

การศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ชุมพรใกล้บริเวณ
เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก

STUDY OF IONOSPHERE CHARACTERISTIC AT CHUMPHON
NEAR THE MAGNETIC EQUATOR

รุ่งชัย อัครวิริยะสุว
RUNGCHAI ATTAVIRYASUWON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-8308-11-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ชุมพรใกล้บริเวณ
เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก

STUDY OF IONOSPHERE CHARACTERISTIC AT CHUMPHON
NEAR THE MAGNETIC EQUATOR



รุ่งชัย อตตวิริยะสุวรรณ

RUNGCHAI ATTAVIRIYASUWON

จพ.

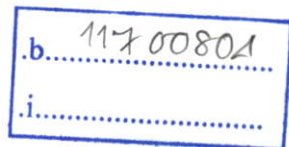
ร 621 7

9549

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 69082

วัน,เดือน,ปี..... - 7 ก.พ. 2550



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-8308-11-1

**STUDY OF IONOSPHERE CHARACTERISTIC AT CHUMPHON
NEAR THE MAGNETIC EQUATOR**

RUNGCHAI ATTAVIRIYASUWON

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-8308-11-1

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ชุมพร ใกล้บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก |
| นักศึกษา | นายรุ่งชัย อัดตวิริยะสุวรรณ |
| รหัสนักศึกษา | 46064102 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโทรคมนาคม |
| พ.ศ. | 2549 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.นิภา ลีลาธุจิ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | รศ.ณรงค์ เหมภรณ์ |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา และ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ค่าความถี่วิกฤต และ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สถานีตรวจวัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตั้งอยู่ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ที่ตำแหน่ง เส้นลองจิจูด 99.3 องศาตะวันออก เส้นละติจูด 10.7 องศาเหนือ โดยใช้ไอโอโนซอนเดเทคนิคในการวัดข้อมูล ความสูงของชั้นบรรยากาศ และ ค่าความถี่วิกฤต และทำการบันทึกค่าเป็นภาพ ไอโอโนแกรม ข้อมูลไอโอโนแกรมที่ได้มาจะทำการบันทึกทุกๆ 15 นาทีตลอดปี พ.ศ. 2547 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (SSN) มีค่าต่ำ ส่วนการวัดค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (TEC) จะใช้การวัดค่า หน่วงเวลาของสัญญาณดาวเทียม GPS ย่าน L แบนด์ 2 ความถี่ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการในการศึกษาคือความสูงของชั้น F (h'F) ความถี่วิกฤต (foF2) ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และ การเกิด สเปรดเอฟ (Spread F) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้จะเกิดความแปรปรวนมากที่สุดในช่วงกลางคืน และ การเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ มีสาเหตุเดียวกันกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน (Scintillation) ของสัญญาณดาวเทียม โดยเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในช่วงกลางคืน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ค่าความถี่วิกฤต และค่า ปริมาณอิเล็กตรอนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตลอดระยะเวลา 1 ปี โดยทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้จะมีความแปรปรวนในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งความแปรปรวนนี้จะเกิดมากในช่วงของ Equinox นำความสัมพันธ์ของค่าความถี่วิกฤตมาหาค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ และ พบว่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแถบละติจูดต่ำจะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น

| | |
|--------------------------|---|
| Thesis Title | Study of Ionosphere Characteristic at Chumphon Near the Magnetic Equator |
| Student | Mr. Rungchai Attaviriyasuwon |
| Student ID. | 46064102 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Telecommunications Engineering |
| Year | 2006 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Nipha Leelaruji |
| Co-Thesis Advisor | Assoc. Prof. Narong Hemmakorn |

ABSTRACT

This thesis proposes the study and analysis of the ionospheric height variation, critical frequency of ionosphere and total electron content (TEC) near the magnetic equator, at Chumphon campus King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, which is located at longitude 99.3-°E latitude 10.7 °N. Ionosonde technique together with ionogram analysis is used to determine apparent height ($h'F$) and critical frequency (f_{oF2}), respectively. Ionogram is obtained every 15 minutes during the year 2004. The study period is during the minimum sunspot number. In this experiment, the correlation of different time delay of 2 L-band signals from GPS satellites is used to determine the total electron content (TEC). The study are investigated the layer F of ionospheric height, critical frequency and total electron content, these parameters are most irregular in the nighttime. The spread F occurs due to ionospheric irregularities. A radio phenomenon resulting from the ionospheric irregularities is the scintillation of receiving satellite signal. This study includes the analysis of relationship between apparent height and critical frequency with total electron content, spanning one-year period. The irregularities of all parameters occur during equinox period. Finally, the determinations of slab thickness of ionosphere are calculated due to the relation of TEC with electron peak in F2 layer (N_mF2), the N_mF2 is computed from critical frequency of ionosphere. It has been important parameter in that it is correlated with the scale height of ionosphere. The pre-sunrise peak in slab thickness occurs at low latitude.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ. นิภา ลีลารุจิ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ รศ. ณรงค์ เหมกรณ์ ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอขอบพระคุณ นาย ทิทัมพร บุญซึก เป็นอย่างสูงสำหรับคำปรึกษาเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย และ คำแนะนำดี ๆ เกี่ยวกับงานวิจัย

I would like to express my deeply many thanks to Prof. Masabumi Kawamura and Prof. Maho Nakamura from Ionosphere and Radio Propagation Group National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukui-kita, Koganei, Tokyo 184-8795 JAPAN, for all advises and very good support me concerning about my paper and thesis.

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ขอขอบคุณองค์กร NICT และ สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และ หนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

รุ่งชัย อัดตวิริยะสุวรรณ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 1 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย..... | 3 |
| 1.6 ขั้นตอนการศึกษา..... | 4 |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี..... | 5 |
| 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศ..... | 5 |
| 2.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก..... | 7 |
| 2.2.1 ชั้นย่อยต่างๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 11 |
| 2.2.1.1 ชั้น D..... | 11 |
| 2.2.1.2 ชั้น E ปกติ | 12 |
| 2.2.1.3 ชั้น Sporadic E..... | 12 |
| 2.2.1.4 ชั้น F1, F2 และ F..... | 13 |
| 2.2.2 ทฤษฎีการแพร่ของคลื่นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 14 |
| 2.2.3 ไอโอโนซอนเดเทคนิค..... | 18 |
| 2.3 ทฤษฎีการส่งคลื่นสั้นในการสื่อสารระยะไกล..... | 21 |
| 2.4 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 28 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.5 ปรากฏการณ์สเปคตรัม..... | 28 |
| บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย..... | 35 |
| 3.1 อุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย..... | 35 |
| 3.1.1 อุปกรณ์การวัดความสูงและความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 35 |
| 3.1.2 อุปกรณ์วัดปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 38 |
| 3.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล..... | 41 |
| 3.2.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตของชั้น F จากไอโอโนแกรม..... | 41 |
| 3.2.1.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของชั้น F จากไอโอโนแกรม..... | 42 |
| 3.2.1.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลความถี่วิกฤตของชั้น F จากไอโอโนแกรม..... | 47 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสูงและความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 56 |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละช่วงเวลาในระหว่างวันและแบบรายเดือน..... | 56 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละช่วงเวลาในระหว่างวันและแบบรายเดือน..... | 61 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสูงและความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล..... | 65 |
| 4.4 ผลการวิเคราะห์การเกิดสเปคตรัม..... | 67 |
| บทที่ 5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงความสูงและความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในชั้น..... | 69 |
| 5.1 แนวคิดและหลักการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 70 |
| 5.1.1 การคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนโดยใช้ความต่างของค่าห้วงเวลาของสัญญาณดาวเทียม..... | 75 |
| 5.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในแต่ละช่วงเวลา..... | 78 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนกับความสูงของ ชั้น F และค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 80 |
| 5.4 ความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 89 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 94 |
| บรรณานุกรม..... | 96 |
| ภาคผนวก..... | 99 |
| ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 100 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 101 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 รายละเอียดของเครื่องมือในการวัดความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ใช้ในการทดลอง..... | 36 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การแบ่งประเภทชั้นบรรยากาศโลกในชั้นต้น..... | 5 |
| 2.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของส่วนประกอบหลักในชั้นบรรยากาศเทียบกับ ความสูง | 6 |
| 2.3 ลมสุริยะจากดวงอาทิตย์ที่แพร่ไปกระทบกับชั้นบรรยากาศของโลก..... | 7 |
| 2.4 ขบวนการไอออไนเซชัน..... | 8 |
| 2.5 ขบวนการรวมตัวกันใหม่..... | 9 |
| 2.6 อัตราการเกิดขบวนการ ไอออไนซ์ที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นอนุภาคของอากาศและ การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากดวงอาทิตย์ | 10 |
| 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 11 |
| 2.8 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแต่ละระดับความสูง..... | 14 |
| 2.9 ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์..... | 18 |
| 2.10 คลื่นที่ใช้ในการมอดูเลตของไอโอโนซอนเด..... | 19 |
| 2.11 การคำนวณเวลาหน่วงในการเดินทางของคลื่น..... | 19 |
| 2.12 การเกิดคลื่นอีกหนึ่งคลื่นสะท้อนกลับมาที่เครื่องรับ..... | 21 |
| 2.13 ภาพไอโอโนแกรมที่ปรากฏเป็นเส้นโค้ง 2 เส้น..... | 21 |
| 2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับจำนวนจุดดับบน ดวงอาทิตย์..... | 23 |
| 2.15 ความสัมพันธ์ของ สกิป โซน (Skip zone) ระยะทางการสื่อสาร โดยใช้สกายเวฟและ ระยะทางของกราวนด์เวฟ..... | 25 |
| 2.16 ภาพจำลองการหาระยะทางที่การเดินทางของคลื่น โดยการสะท้อนชั้นไอโอโนสเฟียร์..... | 27 |
| 2.17 การเดินทางของคลื่นเมื่อใช้ค่ามุมวิกฤตในการสะท้อนชั้นไอโอโนสเฟียร์..... | 27 |
| 2.18 การเดินทางของคลื่นวิหุฑูที่ความถี่เดียวกันแต่มีการส่งทำมุมกับชั้นบรรยากาศต่างกัน..... | 28 |
| 2.19 แบบจำลองกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ..... | 29 |
| 2.20 ลักษณะสัญญาณดาวเทียมเมื่อเดินทางผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน..... | 30 |
| 2.21 สัญญาณดาวเทียมภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน | 31 |
| 2.22 ภาพถ่ายจากดาวเทียมสำรวจสภาพอากาศ GMS-5 ในสภาวะปกติ..... | 32 |
| 2.23 ภาพถ่ายจากดาวเทียมในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน | 32 |
| 2.24 สาเหตุการเกิดสเปรดเอฟ..... | 33 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมการทำงานของระบบไอโอโนซอนเด..... | 35 |
| 3.2 สายอากาศโฟลเด็คโคโพล..... | 37 |
| 3.3 เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar..... | 37 |
| 3.4 คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม..... | 38 |
| 3.5 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การวัดค่า TEC..... | 39 |
| 3.6 สายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS (NovAtel's Model 502GPSAntenna)..... | 39 |
| 3.7 ภาพเครื่องรับสัญญาณ GPS..... | 40 |
| 3.8 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลค่า TEC และจอแสดงผล..... | 40 |
| 3.9 แบบจำลองของระดับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากไอโอโนแกรม..... | 41 |
| 3.10 ไอโอโนแกรมในเวลากลางวัน..... | 42 |
| 3.11 ไอโอโนแกรมในเวลากลางคืน..... | 42 |
| 3.12 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อมีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น E มากกว่าปกติ | 42 |
| 3.13 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการดูดกลืนคลื่น (Absorption)..... | 44 |
| 3.14 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในเวลากลางคืนและเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ..... | 45 |
| 3.15 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดพายุแม่เหล็ก (Magnetic storm)..... | 47 |
| 3.16 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดการลดทอนและการแทรกสอด ของคลื่น..... | 49 |
| 3.17 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อคลื่นมีการสะท้อนที่ผิดไปจากปกติ..... | 51 |
| 3.18 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในการวัดค่าความถี่วิกฤตเมื่อมีการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ..... | 53 |
| 4.1 ภาพไอโอโนแกรมที่ชุมพรทุก ๆ 15 นาทีตั้งแต่เวลา 17.00-18.45 น. ในวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2547..... | 57 |
| 4.2 การเปลี่ยนแปลงความสูงของ F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2547..... | 58 |
| 4.3 การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน..... | 60 |
| 4.4 ค่าความถี่วิกฤตของ F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2547..... | 62 |
| 4.5 ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน..... | 64 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.6 การเปลี่ยนแปลงของความสูงของชั้น F และ ความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ 3 ฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547..... | 66 |
| 4.7 ภาพไอโอโนแกรมเมื่อเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ..... | 67 |
| 4.8 จำนวนการเกิดของปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ในปี พ.ศ. 2547..... | 68 |
| 5.1 ระยะทางจริงที่คลื่นเดินทางและระยะทางตรงจากแนวดาวเทียมถึงเครื่องรับ..... | 74 |
| 5.2 ลักษณะของมุมเงย มุมเซไนท์ที่ตำแหน่งของเครื่องรับ และมุมเซไนท์ที่จุด IP..... | 77 |
| 5.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่ทำการทดลองที่สถานีตรวจวัดที่ชุมพรในปี พ.ศ. 2547..... | 79 |
| 5.4 พารามิเตอร์ของชั้น ไอโอ โนสเฟียร์ที่ทำการวิเคราะห์ในปี พ.ศ. 2547..... | 81 |
| 5.5 การเปรียบเทียบค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤต และ ดัชนีในเดือน ม.ค. - เม.ย. พ.ศ. 2547..... | 83 |
| 5.6 การเปรียบเทียบค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤต และ ดัชนีในเดือน พ.ค. - ส.ค. พ.ศ. 2547..... | 84 |
| 5.7 การเปรียบเทียบค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤต และ ดัชนีในเดือน ก.ย. - ธ.ค. พ.ศ. 2547..... | 85 |
| 5.8 การเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอ โนสเฟียร์ และ ดัชนีของค่า $TEC / (foF_2)^2$ ที่ทำการตัดช่วงมาแสดง ช่วงละ 3 วัน..... | 87 |
| 5.9 การทำ Curve estimate ระหว่างค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอ โนสเฟียร์ในปี พ.ศ. 2547..... | 88 |
| 5.10 แบบจำลองจุดดับบนดวงอาทิตย์..... | 90 |
| 5.11 ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอ โนสเฟียร์ที่ Hawaii (19° N, 26° E) ในช่วงเวลาที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุด (ค.ศ. 1981) และ ต่ำสุด (ค.ศ. 1985) ตามลำดับ..... | 91 |
| 5.12 ค่า TEC, NmF2 และ ค่า D (Slab thickness) ในปี พ.ศ. 2547..... | 92 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารดาวเทียมมีบทบาทมากขึ้นในสังคมไม่ว่าจะในด้านธุรกิจ หรือ ในชีวิตประจำวัน เพื่อเป็นประโยชน์กับประชาชนในด้านการรับรู้ข่าวสาร เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านดาวเทียมก็ เป็นส่วนหนึ่งที่มนุษย์ปัจจุบันใช้ประโยชน์หลายด้านไม่ว่าจะเป็น ด้านการถ่ายทอดข่าวสาร ด้าน พยากรณ์อากาศ ด้านการทหาร การค้นหาทรัพยากรธรณี และอื่นๆที่เป็นประโยชน์อีกมาก แต่ใน การสื่อสารดาวเทียมนั้น ยังมีผลกระทบบางประการเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณผ่าน ชั้นบรรยากาศของโลก โดยชั้นบรรยากาศที่มีผลกระทบต่อสื่อสารผ่านดาวเทียมได้แก่ ชั้น- บรรยากาศโทรโพสเฟียร์และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทร- โปสเฟียร์นั้นจะส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห (Refractive index) ซึ่งมีผลต่อการ- แพร่กระจายคลื่นวิทยุที่มีความถี่สูงกว่า 30 MHz. ถึง 3 GHz. ส่วนความถี่มากกว่า 10 GHz. เช่น ความถี่ย่าน Ku จะได้รับผลกระทบจากสัญญาณเกิดการดูดกลืน (Absorption) การกระเจิง (Scatter) ของสัญญาณจาก เมฆ, ฝน, หิมะ และ อื่นๆ ส่วนผลกระทบที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอ- โอโนสเฟียร์นั้น เนื่องจาก เกิดการหน่วงเวลาของสัญญาณ (Time delay) ซึ่งทำให้สัญญาณที่ มาถึงยังจุดรับช้ากว่าปกติที่คลื่นจะเดินทางในระยะทางตรง และจะเกิดฟาราเดย์โรเตชัน (Faraday rotation) ซึ่งจะทำให้มุมโพลาไรซ์ของสัญญาณนั้นเกิดการหมุนไปจากมุมเดิม และผลของการ เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณ (Scintillation) ซึ่งจะทำให้ระดับสัญญาณเกิด การแกว่งขึ้นลงอย่างรวดเร็วมากกว่าระดับปกติ โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลา และ องค์ประกอบของชั้นบรรยากาศที่สัญญาณเดินทางผ่านในแต่ละระดับ ความสูงจากพื้นโลก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก โครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนภายในชั้น F และ E_s โดยชั้น E_s (Sporadic E) คือชั้นที่มีสภาวะที่ชั้นเกิดความผิดปกติแบบชั่วคราวในเวลา กลางวันและจะมีผลกระทบกับความถี่ย่าน 30-300 MHz. หรือที่เรียกว่าย่าน VHF โดย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันแบบครึ่งคาบ (Quasi periodic scintillation) ส่วนใหญ่จะพบปรากฏการณ์นี้ในแถบละติจูดกลาง (Mid latitude)

ผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นสัญญาณดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอ- โนสเฟียร์ ส่วนมากจะเกิดผลกระทบรุนแรงในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 3 GHz จึงมีการศึกษาและ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความแปรปรวนของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ได้แก่ การ เปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ในชั้นไอโอโนส-

เฟียร์ และปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฤดูกาล ตำแหน่งของละติจูดแม่เหล็ก และปริมาณของจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot number) ซึ่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้จะมีประโยชน์ในศึกษาการเคลื่อนตัวของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ว่ามีการเคลื่อนตัวอย่างไรเมื่อมีข้อมูลในการศึกษาในหลาย ๆ พื้นที่, ข้อมูลความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีประโยชน์ต่อการศึกษาในระบบวิทยุสื่อสาร เช่น วิทยุสมัครเล่น และข้อมูลของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หรือที่เรียกว่า Total Electron Content (TEC) จะช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสื่อสารดาวเทียม โดยที่ทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้ได้มีผู้ทำการศึกษามาก่อนแล้วว่าค่า TEC จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของจุดดับบนดวงอาทิตย์ตามวัฏจักรสุริยะ และค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นมีความสัมพันธ์กับค่า TEC โดยได้มีการศึกษาความสัมพันธ์นี้และได้มีการหาค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแนวละติจูดกลางและละติจูดเหนือ [1] ซึ่งที่ตั้งของประเทศไทยนั้นอยู่ในแนวละติจูดต่ำคือ อยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตร (Equatorial zone) จะได้รับผลกระทบต่อความแปรปรวนของชั้นไอโอโนสเฟียร์ค่อนข้างรุนแรง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการที่จะศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์, ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และ ค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ใกล้บริเวณเส้นศูนย์สูตร

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ใกล้บริเวณเส้นศูนย์สูตร โดยได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติว่าทั้ง 3 พารามิเตอร์ที่ได้กล่าวมานั้นมีความสอดคล้องเกี่ยวเนื่องกันอย่างไร ตามช่วงเวลาและฤดูกาลต่าง ๆ โดยได้ศึกษาโครงสร้างและกลไกทางฟิสิกส์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบกันไปด้วย และได้หาความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากความสัมพันธ์ของค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการศึกษาของนักวิจัยต่างประเทศได้ทำการศึกษา ณ ตำแหน่งละติจูดต่างๆของโลกและได้มีการศึกษาว่า ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นจะมีความรุนแรงในแถบละติจูดต่ำ (Low latitude) เช่น ในประเทศไทยหรือแถบเส้นศูนย์สูตรและรวมไปถึงแถบขั้วโลก และจะมีความรุนแรงยิ่งขึ้นในช่วงที่จุดดับของดวงอาทิตย์

มีค่ามาก ดังนั้นผลกระทบที่มีต่อการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณดาวเทียมจะได้รับผลกระทบไปด้วย จึงได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความสูงของชั้น F ความถี่วิกฤต และ ค่าปริมาณอิเล็กตรอน และ นำความสัมพันธ์ของค่าความถี่วิกฤตกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มาหาค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ใช้อุปกรณ์การวัดข้อมูล 2 ชุด โดยวัดค่าความสูง และ ค่าความถี่วิกฤตโดยใช้ไอโอโนสเฟียร์เทคนิคบันทึกค่าเป็นไอโอโนแกรม และ กำหนดค่า TEC โดยใช้ดาวเทียม GPS ในการหาค่าช่วงเวลาของสัญญาณ 2 ความถี่จากดาวเทียม คือ L_1 (1575.42 MHz.) และ L_2 (1227.60 MHz.) ซึ่งทั้งในการวัดค่าทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้ มีสถานีที่ทำการวัดข้อมูลอยู่ที่เดียวกัน ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร (ตำแหน่ง เส้นแวง 99.3 องศาตะวันออก เส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ) และ นำข้อมูลทั้ง 3 พารามิเตอร์มาศึกษา พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง และ วิเคราะห์ข้อมูลว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้จะได้รับผลกระทบเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางคืน [2] โดยได้ทำการศึกษาดลอดระยะเวลา 1 ปี การวิเคราะห์ข้อมูลอยู่ในปี พ.ศ. 2547 ซึ่งในช่วงเวลานี้เป็นช่วงที่จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำโดยจะส่งผลกระทบไปถึงค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่แปลกไปจากปกติ [1]

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความแปรปรวนของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในปี พ.ศ. 2547 ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ และปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งได้นำทั้ง 3 พารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับความแปรปรวนของชั้น F ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้ มาหาความสัมพันธ์กันและได้นำความสัมพันธ์ของค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มาหาค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยที่ข้อมูลที่น่ามาศึกษาได้มาจากการทำการวัดจริง โดยมีสถานีที่ทำการวัดข้อมูลตั้งอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงโครงสร้างของชั้นไอโอโนสเฟียร์, กลไกทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นกับชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ส่งผลกระทบต่อ การสื่อสารดาวเทียม และ ทฤษฎีพื้นฐานของไอโอโนซอนเดเทคนิค (ionosonde technique) ซึ่งใช้ในการวัดค่าความสูงและความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ออกมาเป็นภาพไอโอโนแกรม

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ค่าความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์จากภาพไอโอโนแกรม

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามเวลาเป็นแบบรายวัน รายเดือน และ รายปี

บทที่ 5 กล่าวถึงการได้มาของข้อมูลปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (TEC), การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (TEC) เป็นแบบรายเดือน และรายปี และ หาความสัมพันธ์ของปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน กับ ค่าความถี่วิกฤต และ ค่าความสูงของชั้น F ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ และ นำความสัมพันธ์ของ TEC กับ ความถี่วิกฤต มาหาค่าความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

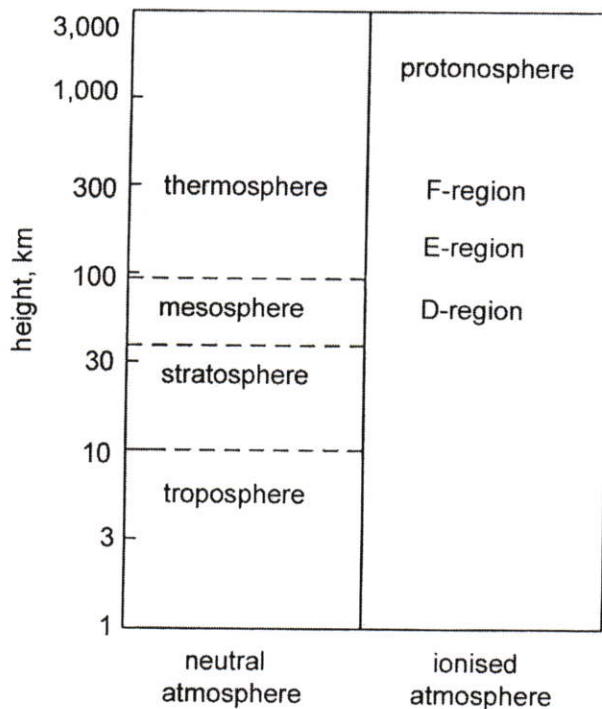
บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศ

ชั้นบรรยากาศของโลกถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเบื้องต้น คือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง (Neutral Atmosphere) และชั้นบรรยากาศที่เป็นไอออไนซ์หรือเรียกว่าไอโอโนสเฟียร์ (Ionized Atmosphere) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่ชั้นบรรยากาศที่เกิดการไอออไนซ์นี้เกิดเนื่องจากการที่โลกมีการเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศที่มีพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน และ มีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานไปมา ซึ่งจะส่งผลต่อชั้นบรรยากาศที่มีอนุภาคความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

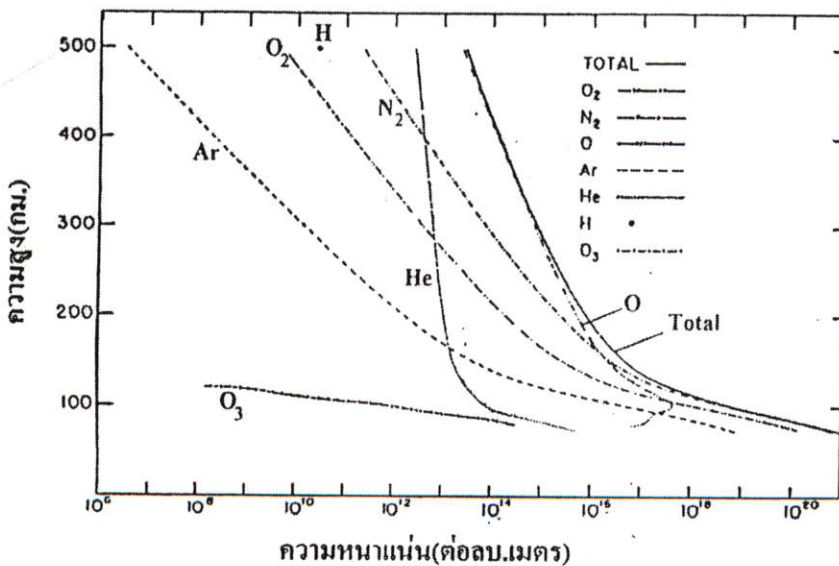


รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทชั้นบรรยากาศโลกในชั้นต้น [2]

สำหรับโครงสร้างของชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางสามารถจัดกลุ่มได้โดยใช้โพรไฟล์อุณหภูมิ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชั้นใหญ่ๆ โดยชั้นที่อยู่บริเวณพื้นโลกจะเป็นชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หรืออาจเรียกว่า Boundary Layer ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่เราใช้ดำรงชีวิตอยู่ โดยในชั้นบรรยากาศนี้จะประกอบไปด้วยก๊าซชนิดต่างๆ รวมไปถึงฝุ่นละออง และมลภาวะที่มาจากแหล่งต่างๆ ตลอดจน เมฆฝน ไอน้ำ หมอก หิมะ จะอยู่ในชั้นบรรยากาศนี้ทั้งสิ้น ซึ่งมีระยะความสูงเมื่อเทียบกับพื้นดินประมาณ 1-10 กิโลเมตร ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ อุณหภูมิของชั้น-

บรรยากาศในระยะแรกจะลดลงผกผันกับความสูงที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 7°C/km [3] และที่ระดับความสูงประมาณ 10 กิโลเมตร (ที่ตำแหน่งโทรโปพอส: Tropopause) หรือที่จุดเริ่มต้นของชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ อุณหภูมิจะมีแนวโน้มแปรตามความสูง โดยการเพิ่มของอุณหภูมิไปตามความสูงนี้ เนื่องจากโอโซนมีการดูดซับรังสี UV บางส่วนที่แผ่จากดวงอาทิตย์ในระดับความสูงดังกล่าว ลักษณะเช่นนี้จะปรากฏจนถึงระดับความสูงที่ 50 กิโลเมตร (หรือที่ตำแหน่งสตราโตพอส: Stratopause) อุณหภูมิก็จะเริ่มลดลงซึ่งแปรผกผันกับความสูงที่เพิ่มขึ้นของชั้นบรรยากาศมีโซสเฟียร์อีกครั้ง และที่ระดับความสูงประมาณ 80 กิโลเมตร อุณหภูมิจะมีการลดลงอย่างฉับพลันและลดลงจนถึงระดับต่ำสุดที่ประมาณ -92°C หลังจากจุดต่ำสุดของอุณหภูมิ (หรือหลังจากตำแหน่งมีโซพอส: Mesopause) นี้แล้ว อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าที่คงที่ที่ประมาณ $1,200^{\circ} \text{C}$ ณ ที่ระดับความสูงของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์

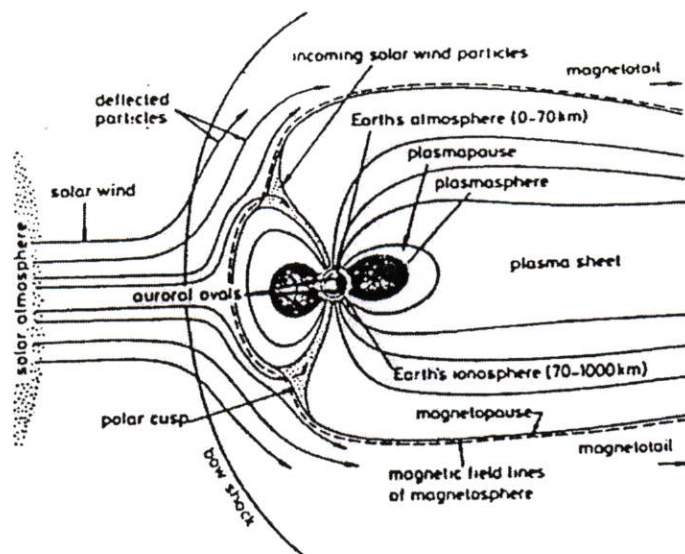
สำหรับชั้นบรรยากาศที่เป็นไอออนไนซ์นั้น สามารถแบ่งลักษณะได้โดยใช้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน เนื่องจากชั้นบรรยากาศส่วนบนของโลกนั้น โมเลกุลของออกซิเจนจะถูกทำให้แตกตัวด้วยรังสี UV ที่มีขนาดความยาวคลื่นสั้นกว่า 175.9 nm ขบวนการนี้มีความไวมากทำให้สภาวะที่มีความแปรปรวน (Turbulence) ไม่สามารถรักษา O_2 หรือให้ออกซิเจนอะตอม (O) รวมตัวกันได้ ดังนั้นจำนวนความหนาแน่นของออกซิเจนอะตอมจะเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระดับความสูงประมาณ 150 กิโลเมตร ดังนั้นที่ความสูงเหนือ 150 กิโลเมตรขึ้นไป ชั้นบรรยากาศส่วนนี้จึงมีอะตอมของออกซิเจนเป็นส่วนประกอบหลักจึงถูกเรียกว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ การเปลี่ยนแปลงตามความสูงของค่าความหนาแน่น ส่วนประกอบหลักของชั้นบรรยากาศนั้น แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของส่วนประกอบหลักในชั้นบรรยากาศเทียบกับความสูง [4]

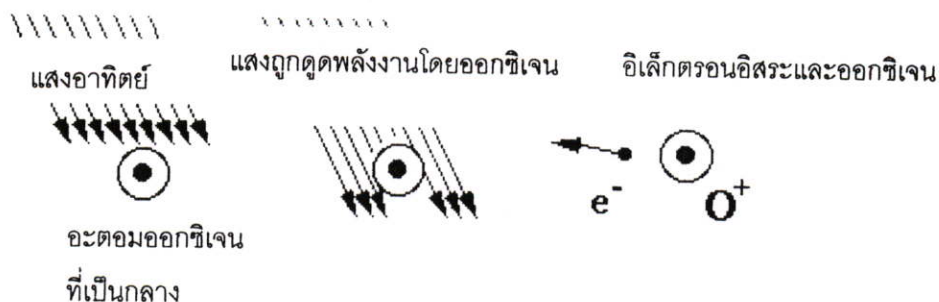
2.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือ บริเวณที่พลาสมา (Plasma) เกิดการไอออไนซ์โดยมีขอบเขตประมาณ 50 กิโลเมตร ถึง 2,000 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก มีโมเลกุลเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ถูกไอออไนซ์และพบว่ายังคงมีโมเลกุลที่เป็นกลางจำนวนมากเหลืออยู่ในชั้นที่อยู่สูงกว่า ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือ ชั้นพลาสมาสเฟียร์ (Plasmasphere) หรือโปรโตโนสเฟียร์ (Protonosphere) ซึ่งยังคงมีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระอยู่อย่างชัดเจนอิเล็กตรอนเหล่านี้ คือ สนามแม่เหล็กของโลกที่ทำหน้าที่ต่อต้านลมสุริยะ (Solar Wind) ซึ่งเป็นอนุภาคที่พุ่งออกจากดวงอาทิตย์ โดยแรงกระทำของอนุภาคที่พุ่งออกจากดวงอาทิตย์เหล่านี้จะบีบสนามแม่เหล็กของโลกไปในบริเวณทิศทางที่หันหลังให้กับดวงอาทิตย์ (Dark Side) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลมสุริยะจากดวงอาทิตย์ที่แพร่ไปกระทบกับชั้นบรรยากาศของโลก [4]

ตามปกติอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ในแต่ละช่วงเวลาและในแต่ละระดับความสูงนั้นจะเกิดไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดขบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) กล่าวคือ ภายใต้สภาวะความกดดันต่ำ (ที่ระดับความสูงมาก) สามารถเป็นไปได้ที่ทำให้อิเล็กตรอนหนึ่งหรือสองตัวหลุดจากโมเลกุลก๊าซ นอกจากนี้ไม่เพียงแต่การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของอิเล็กตรอนเท่านั้นที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา แต่ยังรวมถึงการแผ่รังสีบางชนิด เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และรังสีคอสมิก (Cosmic) ด้วย โดยเมื่อรังสีแพร่เข้าถึงชั้นบรรยากาศจะทำให้จำนวนอนุภาคบางส่วนของอากาศนั้นกลายเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ [5] รูปที่ 2.4 แสดงขบวนการไอออไนเซชัน

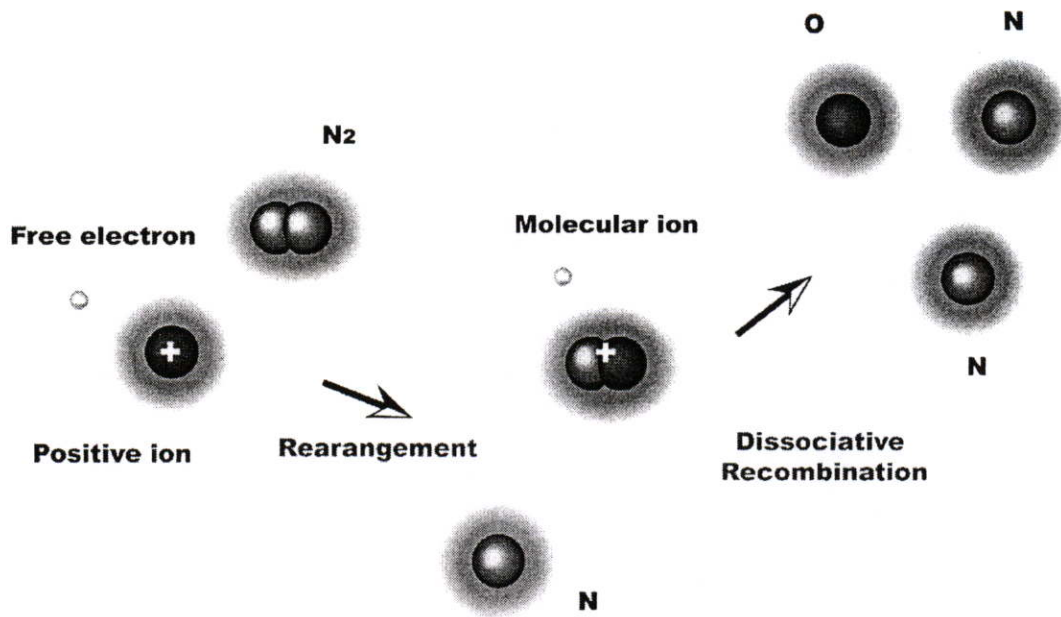


รูปที่ 2.4 ขบวนการ ไอออไนเซชัน

จากรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของออกซิเจนอะตอม (O) ที่เป็นส่วนประกอบหลักจะถูก ไอออไนซ์โดยโฟตอน ($h\nu$) จากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ผลผลิตที่ได้คือ



ผลผลิตที่ได้คืออิเล็กตรอนอิสระ และ โมเลกุลซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนหนึ่งตัวหลุดออกไปแล้วจะทำให้กลายเป็นไอออนประจุบวก (โมเลกุลที่ได้รับอิเล็กตรอนไปก็จะกลายเป็นไอออนประจุลบ) ไอออนเหล่านี้เปลี่ยนแปลงได้ง่ายภายใต้แรงทางไฟฟ้า เช่น แรงดูด หรือ แรงผลัก โดยปกติแล้ว อิเล็กตรอนและอะตอมต่าง ๆ ของก๊าซจะเคลื่อนที่ไปมาตลอดจึงมีการชนเกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีขบวนการการรวมตัวกันใหม่ (Process of Recombination) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา รูปที่ 2.5 แสดงขบวนการรวมตัวกันใหม่ของก๊าซออกซิเจนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



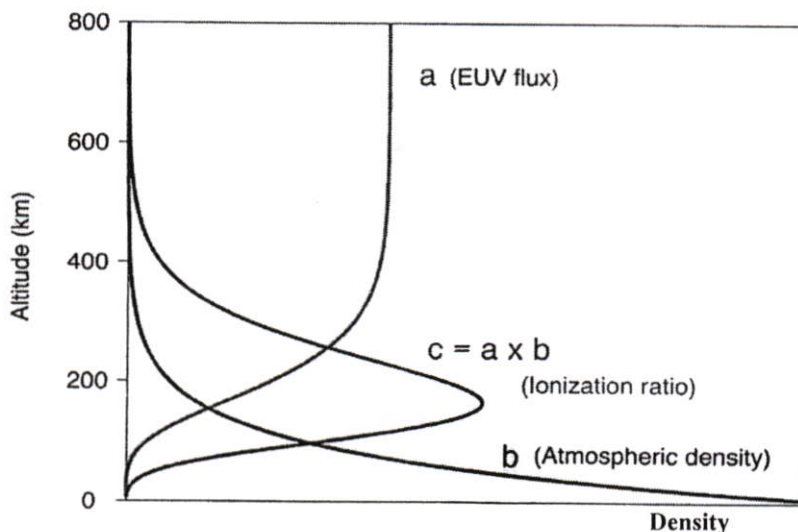
รูปที่ 2.5 ขบวนการรวมตัวกันใหม่ [6]

จากรูปที่ 2.5 อธิบายได้ว่าไอออนที่เกิดจากขบวนการไอออไนซ์ชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง (N_2) จะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนพลังงานหรือการแลกเปลี่ยนประจุและจะรวมตัวใหม่กับอิเล็กตรอนแตกตัวได้เป็นโมเลกุลที่เป็นกลางดังนี้



ดังนั้น โมเลกุลหนึ่ง โมเลกุลที่ถูกไอออไนซ์จะไม่คงความเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ตลอดไป โดยในส่วนของชั้นบรรยากาศโลกที่ต่ำ (ความกดดันสูง) จะมีการชนกันของอนุภาคถี่มากจึงมีโอกาสเกิดขบวนการรวมตัวกันใหม่มาก ดังนั้น โมเลกุลของอากาศจะคงความเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ในระยะเวลาสั้นกว่าชั้นบรรยากาศส่วนบน นอกจากนี้แล้วรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ได้ถูกดูดซับไปเป็นจำนวนมากแล้วโดยชั้นบรรยากาศส่วนบน ดังนั้นในบริเวณที่ความสูงต่ำกว่า 50 กิโลเมตร จะมีการไอออไนซ์เกิดขึ้นน้อยมาก ในทางกลับกันที่ความสูงมากกว่า 400 กิโลเมตรนั้น มีอนุภาคของอากาศที่เบาบาง ทำให้ความหนาแน่นของการไอออไนซ์มีค่าต่ำมาก ถึงแม้ว่าจะได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์มากก็ตาม ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าชั้นบรรยากาศในระดับความสูงในช่วง 50-400 กิโลเมตรซึ่งก็คือระดับการวางตัวของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้น จะมีปริมาณอนุภาคของอากาศ สภาวะความกดดันอากาศและการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตของดวงอาทิตย์เป็นไปอย่างเหมาะสมเอื้ออำนวยให้เกิดการไอออไนซ์ขึ้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ณ ความสูงในช่วงนี้มีความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนสูงสุด รูปที่ 2.6 แสดงอัตราการเกิด-

ขบวนการไอออไนซ์ที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นอนุภาคของอากาศและการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากดวงอาทิตย์

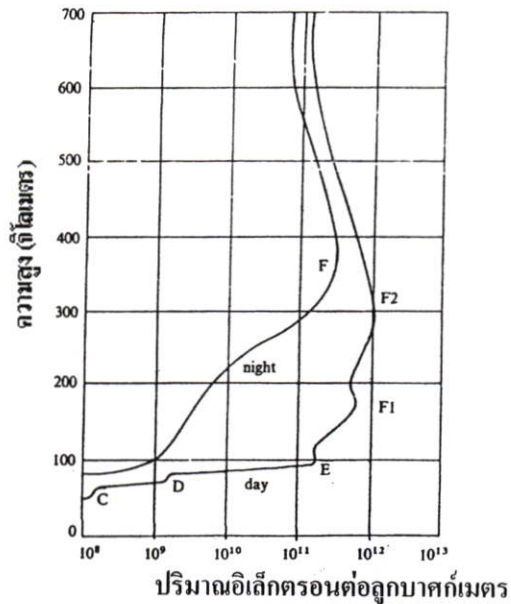


รูปที่ 2.6 อัตราการเกิดขบวนการ ไอออไนซ์ที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นอนุภาคของอากาศและการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากดวงอาทิตย์ [7]

สัญญาณความถี่ต่างกันจะเดินทางกลับมายังโลกจากความสูงของชั้นบรรยากาศที่ต่างกันด้วย จึงแสดงว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไม่ได้มีเพียงชั้นเดียว แต่ในแต่ละชั้นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแตกต่างกันเนื่องจากความจริงที่ว่าก๊าซต่างๆ ในชั้นบรรยากาศโลกที่ถูกไอออไนซ์มีความแตกต่างกัน ณ ที่ความสูงและความดันต่างกัน และนอกจากนี้ต้นกำเนิด (Source) ที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (เช่น ชนิดของรังสีจากดวงอาทิตย์) ก็แตกต่างกันด้วยในการไอออไนซ์ที่ระดับต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นในแต่ละระดับย่อยที่ความหนาแน่น อิเล็กตรอนมีค่าสูงสุดนั้นถูกเรียกว่า “ชั้น” (Layer) จำนวนของชั้น, ความสูงของมัน และความรุนแรงที่มีต่อสัญญาณที่ถูกทำให้เลี้ยวเบนไป จะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาในแต่ละวัน ในแต่ละเดือนและในแต่ละปี ในแต่ละชั้นย่อยจะมีความถี่วิกฤติซึ่งมีค่าเฉพาะในแต่ละชั้นของมันเอง

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบ่งเป็นชั้นย่อยหลักๆ 3 ชั้น ในช่วงเวลากลางวันคือ ชั้น E, F₁ และ F₂ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 นอกจากชั้นปกติเหล่านี้แล้วยังมีชั้นที่ต่ำกว่าชั้น E เรียกว่าชั้น D โดยชั้น D นี้มีขอบเขตอยู่ระหว่าง 50 ถึง 90 กิโลเมตร ในเวลากลางวันของชั้นนี้จะส่งผลเป็นอันมากต่อการลดทอนของคลื่นความถี่สูงในแถบขั้วโลก ในช่วงเวลากลางคืนชั้น F₁ และ F₂ จะรวมตัวกันเป็นชั้นเดียวเรียกว่าชั้น F ส่วนชั้น D ก็จะหายไปในช่วงกลางคืนเช่นกัน ดังนั้นในช่วงกลางคืนจะมีชั้นย่อยปรากฏอยู่เพียง 2 ชั้นหลักๆ คือ ชั้น E และชั้น F โดยปกติแล้วชั้น E ที่ถูกพบที่ความสูง 110 กิโลเมตร แต่อาจจะเปลี่ยนแปลงในช่วงความสูง 90 กิโลเมตร ถึง 140 กิโลเมตร ในทำนองเดียวกันชั้น F₁ จะวางตัวอยู่ที่ระดับความสูง 220 กิโลเมตร โดยที่ระดับความสูงนี้จะ

เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเวลาระหว่างวันและในแต่ละฤดูกาล ส่วนชั้น F_2 นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก คือ จะเปลี่ยนไปมาที่ระดับความสูง 250-400 กิโลเมตร [4]



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [3]

2.2.1 ชั้นย่อยต่างๆของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

2.2.1.1 ชั้น D

ชั้น D เป็นชั้นที่วางตัวในระดับความสูงที่ต่ำสุดในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ชั้นนี้จะปรากฏเฉพาะในช่วงที่มีแสงอาทิตย์ และจะหายไปในเวลากลางคืนเนื่องจากการรวมตัวกันใหม่ของอนุภาคมีค่าสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากความจริงที่ว่าความเข้มของการไอออไนซ์นั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างของโลกกับดวงอาทิตย์ และหลังจากพระอาทิตย์ตกขบวนการการรวมตัวกันใหม่ก็จะมีอัตราเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ชั้น D หายไปในเวลากลางคืน ความหนาแน่นในการไอออไนซ์จะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลากลางวันและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วงจาก 10^8 และ 10^{10} อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร [4]

ชั้น D มีบทบาทต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ คือ จะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นที่มีความถี่ MF, HF และ VHF และมันยังสะท้อนสัญญาณในช่วงความถี่ LF และ VLF เนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นนี้มีไม่เพียงพอ (ประมาณ 10^9 e/m^3) และมีความถี่ในการชนกันของอิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นกลางที่อัตราที่สูง (ประมาณ 10^6 ครั้งต่อวินาที) [4] จึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อคลื่นวิทยุให้เลี้ยวเบนได้ ดังนั้นจึงมีผลกระทบแก่การลดทอนของคลื่นสัญญาณเมื่อเดินทางผ่านชั้นนี้ และเนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำนี้ทำให้ไม่สามารถศึกษาได้ด้วยวิธีไอโอ-

โนซอนเด แต่ใช้เทคนิคอื่นได้ เช่น การกระจัดกระจายไม่ร่วมใน (Incoherent Scatter) การวัดโดย
ใช้จรวด Wave Interaction และอื่นๆ

2.2.1.2 ชั้น E ปกติ

ชั้น E ปกติ เป็นชั้นที่ค่อนข้างบาง วางตัวอยู่เหนือชั้น D ที่ระดับความสูง 90-140 กิโลเมตร มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากที่สุดที่ระดับความสูง 110 กิโลเมตร จากพื้นผิวโลก ในเวลากลางคืนชั้น E มีการไอออไนซ์ที่น้อยมาก ในขณะที่ช่วงเวลากลางวันจะมีการไอออไนซ์ค่อนข้างมาก การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันไม่ค่อยมากแต่จะค่อนข้างเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล คือค่าอิเล็กตรอนจะมีค่าต่ำในฤดูหนาว เนื่องจากการทำมุมเอียงระหว่างตำแหน่งของโลกกับดวงอาทิตย์ส่งผลให้ลดการเกิดไอออไนซ์ลง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นนี้อยู่ในช่วงประมาณ 10^5 ถึง 4.5×10^5 el/m^3 ในช่วงเวลากลางวัน และมีค่าประมาณ 5×10^5 el/m^3 [4] ในเวลากลางคืน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาโซล่า (Solar Activity) โดยชั้น E นี้ถูกสร้างขึ้นจากการไอออไนซ์ของก๊าซเนื่องจากการแผ่รังสี Soft X-ray

2.2.1.3 ชั้น Sporadic-E

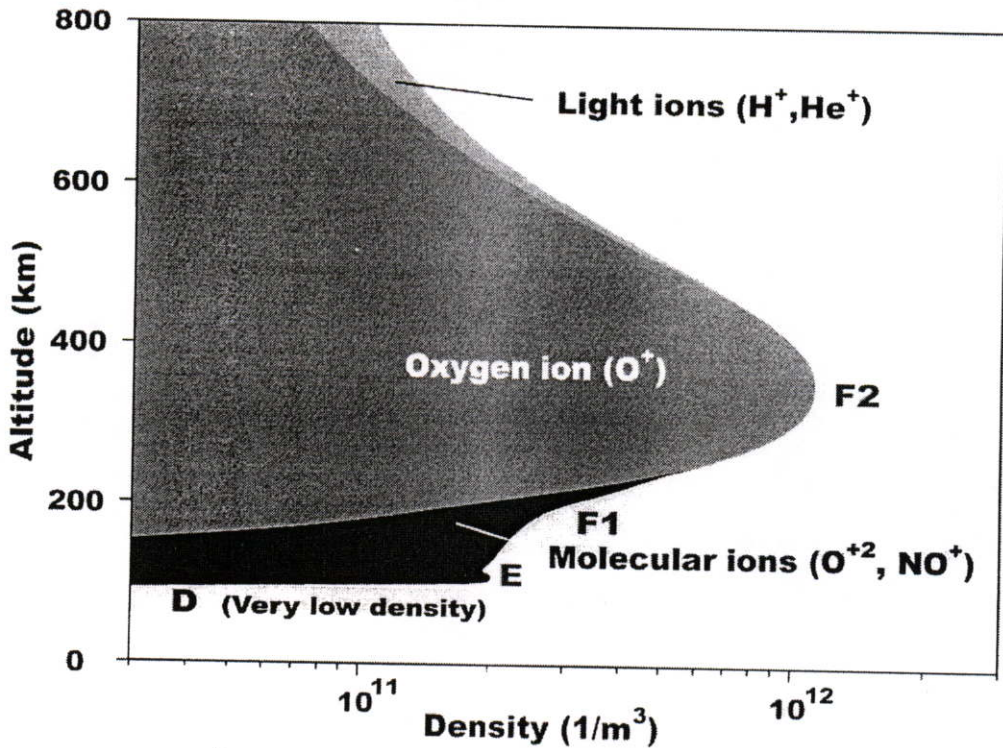
นอกจากชั้นที่มีความเสถียรดังเช่นชั้น D,E และ F แล้ว ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ยังมีการปรากฏของเทอมการไอออไนซ์ที่ผิดปกติก็คือ Sporadic-E แทนด้วยสัญลักษณ์ E_s เนื่องจากการปรากฏขึ้นของชั้น Sporadic-E จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น โดยปกติจะมีรูปแบบคล้ายก้อนเมฆมีลักษณะเป็นหย่อม ๆ และจะเปลี่ยนแปลงขนาดตั้งแต่ 1 กิโลเมตร จนถึงหลายร้อยกิโลเมตร การเกิดขึ้นและความเข้มของการไอออไนซ์จะไม่มีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยการเกิดขึ้นนี้ไม่สามารถทำนายได้ และยังสามารถพบได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน หรือในฤดูใดๆก็ได้ ชั้น Sporadic-E เป็นชั้นที่บางมากแต่มีความหนาแน่นของการไอออไนซ์สูง (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าเกือบ 10 เท่า ของชั้น E ปกติ) และจะปรากฏที่ใดก็ได้ในระยะความสูงตั้งแต่ 90-120 กิโลเมตร [4]

2.2.1.4 ชั้น F₁, F₂ และ F

ชั้น F เป็นชั้นย่อยบนสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการไอออไนซ์มากที่สุด และเป็นเพียงชั้นเดียวที่รักษาการไอออไนซ์โดยไม่ขึ้นกับวันหรือฤดูกาลใดๆ ชั้น F เป็นชั้นที่อำนาจต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระยะทางไกลได้แม้ในยามกลางคืน การปรากฏขึ้นได้ของชั้น F ในเวลากลางคืนนั้นมาจากความจริงที่ว่าชั้น F เป็นชั้นบนสุดที่มีการไอออไนซ์สูงมาก ดังนั้นจึงมีอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์แล้วเหลืออยู่แม้ไม่ได้รับแสงจากดวงอาทิตย์แล้วก็ตาม และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือค่าความหนาแน่นในการไอออไนซ์มีค่าสูงในขณะที่ค่าความหนาแน่นของอากาศมีไม่มากนัก ความสูงระดับนี้ ดังนั้น โมเลกุลเกือบทั้งหมดในชั้นนี้จึงเป็น โมเลกุลที่ถูกไอออไนซ์ โดยอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ในการก่อตัวขึ้นเป็นชั้นนี้ คือ อะตอมของออกซิเจน

ในระหว่างกลางวันหลังจากพระอาทิตย์ขึ้นพบว่า ชั้น F แยกเป็น 2 ชั้น เรียกว่าชั้น F_1 และ F_2 ปรากฏการณ์นี้จะพบตลอดปีในบริเวณละติจูดต่ำ (Low Latitude) และปรากฏเฉพาะฤดูร้อนเท่านั้นในบริเวณละติจูดสูง (High Latitude) ชั้น F_1 จะปรากฏขึ้นในช่วงเวลากลางวัน และวางตัวอยู่ในระดับความสูงประมาณ 140-250 กิโลเมตร โดยมีค่าระดับความสูงเฉลี่ยคือ 220 กิโลเมตร สำหรับชั้น F_2 เป็นชั้นที่วางตัวอยู่บนสุดโดยมีระดับความสูงอยู่ที่ 250-400 กิโลเมตร ในเวลากลางวันค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นนี้จะมีค่ามากที่สุด ในบรรดาชั้นย่อยอื่นๆ ทั้งหมดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในเวลากลางคืนชั้น F_1 และ F_2 จะรวมตัวกันเป็นชั้น F และมีระดับความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 300 กิโลเมตร ชั้น F_2 นี้ก่อตัวขึ้นโดยการไอออไนซ์จากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต และ รังสี X-rays การไอออไนซ์ของชั้น F_2 จะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กโลก ลมสุริยะ และกระแสน้ำลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และ ค่าความหนาแน่นไอออไนซ์เปลี่ยนแปลง ตามปฏิกิริยาโซล่า (Solar Activity) และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนจุดดับของดวงอาทิตย์ตั้งแต่ค่าต่ำสุดจนถึงสูงสุด [4]

การเกิดปฏิกิริยาไอออไนเซชันของโมเลกุลของออกซิเจน จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละระดับความสูงดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งในแต่ละชั้นของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าชั้นที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำที่สุดคือชั้น D ซึ่งมีความสูงประมาณ 90 กิโลเมตรจากพื้นดินและค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงขึ้นตามความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่ามากที่สุดที่ความสูงประมาณ 370 กิโลเมตร ซึ่งเป็นระดับความสูงของชั้น F_2 ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เมื่อความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงเกินชั้น F_2 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมีค่าลดลงไปเนื่องจากเมื่อถึงความสูงระดับนี้ ปริมาณออกซิเจนในชั้นบรรยากาศจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแต่ละระดับความสูง

ปัจจุบันมีการศึกษาวิธีการต่างๆ ที่ใช้หาค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Total Electron Content : TEC) หลายวิธีโดยปกติแล้วปริมาณอิเล็กตรอนจะถูกวัดในหน่วยของ 10^{16} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร (el/m^2) [3] การได้มาของข้อมูลค่าปริมาณอิเล็กตรอนโดยใช้ดาวเทียม GPS ในการวัดค่านั้นจะทำการอธิบายในบทที่ 5

2.2.2 ทฤษฎีการแพร่ของคลื่นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เนื่องจากการไอออไนซ์ของออกซิเจนภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จากพลังงานแสงอาทิตย์ใน ทำให้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวกลางหนึ่งในการเดินทางของคลื่น ดังนั้นในการเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity ϵ) ค่า (Permeability μ) และ ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity σ) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความเร็วในการแพร่ของคลื่น (Velocity of propagation v) ครรชนีหักเห (Refractive index n) และ อินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic impedance Z_i) ซึ่งสมการที่นำมาแสดงนี้ได้ทำการลดรูปมาจากสมการคลื่น(Maxwell's Equation)

(1) การลดทอน (Attenuation)

จากสมการ Maxwell's Equation ค่าแรงของสนามไฟฟ้า (Electric field strength) ในโดเมนของความถี่มีค่าดังสมการ

$$E = E \exp[-(\alpha + j\beta)z] \exp(j\omega t) \quad (2.4)$$

โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation coefficient) α มีหน่วยเป็นเนเปอร์ต่อเมตร (Nepers per meter) มีค่าดังสมการ

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \{ \sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} - 1 \}} \quad (2.5)$$

โดยที่ค่า $\mu_r = 1$ และ ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) มีค่าน้อยจึงทำให้

$$(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$$

และ

$$\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} \approx 1 + \frac{1}{2}(\sigma/\omega\epsilon)^2$$

นำค่าไปแทนในสมการที่ (2.6) จะได้ค่าการลดทอน (attenuation) จากชั้นบรรยากาศเป็น

$$\alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\mu/\epsilon} = 60\pi\sigma(\epsilon_r)^{-1/2} \quad \text{Np/m} \quad (2.6)$$

$$\alpha = 1.637 \times 10^6 \sigma / (\epsilon_r)^{1/2} \quad \text{dB/km} \quad (2.7)$$

(2) ครรชนหักเห (Refractive Index)

จากสมการ Maxwell's Equation จะมีกระแสอยู่ 2 ชนิดรวมกัน คือ ความหนาแน่น กระแสความนำ (Conduction current density) J_c และ ความหนาแน่นกระแสกระจัด (Displacement current density) J_d แสดงดังสมการ (2.8)

$$J = J_c + J_d = \sigma E + \epsilon \partial E / \partial t \quad (2.8)$$

ถ้าระนาบคลื่น $E = E \sin \omega t$ ที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีการไอออไนซ์ของ อิเล็กตรอนอิสระ N ที่มีหน่วยเป็น อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร ค่าแรงที่กระทำในทิศทางแกน x คือ

$$F_x = (-)eE_x$$

หรือ

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = (-)eE_x \sin \omega t$$

หรือ

$$\frac{dx}{dt} = (+) \frac{eE_x \cos \omega t}{\omega m} = v_x$$

โดยที่ m คือ ค่ามวลของอิเล็กตรอน และ v_x คือ ค่าความเร็วในทิศทางแกน x โดยแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$J_{cx} = N(-e)v_x = \frac{N(-e)eE_x \cos \omega t}{\omega m}$$

และ

$$J_{dx} = \epsilon_0 \frac{dE_x}{dx} = \epsilon_0 \omega E_x \cos \omega t$$

เมื่อทำการรวมทั้งสองสมการจะได้

$$J_x = \epsilon_0 \left\{ 1 - Ne^2 / (\omega^2 m \epsilon_0) \right\} \omega E_x \cos \omega t$$

หรือ

$$J_x = \epsilon_0 \left\{ \epsilon_r \right\} \omega E \cos \omega t$$

จากสมการนี้ทำให้ทำการพิจารณาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นไดอิเล็กตริก โดยมีค่าประสิทธิภาพผลสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Effective relative permittivity ϵ_r) และค่าดัชนีการหักเห

$$\eta = \sqrt{\epsilon_r}$$

$$\eta = \left\{ 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \right\}^{1/2} = \left\{ 1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^2 \right\}^{1/2} = (1 - 81N / f^2)^{1/2} \quad (2.9)$$

ค่า 81 คือ ค่าประมาณของ $e^2 / (4\pi^2 \epsilon_0 m) = 80.5 m^3 s^{-2}$ โดยที่ค่าดัชนีการหักเห จะมีค่าเป็น 0 เมื่อ $\omega^2 = \omega_c^2 = Ne^2 / (\epsilon_0 m)$

(3) ความนำไฟฟ้า (Conductivity) และ สภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity)

สำหรับค่ามวลของอิเล็กตรอนนั้นให้สันนิษฐานว่าเป็นค่าคงที่ ดังนั้น ค่าแรงจากสนามไฟฟ้าคือ $F = eE$ จากกฎของการเคลื่อนที่ แรงจะเป็นสัดส่วนของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม จะได้

$$eE = m \frac{dv}{dt}$$

ในสภาวะที่เหมาะสมการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลของก๊าซ จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานไปในรูปของความร้อน โดยที่พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปคือ mv/τ หรือ $mv\nu$ โดยที่ $\nu = 1/\tau$ ดังนั้น จะได้สมการที่สมบูรณ์ขึ้นเป็น

$$Ee = m dv/dt + mv\nu$$

ในโดเมนของเวลา $E = E_0 e^{j\omega t}$ และ $\nu = \nu_0 e^{j\omega t}$

$$\nu = \frac{Ee}{m\nu + j\omega m}$$

นำค่า ν มาแทนค่าในสมการของ J_c

$$J_c = Ne\nu = \frac{Ne^2\nu E}{m(\nu^2 + \omega^2)} - j \frac{\omega Ne^2 E}{m(\nu^2 + \omega^2)}$$

นำมาเปรียบเทียบกับผล

$$\begin{aligned} J &= J_c + J_d = \sigma E + j\omega\epsilon_0 E \\ &= \frac{Ne^2\nu}{m(\nu^2 + \omega^2)} E + j\omega\epsilon_0 \left[1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\nu^2 + \omega^2)} \right] E \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ค่า ความนำไฟฟ้า และ สภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ดังสมการ (2.10) และ (2.11)

$$\sigma = \frac{Ne^2\nu}{m(\nu^2 + \omega^2)} \tag{2.10}$$

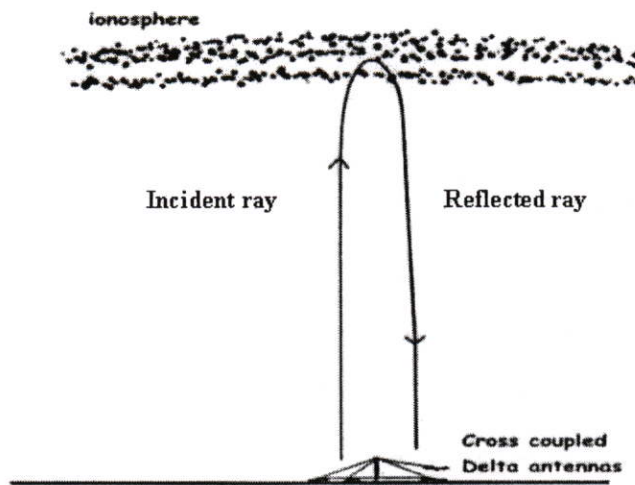
$$\epsilon_r' = 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\nu^2 + \omega^2)} \quad (2.11)$$

เมื่อชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวกลางการเดินทางของคลื่นจะได้ว่า ในพารามิเตอร์เริ่มต้น ค่า σ, ϵ_r' และ $\mu_r = 1$ โดยที่ใน พารามิเตอร์ทุติยภูมิ จะขึ้นอยู่กับความถี่ [5]

ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ จะส่งผลกับการเดินทางของคลื่นที่มีชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวกลางในการเดินทาง เมื่อทำการวัดแบบไอโอโนซอนเดเทคนิค ผลที่ได้จากการวัดซึ่งเรียกว่า ภาพไอโนแกรมโดยจะเป็นรอยเส้นโค้งต่าง ๆ กันตามลักษณะทางกายภาพของแต่ละชั้นซึ่งแต่ละชั้นจะมีความสูงต่างกันไป การวัดแบบไอโอโนซอนเดเทคนิคจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.2.3 ไอโอโนซอนเดเทคนิค

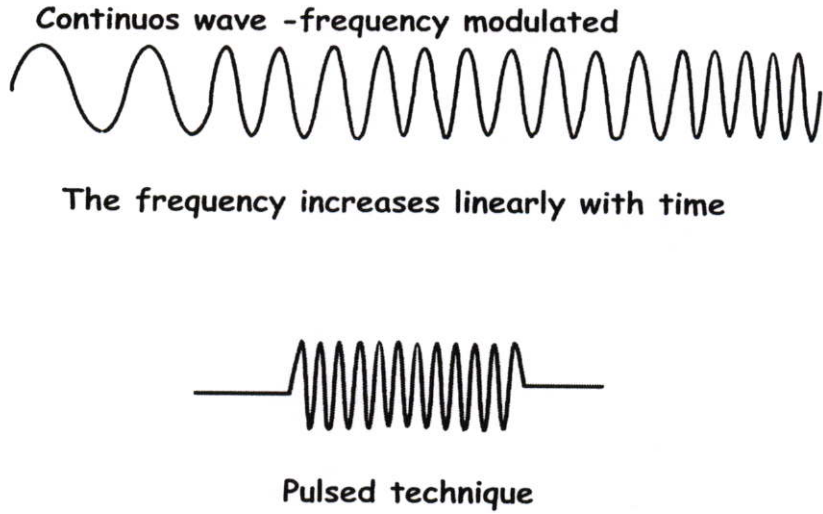
ไอโอโนซอนเดเทคนิคเป็นทฤษฎีที่มีมานานแล้ว ซึ่งหลักการนั้นไม่ได้มีความซับซ้อนอะไรมาก โดยหลักการจะคล้ายๆกับ เรดาร์ คือ เมื่อมีการส่งคลื่นไปสะท้อนกับวัตถุชิ้นใดชิ้นหนึ่งแล้ว จะสามารถทราบได้ว่าวัตถุชิ้นนั้นอยู่ห่างจากจุดที่ส่งคลื่นไปสะท้อนนั้นเป็นระยะทางเท่าไร โดยการคำนวณเวลาที่คลื่นเดินทางไปและกลับ แต่เทคนิคของไอโอโนซอนเดนั้นจะใช้ความถี่ในย่านที่มีค่าไม่สูงนัก และสามารถสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กลับมายังสายอากาศรับได้ และ มีการส่งคลื่นแบบต่อเนื่องด้วย รูปที่ 2.9 แสดงภาพจำลองของการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



รูปที่ 2.9 ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

การหาความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยสถานีการตรวจวัดจะทำการส่งคลื่นความถี่ย่าน HF (High Frequency) ที่มีความถี่ตั้งแต่ 3-30 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการทำงานจะทำการส่ง

และรับคลื่นอย่างต่อเนื่อง โดยการมอดูเลตจะใช้เทคนิคการมอดูเลตคลื่นแบบต่อเนื่อง(Continuous wave frequency modulated) โดยมีการเพิ่มความถี่แบบเชิงเส้นตามเวลา แสดงดังรูปที่ 2.10[8]

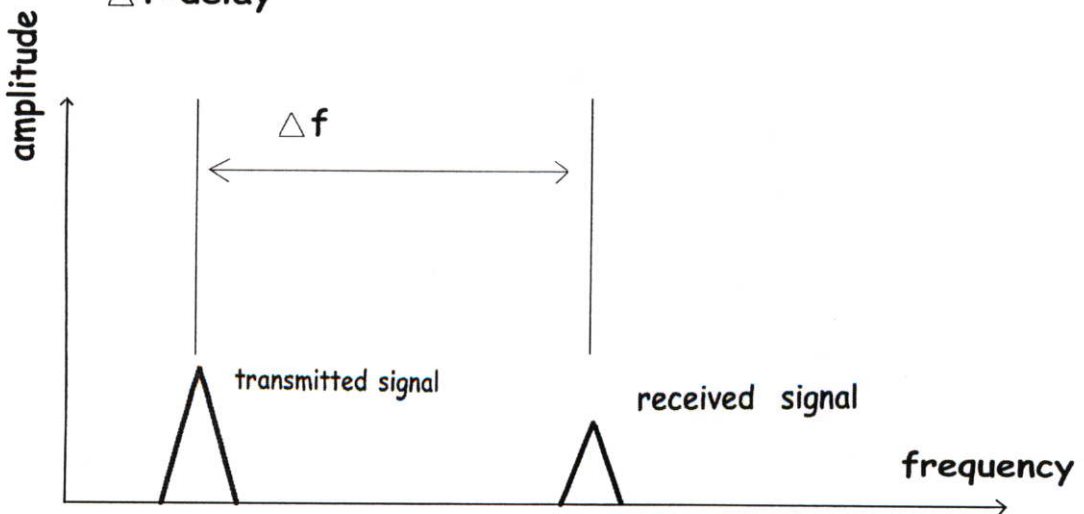


รูปที่ 2.10 คลื่นที่ใช้ในการมอดูเลตของไอโอโนซอนเด

คลื่นที่ส่งขึ้นไปจะไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่มีกลุ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอน โดยมีสายอากาศที่รับและส่งวางขวางตัดกันเป็นโดม และ จากนั้นจะทำการคำนวณเวลาหน่วงในการเดินทางของคลื่นแล้วทำการพล็อตเป็นไอโอโนแกรม

$$\Delta t = (dt/df) \Delta f$$

$$\Delta t = \text{delay}$$



รูปที่ 2.11 การคำนวณเวลาหน่วงในการเดินทางของคลื่น

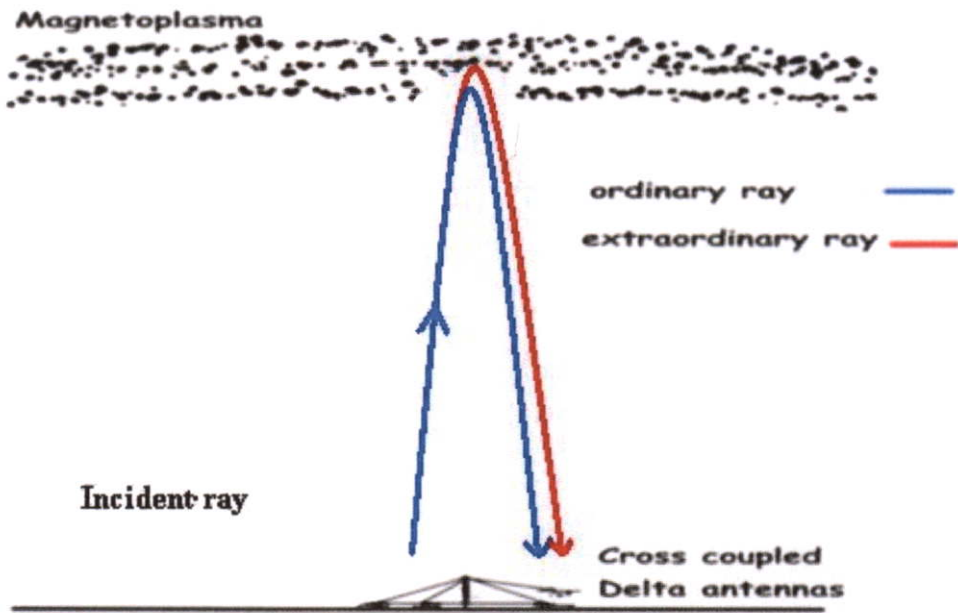
โดยที่ค่าหน่วยเวลา Δt และ ค่าความสูง h' ของชั้นบรรยากาศที่ทำการคำนวณได้จะแสดงดังสมการที่ (2.4)

$$\Delta t = \frac{2}{c} h' \quad (2.12)$$

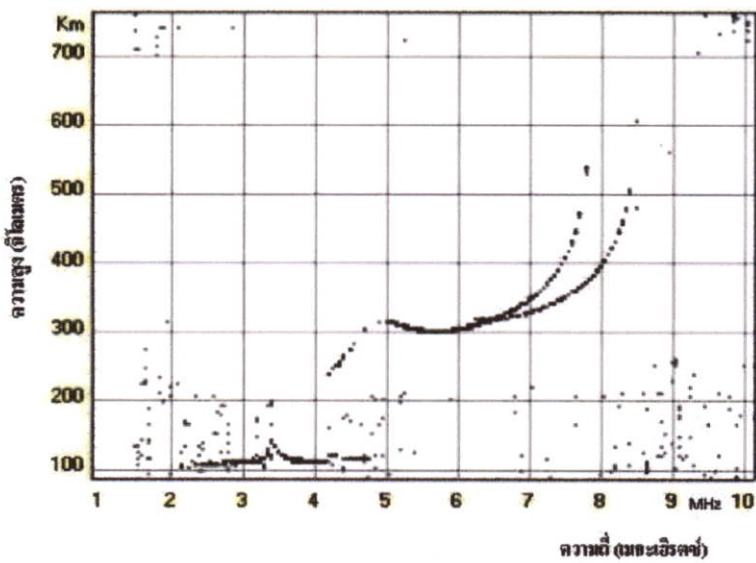
ในการส่งคลื่นขึ้นสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้น จะเกิดความถี่อีกความถี่หนึ่งสะท้อนกลับมาด้วยเนื่องจากในชั้นจะมีแมกนีโตพลาสมา (Magnetoplasma) ทำให้คลื่นส่วนหนึ่งเดินทางเข้าไปได้เล็กน้อยแต่อีกส่วนสะท้อนกลับมาเลย โดยที่ความถี่จริงที่สะท้อนกลับมานั้นคือความถี่สามัญ (Ordinary) ส่วนความถี่เกิดขึ้นใหม่คือความถี่วิสามัญ (Extraordinary) ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าจะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีผลมาจากแรงของสนามไฟฟ้า eE , และ แรงของสนามแม่เหล็กโลก $ev \times B$ ส่งผลทำให้ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (Complex dielectric) มีสองค่าคือ \pm โดยที่สมการของ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (Complex dielectric constant) แสดงดังสมการ 2.5 รูปที่ 2.12 แสดงการสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วเกิดความถี่อีกความถี่สะท้อนกลับมา ซึ่งจะมีค่าความถี่สูงกว่าความถี่สามัญ (Ordinary) ทำให้เครื่องรับสามารถรับความถี่กลับมาได้ 2 ความถี่เมื่อนำมาพล็อตเป็นภาพไอโอโนแกรมจึงปรากฏเป็นเส้น โค้ง 2 เส้นที่มีค่าความถี่ต่างกันดังรูปที่ 2.13

$$\epsilon_r' = 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega(\omega_c \pm \omega_H - j\nu)} \quad (2.13)$$

โดยที่ค่า $\omega_c^2 = Ne^2 / \epsilon_0 m$ จากสมการที่ (2.9) , $\omega_H = \mu_0 He / m = 2\pi f_H$ ค่า f_H คือ Gyromagnetic frequency จะขึ้นอยู่กับสถานที่ และ ν คือ ความถี่ในการชนของอิเล็กตรอน (Electron collision frequency) [7]



รูปที่ 2.12 แสดงการเกิดคลื่นอีกหนึ่งคลื่นสะท้อนกลับมาที่เครื่องรับ



รูปที่ 2.13 ภาพไอโอโนแกรมที่ปรากฏเป็นเส้นโค้ง 2 เส้น

2.3 ทฤษฎีการส่งคลื่นสั้นในการสื่อสารระยะไกล

สัญญาณวิทยุของคลื่นสั้น หรือ เรียกอีกอย่างว่า คลื่นในย่าน HF (High frequency) โดยมีย่านความถี่ตั้งแต่ 3-30 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเปรียบเสมือนกระจกที่สะท้อนคลื่นกลับมา ในเวลากลางวันจะใช้น้อยมากเนื่องจากจะมีการสะท้อนได้แค่ 100 กิโลเมตรเท่านั้น ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อยู่สูงเหนือชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีความสูงจากพื้นโลกตั้งแต่ 30 ไมล์ (55.8 กิโลเมตร) ถึง 260 ไมล์ (483.6 กิโลเมตร) คลื่นจะถูกสะท้อนเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง โดยปกติคลื่นวิทยุจะสะท้อนเมื่อเดินทางผ่านชั้นต่างๆของชั้นบรรยากาศแอดโมสเฟียร์ ซึ่งก็คือชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีความสูงของชั้นตั้งแต่ 100 กิโลเมตรขึ้นไป เมื่ออัตราส่วนของดัชนีหักเหของ 2 ตัวกลางมีค่ามากพอคลื่นจะสามารถสะท้อนชั้นได้เปรียบเสมือนกับแสงที่สะท้อนกระจก[8]

บทบาทของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการแพร่ของคลื่น จะสามารถอธิบายได้ การเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมในการสื่อสารตามความสูงต่างๆของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ถึงแม้ว่าจะมีหลายหลักการที่ใช้อธิบายวิธีการของ Heaviside และ Kennally แต่ก็มีผลต่างของผลที่ได้มาโดย Professor Appleton และผู้ร่วมวิจัย ได้ค้นพบว่าไม่ได้มีเพียงชั้นเดียวที่สามารถสะท้อนคลื่นได้แต่มีถึงสองชั้นที่สามารถสะท้อนคลื่นได้ การทดลองแรกกับ Pulse wave ในปี ค.ศ. 1925 โดย Breit และ Tuve ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งประสบความสำเร็จมากในการพิสูจน์ทฤษฎีที่สามารถนำไปใช้ได้ โดยที่คลื่นวิทยุความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถสื่อสารได้ระยะทาง 300 กิโลเมตร การกำหนดชื่อของชั้นบรรยากาศที่มีการไอออไนเซชันถูกกำหนดชื่อโดย E. V. Appleton โดยที่ชั้นต่ำสุดมีความสูงของชั้นตั้งแต่ 60-90 กิโลเมตร เรียกว่าชั้น D region ซึ่งไม่เป็นชั้นที่แน่นอนและเป็นส่วนหนึ่งของชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนโดยเกิดขึ้นในเวลาที่ไม่มีความเสถียรซึ่งทำให้เกิดการรวมกลับ (Recombination) อย่างรวดเร็ว โดยที่ในเวลากลางวัน ปริมาณการไอออไนเซชัน (Ionization) จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงอาทิตย์ และชั้นบรรยากาศจะมีการดูดซับพลังงานจากคลื่นวิทยุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความถี่ในย่าน 3 เมกะเฮิร์ตซ์ และที่ความถี่ 7 เมกะเฮิร์ตซ์

การสื่อสารในระยะไกล จะใช้การไอออไนเซชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพื่อเป็นประโยชน์ในการสะท้อนคลื่นวิทยุ ย่านของคลื่นวิทยุที่นำไปใช้ ได้แก่ย่าน 3.5, 7, 14, 21 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยที่ความสูงของชั้นจะมีค่าที่ไม่คงที่โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความสูงจาก 200 ถึง 400 กิโลเมตรหรืออาจจะถึง 500 กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของปี ตำแหน่งของเส้นรุ้ง และช่วงเวลาใน 1 วัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วัฏจักรสุริยะ (Solar activity) ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และ ความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยที่ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามสมการที่ 2.14

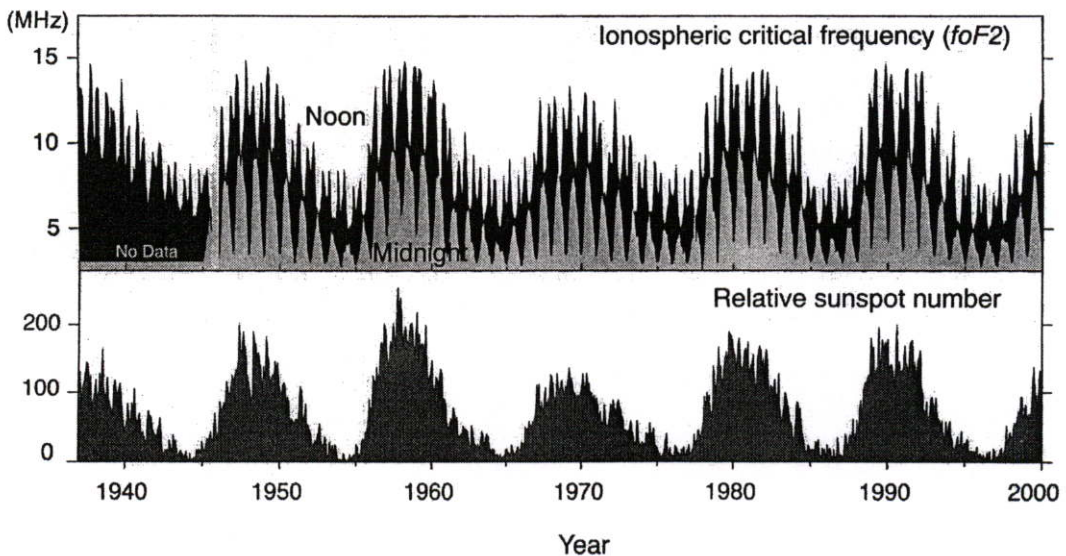
$$f_c = 9\sqrt{N_{\max}} = \frac{\omega_c}{2\pi} \quad (2.14)$$

โดยที่ค่า N_{\max} คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (el/m^3) และการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของแต่ละชั้นนั้นจะขึ้นอยู่กับฤดูกาล และ วัฏจักรสุริยะซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.15 และ 2.16

$$f_oE = 0.9[(180 + 1.44R) \cos \chi]^{0.25} \quad \text{MHz} \quad (2.15)$$

$$f_oF_1 = (4.3 + 0.01R) \cos^{0.2} \chi \quad \text{MHz} \quad (2.16)$$

ค่า f_oE คือ ค่าความถี่สูงสุดของชั้น E, ค่า f_oF_1 คือ ค่าความถี่สูงสุดของชั้น F_1 , ค่า R คือ จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ และ χ คือ มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ (Zenith angle of the sun) [9] ซึ่งปริมาณของจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ กับความถี่วิกฤตของชั้น F มีการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตามกันดังรูปที่ 2.14 ทำให้ความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ช่วงเวลาของวัฏจักรสุริยะจะมีช่วงระยะเวลา 11 ปีในแต่ละรอบของวัฏจักร [10]



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sun spot number)

ในเวลากลางวันชั้น D layer จะดูดซับความถี่ย่าน 1.8 เมกะเฮิรตซ์มาก หรือ เรียกอีกอย่างว่าย่าน ความยาวคลื่น 16 เมตร ถ้ามีมุมการสะท้อนที่มากพอจะทำให้สัญญาณที่ส่งขึ้นไปจะไม่ทะลุผ่านชั้น F ไปได้เลย และในการสื่อสารในเวลากลางวันจะจำกัดขอบเขตที่คลื่นดินส่งไปถึง

ในเวลากลางคืนชั้น D layer จะหายไปอย่างรวดเร็วและในการติดต่อสื่อสารจะติดต่อสื่อสารโดยใช้ชั้น F₂ layer skip ข้อจำกัดของการแพร่ของคลื่นในย่านนี้เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นตัวกลาง ในการเดินทางของคลื่นและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากมนุษย์ ในเขตร้อนชื้นและพื้นที่บริเวณละติจูดกลาง (Mid latitude) จะมีพายุเมฆซึ่งเป็นเหตุให้ระดับสัญญาณมีค่าสูงในหน้าร้อน และในหน้าหนาว ช่วงเวลาในตอนเย็นจะเหมาะที่จะใช้ความถี่ย่านนี้ในการติดต่อสื่อสารในระยะทางไกลๆ แต่ว่าสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณนั้นต้องสามารถรับสัญญาณที่ต้องการได้ดีและลดจำนวนของสัญญาณรบกวนที่รับมาได้ด้วย

ความถี่ในย่าน 3.5 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือเรียกอีกอย่างว่า ย่านความยาวคลื่น 80 เมตร เป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดของย่าน HF ซึ่งจะมีคุณสมบัติคล้ายกับกับความถี่ย่าน 1.8 เมกะเฮิร์ตซ์ คือในเวลากลางวันจะถูกดูดซับโดยชั้น D layer มากแต่จะไม่มากเท่ากับในย่าน 1.8 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อส่งสัญญาณด้วยมุมที่มีค่าสูงสัญญาณจะสามารถทะลุชั้น E และ ชั้น F ไปได้ โดยปกติตามทฤษฎีแล้วระยะทางในการสื่อสารของความถี่ในย่านนี้ในเวลากลางวันจะจำกัดอยู่ที่ 400 กิโลเมตร สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับความถี่ในย่านนี้ก็จะเหมือนกับที่เกิดกับย่าน 1.8 เมกะเฮิร์ตซ์ ก็เกิดจากรบกวนสัญญาณของชั้นบรรยากาศ ความถี่ที่ใช้ประโยชน์ในการสื่อสารในเวลากลางวันได้ระยะทางไกลถึง 800 กิโลเมตรโดยใช้ชั้น E และ ชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการสะท้อนคลื่นนั้นคือความถี่ย่าน 7 เมกะเฮิร์ตซ์ และการใช้ความถี่ย่านนี้ในการสื่อสารให้ได้ระยะทางไกลๆที่ใช้กันทั่วโลกนั้นจะใช้ชั้น F₂ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการสะท้อนคลื่น

ความถี่ที่มีคุณสมบัติพิเศษ สามารถใช้ในการสื่อสารได้ทั้งเวลากลางวันและเวลากลางคืนคือ ความถี่ย่าน 10 เมกะเฮิร์ตซ์หรือย่าน 30 เมตร โดยปกติแล้วสามารถสื่อสารได้ระยะไกลถึง 3000 กิโลเมตรในเวลากลางวันและใช้กันทั่วโลก โดยจะใช้ชั้น F₂ ในการสะท้อนคลื่นตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง โดยที่หน่วยงาน ITU (International Telecommunication Union) ได้จัดสรรช่วงความถี่ที่ใช้ตั้งแต่ 10,100 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10,150 กิโลเฮิร์ตซ์สำหรับผู้ใช้วิทยุสมัครเล่นใน 3 พื้นที่ ขณะที่ ในหลายๆพื้นที่จะใช้กับแฮมเรดิโอ (Ham radio)

นอกจากนี้การสื่อสาร โดยใช้คลื่นสั้นจะประหยัดกว่าการสื่อสารแบบดาวเทียมเนื่องจากไม่ต้องจองช่องสัญญาณในการเข้าถึง สามารถส่งข้อมูลไปกับคลื่นวิทยุไปได้เลยในระยะทางไกลๆ ดังนั้นจึงมีการศึกษาชั้น ไอโอโนสเฟียร์เพื่อใช้ในการสื่อสาร โดยใช้คลื่นสั้นเนื่องจากไม่มีความซับซ้อนในการส่งจึงทำให้ข้อมูลที่ส่งไปนั้นต้องไม่เป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับความลับ เพราะว่ามันมีเครื่องรับที่ตั้งอยู่ในระยะที่สามารถรับคลื่นที่เราส่งไปได้ แคปรับเครื่องรับให้รับความถี่เดียวกันกับที่เราส่งก็จะสามารถทราบได้ว่าเราส่งข้อมูลอะไรไป เมื่อมีปัญหาในการรับสัญญาณเกิดขึ้นเนื่องจากมีระดับสัญญาณที่ต่ำ ในการแก้ปัญหาของการแพร่ของคลื่นจะทำได้โดยใช้ไคเวอร์ซิตี (Diversity) ซึ่งการจัดสรรในระบบสื่อสารแบบไร้สายจะการจัดความถี่ให้ครอบคลุม

การเดินทางของคลื่นวิทยุ ที่สะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไปยังเครื่องรับนั้น ขึ้นอยู่กับมุมในการส่งขึ้นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศว่าคลื่นที่มีค่าความถี่เท่านี้ จะสามารถส่งคลื่นไปได้ระยะทางไกลที่สุดเท่าไรแสดงดังรูปที่ 2.16 โดยสามารถคำนวณหาค่าระยะทางที่ทำการส่งได้จากสมการที่ (2.17)

$$\tan \theta = \frac{\frac{d}{2}}{h} = \frac{d}{2h} \quad (2.17)$$

จากสมการข้างบนตามสูตร

$$\tan \theta = \sqrt{(\sec^2 \theta - 1)} \quad (2.18)$$

โดยที่

$$\sec \theta = \frac{f}{f_0} \quad (2.19)$$

นำค่า $\tan \theta$ และ $\sec \theta$ มาแทนในสมการที่ 2.17 จะได้

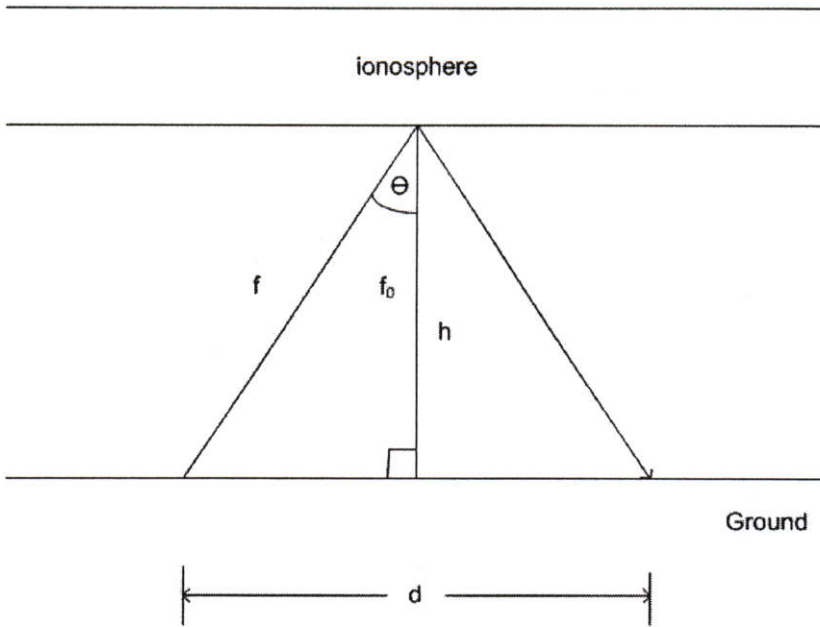
$$d = 2h \sqrt{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1} \quad (2.20)$$

ค่า d คือ ระยะทางจากจุดที่ส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ถึงจุดที่รับคลื่นที่สะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มาแล้ว

ค่า h คือ ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะที่ส่งคลื่นขึ้นไปสะท้อน

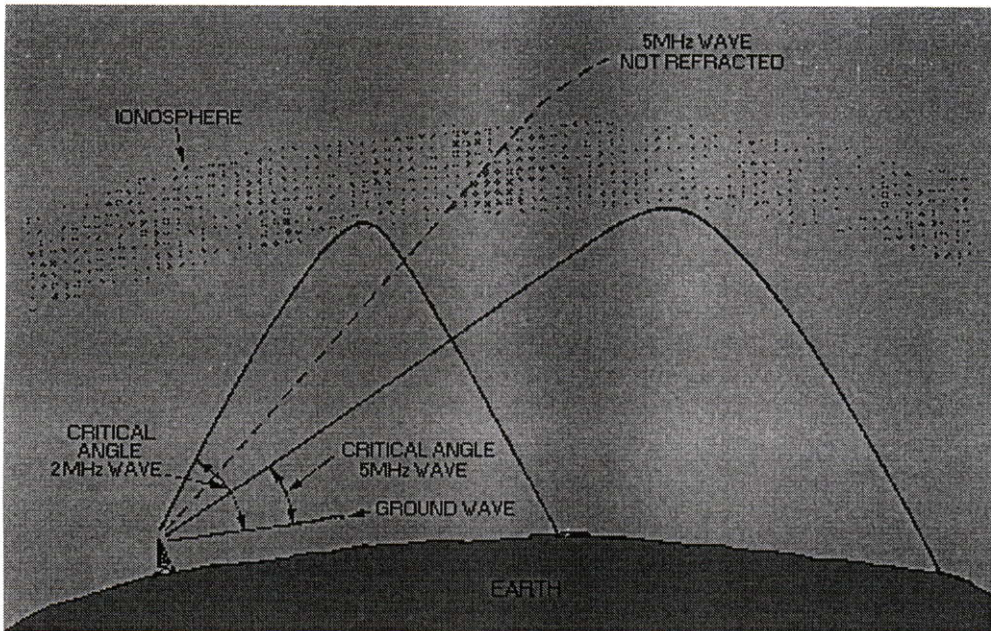
ค่า f คือ ความถี่ที่ใช้ส่งคลื่น (โดยที่ค่า $f < f_0$)

ค่า f_0 คือ ความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ [8]



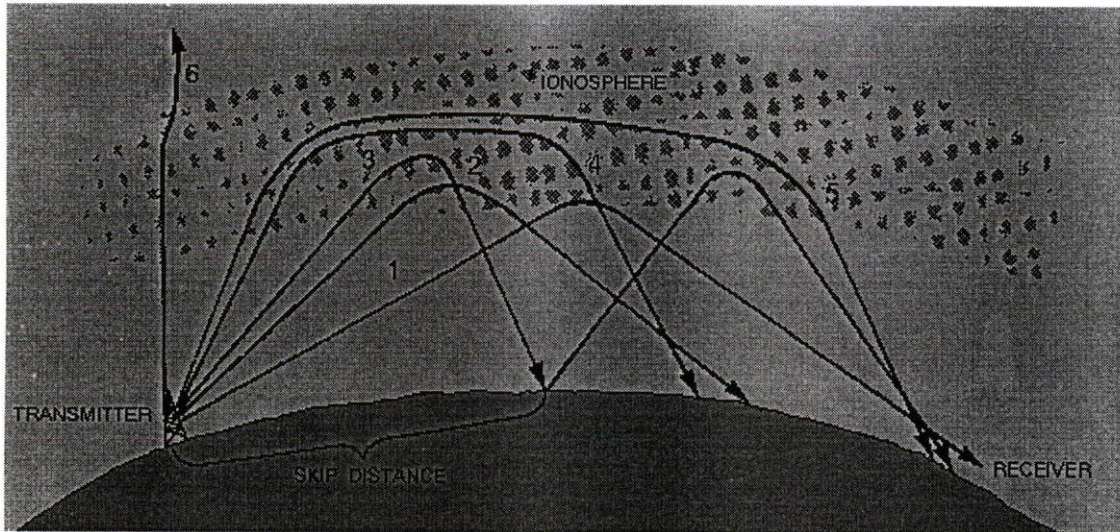
รูปที่ 2.16 ภาพจำลองการหาระยะทางที่การเดินทางของคลื่น โดยการสะท้อนชั้นไอโอโนสเฟียร์

โดยที่ค่ามุมที่สูงที่สุดที่ทำกับพื้นโลกที่สามารถส่งคลื่นวิทยุ ไปสะท้อนชั้นบรรยากาศ เรียกว่า ค่ามุมวิกฤต (Critical angle) ถ้าค่ามุมที่ส่งมีค่ามากกว่านี้จะทำให้คลื่นวิทยุทะลุผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเดินทางของคลื่นเมื่อใช้ค่ามุมวิกฤตในการสะท้อนชั้นไอโอโนสเฟียร์

เมื่อทำการส่งคลื่นวิทยุโดยใช้ความถี่เดียวกันแต่ใช้มุมในการสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ต่างกันการเดินทางของคลื่นวิทยุที่ไปสะท้อนชั้นบรรยากาศจะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.18



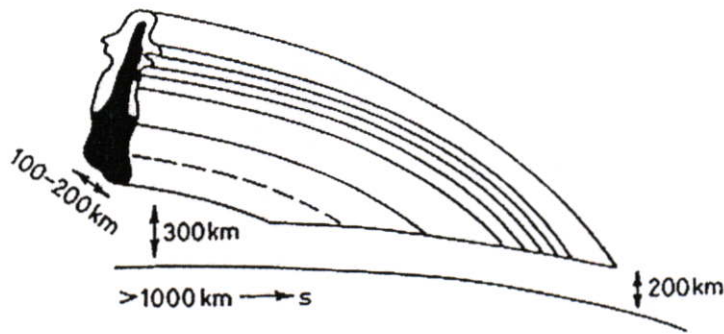
รูปที่ 2.18 การเดินทางของคลื่นวิทยุที่ความถี่เดียวกันแต่มีการส่งทำมุมกับชั้นบรรยากาศต่างกัน

ในเส้นที่หมายเลข 1 การส่งคลื่นวิทยุในค่ามุมนี้จะสามารถส่งไปได้ระยะทางที่ไกลที่สุดแต่จะไม่แทรกเข้าไปในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากนัก เมื่อทำการเพิ่มค่ามุมในการส่งไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ดังเส้นที่หมายเลข 2 และ 3 จะสังเกตได้ว่าคลื่นวิทยุมีการแทรกเข้าไปในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่ในเส้นที่หมายเลข 3 จะมีการสะท้อนสองครั้งโดยคลื่นจะสะท้อนกับพื้นโลก และ เดินทางไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อีกครั้งจะทำให้คลื่นสามารถเดินทางไปยังเครื่องรับได้ เมื่อทำการเพิ่มค่ามุมที่ส่งให้สูงขึ้นไปอีกคลื่นจะสามารถแทรกเข้าไปในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีการไอออไนซ์สูงที่สุดและจะทำให้มีการสะท้อนกลับลงมาข้างเส้นที่หมายเลข 4 และ 5 ในเส้นที่หมายเลข 6 มุมที่ทำการส่งคลื่นวิทยุจะมากกว่าค่ามุมวิกฤตโดยเกือบจะตั้งฉากกับพื้นโลกคลื่นจะทะลุชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไป

2.4 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ที่มีสาเหตุจากชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น เกิดขึ้นจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอขนาดเล็ก (Small-Scale Irregularities) หลายๆ กลุ่ม จะถูกบรรจุอยู่ใน ม่านขนาดใหญ่ (Large-Scale Patches) ที่เดินทางมาขวางเส้นทางการเดินทางของคลื่นเป็นเวลา 20 นาที หรือหลายครั้งในหนึ่งคืน โดยที่แผ่นม่านนี้จะเกิดขึ้นและหยุดหลายๆ ครั้งในหนึ่งคืน และจะเกิดขึ้น

ภายหลังที่ดวงอาทิตย์ตกคือไม่มีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น โดยที่กลุ่มความหนาแน่นนี้จะแผ่กว้างไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก (จึงทำให้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแนวเส้นศูนย์สูตร) มีลักษณะเหมือนกล้วยหรือกล้วยส้ม ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.19

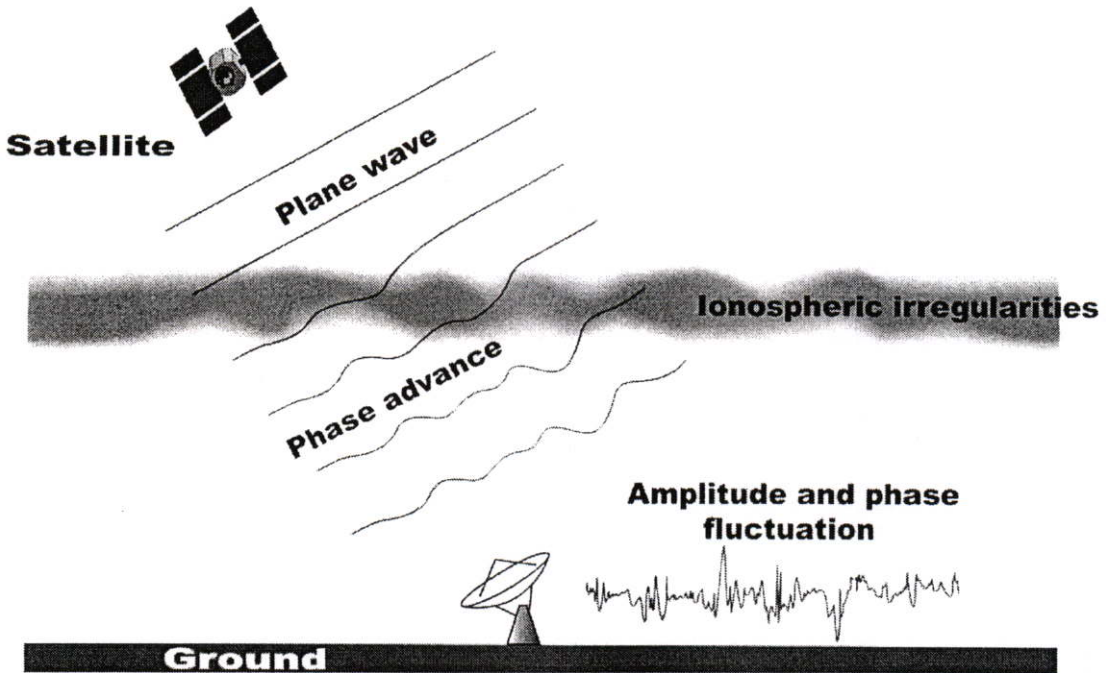


รูปที่ 2.19 แบบจำลองกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์

แผ่นม่านจะประกอบไปด้วยความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนแผ่กว้างไปทางทิศตะวันออก และทิศตะวันตก มีขนาดประมาณ 100 กิโลเมตรถึงหลายร้อยกิโลเมตร และในทิศเหนือและใต้มีขนาดประมาณ 2,000 กิโลเมตรหรือมากกว่า ความเข้มของความไม่สม่ำเสมอสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณความสูง 225-450 กิโลเมตร การเคลื่อนที่ของแผ่นม่านจะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันออกด้วยความเร็ว 100-200 กิโลเมตรต่อวินาที และจะมีการหยุดการเคลื่อนที่ภายหลังเวลาที่เที่ยงคืนและจะมีการเคลื่อนที่กลับไปทิศตะวันตกในความเร็วที่เพิ่มขึ้น ในการศึกษากลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันตามรอบของวัฏจักรสุริยะ (Solar Activity) [9]

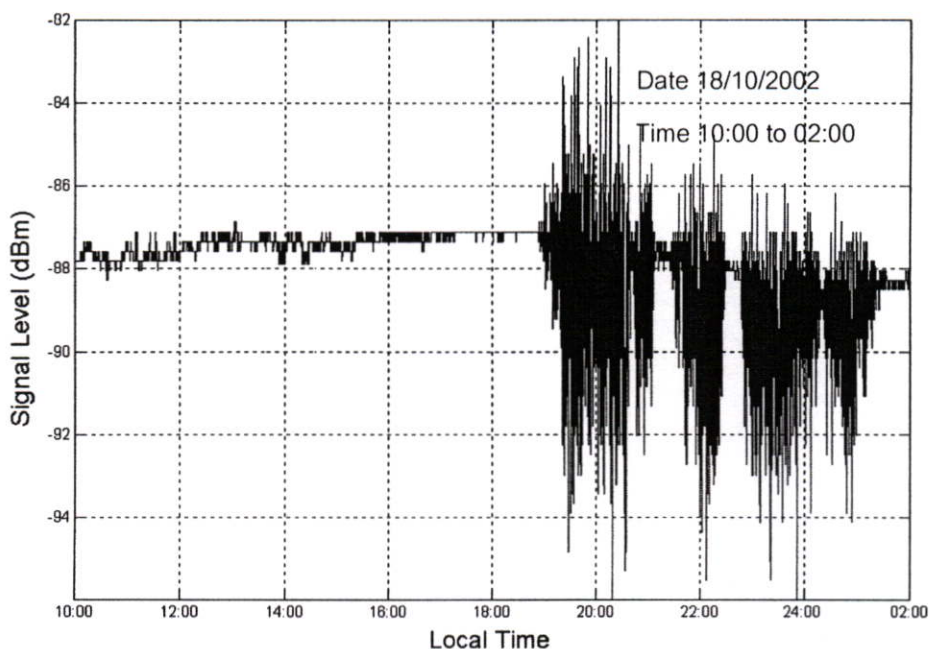
การเปลี่ยนแปลงระดับกำลังงานของสัญญาณดาวเทียมในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน (Amplitude Scintillation) ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการแทรกสอดกันของสัญญาณ (Interference Effects) โดยถ้าเป็นการสื่อสารภาคพื้นดิน เช่น ระบบสัญญาณเอฟเอ็มเสาเหตุของการแทรกสอดอาจมาจากสถานีวิทยุข้างเคียงที่ใช้ค่าความถี่ของคลื่นพาห้ (Carrier) ที่ใกล้เคียงหรือใช้ความถี่ที่ทับกัน [10] แต่ในปรากฏการณ์นี้สัญญาณที่มาแทรกสอดก็คือสัญญาณของตัวเองโดยเกิดจากการเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่มีค่าความหนาแน่นไม่เท่ากันดังรูปที่ 2.20 ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เฟสนำหน้า (Phase Advance) ซึ่งจะทำความเร็วของคลื่นระนาบ (Plane Wave) เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณดาวเทียมที่รับได้จะมีเฟสแตกต่างกันซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแอมพลิจูดและเฟสอย่างกะทันหัน

Ionospheric Scintillations



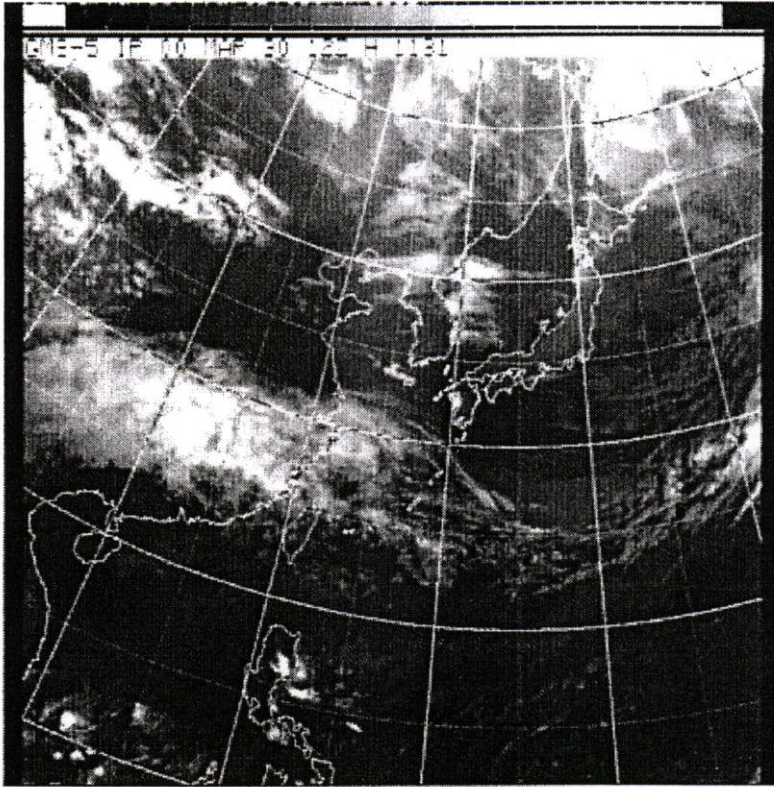
รูปที่ 2.20 ลักษณะสัญญาณดาวเทียมเมื่อเดินทางผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน

การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณดาวเทียมในขณะที่เกิดปรากฏการณ์นี้แสดงในรูปที่ 2.21 เป็นระดับสัญญาณดาวเทียมของวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2545 โดยเมื่อพิจารณาช่วงเวลา 10:00 – 18:00 น. ระดับสัญญาณ (Signal Level) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในระดับที่ไม่เกิน 0.5 – 1 dBp-p โดยถือว่าเป็นระดับสัญญาณปกติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้อาจเกิดจากคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นชั้นบรรยากาศที่แตกต่างกันหลายชั้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเคลื่อนตัวของดาวเทียม [9] แต่หลังจากเวลา 19:00 น. ระดับสัญญาณเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 01:30 น. ช่วงเวลานี้คือช่วงที่สัญญาณดาวเทียมได้รับอิทธิพลจากปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ที่ส่งผลให้ระดับกำลังงานเปลี่ยนไปจากระดับปกติถึง 15 dBp-p หลังจากนั้นระดับสัญญาณก็กลับสู่สภาวะปกติในเวลาประมาณ 02:00 น.

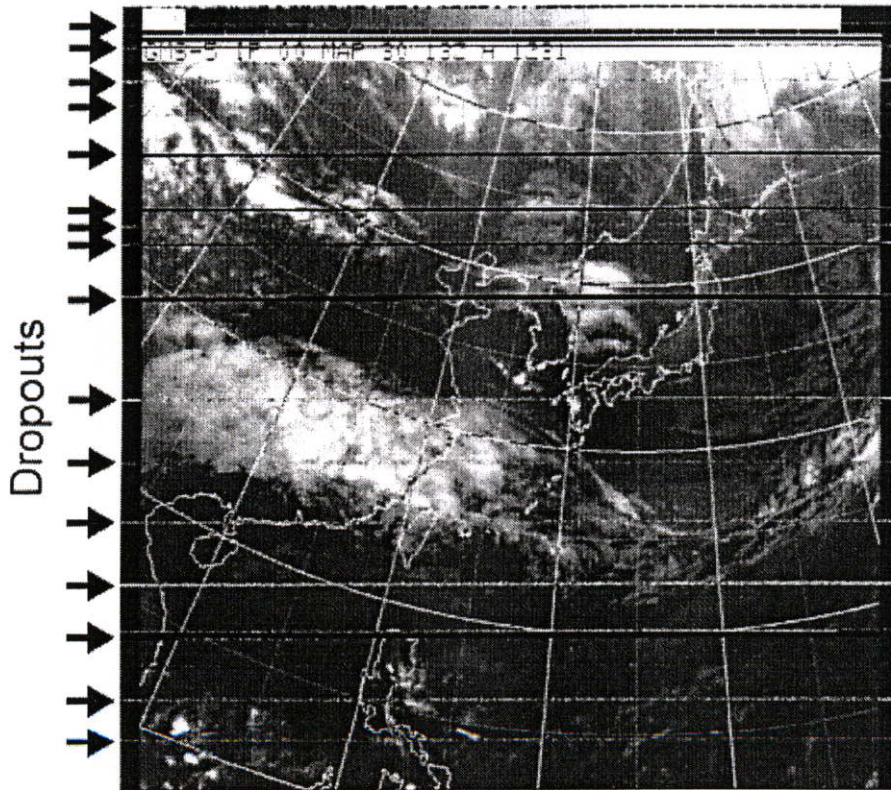


รูปที่ 2.21 สัญญาณดาวเทียมภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน [11]

เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณภาพที่ลดลงในการใช้งานจริงของสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากปรากฏการณ์นี้ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำรูปที่เป็นภาพถ่ายจากดาวเทียม GSM-5 (Geostationary Meteorological Satellite-5 or Himawari-5) ซึ่งเป็นดาวเทียมสำรวจสภาพอากาศ โดยในรูปที่ 2.22 แสดงภาพถ่ายจากดาวเทียมที่รับได้ในสภาวะปกติ ส่วนในรูปที่ 2.23 แสดงภาพถ่ายจากดาวเทียมที่รับได้ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของวันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2545 ซึ่งจะเห็นได้ว่าภาพที่รับได้นั้นหายไปเป็นช่วง (Dropouts) ซึ่งเกิดจากการที่แอมพลิจูดของสัญญาณเพิ่มขึ้นหรือลดลงจนเกินความสามารถของเครื่องรับจึงทำให้เราสูญเสียสัญญาณภาพในช่วงเวลาดังกล่าว



รูปที่ 2.22 ภาพถ่ายจากดาวเทียมสำรวจสภาพอากาศ GMS-5 ในสภาวะปกติ



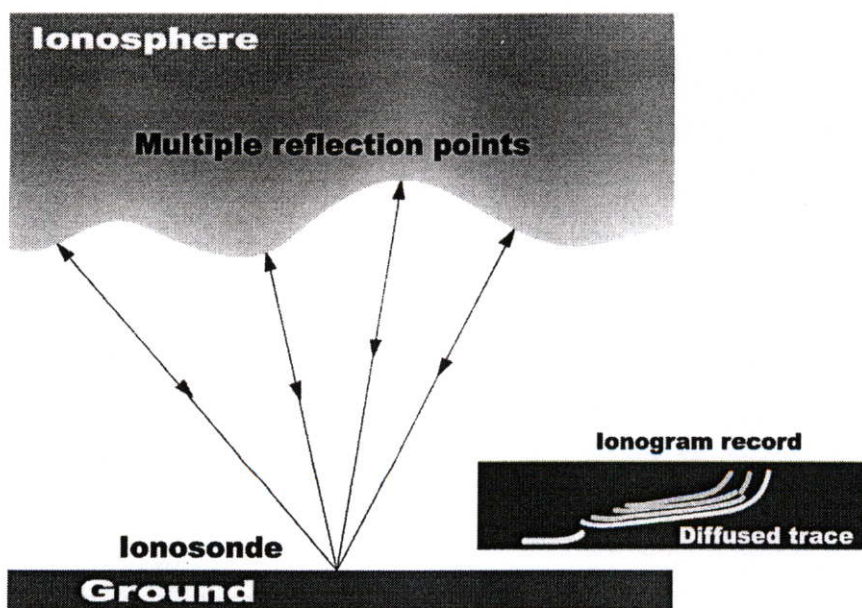
รูปที่ 2.23 ภาพถ่ายจากดาวเทียมในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

2.5 ปรากฏการณ์สเปรดเอฟ (Spread F)

ภายใต้อิทธิพลของแสงอาทิตย์จะทำให้โมเลกุลอากาศในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดการไอออไนเซชันกับโมเลกุลของออกซิเจนในเวลากลางวัน และ จะเกิดขบวนการรวมกลับในเวลาที่ไม่ม่มีแสงอาทิตย์ ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.2 แล้วนั้น และ เหตุการณ์นี้เองจะทำให้ประจุความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของชั้นไอโอโนสเฟียร์ เกิดความแปรปรวนในเวลากลางคืนซึ่งไม่มีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนเนื่องจากไม่มีแสงอาทิตย์ และ ปรากฏการณ์นี้เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเกิดในเวลากลางคืน เช่นเดียวกันกับการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ที่เกิดจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะสังเกตปรากฏการณ์นี้ได้จากไอโอโนแกรม ที่ได้จากการวัดแบบไอโอโนซอนเดเทคนิค

การทำกรวัดแบบไอโอโนซอนเด จะทำการวัดค่าหน่วงเวลาของคลื่นที่ส่งขึ้นไปสะท้อนตั้งฉากกับระนาบความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่มีค่าเท่ากันดังรูปที่ 2.24 เป็นตัวอย่างเมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าไม่สม่ำเสมอ การส่งคลื่นจากจุดหนึ่งไปสะท้อนกับระนาบความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนแล้วกลับมาอยู่ที่เดิม ระยะทางคงที่ที่ได้จะเปลี่ยนตามจุดของการสะท้อน และ จะทำการลากเส้นการสะท้อนที่ได้จากการคำนวณค่าหน่วงเวลา ลงในไอโอโนแกรม ทำให้ภาพไอโอโนแกรมที่ได้มีความกว้าง เราจะเห็นปรากฏการณ์นี้ได้เมื่อเกิดการสะท้อนในชั้น F ของไอโอโนสเฟียร์และการกระจายที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า สเปรดเอฟ (spread F) [12]

Spread F



รูปที่ 2.24 สาเหตุการเกิดสเปรดเอฟ

โดยทั่วไปความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ จะเกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของการวัดในสเกลที่ต่างกันมาก ๆ รวมกับเกิดการสะท้อนรวมกันหลายๆจุด ทำให้เกิดปรากฏการณ์ สเปคตรัม และเกิดการกระเจิงของคลื่นที่สะท้อนโดยความผิดปกติของโครงสร้างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งมีสเกลเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของความถี่ที่ทำการส่งขึ้นไป ความผิดปกติของโครงสร้างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แนวโน้มมีทิศทางตามเส้นสนามแม่เหล็ก ดังนั้นคลื่นที่เดินทางไปกระทบเส้นสนามแม่เหล็ก จะมีประสิทธิภาพในการกระเจิงมาก [13] ดังนั้นในการวัดแบบไอโอโนซอนเดเทคนิค จะทำให้สามารถสังเกตทิศทางเคลื่อนตัวของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันได้

บทที่ 3

วิธีการศึกษาวิจัย

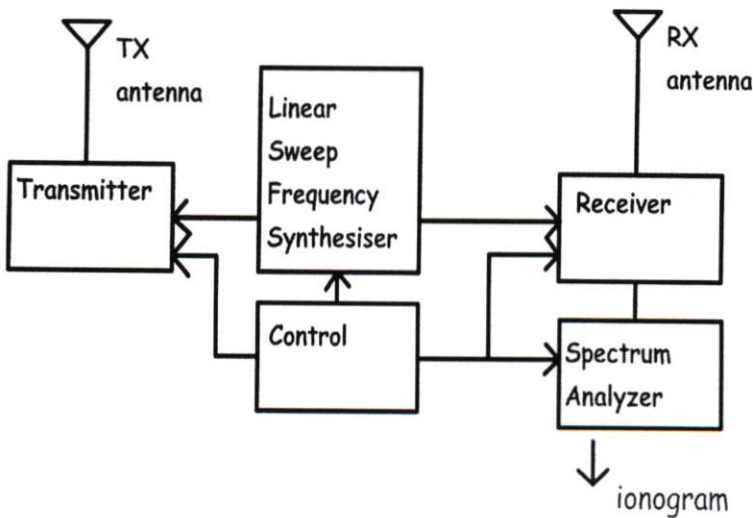
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ในการวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนที่ทำการวัดเก็บข้อมูลได้แก่

1. อุปกรณ์การวัดความสูงและความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์
2. อุปกรณ์การวัดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

3.1.1 อุปกรณ์การวัดความสูงและความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตที่เวลาต่างๆ ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องรับและส่งคลื่นในย่าน HF รุ่น SKI-96092 FM/CW Radar ซึ่งถูกติดตั้ง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร (ตำแหน่งเส้นลองจิจูด 99.3 องศาตะวันออก เส้นละติจูด 10.7 องศาเหนือ) เครื่องจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นภาพไอโอโนแกรมโดยเครื่องจะทำการบันทึกข้อมูลภาพเป็นไฟล์ PNG ทุกๆ 15 นาที ตั้งแต่เดือนมกราคม 2547 ถึงเดือน ธันวาคม 2547 เพื่อนำข้อมูลที่เป็นไฟล์ภาพไอโอโนแกรมนี้ มาวิเคราะห์หาค่าความสูงของชั้น F และ ค่าความถี่วิกฤต ณ เวลาต่าง ๆ ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยภาพรวมของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความถี่วิกฤตของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมการทำงานของระบบไอโอโนซอนเด

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องมือในการวัดความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ใช้ในการทดลอง

| | |
|-----------------------|--|
| เสาอากาศ | สูง 27 เมตร |
| ชนิดสายอากาศ | Folded Dipole 2 ชั้น มี โพลาริซ เป็น 90 องศาต่อกัน |
| ตำแหน่งของสถานี | เส้นลองจิจูด 99.3° ตะวันออก เส้นละติจูด 10.7° เหนือ |
| เครื่องรับและส่งคลื่น | SKI-96092 FM/CW Radar |
| การ Sweep ความถี่ | Digital direct synthesizer |
| Power | 20 watt |

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความถี่วิกฤตมีดังนี้

1) สายอากาศ

เป็นสายอากาศชนิด โฟลด์ดีปโพล (Folded dipole) 2 ชั้น วางตัดขวางกันเป็น โคม โดยใช้เสาที่มีความสูง 27 เมตรเป็นตัวยึดสายอากาศ สายอากาศชั้นที่ทำการส่งคลื่นขึ้นไปยังชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีมุมการโพลาริซของคลื่นเป็น 90 องศา กับสายอากาศชั้นที่ทำการรับคลื่นที่สะท้อนลงมายังพื้นโลก



รูปที่ 3.2 สายอากาศโพลเด็คไดโพล

2) ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ

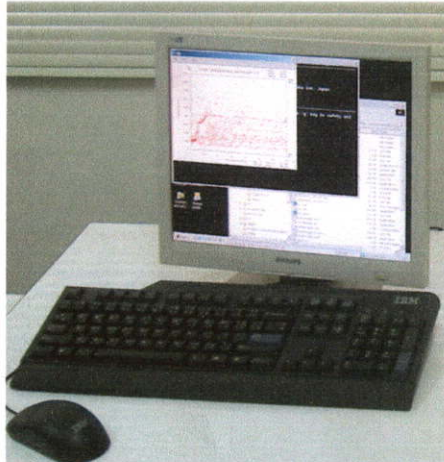
เป็นเครื่องส่งและเครื่องรับคลื่นความถี่ย่าน 3 - 30 เมกะเฮิร์ตซ์ รุ่น SKI-96092 FM/CW Radar จะมีการส่งความถี่แบบต่อเนื่อง (Continuous wave) และมีการเพิ่มความถี่ที่ส่งขึ้นไปในอัตรา 100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที ใน 1 รอบของการทำงานในการสวீป (Sweep) ความถี่จาก 3 - 30 เมกะเฮิร์ตซ์จะใช้เวลาทั้งหมด 5 นาทีแล้วจะส่งข้อมูลไปทำการบันทึกที่คอมพิวเตอร์ แล้วจะทำการปรับสัญญาณนาฬิกา (Clock) ของเครื่องใหม่ในทุกๆรอบของการทำงาน



รูปที่ 3.3 เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar

3) คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม

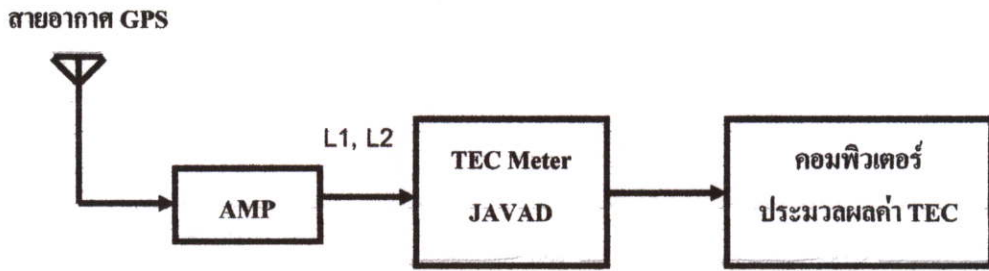
จะนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับที่ทำการคำนวณเวลาหน่วงของคลื่นที่สะท้อนกลับมายังเครื่องรับ ที่ทำการบันทึกทุกๆ 15 นาทีมาทำการสร้างเป็นภาพไอโอโนแกรมโดยมีการเก็บภาพเป็นไฟล์ .PNG



รูปที่ 3.4 คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม

3.1.2 อุปกรณ์การวัดปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในการศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (TEC: Total electron content) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้ดำเนินการโดยใช้ชุดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ซึ่งผลิตโดยบริษัท JAVAD ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งถูกติดตั้ง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร (ตำแหน่ง เส้นลองจิจูด 99.3 องศาตะวันออก เส้นละติจูด 10.7 องศาเหนือ) ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสัญญาณจากดาวเทียม GPS ตั้งแต่เดือนมกราคม 2547 ถึงเดือน ธันวาคม 2547 เพื่อนำมาประมวลผลค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากสัญญาณดาวเทียม GPS ความถี่ 1575.42 MHz ที่เกิดขึ้นในระหว่างวัน และในแต่ละเดือนต่อไป บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในการหาค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์แสดงในรูปที่ 3.5 โดยชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การวัดค่า TEC

1) สายอากาศ

เป็นสายอากาศชนิดไมโครสตริป (Microstrip Antenna) ที่มีโพลาไรซ์ของคลื่นแบบวงกลม หมุนขวา (Right Hand Circular Polarized) เนื่องด้วยสัญญาณจากดาวเทียมเป็นแบบหมุนวนขวา สายอากาศถูกติดตั้งอยู่ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขต ชุมพร ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางรอบทิศทางเป็นมุมเงยสูงกว่า 20 องศา และไม่ใกล้กับ แหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม ทำหน้าที่รับ สัญญาณจากดาวเทียม GPS ทั้ง 2 ความถี่ คือ L1 เท่ากับ 1575.42 MHz และ L2 เท่ากับ 1227.12 MHz รูปที่ 3.6 แสดงภาพสายอากาศรับสัญญาณ GPS



รูปที่ 3.6 สายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS (NovAtel's Model 502GPSAntenna)

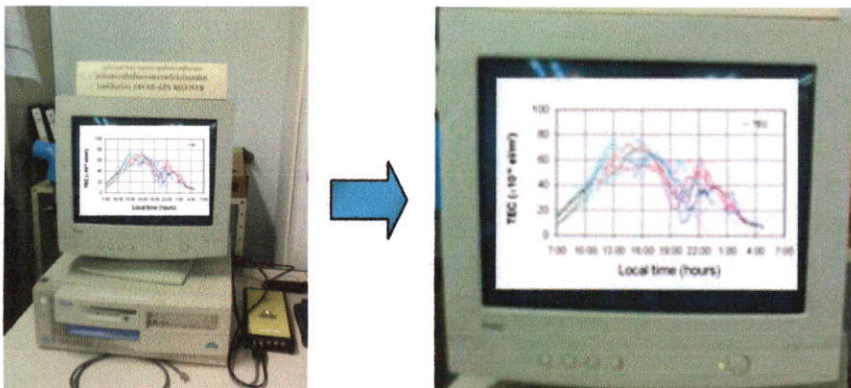
2) เครื่องรับสัญญาณ GPS

เป็นเครื่องรับที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ตั้งแต่ 4 ดวงขึ้นไปพร้อมๆ กัน และสามารถแสดงผลค่าตำแหน่งและความเร็วได้ทันที นอกจากนี้ข้อดีที่ใช้วัดตำแหน่งอย่างต่อเนื่องได้แล้ว เครื่องรับชนิดนี้ยังสามารถช่วยขจัดปัญหา GDOP ซึ่งเป็นความผิดพลาดอันเนื่องจากการจับกลุ่มของดาวเทียมที่ใช้นำร่องได้อีกด้วย โดยเครื่องรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมมาประมวลผลได้ครั้งละ 12 ดวงพร้อมๆ กัน ถูกติดตั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร รูปที่ 3.7 แสดงภาพเครื่องรับสัญญาณ GPS ยี่ห้อ Legacy



รูปที่ 3.7 ภาพเครื่องรับสัญญาณ GPS

3) คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลค่า TEC



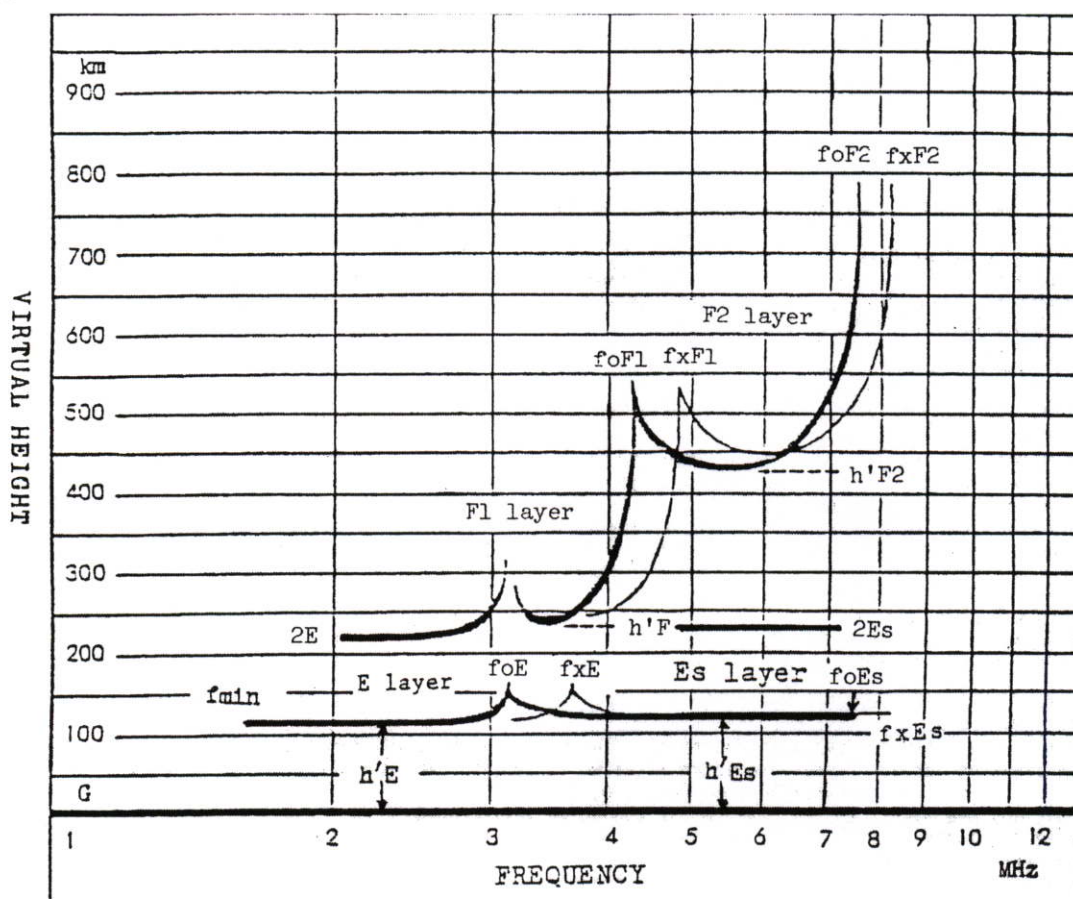
รูปที่ 3.8 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลค่า TEC และจอแสดงผล

3.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

3.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตของชั้น F จากไอโอโนแกรม

เครื่องมือที่ใช้วัดความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะใช้ ไอโอโนซอนเดเทคนิค โดยจะเป็นเทคนิคที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความสูงและความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยจะทำการส่งคลื่นวิทยุที่มีพัลส์สั้นในแนวตั้ง โดยเครื่องมือในการทดลองนี้จะทำการส่งคลื่นแบบต่อเนื่องด้วยการสวิป (Sweep) ความถี่ค่าตั้งแต่ 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยจะทำการเพิ่มความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที ใน 1 รอบจะใช้เวลาทั้งหมด 5 นาที และทำการบันทึกข้อมูลเวลาหน่วงระหว่างการส่งและการรับทุกๆ 15 นาที เมื่อทราบค่าความเร็วในการแพร่กระจายคลื่นและระยะตำแหน่งที่คลื่นสะท้อนจะทำให้สามารถคำนวณค่าออกมาได้ โดยคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลแล้วพล็อตผลที่ได้นี้ออกมาเป็นรูปภาพที่เรียกว่า ไอโอโนแกรม (Ionogram) แสดงในรูปที่

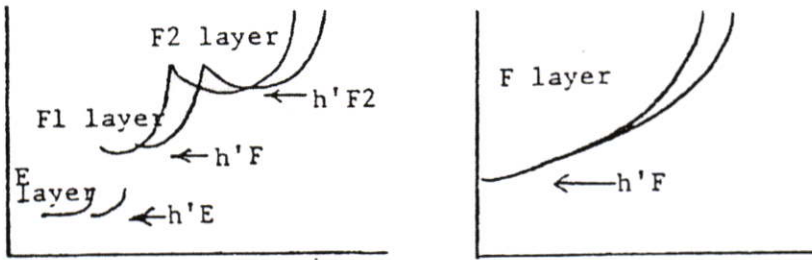
3.9



รูปที่ 3.9 แบบจำลองของระดับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากไอโอโนแกรม [14]

ความสูงของชั้น F นั้นจะสามารถทำการวัดได้จากส่วนของเส้นโค้งที่ต่ำที่สุดที่ขนานกับแกนนอนของภาพที่ได้จากไอโอโนแกรม โดยที่แกนนอนจะเป็นแกนของความถี่ที่มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์และในแกนตั้งจะเป็นแกนของความสูงจากพื้นโลกที่มีหน่วยเป็นกิโลเมตร ในเวลากลางวันและเวลากลางคืนการปรากฏของชั้นต่างๆของไอโอโนสเฟียร์จะแตกต่างกัน โดยที่ในเวลา

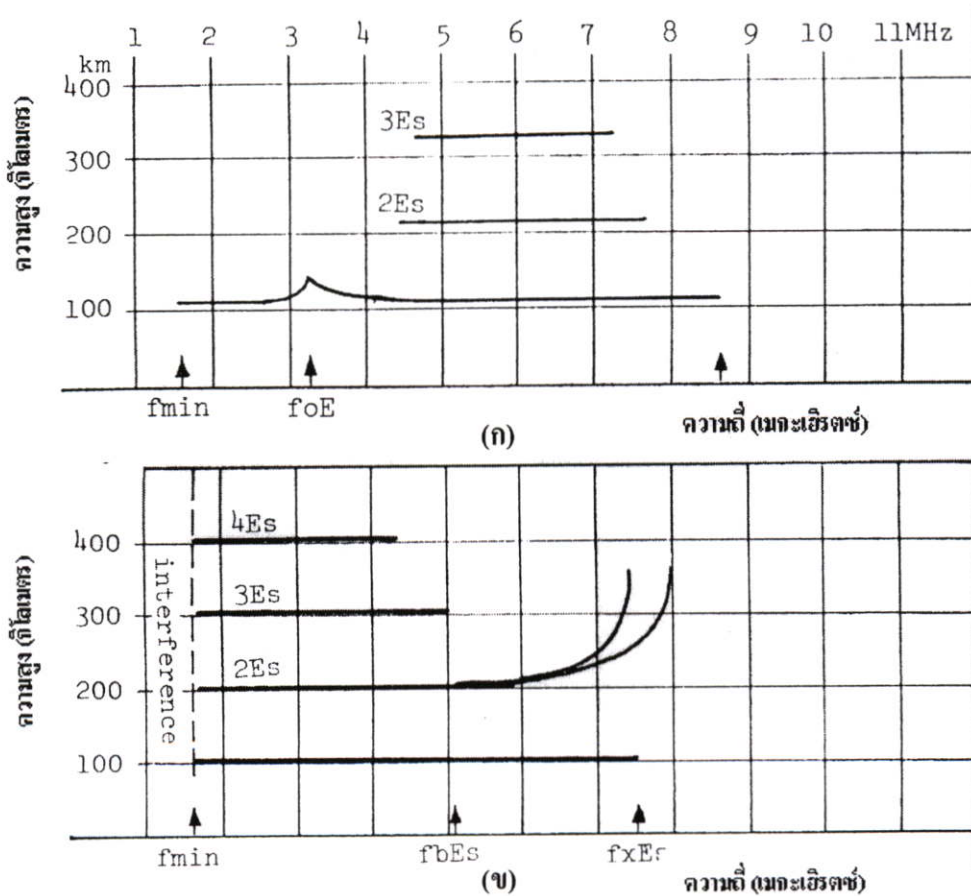
กลางวันชั้น F จะมีการแตกตัวเป็นสองชั้นและในเวลากลางคืนจะรวมตัวกันเป็นชั้นเดียว ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



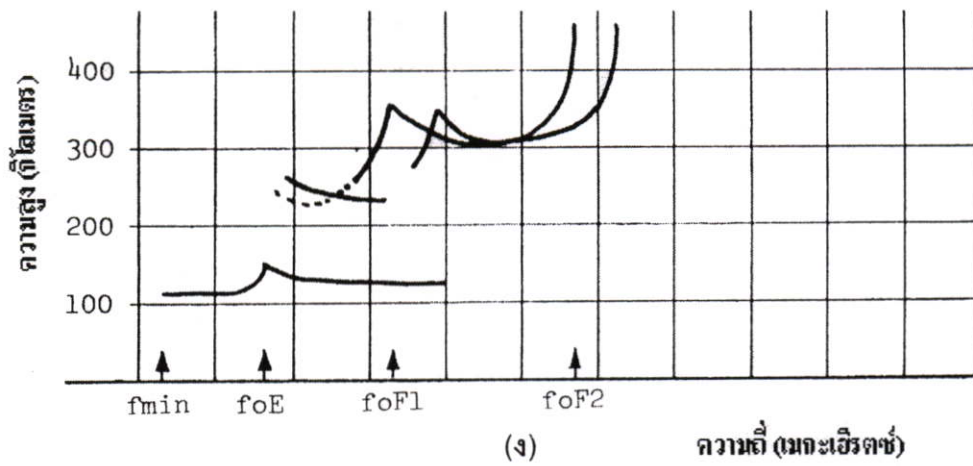
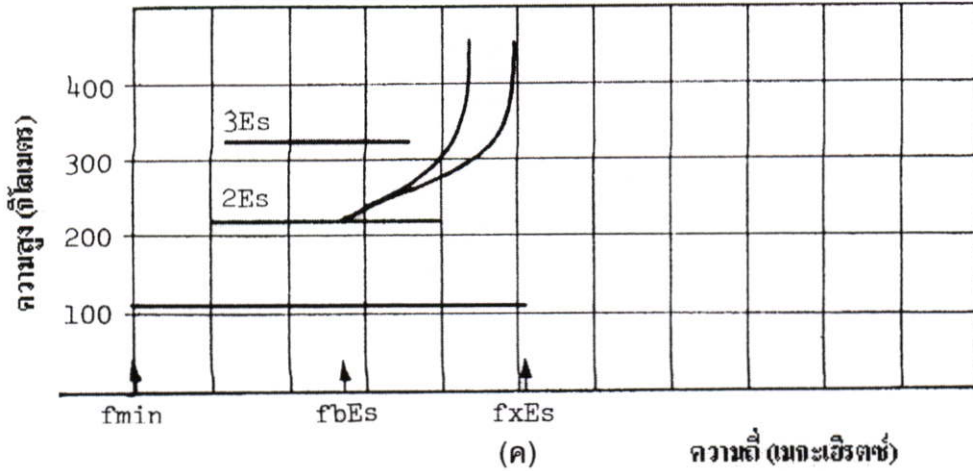
รูปที่ 3.10 ไอโอโนแกรมในเวลากลางวัน รูปที่ 3.11 ไอโอโนแกรมในเวลากลางคืน

ในการพิจารณาไอโอโนแกรมแต่ละเวลา ซึ่งจะมีการพิจารณาในแต่ละรูปแบบไม่เหมือนกัน โดยจะใช้ Manual ionogram เป็นเครื่องมือในการอ้างอิง ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณา 2 พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญคือ ความสูงของชั้น F และ ความถี่วิกฤตของชั้น F โดยที่จะแสดงการพิจารณาในแต่ละกรณีที่สามารถสังเกตพบได้บ่อยดังนี้

3.2.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของชั้น F จากไอโอโนแกรม

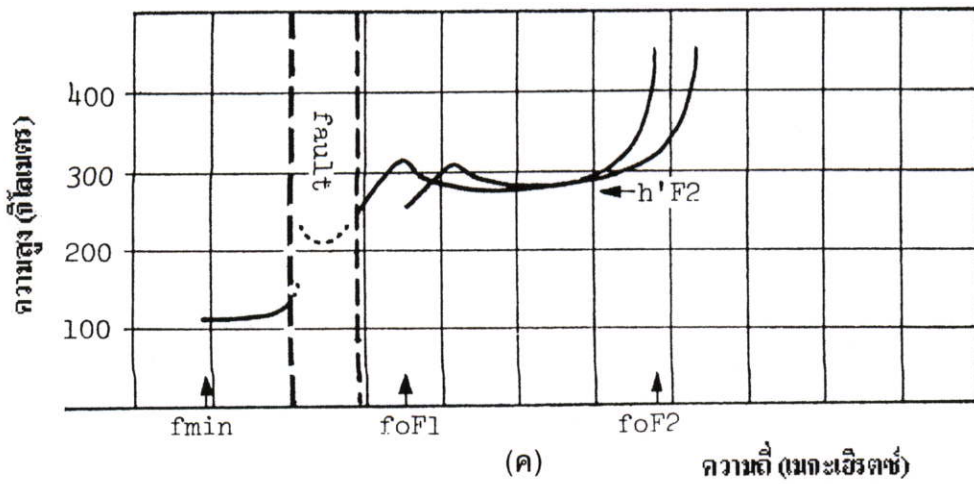
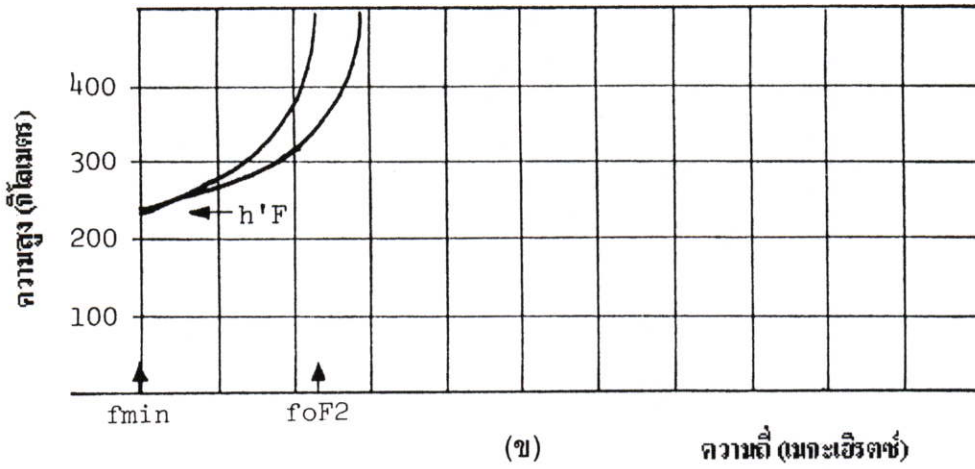
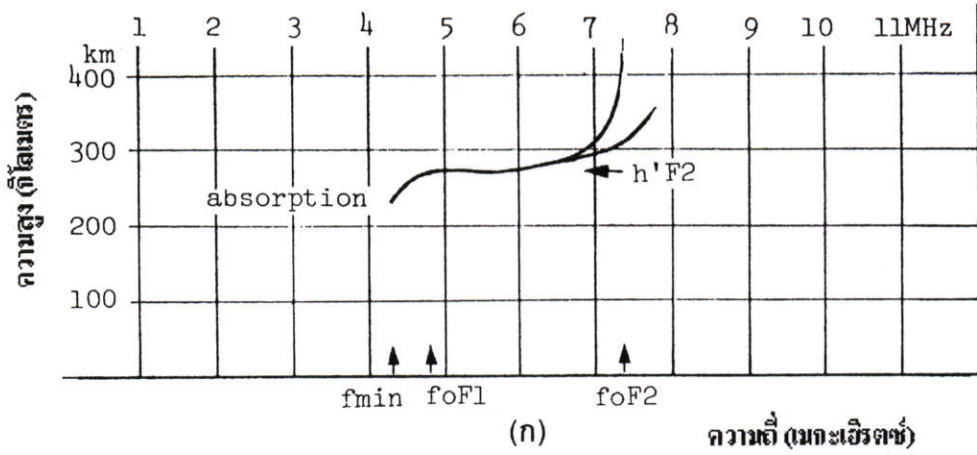


รูปที่ 3.12 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อมีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น E มากกว่าปกติ [14]

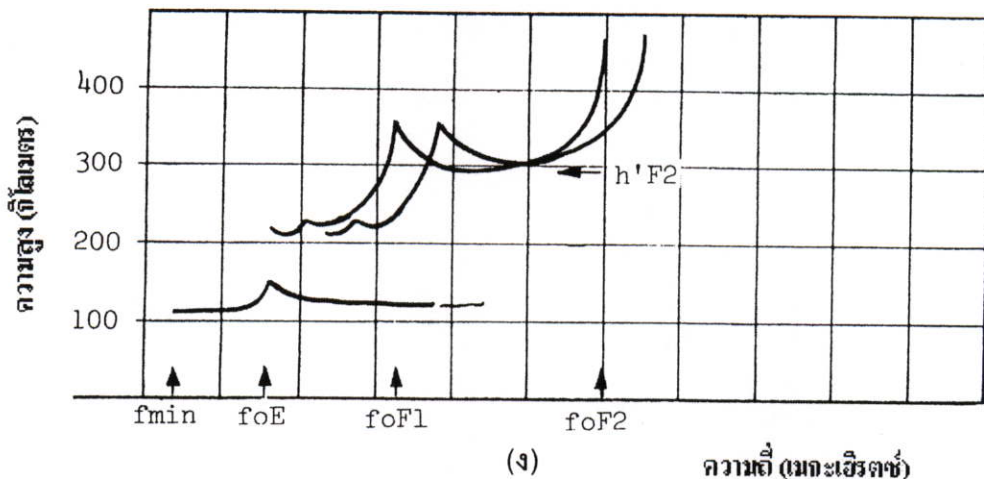


รูปที่ 3.12 (ต่อ)

จากรูปที่ 3.12 (ก) จะเป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นบ่อยในหน้าร้อนช่วงเดือน พฤษภาคม ถึง เดือน กรกฎาคม จะเกิด sporadic E บ่อยครั้ง โดยที่การเกิด sporadic E นี้จะทำให้ไม่สามารถเห็น ชั้น F ได้จากไอโอโนแกรม เนื่องจากถูกบดบังโดยชั้น E เพราะในเวลานั้นมีการไอออไนซ์ของ อิเล็กตรอนในชั้นมากกว่าปกติ [John Griffith] จากรูปนี้จะไม่มีความแต่จะใส่สัญลักษณ์ A เพื่อเป็นที่ทราบกันว่าชั้น F ถูกบดบังโดย sporadic E รูปที่ 3.12 (ข) ในภาพไอโอโนแกรมนี้จะพบได้ บ่อยครั้งทั้งก่อนและหลังพระอาทิตย์ตก การวิเคราะห์ค่า ความสูงของชั้น F จะต้องระมัดระวังใน การแยกแยะระหว่างความสูงของชั้น F กับชั้น E ที่มีค่าความสูงเป็น 2 เท่าของ E จริงๆ โดยที่ค่าความ สูงของชั้น F ในรูปนี้คือ 200A รูปที่ 3.12 (ค) การอ่านค่าไอโอโนแกรมในกรณีนี้จะคล้ายกับรูปที่ 3.12 (ข) แต่ค่าความสูงจะใส่สัญลักษณ์ E เพิ่มเข้าไปเป็น 220 EA รูปที่ 3.12 (ง) โดยปกติแล้ว ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น E จะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น F แต่ในกรณีนี้ก็ไม่สามารถทราบค่าความสูงของชั้น F ได้เหมือนกันเนื่องจากโดนชั้น E ซึ่งมี ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากกว่ามาบดบัง

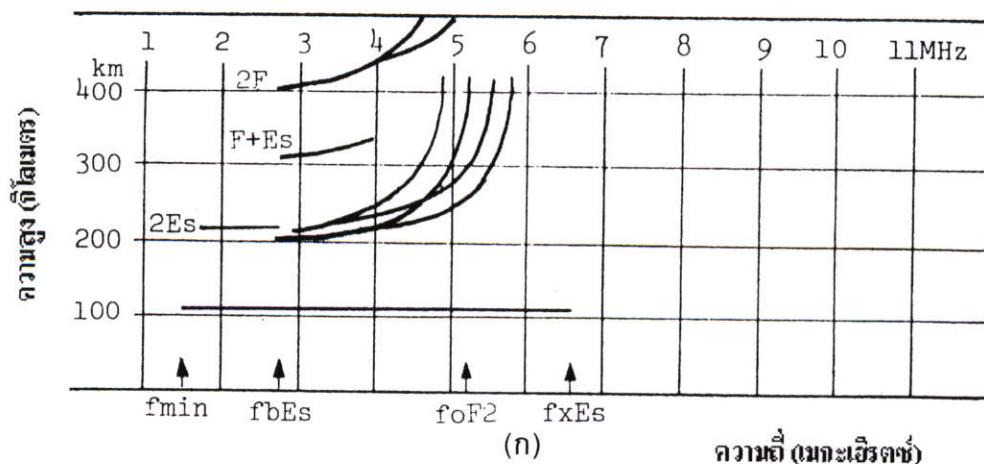


รูปที่ 3.13 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการดูดกลืนคลื่น (Absorption)

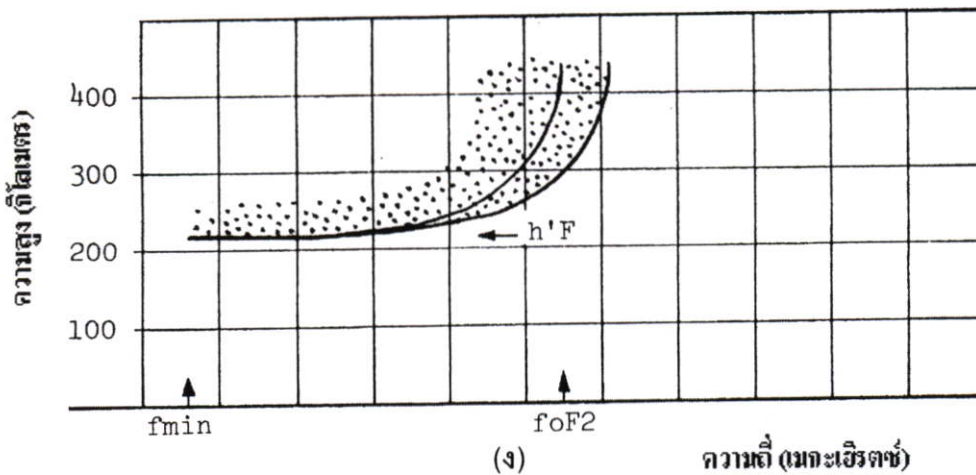
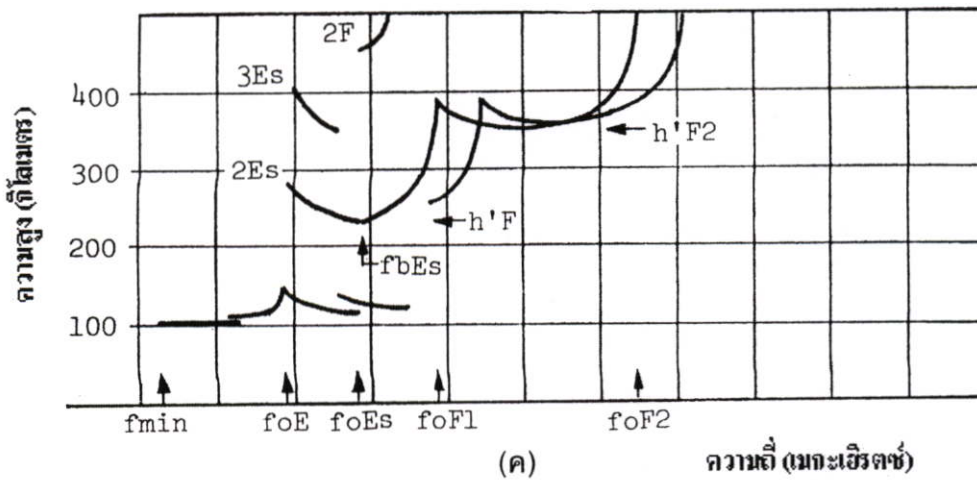
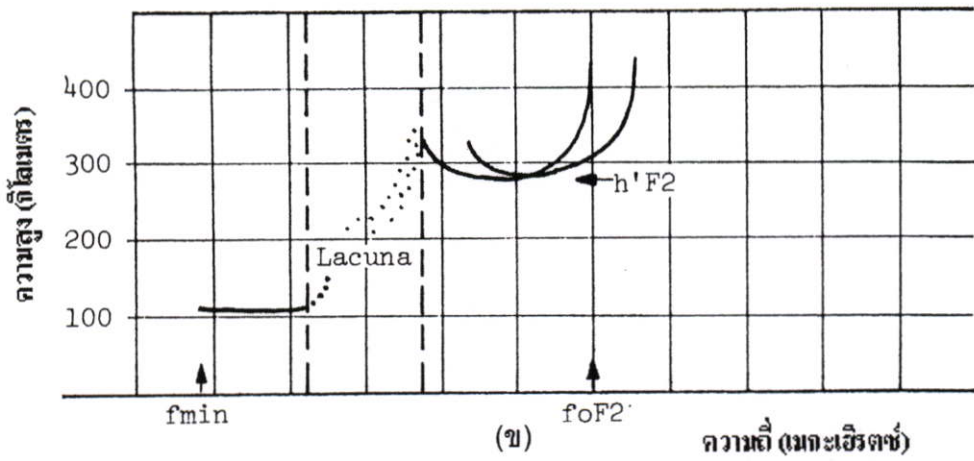


รูปที่ 3.13 (ต่อ)

ภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.13 (ก) เป็นกรณีที่เกิดการดูดกลืน (Absorption) ที่รุนแรง (ซึ่งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่ทำให้เกิดการดูดกลืนจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ ได้อธิบายในหัวข้อ 2.2) คลื่นในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 4.3 MHz. จะถูกดูดซับโดยชั้นบรรยากาศไปหมดจนไม่สะท้อนกลับมายังเครื่องรับ จึงไม่สามารถเห็นเส้นโค้งบริเวณ $h'F$ ได้ทั้งหมด [15] สัญลักษณ์ที่ใส่เมื่อเกิดการดูดกลืน คือ B ส่วนรูปถัดมารูปที่ 3.13 (ข) เป็นไอโอโนแกรมที่พบได้ในเวลากลางคืนโดยที่ชั้น F จะรวมตัวกันเป็นชั้นเดียวเวลาตอนนี้ $h'F$ จะไม่ขนานกับแกนนอนของไอโอโนแกรมโดยจะใช้ EE เป็นสัญลักษณ์ที่บ่งบอก ในรูปที่ 3.13 (ค) จะไม่สามารถทราบค่า $h'F$ ได้เนื่องจากเป็นความผิดพลาดของการวัดแบบ ไอโอโนซอนเด โดยในกรณีนี้จะใช้สัญลักษณ์ C ไอโอโนแกรมที่พบได้ในเวลากลางวันจะดูตัวอย่างได้จากรูปที่ 3.13 (ง) โดยจะพบว่าชั้น F มีการแตกตัวเป็น 2 ชั้นคือชั้น F_1 และ ชั้น F_2 ถ้าพบไอโอโนแกรมดังในภาพนี้จะสามารถทราบค่าความสูงของชั้น F_1 และ F_2 ได้



รูปที่ 3.14 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในเวลากลางคืนและเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ



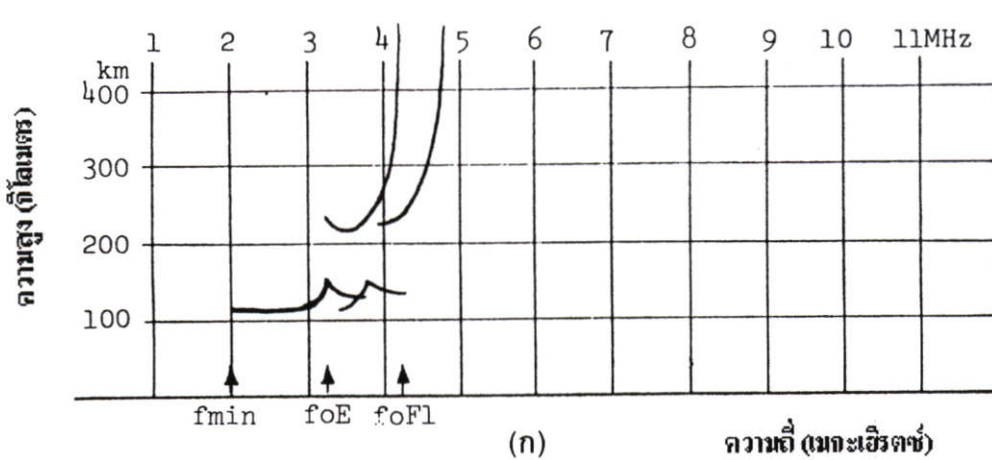
รูปที่ 3.14 (ต่อ)

ภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.14 (ก) นี้ เป็นภาพที่เกิดขึ้นในเวลากลางคืน เส้นโค้งที่เกิดขึ้นมาซ้อนกันเกิดขึ้นมาจากความถี่ Oblique ที่เครื่องสามารถรับเข้ามาได้ด้วย ซึ่งค่าของ $h'F$ ของคลื่นที่ส่งขึ้นไปจริงๆ จากรูปนี้คือ 200 กิโลเมตร ส่วนค่า $h'F$ ที่มาจากความถี่ Oblique คือ 210 กิโลเมตรจะสังเกตได้ว่ามีลักษณะของเส้นโค้งที่พล็อตออกมาจากไอโอโนแกรมคล้ายกัน ส่วนใน

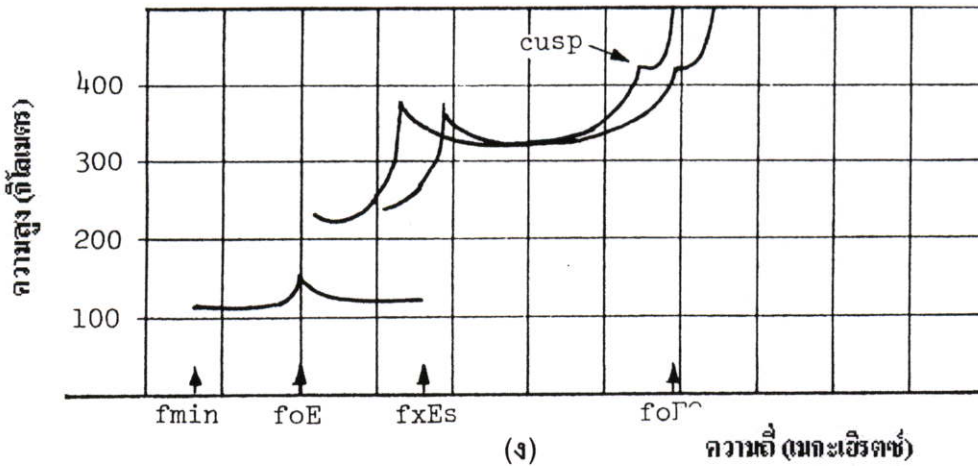
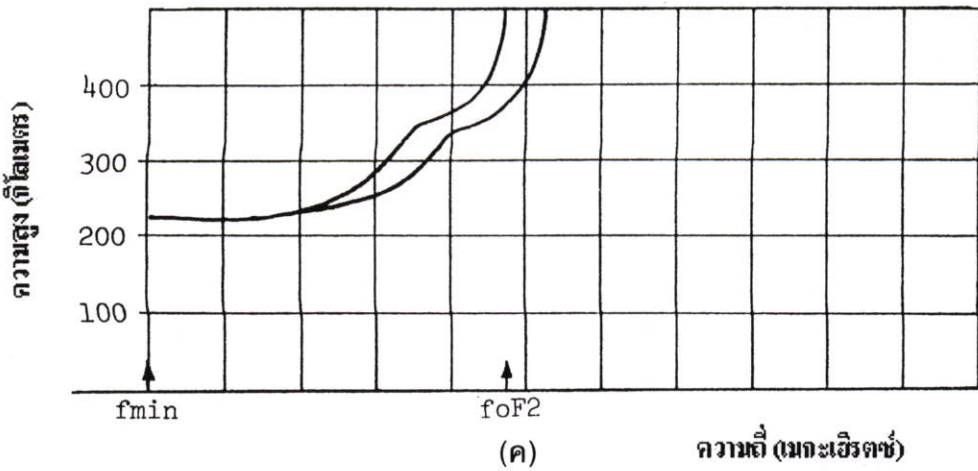
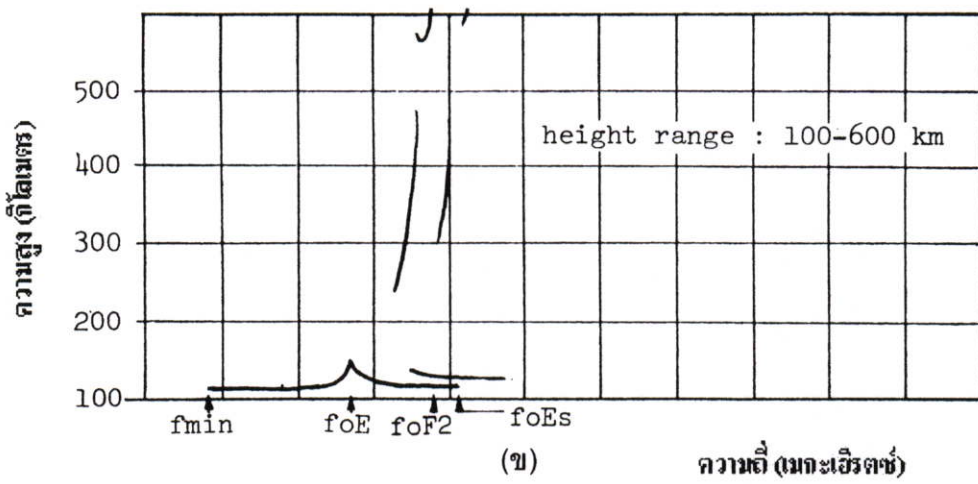
รูปที่ 3.14 (ข) เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางวันในรูปนี้จะมีปรากฏการณ์ Lacuna เกิดขึ้นโดยที่เกิดมาจากชั้น E และแพร่กระจายสูงขึ้นไปยังชั้น F₁ จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตชั้น F₁ ได้โดยจะใช้สัญลักษณ์ Y ที่ค่าของ h'F ในรูปที่ 3.14 (ค) ก็เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลา กลางวันเช่นกันในรูปนี้จะสังเกตเห็นชั้น E เป็นหลายชั้นเนื่องจากสัญญาณที่สะท้อนกลับมาถึง เครื่องรับมีค่าพลังงานที่แรงทำให้เกิดการสะท้อนกลับมาหลายครั้งทำให้เห็นเป็นชั้น E หลายชั้น ค่า h'F ในรูปนี้คือ 230 กิโลเมตร รูปที่ 3.14 (ง) เป็นภาพไอโอโนแกรมเมื่อมีการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ [16] ซึ่งจะเกิดในเวลากลางคืนส่วนในรายละเอียดของชนิดของ สเปรดเอฟ จะกล่าวใน บทต่อไป

3.2.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลความถี่วิกฤตของชั้น F จากไอโอโนแกรม

ความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รู้จักกันในสากลจะใช้สัญลักษณ์ foF2 ความถี่วิกฤตของชั้น F นี้มีประโยชน์กับการนำไปใช้ในการสื่อสารตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นอกจากนั้นแล้วยังมีความเกี่ยวข้องกับค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F ด้วย ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F สามารถวัดได้จากส่วนโค้งแรกที่ตั้งฉากกับแกนนอนของไอโอโนแกรม ตัวอย่างของการพิจารณาค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ จากภาพไอโอโนแกรม ณ เวลา ต่างๆที่สามารถพบได้บ่อยมีดังนี้



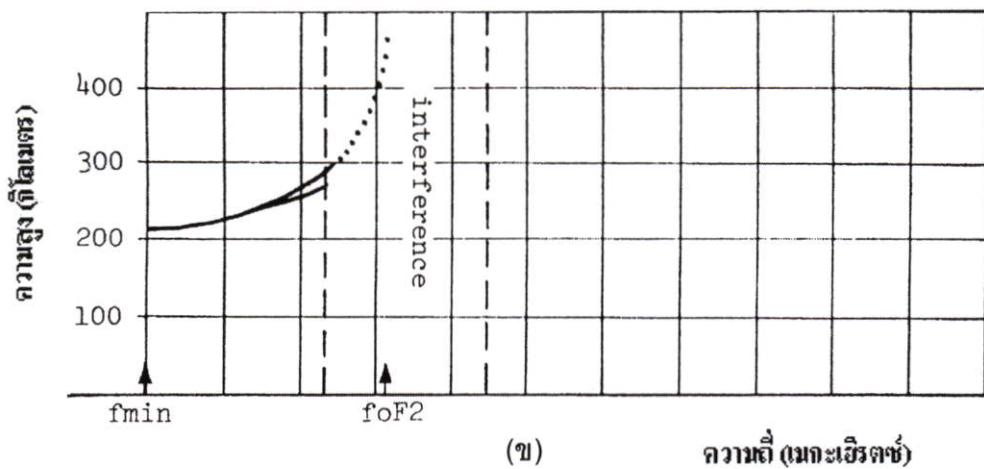
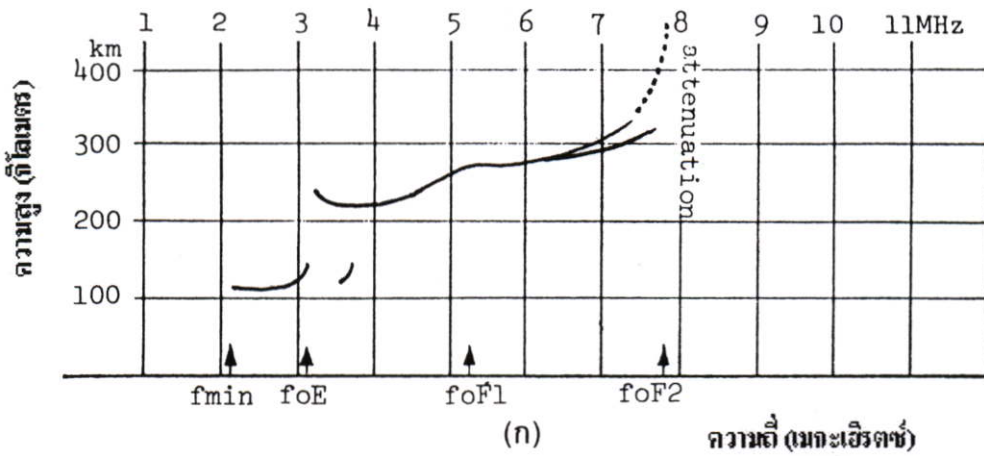
รูปที่ 3.15 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดพายุแม่เหล็ก (Magnetic storm)



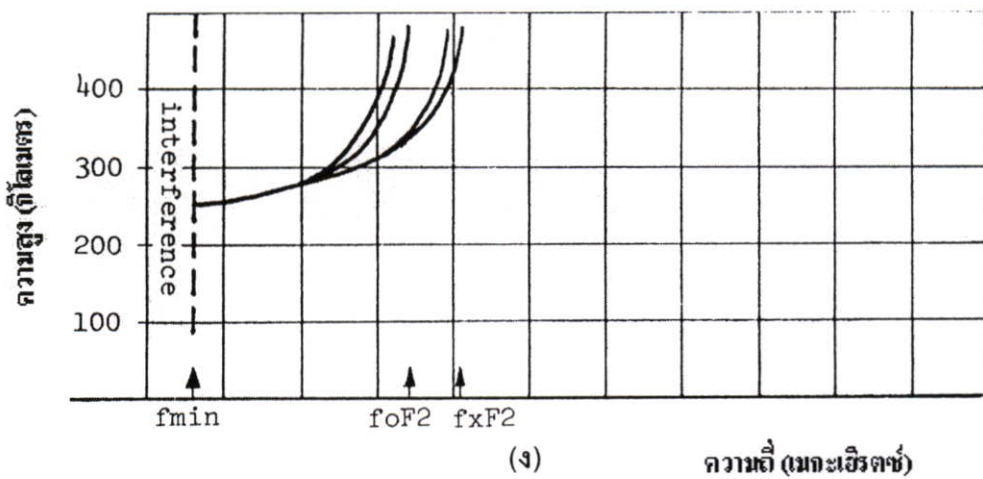
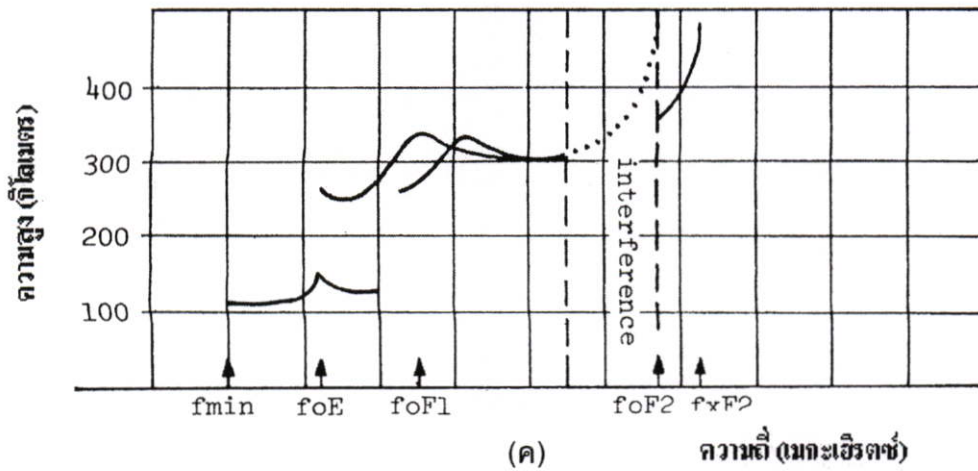
รูปที่ 3.15 (ต่อ)

ภาพไอโอแกรมในรูปที่ 3.15 (ก) เป็นรูปที่ไม่ได้พบเห็นได้บ่อยนักในกรณีจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเกิดชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดความแปรปรวน (Ionospheric disturbances) ที่จะเกิดขึ้นในสภาวะที่เกิดพายุแม่เหล็ก (Magnetic storm) ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น F_2 มีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น F_1 หรืออาจจะลดลงจนมีค่าน้อยกว่าในชั้น F_1

ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถหาได้จากไอโอโนแกรม จะใส่สัญลักษณ์ EG (E คือ มีค่าน้อย) โดยที่ค่า foF2 คือ 4.2 EG เมกะเฮิร์ตซ์ ข้อควรระวังของการสังเกตในกรณีนี้ก็จะเป็นคล้ายกับรูปที่ 3.14 ซึ่งจะมีการอธิบายในส่วนถัดไป ภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.15 (ข) จะเป็นภาพที่เกิดหลังจากรูปที่ 3.15 (ก) ได้เกิดไปแล้วความสูงของชั้น F₂ จะไม่สามารถหาค่าได้ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในรูปนี้จะมีค่า 4.7 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนภาพถัดมานั้น รูปที่ 3.15 (ค) คือภาพไอโอโนแกรมที่เกิดในเวลากลางคืน ในกรณีนี้จะสามารถสังเกตค่าความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และค่าความถี่วิกฤตของชั้นได้อย่างชัดเจนโดยที่ค่าความถี่วิกฤตในรูปนี้คือ 5.7 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนรูปที่ 3.15 (ง) เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางวันรูปนี้จะมีควมผิดปกติ คือ มีรอยหยัก (Cusp) เกิดขึ้นใกล้กับค่าความถี่วิกฤตเล็กน้อยแต่ไม่เป็นผลกระทบอะไรค่าความถี่วิกฤตในรูปนี้จะมีค่า 7.9 เมกะเฮิร์ตซ์



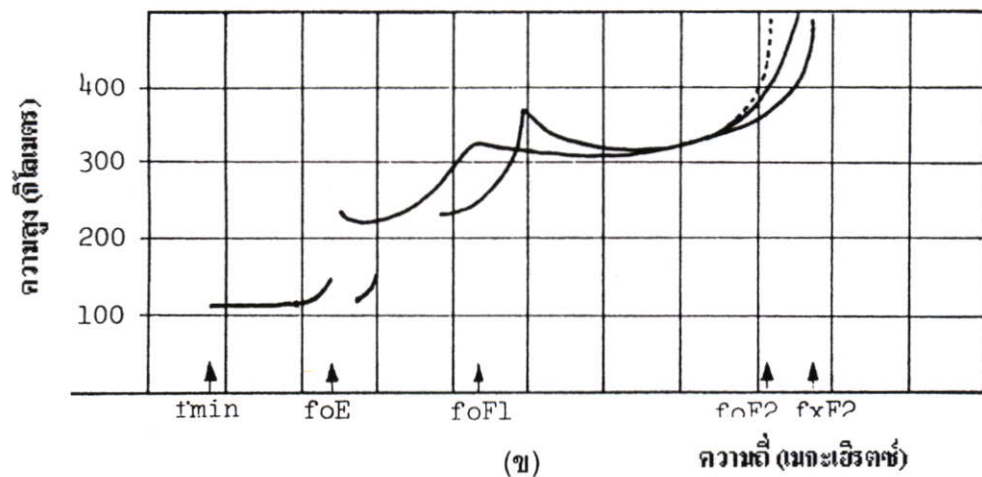
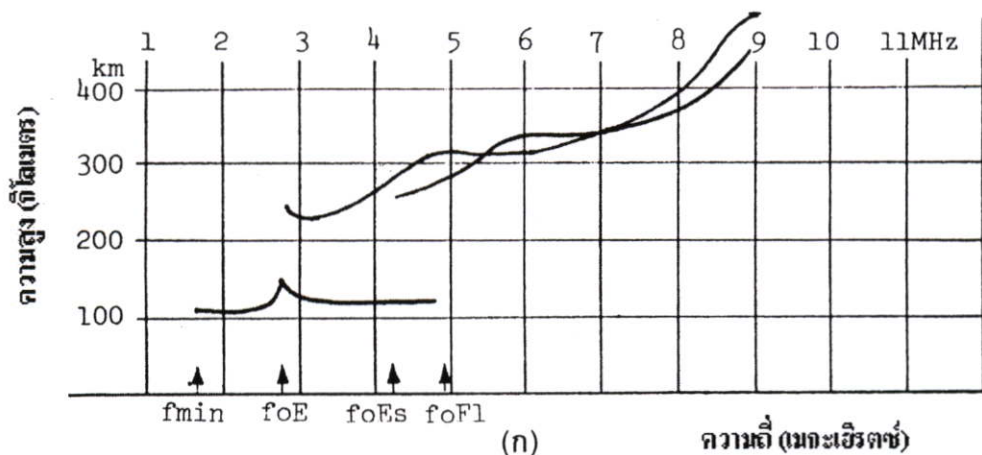
รูปที่ 3.16 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดการลดทอน และการแทรกสอด (Interference) ของคลื่น



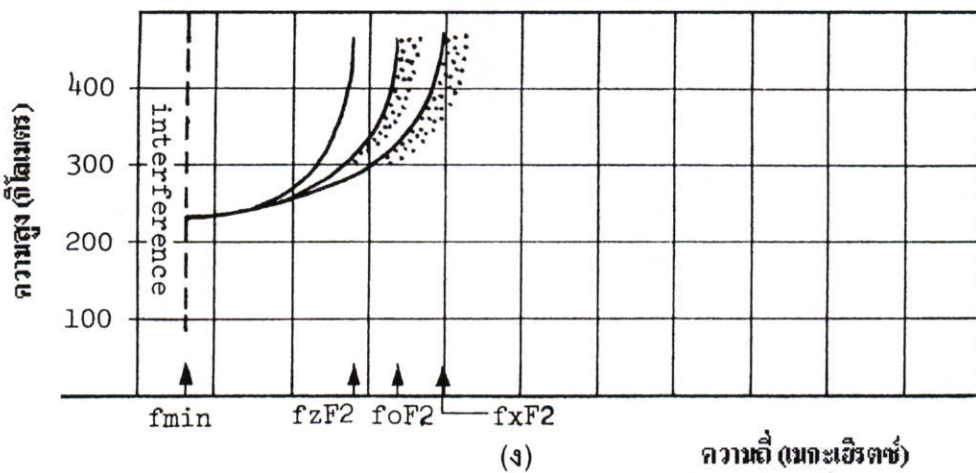
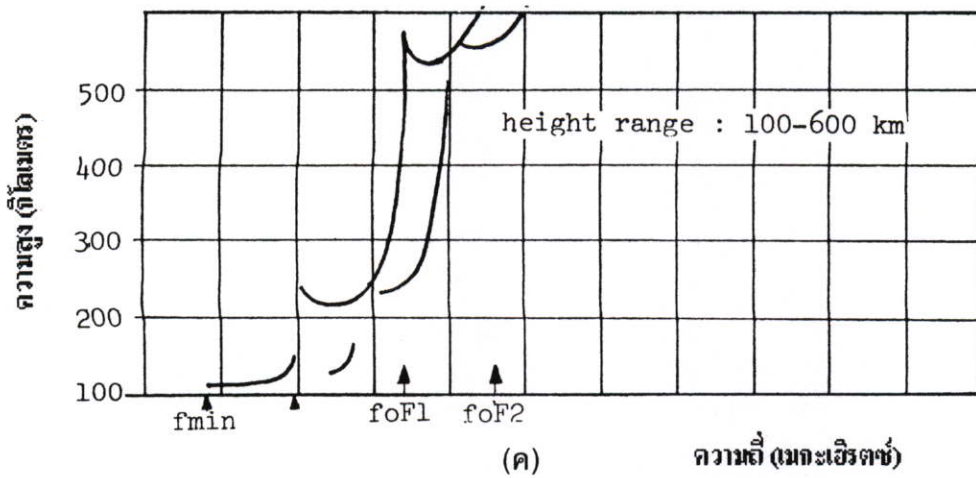
รูปที่ 3.16 (ต่อ)

รูปที่ 3.16 (ก) นี้ภาพไอโอโนแกรมจะทำให้อ่านค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดความคลาดเคลื่อนไปบ้าง เนื่องจากเกิดการลดทอนของสัญญาณที่กลับเข้ามาที่เครื่องรับจึงไม่สามารถเห็นได้หมดโดยค่าของความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในรูปนี้คือ 7.8 R เมกะเฮิรตซ์ ที่ได้สัญลักษณ์ R ไว้ด้วย คือ สัญญาณเกิดการลดทอน รูปถัดมาคือรูปที่ 3.16 (ข) ในรูปนี้ก็เช่นกันจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าความถี่วิกฤต ในรูปนี้เกิดจากการแทรกสอดของสัญญาณภายนอกที่เครื่องรับสามารถรับเข้ามาได้ด้วย ซึ่งเหตุการณ์ดังเช่นในภาพนี้จะเกิดขึ้นในเวลากลางคืน การพิจารณาค่าของความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ทำได้โดยดูจากค่าความถี่วิกฤตที่ต่ำที่สุดก่อนที่จะเกิดการแทรกสอดของสัญญาณ คือ 3.3 เมกะเฮิรตซ์จนถึงรอยที่เส้นโค้งนั้นจะหายไปคือ 4.1 เมกะเฮิรตซ์ ถ้าระยะห่างระหว่าง 2 ค่านี้ไม่เกิน 20% ของค่าความถี่ที่สูงที่สุดคือ 4.1 เมกะเฮิรตซ์ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อ่านได้คือ 3.3 DS เมกะเฮิรตซ์ (สัญลักษณ์ D คือเกิดความคลาดเคลื่อน และ สัญลักษณ์ S คือ เกิดการแทรกสอดของสัญญาณ) ถ้าค่าความต่างของ 2 ค่าความถี่ที่ได้กล่าวมานั้นเกิน 20% ของค่าความถี่ที่สูงที่สุดจะไม่สามารถอ่านค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ โดยจะใส่สัญลักษณ์ S ไว้เฉยๆคืออ่านค่าไม่ได้

เนื่องจากเกิดการแทรกสอดของสัญญาณ รูปที่ 3.16 (ค) ก็เกิดการแทรกสอดของสัญญาณทำให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่ชัดเจน สังเกตได้จากช่วงความถี่ 6.5 – 7.7 เมกะเฮิร์ตซ์ จะเกิดการแทรกสอด ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ของรูปนี้คือ 7.7 JS เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนในรูปถัดมาคือ รูปที่ 3.16 (ง) เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางคืนในรูปนี้ชั้น F ที่สังเกตได้จะมีรูปร่างเป็นง่าม (Fork) โดยที่ความถี่จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นความถี่สามัญ (Ordinary) และ ความถี่วิสามัญ (Extraordinary) ช่วงที่มีความถี่สูงกว่ามีความถี่เป็น 4.4 และ 5.1 เมกะเฮิร์ตซ์ตามลำดับ และช่วงที่มีความถี่ต่ำกว่ามีค่า 4.2 และ 4.8 เมกะเฮิร์ตซ์ คู่ที่มีความถี่สูงกว่าคือส่วนที่จะทำการอ่านค่าโดยจะใส่สัญลักษณ์ V เป็นตัวบอกว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์มีรูปร่างเป็นง่ามและเกิด 2 ช่วงความถี่ในไอโอโนแกรมโดยค่าความถี่วิกฤตในรูปนี้ก็คือ 4.4 V เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.17 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อคลื่นมีการสะท้อนที่ผิดไปจากปกติ

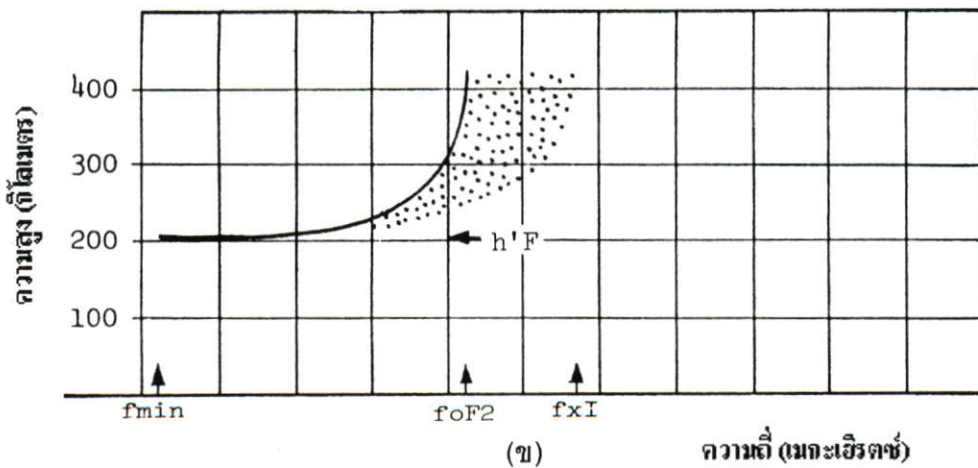
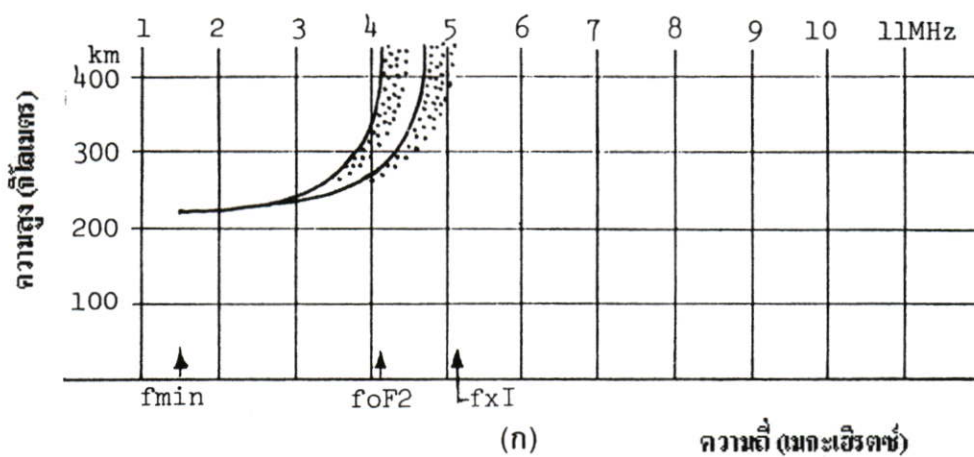


รูปที่ 3.17 (ต่อ)

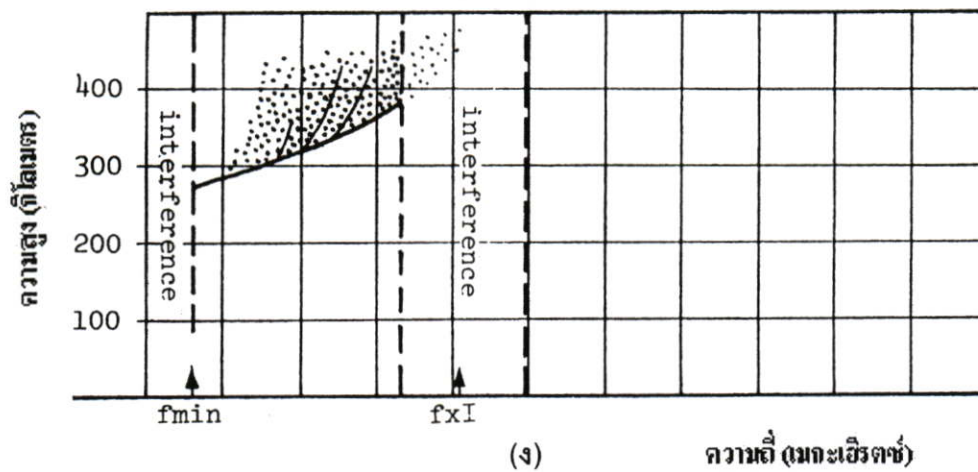
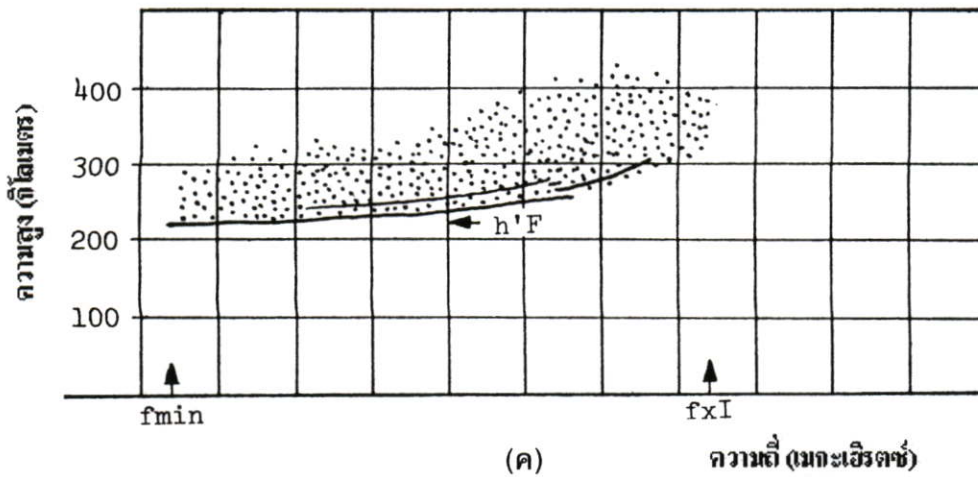
ภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.17 (ก) ความถี่วิกฤตในรูปนี้จะมีค่าสูงแต่รูปร่างของเส้นโค้งของไอโอโนแกรมจะมีความผิดปกติที่บริเวณความถี่ประมาณ 9 เมกะเฮิรตซ์ ถ้าความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการสะท้อนจากแนวเฉียง (Oblique) ไม่ได้เกิดการสะท้อนในแนวที่ตั้งฉากกับพื้นโลก ในบางเวลาอาจทำให้ค่าความถี่วิกฤตที่ทำการวัดแบบไอโอโนซอนด์เทคนิคนั้นหายไปหรืออาจจะพบได้แต่ค่านั้นจะไม่นำมาอ่านเป็นค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เวลานั้นเนื่องจากไม่ใช่ค่าที่เกิดจากการสะท้อนในแนวตรง แต่ในภาพไอโอโนแกรมนี้สามารถอ่านค่าความถี่วิกฤตได้คือ 9.0 EY เมกะเฮิรตซ์ ส่วนในรูปถัดมา รูปที่ 3.17 (ข) เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางวัน แต่ในรูปนี้จะมีความผิดปกติตรงที่ความถี่สามัญ กับ ความถี่วิสามัญ มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเกิดเหตุการณ์อย่างนี้เกิดขึ้นการอ่านค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในรูปนี้จะต้องนำค่าความต่างระหว่างความถี่วิสามัญกับความถี่สามัญ แล้วทำการหารด้วย 2 จากนั้นก็นำไปลบออกจากความถี่วิสามัญ จะได้เป็นค่าความถี่วิกฤตของภาพนี้

$$foF2 = (fxF2 - fB/2) = 9.1 \text{ เมกะเฮิรตซ์}$$

ภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.17 (ก) ก็เกิดเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นอีกเมื่อความสูงของชั้น F2 มีค่าความสูงจากพื้นดินถึง 540 กิโลเมตร แต่การอ่านค่าความถี่วิกฤตจากรูปนี้ไม่มีผลกระทบอะไรมากนักกับเหตุการณ์นี้ โดยค่าความถี่วิกฤตในรูปนี้จะมีค่า 5.6 U เมกะเฮิร์ตซ์ โดยที่สัญลักษณ์ U คือเครื่องหมายที่บอกว่าขอบเขตความสูงของชั้น F₂ นั้นมีค่ามากกว่าปกติ ในภาพ 3.17 (ก), (ข), (ค) ล้วนแต่เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางวันทั้งสิ้น ส่วนในรูปที่ 3.17 (ง) ภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางคืน ซึ่งในภาพนี้จะมีการเกิด สเปรดเอฟ เกิดขึ้น โดยในภาพนี้จะมีค่าความถี่เกิดขึ้นพร้อมกัน 3 ความถี่ ก็จะมีค่าความถี่แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ (Magneto-electronic) (z mode) เพิ่มเข้ามาซึ่งโดยปกติแล้วจะพบแค่ 2 ความถี่คือ ความถี่สามัญ และความถี่วิสามัญ โดยที่ความถี่แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ จากภาพไอโอโนแกรมนี้มีค่าความถี่ 3.8 เมกะเฮิร์ตซ์ และจะเกิด สเปรดเอฟ ในความถี่สามัญ และความถี่วิสามัญ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในรูปนี้คือ 4.4 ZF เมกะเฮิร์ตซ์ โดยจะสังเกตได้ว่าจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าความถี่วิสามัญ กับ ความถี่แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.18 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในการวัดค่าความถี่วิกฤตเมื่อมีการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ [13]



รูปที่ 3.18 (ต่อ)

ไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.18 (ก), (ข), (ค), (ง) ทั้งหมดนี้เป็นภาพไอโอโนแกรมที่มีการเกิดสเปรดเอฟ ทั้งหมดซึ่งเวลาในการเกิดนี้ก็เกิดขึ้นในเวลากลางคืนทั้งสิ้น ในรูปที่ 3.18 (ก) เป็นการเกิด สเปรดเอฟ ชนิดที่เรียกว่า F-type (โดยที่การเกิด สเปรดเอฟ มีการจำแนกการเกิดเป็น 2 ชนิด) ปรากฏการณ์นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อส่งคลื่นขึ้นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลาที่เกิดความแปรปรวนของอิเล็กตรอนภายในชั้น โดยที่คลื่นความถี่เดียวกันที่สะท้อนกลับมายังเครื่องรับ จะมีเวลาหน่วงที่แตกต่างกัน ซึ่งมีการสะท้อนกลับมาในหลายทิศทางและเกิดการซ้อนทับที่ความถี่เดียวกันทำให้เกิดเป็นชั้นความสูงที่แตกต่างกันซ้อนทับกัน ในภาพไอโอโนแกรม ในการพิจารณาค่าความถี่วิกฤตจากรูปนี้จะอ้างอิงตรงเส้นโค้งหลักภายใน ที่มีเส้นที่ปรากฏอย่างชัดเจน และอ่านค่านั้นเช่นในรูปนี้ค่าความถี่วิกฤตคือ 4.1 F เมกะเฮิรตซ์ สัญลักษณ์ F คือการบอกว่าเกิดสเปรดเอฟ ชนิด F-type ส่วนในรูปถัดมาคือ รูปที่ 3.18 (ข) ในรูปนี้มีการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ชนิด F-type เช่นกันแต่ช่วงที่เกิด สเปรดเอฟ ในแนวตั้งจะกว้างกว่ารูปแรก คือมีช่วงที่เกิดตั้งแต่ความถี่ประมาณ 5.2 ถึง 6.7 เมกะเฮิรตซ์ การอ่านค่าความถี่วิกฤตจากรูปนี้อ่านได้จากเส้นโค้งหลักภายในที่มีความชัดเจน ค่าที่ได้ อ่านได้คือ 5.2 F เมกะเฮิรตซ์ ส่วนรูปที่ 3.18 (ค) นั้นเป็น

การเกิด สเปคตรัมชนิด Q-type คือช่วงในการเกิด สเปคตรัม ในแนวนอนจะมีช่วงกว้างมากกว่า 30 กิโลเมตร และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นไปในแนวแกนความถี่อย่างช้าๆ โดยมีช่วงความถี่ที่เกิดตั้งแต่ความถี่ 1.4 ถึง 8.4 เมกะเฮิร์ตซ์ ในกรณีนี้จะไม่สามารถอ่านค่าความถี่วิกฤตได้โดยจะใช้สัญลักษณ์ Q ในรูปที่ 3.18 (ง) จะมีการเกิดการแทรกสอดของสัญญาณเข้ามาด้วยในช่วงความถี่ ต่ำกว่า 1.7 เมกะเฮิร์ตซ์และในช่วงความถี่ 4.3 เมกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป แต่ในกรณีนี้การเกิด สเปคตรัม จะเป็นชนิด F-type แต่ก็ไม่สามารถอ่านค่าความถี่วิกฤตจากกรณีนี้ได้เช่นกันโดยจะใช้สัญลักษณ์ F

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ และ ความถี่วิกฤต จากภาพไอโอโนแกรมแล้ว ข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Special scaling จะทำการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ .txt จากนั้นจะนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรายวัน รายเดือน รายปี และ ตามฤดูกาล ที่มีการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่มีความสัมพันธ์ในเรื่องสาเหตุของการเกิดกับการเกิดปรากฏการณ์ สเปคตรัม ซึ่งจะแสดงในบทต่อไปคือ บทที่ 4 ส่วนรายละเอียดในการคำนวณและการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะทำการอธิบายในบทที่ 5

บทที่ 4

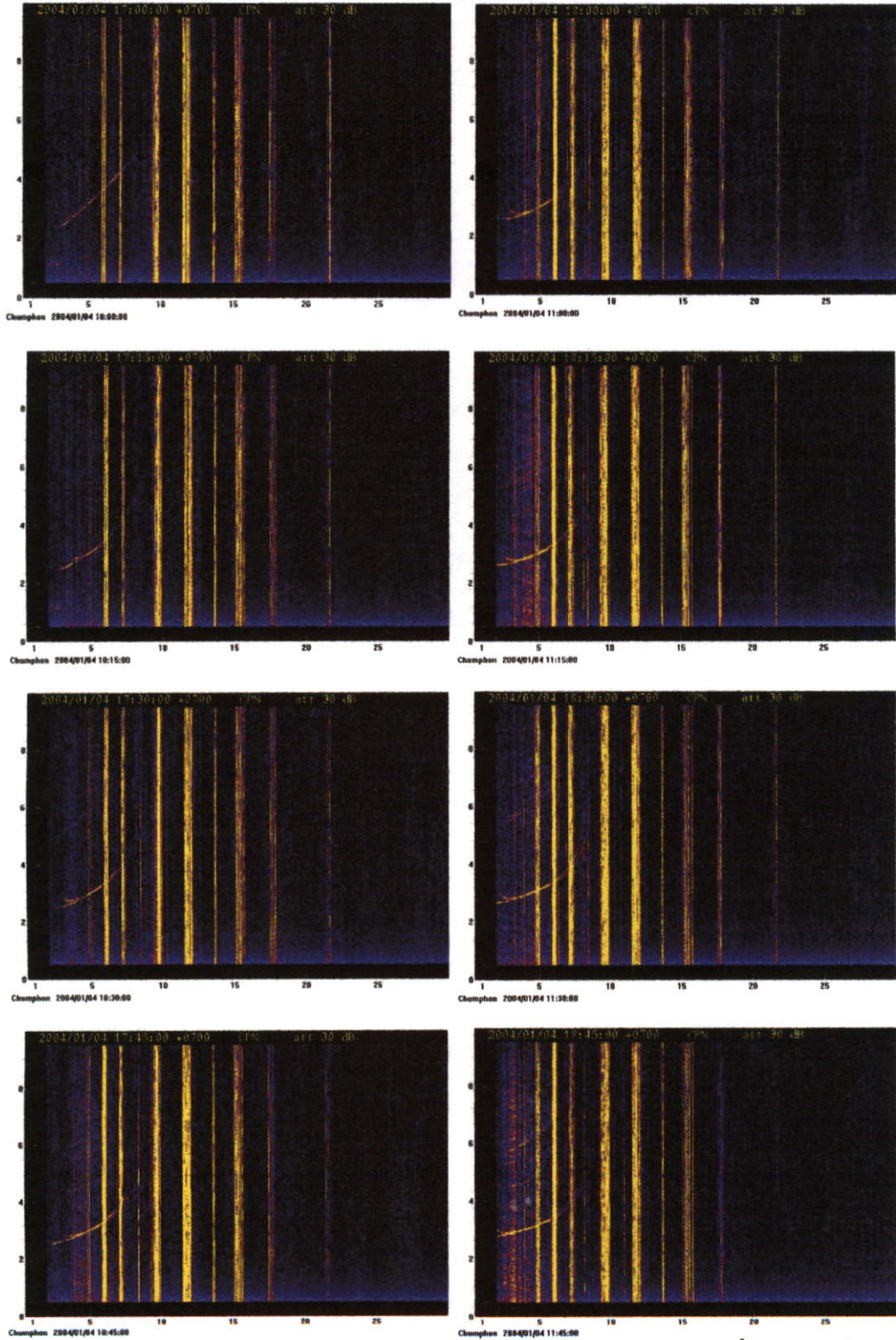
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสูงและความถี่วิกฤตของชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรมแล้ว โดยมีพารามิเตอร์ 2 ตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพจากไอโอโนแกรมคือ ค่าความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยที่ ทั้ง 2 พารามิเตอร์นี้มีความสำคัญ เนื่องจาก จะใช้ศึกษาเพื่อดูกลไกการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ และ ยังสามารถใช้สังเกตการเคลื่อนตัวของชั้นไอโอโนสเฟียร์ว่ามีการเคลื่อนตัวอย่างไร เนื่องจาก จะได้ทราบว่ากลุ่มความหนาแน่นที่ผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์มีลักษณะการเคลื่อนตัวอย่างไร และ ผลการทดลองที่ได้เก็บในทางสถิตินั้นยังมีประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาในเรื่องการทำนายค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศในเวลาต่าง ๆ ด้วยแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลหลาย ๆ ปี ในผลการทดลองนี้ จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F และค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีการแจกแจงเป็นแบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และเป็นแบบรายปี นอกจากนี้ยังได้แสดงเปอร์เซ็นต์การเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ในรายปีด้วย โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์นั้นเป็นข้อมูลในเดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2547

4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละช่วงเวลาในระหว่างวันและแบบรายเดือน

จากผลการวิจัยที่ได้เริ่มเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมทุกๆ 15 นาทีตลอด 24 ชั่วโมง โดยที่ใน 1 วันจะมีข้อมูลภาพทั้งหมด 96 ภาพ ตัวอย่างของภาพไอโอโนแกรมในวันที่ 4 มกราคม พ.ศ.2547 เวลา 17.00-18.45 น. แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยที่แกนตั้งของรูป คือ ความสูงมีหน่วยเป็นกิโลเมตร ส่วนแกนนอนเป็นแกนความถี่มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์ จากรูปจะให้ความสนใจไปที่เส้นโค้งสีเหลืองซึ่งคือข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยการสวิตความถี่ ส่วนแถบสีเหลืองที่ตั้งฉากกับรูปนั้นเป็นสัญญาณรบกวนจากความถี่ย่านที่มีการใช้งานจากระบบอื่นที่เครื่องรับสามารถรับได้ และ ทำการอ่านค่าความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากภาพไอโอโนแกรม (วิธีการอ่านค่าความสูงจากภาพไอโอโนแกรมได้กล่าวไว้ในบทที่ 3) จึงจะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์

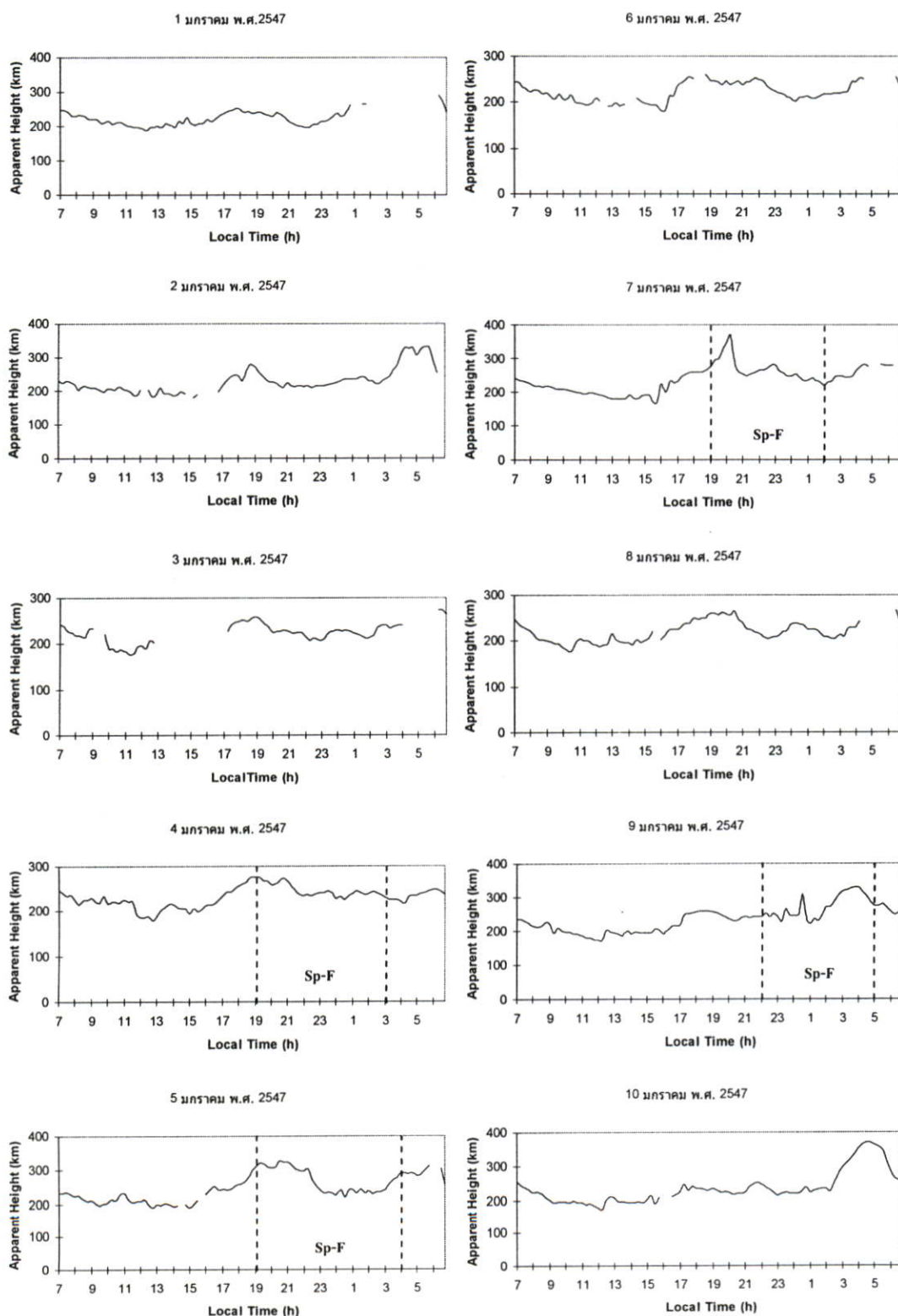
ความสูง (x100กิโลเมตร)



ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

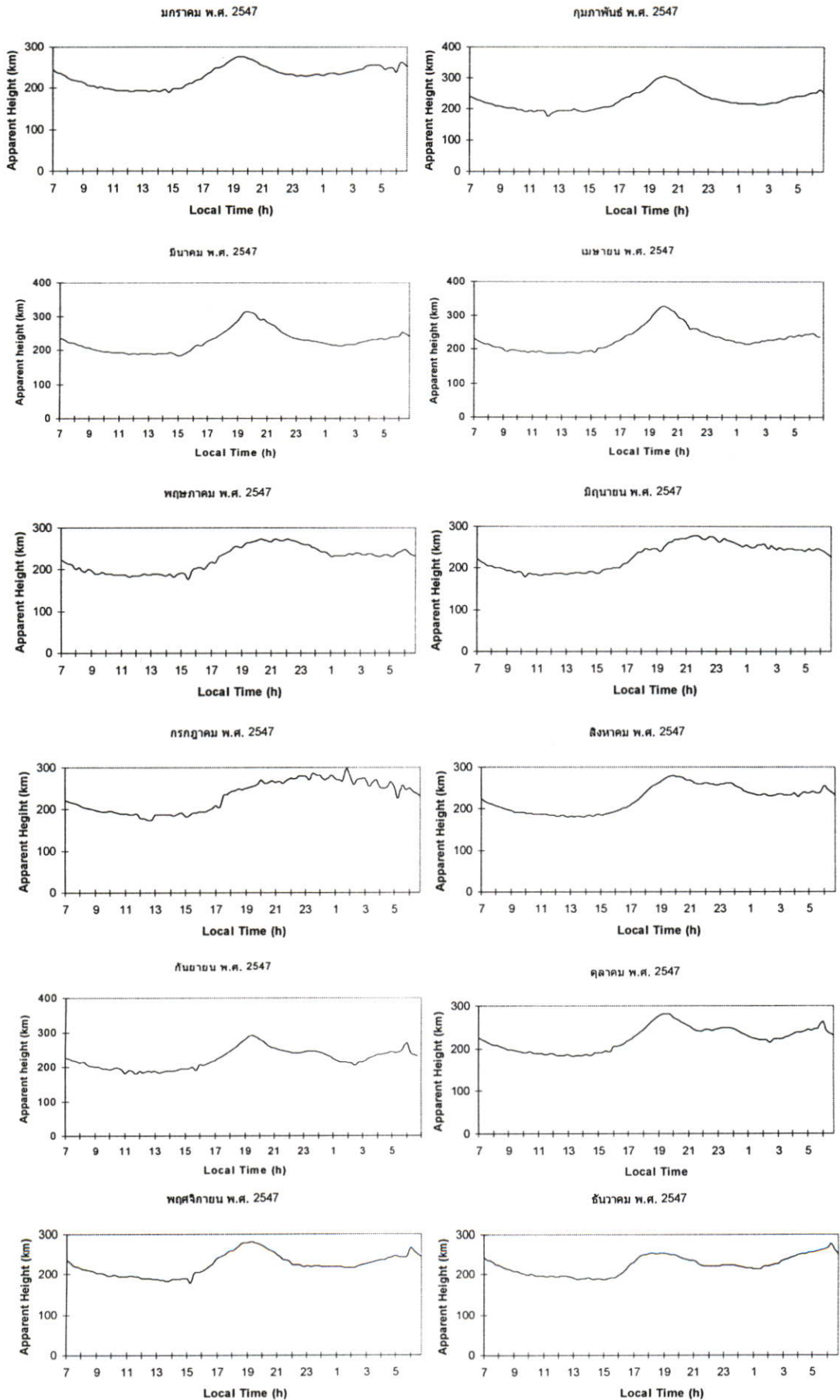
รูปที่ 4.1 ภาพไอโอโนแกรมที่ชุมพรทุกๆ 15 นาทีตั้งแต่เวลา 17.00-18.45 น. ในวันที่ 4 มกราคม พ.ศ.2547

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์จากภาพไอโอโนแกรมอย่างต่อเนื่องทุก ๆ 15 นาที จากสถานีตรวจวัดที่ หุมพร ในวันที่ 1-10 เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ได้ผลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความสูงของ F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2547

จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2547 ซึ่งแต่ละค่าที่พล็อตในแต่ละกราฟเกิดจากการวิเคราะห์ค่ามาจากไอโอโนแกรมโดยได้ข้อมูลมาพล็อตทุกๆ 15 นาที ข้อมูลที่นำมาแสดงการเปลี่ยนแปลงรายวันนี้เป็นส่วนหนึ่งเท่านั้นซึ่งในส่วนต่อไป จะแสดงการเปลี่ยนแปลงที่ผิดไปจากเดือนอื่นๆ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีส่วนที่ขาดหายไปของกราฟนั้น เกิดจากการที่ไอโอโนแกรมไม่สามารถบันทึกภาพได้จึงทำให้ข้อมูลมีการขาดหายไปบางส่วน ส่วนสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ได้นั้นก็เกิดจากการที่มีสัญญาณภายนอกของคลื่นในย่าน HF แทรกสอดเข้ามาซึ่งจะมีสัญญาณแรงแล้วบดบังช่วงของข้อมูลที่ต้องการอ่านค่าพารามิเตอร์นั้นจึงทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์นั้นได้ การเปลี่ยนแปลงความสูงชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นในเวลากลางวันจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยความสูงจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงคือมีความสูงมากขึ้น และ จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติเริ่มขึ้นในช่วงเวลาตอนเย็นหรือหลังจากที่ดวงอาทิตย์ตกดินตั้งแต่เวลา 17.00 น. เป็นต้นไปจนถึงเวลา 01.00 น. เนื่องจากกลไกทางฟิสิกส์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือ เมื่อไม่มีแสงอาทิตย์แล้วในชั้นจะเกิดการรวมตัวกลับ (Recombination) ของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้นที่มีการแตกตัว (ไอออไนซ์) ในตอนกลางวันเนื่องจากพลังงานจากแสงอาทิตย์ กลับมาเป็นกลุ่มก้อนทำให้ชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการรวมตัวเป็นชั้นเดียวและลอยสูงขึ้น และกลุ่มก้อนของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการรวมตัวกลับนี้เองจะทำให้เกิดกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [17] ซึ่งข้อมูลที่นำมาเสนอนั้นมีการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ในวันที่ 4, 5, 7, 9 ของเดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเกิดปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อ ชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการรวมตัวกันเป็นชั้นเดียวเนื่องจากการหยุดไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น ซึ่งในเวลากลางวันมีการแตกตัวเป็น 2 ชั้นเมื่อไม่มีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนในชั้นความสูงของชั้นบรรยากาศจะเลื่อนขึ้นไปจนสูงที่สุด และ จะมีการเลื่อนลง เกิดขึ้นหลังจากที่ดวงอาทิตย์ตกดิน

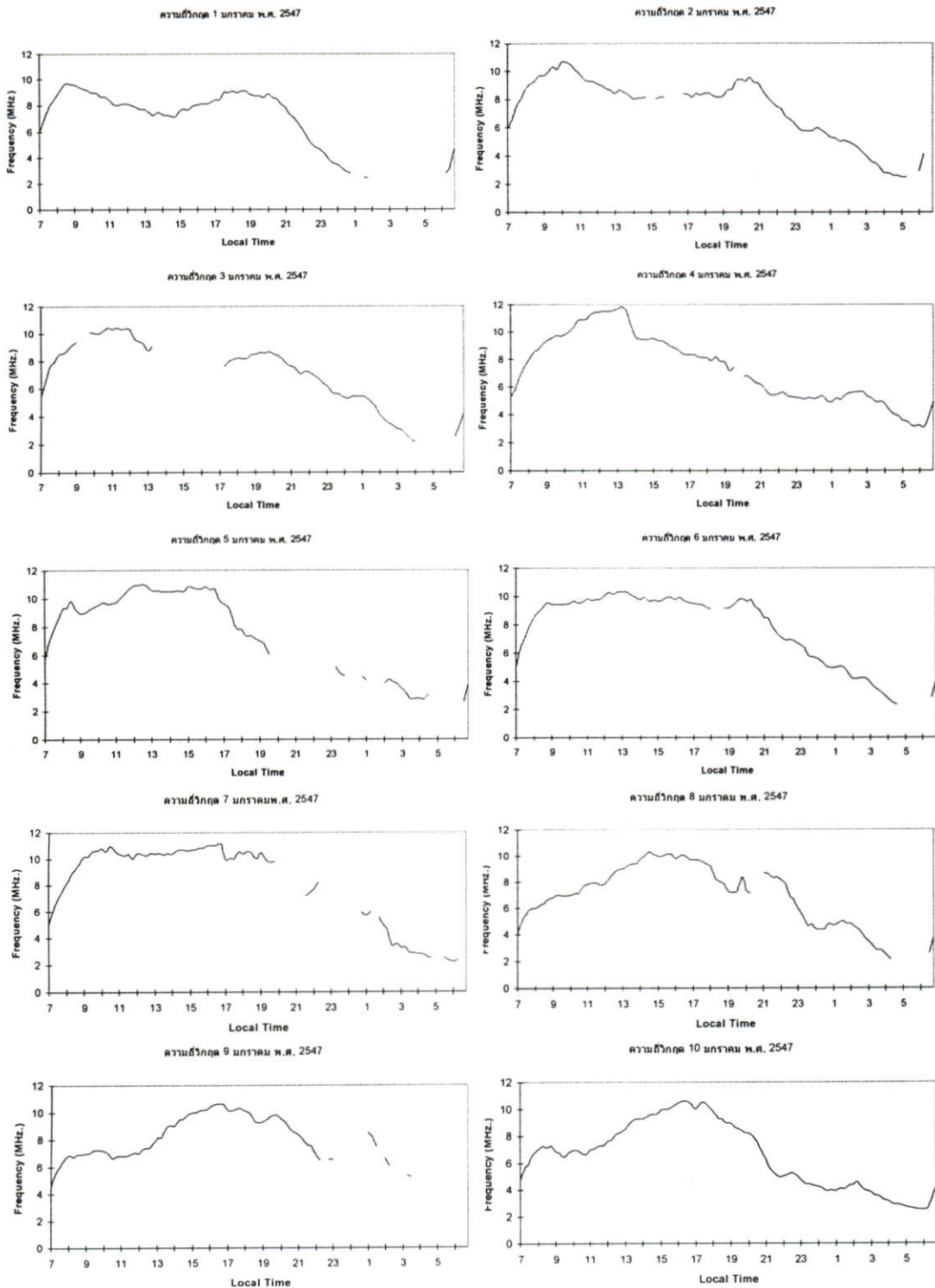


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน

การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในรูปที่ 4.3 เป็นการนำความสูงของชั้น F ในแต่ละวันมาทำการเฉลี่ยค่าเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงแบบรายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2547 พบว่าในช่วงเดือนมีนาคมและเดือนเมษายน และในช่วงเดือนกันยายนและเดือนตุลาคม ความสูงของชั้น F จะสูงกว่าในเดือนอื่นๆ ซึ่งในช่วงเดือนนี้เป็นช่วงเดือน equinox (เป็นช่วงที่เวลากลางวัน และ กลางคืนนั้นยาวนานเท่ากัน) ที่ชั้นบรรยากาศจะมีความแปรปรวนมากที่สุดจึงส่งผลกระทบต่อทำให้ความสูงของชั้น F มีการเลื่อนขึ้นไปสูงกว่าปกติ [18] และจากงานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันช่วงเดือนนี้จะเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในเวลากลางคืนมากที่สุดอีกด้วย โดยที่ความสูงจากพื้นดินที่สูงที่สุดของชั้น F ปรากฏที่เดือนเมษายนในเวลา 20.00 น. และมีค่าความสูง 326 กิโลเมตร ในเดือนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ช่วง equinox ความสูงที่สูงที่สุดของชั้น F จะมีค่าไม่เกิน 300 กิโลเมตร

4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในแต่ละช่วงเวลาในระหว่างวันและแบบรายเดือน

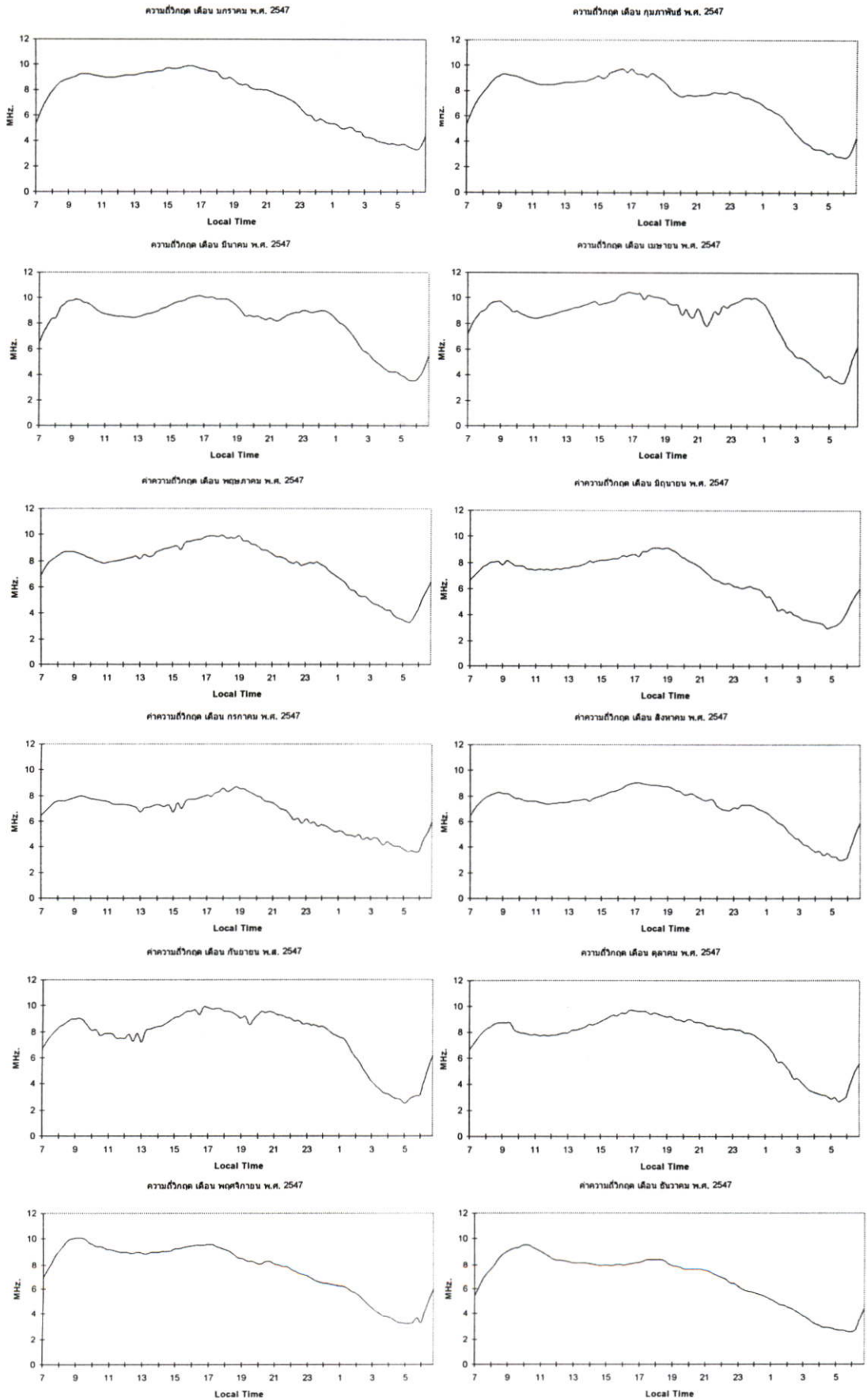
จากผลการทดลองที่ได้เริ่มเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมและวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างต่อเนื่องตลอดปี พ.ศ. 2547 ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม จากสถานีตรวจวัดที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ได้นำผลตัวอย่างในเดือนมกราคมมาแสดงเป็นแบบรายวันดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ค่าความถี่วิกฤตของ F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2547

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2547 ซึ่งแต่ละค่าที่พล็อตในแต่ละกราฟเกิดจากการวิเคราะห์ค่ามาจากไอโอโนแกรมโดยโปรแกรม Special scaling ข้อมูลจะทำการเก็บทุก ๆ 15 นาที ข้อมูลที่นำมาแสดงการเปลี่ยนแปลงรายวันนี้เป็นส่วนหนึ่งเท่านั้นซึ่งในส่วนต่อไป จะ

แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ผิดไปจากเดือนอื่นๆ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีส่วนที่ขาดหายไปของกราฟนั้น เกิดจากการที่ไอโอโนแกรมไม่สามารถบันทึกภาพได้จึงทำให้ข้อมูลมีการขาดหายไปบางส่วน ส่วนสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ได้นั้นก็เกิดจากการที่มีสัญญาณภายนอกของคลื่นในย่าน HF แทรกสอดเข้ามาซึ่งจะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าสัญญาณที่ต้องการ แล้วบดบังช่วงของข้อมูลที่ต้องการอ่านค่าพารามิเตอร์นั้นจึงทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์นั้นได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ในเวลากลางคืนก็จะไม่สามารถหาค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอสเฟียร์ ณ เวลานั้นได้



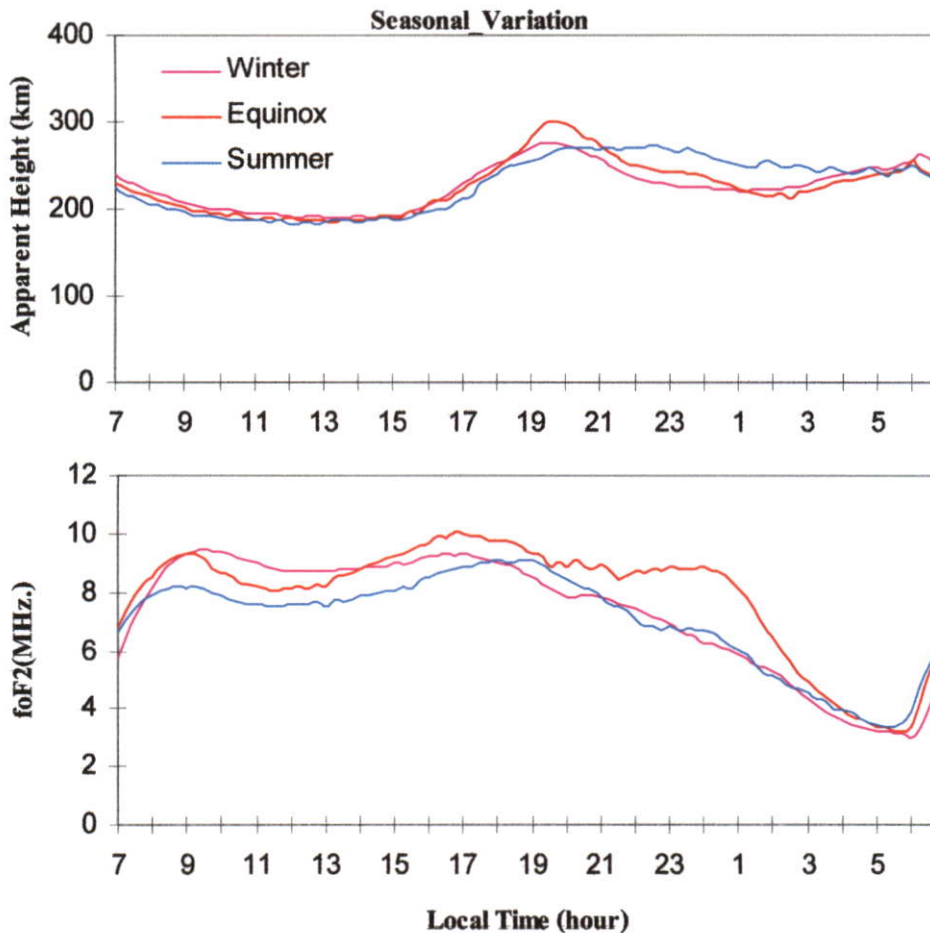
รูปที่ 4.5 ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตในแบบรายเดือน โดยที่กราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการเฉลี่ยค่าความถี่วิกฤต ณ เวลานั้นๆ ออกมาเป็นรายเดือน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเดือน โดยจะให้ความสนใจที่เดือน มีนาคม เดือน เมษายน เดือน กันยายน และเดือน ตุลาคม ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถี่วิกฤตในทุก ๆ เดือนจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่เวลา 06.00 น. คือช่วงที่พระอาทิตย์เริ่มขึ้นนั่นเอง และจะมีค่าลดลงในเวลา 19.00 น. แต่จะค่อยๆ ลดลงจนถึงเวลา 05.00 น. การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตในเดือน มีนาคม, เมษายน, กันยายน, และเดือนตุลาคม จะมีความผิดปกติมากกว่าเดือนอื่นซึ่งดูได้จากกราฟซึ่งจะมีความแปรปรวนมากในเวลาหลังจากพระอาทิตย์ตก ช่วงเวลาที่ค่าความถี่วิกฤตเกิดความแปรปรวนนี้จะเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับที่เกิดกับการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากกลไกทางฟิสิกส์ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.1

จากการสังเกตเวลาในการเกิดความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ กับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วพบว่าเกิดในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน และ เป็นช่วงเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากความแปรปรวนของความหนาแน่นอิเล็กตรอนภายในชั้น จึงทำให้ผู้วิจัยนำทั้ง 2 พารามิเตอร์ที่กล่าวมานี้มาศึกษาความสัมพันธ์กัน โดยได้มีการแบ่งช่วงเวลาในการศึกษาเป็นฤดูกาลซึ่งจะทำการอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสูง และ ความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล

จากการวิเคราะห์ผลการวิจัยพบว่าข้อมูลความสูง และความถี่วิกฤตของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแถบละติจูดต่ำ หรือบริเวณเส้นศูนย์สูตรเป็นเวลา 1 ปีนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดและต่ำที่สุดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นฤดูกาล (Seasonal Variation) จากงานวิจัยอื่นที่ได้ทำการศึกษา ได้มีการแบ่งช่วงการพิจารณาเป็น 3 ช่วงคือ Winter (ช่วงเดือน พฤศจิกายน, ธันวาคม, มกราคม, กุมภาพันธ์), Equinox (ช่วงเดือน มีนาคม, เมษายน และ เดือน กันยายน, ตุลาคม) และ Summer (ช่วงเดือน พฤษภาคม, มิถุนายน, กรกฎาคม, สิงหาคม) [1]



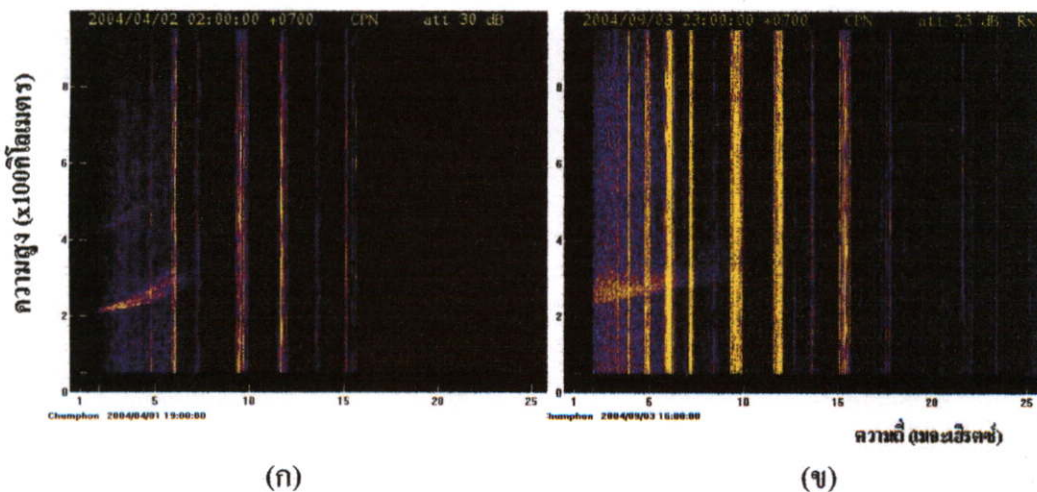
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของความสูงของชั้น F และ ความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ 3 ฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547

จากรูป 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F และความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยมีการพิจารณาเป็นการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ซึ่งความสูงของชั้น F ในเวลากลางวันจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ความสูงของชั้น F จะเริ่มมีการเลื่อนสูงขึ้น ในเวลาประมาณ 17.00 น. จนไปมีความสูงที่สูงที่สุดในเวลา 20.00 น. ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้จะมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันทั้ง 3 ฤดูกาลแต่ในช่วง Equinox ความสูงของชั้น F ในเวลา 20.00 น. จะมีความสูงกว่าในช่วง Summer และ Winter และ ในช่วงเวลา 20.00 น. นี้เอง ที่ความสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แปรปรวนไป เมื่อเทียบกับในเวลากลางวันซึ่งจะเห็นได้ชัดในช่วง Equinox ซึ่งช่วงเวลาที่ความสูงของชั้น F มีความแปรปรวนนี้เองจะเป็นช่วงเวลาที่มีการเกิดปรากฏการณ์ สเปคตรัม ซึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวน จะส่งผลกระทบต่อคลื่นย่าน HF ที่ทำการส่งขึ้นไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้ค่าความถี่วิกฤตที่วัดได้ในช่วงเวลานั้นเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัด เมื่อนำค่าความถี่วิกฤตมาพิจารณาเป็นฤดูกาล พบว่าค่าความถี่วิกฤตจะมีค่าสูงที่สุดในช่วง

Equinox เช่นเดียวกับค่าความสูงของชั้น F แต่ตามปกติแล้วค่าความถี่วิกฤตจะมีค่าลดลงหลังจากที่พระอาทิตย์ตกดินเนื่องจากไม่มีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนในชั้นแล้วจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ลดลงความถี่จึงมีค่าต่ำลง ดังจะเห็นได้จากกราฟในช่วง Summer และ Winter ที่ความถี่วิกฤตในช่วง Equinox มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 20.00 น. จะเกิดจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนที่มีความแปรปรวน ซึ่งในช่วง Equinox จะเป็นช่วงที่มีกลุ่มก้อนความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนมากกว่าในช่วงฤดูกาลอื่น [13]

4.4 การวิเคราะห์การเกิดสเปรดเอฟ

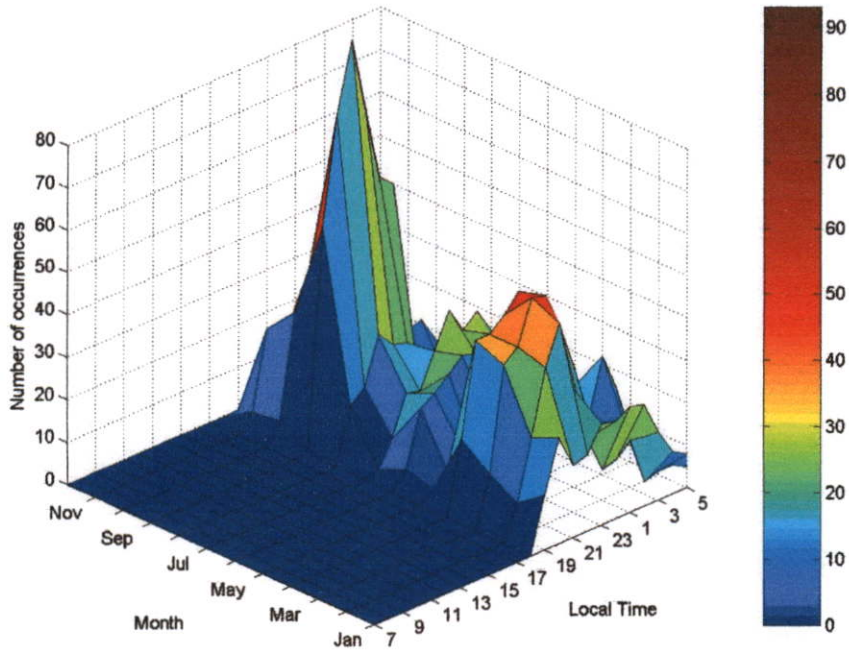
การศึกษาปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ นั้นเป็นหัวข้อใหญ่ในการศึกษาค้นคว้าเป็นเวลานาน โดยที่จะเกิดจากกลไกของชั้นบรรยากาศบริเวณแนวเส้นศูนย์สูตร โดยความแปรปรวนของ $E \times B$ drift (E คือ สนามไฟฟ้าของโลก และ B คือ สนามแม่เหล็กของโลก) และ ความแปรปรวนที่พื้นดินของ Rayleigh-Taylor จะทำให้เกิดกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศขึ้นในเวลาหลังจากพระอาทิตย์ตกดิน [17] เมื่อทำการวัดค่าความสูงของชั้น F และค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้ผู้วิจัยได้พบว่าการเกิดปรากฏการณ์ที่มารบกวนในการวัดทั้ง 2 ค่าพารามิเตอร์ นี้ในเวลากลางคืน และ หลังจากที่เกิดดวงอาทิตย์ตก และได้ทราบว่าสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ นั้นมาจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางคืน เช่นเดียวกับสาเหตุของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน [13] ในส่วนของการศึกษาวิจัยนี้ ได้สังเกตจำนวนการเกิดของปรากฏการณ์นี้โดยใช้ไอโอโนซอนเดเทคนิคตามเวลาในการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ในปี พ.ศ. 2547 ซึ่งจะสามารถสังเกตการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ได้จากภาพไอโอโนแกรมดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพไอโอโนแกรมเมื่อเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ

รูปที่ 4.7 เป็นภาพไอโอโนแกรมเมื่อเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ผู้สังเกตจะไม่สามารถทราบค่าความถี่วิกฤตจากภาพไอโอโนแกรมได้ โดยที่ในรูปที่ 4.7 (ก) เป็นการเกิด สเปรดเอฟ

ชนิด F-type ส่วนในรูปที่ 4.7 (ข) เป็น สเปคตรอฟ ชนิด Q-type จะสังเกตได้ว่าทั้ง สเปคตรอฟ ทั้งสองชนิดนี้จะมีความแตกต่างกันตรงที่ความหนาบริเวณ $h'F$ ซึ่ง สเปคตรอฟ ชนิด F-type จะไม่มีแถบหนาบริเวณ $h'F$ แต่ในชนิด Q-type จะมีแถบหนาบริเวณ $h'F$ และแถบหนานั้นจะมีความหนาเกิน 30 กิโลเมตร ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์นี้จะไม่ได้มีการเกิดขึ้นในทุก ๆ วัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการสังเกตช่วงเวลาในการปรากฏการณ์นี้เป็นระยะเวลา 1 ปี



รูปที่ 4.8 จำนวนการเกิดของปรากฏการณ์ สเปคตรอฟ ในปี พ.ศ. 2547

ในรูปที่ 4.8 แสดงจำนวนการเกิดปรากฏการณ์ สเปคตรอฟ ที่ทำการสังเกตจากไอโอโนแกรม โดยไอโอโนซอนด์เทคนิค ตลอดระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2547 จะเห็นได้ว่า เดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดปรากฏการณ์ สเปคตรอฟ ค่อนข้างมาก มี 2 ช่วง คือ ในช่วงเดือน มีนาคม ถึง เมษายน พ.ศ. 2547 และในช่วงเดือน กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2547 และช่วงเวลาในการเกิดปรากฏการณ์นี้มีช่วงเวลาอยู่ที่ 17.00 น. - 05.00 น. (เป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางคืน) ส่วนเดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดปรากฏการณ์ สเปคตรอฟ น้อยที่สุด คือ เดือน พฤษภาคม ถึง สิงหาคม พ.ศ. 2547 จะเห็นได้ว่า ช่วงที่มีการเกิดปรากฏการณ์ สเปคตรอฟ มากที่สุดนั้นตรงกับช่วง Equinox พอดี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F และค่าความถี่วิกฤตในช่วงนี้จะมีค่าสูงกว่าในเดือนอื่น ๆ อีกด้วยดังผลที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.3 และช่วงนี้เป็นช่วงที่มีการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในเวลากลางคืนมากที่สุด [12] ดังนั้นจำนวนการเกิดปรากฏการณ์ สเปคตรอฟ จึงมีความสัมพันธ์กับการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์[13]

บทที่ 5

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงความสูงและความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนภายในชั้น

ในบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการที่ได้มาซึ่งค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์และความสัมพันธ์กับค่าความถี่วิกฤตและความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทำให้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นประกอบด้วย ชั้นย่อย ๆ ที่มีการไอออไนซ์ เพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาชั้นบรรยากาศที่ประกอบด้วยอนุภาคจะสามารถศึกษาได้จากค่าปริมาณอิเล็กตรอนในแนวเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมกับเทอร์มินอลภาคพื้นดิน ในแต่ละชั้นย่อยตัวกลางที่เป็นไอออไนซ์นั้นจะไม่ใช่ทั้ง เอกพันธ์ (Homogenous) และ ไม่แปรผันตามเวลา (Stationary) หรือตัวกลางมีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่คงที่ กล่าวโดยทั่วไปแล้ว พื้นฐานของการไอออไนเซชันของอะตอมของออกซิเจนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้น มีกลไกสัมพันธ์กับช่วงเวลาต่างๆในระหว่างวัน ในแต่ละฤดูกาลและการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรสุริยะในรอบ 11 ปี นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดและการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามแม่เหล็กโลก และโครงสร้างของการไอออไนเซชันนี้มักจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่คงที่หรือที่เรียกว่า “Small-scale irregularities” ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคลื่นวิทยุ และ ส่งผลให้ตัวกลางการกระจายตามความถี่ (Dispersive) นั่นคือ ดัชนีหักเหกลายมาขึ้นต่อความถี่ ผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อคลื่นสัญญาณ เช่น การหักเห การกระจายตามความถี่ และการหน่วงเวลา ซึ่งที่กล่าวมานี้แปรโดยตรงกับค่า TEC และ ยังรวมถึงผลกระทบที่ เรียกว่า ฟาราเดย์โรเทชันซึ่งก็แปรตามค่า TEC เช่นกัน นอกจากนี้ค่า TEC ยังมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่สูงที่สุดในชั้น F (NmF2) ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ และ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (foF2) ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์นั้นไปหาค่าความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ด้วย (Slab thickness D) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวมานี้มีความสำคัญกับผลกระทบที่เกิดจากการสื่อสารดาวเทียม ดังนั้นความรู้และข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่า TEC จึงมีความสำคัญต่อการศึกษาผลกระทบต่อการสื่อสารที่เกิดเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้

5.1 แนวคิดและหลักการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอน (TEC) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้อาศัยความสัมพันธ์ของความแตกต่างของเวลาหน่วงของสัญญาณดาวเทียม GPS 2 ความถี่ คือ $L_1 = 1575.42$ เมกะเฮิรตซ์ และ $L_2 = 1227.60$ เมกะเฮิรตซ์ การรับความถี่ทั้งสองความถี่จากดาวเทียม GPS แสดงในรูปที่ 5.1 สัญญาณที่เดินทางมาถึงเครื่องรับของทั้งสองความถี่นั้นจะมีเวลาหน่วงไม่เท่ากันเนื่องจากความถี่ต่างกันจะได้รับผลจากค่าดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่างกันด้วย นอกจากนี้ยังทำให้ใช้ระยะทางและเวลาในการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มาถึงเครื่องรับเพิ่มขึ้นและมีเฟสเปลี่ยนไปด้วย โดยที่จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่นำเสนอ ดังนี้ เมื่อพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่ว่างด้วยความยาวคลื่น λ และความถี่ f ความเร็วเฟสสามารถเขียนได้เป็น

$$V_{ph} = \lambda f \quad (5.1)$$

สำหรับ GPS คลื่นพาห์ L_1 และ L_2 นั้นแพร่กระจายด้วยความเร็วเฟสที่ต่างกัน สำหรับกลุ่มของคลื่นมีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อย สามารถนิยามความเร็วกลุ่มได้ดังนี้ [20]

$$V_{gr} = -\frac{df}{d\lambda} \lambda^2 \quad (5.2)$$

ความเร็วกลุ่มได้ถูกนำมาใช้พิจารณาสำหรับการวัดรหัสของ GPS [20]

หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่มโดยหาอนุพันธ์ของสมการ (5.1) ด้วย $d/d\lambda$ จะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{dV_{ph}}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda} \quad (5.3)$$

แทนค่า $\frac{df}{d\lambda}$ ลงในสมการที่ (5.2) จะได้

$$V_{gr} = -\lambda \frac{dV_{ph}}{d\lambda} + f\lambda \quad (5.4)$$

โดยที่ $V_{ph} = \lambda f$ ดังนั้นจะได้

$$V_{gr} = V_{ph} - \lambda \frac{dV_{ph}}{d\lambda} \quad (5.5)$$

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นเป็นตัวกลางแบบที่มีการกระจายตามความถี่ (Dispersive medium) ซึ่งดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศนี้จะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับความถี่ โดยที่ความเร็วกลุ่ม (V_{gr}) จะมีค่าไม่เท่ากับความเร็วเฟส (V_{ph}) แตกต่างกับตัวกลางที่เป็นแบบไม่กระจายตามความถี่ (Non-dispersive) ค่าความเร็วเฟสจะมีค่าเท่ากับความเร็วกลุ่ม แต่จะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเห η และค่าความเร็วของแสง C ตามความสัมพันธ์นี้ $V = \frac{C}{\eta}$ จากสมการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการหาความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่มซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีหักเห η_{ph} และ η_{gr} ได้ดังนี้

$$V_{ph} = \frac{c}{\eta_{ph}} \quad (5.6)$$

$$V_{gr} = \frac{c}{\eta_{gr}} \quad (5.7)$$

หาอนุพันธ์ของความเร็วเฟสในสมการ (5.6) ด้วย $\frac{d}{d\lambda}$ จะได้

$$\frac{dV_{ph}}{d\lambda} = -\frac{C}{\eta_{ph}^2} \frac{d\eta_{ph}}{d\lambda} \quad (5.8)$$

แทนค่าสมการ (5.6)-(5.8) ลงในสมการ (5.5) จะได้

$$\frac{C}{\eta_{gr}} = \frac{C}{\eta_{ph}} + \lambda \frac{C}{\eta_{ph}^2} \frac{d\eta_{ph}}{d\lambda} \quad (5.9)$$

หรือ

$$\frac{1}{\eta_{gr}} = \frac{1}{\eta_{ph}} \left[1 + \lambda \frac{1}{\eta_{ph}} \frac{d\eta_{ph}}{d\lambda} \right] \quad (5.10)$$

กลับเศษส่วนแล้วทำการประมาณค่า $(1 + \varepsilon)^{-1} = 1 - \varepsilon$ [20] จะได้เป็น

$$\eta_{gr} = \eta_{ph} \left[1 - \lambda \frac{1}{\eta_{ph}} \frac{d\eta_{ph}}{d\lambda} \right] \quad (5.11)$$

หรือ

$$\eta_{gr} = \eta_{ph} - \lambda \frac{d\eta_{ph}}{d\lambda} \quad (5.12)$$

สมการ (5.12) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของสมการ Rayleigh สามารถจัดรูปสมการนี้ใหม่โดยอาศัยผลของการหาอนุพันธ์ของสมการ $C = \lambda f$ จะได้ความสัมพันธ์ของ λ และ f ดังนี้

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = -\frac{df}{f} \quad (5.13)$$

แทนค่าลงในสมการ (5.12) จะได้

$$\eta_{gr} = \eta_{ph} + f \frac{d\eta_{ph}}{df} \quad (5.14)$$

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วยชั้นย่อยหลายชั้นด้วยกัน โดยวางตัวที่ระดับความสูงตั้งแต่ 50 กิโลเมตรขึ้นไป จนถึงที่ความสูงเหนือพื้นโลกประมาณ 1,000 กิโลเมตร ที่ได้กล่าวมาแล้วว่าชั้นบรรยากาศนี้เป็นตัวกลางแบบกระจายตามความถี่ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของสัญญาณ GPS และสอดคล้องกับค่าดัชนีหักเหของเฟส สมการที่ได้เป็นการประมาณออกมาได้ดังนี้

$$\eta_{ph} = 1 + \frac{C_2}{f^2} + \frac{C_3}{f^3} + \frac{C_4}{f^4} + \dots \quad (5.15)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ C_2, C_3, C_4, \dots ไม่ได้ขึ้นกับความถี่แต่สัมพันธ์กับปริมาณ N (ความหนาแน่นอิเล็กตรอน) ตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นสามารถหาค่าประมาณของค่าดัชนีหักเหของเฟสได้โดยการตัดส่วนขยายของอนุกรมที่อยู่หลังจากเทอมยกกำลังสองจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ph} = 1 + \frac{C_2}{f^2} \quad (5.16)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการจะได้เป็น

$$d\eta_{ph} = -\frac{2C_2}{f^3} df \quad (5.17)$$

แทนสมการ (5.16) และ (5.17) ลงในสมการ (5.14) จะได้

$$\eta_{gr} = 1 + \frac{C_2}{f^2} - f \frac{2C_2}{f^3} \quad (5.18)$$

หรือ

$$\eta_{gr} = 1 - \frac{C_2}{f^2} \quad (5.19)$$

สามารถสังเกตได้ว่าในสมการ (5.16) และ (5.17) เป็นค่าดัชนีการหักเหเฟสและกลุ่มที่มีรูปเดียวกันแตกต่างกันเฉพาะเครื่องหมาย เมื่อแทนค่าประมาณ $C_2 = -40.3 \text{ N [20]}$ จะได้ค่าดัชนีการหักเหเฟสและกลุ่มดังนี้

$$\eta_{ph} = 1 - \frac{40.3N}{f^2} \quad (5.20)$$

และ

$$\eta_{gr} = 1 + \frac{40.3N}{f^2} \quad (5.21)$$

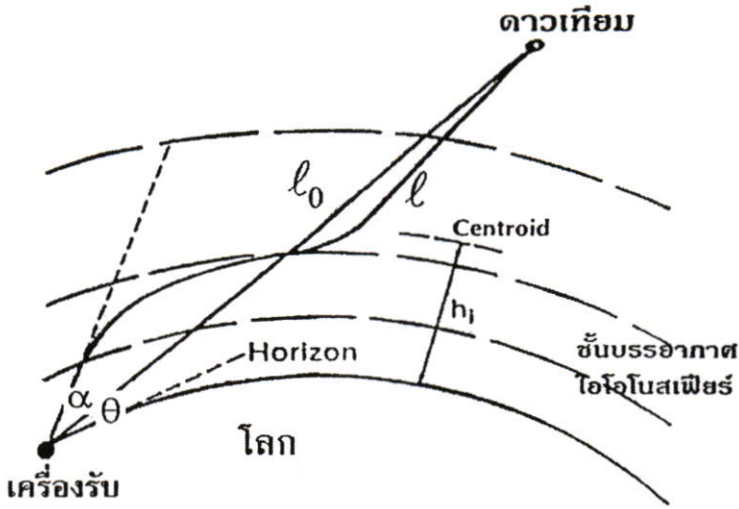
ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ $\eta_{gr} > \eta_{ph}$ และ $V_{gr} < V_{ph}$ ทั้งนี้เพราะว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน N จะมีค่าเป็นบวกเสมอ เนื่องจากลักษณะเหล่านี้มีความเร็วไม่เท่ากันจึงทำให้เกิด Group delay และ เฟสก้าวหน้า (Phase advance) ขึ้น นอกจากนี้ผลการวัดรหัส จาก GPS จะเกิดการหน่วง (Delay) และ เฟสของคลื่นพาห้ของสัญญาณ GPS จะเป็นแบบก้าวหน้า (Phase advance) ดังนั้นทำให้ระยะทางเทียม (Code pseudorange) ที่วัดได้ยาวเกินไป ในขณะที่เฟสของคลื่นพาห้ที่วัดได้ก็สั้นเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับระยะจริงทางภูมิศาสตร์ระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ จากหลักการของ Format สามารถนิยามระยะทางที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับได้ดังนี้

$$l = \int \eta dl_0 \quad (5.22)$$

เมื่อขอบเขตของการอินทิเกรต คือเส้นทางการเดินทางของสัญญาณ และระยะทางตรง l_0 ระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสามารถหาได้ในลักษณะเดียวกันกับสมการ (5.22) แต่กำหนดให้ดัชนีหักเหของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 คือ $\eta = 1$ จะได้สมการ

$$l_0 = \int dl_0 \quad (5.23)$$

เมื่อค่าดัชนีหักเหเป็น 1 คลื่นสัญญาณจะไม่เกิดการหักเหทำให้สัญญาณเดินทางจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับได้ระยะทางตรง ระยะทางตรงและระยะทางที่คลื่นเดินทางแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระยะทางจริงที่คลื่นเดินทางและระยะทางตรงจากแนวดาวเทียมถึงเครื่องรับ

ค่าผลต่างของระยะทางที่วัดได้กับระยะทางตรง เรียกว่า การหักเหเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric refraction) [20] แทนด้วย ΔL ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\Delta L = \int \eta dl_0 - \int dl_0 \quad (5.24)$$

เมื่อเขียนอยู่ในรูปค่าดัชนีการหักเหเฟส η_{ph} จากสมการ (5.16)

$$\Delta L_{ph} = \int \left(1 + \frac{C_2}{f^2} \right) dl_0 - \int dl_0 \quad (5.25)$$

และเมื่อเขียนให้อยู่ในรูปค่าดัชนีหักเหกลุ่ม η_{gr} จากสมการ (5.19) จะได้

$$\Delta L_{gr} = \int \left(1 - \frac{C_2}{f^2} \right) dl_0 - \int dl_0 \quad (5.26)$$

จัดรูปสมการของ สมการ (5.25) และ (5.26) ได้ใหม่เป็น

$$\Delta L_{ph} = \int \frac{C_2}{f^2} dl_0 \quad (5.27)$$

และ

$$\Delta L_{gr} = - \int \frac{C_2}{f^2} dl_0 \quad (5.28)$$

แทนค่า $C2 = -40.3N$ ลงในสมการ (5.27) และ (5.28) จะได้

$$\Delta L_{ph} = \frac{-40.3}{f^2} \int Ndl_0 \quad (5.29)$$

และ

$$\Delta L_{gr} = \frac{40.3}{f^2} \int Ndl_0 \quad (5.30)$$

โดยที่ค่า $\int Ndl_0$ มีนิยามเป็นค่า TEC คือ

$$TEC = \int Ndl_0 \quad (5.31)$$

เมื่อแทน TEC ลงในสมการ (5.29) และ (5.30) จะได้ระยะทางที่เพิ่มขึ้นดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta L_{ph} = \frac{-40.3}{f^2} TEC \quad (5.32)$$

และ

$$\Delta L_{gr} = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (5.33)$$

ค่า TEC ที่นิยามในสมการ (5.31) คือ Total Electron Content ตามเส้นทางที่คลื่นสัญญาณเดินทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ กล่าวคือ ในทอมการอินทิเกรตนี้หมายถึงการวัดปริมาณอิเล็กตรอนในพื้นที่หน้าตัดตรงกระบอก 1 ตารางเมตรตลอดเส้นทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ

5.1.1 การคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนโดยใช้ความแตกต่างของเวลาหน่วงของสัญญาณดาวเทียม

จากแนวคิดที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ทำให้ทราบถึงการหักเหของคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทำให้ระยะทางที่ใช้ในการเดินทาง มีค่ามากกว่าระยะทางตรงจริงๆจากดาวเทียมไปจนถึงเครื่องรับ และดาวเทียม GPS ได้มีการส่งสัญญาณโดยใช้สัญญาณ L แบนด์ 2 ความถี่ เวลาที่สัญญาณเดินทางมายังเครื่องรับจะใช้เวลาไม่เท่ากันเนื่องจากค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน โดยมีการแปรผกผันกับความถี่ดังสมการ (5.16) และ (5.19) นำสมการที่ (5.33) มาอาศัยความสัมพันธ์ของระยะทางและความเร็ว เมื่อระยะทางที่คลาดเคลื่อนไป (ΔL)หารด้วยความเร็วแสง (C) และค่าเวลาหน่วงคือ (T_p) จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{\Delta L}{C} = T_d = \frac{40.3}{Cf^2} TEC \quad (5.34)$$

$$T_d = \frac{1.345 \times TEC \times 10^{-7}}{f^2} \quad (5.35)$$

จากความแตกต่างระหว่างเวลาหน่วงของสัญญาณ L_1 และ L_2 จากดาวเทียม GPS ที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เราสามารถนำความสัมพันธ์นี้มาใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาค่าปริมาณ TEC ในชั้นบรรยากาศ [19] ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta T_d = T_{d(f_1)} - T_{d(f_2)} \quad (5.36)$$

แทนค่า T_d จากสมการ (5.35) จะได้

$$\Delta T_d = 134 \times TEC \left[\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right] \quad (5.37)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้ค่าปริมาณอิเล็กตรอน Total Electron Content (TEC) ดังสมการ

$$TEC = \frac{\Delta T_d}{134} \left[\frac{(f_1 f_2)^2}{f_1^2 - f_2^2} \right] \quad (5.38)$$

เนื่องจากการคำนวณหาค่า TEC นั้นสามารถหาได้หลายวิธี อัลกอริทึมที่ใช้ในการทดลองจริง ๆ ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าระยะทางเทียม (Pseudorange) ที่แตกต่างกัน (P_1, P_2) ระหว่าง 2 ความถี่ และ ค่าเฟสของสัญญาณที่แตกต่างกัน (L_1, L_2) โดยที่ ค่า k คือ ค่าคงที่การหักเห (Refraction) ของชั้นไอโอโนสเฟียร์มีค่าเท่ากับ $80.62 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$ [21] และ เก็บผลในรูปแบบของ RINEX และจะนำค่าได้จากทำการวัดนั้นมาใช้โปรแกรมในการคำนวณค่า TEC ตามสมการดังนี้ จะแสดงดังสมการที่ (5.40)

$$TEC_{sl} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (P_2 - P_1) \quad (5.39)$$

$$TEC_{sl} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \quad \text{el/m}^2 \quad (5.40)$$

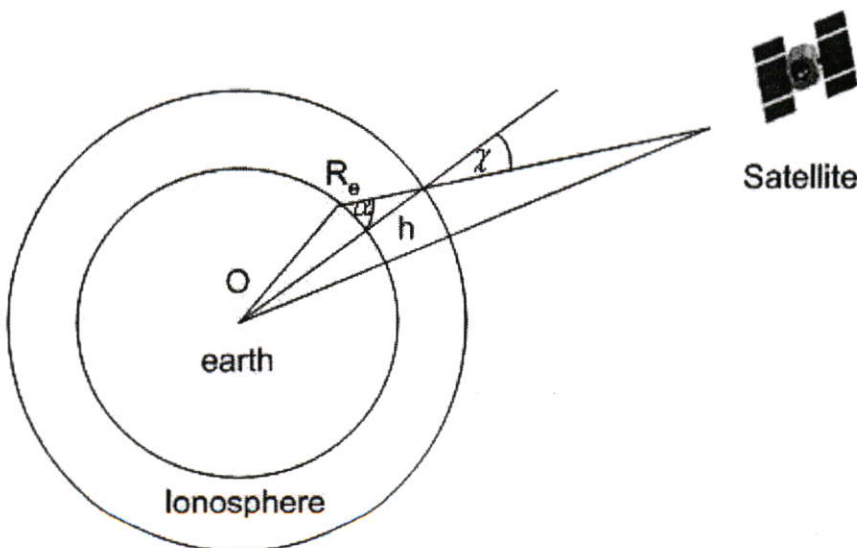
โดยปกติแล้วปริมาณ TEC จะถูกวัดในหน่วยของ 10^{16} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร (e/m^2) หรือเรียกอีกอย่างว่า TEC Unit (TECU) และในแบบจำลองที่นักวิจัยต่าง ๆ ได้ทำการศึกษาจะเป็นการใช้ปริมาณอิเล็กตรอนในแนวตั้ง หรือปริมาณอิเล็กตรอนที่วัดจากเส้นทางดาวเทียมอยู่ที่ตำแหน่งมุมเซไนทเป็นศูนย์หรืออยู่ในแนวเดียวกันกับดาวเทียม เนื่องจากในการวัดค่าปริมาณอิเล็กตรอนนั้น ข้อมูลที่วัดได้จะอยู่ในแนวเอียง (Slant TEC) หรือเส้นทางที่คลื่นเดินทางจริงระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียมจึงต้องทำการแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ให้อยู่ในแนวตั้ง (Vertical TEC) เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันกับแบบจำลองอื่นๆ

ในการแปลงค่า TEC ในแนวเอียง (Slant) ให้อยู่ในแนวตั้งทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$TEC_V = TEC_{sl} \times \cos \chi \quad (5.41)$$

$$\chi = \arcsin \left(\frac{R_e \cos \alpha}{R_e + h} \right) \quad (5.42)$$

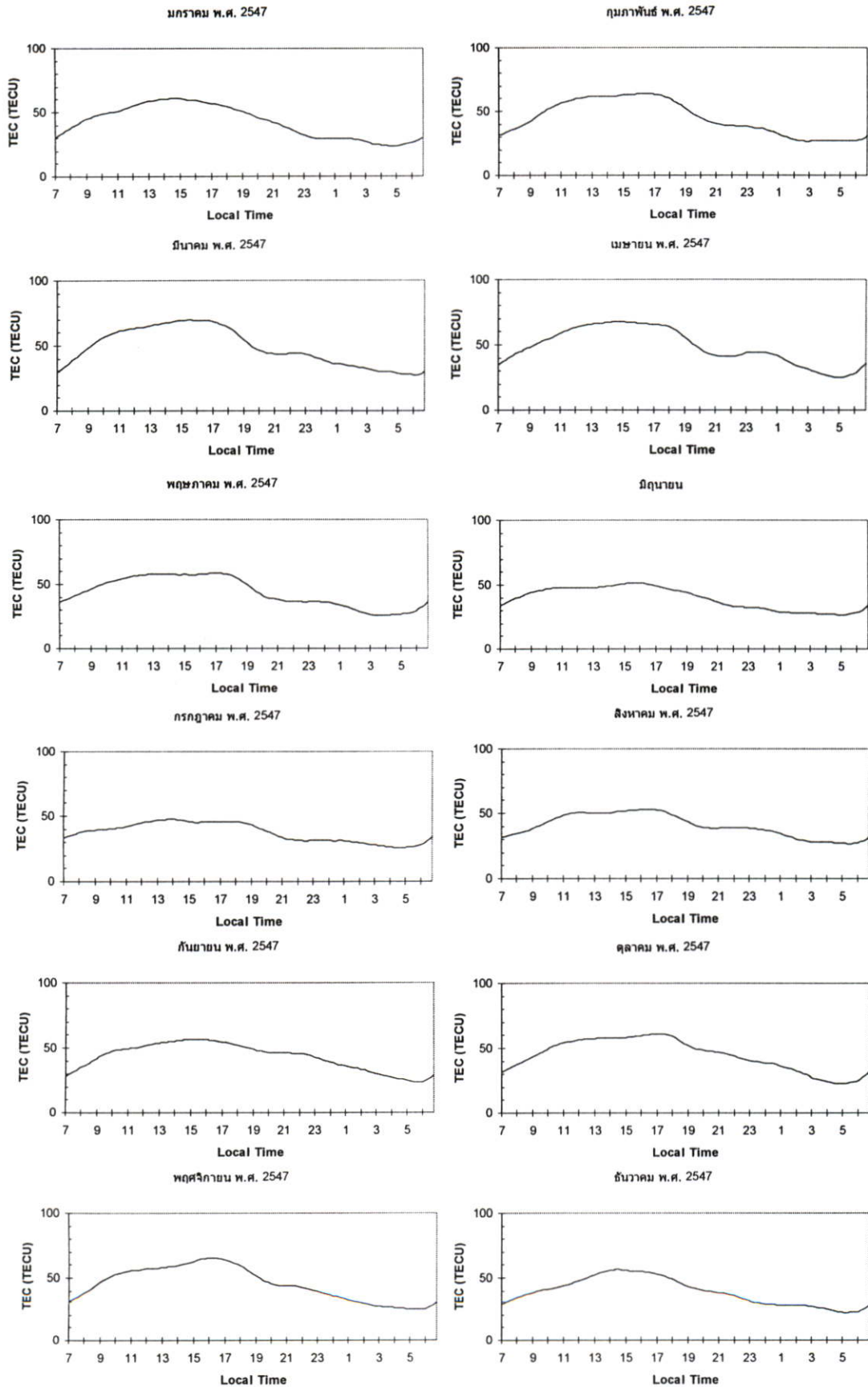
โดยได้แสดงรูปความสัมพันธ์ของมุมเซไนท (α), มุมเซไนทที่จุดเริ่มของชั้นไอโอโนสเฟียร์ IP (χ) ความสูงจากพื้นโลกของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (h) ที่ได้จากการประมาณมีค่า 400 กิโลเมตร และ R_e คือรัศมีของโลก (มีค่าประมาณ 6,378.137 กิโลเมตร) ขณะที่ค่า $\cos \chi$ เรียกอีกอย่างว่า Slant Factor (SF) [22]



รูปที่ 5.2 ลักษณะของมุมเซไนท มุมเซไนทที่ตำแหน่งของเครื่องรับ และมุมเซไนทที่จุด IP

5.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละช่วงเวลา

ในส่วนนี้จะทำการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณค่า TEC ซึ่งค่า TEC ที่นำมาแสดงผลนั้นได้ทำการแปลงเป็นค่า TEC ในแนวดิ่ง เป็นข้อมูลในปี พ.ศ. 2547 จากสถานีตรวจวัดที่ชุมพร ได้ผลแสดงผลของค่าเฉลี่ยของค่า TEC ที่ทำการวัดเป็นรายเดือน



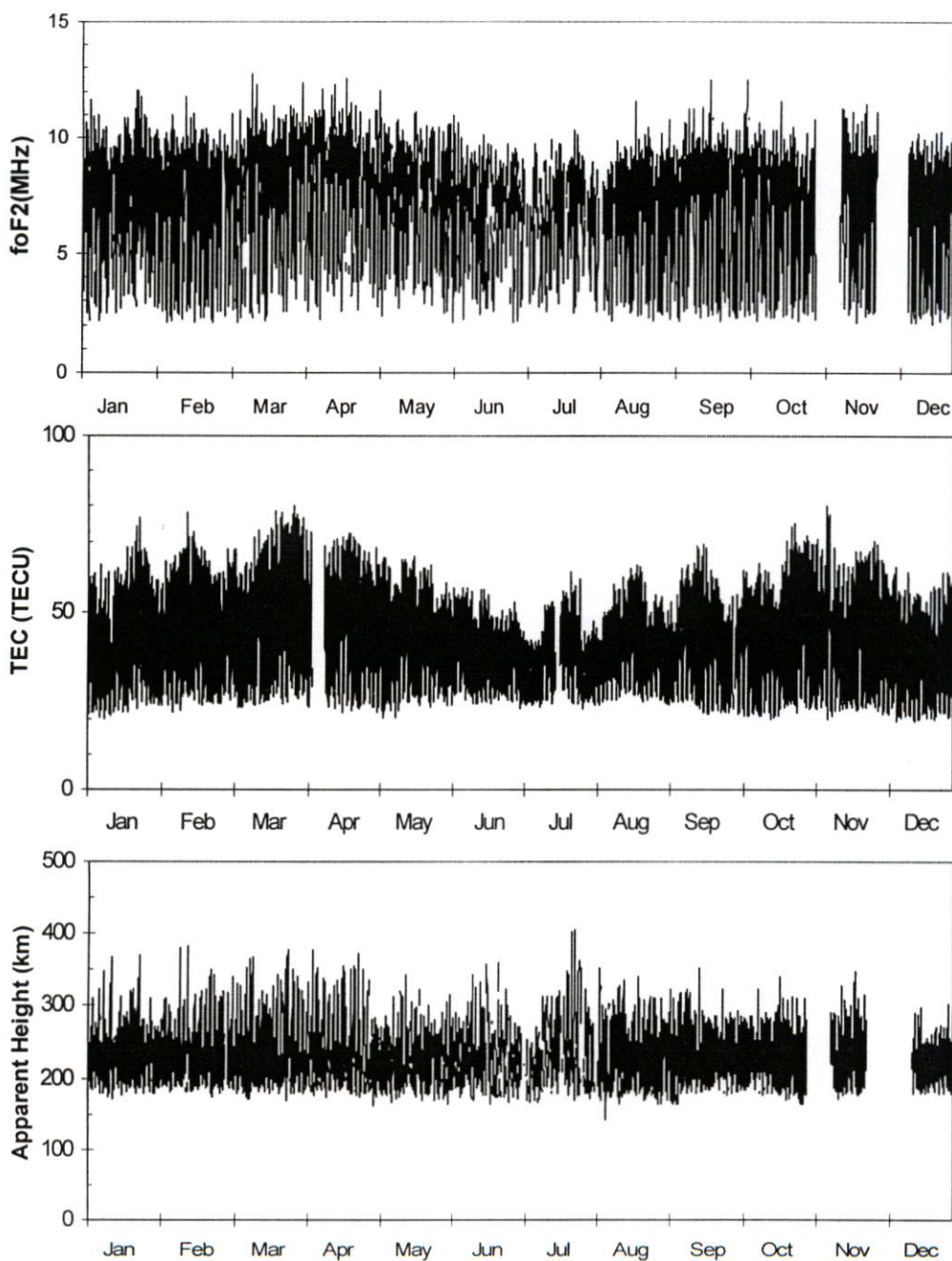
รูปที่ 5.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่ทำการทดลองที่สถานีตรวจวัดที่
ชุมพรในปี พ.ศ. 2547

จากรูปที่ 5.3 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GPS 2 ความถี่ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 5.11 ซึ่งแต่ละค่าที่พล็อตในแต่ละกราฟเกิดจากการหาค่าเฉลี่ยของค่า TEC ทุกวัน ณ เวลาเดียวกันเป็นรายเดือน เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา ซึ่งพบว่า การเปลี่ยนแปลงในระหว่างวัน ค่าปริมาณอิเล็กตรอน จะมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 04.00-05.00 น. และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในเวลา 06.00 น. เมื่อเริ่มมีแสงอาทิตย์ที่เป็นพลังงานให้อิเล็กตรอนในชั้นรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ได้แก่ ความเข้มจากรังสี EUV และ X-ray จนเกิดการไอออไนซ์ ของออกซิเจน และ ไนโตรเจน ตามกลไกทางฟิสิกส์ของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ในสมการ (2.1) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนจะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 16.00 น. ที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลานี้แทนที่จะมีค่าสูงสุดเมื่อเวลา 12.00 น. นั้นสามารถอธิบายสาเหตุได้ว่ามาจากความผิดปกติในบริเวณเส้นศูนย์สูตร (Equatorial anomaly) และในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่สูงที่สุด ในเดือนมีนาคม โดยมีค่าอยู่ที่ 69.3 TECU ซึ่งในเดือนนี้ก็เป็นช่วง Equinox คือในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นมากที่สุด จนเป็นผลให้เกิดผลกระทบต่อ การสื่อสารดาวเทียม แต่ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นไม่ได้เกิดในเวลาที่มีค่าปริมาณอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุดแต่จะเกิดในช่วงหลังดวงอาทิตย์ตกดินและไม่มีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนแต่เกิดการรวมตัวกลับภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กจะมีการไอออไนซ์สูงในช่วงเวลาหลังจากดวงอาทิตย์ขึ้น ซึ่งจะพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เป็นกลุ่มก้อน (Crest) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและมีทิศทางเคลื่อนที่ออกจากกันในแนวทิศเหนือและใต้ไปจนถึงละติจูดแม่เหล็ก $\pm 15 - 20^\circ$ และจะมีความหนาแน่นของการไอออไนซ์สูงขึ้นและจะมีค่าสูงที่สุดที่เส้นละติจูดแม่เหล็ก $\pm 15 - 20^\circ$ หลังจากนั้นการไอออไนซ์จะเริ่มลดลงและกลุ่มก้อนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนเข้าหากันในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กอีกครั้งและจางหายไปในเวลากลางคืน [23, 24] ช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนมากที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 18.00-01.00 น. ซึ่งช่วงเวลาที่เกิดความแปรปรวนขึ้นนี้เป็นช่วงเวลาที่ค่าความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ และค่าความถี่วิกฤตเกิดความแปรปรวนด้วย ซึ่งในหัวข้อถัดไปได้นำทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้มาศึกษาความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลง

5.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนกับความสูงของชั้น F และ ความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูง และความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติในช่วงเวลาเดียวกันคือช่วงเวลาเย็นหลังจากดวงอาทิตย์ตก ซึ่งในช่วงเวลานี้เป็นเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดความแปรปรวน เนื่องจากกลไกทาง

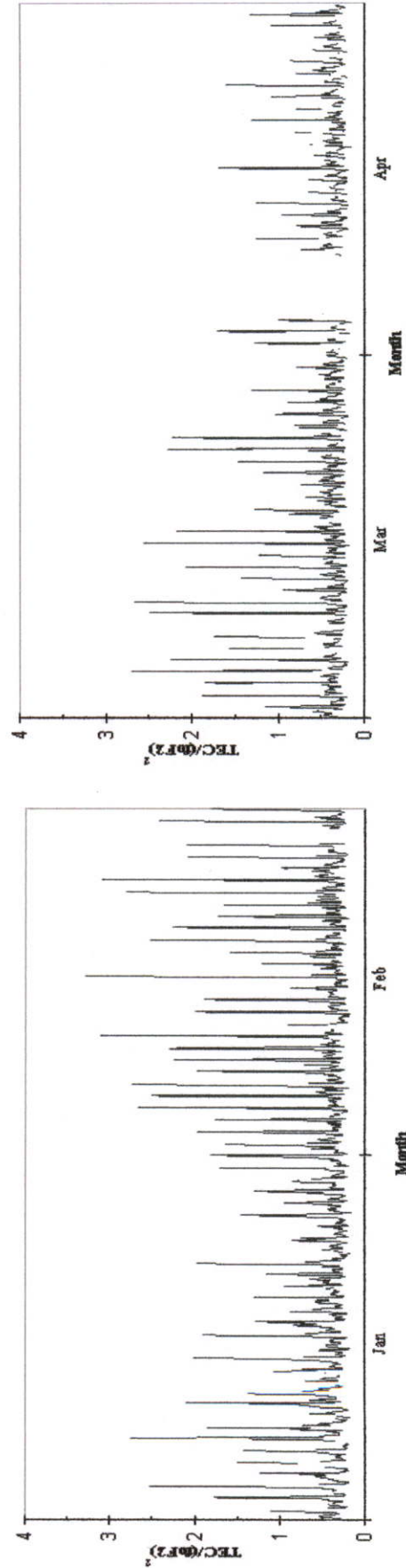
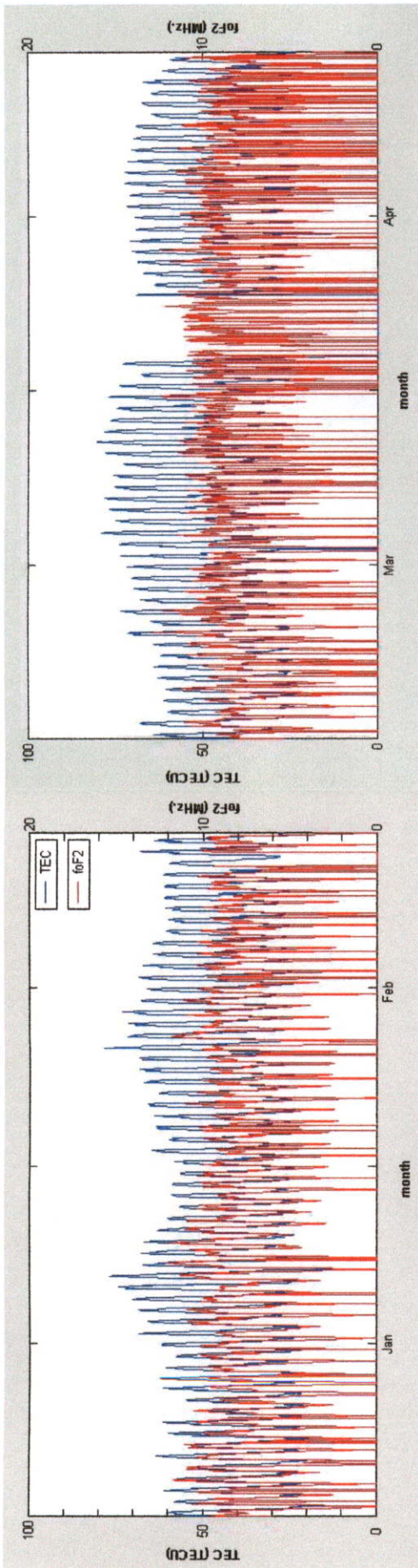
ฟิสิกส์ของชั้นบรรยากาศในเวลาที่ไม่มีการแผ่รังสี และในเวลาเดียวกันนี้เองค่าปริมาณอิเล็กตรอนเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความแปรปรวนในเวลาหลังจากดวงอาทิตย์ตกดินด้วย จึงได้นำทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้มาศึกษาความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงกันว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร โดยที่ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลของทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้ออกมาในแบบรายปี



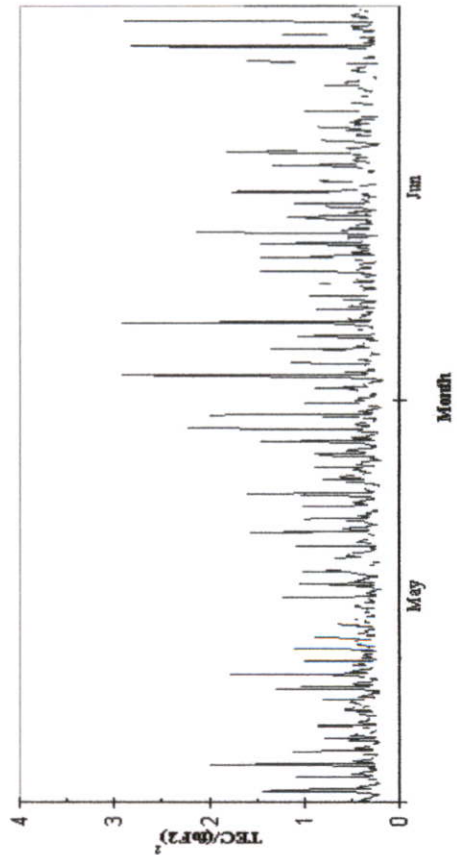
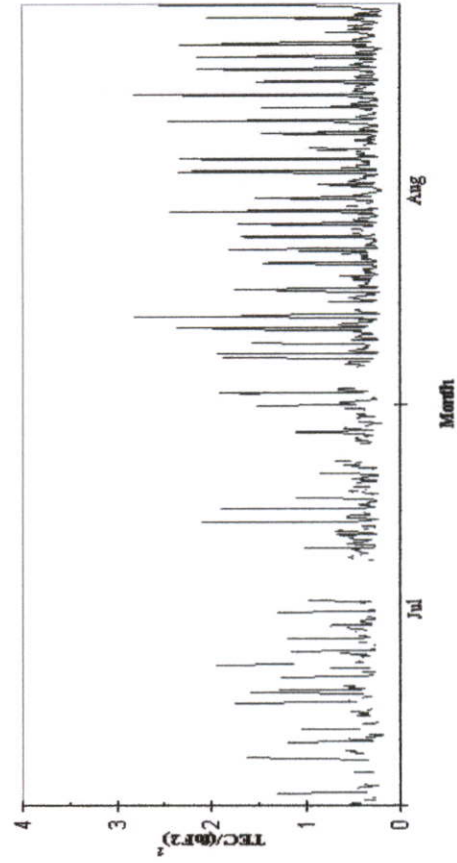
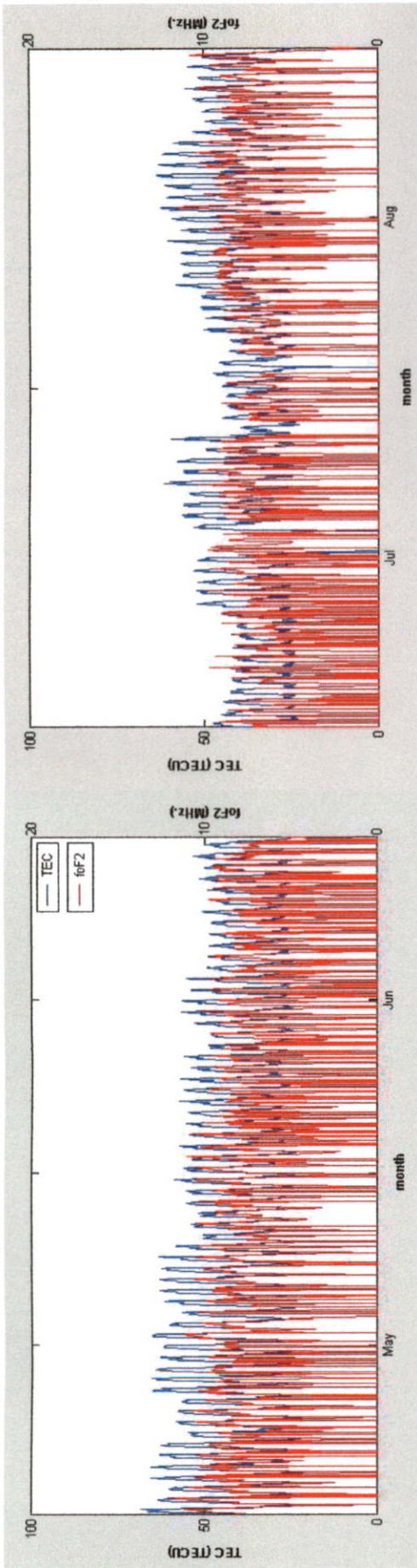
รูปที่ 5.4 พารามิเตอร์ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ทำการวิเคราะห์ในปี พ.ศ. 2547

รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤต, ค่า TEC และ ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2547 จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตและค่า TEC นั้นเวลาในการเกิดค่าต่ำสุด และ สูงสุดของข้อมูลนั้นจะเกิดในช่วงเดือนเดียวกันและลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะคล้ายกันไปตลอดทั้งปี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจาก 2 พารามิเตอร์นี้ โดยที่ช่วงที่เกิดค่าสูงสุดของความถี่วิกฤตจะเกิดในช่วงเดือน มีนาคม และ ทยอยลดต่ำลงมาเรื่อย ๆ จนถึงเดือน สิงหาคมและจะมีค่าสูงสุดอีกครั้งในช่วงเดือน กันยายน ช่วงที่มีการเกิดค่าสูงสุดของข้อมูลนี้อยู่ในช่วง Equinox ซึ่งจะสังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า TEC มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับค่าความถี่วิกฤต โดยมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบขนานกันไปในทุก ๆ เดือนที่ช่วงเวลาเดียวกัน ในช่วงเดือน พฤศจิกายน นั้นจะมีการขาดหายของข้อมูลไปบางส่วนเนื่องจากอุปกรณ์ในการตรวจวัดที่ใช้ไอโอโนซอนด์เทคนิค มีปัญหาในเรื่องของเครื่องขยายสัญญาณ (Power amplifier) มีความเสียหาย เครื่องจึงไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลในเวลานั้น

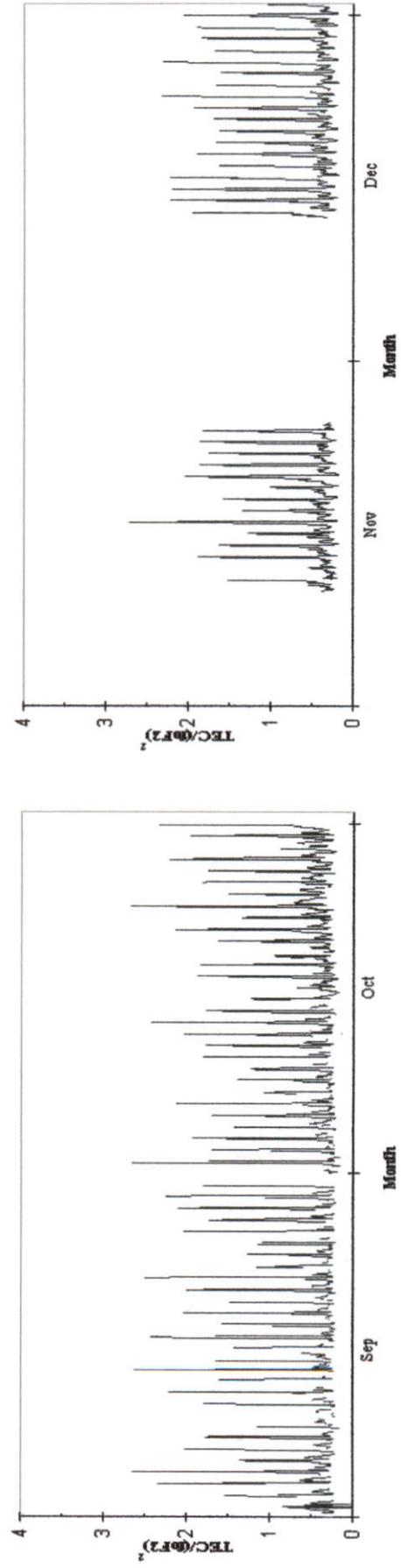
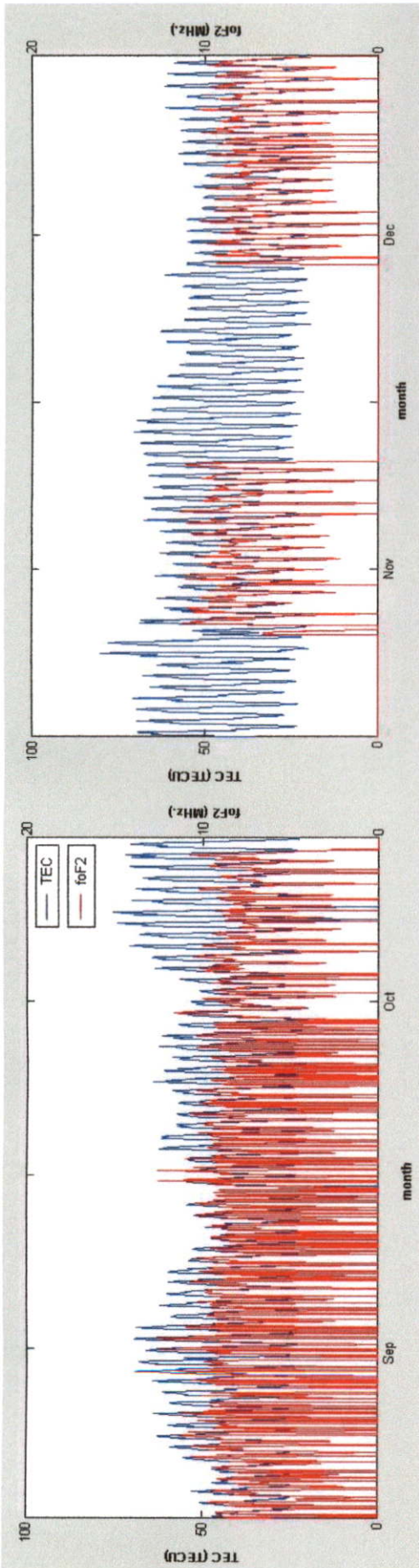
นอกจากนี้ ยังได้มีการนำค่าความถี่วิกฤต และ ค่า TEC มาแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปตามกันในแต่ละวันมาแสดงตลอดปี พ.ศ. 2547 เนื่องจากทั้ง 2 พารามิเตอร์นี้มีความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันที่เป็นไปตามกัน จึงสามารถหาค่าอัตราส่วนกันโดยมีค่าเท่ากับ $TEC / (foF_2)^2$ [22] โดยได้ทำการหาอัตราส่วนเป็นรายปี ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.5-5.7



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤต และ ดัชนีในเดือน ม.ค. - เม.ย. พ.ศ. 2547

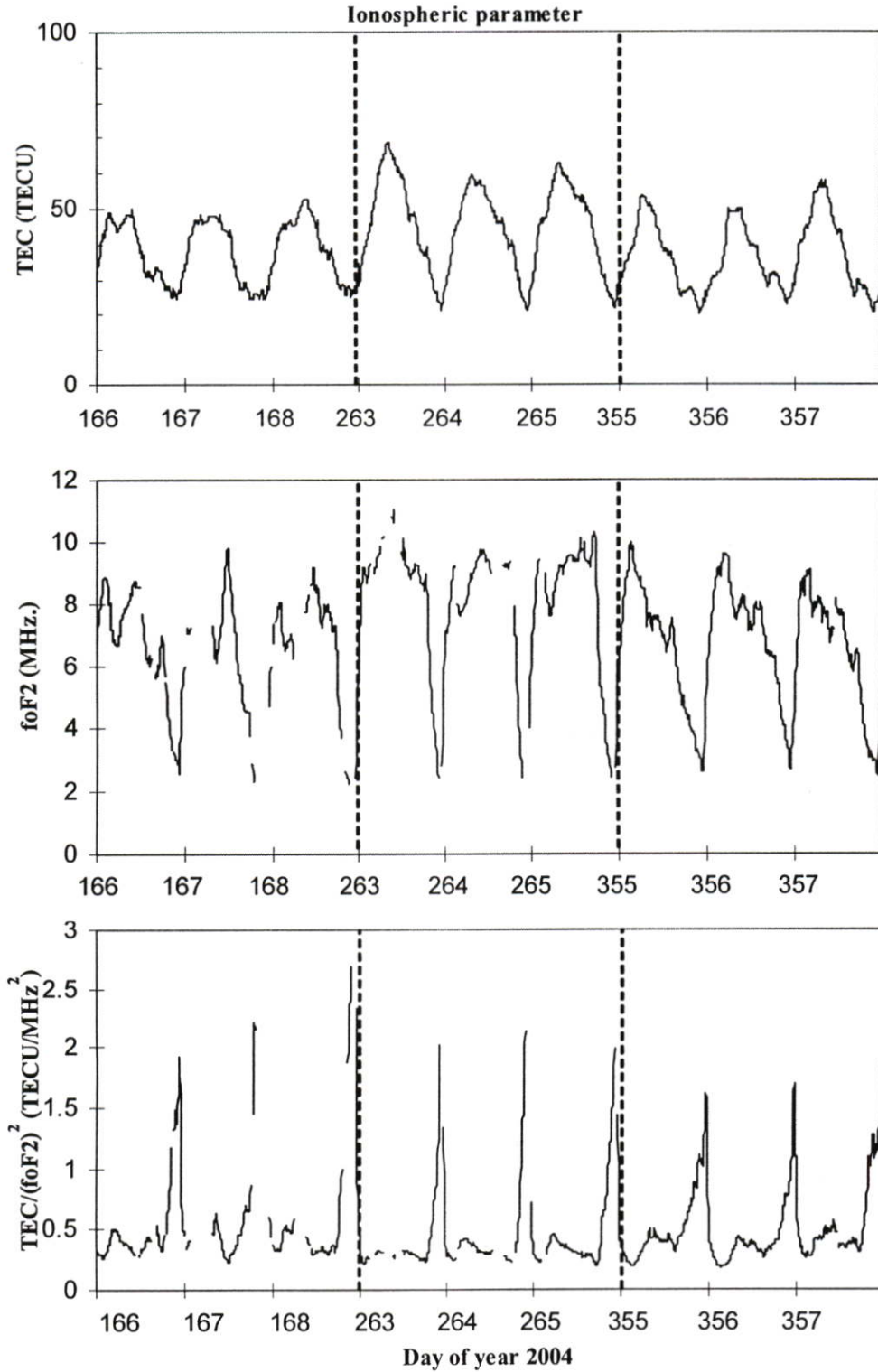


รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤต และ ดัชนีในเดือน พ.ค. - ส.ค. พ.ศ. 2547



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่า TEC กับ ค่าความถี่วิกฤต และ คำนีในเดือน ก.ย. - ธ.ค. พ.ศ. 2547

จากรูปที่ 5.5-5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กันตามเวลาของข้อมูล TEC กับค่าความถี่วิกฤตในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยพบว่าค่าสูงสุดของดัชนีในแต่ละวัน จะสามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็น 3 ช่วง ตามฤดู ได้แก่ ฤดูร้อน (Summer), ฤดูEquinox และ ฤดูหนาว (Winter) แต่ข้อมูลที่ทำการสังเกตเป็นรายปีนั้นจะมีจำนวนของข้อมูลยาวมากเพื่อใช้ในการสังเกต จึงทำการตัดแต่ละช่วงของการศึกษา ได้แก่ ช่วง Summer, Equinox และ Winter ออกมาเป็นตัวอย่างของข้อมูล 4 วันในแต่ละช่วง ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.8 เนื่องจากถ้านำมาช่วงทั้งหมดของข้อมูลมาแสดงจะยาวมาก จนไม่สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน จากกราฟจะมีการแบ่งช่วงเวลาเป็นช่วง Summer, Equinox และ Winter ตามลำดับ ค่าดัชนีจะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูร้อน และ จะมีค่าลดลงมาเรื่อยๆ จนถึงช่วง Equinox ที่ค่าดัชนีในช่วงฤดูร้อนเป็นเช่นนี้ เนื่องจากผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน Plasmaspheric ในแถบละติจูดต่ำจะมีค่าสูงกว่าในช่วงอื่น [25]



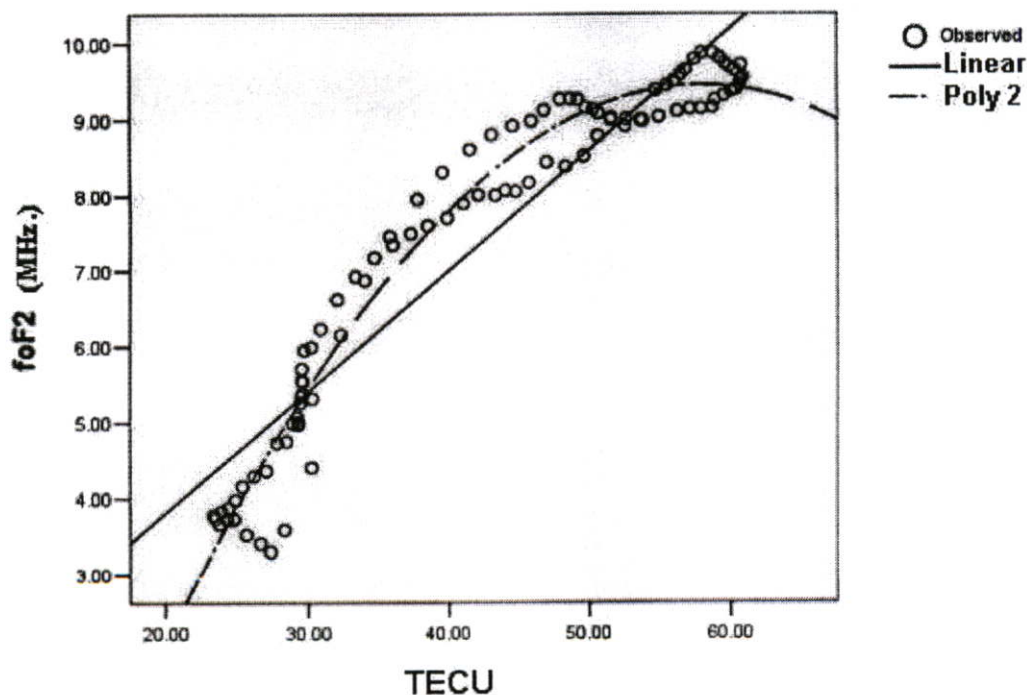
รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงของค่า TEC, ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และดัชนีของค่า $TEC/(foF_2)^2$ ที่ทำการตัดช่วงมาแสดง ช่วงละ 3 วัน

ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตในแต่ละเวลานั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า TEC โดยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงจะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ของตัวแปรทั้ง 2 ตัวในปี พ.ศ. 2547 ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยแค่ไหน โดยใช้สูตรสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson product moment Correlation Coefficient) มีสมการดังนี้

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (5.43)$$

โดยที่ ค่า r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่า x คือ ค่าปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (TECU) ค่า y คือ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้ง 2 ตัวแปรมีค่า 0.944 แสดงว่าทั้ง 2 ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันสูง และทั้ง 2 ตัวแปรนี้สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงซึ่งกันและกันได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ตัวแปรนี้ต่อโดยการทำ (Curve estimate) โดยผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 การทำ Curve estimate ระหว่างค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี พ.ศ. 2547

รูปที่ 5.9 แสดงการทำ Curve estimate ระหว่างค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี พ.ศ. 2547 โดยที่ค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวแปรต้น และค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวแปรตาม เนื่องจากค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ณ เวลานั้นๆ จะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ ณ เวลานั้นด้วย เมื่อนำตัวแปรทั้ง 2 มาเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติแบบ Regression จะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 2 เป็นสมการ โพลีโนเมียลกำลังสองดังสมการที่ (5.44)

$$y = -7.765 + 0.594x - 0.005x^2 \quad (5.44)$$

โดยที่ค่า x คือ ค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีหน่วยเป็น TECU และค่า y คือ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีหน่วยเป็น เมกะเฮิร์ตซ์ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงที่มีความสัมพันธ์กันของทั้ง 2 พารามิเตอร์นี้จะสามารถนำไปใช้หาค่าความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ [1] ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

5.4 ความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

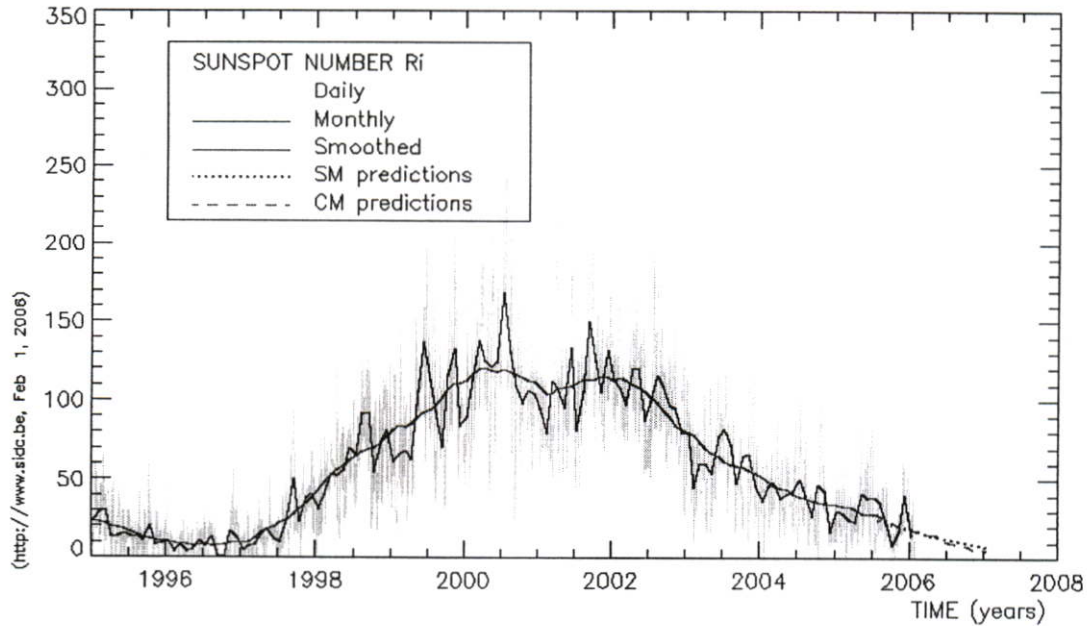
จากการศึกษาค้นคว้าได้มีผู้วิจัยในต่างประเทศ ได้ทำการหาค่า ความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Slab thickness) D โดยใช้การคำนวณจากค่า TEC และ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูงที่สุดในชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ($NmF2$) ตามสมการที่ (5.45) [26, 27, 28] ซึ่งผู้ที่ทำการศึกษาค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้สร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (5.46)

$$D = TEC / NmF2 \quad \text{km.} \quad (5.45)$$

$$NmF2 = 1.24(f_oF2)^2 \times 10^{10} \quad \text{el/m}^3 \quad (5.46)$$

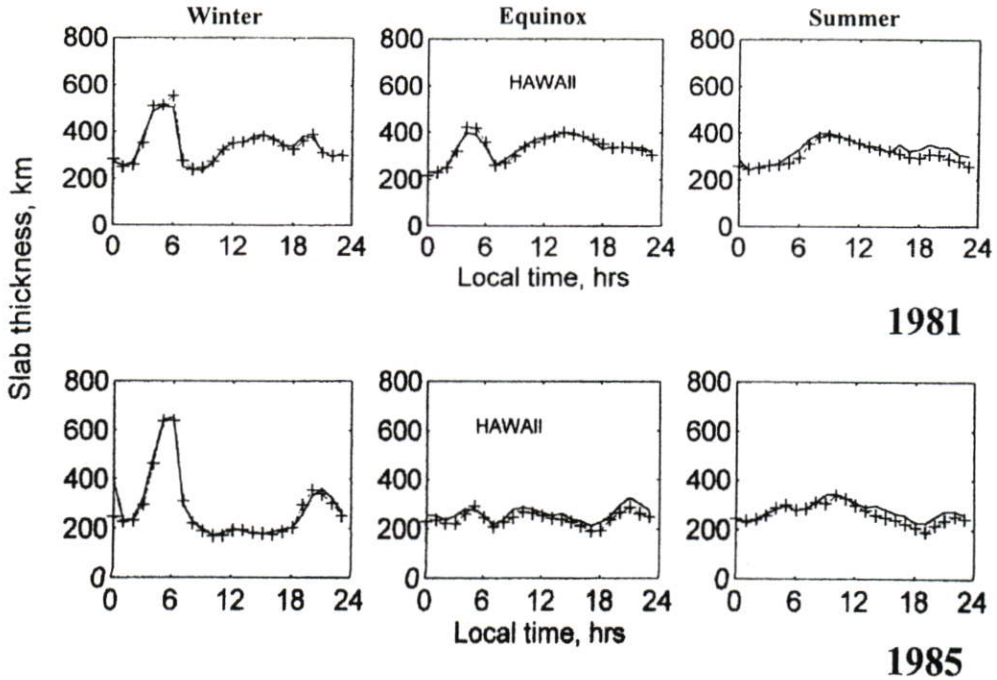
โดยที่ความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ D มีหน่วยเป็นกิโลเมตร ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ $NmF2$ มีหน่วยเป็น el/m^3 และค่าความถี่วิกฤตมีหน่วยเป็น MHz ซึ่งพารามิเตอร์นี้มีความสำคัญในการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นอิเล็กตรอน และการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของชั้นบรรยากาศ

ด้วย [25] ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี พ.ศ. 2547 ซึ่งช่วงปี พ.ศ. 2547 (ค.ศ. 2004) นี้เป็นช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าลดต่ำลง แสดงแบบจำลองจุดดับบนดวงอาทิตย์ดังรูปที่ 5.10 และปริมาณของจุดดับบนดวงอาทิตย์ จะส่งผลกับค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแถบเส้นศูนย์สูตรด้วย [1]



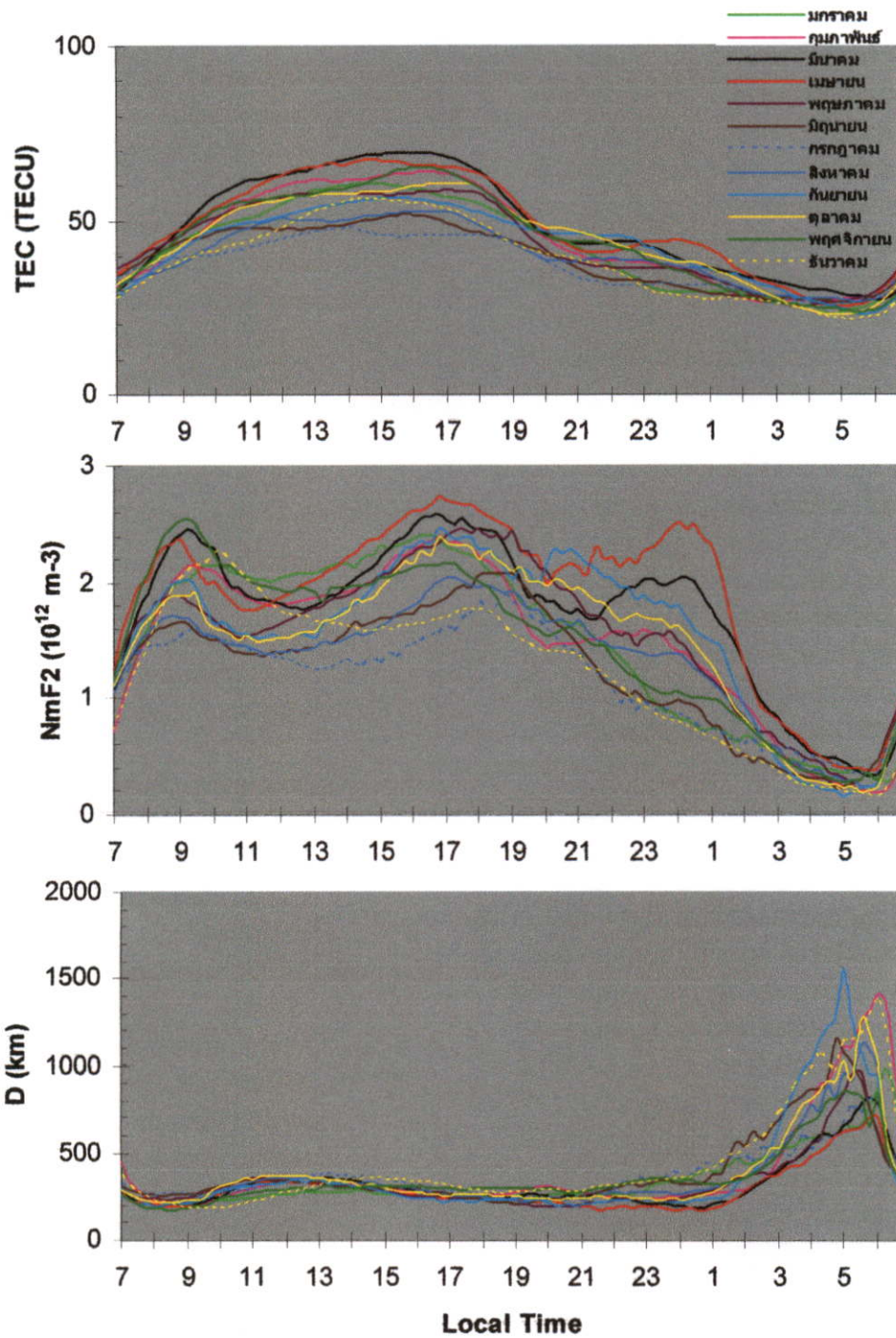
รูปที่ 5.10 แบบจำลองจุดดับบนดวงอาทิตย์[29]

ข้อมูล TEC ที่นำมาคำนวณค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้มาจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้โดยใช้ดาวเทียม GPS ตามอัลกอริทึมที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.1 และ ข้อมูล ค่าความถี่วิกฤตได้มาจากการใช้ ไอโอโนซonde เทคนิคในการวัด ซึ่งข้อมูล TEC และ ค่าความถี่วิกฤตที่ทำกรวัดนั้นสถานีตรวจวัดตั้งอยู่ในแถบละติจูดต่ำ (สถานีที่วัดของทั้ง 2 พารามิเตอร์ต้องอยู่ที่จุดเดียวกันจึงจะนำค่ามาพิจารณาได้ [1]) ซึ่งความผิดปกติของค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเกิดในในช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุด และการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดด้วย โดยที่ในรูปที่ 5.11 แสดงค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ Hawaii ซึ่งอยู่ในแถบละติจูดต่ำเช่นเดียวกับประเทศไทย โดยอยู่ที่ตำแหน่ง (19° N, 26° E) ในช่วงเวลาที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุดในปี ค.ศ. 1981 และ ในช่วงเวลาที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดในปี ค.ศ. 1985 ตามลำดับ ซึ่งในช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำที่สุด (1985) นั้น ค่าความหนาที่สูงที่สุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ Hawaii ในช่วง Winter ในเวลา 06.00 น. จะมีค่าสูงกว่าในช่วงที่ปริมาณจุดดับของดวงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุด (1981)



รูปที่ 5.11 ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ Hawaii (19° N, 26° E) ในช่วงเวลาที่ ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุด (ค.ศ. 1981) และ ต่ำสุด (ค.ศ. 1985) ตามลำดับ

โดยที่ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแถบละติจูดต่ำนี้ จะมีเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาก่อนที่ดวงอาทิตย์ขึ้น คือในเวลา 05.00 น. และมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 06.00 น. และหลังจากนั้นจะลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่เวลา 07.00 น. เนื่องจาก ผลของการเคลื่อนที่ลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในชั้นต่ำ เมื่อลม Neutral wind ยังคงคั่นชั้นไอโอโนสเฟียร์ในชั้นสูงให้มีค่าต่ำเดิม [28, 30 และ 31] หรือ อธิบายได้จาก การที่ค่าพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ คือ ค่าปริมาณอิเล็กตรอน มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กันกับค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูงที่สุดในชั้น F ณ เวลานั้น โดยที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น แต่ค่า ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูงที่สุดในชั้น F ยังคงมีค่าลดลง จะสังเกตได้จากรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ค่า TEC, NmF2 และ ค่า D (Slab thickness) ที่ชุมพรในปี พ.ศ. 2547

ในรูปที่ 5.12 แสดงถึงค่า TEC ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F (NmF2) และค่าความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแถบละติจูดต่ำ ที่ทำการศึกษามีชุมพรในปี พ.ศ. 2547 ซึ่งเป็นช่วงที่จุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำ (ค่าความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีค่าสูงที่สุด ในช่วงเวลาที่จุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำที่สุด และ จะมีค่าสูงที่สุดอีกรอบ เมื่อจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุด [28]) การเปลี่ยนแปลงค่า TEC ในเดือน เมษายน, มีนาคม และ กันยายน นั้นจะมีความผิดปกติ ซึ่งก็มีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับ การเปลี่ยนแปลงค่า NmF2 ซึ่งจะมีค่า

จะลดลงในเวลากลางคืนแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในเวลา ประมาณ 24.00 น. อันเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มของค่าปริมาณอิเล็กตรอน (TEC enhancement) ในเวลากลางคืนของช่วง Equinox [28] จากกราฟจะแสดงให้เห็นถึง พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในเวลากลางวันความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่า 300 กิโลเมตรและไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นในเวลาเที่ยง เนื่องจากค่า Solar flux ในเวลานั้นมีค่าเพิ่มขึ้น [26] ในเวลากลางคืนความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน ช่วงเวลา 05.00 น. ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าสูงที่สุดโดยช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาก่อนที่พระอาทิตย์จะขึ้น โดยสามารถสรุปได้ว่าเกิดขึ้นเมื่อ ค่า NmF2 มีค่าต่ำลงมาก และค่า TEC ยังคงที่ และจะมีค่าลดลงหลังจากที่พระอาทิตย์ขึ้นไปแล้วในเวลา 06.00 น. ที่ จะมีค่าต่ำที่สุดในเวลา 07.00 น. โดยที่ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าต่ำที่สุดในช่วง Equinox (เดือน มีนาคม, เมษายน, กันยายน และ ตุลาคม) และ จะมีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดูหนาว (เดือน พฤศจิกายน, ธันวาคม, มกราคม และ กุมภาพันธ์) โดยที่ความหนาของชั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 พารามิเตอร์ คือ ตำแหน่งละติจูด, ฤดูกาล และ จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ [26]

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

เนื่องมาจากผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความไม่สม่ำเสมอจะส่งผลกระทบต่อการสื่อสารดาวเทียมในการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในเวลา กลางคืน ทำให้ต้องมีการศึกษาลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามทฤษฎีที่มีผู้วิจัย ในต่างประเทศได้ทำการศึกษามาเป็นเวลานาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาการ เปลี่ยนแปลงค่าความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์, ค่าความถี่วิกฤตของชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ไอโอโนซอนด์เทคนิคในการวัดข้อมูล ร่วมกับการเปลี่ยนแปลง ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ใช้ดาวเทียม GPS ในการวัดค่า โดยได้นำ ทั้ง 3 พารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาความสัมพันธ์กัน ซึ่งในการวัดค่าทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้ทำ ในแถบ ละติจูดต่ำ (Low-latitude) ที่จังหวัดชุมพร ของประเทศไทย

จากการศึกษา การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ในเวลากลางวันจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ความสูงของชั้น F จะเริ่มมีการเลื่อนสูงขึ้น ในเวลาประมาณ 17.00 น. จน ไปมีความสูงที่สุดสูงสุดในเวลา 20.00 น. ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้จะมีรูปแบบของการ เปลี่ยนแปลงเหมือนกันทั้ง 3 ฤดูกาลแต่ในช่วง Equinox ความสูงของชั้น F ในเวลา 20.00 น. จะมี ความสูงกว่าในช่วง Summer และ Winter และ ในช่วงเวลา 20.00 น. นี้เอง ที่ความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่แปรปรวนไปมากกว่า เมื่อเทียบกับใน เวลากลางวันซึ่งจะเห็นได้ชัดในช่วง Equinox ซึ่งช่วงเวลาที่ความสูงของชั้น F มีความแปรปรวน นี้เองจะเป็นช่วงเวลาที่มีการเกิด ปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ซึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของ อิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวน จะส่งผลกระทบต่อคลื่นย่าน HF ที่ ทำการส่งขึ้นไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้ค่าความถี่วิกฤตที่วัดได้ใน ช่วงเวลานั้นเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัด

การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤต ในเวลากลางวันจะเป็นช่วงที่ค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูง ที่สุด คือจะมีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลา ประมาณ 17.00 น. และจะมีค่าลดลงในเวลากลางคืน เมื่อ นำมาพิจารณาเป็นฤดูกาลนั้น พบว่าค่าความถี่วิกฤตจะมีค่าสูงที่สุดในช่วง Equinox เช่นเดียวกับค่า ความสูงของชั้น F แต่ตามปกติแล้วค่าความถี่วิกฤตจะมีค่าลดลงหลังจากที่ดวงอาทิตย์ตกดิน เนื่องจากไม่มีการ ไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนในชั้นแล้วจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนใน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ลดลงความถี่จึงมีค่าต่ำลง ดังจะเห็นได้จากกราฟในช่วง Summer และ Winter ที่ความถี่วิกฤตในช่วง Equinox มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 20.00 น. จะเกิดจากกลุ่มความไม่ สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนที่มีความแปรปรวน ซึ่งในช่วง Equinox จะเป็นช่วงที่มีกลุ่มก้อนความไม่ สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนมากกว่าในช่วงฤดูกาลอื่น [13]

การเปลี่ยนแปลงในระหว่างวันของ ค่าปริมาณอิเล็กตรอน จะมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 04.00-05.00 น. และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในเวลา 06.00 น. เมื่อเริ่มมีแสงอาทิตย์ที่เป็นพลังงานให้อิเล็กตรอนในชั้นรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้แก่ ความเข้มจากรังสี EUV และ X-ray จนเกิดการไอออไนซ์ ของออกซิเจน และ ไนโตรเจน และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนจะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 16.00 น. ที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลานี้แทนที่จะมีค่าสูงสุดเมื่อเวลา 12.00 น. ซึ่งเกิดมาจากความผิดปกติในย่านเส้นศูนย์สูตร (Equatorial anomaly) และในเดือนมีนาคม จะเป็นเดือนที่มีค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่สูงที่สุดในปี พ.ศ. 2547 ซึ่งในเดือนนี้ก็เป็นช่วง Equinox คือในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นมากที่สุด

การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะมีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดเดียวกัน นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าความถี่วิกฤต และค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่วัดได้ มาหาคำนวณหาค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในเวลากลางคืนความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน ช่วงเวลา 05.00 น. ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าสูงที่สุดโดยช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาก่อนที่ดวงอาทิตย์จะขึ้น และ จะมีค่าลดลงหลังจากที่ดวงอาทิตย์ขึ้นไปแล้วในเวลา 06.00 น. และ จะมีค่าต่ำที่สุดในเวลา 07.00 น. โดยที่ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าต่ำที่สุดที่ช่วง Equinox (เดือน มีนาคม, เมษายน, กันยายน และ ตุลาคม) และ จะมีค่าสูงที่สุดในช่วง Winter (เดือน พฤศจิกายน, ธันวาคม, มกราคม และ กุมภาพันธ์) ซึ่งความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดที่ทำการศึกษา

ถ้ามีสถานีตรวจวัดหลายจุด ในการวัดค่าความสูงของชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น จะสามารถนำไปสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของชั้นไอโอโนสเฟียร์ และ ควรจะพัฒนาโปรแกรมในการวิเคราะห์ค่าความสูง และ ความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ให้เป็นแบบ ออโตเมติก ไอโอโนแกรม จะได้ไม่ต้องเสียเวลาในการใช้คนในการวิเคราะห์ข้อมูล และถ้าในสถานีตรวจวัดมีเครื่องมือในการวัดค่าดัชนี S4 จะทำให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันกับการเกิดปรากฏการณ์ สเปรดเอฟ ได้โดยตรง

บรรณานุกรม

- [1] B. Jayachandan, T. N. Krishnankutty and T. L. Gulyaeva, “**Climatology of ionospheric slab thickness,**” Ann. Geophys. Vol.22, pp 25-33, 2004
- [2] M.C. Kelly, “**The Earth’s Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics,**” Academic Press,INC.: San Diego, 1989
- [3] M.P.M Hall, L.W. Barclay and M.T. Hewitt, “**Propagation of Radiowaves,**” Short Run Press Ltd., London, 1996
- [4] K. D. Prasad, “**Antenna and wave propagation,**” Tech India Publications, New Delhi.
- [5] J. Griffiths, “**Radio Wave Propagation and Antennas An Introduction,**” Prentice-Hall International., 1993
- [6] W.A Feess and S. G. Stephens, “**Evaluation of GPS Ionospheric Time Delay Model,**” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. AES-23, No.3, pp332-338, 1987.
- [7] A. Picquenard, “**Radio Wave Propagation,**” The Macmillan Press Ltd., London, 1974
- [8] “**Electrical Engineering Training Series,**” [Online]. Available <http://www.tpub.com/neets/book10/40e.htm>. 2003
- [9] K. Daves, “**Ionospheric Radio Propagation,**” N.B.S Monograph 80, Washington, 1965
- [10] Livingston R. C., Weber E. and Buchau J. “**Multiscale Observations of Irregularities in an Isolated and Decaying Plasma Bubble.**” Proc.VI ISEA., Aguadilla, Puerto Rico, 1980
- [11] วิวัฒน์ กิรานนท์. “**วิศวกรรมการสื่อสาร.**” พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : อักษรสยามการพิมพ์. 2540
- [12] กิตติชัย วิเศษศิริ. “**การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ที่มีผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมย่านความถี่ VHF.**” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [13] T. Maruyama, “**Ionospheric Radio Propagations,**” Science of Space Environment, 2001.
- [14] N. Wakai, H. Ohya and T. Koizumi, “**Example of typical ionogram,**” MANUAL OF IONOGRAM SCALING Third Version ,1987
- [15] N. Wakai, “**Nomogram for easy readout of the night-time absorption,**” CCIR IWP 6/1, Document 12.

- [16] M. Nakamura, **“Quick Reference of Manual Scaling for SPECIAL scaling,”** Communications Research laboratory, Tokyo, Japan, 2003
- [17] T. Maruyama, K. Nozaki, M. Yamamoto and S. Fukao, **“Ionospheric height changes at two closely separated equatorial stations and implications in spread F onsets,”** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics Vol. .64, pp1557-1563, 2002
- [18] T. Maruyama, **“Ionosphere and Thermosphere,”** Journal of Communications Research Laboratory Vol. 49 No.3, 2002
- [19] N. Tsushinki, **“Model 7633 Realtime TECMETER Operation Manual,”** Japan
- [20] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, **“Global Positioning System,”** Third edition, Springer-Verlag Wien, New York, 1994
- [21] G. Blewitt, **“An automatic editing algorithm for GPS data,”** Geophys. Res. Lett., 17, pp199-202, 1990
- [22] G. Ma and T. Maruyama, **“Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan,”** Ann. Geophys. Vol. 21 , pp2083-2093.
- [23] CCIR Report 725-3, **“Ionospheric Properties,”** Reports of the CCIR, 1990; Vol. VI propagation in Ionized Media, (ITU, Geneva, 1990)
- [24] G. R. Ezuer, A. O. Nieves, and H. Teresita, **“Predicted and measured total electron content at both peak of the equatorial anomaly,”** Radio Science, Vol. 29, No. 4, pp831-838, 1994
- [25] G. Ma and T. Maruyama, **“Ionospheric slab thickness over Kokubunji during solar maximum,”** Ann. Geophys.
- [26] K. Davies, and X. M. Lui, **“Ionosphere slab thickness in middle and low-latitudes,”** Radio Sci., 26, 1997, 1991.
- [27] P. K. Bhuyan, S. Lakha and T. R. Tyagi, **“Equivalent slab thickness of the ionosphere over 26 N through the ascending half of a solar cycle,”** Ann. Geophys., 4, 131, 1986.
- [28] H. Minakoshi, and I. Nishimuta, **“Ionospheric electron content and equivalent slab thickness at lower mid-latitudes in the Japanese zone,”** Proc., IBSS, University of Wales, U.K., 144, 1994
- [29] SIDC, **“Solar Influences Data Analysis Center,”** [Online] Available <http://www.sidc.be>, Feb 1, 2006

- [30] G. O. Walker, and S. D. ting, **“Electron content and other related measurements for low-latitude station obtained at sunspot maximum using geostationary satellite”**, J. Atmos. Terr. Phys., 34, 283, 1972
- [31] P. B. Rao, B. Jayachadran, and N. Balan, **“Low latitude TEC and Np variations during the solar cycles of 20 and 21, in: Investigation of ionosphere by means of Beacon satellite measurements edited by Cao Chong”**, Int. Beacon Satellite symposium, Beijing, China, p.241, 1988

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. R. Attaviriyasuwon, N. leelaruji, N. Hemmakorn and T. Boonchuck, “**Observation of Ionospheric Height Changes at Chumphon near the Magnetic Equator.**” Information, Communications and Signal Processing (ICICS’2005), pp. 1169-1172, Bangkok, Thailand, December 6-9, 2005.
2. ณรงค์ เหมกรณ์, รุ่งชัย อัครดิวิริยะสุวรรณ และ นิภา ลีลารุจิ, “การศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียม,” วารสารวิชาการเนคเทค ปีที่ 5, ฉบับที่ 16, เดือนพฤศจิกายน 2547 – ตุลาคม 2548, หน้า 643-648.

ประวัติผู้เขียน

นายรุ่งชัย อัดตวิริยะสุวร เกิดเมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ.2524 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546