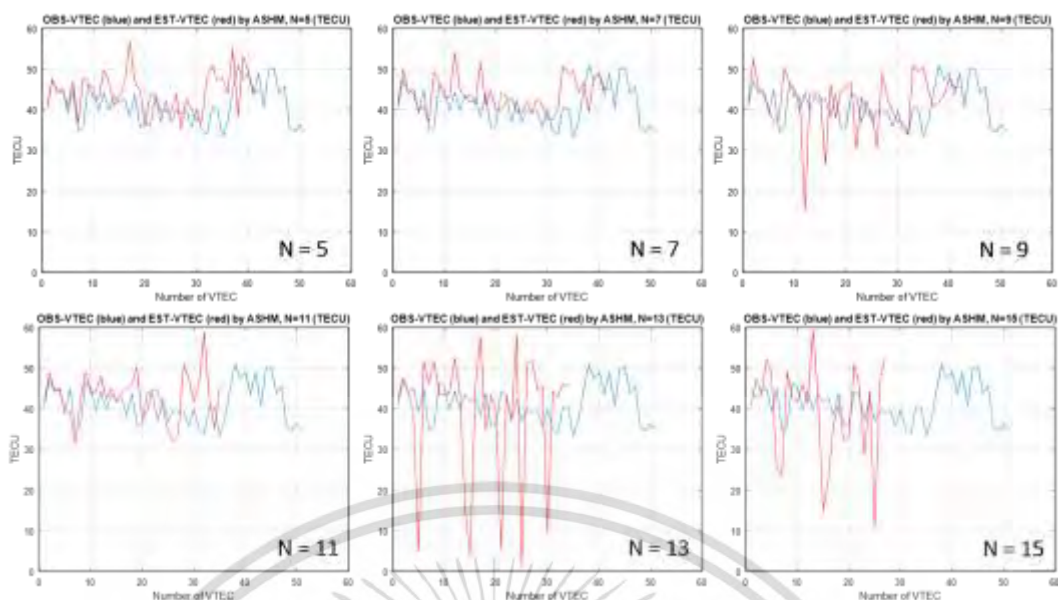


Figure 4.6 OBS VTEC (blue line) and EST VTEC (red line) by ASHM with the maximum degree of 5, 7, 9, 11, 13 and 15.

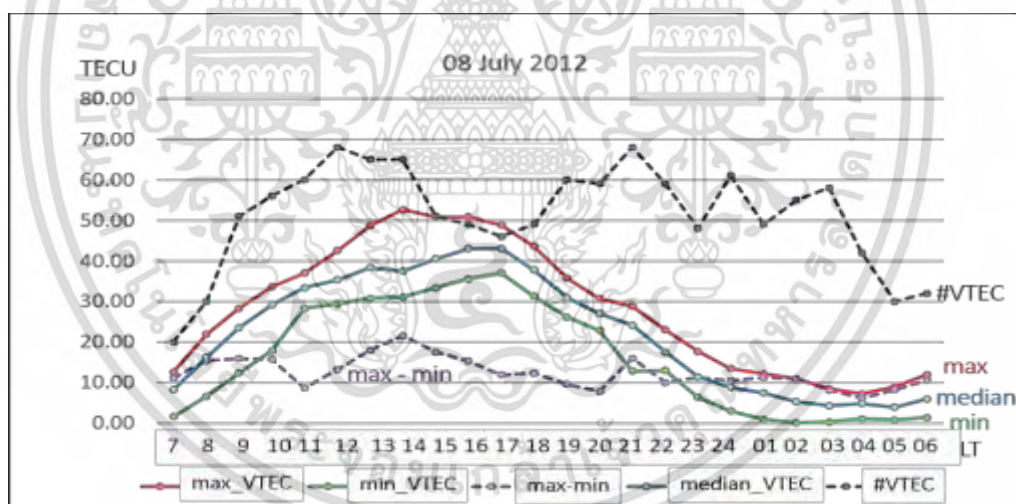


Figure 4.7 Hourly median, maximum, minimum, peak-to-peak and number of OBS VTEC recorded at 12 stations on July 8, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

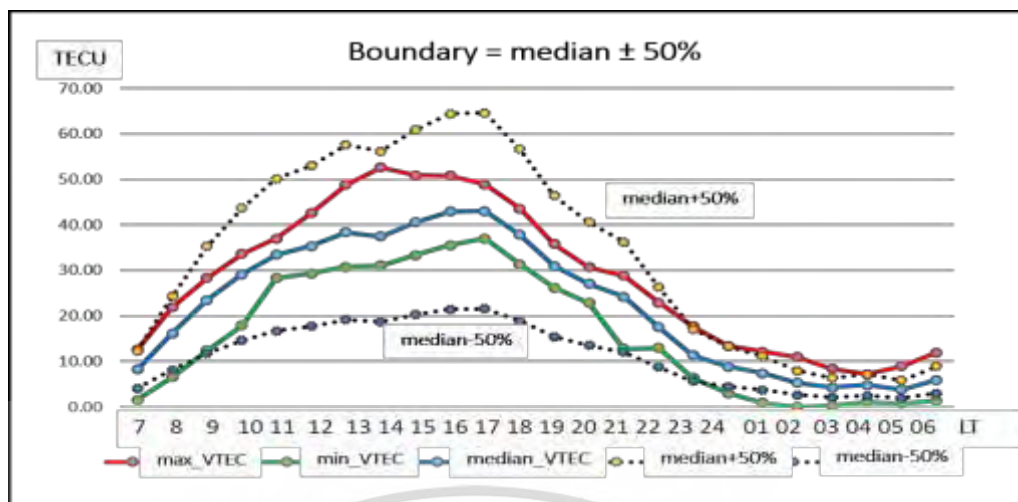


Figure 4.8 Error bound for VTEC calculation by ASHM.

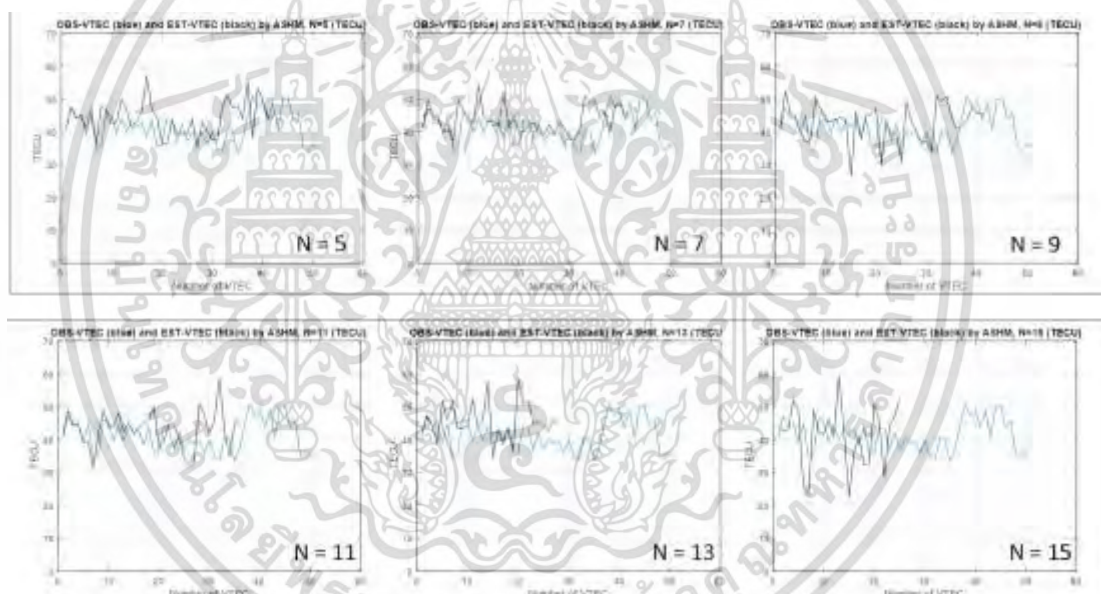


Figure 4.9 OBS VTEC (blue line) and EST VTEC (black line) by ASHM with the maximum degree of 5, 7, 9, 11, 13 and 15.

Figure 4.10 depicts (a) the 51 OBS VTECs observed from 12 stations on July 8, 2012 at 15LT, (b) the 51 EST VTEC from the ASHM ($N=3$) at the original IPP of OBS VTEC $+1.25^\circ$ and $+1.25^\circ$ in latitude and longitude, respectively and (c) the 42 ESB VTEC from the ASHM ($N=3$) with the boundary equal \pm median 50%. The results show that after

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bounding the calculation error, the ESB VTEC values is comparable to the OBS VTEC than the EST VTEC.

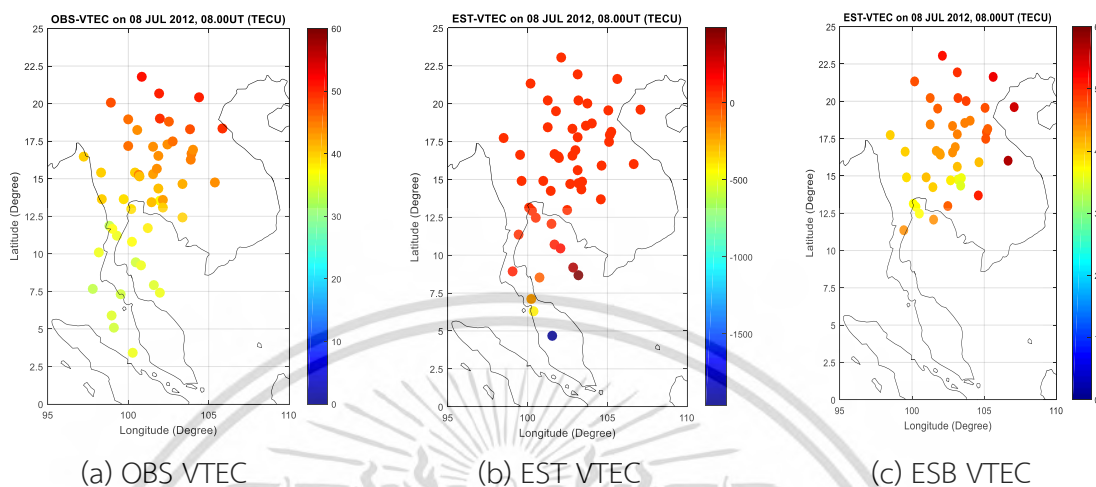


Figure 4.10 OBS VTEC, EST VTEC and ESB VTEC on July 8, 2012, 15LT.

4.4 VTEC calculation by ASHM

Because the number of the calculated VTEC is decreased after bounding the error, the calculation locations are added for each time. We increase the desired IPPs to be 4 locations: the original IPP of OBS VTEC $\pm 1.25^\circ$ in latitude and longitude before bounding the error bound (median $\pm 50\%$) as shown in Figure 4.11. Consequently, the number of VTEC is increased to be 255 (number of ESB VTEC at 4 IPPs and OBS VTEC). After that we calculate the median of all VTECs (ALL VTEC) with the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ (ESG VTEC) and plot a 2D map of ESG VTEC, as shown in Figure 4.12. The results confirm that the VTEC calculation by ASHM gives a more effective VTEC map than using only the observed VTEC.

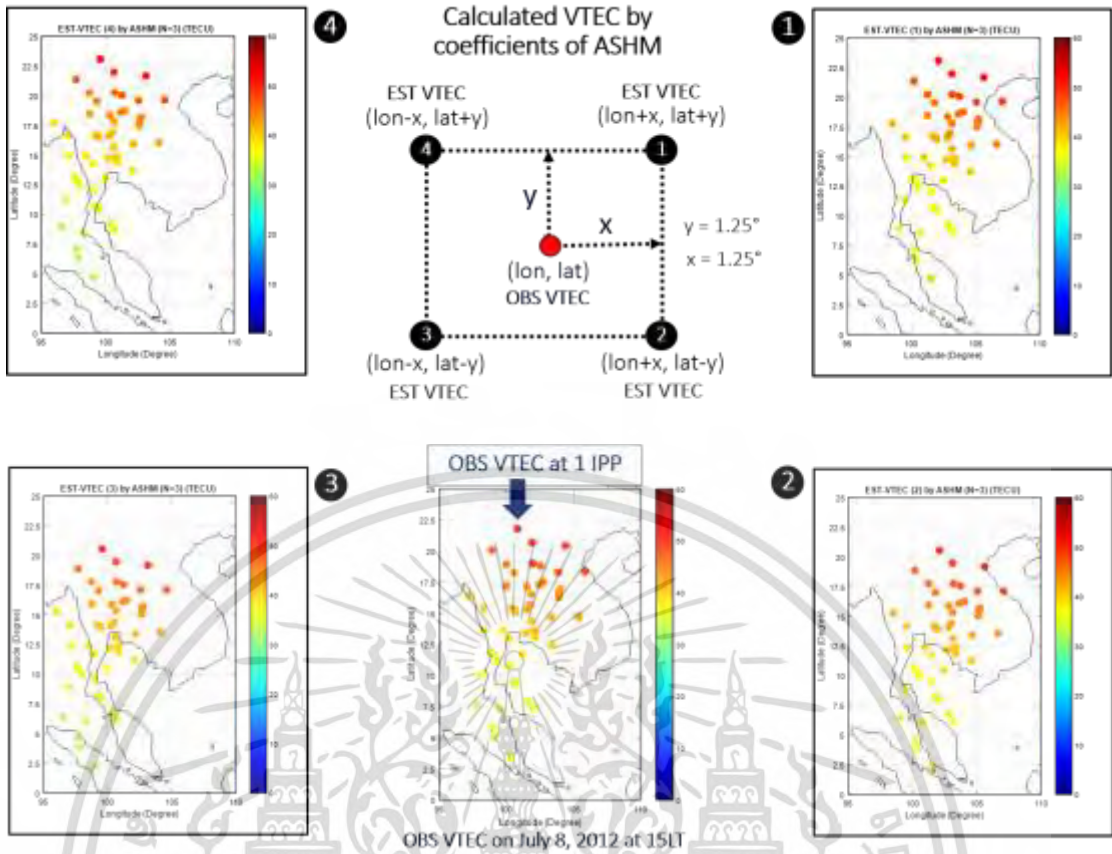
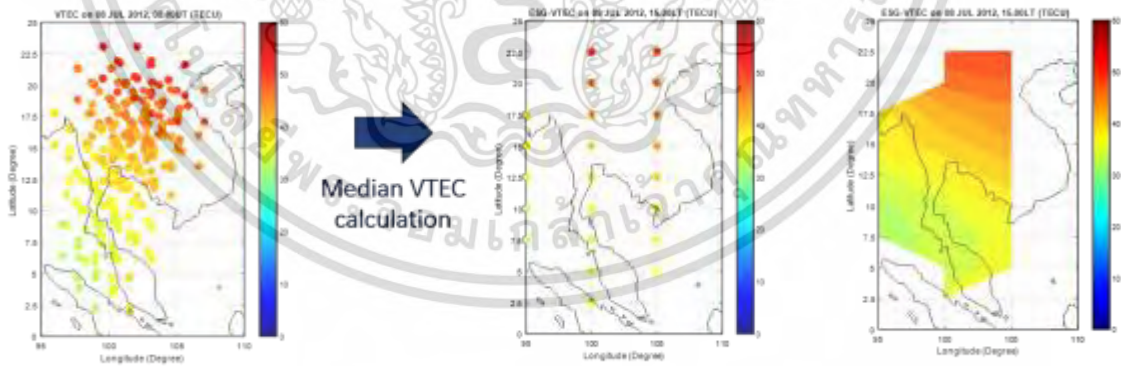


Figure 4.11 OBS VTEC and EST VTEC at 4 desired locations.



(a) ALL VTEC

(b) ESG VTEC

(c) ESG VTEC map

Figure 4.12 ALL VTEC, ESG VTEC and ESG VTEC map on July 8, 2012, 15LT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Moreover, we change the spatial resolution for improving the VTEC map as shown in Figure 4.13. The results show that the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ and $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ give the comparable resolutions of 2D ESG VTEC map over Thailand on July 8, 2012, 15LT.

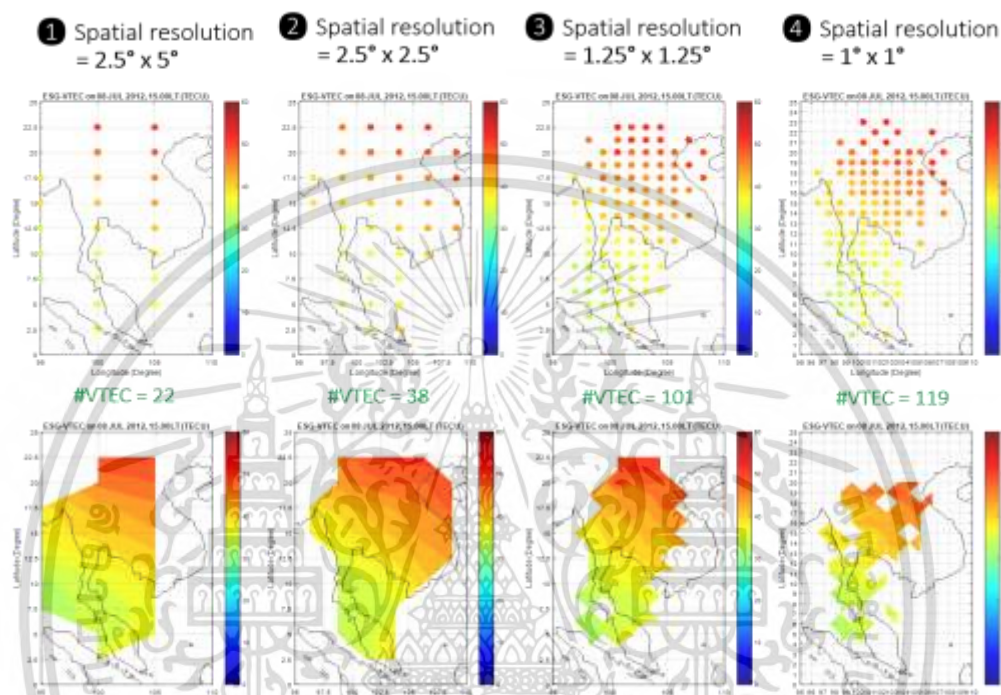


Figure 4.13 ESG VTEC map comparison between the spatial resolution of (a) $2.5^\circ \times 5^\circ$ (b) $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (c) $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ and (d) $1^\circ \times 1^\circ$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER 5

LATITUDE-DEPENDENT FACTOR

Although the data aggregation between the observed VTEC and the estimated VTEC of IRI model, and calculated VTEC of IGS's IONEX can expand the regional VTEC map, the discrepancy of both VTECs should be decreased before aggregation and mapping. Therefore, in this chapter, the latitude-dependent factor (LDF) is proposed for adjusting the VTEC from the IRI-2012 model and the IONEX data of IGS.

5.1 Latitude-dependent factor

The flow chart of proposed methodology for regional vertical total electron content (VTEC) mapping is shown in Figure 5.1. Firstly, the slant TEC (STEC) at each station is determined from the measured GPS data recorded in the receiver independent exchange format (RINEX) file. Both of the receiver and satellite biases are removed from the STEC before converting to VTEC using the mapping function. Next, the VTEC from all stations are observed at time t with the temporal resolution of 2 hours (OBS VTEC). Then the OBS VTECs on each grid are calculated the median value (MED VTEC) with the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively. On the other hand, the VTEC estimation of IRI-2012 model (IRI VTEC) is downloaded with the same resolutions for calculating the proposed latitude-dependent factor (LDF). After that, the IRI VTEC is adjusted by the LDF before aggregating with the MED VTEC. Not only this aggregated VTEC (AGG VTEC) is mapped for showing the behaviors and characteristics of ionosphere over Thailand, it is used as the alternative input of the adjusted spherical harmonic model (ASHM) for coefficient calculation. The coefficient of ASHM is used to calculate the VTEC at desired locations over Thailand.

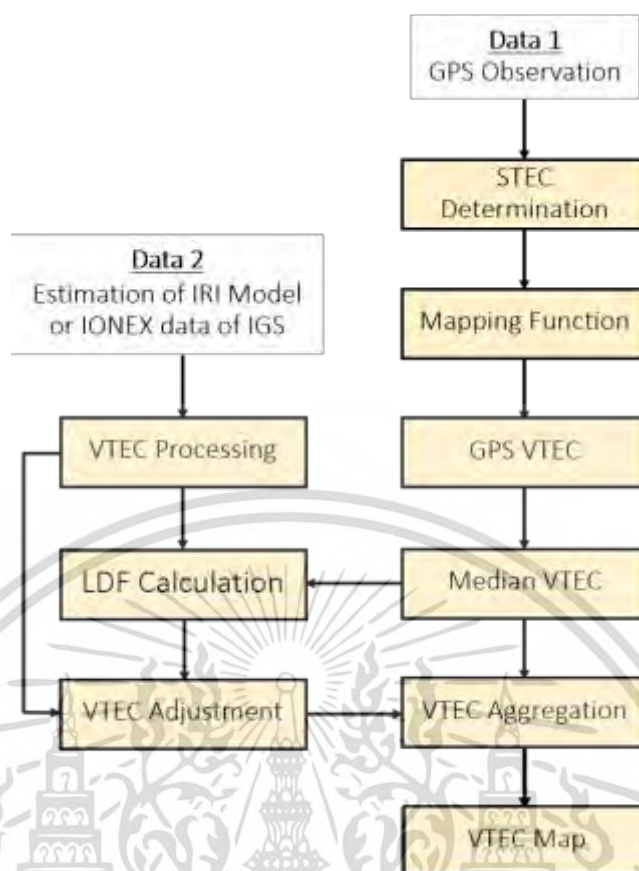
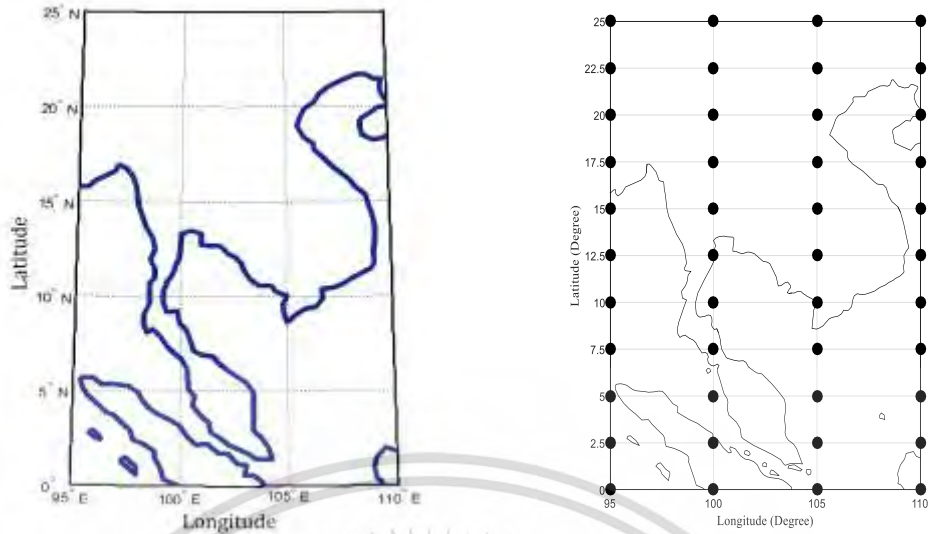


Figure 5.1 Flow chart of the proposed methodology for creating regional VTEC map.

5.2 VTEC grid of Thailand

The geographic area of Thailand is from 0° to 25° north in latitude and from 95° east to 110° east in longitude, which is divided into the spatial resolution of $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$ in latitude and longitude, respectively, as shown in Figure 5.2.



(a) geographic area

(b) spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$

Figure 5.2 Thailand with (a) geographic area (b) grids with a spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively.

At the observation time t , the matrix of observed VTEC (\mathbf{MED}_{ij}), the estimated VTEC of IRI-2012 model (\mathbf{IRI}_{ij}) and the calculated VTEC from the IONEX data of IGS (\mathbf{IGS}_{ij}) at the i^{th} latitude and the j^{th} longitude can be written as

$$\mathbf{MED} = \begin{bmatrix} \mathbf{MED}_{1,1} & \mathbf{MED}_{1,2} & \cdots & \mathbf{MED}_{1,j} \\ \mathbf{MED}_{2,1} & \mathbf{MED}_{2,2} & \cdots & \mathbf{MED}_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{MED}_{i,1} & \mathbf{MED}_{i,2} & \cdots & \mathbf{MED}_{i,j} \end{bmatrix}_{ixj}, \quad (5.1)$$

$$\mathbf{IRI} = \begin{bmatrix} \mathbf{IRI}_{1,1} & \mathbf{IRI}_{1,2} & \cdots & \mathbf{IRI}_{1,j} \\ \mathbf{IRI}_{2,1} & \mathbf{IRI}_{2,2} & \cdots & \mathbf{IRI}_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{IRI}_{i,1} & \mathbf{IRI}_{i,2} & \cdots & \mathbf{IRI}_{i,j} \end{bmatrix}_{ixj} \quad (5.2)$$

and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{IGS} = \begin{bmatrix} \text{IGS}_{1,1} & \text{IGS}_{1,2} & \cdots & \text{IGS}_{1,j} \\ \text{IGS}_{2,1} & \text{IGS}_{2,2} & \cdots & \text{IGS}_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{IGS}_{i,1} & \text{IGS}_{i,2} & \cdots & \text{IGS}_{i,j} \end{bmatrix}_{ixj} \quad (5.3)$$

The latitude-dependent factor matrices: $\mathbf{LDF}_{\text{IRI}}$ and $\mathbf{LDF}_{\text{IGS}}$ are the median of the proportion between the **MED** and the **IRI**, and the **IGS** at each latitude i , respectively, i.e.,

$$\mathbf{LDF}_{\text{IRI}} = \begin{bmatrix} \text{median} \left(\frac{\text{IRI}_{1,1}}{\text{MED}_{1,1}}, \frac{\text{IRI}_{1,2}}{\text{MED}_{1,2}}, \dots, \frac{\text{IRI}_{1,j}}{\text{MED}_{1,j}} \right) \\ \text{median} \left(\frac{\text{IRI}_{2,1}}{\text{MED}_{2,1}}, \frac{\text{IRI}_{2,2}}{\text{MED}_{2,2}}, \dots, \frac{\text{IRI}_{2,j}}{\text{MED}_{2,j}} \right) \\ \vdots \\ \text{median} \left(\frac{\text{IRI}_{i,1}}{\text{MED}_{i,1}}, \frac{\text{IRI}_{i,2}}{\text{MED}_{i,2}}, \dots, \frac{\text{IRI}_{i,j}}{\text{MED}_{i,j}} \right) \end{bmatrix}_{ix1} = \begin{bmatrix} \text{LDF}_1 \\ \text{LDF}_2 \\ \vdots \\ \text{LDF}_i \end{bmatrix}_{ix1} \quad (5.4)$$

and

$$\mathbf{LDF}_{\text{IGS}} = \begin{bmatrix} \text{median} \left(\frac{\text{IGS}_{1,1}}{\text{MED}_{1,1}}, \frac{\text{IGS}_{1,2}}{\text{MED}_{1,2}}, \dots, \frac{\text{IGS}_{1,j}}{\text{MED}_{1,j}} \right) \\ \text{median} \left(\frac{\text{IGS}_{2,1}}{\text{MED}_{2,1}}, \frac{\text{IGS}_{2,2}}{\text{MED}_{2,2}}, \dots, \frac{\text{IGS}_{2,j}}{\text{MED}_{2,j}} \right) \\ \vdots \\ \text{median} \left(\frac{\text{IGS}_{i,1}}{\text{MED}_{i,1}}, \frac{\text{IGS}_{i,2}}{\text{MED}_{i,2}}, \dots, \frac{\text{IGS}_{i,j}}{\text{MED}_{i,j}} \right) \end{bmatrix}_{ix1} = \begin{bmatrix} \text{LDF}_1 \\ \text{LDF}_2 \\ \vdots \\ \text{LDF}_i \end{bmatrix}_{ix1} \quad (5.5)$$

In case there is no median observed VTEC in the grid, the \mathbf{LDF}_i is equal to the median of the median of \mathbf{LDF} . Then the modelled IRI VTEC or IGS VTEC will be adjusted by the $\mathbf{LDF}_{\text{IRI}}$ or $\mathbf{LDF}_{\text{IGS}}$ to obtain the **IRF** or **IGF** as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{IRF} = \begin{bmatrix} \frac{\text{IRI}_{1,1}}{\text{LDF}_1} & \frac{\text{IRI}_{1,2}}{\text{LDF}_1} & \dots & \frac{\text{IRI}_{1,j}}{\text{LDF}_1} \\ \frac{\text{IRI}_{2,1}}{\text{LDF}_2} & \frac{\text{IRI}_{2,2}}{\text{LDF}_2} & \dots & \frac{\text{IRI}_{2,j}}{\text{LDF}_2} \\ \vdots & & & \\ \frac{\text{IRI}_{i,1}}{\text{LDF}_i} & \frac{\text{IRI}_{i,2}}{\text{LDF}_i} & \dots & \frac{\text{IRI}_{i,j}}{\text{LDF}_i} \end{bmatrix}_{ixj} = \begin{bmatrix} \text{IRF}_{1,1} & \text{IRF}_{1,2} & \dots & \text{IRF}_{1,j} \\ \text{IRF}_{2,1} & \text{IRF}_{2,2} & \dots & \text{IRF}_{2,j} \\ \vdots & & & \\ \text{IRF}_{i,1} & \text{IRF}_{i,2} & \dots & \text{IRF}_{i,j} \end{bmatrix}_{ixj} \quad (5.6)$$

and

$$\mathbf{IGF} = \begin{bmatrix} \frac{\text{IGS}_{1,1}}{\text{LDF}_1} & \frac{\text{IGS}_{1,2}}{\text{LDF}_1} & \dots & \frac{\text{IGS}_{1,j}}{\text{LDF}_1} \\ \frac{\text{IGS}_{2,1}}{\text{LDF}_2} & \frac{\text{IGS}_{2,2}}{\text{LDF}_2} & \dots & \frac{\text{IGS}_{2,j}}{\text{LDF}_2} \\ \vdots & & & \\ \frac{\text{IGS}_{i,1}}{\text{LDF}_i} & \frac{\text{IGS}_{i,2}}{\text{LDF}_i} & \dots & \frac{\text{IGS}_{i,j}}{\text{LDF}_i} \end{bmatrix}_{ixj} = \begin{bmatrix} \text{IGF}_{1,1} & \text{IGF}_{1,2} & \dots & \text{IGF}_{1,j} \\ \text{IGF}_{2,1} & \text{IGF}_{2,2} & \dots & \text{IGF}_{2,j} \\ \vdots & & & \\ \text{IGF}_{i,1} & \text{IGF}_{i,2} & \dots & \text{IGF}_{i,j} \end{bmatrix}_{ixj} \quad (5.7)$$

Finally, some of **IRF** or **IGF** will be aggregated into the vacant grids of **MED** for expanding the map over Thailand.

5.3 Observational data

Refer to the observed VTEC on July 8, 2012 (DOY190) from 12 GPS stations (CHAN, CHMA, NKRM, NKSW, PJRK, SISK, SOKA, SRTN, UDON, UTTD, DPT and KMIT) in Thailand in Chapter 4, the VTEC values are investigated in 4 periods: daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT) as shown in Table 5.1 and Figure 5.3. The results show that high level of OBS VTEC occurs during daytime and before sunset and low level of OBS VTEC occurs during nighttime and before sunrise, respectively. It confirms that the level and the number of GPS VTEC depend on the observational periods due to the level of solar activity.

Table 5.1 Observational periods and times.

Observational period	Observational time	
Daytime	11LT	04UT
Before sunset	17LT	10UT
Nighttime	23LT	16UT
Before sunrise	05LT	22UT

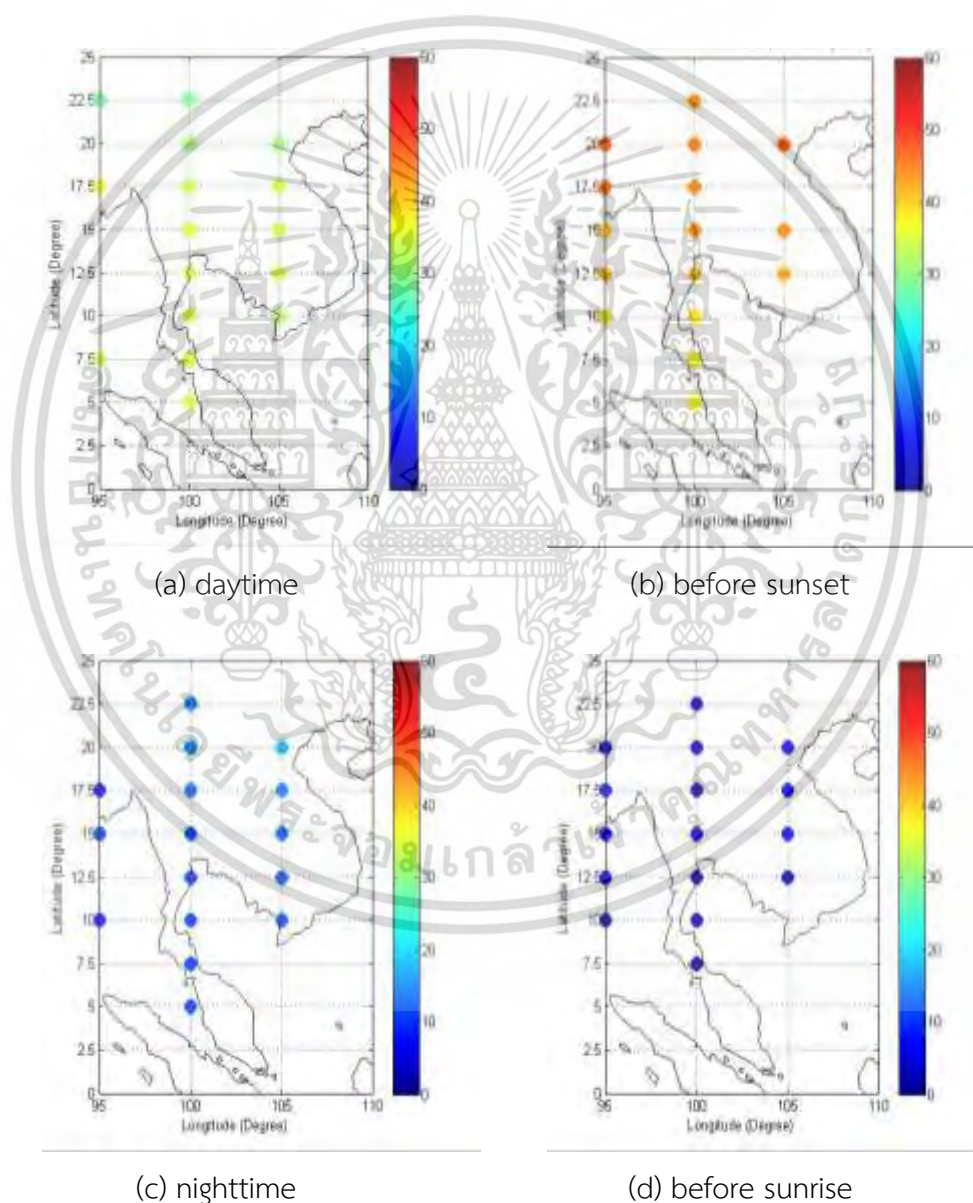


Figure 5.3 MED VTEC from 12 stations over Thailand on July 8, 2012 in (a) daytime, (b) before sunset, (c) nighttime and (d) before sunrise.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

At time t , the observed OBS VTEC of all stations used to determine the median value in each grid are shown in Figure 5.4 (a). Figure 5.4 (b) and (c) shows the median observed VTEC and its map, respectively.

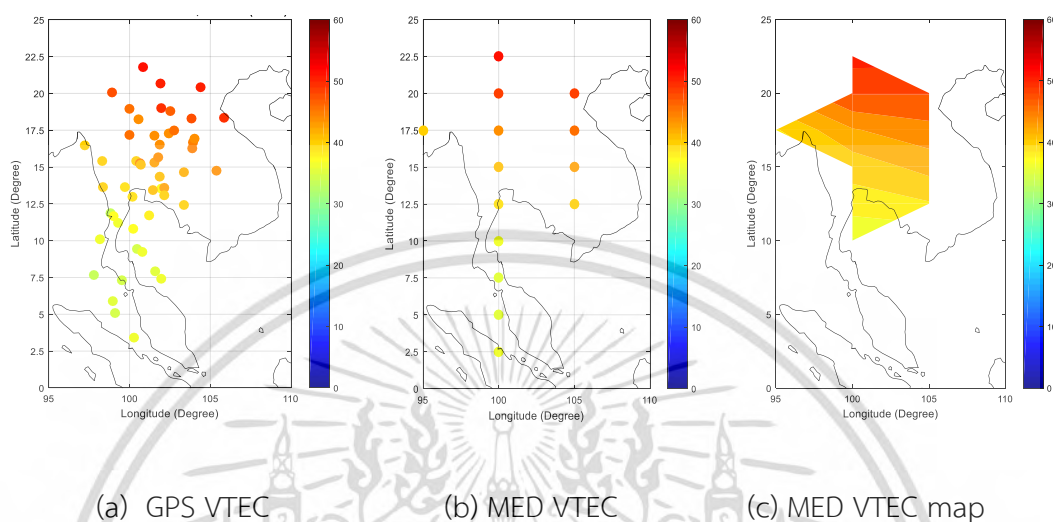


Figure 5.4 VTEC from 12 stations in Thailand on July 8, 2012 at 15LT (a) OBS VTEC, (b) MED VTEC and (c) MED VTEC map.

Due to the sparse GPS stations in Thailand, the observed VTEC map cannot cover all areas of Thailand. Therefore, the TEC data or predictions of the international ionospheric models such as the IONEX data of IGS or the estimation of the IRI model, can help expand this regional TEC map, as will be explained in the next section.

5.4 IGS VTEC map of Thailand

Figure 5.5 shows the daily global ionosphere maps (GIMs) on July 8, 2012 (DOY190) at 17UT which is generated from the Center for Orbit Determination in Europe (CODE) using the GPS data from over 200 stations of the International GNSS Service (IGS) and other institutions. The regional VTEC map of Thailand (0° - 25° N in latitude and 95° - 110° E in longitude) can be produced from the IONEX data of the IGS for studying ionospheric characteristics at regional scale as shown in Figure 5.5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

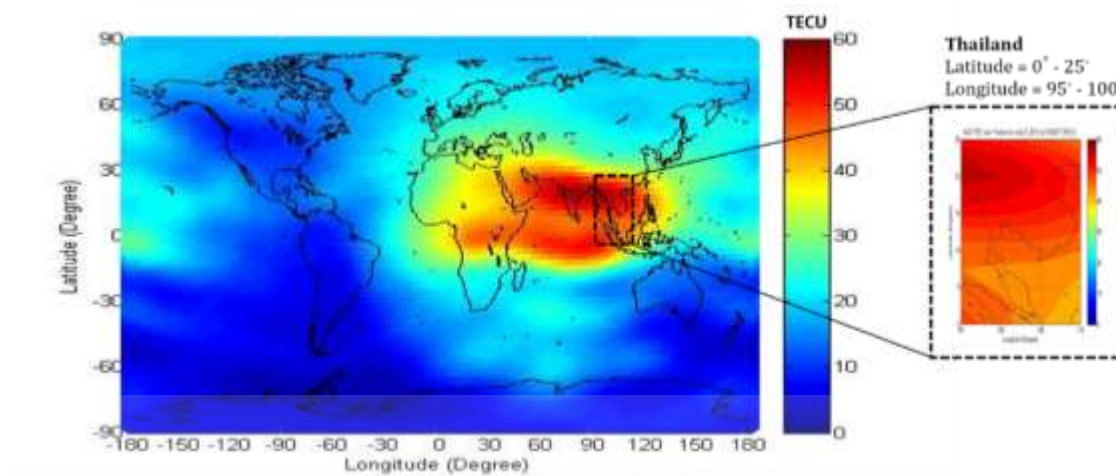


Figure 5.5 Regional VTEC map over Thailand by CODE on July 8, 2012 (DOY190) at 17LT.

In this work, the GIMs on July 8, 2012 (DOY190) at every 2 hours are shown in Figure 5.6. These global VTEC maps show the ionospheric characteristic in global scale that the VTEC level depends on the location and time. Figure 5.7 (a) and (b) show the regional IGS VTEC of Thailand on July 8, 2012 at 15LT with the spatial resolution $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude and its map, respectively. The maps of IGS VTEC for Thailand region on July 8, 2012 at every 2 hours are shown in Figure 5.8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

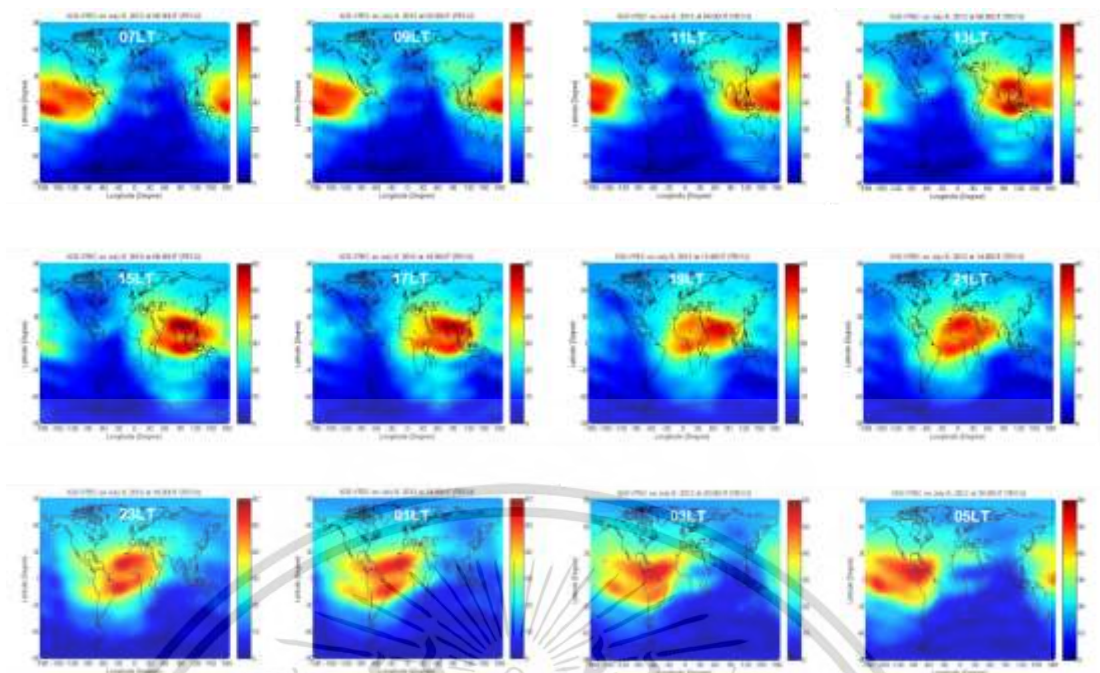


Figure 5.6 Global Ionospheric Maps (GIMs) by CODE on July 8, 2012 (DOY190) at every 2 hours.

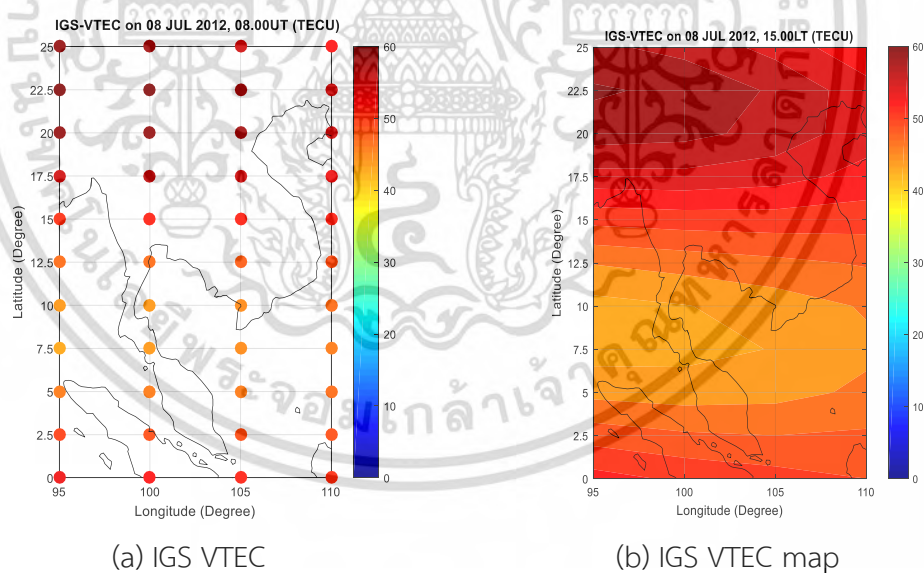


Figure 5.7 IGS VTEC on July 8, 2012 at 15:00LT (a) IGS VTEC (b) IGS VTEC map.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

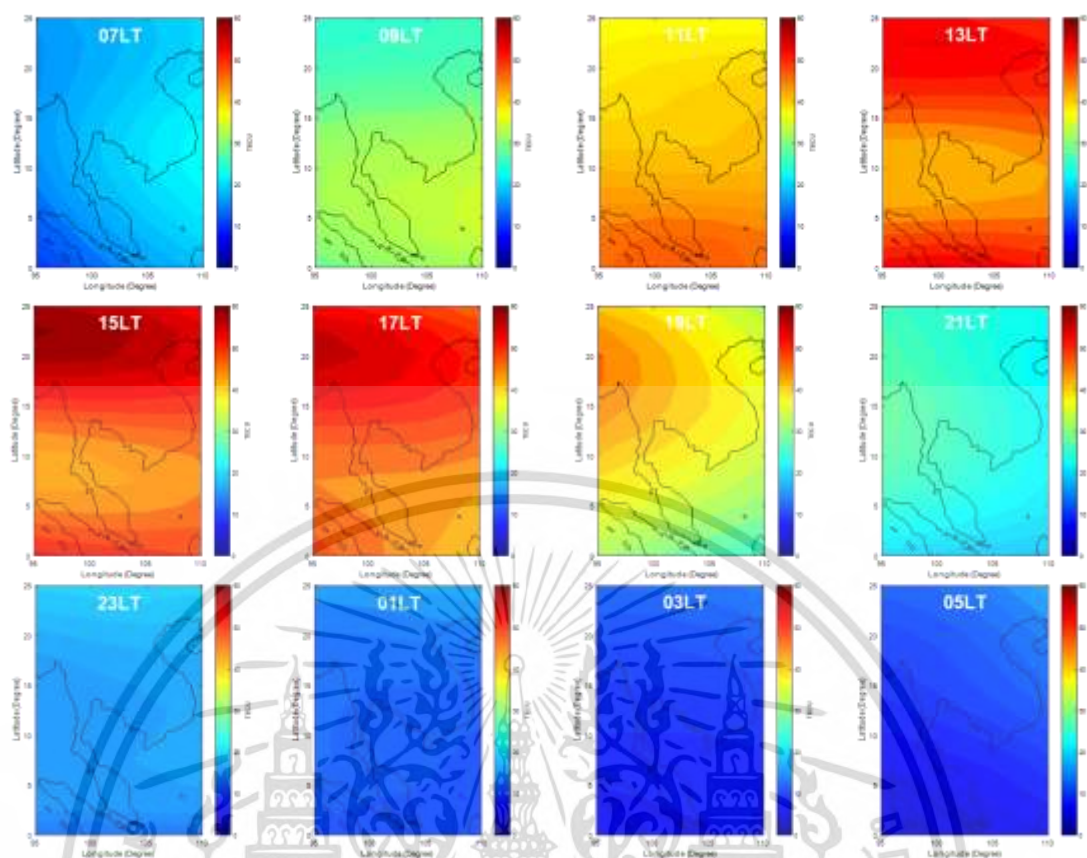


Figure 5.8 IGS VTEC maps over Thailand region on July 8, 2012 at every 2 hours.

5.5 IRI VTEC map of Thailand

Figure 5.9 shows the monthly median VTEC on July 8, 2012 at 12 stations in Thailand, as estimated by the IRI-2012 model when the upper boundary is 2,000 km, the highest boundary of the IRI model. The result shows that the IRI model gives the similar prediction trend in that the maximum TEC estimation is around 16LT to 17LT and the minimum value is at 05LT approximately. The comparison between the observed VTEC and the estimated VTEC of IRI model at 12 observation sites are shown in Figure 5.10. The results show that the IRI model gives similar trends for all stations.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

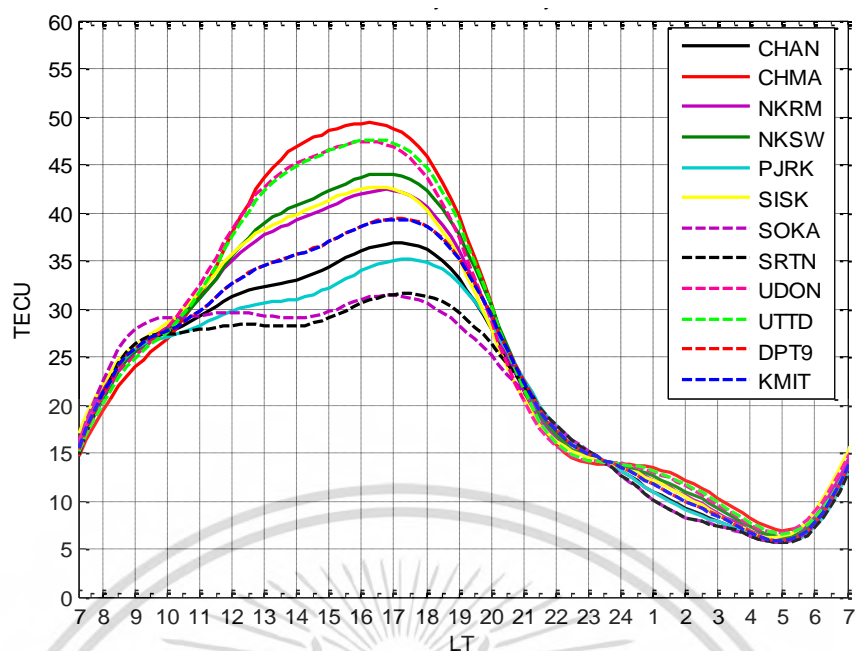


Figure 5.9 Monthly median VTEC estimation by IRI-2012 model on July 8, 2012.

The estimated VTEC of the IRI model at the grid over Thailand (IRI VTEC) on July 8, 2012 at 15LT with the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively and its map are shown in Figure 5.11 (a) and (b), respectively. The maps of the IRI VTEC for Thailand region at every 2 hours are shown in Figure 5.12.

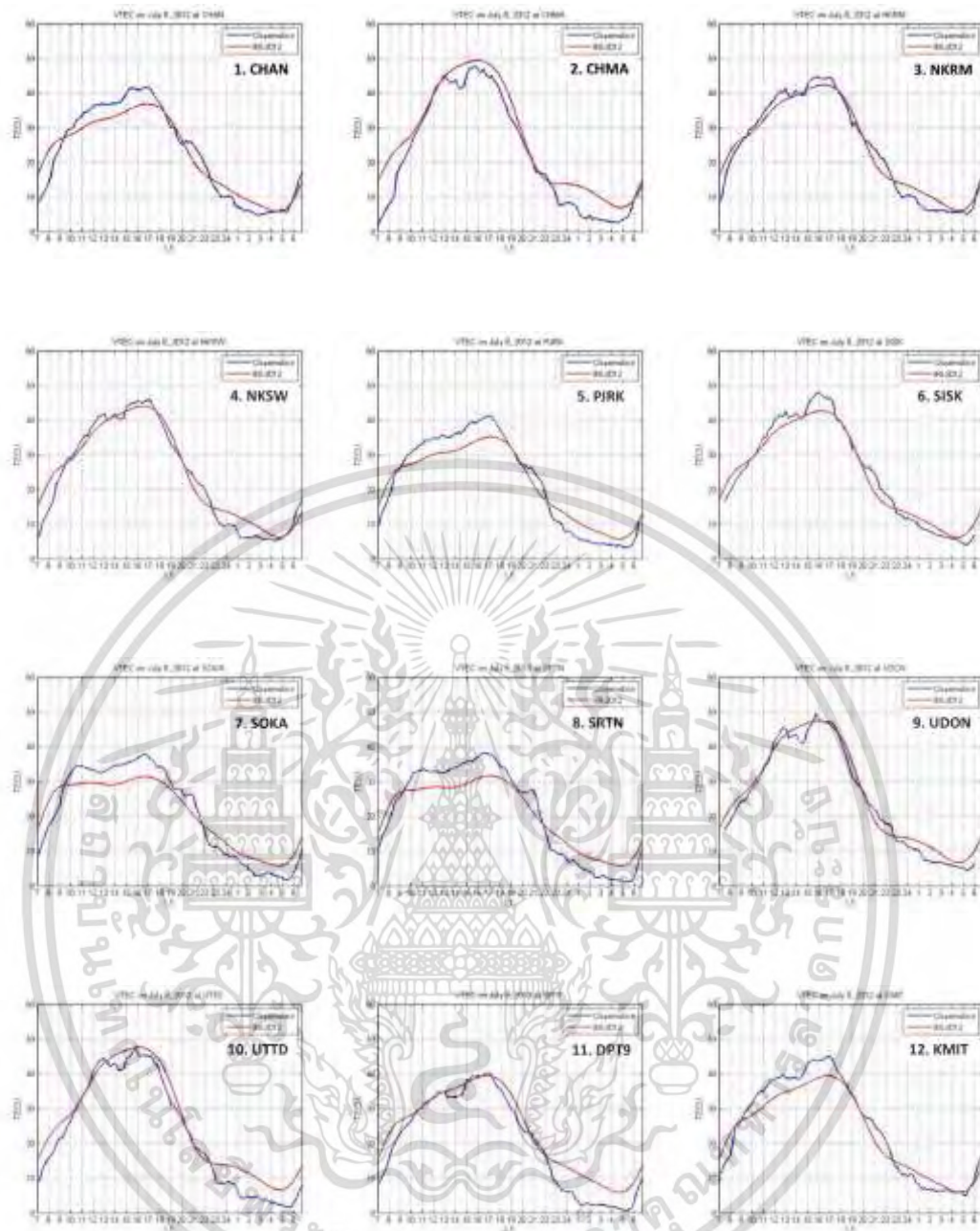


Figure 5.10 Comparison between the estimated VTEC of the IRI-2012 model and the observed VTEC at 12 stations in Thailand on July 8, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

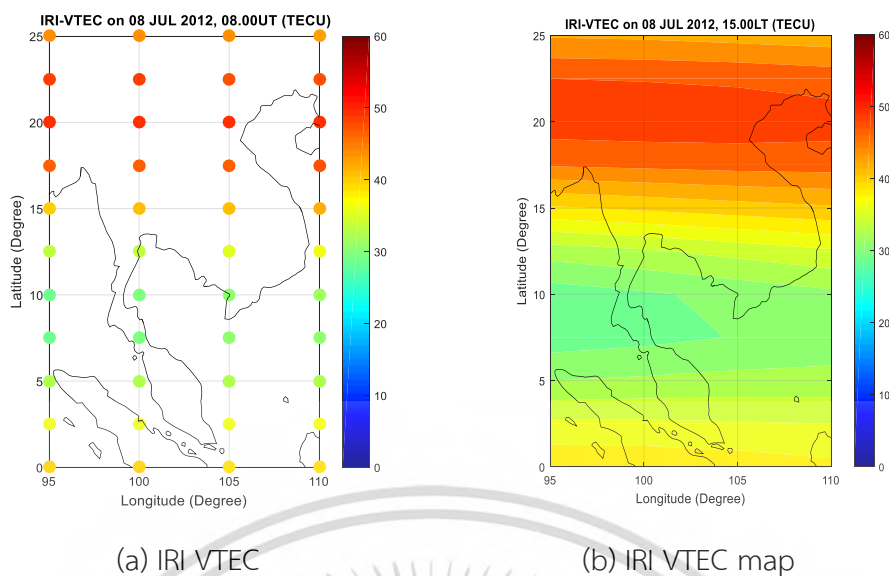


Figure 5.11 IRI VTEC on July 8, 2012 at 15LT (a) IRI VTEC (b) IRI VTEC map.

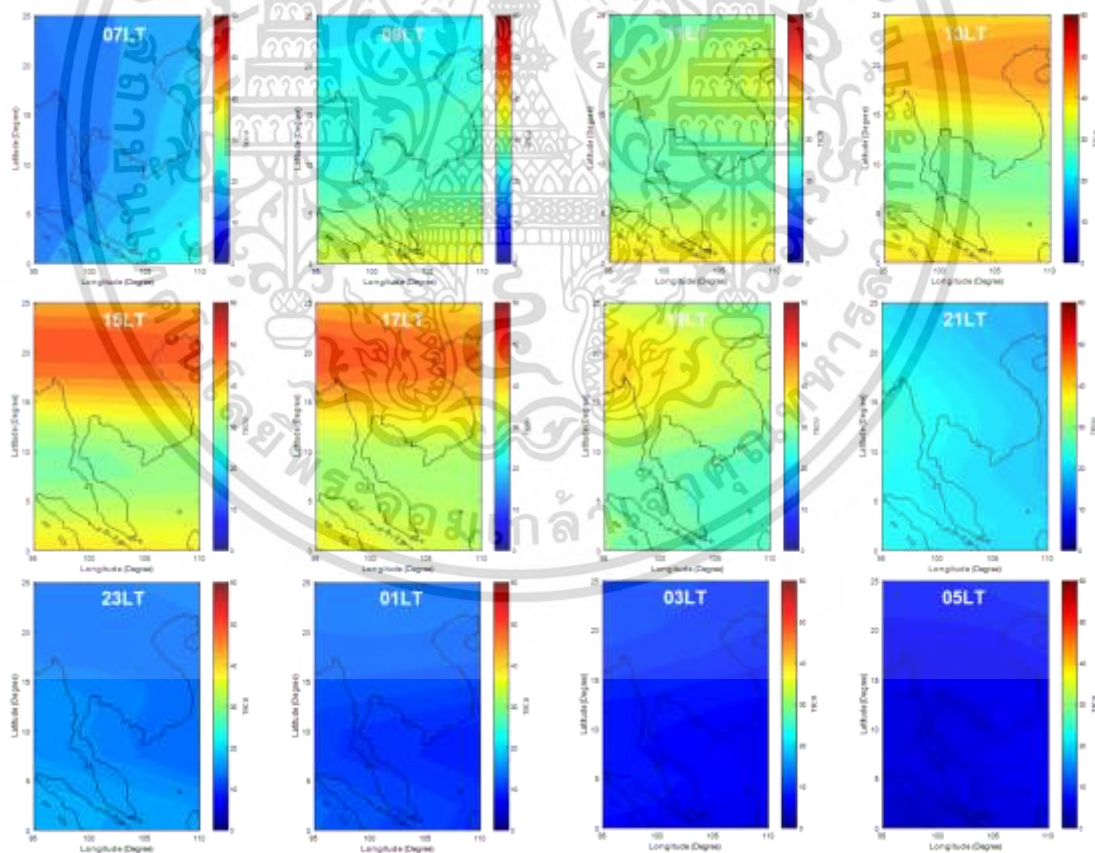


Figure 5.12 IRI VTEC maps over Thailand region on July 8, 2012 at every 2 hours.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 Comparison of VTEC map over Thailand

The comparison between the MED VTEC, IRI VTEC and IGS VTEC values and their corresponding maps on July 8, 2016 at 15LT with the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively, are shown in Figure 5.13 (a) – (c), respectively. The comparison results show that the MED VTEC map cannot cover Thailand area due to lack of observation data, whereas the IRI VTEC and IGS VTEC map can cover Thailand area. However, the IRI-2012 model gives the empirical VTEC value with the limit boundary of 2,000 km for electron content estimation (Bilitza et al., 2014b). Note that the IGS VTEC is observed at 20,200 km and recorded at GPS stations over the world in the IONEX files, the time resolution of 2 hours and spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively, are fixed. Therefore, the IRI model and IGS give the different VTEC values and maps from the observations.

Figure 5.14 shows the comparison of these three VTECs at 44 grids at 15LT. The IONEX file of the IGS gives higher VTEC value than the observation at all grids at this time. For the IRI model, the estimated VTEC is close to the observation at most grids. In addition, Figure 5.15 shows the VTEC comparison in 4 observational periods: daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT). The comparison results confirm that the IRI-2012 model gives the comparable VTEC to the observed VTEC, especially during daytime and before sunset. However, the IRI model overestimates the VTEC during the nighttime and before sunrise.

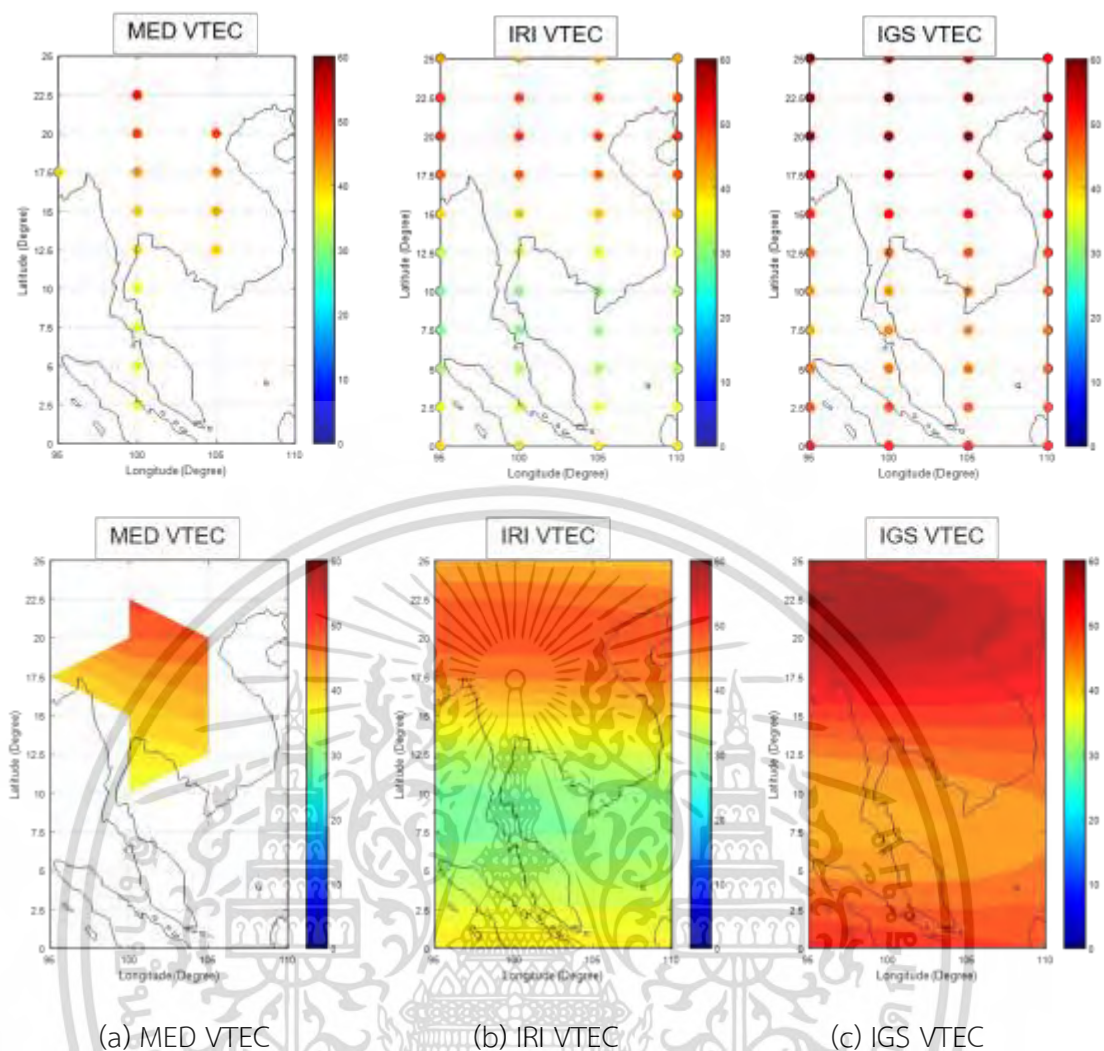


Figure 5.13 VTEC and 2D map comparison on July 8, 2012 at 15LT between (a) MED VTEC, (b) IRI VTEC and (c) IGS VTEC.

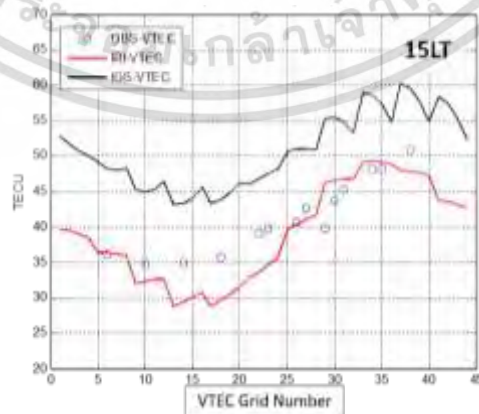


Figure 5.14 Comparison of the MED VTEC, IRI VTEC and IGS VTEC on July 8, 2012 at 15LT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

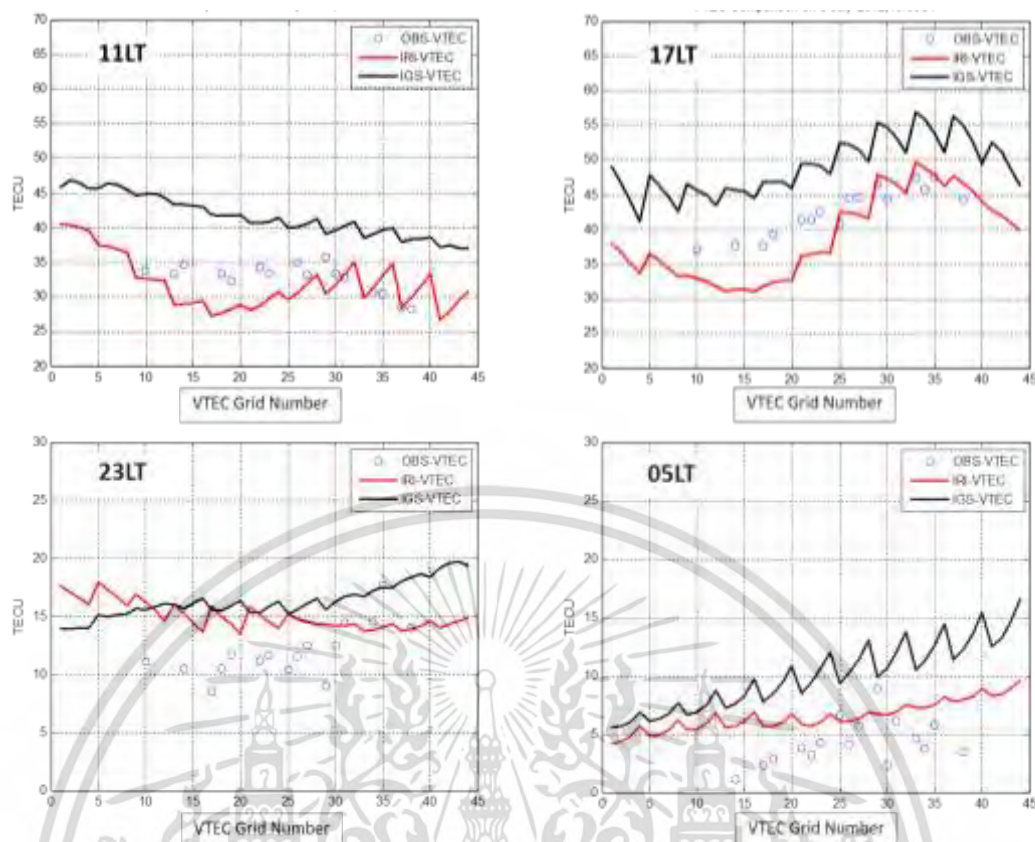


Figure 5.15 Same as Figure 5.14 but for daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT).

5.7 Aggregated VTEC map of Thailand

Due to the discrepancy between the observed VTEC, predicted VTEC of the IRI model and calculated VTEC from the IONEX data of the IGS, the latitude-dependent factor (LDF) is used to adjust the VTEC differences before aggregation.

Figure 5.16 and 5.17 show the data aggregation between the observed MED VTEC and the IRI VTEC with and without the proposed LDF_{IRI} , respectively, for mapping the VTEC on July 8, 2012 at 15LT. Also Figure 5.18 and 5.19 show the results of VTEC aggregation between the MED VTEC and the IGS VTEC with and without the LDF_{IGS} . The results show that the LDF can adjust the VTEC difference, especially the VTEC difference between the MED VTEC and IGS VTEC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

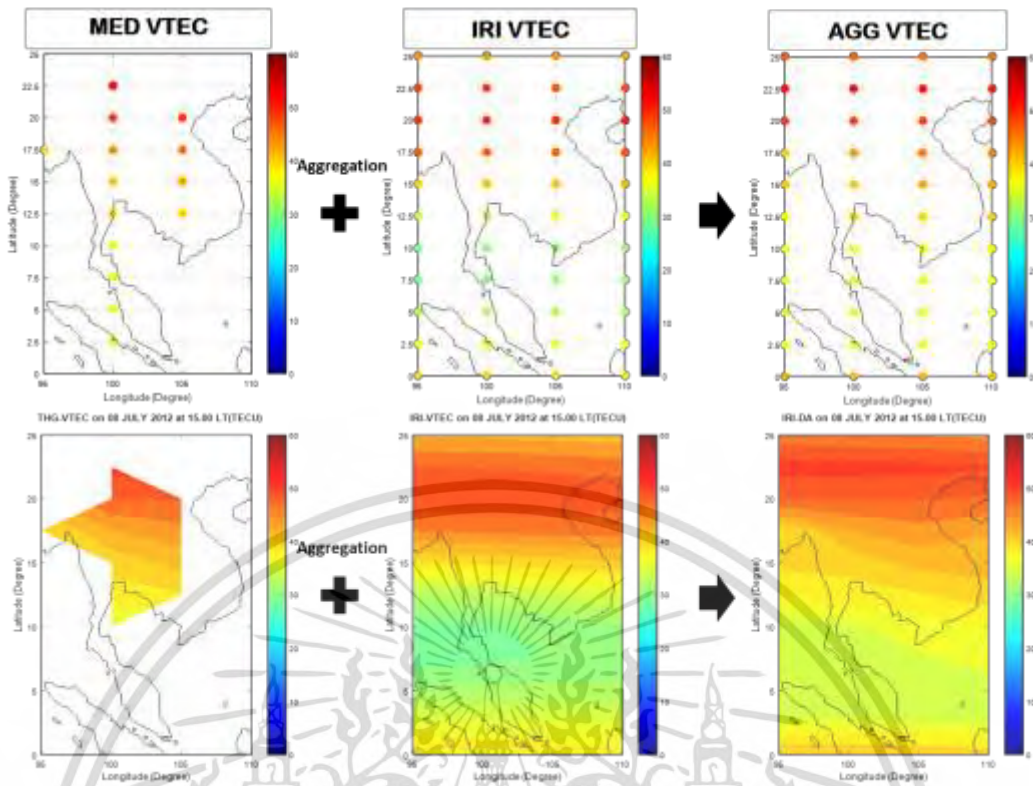


Figure 5.16 Data aggregation between MED VTEC and IRI VTEC with the LDF_{IRI} on July 8, 2012 at 15LT.

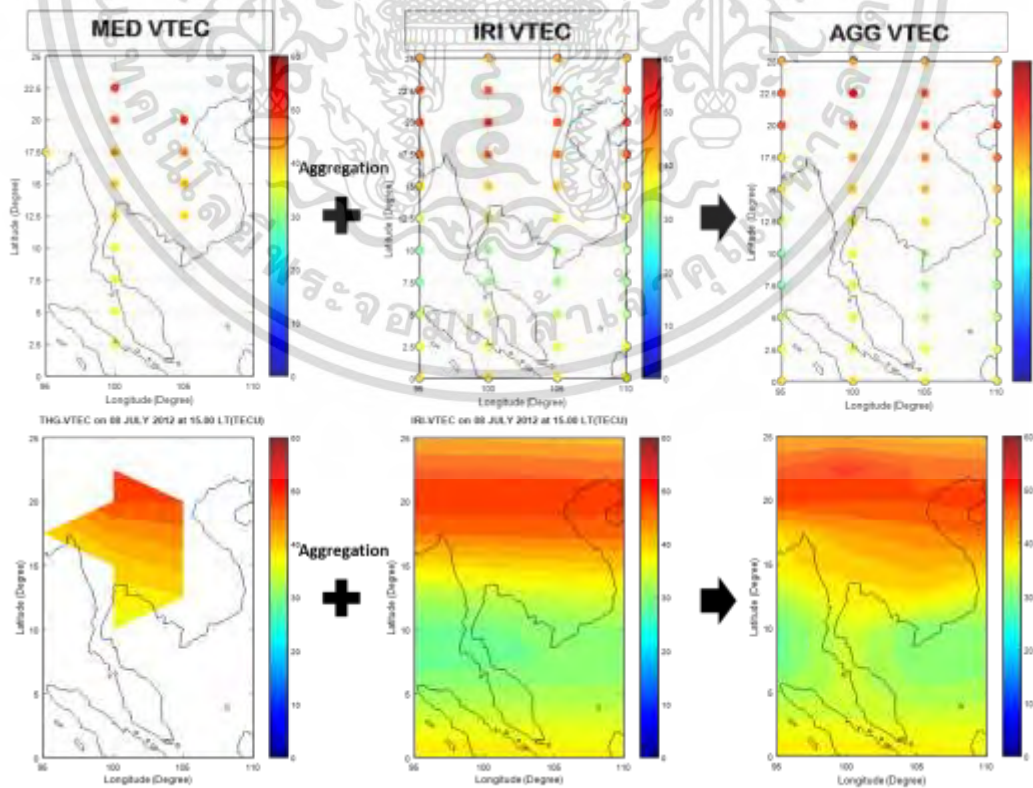


Figure 5.17 Same as Figure 5.16 but without the LDF_{IRI} .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

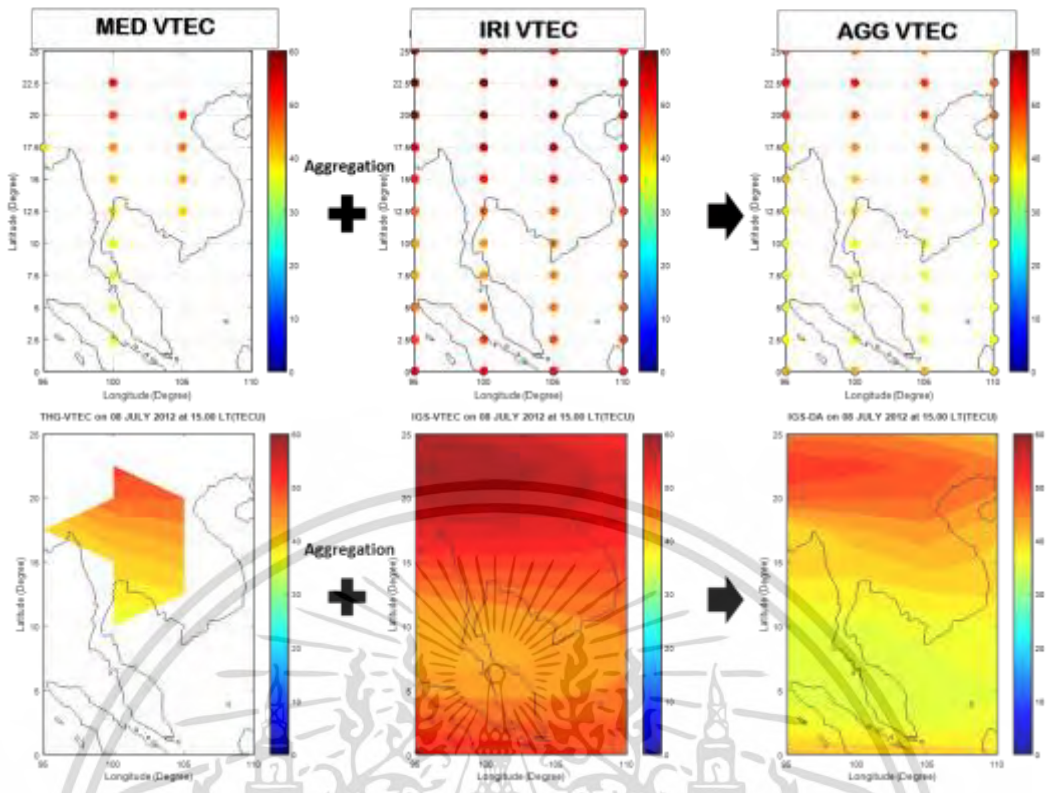


Figure 5.18 Data aggregation between MED VTEC and IGS VTEC with the LDF_{IGS} on July 8, 2012 at 15LT.

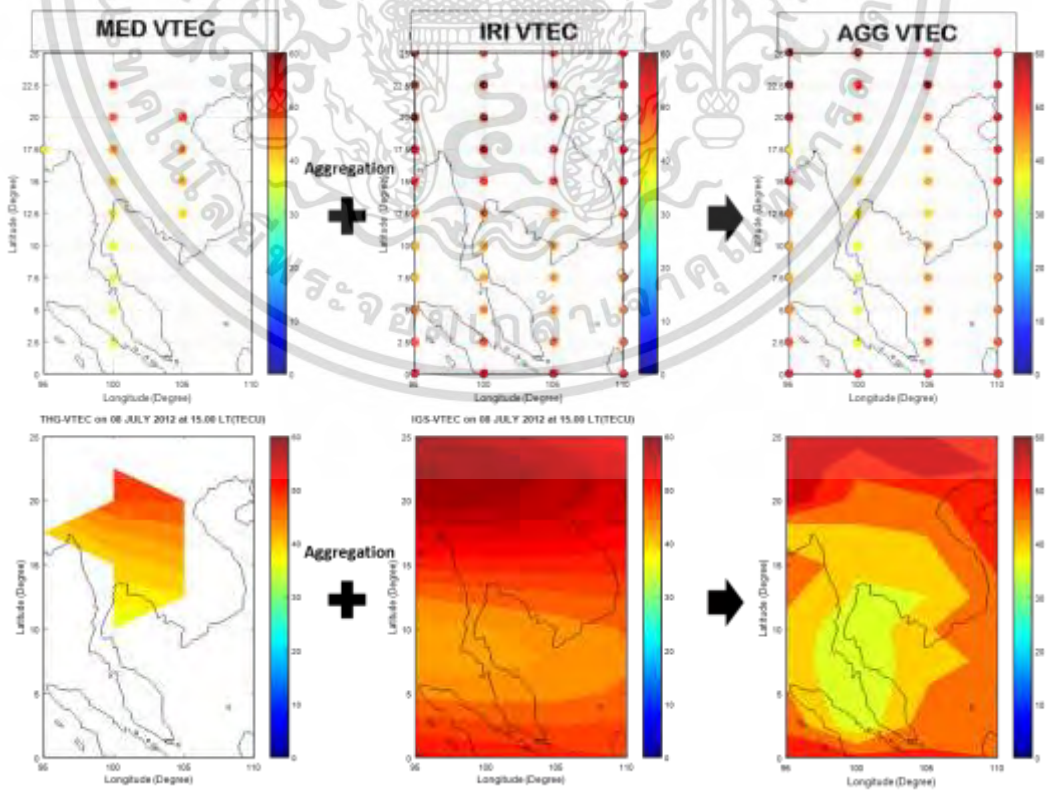


Figure 5.19 Same as Figure 5.18 but without the LDF_{IGS} .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figures 5.20 and 5.21 show the final VTEC map which is developed using the data aggregation between the MED VTEC, the IRI VTEC and the IGS VTEC together with the proposed LDF_{IRI} and LDF_{IGS} , respectively on July 8, 2012 at every 2 hours. These maps can indicate the ionospheric characteristic over Thailand region, located in the north section of hemisphere of EIA region.

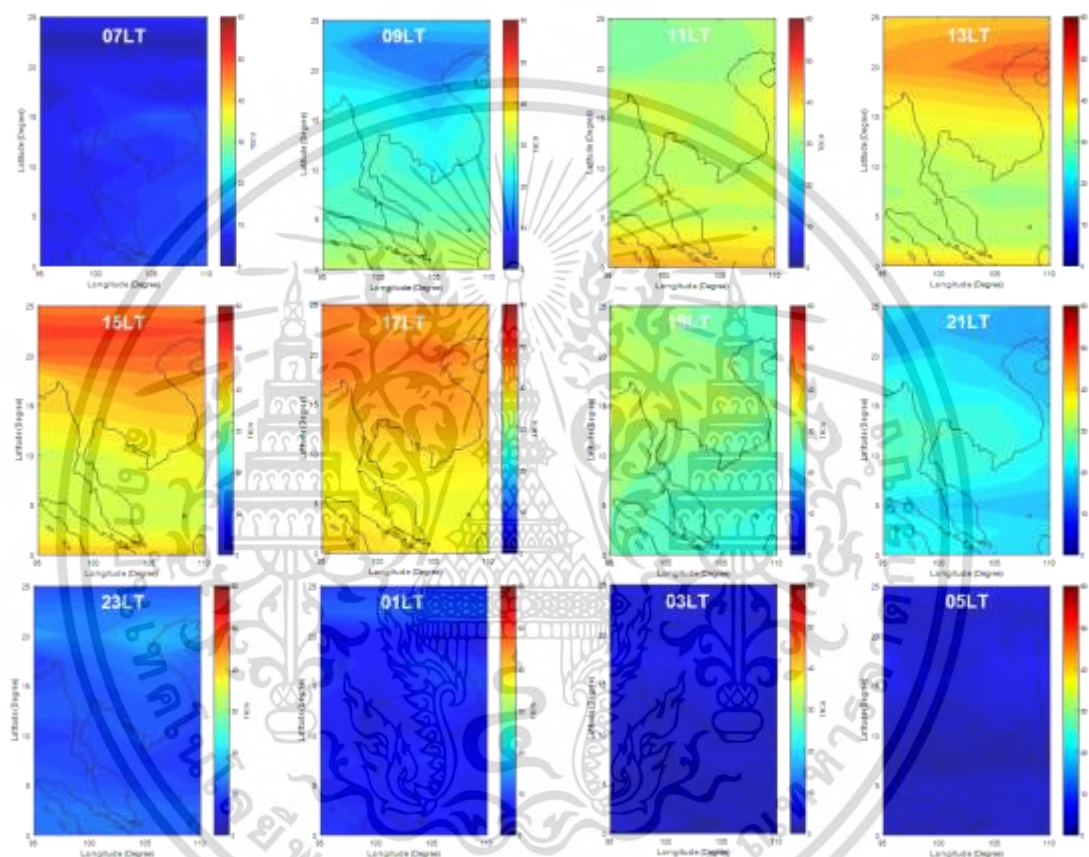


Figure 5.20 Data aggregation between MED VTEC and IRI VTEC with the LDF_{IRI} on July 8, 2012 at every 2 hours.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

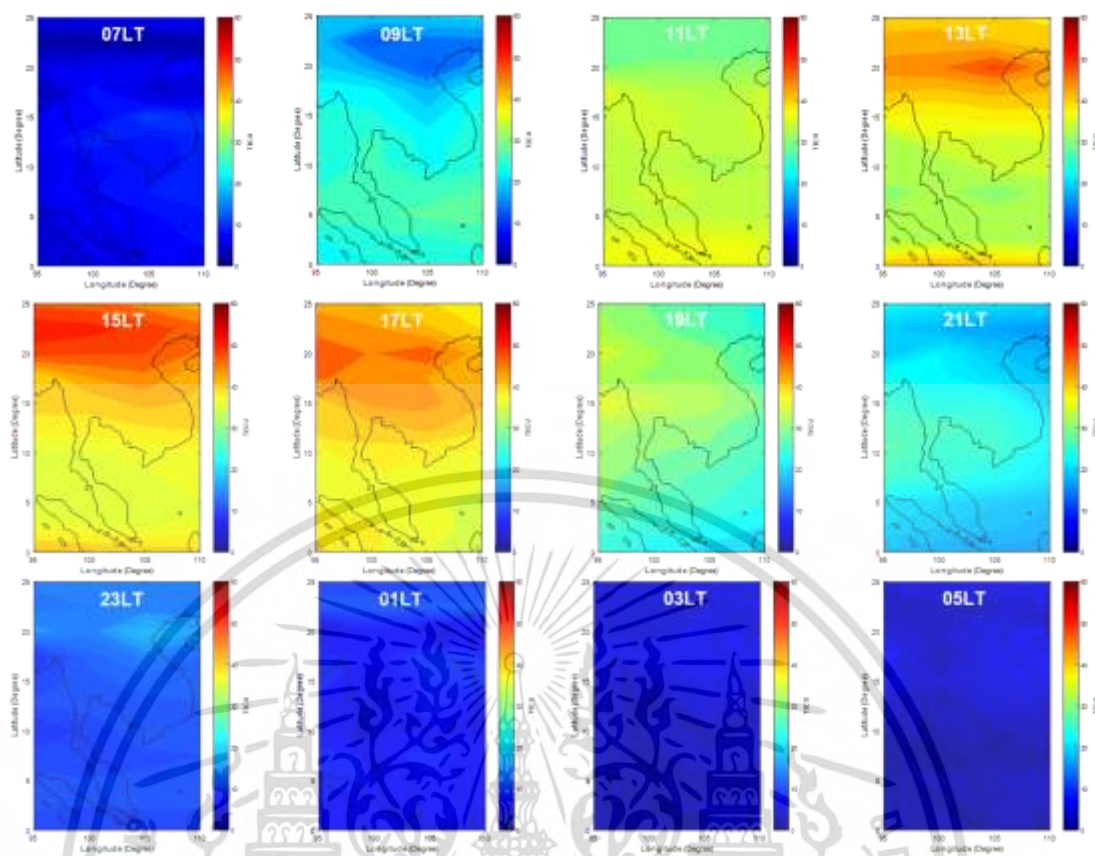


Figure 5.21 Data aggregation between MED VTEC and IGS VTEC with the LDF_{IGS} on July 8, 2012 at every 2 hours.

The results in this chapter show that not only the data aggregation technique can expand the regional VTEC map of Thailand to cover the adjacent countries, but also using the proposed LDF can produce more effective VTEC maps at regional scale. Moreover, the results show that the IRI-2012 model generally gives the VTEC estimation comparable to the observed VTEC over Thailand. Thus, in the next chapter, the VTEC map of 4 seasons: December solstice, March equinox, June solstice and September equinox, are developed using the data aggregation between the estimation of the IRI model and the GPS observation of Thailand together with the proposed LDF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER 6

VTEC MAP OF THAILAND

According to the results in the chapter 5, the IRI-2012 model gives the estimated VTEC comparable to the observed VTEC. Therefore, we focus on the IRI VTEC in this chapter for VTEC aggregation in the seasonal variation. Furthermore, this thesis proposed the proposed latitude-dependent factor (LDF) is used for adjusting the IRI discrepancy before data aggregation.

6.1 VTEC data

In this chapter, the VTEC values are calculated from the RINEX files recorded by the dual-frequency GPS receivers at 10 stations, installed by Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT), Thailand. The geographic locations of these DPT stations are shown in Figure 6.1 and Table 6.1.

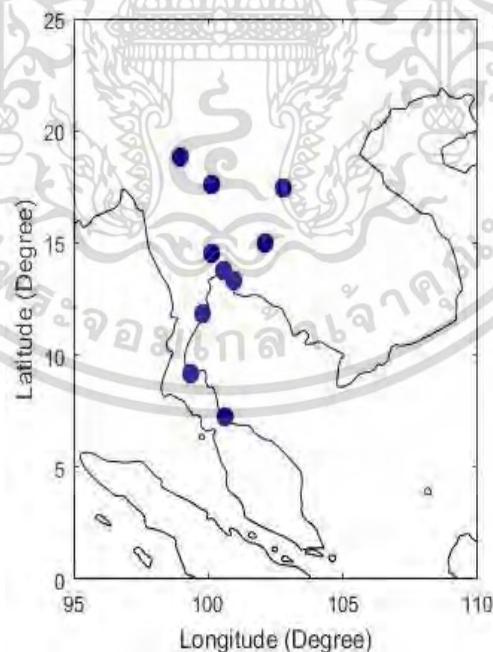


Figure 6.1 Location of the 10 GPS stations.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6.1 Location of the GPS stations in Thailand.

No.	Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)
1	Chiangmai (CHMA)	18.84	98.97
2	Chonburi (CNBR)	13.28	100.93
3	Bangkok (DPT9)	13.73	100.57
4	Nakhonratchasima (NKRM)	14.99	102.12
5	Prachuapkhirikhan (PJKR)	11.81	99.80
6	Songkla (SOKA)	7.21	100.60
7	Suphanburi (SPBR)	14.52	100.13
8	Suratthani (SRTN)	9.13	99.33
9	Udonthani (UDON)	17.41	102.78
10	Uttaradit (UTTD)	17.63	100.10

The IPP latitude, IPP longitude, GPS VTEC and the median GPS VTEC are calculated from the RINEX files recorded at DPT9 station on February 9, 2016 (quiet day) with the elevation angle of 30 degrees and SLM height of 350 km. The cycle slip, receiver bias and satellite bias are removed. The IPP latitude, IPP longitude, GPS VTEC and median GPS VTEC calculated at every 1 second from the 32 satellites are represented using the different color lines as shown in Figure 6.2 (a) - (d), respectively. The results show that the median GPS VTEC is at the maximum value of about 48 TECU at 14:30LT (UT+7 hours) and minimum value of about 1 TECU at 05-06LT, approximately.

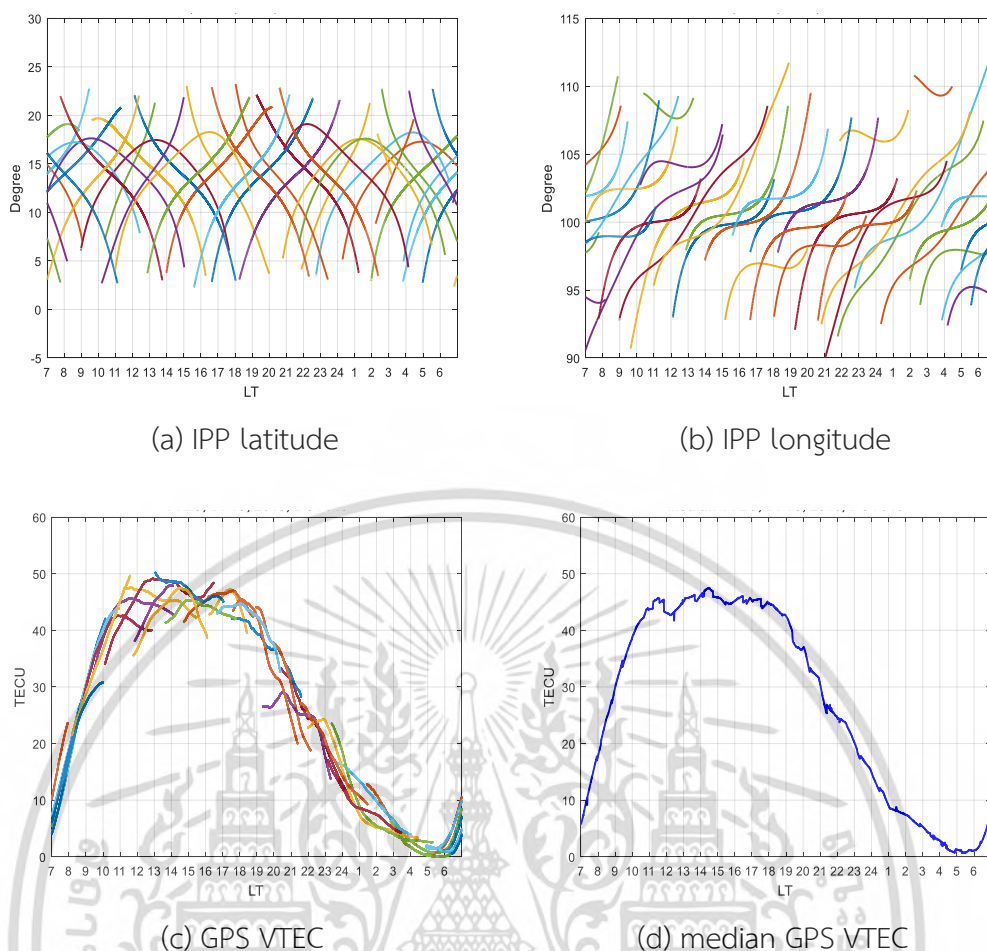


Figure 6.2 Observation at DPT9 station on February 9, 2016 (a) IPP latitude, (b) IPP longitude, (c) GPS VTEC and (d) median GPS VTEC.

6.2 Comparison between the GPS VTEC and IRI VTEC

The GPS TEC is observed in 4 periods: daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT) for studying the diurnal variation. For the seasonal variation, the observation data on quiet days: 22 January (DOY022), 9 February (DOY040), 8 July (DOY190) and 21 August (DOY234) in 2016 are represented for 4 seasons: December solstice, March equinox, June solstice and September equinox, respectively, when the flux of radio emission from the sun at 10.7 cm wavelength (2.8 GHz frequency) or F10.7 index (Tapping, 2013; Convington, 1969) are 97, 114, 90 and 78 sfu, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The comparison between the median GPS VTEC at DPT9 station (blue line) and the monthly mean VTEC of the IRI-2012 model (red line) in 4 seasons: December solstice, March equinox, June solstice and September equinox are shown in Figure 6.3. The IRI model predicts the electron content with the upper boundary limit of 2,000 km, which is the maximum limit of model option. The comparison results show that the maximum value of GPS VTEC and IRI VTEC are about 48 TECU at 14.30LT and 40 TECU at 16LT, respectively, in March equinox, when the F10.7 is at the highest level (114 sfu). The minimum values of both GPS VTEC and IRI VTEC occur during 05-06LT for all seasons. The IRI model underestimates the VTEC for all observation periods in March equinox except during 01-04LT, but overestimates the VTEC around 04-07LT. For September equinox, the IRI model overestimates the VTEC for all time except during 03-05LT. However, the IRI model almost gives the comparable VTEC to the observed VTEC in solstice months, except during 07-11LT that IRI model gives the VTEC overestimation, and in December solstice (10:30-15:30LT) that the IRI model gives the VTEC underestimation.

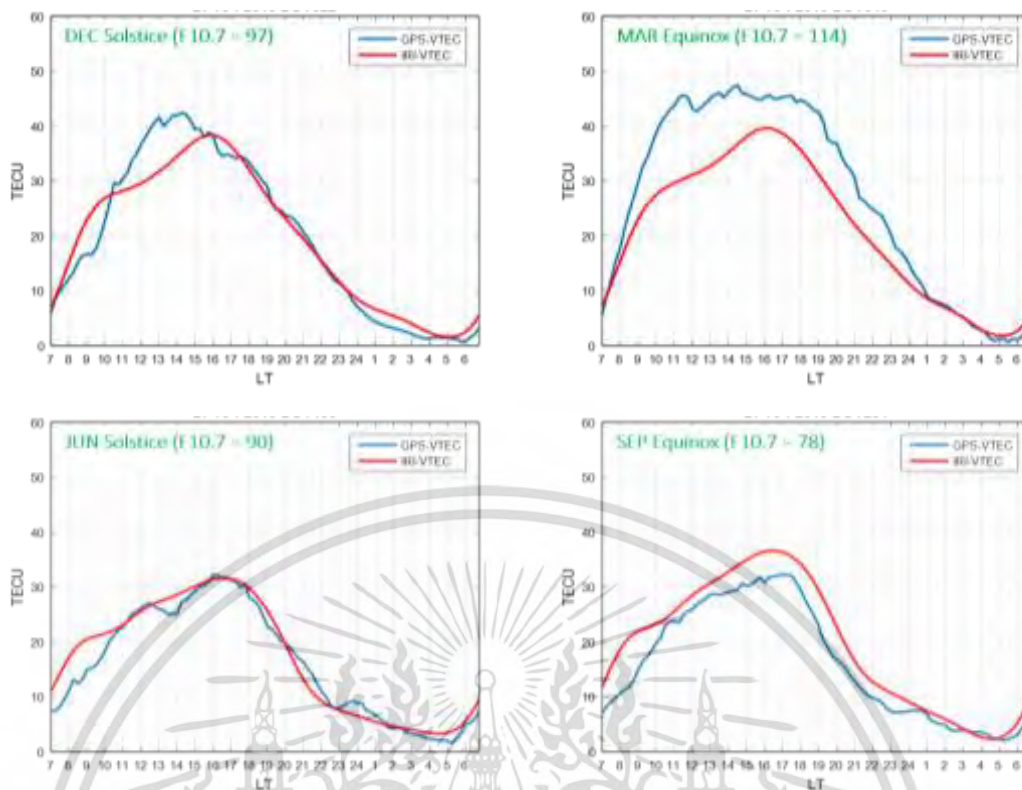


Figure 6.3 Comparison between the estimated VTEC of the IRI-2012 model (red) and the median observed VTEC (blue) at DPT9 station in December solstice, March equinox, June solstice and September equinox.

Referred to the difference between the IRI-2012 estimation and the observation in all seasons, the IRI VTEC at CHMA (northern of Thailand), DPT9 (middle of Thailand) and SOKA (southern of Thailand) are compared in 4 seasons as shown in Figure 6.4. The results show that the VTEC levels in March equinox is higher than in September equinox, December solstice and June solstice. The station at the higher latitude (CHMA) obtains the higher VTEC level from the IRI-2012 model than the stations at the lower latitude: DPT9 and SOKA. The results demonstrate the relation between the IRI VTEC and the season variation, also the given latitude of station location especially, during after sunrise until nighttime (09:30LT-20:30LT).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

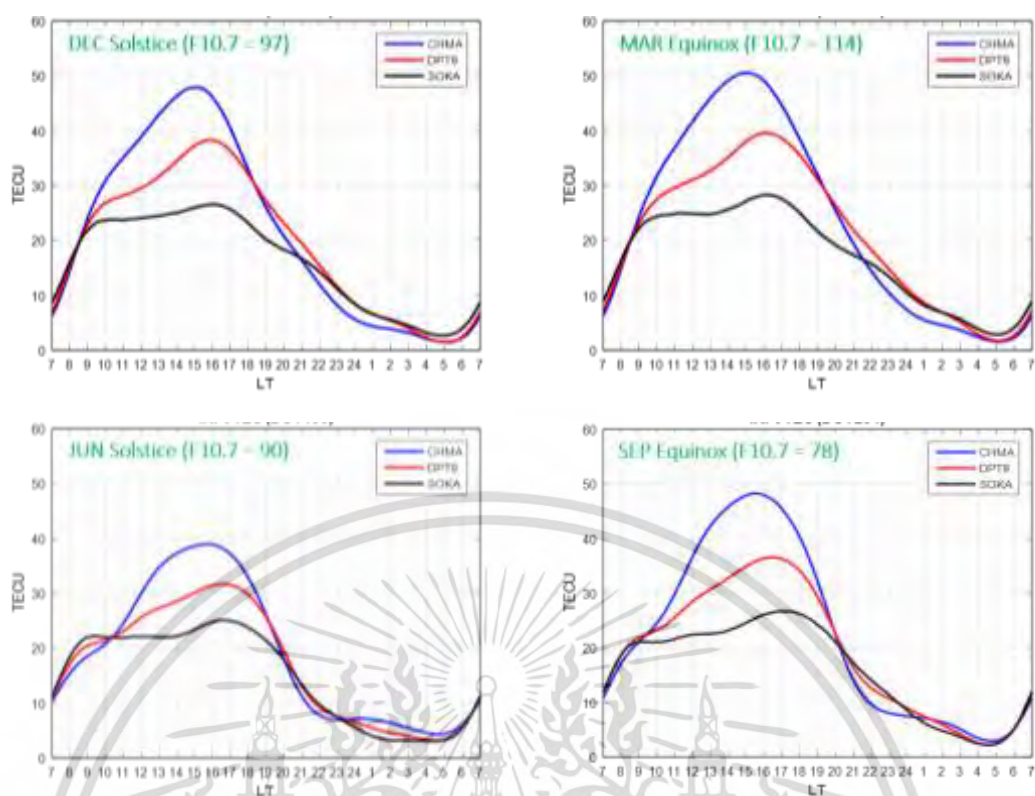


Figure 6.4 VTEC estimation of the IRI-2012 model for CHMA (blue), DPT9 (red) and SOKA (black) stations in (a) December solstice, (b) March equinox, (c) June solstice and (d) September equinox.

Figure 6.5 shows the VTEC prediction of the IRI model in 12 grids over Thailand, at 3 latitudes (0° , 12.5° and 25°) and at 4 longitudes (95° , 100° , 105° and 110°). The results show that the IRI model gives the similar level of VTEC for each longitude with the same latitude band.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

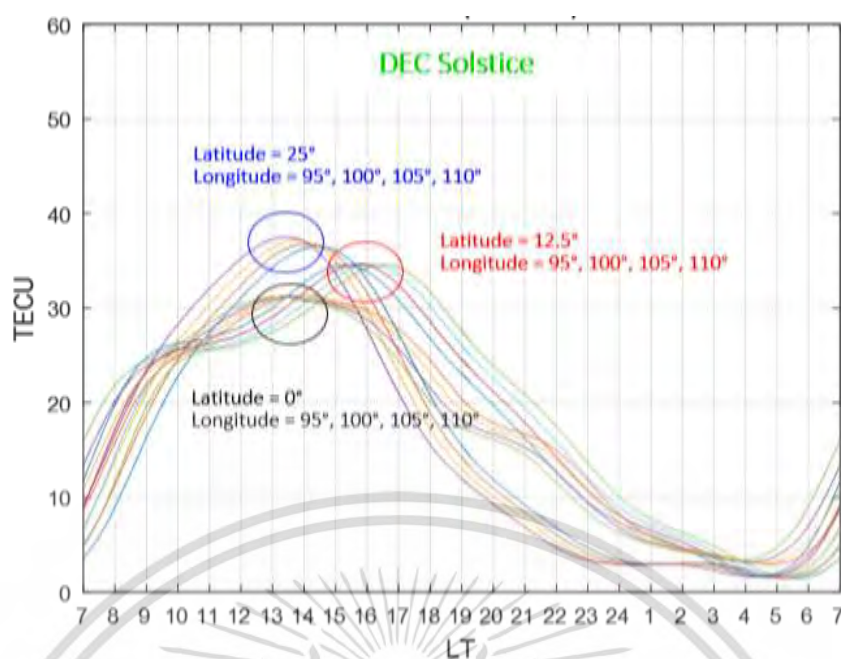


Figure 6.5 VTEC estimation of the IRI-2012 model for grid at latitudes of 0° , 12.5° and 25° , and at longitudes of 95° , 100° , 105° and 110° .

6.3 Observed VTEC

The observed VTEC (OBS VTEC) are calculated from the RINEX files observed at 10 stations in Thailand: CHMA, CNBR, DPT9, NCRM, PJRK, SOKA, SPBR, SRTN, UDON and UTDD in 4 seasons: December solstice, March equinox, June solstice and September equinox for studying diurnal and seasonal ionospheric characteristics.

Figure 6.6 - 6.9 show the observed VTEC (OBS VTEC) in Thailand area ($0^\circ - 25^\circ$ and $95^\circ - 110^\circ$) with the temporal resolution of 2 hours in December solstice, March equinox, June solstice and September equinox, respectively. The colored dots indicate the level of OBS VTEC. The VTEC is increased from daytime until before sunset. The maximum level of VTEC occurs during daytime due to strong solar effects. Then the VTEC decreases in the nighttime and continuously decreasing until before sunrise.

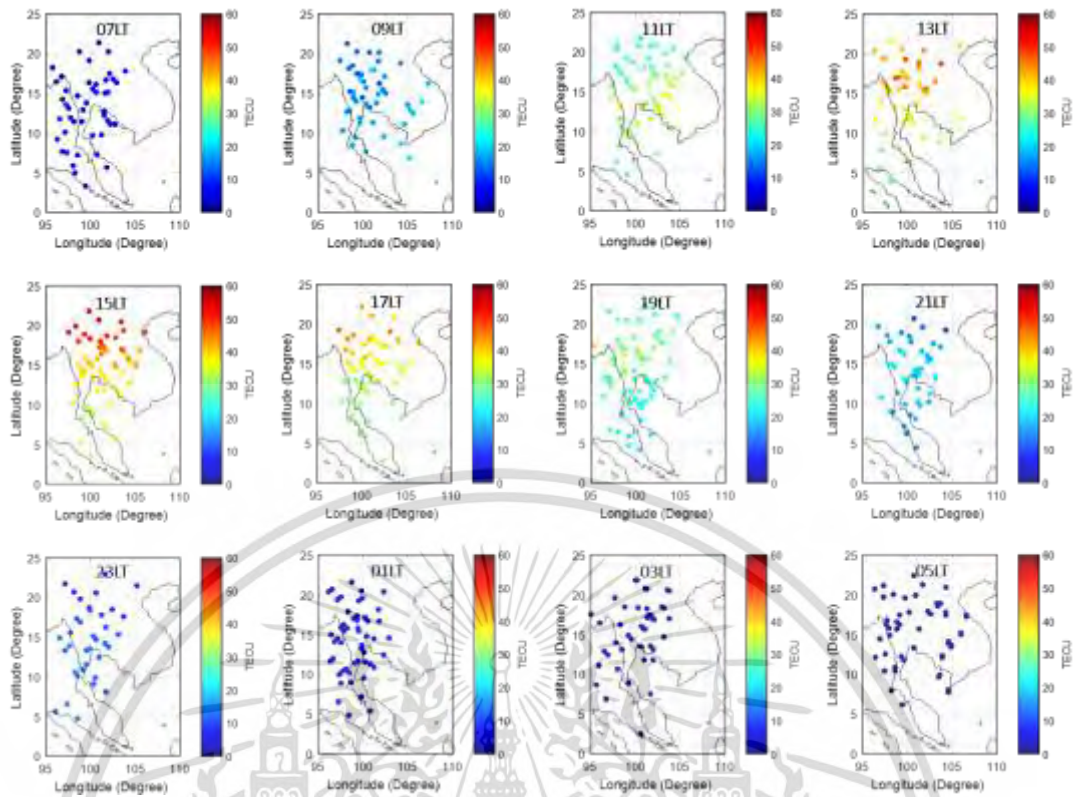


Figure 6.6 OBS VTEC over Thailand in December solstice with the temporal of 2 hours.

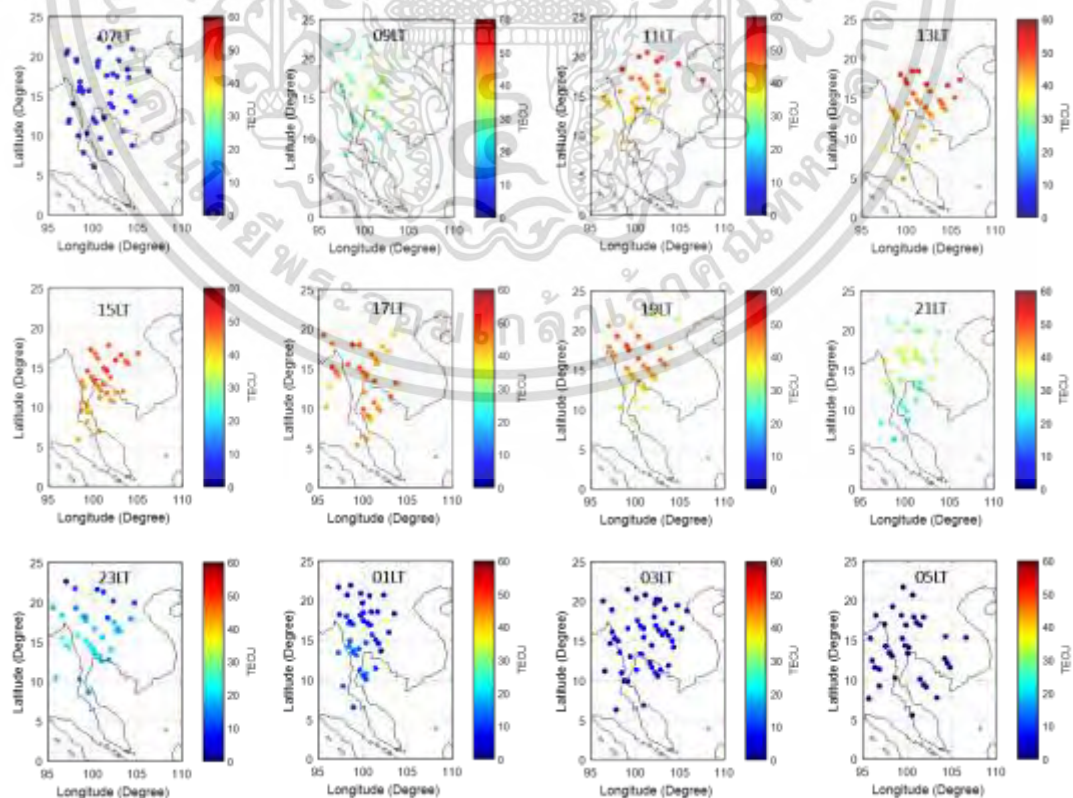


Figure 6.7 Same as Figure 6.6 but for March equinox.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

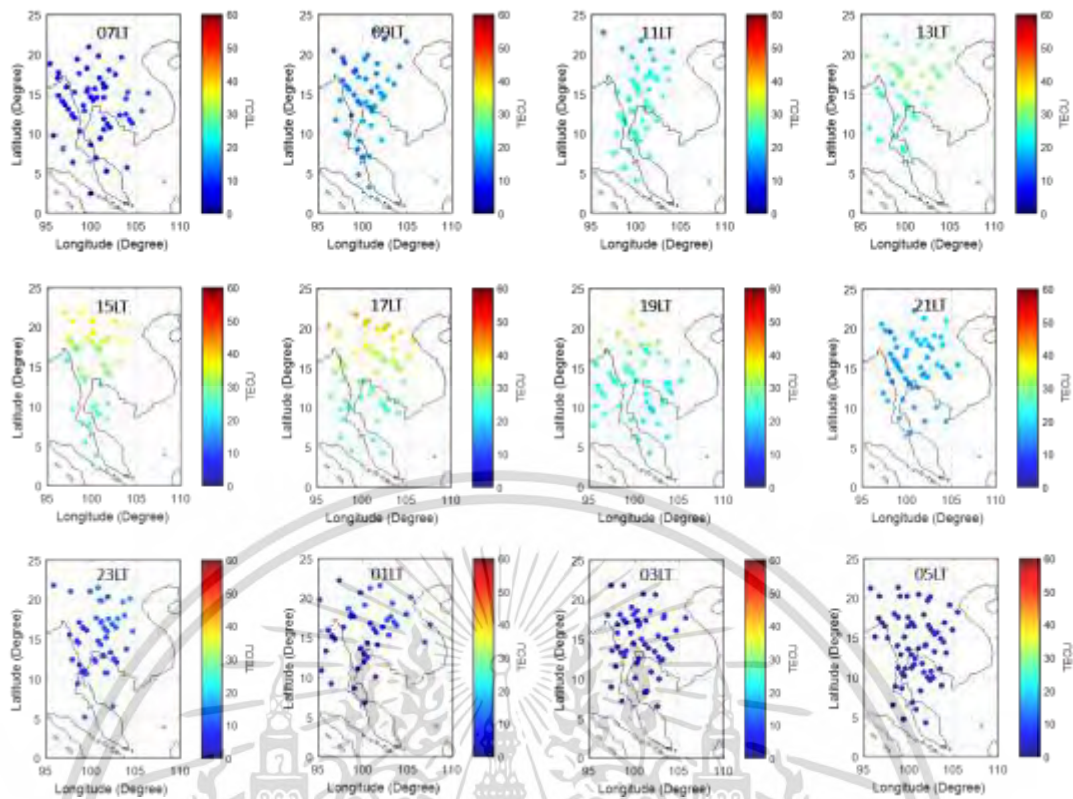


Figure 6.8 Same as Figure 6.6 but for June solstice.

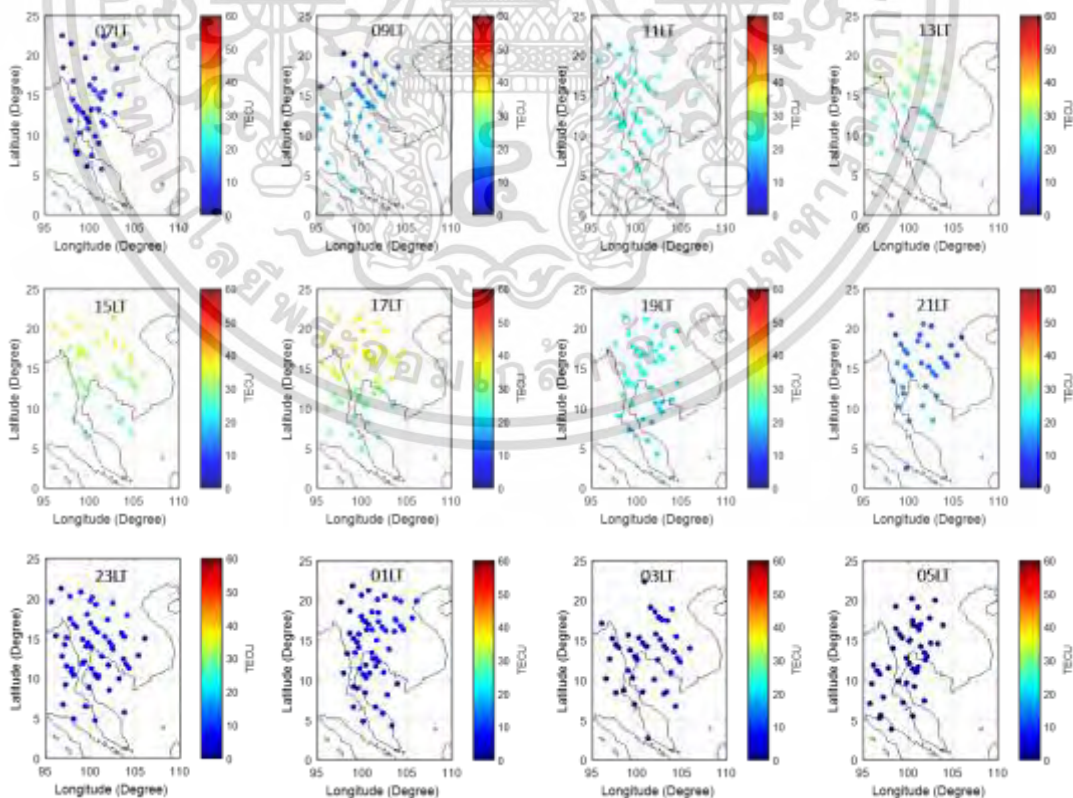


Figure 6.9 Same as Figure 6.6 but for September equinox.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 Median VTEC map

For studying diurnal and seasonal ionospheric characteristic, the MED VTEC over Thailand with the temporal resolution of 2 hours and the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively, for December solstice, March equinox, June solstice and September equinox are shown in Figure 6.10 – 6.13, respectively.

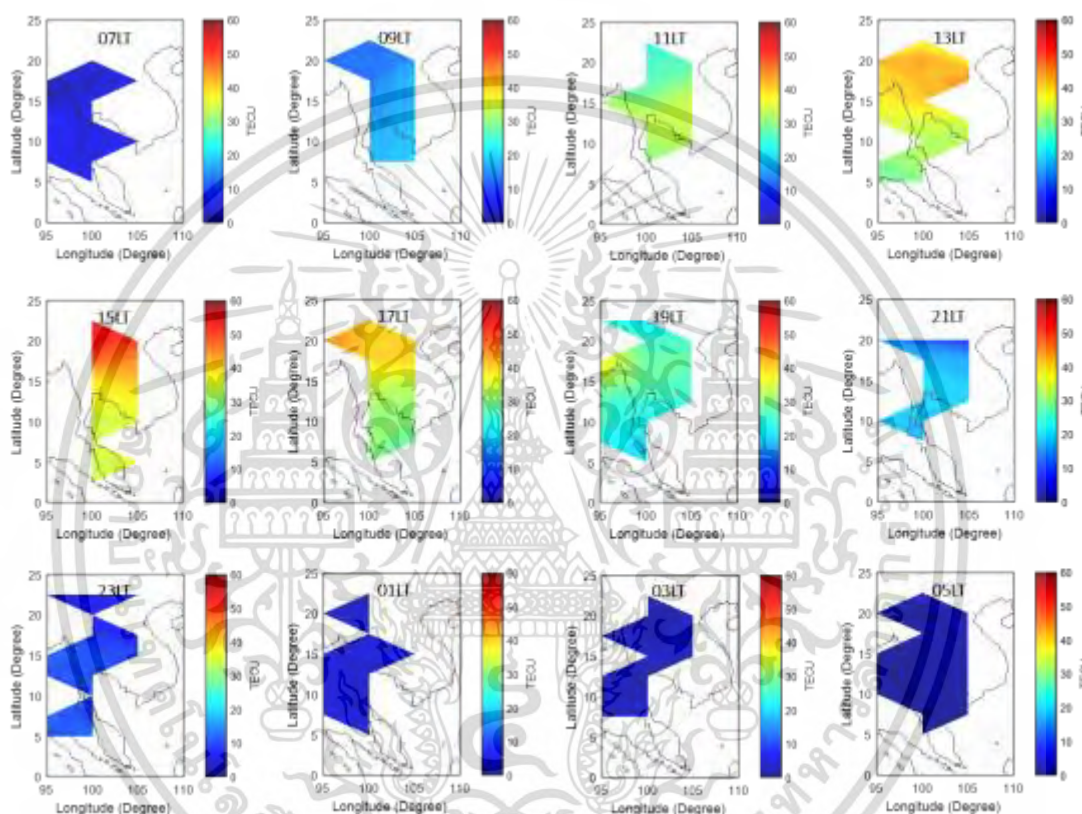


Figure 6.10 MED VTEC map over Thailand in December solstice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

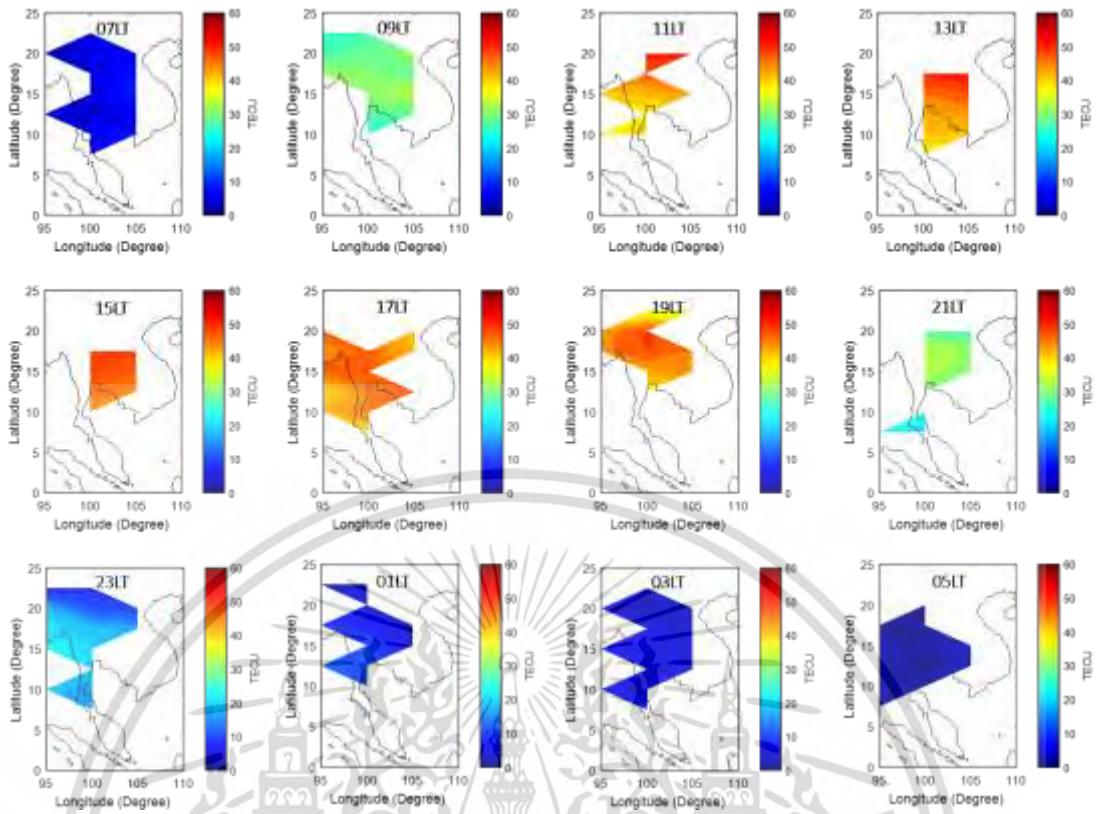


Figure 6.11 Same as Figure 6.10 but for March equinox.

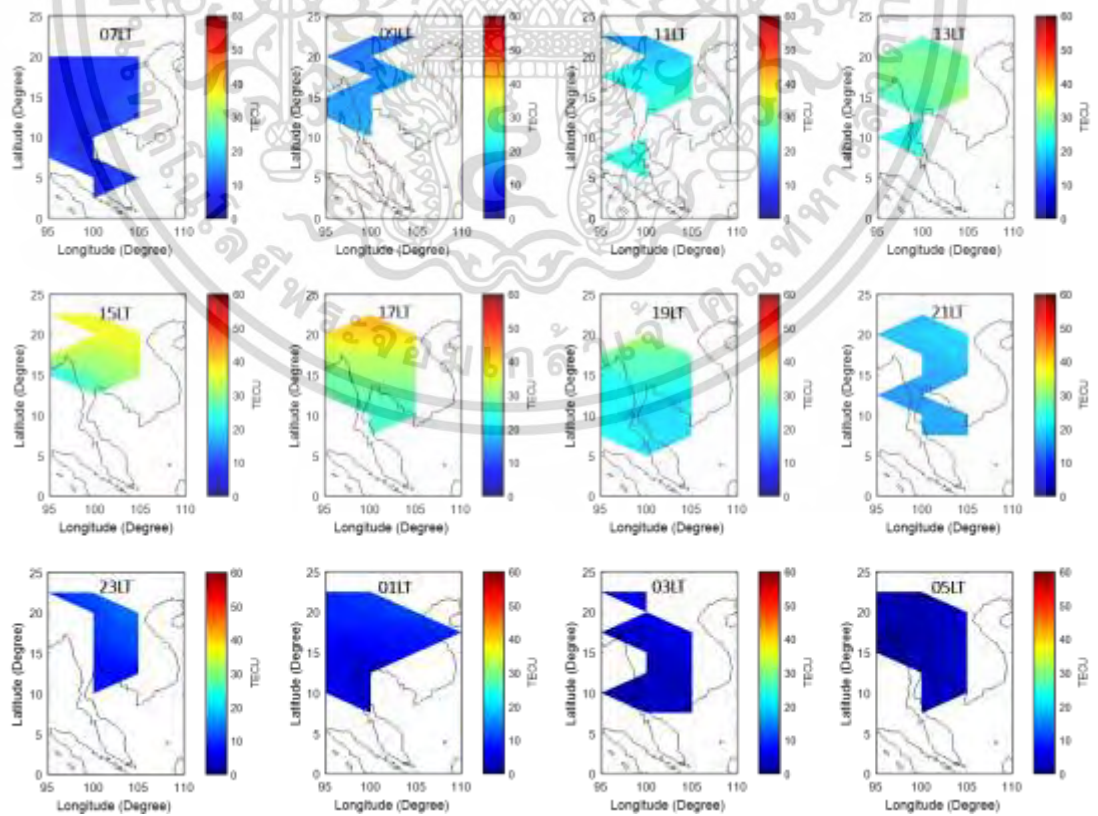


Figure 6.12 Same as Figure 6.10 but for June solstice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

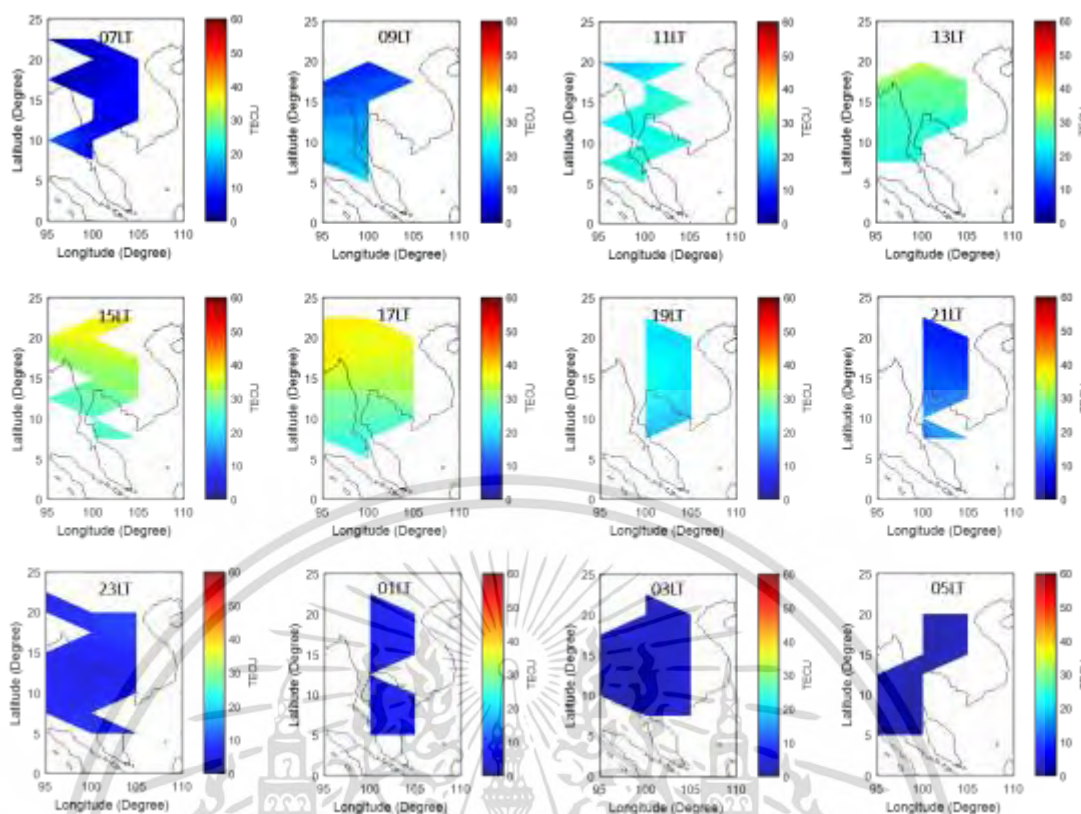


Figure 6.13 Same as Figure 6.10 but for September equinox.

As mentioned before, the median observed VTEC map cannot cover all Thailand areas because of the sparse GPS data over Thailand region. Therefore, the VTEC prediction of the well-known IRI-2012 model is aggregated into the observational VTEC data for expanding the regional VTEC map.

6.5 IRI-2012 VTEC map

Before aggregating the data, we map the estimated VTEC of IRI model over Thailand grid with the temporal of 2 hours and the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively, in 4 seasons: December solstice, March equinox, June solstice and September equinox as shown in Figure 6.14 – 6.17, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

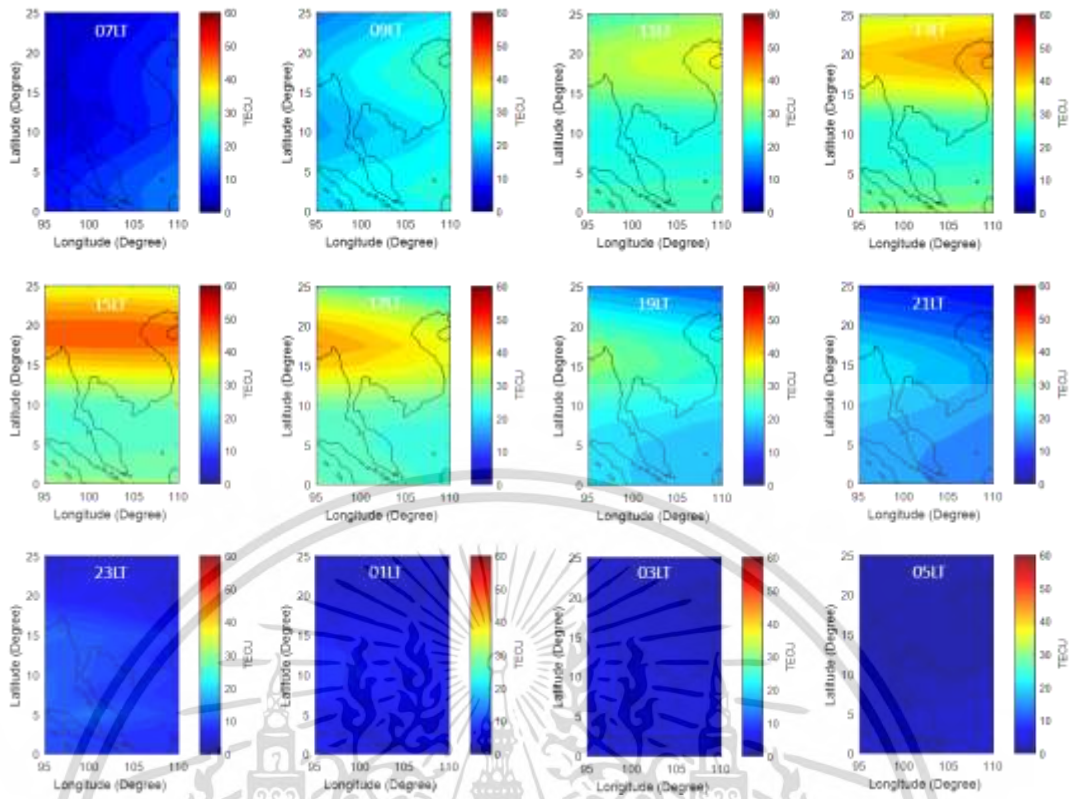


Figure 6.14 IRI VTEC map over Thailand in December solstice.

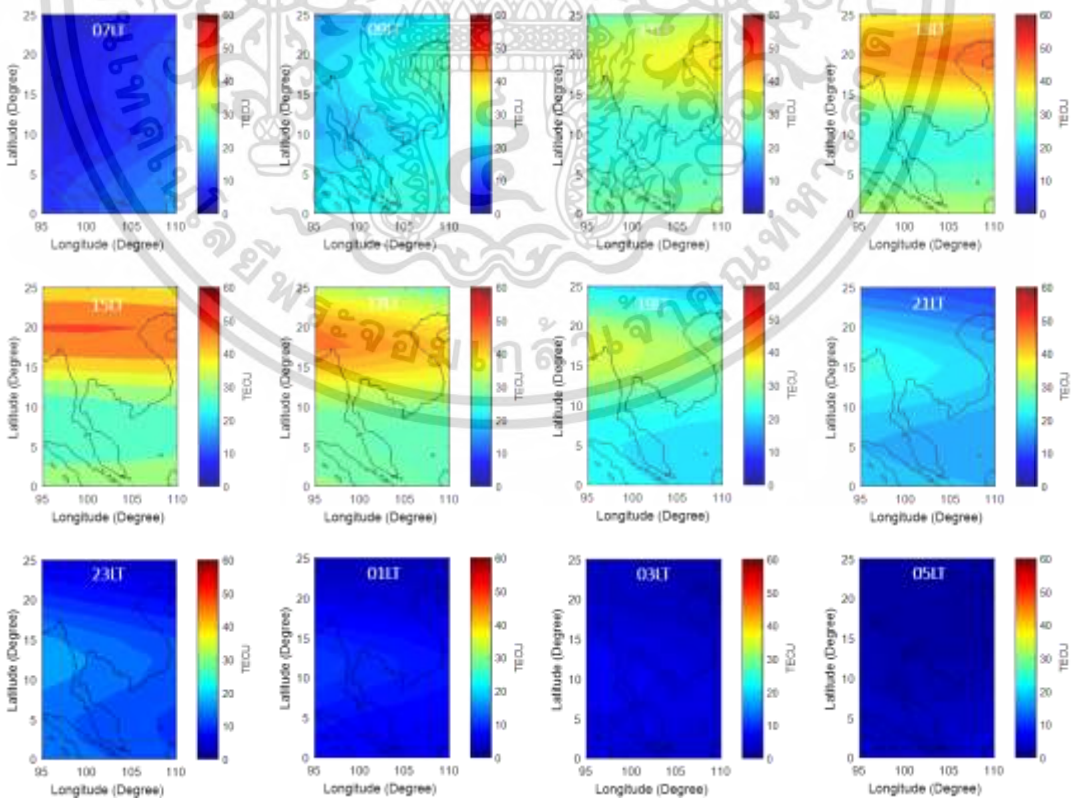


Figure 6.15 Same as Figure 6.14 but for March equinox.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

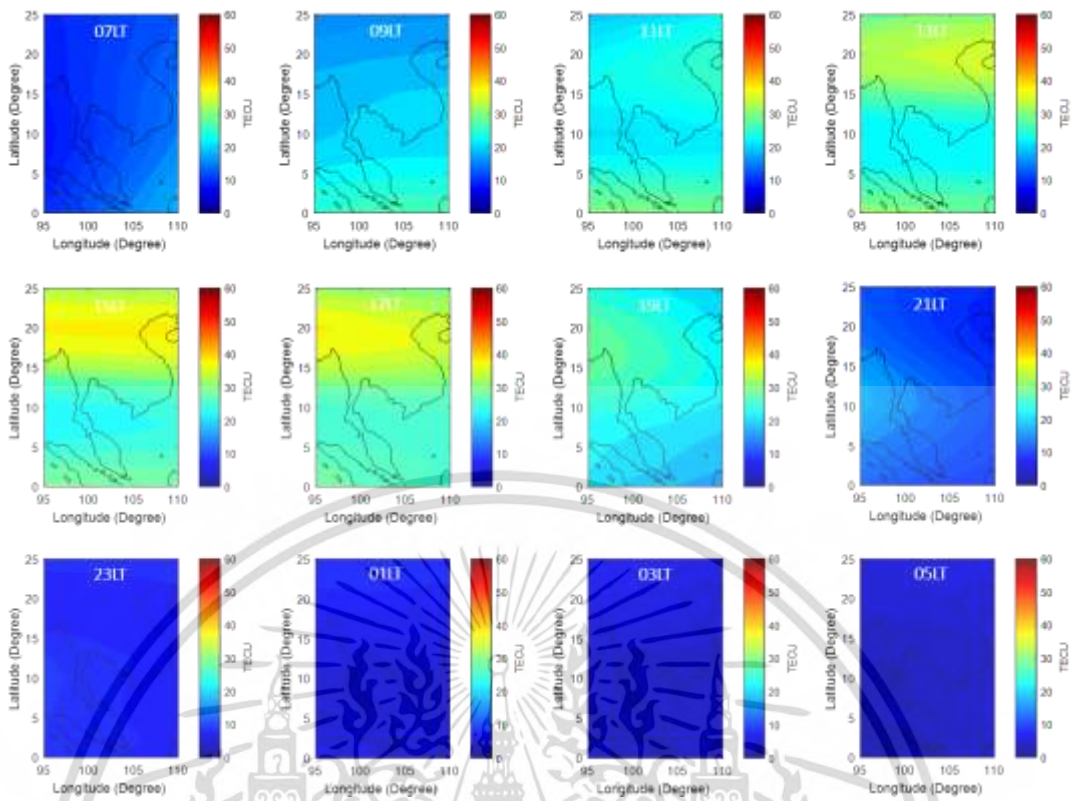


Figure 6.16 Same as Figure 6.14 but for June solstice.

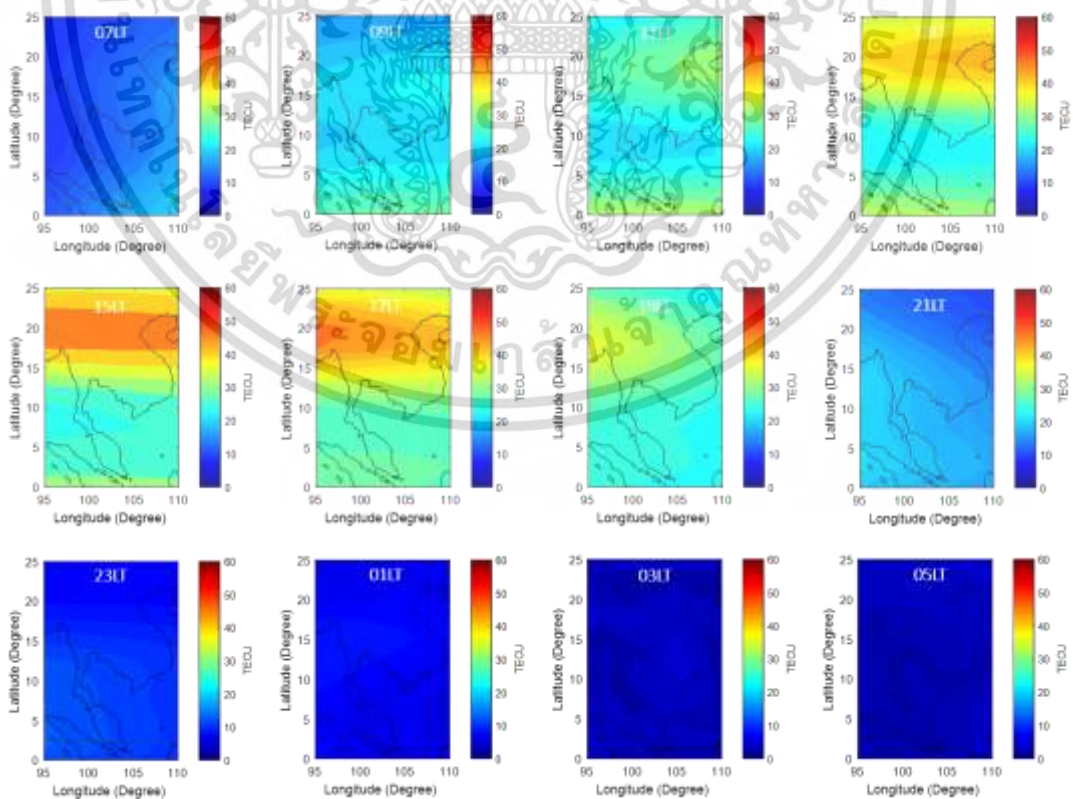


Figure 6.17 Same as Figure 6.14 but for September equinox.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานของนักศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาขอขมกราบเรียนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 Aggregated VTEC map

The comparison between MED VEC map (first row), IRI VTEC map (second row) and the aggregated VTEC or AGG VTEC (third row) during 4 periods: daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT) in 4 seasons: December solstice ($F_{10.7}=97$ sfu), March equinox ($F_{10.7}=114$ sfu), June solstice ($F_{10.7}=90$ sfu) and September equinox ($F_{10.7}=78$ sfu) in 2016 (moderate level of solar activity) are shown in Figure 6.18 – 6.21, respectively. The AGG VTEC maps are produced from the data aggregation technique between the MED VTEC and IRI VTEC together with the proposed LDF.

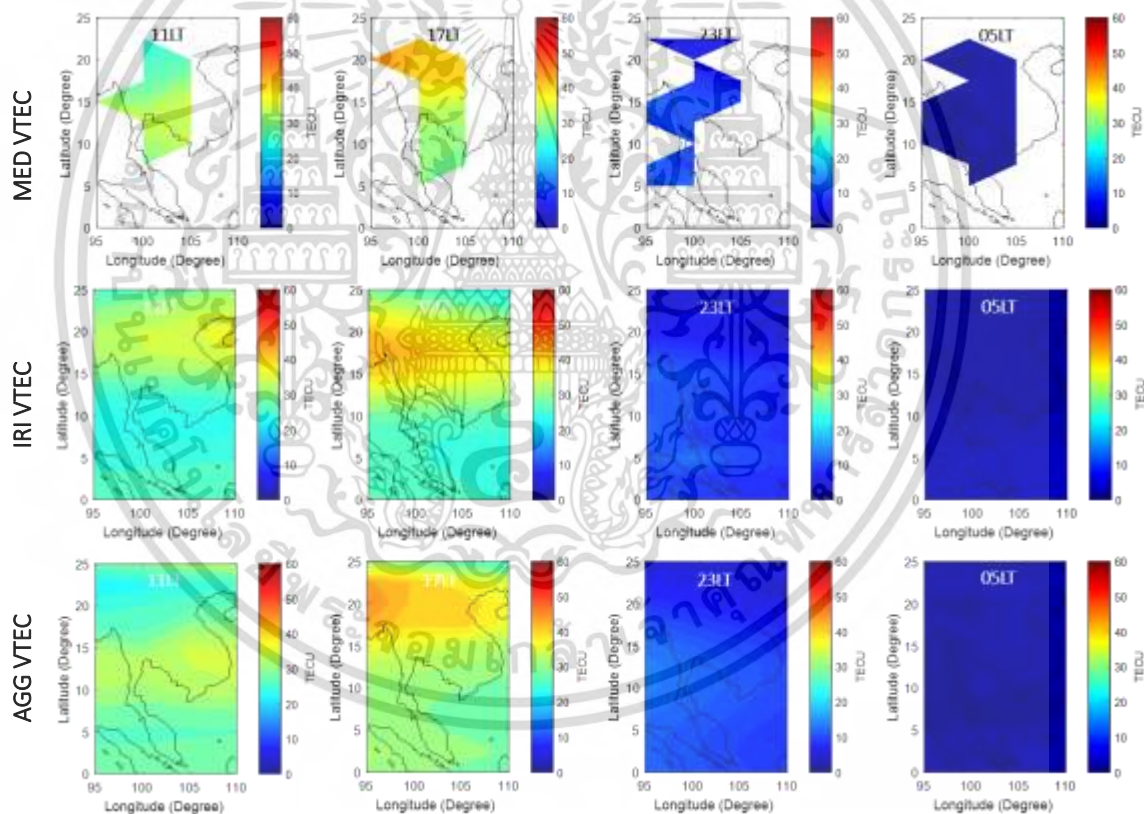


Figure 6.18 VTEC map comparison between MED VTEC (first row), IRI VTEC (second row) and AGG VTEC (third row) during daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT) in December solstice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

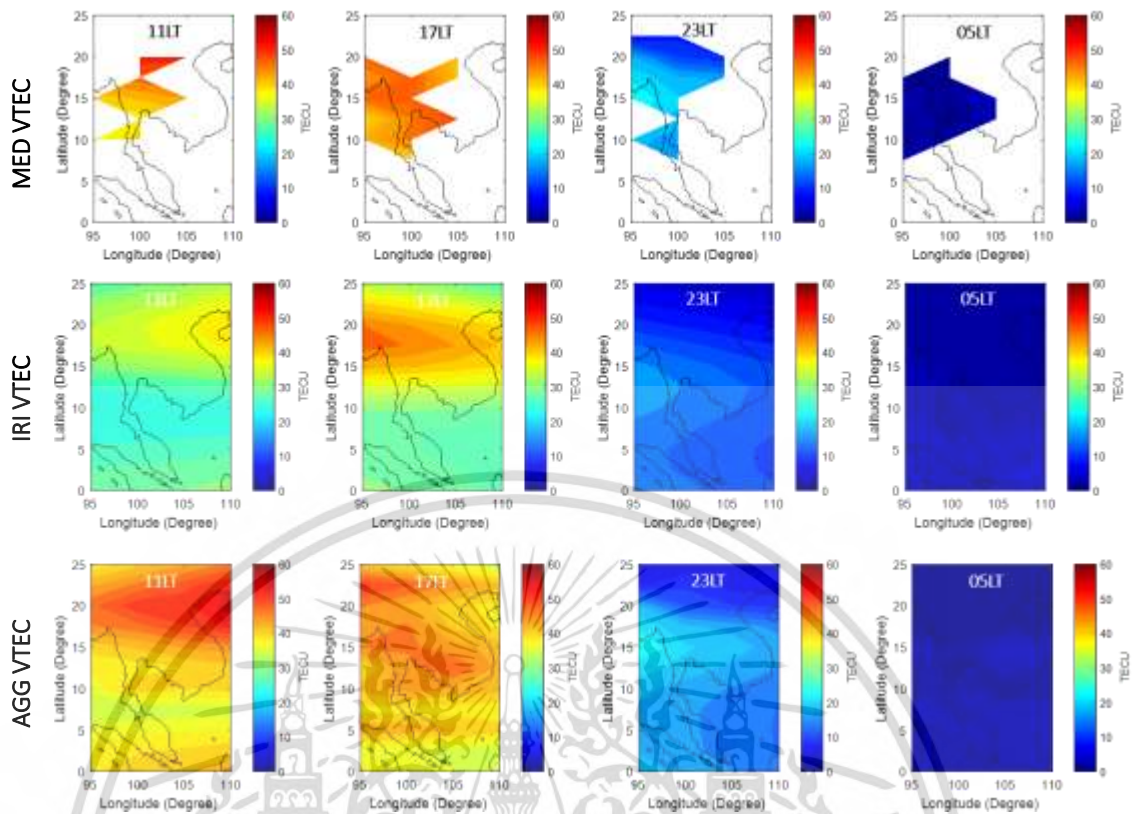


Figure 6.19 Same as Figure 6.18 but for March equinox.

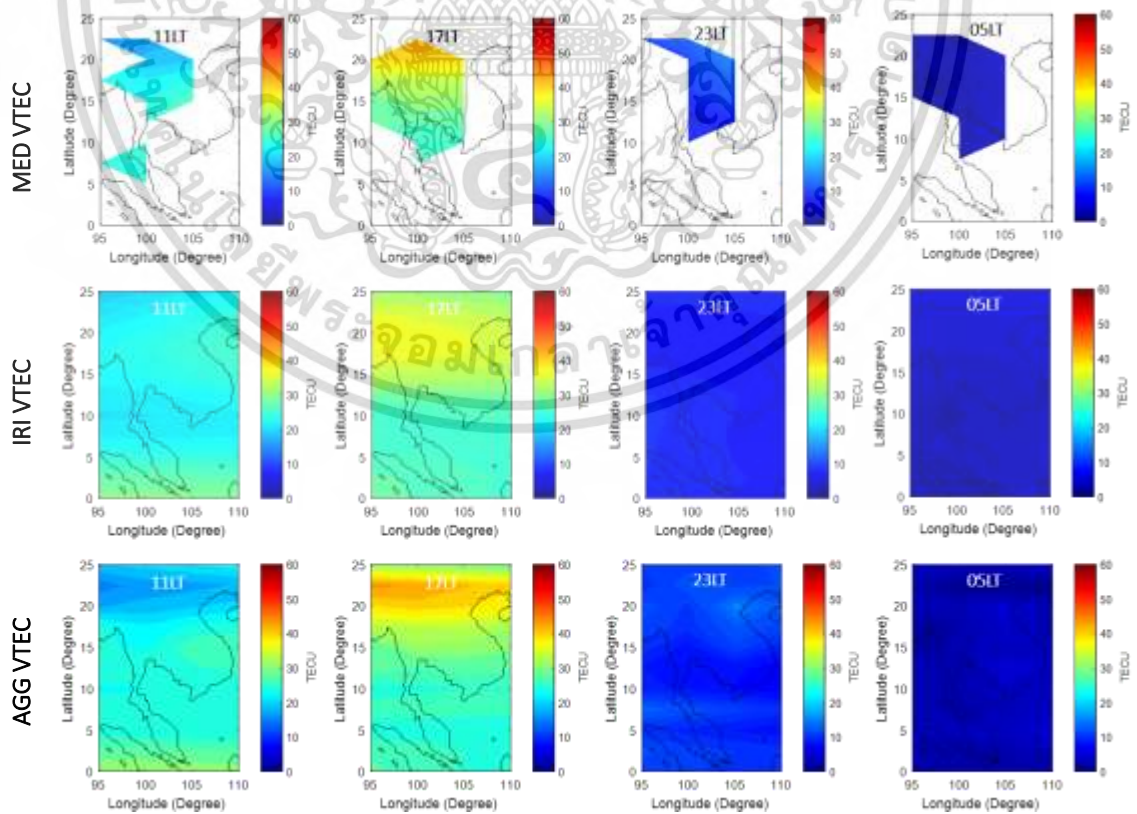


Figure 6.20 Same as Figure 6.18 but for June solstice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

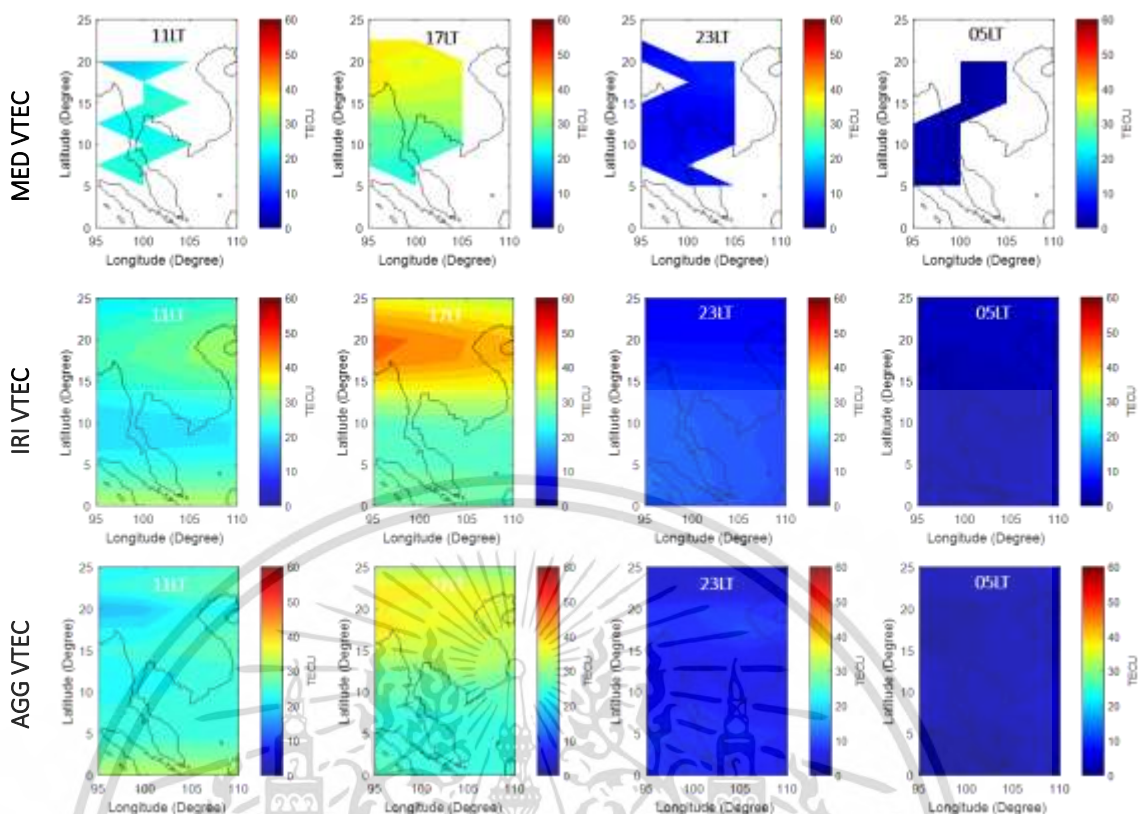


Figure 6.21 Same as Figure 6.18 but for September equinox.

The AGG VTEC map with the temporal resolution of 2 hours and the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively in 4 seasons: December solstice ($F_{10.7}=97$ sfu), March equinox ($F_{10.7}=114$ sfu), June solstice ($F_{10.7}=90$ sfu) and September equinox ($F_{10.7}=78$ sfu) in 2016 (moderate level of solar activity) are shown in Figure 6.22 – 6.25, respectively. The VTEC level is indicated by the color map from 0 to 60 TECU. These VTEC maps indicate that the VTEC values at the latitude bands from 15°N to 25°N are higher than at the other latitude bands for all seasons. These results can confirm that the VTEC at the crest of EIA region is generally higher than the area nearby the magnetic equator. Besides, the high level of VTEC occurs during daytime, but the low level of VTEC occurs before sunrise for all seasons, especially in March equinox, when the level of solar activity is highest ($F_{10.7}=114$ sfu). It can confirm that the VTEC level corresponds to the solar activity level in the diurnal and season variations.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

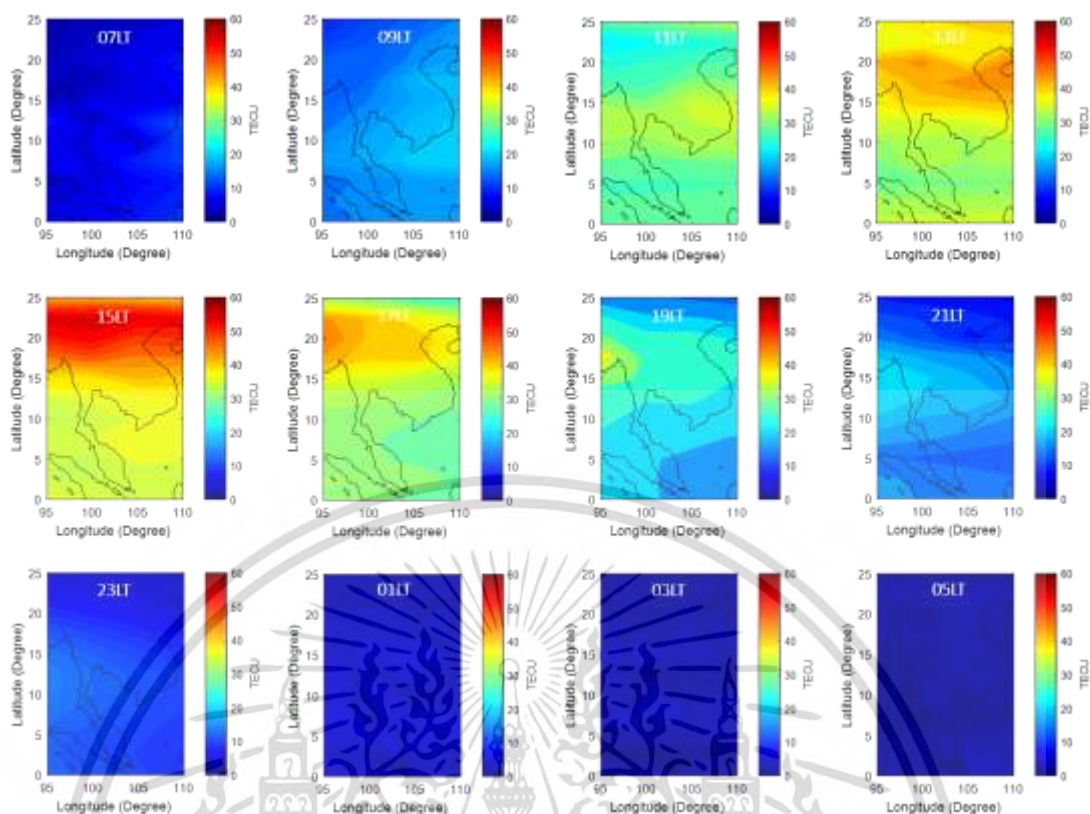


Figure 6.22 AGG VTEC map over Thailand in December solstice at every 2 hours and the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively.

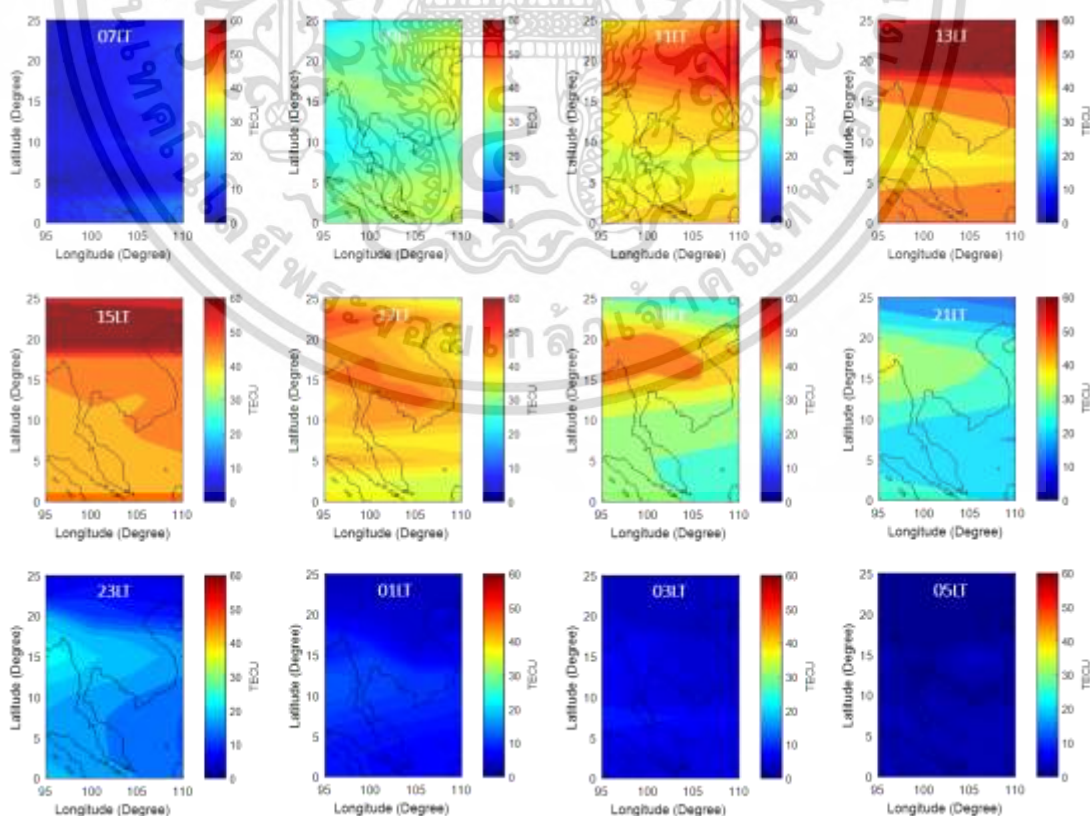


Figure 6.23 Same as Figure 6.22 but for March equinox.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนหอการค้า กรุงเทพมหานคร เมื่อผู้ใดที่เห็นชอบใช้เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

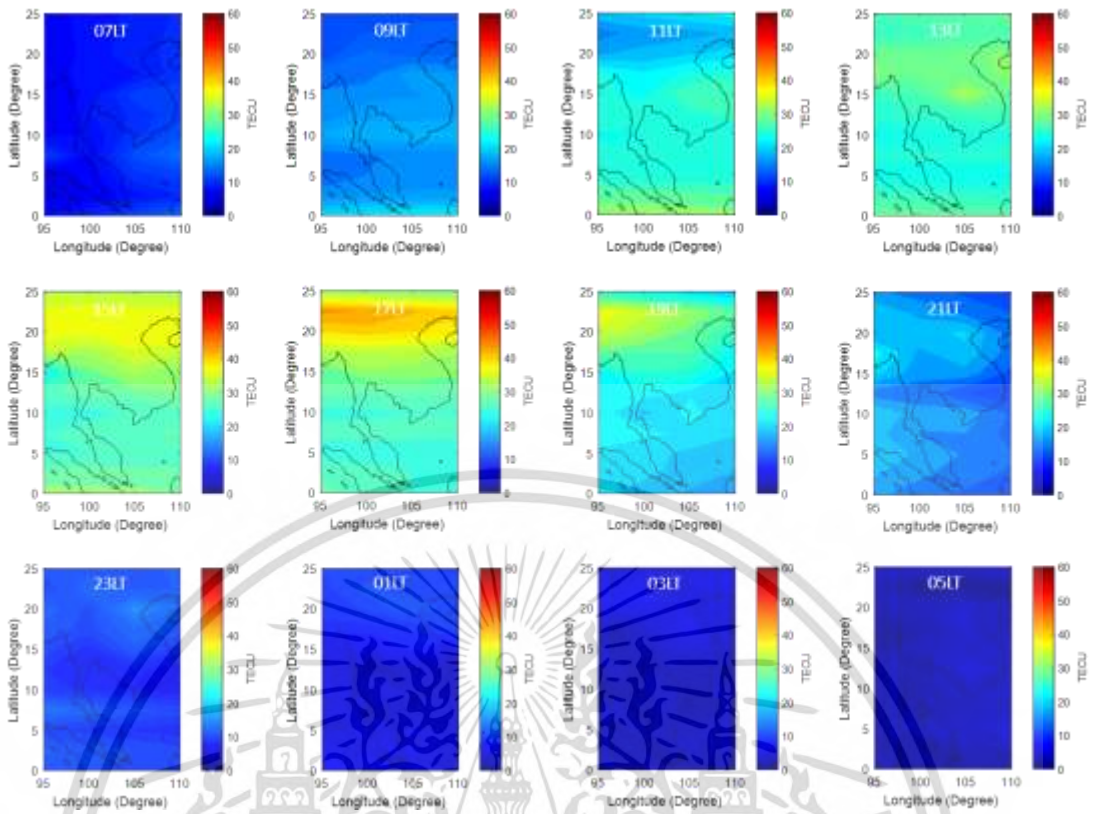


Figure 6.24 Same as Figure 6.22 but for June solstice.

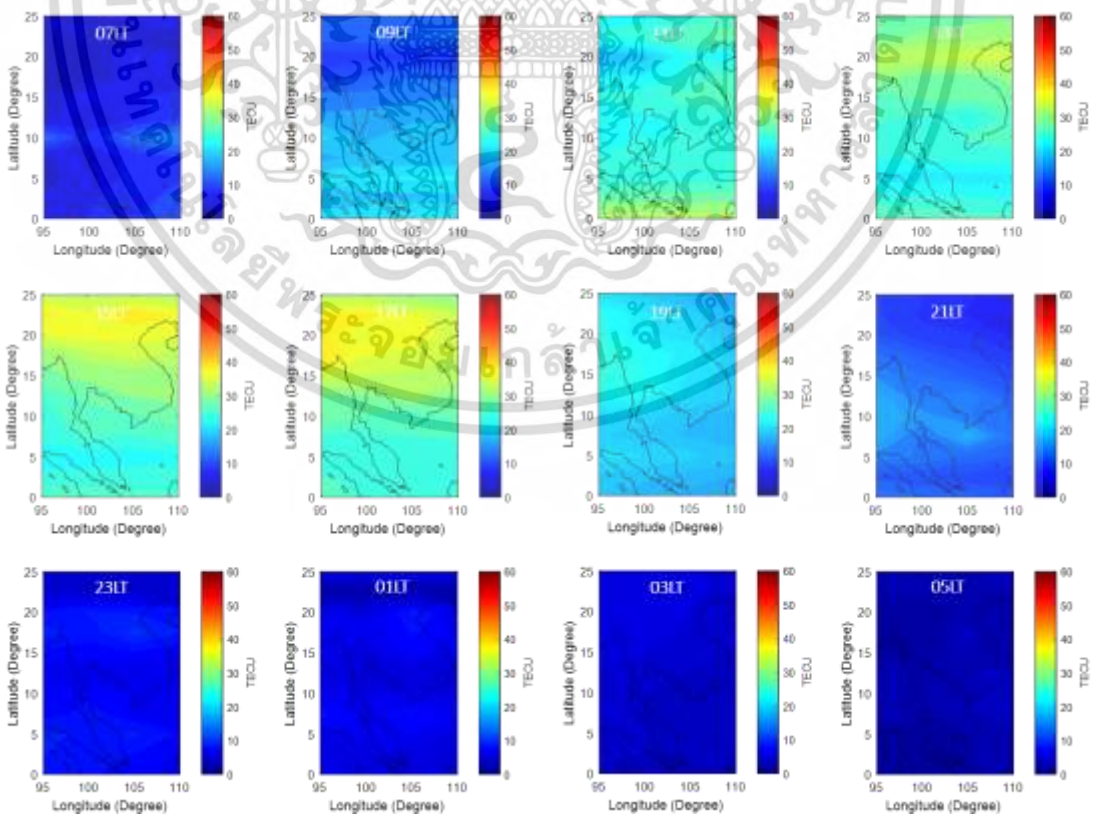


Figure 6.25 Same as Figure 6.22 but for September equinox.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 6.26 shows the comparison of AGG VTEC map over Thailand region during 4 periods: daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT) in 4 seasons: December solstice (F10.7=97 sfu), March equinox (F10.7=114 sfu), June solstice (F10.7=90 sfu) and September equinox (F10.7=78 sfu) in 2016 (moderate solar activity). The results show that the regional VTEC maps can be constructed using the data aggregation technique together with the proposed LDF. These developed VTEC maps can be used to demonstrate the ionospheric characteristics over Thailand and some adjacent counties including Myanmar, Laos, Cambodia, Malaysia and Indonesia.

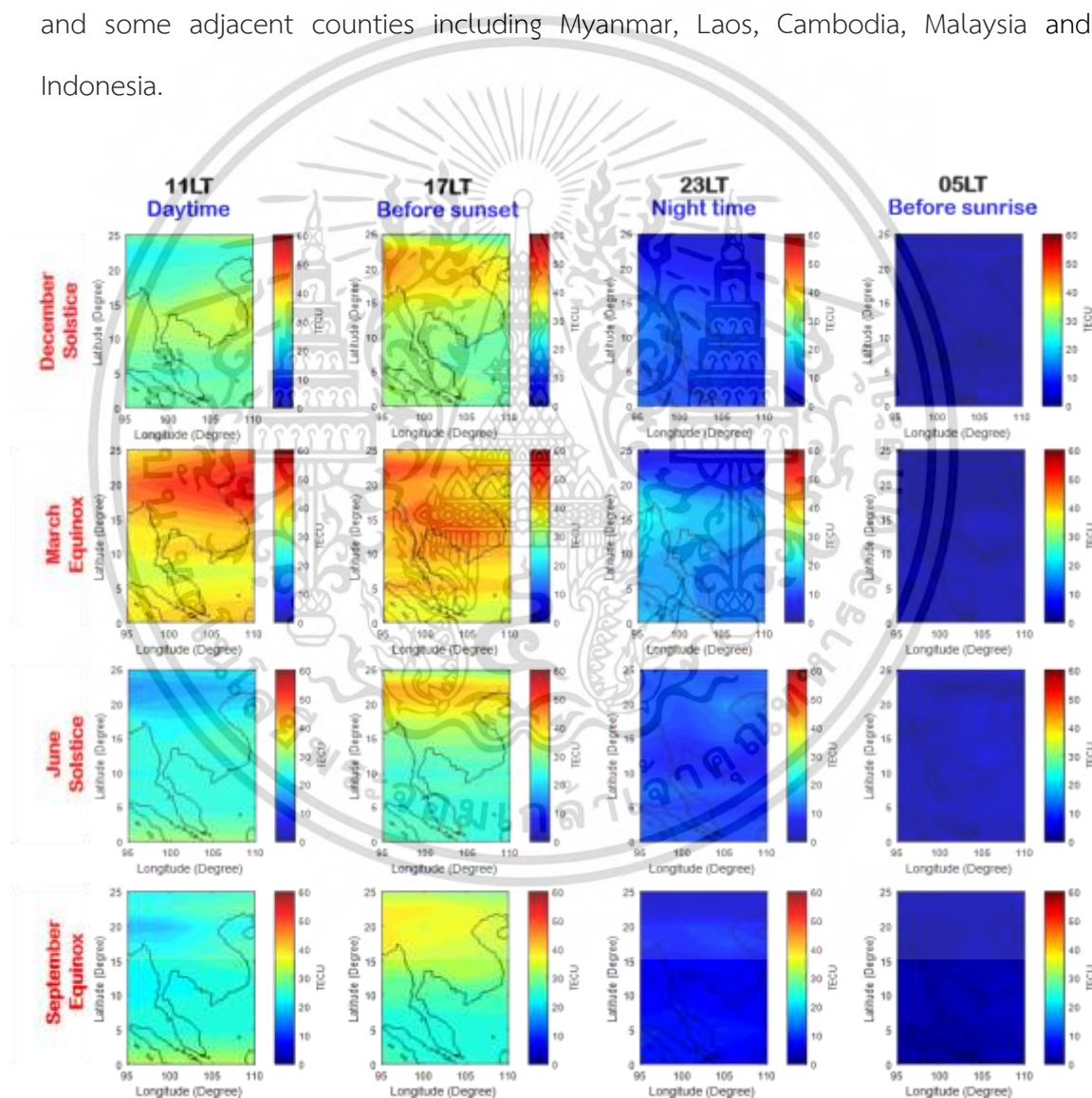


Figure 6.26 Regional map over Thailand in 4 seasons: December solstice (first row), March equinox (second row), June solstice (third row) and September equinox (fourth row) in daytime, before sunset, nighttime and before sunrise.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 Validation of VTEC aggregation

For the validation of our purposed method, we compare the hourly mean of VTEC difference between the MED VTEC with the IRI VTEC level before and after aggregation together with the proposed LDF during 4 periods: daytime (11LT), before sunset (17LT), nighttime (23LT) and before sunrise (05LT) in March equinox as shown in Figure 6.27 (a)-(d). The comparison results show that the LDF can reduce the VTEC difference between the IRI VTEC and GPS VTEC, especially during the daytime (11LT).

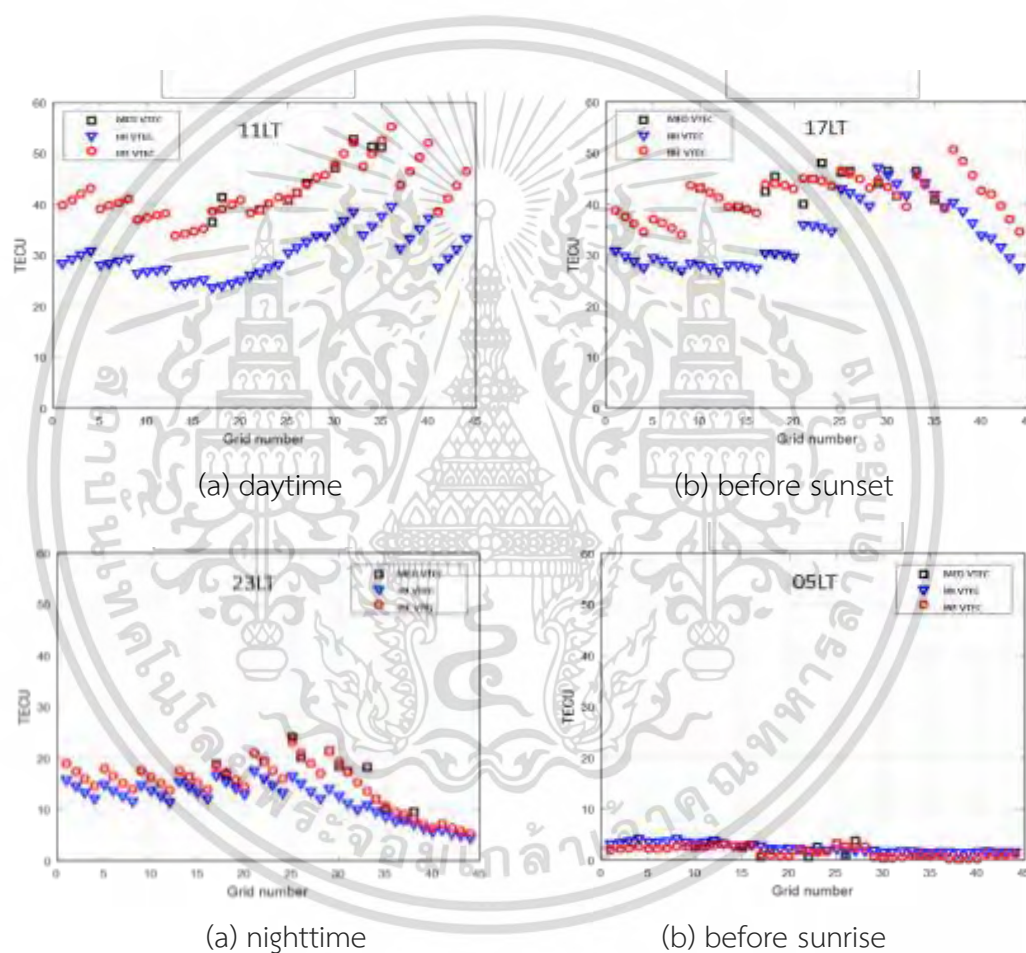


Figure 6.27 Comparison between MED VTEC, IRI VTEC and IRF VTEC in March equinox during (a) daytime, (b) before sunset, (c) nighttime and (d) before sunrise.

Moreover, Figure 6.28 (a) – (d) show the comparison of hourly mean difference between MED VTEC and IRI VTEC (blue line) and between MED VTEC and IRI VTEC after adjusting by LDF (IRF VTEC) (red line) in 4 seasons. The results show that the maximum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of mean difference between the IRI VTEC and MED VTEC is about 13 TECU during daytime in March equinox. The difference or mis-estimation can be decreased by the proposed LDF, which can reduce the difference between the MED VTEC and LDF VTEC to below 2 TECU for all seasons.

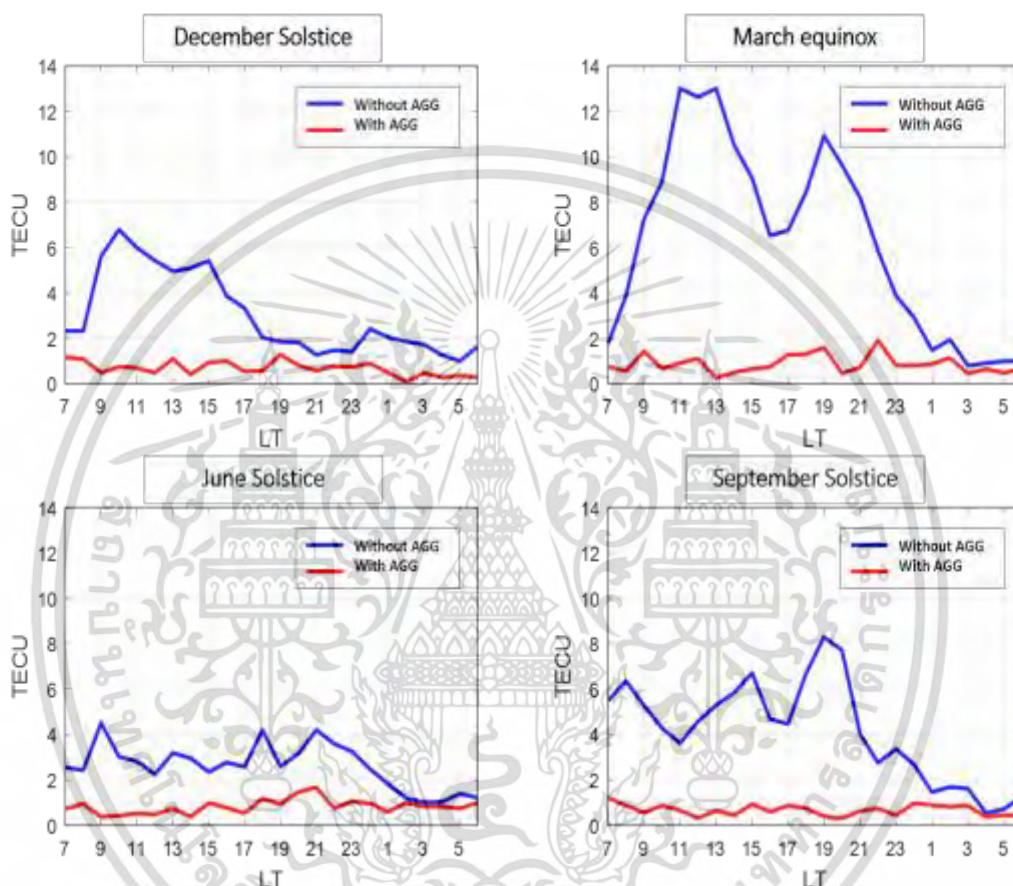


Figure 6.28 Mean difference between MED VTEC and IRI VTEC (blue line) and between MED VTEC and IRF VTEC (red line) in December solstice, March equinox, June solstice and September equinox.

The results in this chapter exhibit the importance of ionospheric study, especially the ionosphere near magnetic equator and in low latitude region using the two-dimensional (2D) map of total electron content (TEC). The aggregation technique with the proposed LDF can expand and improve the VTEC map over Thailand region.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER 7

CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

7.1 Conclusions

This work exhibits the importance of ionospheric study, especially the ionosphere characteristics and irregularities in low latitude region and near the magnetic equator such as Thailand. The two-dimensional (2D) map of vertical total electron content (VTEC) is developed using data aggregation between the observed GPS VTEC and the estimated VTEC of the International Reference Ionosphere Model (IRI-2012 model) with the proposed latitude-dependent factor (LDF). In addition, the adjusted spherical harmonic model (ASHM) with the maximum degree of three is used to calculate the regional VTEC at the desired locations in Thailand.

The GPS VTEC are calculated from the RINEX data recorded at GPS stations in Thailand on quiet days: 8 July 2012 (DOY190) for studying the diurnal variation. Furthermore, the data on 22 January (DOY022), 9 February (DOY040), 8 July (DOY190) and 21 August (DOY234) in 2016 (moderate solar activity) are investigated to represent 4 seasons: December solstice, March equinox, June solstice and September equinox. The regional VTEC map is developed with the temporal resolution of 2 hours and the spatial resolution of $2.5^\circ \times 5^\circ$ in latitude and longitude, respectively.

The results show that the proposed LDF is the useful factor to adjust the VTEC difference between the GPS observation and the IRI-2012 estimation. The LDF can decrease the VTEC difference in the maximum level of 13 TECU during daytime (13LT) in March equinox. The developed aggregated VTEC map is a powerful tool for monitoring the regional ionospheric characteristics over Thailand and some area of neighboring countries such as Myanmar, Laos, Cambodia, Indonesia and Malaysia.

7.2 Suggestions for future works

1. The VTEC map based on the regional observation data can be constructed in real-time or near real-time.

2. The ionospheric observation at conjugate stations in EIA region can exhibit the asymmetry/symmetry of the ionospheric characteristics and irregularities over the magnetic equator and the low latitude region.

3. The TEC variation during the period of storm occurrences can indicate the storm characteristics.

4. The aggregated VTEC can be the alternative input of the ASHM for coefficient calculation.



REFERENCES

- Aarons, J., 1977. **Equatorial scintillations: a review**, IEEE Trans. Antennas Propag., AP-25 (5), 729-736.
- Abdu, M.A., 2001. **Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere system relevant to spread F**. J. Atmos. Solar Terrest. Phys., 63, 869-884.
- Aggarwal, M., 2011. **TEC variability near northern EIA crest and comparison with IRI model**. Adv. Space Res. 48, 1221-1231.
- Appleton, E.V., 1946. **Two anomalies in the ionosphere**. Nature 157, 691.
- Bilitza, D., 2014a. **The International Reference Ionosphere: Rawer's IRI and its status today**. Adv. Radio Sci. 12, 231-236.
- Bilitza, D., Altadill, D., Zang, Y., Mertens, C., Truhlik, V., Richards, P., McKinnell, L.A., Reinisch, B., 2014b. **The international reference ionosphere 2012 - a model of international collaboration**. J. Space Weather Space Clim. 4 (A07).
- Bilitza, D., 2015. **The International Reference Ionosphere - Status 2013**. Adv. Radio Sci. 55, 1914-1927.
- Bilitza, D., Altadill, D., Truhlik, V., Shubin V., Galkin I., Reinisch, B., Huang X., 2017. **International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions**. Space Weather, 15, 418-429.
- Booker, H.G., Wells, H.W., 1938. **Scattering of radio waves in the F-region of the ionosphere**. Terr. Magn. Atmos. Electr., vol. 43, 249-256.
- Cohen, R., Bowles, H.W., 1961. **Onset the nature of equatorial spread F**. J. Geophys. Res., vol. 66, 1081-1106.
- Covington, A.E., 1969. **Solar Radio Emission at 10.7 cm, 1947-1968**. J. R. Astron. Soc. Can., 63, 125-132.

- Hernández-Pajares, M., Juan, J.M., Sanz, J., Orus, R., Garcia-Rigo, A., Feltens, J., Komjathy, A., Schaer, S.C., Krankowski, A., 2009. **The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998.** *J Geod.* 83, 263-275.
- Hoang, T.L., Abdu, M.A., MacDougall, J., Batista I.S., 2010. **Longitudinal differences in equatorial spread F characteristics between Vietnam and Brazil.** *Adv. Space Res.* 45, 351-360.
- Huy, M.L. Amory-Mazaudier, C., Fleury, R., Bourdillon, A., Lassudrie-Duchesne, P., Thi, L.T., Chien, T.N., Ha, T.N., Vila, P., 2014. **Time variation of the total electron content in the Southeast Asian equatorial ionization anomaly for the period 2006-2011.** *Adv. Space Res.* 54, 355-368.
- Kelly, M.C., 2009. **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics.** Second Edition, Elsevier Inc.
- Klingam, S., Supnithi, P., Rungraengwajjake, S., Tsugawa, T., Ishii, M., Maruyama, T., 2015. **The occurrence of equatorial spread-F at conjugate stations in Southeast Asia.** *Adv. Space Res.* 55, 2139-2147.
- Lee, C.C., Liou, Y.A., Otsuka, Y., Chu, F.D., Yeh, T.K., 2008. **Nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances detected by network GPS received in Taiwan.** *Journal of Geophysical Research.* 113, A12316.
- Leong, S. K., Musa, T.A., Omar, K., Subari, M.D., Pathy, N.B., Asillam, M.F., 2015. **Assessment of ionosphere models at Banting: Performance of IRI-2007, IRI-2012 and NeQuick 2 models during the ascending phase of Solar Cycle 24.** *Adv. Space Res.* 55, 1928-1940.
- Liu, L., Chen, Y., 2009. **Statistical analysis of solar activity variations of total electron content derived at Jet Propulsion Laboratory from GPS observations.** *J. Geophys. Res.*, 114, A10311.
- Ma, G. and Maruyama, T., 2003. **Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan.** *Annales Geophysicae.* 21, 2083-2093.

- Maruyama, T., Matuura, N., 1984. **Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles.** J. Geophys. Res., vol. 89, pp. 10903-10912.
- Maruyama, T., Nozaki, K., Yamamoto, M., Kukao, S., 2002. **Ionospheric height changes at two closely separated equatorial stations and implications in spread F onsets.** J. Atmos. Solar Terrest. Phys., 64, 1557-1563.
- Maruyama, T., Kawamura, M., Saito, S., Nozaki, K., Kato, H., Hemmakorn, N., Boonchuk, T., Komolmis, T., Ha Duyen, C., 2007. **Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with ionosonde chain in Southeast Asia.** Ann. Geophys., vol. 25, 1569-1577.
- Maruyama, T., 2012. **Ionospheric Space Weather and its Effect on Radio Systems.** The 1st AOSWA Workshop, Chiang Mai, 22-24 February 2012.
- Mathews, J.D., Gonzalez, S., Sulzer, M.P., Zhou, Q.-H., Urbina, J., Kudeki, E., Franke, S., 2001. **Kilometer-scale layered structures inside spread-F.** Geophys. Res. Lett., vol. 28, pp. 4167-4170.
- Okoh, D., McKinnell, L.A., Cilliers, P., Okere, B., Okonkwo, C., Radio, B., 2015. **IRI-vTEC versus GPS-vTEC for Nigerian SCINDA GPS stations.** Adv. Space Res. 55, 1941-1947.
- Opio, P., D'ujanga, F.M., Ssenyonga, T., 2015, **Latitudinal variation of the ionosphere in the African sector using GPS TEC data.** Adv. Space Res. 55, 1640-1650.
- Opperman, B.D.L., Cilliers, P.J., McKinnell, L.A., Haggard, R., 2007. **Development of a regional GPS-based ionospheric TEC model for South Africa.** Adv. Space Res. 39, 808-815.
- Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S., Miyazaki, S., 2002. **A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan.** Earth Planets Space. 54, 63-70.
- Piggott, W.R., Rawer, K., 1972. **URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction 2nd ed.** Elsevier, New York.

- Rungraengwajake, S., Supnithi, P., Tsugawa, T., Maruyama, T., 2013. **The variation of equatorial spread-F occurrences observed by ionosondes at Thailand longitude sector.** Adv. Space Res. 52, 1809-1819.
- Rungraengwajake, S., Supnithi, P., Saito, S., Siansawasdi, N., Saekow, A., 2015. **Ionospheric delay gradient monitoring for GBAS by GPS stations near Suvarnabhumi airport, Thailand.** Radio Sci., 50, 1076-1085.
- Rungraengwajake, S., 2016. **A study of ionosphere delay gradient using GPS monitoring stations near Suvarnabhumi airport, Thailand.** Ph.D. Thesis, KMITL, Thailand.
- Rideout, W., Coster, A., 2006. **Automated GPS processing for global total electron content data.** GPS Solut., 10, 219-228.
- Saito, S., Maruyama, T., 2006. **Ionospheric height variations observed by ionosondes chain in Southeast Asia.** Ann. Geophys., 25, 1569-1577.
- Santis, A.D., Chiappini, M., Dominici, G., Meloni, A., 1997. **Regional geomagnetic field modelling: the contribution of the Istituto Nazionale di Geofisica,** Annali Di Geofisica, XL, N. 5.
- Schaer, S., 1977. **How to use CODE's Global Ionosphere Maps.** Astronomical Institute, University of Berne, 1977.
- Schaer, S., Gurtner, W., 1998a. **IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.** Proceedings of the IGSAC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9-11.
- Schaer, S., Gurtner, W., 1998b. **IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1.** Proceedings of the IGSAC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9-11.
- Shimazaki, T., 1955. **Word daily variability in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2-layer.** J. Radio Res. Labes. (Jpn.) 2, 85-97.
- Tapping, K.F., 2013. **The 10.7 cm solar radio flux ($F_{10.7}$).** Space Weather, 11, 394-406.

Tsugawa, T., Otsuka, Y., Coster, A.J., Saito, A., 2007. **Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America.** Geophys. Res. Lett.34, L22101.

Vallado, D.A., 1997. **Fundamentals of Astrodynamics and Applications.** McCraw-Hill. Space Technology Series.

Zheng, J., Zhao, B., Xiong, B., Wan, W., 2016. **Spatial and temporal analysis of the total electron content over China during 2011-2014.** Adv. Space Res. 57, 2470-2478.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIST OF PUBLICATIONS

Journals

Somjai Klinngam, Pornchai Supnithi, Kornyanat Hozumi, Takuya Tsugawa “Regional VTEC Map over Thailand with Latitude-Dependent Data Aggregation,” *Advances in Space Research* (Submitted).

Macro Pietrella, Michael Pezzopane, Paulo R. Fagundes, Rodolfo de Jesus, Pornchai Supnithi, Somjai Klinngam, Rezquer G. Ezquer, Miguel Angel Cabrera, “Equatorial spread-F occurrence at low latitudes in different longitude sectors under moderate and high solar activity,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 164, pp. 149-162, 2017.

Somjai Klinngam, Pornchai Supnithi, Sarawoot Rungraengwajjake, Takuya Tsugawa, Mamoru Ishii, Takashi Maruyama, “The occurrence of equatorial spread-F at conjugate stations in Southeast Asia,” *Advances in Space Research*, vol. 55, pp. 2139-2147, 2015.

Conference Proceedings

Phimmasone Thammavongsy, Pornchai Supnithi, Somjai Klinngam, Watid Phakphisut, Kornyanat Hozumi, Takuya Tsugawa, “Statistical Analysis of High Frequency Radio Parameters on St. Patrick’s day in Thailand,” 5th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017.

Somjai Klinngam, Pornchai Supnithi, Athiwat Chiablaem, Takuya Tsugawa, Kornyanat Watthanasangmechai, “Data Assimilation and Adjusted Spherical Harmonic Model of VTEC map over Thailand,” The 4th Asia Oceania Space Weather Alliance (AOSWA) Workshop, Jeju, Republic of Korea, October 24-27, 2016.

Athiwat Chiablaem, Pornchai Supnithi, Somjai Klinngam, Chaiwat Panachart, Apithep Saekow, Prasert Kenpankho, Kornyanat Watthanasangmechai, Tatsuhiro Tokoyama, Takuya Tsugawa, Mamoru Ishii, “Estimation of the single GPS-receiver bias using the gradient descent algorithm,” International Conference on the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, June 28 – July 1, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Somjai Klinngam, Pornchai Supnithi, Athiwat Chiablaem, Takuya Tsugawa, Mamoru Ishii, Takashi Maruyama, “Data Assimilation for Regional TEC Estimation and Mapping over Thailand,” International Reference Ionosphere (IRI) 2015 Workshop, Bangkok, Thailand, November 2-13, 2015.

Somjai Klinngam, Pornchai Supnithi, Takuya Tsugawa, Mamoru Ishii, Takashi Maruyama, “Solar Activity Variation of Equatorial Spread-F Observed in Thailand,” International Technical Conference on Circuit/Systems Computer and Communications (ITC-CSCC), Phuket, Thailand, July 1-4, 2014.

Somjai Klinngam, Pornchai Supnithi, Narongsak Manositthichai, Kasemsuk Sepsirisuk, Takuya Tsugawa, Takashi Maruyama, “The Statistics of Equatorial Spread-F at the Conjugate Stations in Southeast Asia,” Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE), Chiang Rai, Thailand, March 5-8, 2014.

Somjai Klinngam, Pornchai Supnithi, Sunti Tuntrakool, Takuya Tsugawa, Takashi Maruyama, Tsutomu Nagatsuma “The Occurrence of Equatorial Spread-F at the Conjugate Stations in Southeast Asia,” International Reference Ionosphere (IRI) 2013 Workshop, Olsztyn, Poland, June 24-28, 2013

AUTHOR BIOGRAPHY

Author: Mrs. Somjai Klinngam
Date of Birth: February 18, 1977
Place of Birth: Nakhon Ratchasima
Bachelor Degree: B. Eng.
Department: Telecommunication Engineering,
 Faculty of Engineering,
 Suranaree University of Technology
Year of Graduation: 1999
Master Degree: M. Eng.
Department: Telecommunication Engineering,
 Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year of Graduation: 2007



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้