

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้สัญญาณดาวเทียม GPS
STUDY OF IONOSPHERIC ELECTRON CONTENT BY USING GPS SATELLITES SIGNALS



นายกาญจน์ เหลาพิพัฒนา
MR. KAN LAOPIPATTANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เลขที่..... สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขทะเบียน..... 29388 พ.ศ. 2540
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2541 ISBN 974-589-188-6

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF IONOSPHERIC ELECTRON CONTENT BY USING GPS SATELLITES SIGNALS



KAN LAOPIPATTANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
1997

ISBN 974-589-188-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้สัญญาณจากดาวเทียม GPS
นักศึกษา	นายกาญจน์ เหล่าพิพัฒนา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ณรงค์ เหมกรณ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการสื่อสารดาวเทียมมีส่วนสำคัญในการติดต่อสื่อสารมาก แต่จะได้รับผลกระทบต่าง ๆ จากการที่คลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยผลกระทบนั้นมีหลายรูปแบบเช่นฟาราเดย์โรเทชัน เวลาหน่วง และที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณอย่างกะทันหัน ซึ่งเกิดเนื่องมาจากปริมาณและการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในชั้นย่อยต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปในแต่ละเวลาและปัจจัยอื่น ๆ โดยการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในกรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ และภูเก็ต เพื่อเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนที่ระดับเส้นรุ้งต่าง ๆ กัน โดยใช้ผลต่างของค่าเวลาหน่วงของสัญญาณ L-band ทั้ง 2 ของระบบดาวเทียม GPS และคำนวณเป็นค่า Total Electron Content (TEC) จากการทดลองผลที่ได้นั้น การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของปริมาณ TEC ในประเทศไทย จะมีช่วงที่มีค่ามากที่สุดที่ช่วงประมาณเดือนพฤษภาคมและอีกช่วงประมาณเดือนตุลาคมมีค่าประมาณ 53×10^{16} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร ช่วงที่มีค่าน้อยที่สุดอยู่ในช่วงเดือนมิถุนายนและเดือนธันวาคม เนื่องมาจากกระยะระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์และมุมซีกนิจของดวงอาทิตย์กับโลก ส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างวันนั้นจุดที่ค่า TEC ต่ำที่สุดอยู่ก่อนพระอาทิตย์ขึ้น และจะมากที่สุดในเวลาประมาณ 14.00 น. ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในเวลากลางวันมีค่าประมาณ 15% กลางคืนประมาณ 25% และค่าที่มากที่สุดของวันอยู่ที่ช่วง 2.00-5.00น. ประมาณ 40-70% ซึ่งเกิดจากเวลากลางคืนมีความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนมากซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างเชียงใหม่และกรุงเทพฯมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีและขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงตามเส้นรุ้งแม่เหล็กนั้นค่ามากที่สุดที่เชียงใหม่จะมากกว่าที่กรุงเทพฯ เพราะความหนาแน่นอิเล็กตรอนในตอนกลางวันจะอยู่ที่เส้นรุ้งดิพแม่เหล็กประมาณ $\pm 15-20$ องศาซึ่งใกล้เชียงใหม่มากกว่ากรุงเทพฯ ส่วนการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบปีต่อปีจะพบว่า ปริมาณ TEC จะมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ตั้งแต่ปี 2536 น้อยที่สุดในปี 2539 เนื่องมาจากวัฏจักรสุริยะซึ่งเป็นวัฏจักรที่มีคาบ 11 ปี ในช่วงนี้จะอยู่ในช่วงที่ความเข้มมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งผลกระทบของสัญญาณดาวเทียมจะไม่รุนแรงนัก ส่วนผลกระทบที่รุนแรงกว่านี้จะเกิดขึ้นภายใน 2-3 ปีนี้

Thesis Title	Study of Ionospheric Electron Content by Using GPS Satellites Signals
Student	Mr. Kan Laopipattana
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Narong Hemmakorn
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1997

ABSTRACT

At present, satellite communications are important to use in every day communication. But there are some effects from signals propagate through ionosphere. The types of effect such as Faraday rotation, time delay and the important effect is scintillation, which due to the variation of structures and electron density in each region of the ionosphere that vary on the times of the day and other factors. This thesis presents the variation of total ionospheric electron content (TEC) in Bangkok, Chiang mai and Phuket for comparison the variation of TEC on latitude. Using the correlation of different time delay of 2 L-band signals from GPS satellites, the TEC value can be determined. The results show that, the seasonal variation of TEC in Thailand, the maximum are in May and the other are in October, TEC value is about 53×10^{16} electrons/m². The minimum are in June and December, that corresponds to the distance between the earth and the sun, and the solar zenith. The diurnal variation of TEC, the lowest is just before sunrise and peak during 14.00 LT. The standard deviation (SD) of TEC data at day time is about 15%, at night time is about 25% ,the peak of day is in the night time during 02.00-05.00 LT about 40-70%, because in the night time electron density in ionosphere is not uniform and that maybe a factor for scintillation. Furthermore, the comparison of TEC data between Bangkok and Chiangmai shows the good correlation and depend on season. The geomagnetic latitude variation, the maximum TEC value at Chiangmai is larger than Bangkok because of electron crest in the day time are on magnetic dip latitude $\pm 15-20^\circ$ which closer Chiangmai than Bangkok. The year-to-year variations of TEC have decreased since 1993, the minimum is in 1996 which corresponded to a 11-years solar cycle in the minimum of the cycle. At this moment, there are some strong effects of satellite signals, but the stronger effects will be coming in the next 2-3 year.

กิตติกรรมประกาศ

การที่ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เป็นเพราะความกรุณาและกำลังใจจากบิดามารดาของข้าพเจ้า ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านทั้งสองเป็นอย่างสูง, รวมถึง รศ. ณรงค์ เหมภรณ์, ผศ. นิภา ลีลาธุจิ ซึ่งให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดมา, อ. ธราดล โกมลมิตร ซึ่งให้ข้อมูลจากเชียงใหม่, อ. บุญช่วย ชิดเชี่ยว ที่ให้ข้อมูลจากภูเก็ต, ครูและอาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอนข้าพเจ้ามา รวมทั้ง ณัฐฐา เหลืองไพโรจน์ และเพื่อนปริญญาโทซึ่งให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้ามาตลอด

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ Mr. Kiyoshi Igarashi, Mr. Takeo Kusama, Mr. Hisamitsu Minakoshi ซึ่งให้โอกาสและคำแนะนำในการอบรมดูงานที่ CRL ประเทศญี่ปุ่น มา ณ ที่นี้ด้วย

กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII

บทที่

1	บทนำ.....	1
	กล่าวนำ.....	1
	วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	3
	รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
2	ผลกระทบของปริมาณและการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อสัญญาณดาวเทียม.....	5
	กล่าวนำ.....	5
	ทฤษฎีพื้นฐาน.....	8
	ดัชนีการหักเหของสัญญาณดาวเทียมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	14
	ผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อสัญญาณดาวเทียม.....	18
	ฟาราเดย์โรเทชัน.....	19
	เวลาหน่วง.....	20
	การหักเหของสัญญาณ.....	21
	การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน.....	22
3	หลักการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	27
	กล่าวนำ.....	27
	ลักษณะโดยทั่วไปของระบบดาวเทียมนำร่อง GPS.....	30

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
หลักการของการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์บนชั้นบรรยากาศ	
ไอโอโนสเฟียร์ (TEC) โดยใช้สัญญาณจาก GPS.....	38
อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง.....	42
หลักการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้.....	51
4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะปริมาณอิเล็กทรอนิกส์	
ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	53
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกับเวลาระหว่างวัน.....	53
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาล.....	70
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อวัฏจักรสุริยะ.....	75
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อเส้นรุ้งแม่เหล็ก.....	81
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC	
ในช่วงการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา.....	87
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์รูปแบบต่าง ๆ ของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย.....	94
5 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูลกับการประมาณจากแบบจำลอง.....	97
กล่าวนำ.....	97
วิธีการคำนวณปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จากแบบจำลอง.....	99
ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าที่วัดได้.....	100
6 บทสรุป.....	107
บรรณานุกรม.....	111
ภาคผนวก.....	115
- ภาคผนวก ก. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	116
- ภาคผนวก ข. เว็บไซต์เกี่ยวกับการศึกษาชั้นบรรยากาศ	
ไอโอโนสเฟียร์และดาวเทียม GPS ที่น่าสนใจ.....	117

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
- ภาคผนวก ค. โปรแกรม AVG.PAS.....	127
- ภาคผนวก ง. ไฟลวซาร์ทของโปรแกรม AVG.PAS.....	133
- ภาคผนวก จ. รายละเอียดและคุณสมบัติของดาวเทียม GPS.....	138
ประวัติผู้เขียน.....	140



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงรายละเอียดพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ทดลอง.....	3
2. แสดงรายละเอียดของช่วงเวลาที่ใช้ทดลองวัดและบันทึกค่า.....	3
3. แสดงค่าประมาณผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อ สัญญาณดาวเทียม (ที่มุมเงย 30° แถบเส้นรุ้งปานกลาง).....	22
4. แสดงรายละเอียดพิกัดต่าง ๆ ของสถานที่ทดลอง.....	83
5. แสดงสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและช่วงเวลาของการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา.....	88
6. แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแบบจำลอง IRI-90 และ IRI-95 กับค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่และกรุงเทพฯ และค่าจุดดับเฉลี่ยบนดวงอาทิตย์ (R_{12}).....	106

สารบัญภาพ

	หน้า
1. แสดงตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีที่วัดค่าปริมาณ TEC.....	2
2. แสดงปฏิภณระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก.....	6
3. แสดงโครงสร้างความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	6
4. แสดงชั้นย่อยต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	7
5. แสดงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีผลต่อการสื่อสารในย่านความถี่ต่าง ๆ.....	8
6. แสดงแรงบนอนุภาคประจุในสนามไฟฟ้า E ที่เกิดจากขั้วของแผ่นประจุไฟฟ้า ธรรมชาติของพลาสมา.....	9
7. แสดงคุณสมบัติของคลื่น.....	11
8. แสดงการสะท้อนและหักเหสัญญาณที่ส่งจากจุด A ไปยังจุด B.....	12
9. (ก) แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่อความสูงและการสะท้อนในแนวตั้ง.....	12
(ข) แสดงการหักเหของสัญญาณในแนวเอียง.....	12
(ค) แสดงแบบจำลองของความหนาแน่นไอโอโนสเฟียร์ที่คลื่นเดินทางผ่าน.....	12
10. แสดงความถี่วิกฤตที่เวลาต่าง ๆ.....	13
11. แสดงระยะทางในแนวตรงและระยะทางที่คลื่นเดินทาง.....	16
12. แสดงคำจำกัดความของ Total Electron Content.....	17
13. แสดงผลกระทบหลัก ๆ ของคลื่นสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมที่เดินทางผ่าน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	18
14. แสดงค่าประมาณของพาราเดย์โรเทชันเป็นฟังก์ชันกับความถี่และปริมาณอิเล็กตรอน TEC สำหรับเส้นทางของคลื่นสัญญาณในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก.....	20
15. ค่าเวลาหน่วงเป็นฟังก์ชันกับความถี่สำหรับค่าปริมาณอิเล็กตรอน $TEC 10^{16} - 10^{19}$ อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร.....	21
16. แสดงลักษณะของระดับสัญญาณดาวเทียมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด อย่างกะทันหัน.....	23
17. แสดงการทำนายการเปลี่ยนแปลงต่อพิกัดที่ตั้งในย่านเส้นศูนย์สูตร วันที่ 21 มีนาคม 2543 เวลา 1330 UT.....	24

18. แสดงความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน.....	25
19. แสดงตัวอย่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันแบบครึ่งคาบ.....	26
20. แสดงวิธีต่าง ๆ ในการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	27
21. แสดงภาพตัวอย่างผลการวัดโดยวิธี Vertical Sounder ที่ Kokubunji ประเทศญี่ปุ่น.....	28
22. แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบดาวเทียม GPS.....	31
23. แสดงวงโคจรของระบบดาวเทียม GPS.....	31
24. แสดงวงโคจรแบบแยกกระนาบวงโคจรของระบบดาวเทียม GPS.....	32
25. แสดงลักษณะการมอดดูเลทสัญญาณของ GPS.....	33
26. แสดงพิกัดของดาวเทียม GPS เพื่อการคำนวณตำแหน่งพิกัดของจุดบนพื้นโลก.....	34
27. แสดงวงโคจรของดาวเทียม GPS ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538.....	36
28. แสดงวงโคจรของดาวเทียม GPS ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 ในช่วงเวลา 0200-0500 UT (7:00-11:00 น.).....	37
29. แสดงปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 ที่กรุงเทพฯ.....	38
30. แสดงความแตกต่างของเวลาหน่วงเมื่อแคเรียร์เฟสของคลื่นสัญญาณ GPS ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	39
31. แสดงบล็อกไดอะแกรมของสัญญาณ GPS ในเครื่องรับ TEC meter.....	40
32. แสดงสัญญาณ V_1 และ V_2 ของ Correlator ในเครื่อง TEC meter.....	40
33. แสดงลักษณะมุมและความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เมื่อมีสัญญาณผ่าน.....	42
34. แสดงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
35. แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
36. แสดงสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS ติดตั้งอยู่บนดาดฟ้าตึกวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล.....	44
37. แสดงสายอากาศรับสัญญาณเวลาจากดาวเทียม GPS ติดตั้งอยู่บนดาดฟ้าตึกวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล.....	44
38. แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม TMFC.EXE.....	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

39. แสดงตัวอย่างข้อมูลของ TEC ทุก ๆ 1 นาที เมื่อแปลงเป็นเท็กซ์ไฟล์ จากข้อมูลที่เชียงใหม่ วันที่ 22 ต.ค. 2538.....	46
40. ค่า Slant factor จริงและค่าประมาณ กับมุมเงย.....	47
41. แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม AVG.EXE.....	48
42. แสดงตัวอย่างไฟล์ 951022.AVG.....	49
43.(ก) ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในแนวสายอากาศกับดาวเทียม.....	50
(ข) ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในแนวตั้ง.....	50
(ค) ค่าเฉลี่ยปริมาณอิเล็กตรอน TEC และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	50
44.(ก) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพ เมื่อเดือนธันวาคม 2536 ถึง กุมภาพันธ์ 2537.....	53
(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพ เมื่อเดือนมีนาคม ถึงพฤษภาคม 2537.....	54
(ค) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพ เมื่อเดือนมิถุนายน ถึงสิงหาคม 2537.....	54
(ง) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพ เมื่อเดือน ธันวาคม 2537 ถึง กุมภาพันธ์ 2538.....	55
45.(ก) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนตุลาคม 2538.....	55
(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนพฤศจิกายน 2538.....	56
(ค) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนธันวาคม 2538.....	56
(ง) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนมกราคม 2539.....	57
(จ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนกุมภาพันธ์ 2539.....	57

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
(จ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนมีนาคม 2539.....	58
(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนเมษายน 2539.....	58
(ค) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนพฤษภาคม 2539.....	59
(ด) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนมิถุนายน 2539.....	59
(ฉ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนกรกฎาคม 2539.....	60
(ง) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนสิงหาคม 2539.....	60
(จ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนกันยายน 2539.....	61
(ช) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนตุลาคม 2539.....	61
(ฌ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนพฤศจิกายน 2539.....	62
(ณ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนธันวาคม 2539.....	62
46.(ก) แสดงค่าเวลาเฉลี่ยต่อเดือนของจุดสูงสุดที่สุดของข้อมูลแต่ละวัน.....	63
(ข) แสดงค่าเวลาเฉลี่ยต่อเดือนของจุดต่ำที่สุดของข้อมูลแต่ละวัน.....	64
47.(ก) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็นจุดสูงสุดที่สุดของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ในแต่ละวัน ที่เชียงใหม่.....	64
(ข) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็นจุดสูงสุดที่สุดของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ในแต่ละวัน ที่กรุงเทพ.....	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

48.(ก) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็นจุดต่ำที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแต่ละวันที่เชียงใหม่.....	65
(ข) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็นจุดต่ำที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแต่ละวันที่กรุงเทพฯ.....	66
49. แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างวันของสนามแม่เหล็ก H-component และปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ.....	67
50.(ก) แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ.....	68
(ข) แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่.....	68
51. แสดงตัวอย่างจำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันรวมทั้งหมดในเดือนเมษายน 2536 ที่กรุงเทพฯ.....	69
52. รูปแสดงค่าเฉลี่ยต่อเดือนของแต่ละสถานีและแต่ละเดือนที่บันทึกค่าปริมาณ TEC.....	70
53. แสดงการทะลุของรังสีเข้าไปในชั้นบรรยากาศที่มุมซีนิธต่างกัน.....	71
54. แสดงมุมซีนิธของดวงอาทิตย์ในเดือนมกราคม.....	72
55. แสดงตำแหน่งเส้นรุ้งของโลกที่ดวงอาทิตย์โคจรตรงศีรษะในเวลากลางวัน.....	72
56. แสดงมุมซีนิธของดวงอาทิตย์ที่เส้นรุ้งต่าง ๆ	74
57. แสดงตัวอย่างผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมในย่าน C แบนด์ ต่อเดือน ในช่วงกรกฎาคม 2535 ถึง มิถุนายน 2536 กับค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ ในปี 2537 และ 2539.....	75
58. แสดงการไหลของสนามแม่เหล็กของจุดดับบนดวงอาทิตย์.....	76
59. แสดงจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือนกับค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ $F_{10.7}$	77
60. แสดงจุดดับบนดวงอาทิตย์ต่อวัน ค่าเฉลี่ยต่อเดือน และค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ R_{12}	78
61. แสดงการทำนายจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีในวัฏจักรที่ 23.....	79
62. แสดงปริมาณอิเล็กตรอน TEC สูงที่สุดของค่าเฉลี่ยต่อเดือนในแต่ละปีเปรียบเทียบกัน.....	79
63. แสดงปริมาณอิเล็กตรอน TEC สูงที่สุดของค่าเฉลี่ยต่อเดือนในเดือนธันวาคมของแต่ละปี เปรียบเทียบกับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ R_{12}	80
64. แสดงแกนแม่เหล็กของโลกและแกนหมุนของโลก.....	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

65. แสดงเส้นรุ้งแม่เหล็กของโลก.....	82
66. แสดงค่าเฉลี่ยทุก ๆ 1 ชม. ของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รอน TEC ทั้ง 3 สถานีวัด ในช่วง 21 มิ.ย. ถึง 27 มิ.ย. 2539.....	84
67. แสดงค่าสูงที่สุดของค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รอน TEC กับเส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก และค่าจากแบบจำลอง IRI-90 ในช่วง 21 ถึง 27 มิ.ย. 2539.....	86
68. แสดงค่าความถี่วิกฤตของชั้น F_2 กับเส้นรุ้งแม่เหล็ก.....	86
69. แสดงรูปการเกิด Fountain effect ในแถบศูนย์สูตร.....	87
70. แสดงเส้นทางที่เงามืดพาดผ่านประเทศไทยในวันที่ 24 ตุลาคม 2538.....	88
71. แสดงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่อำเภอคลองขลุง จังหวัดกำแพงเพชร.....	89
72. แสดงรูป TEC meter (Turbo Rogue ICS-4000Z).....	89
73. แสดงรูปสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS.....	90
74. แสดงรูปอุปกรณ์เซนเซอร์.....	90
75. (ก) แสดงผลการวัดปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รอน TEC ที่กรุงเทพฯ ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 และค่าเฉลี่ยในวันที่ 21-23 ตุลาคม 2538.....	91
(ข) แสดงผลการวัดปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รอน TEC ที่เชียงใหม่ ในวันที่ 24 ตุลาคม และค่าเฉลี่ยในวันที่ 21-23 ตุลาคม 2538.....	91
76. แสดงข้อมูลทางอุณหภูมิจากสถานีวัดที่ได้โดยอุปกรณ์เซนเซอร์ที่อำเภอคลองขลุง.....	92
77. แสดงกราฟการเปรียบเทียบปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รอนในวันที่ 21-24 ตุลาคม 2538 ที่อำเภอคลองขลุง ซึ่งวัดได้โดย TEC meter (Turbo Rogue ICS-4000Z).....	93
78. แสดงค่าเฉลี่ย TEC ของทั้ง 2 สถานีรวมกันในเดือนตุลาคม 2538.....	95
79. แสดงผลจากการวิเคราะห์ค่า m , C และ p ระหว่าง 2 สถานี ตั้งแต่ตุลาคม 2538 จนถึง ธันวาคม 2539.....	95
80. แสดงโครงสร้างความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์รอนของแบบจำลอง IRI.....	98
81. แสดงตัวอย่างผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม IRI-90 ที่กรุงเทพฯ ในวันที่ 15 มีนาคม 2537 เวลา 14.00 น.....	100

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

82.(ก) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนมกราคม 2537.....	101
(ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนมีนาคม 2537.....	101
(ค) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนกรกฎาคม 2537.....	101
(ง) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2538.....	102
(จ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2538.....	102
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนพฤษภาคม 2539.....	102
(ช) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนกรกฎาคม 2539.....	103
(ซ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2539.....	103
(ณ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2539.....	103
83.(ก) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2538.....	104
(ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2538.....	104
(ค) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนพฤษภาคม 2539.....	104
(ง) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนกรกฎาคม 2539.....	105

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
(จ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2539.....	105
(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2539.....	105
84. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ National Geophysical Data Center.....	118
85. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ National Space Science Data Center.....	119
86. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ NOAA Space Environment Center.....	120
87. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ Northwest Research Associates, Inc.	121
88. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ TRS Consultant.....	122
89. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ JPL.....	123
90. (ก) แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ CRL.....	124
(ข) แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ Hiraiso Solar Terrestrial Research Center.....	124
91. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ GPS ของมหาวิทยาลัย TEXAS.....	125
92. แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ Sunspot Index Data Center (SIDC).....	126
93. (ก) แสดงไฟล์ซารัทของโปรแกรม AVG.PAS.....	133
(ข) แสดงไฟล์ซารัทของส่วนย่อย A ของโปรแกรม AVG.PAS.....	134
(ค) แสดงไฟล์ซารัทของส่วนย่อย B ของโปรแกรม AVG.PAS.....	135
94. แสดงรูปดาวเทียม GPS บล็อก I.....	136
95. แสดงรูปดาวเทียม GPS บล็อก II และ IIA.....	137

บทที่ 1

บทนำ

กล่าวนำ

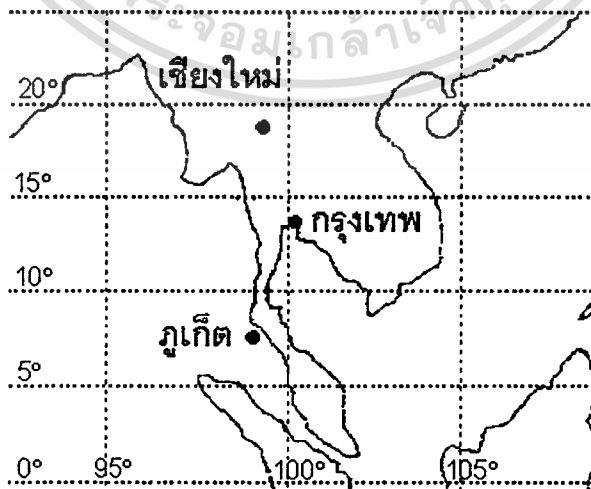
ในปัจจุบันการสื่อสารดาวเทียมมีส่วนสำคัญในการติดต่อสื่อสารอย่างมากและแพร่หลาย เช่นการแพร่ภาพสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม(ซึ่งใช้ความถี่ย่าน Ku-band และ C-band) การโทรศัพท์ติดต่อระหว่างประเทศ การนำร่องโดยใช้สัญญาณดาวเทียม GPS (ซึ่งใช้ความถี่ย่าน L-band) ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ดาวเทียมเป็นสถานีฐาน เช่นระบบอิริเดียม (ซึ่งใช้ความถี่ย่าน L แบนด์ และ S แบนด์) แต่การสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้นจะมีผลกระทบ เนื่องมาจากคลื่นสัญญาณที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระดับสัญญาณและลักษณะของคลื่น ซึ่งผลกระทบต่าง ๆ นั้นส่วนใหญ่จะเป็นผลมาจากชั้นบรรยากาศหลัก 2 ชั้นบรรยากาศคือ โทรโพสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์[1],[2] ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นั้นจะเกิดการลดทอนของระดับสัญญาณอันเนื่องมาจากการตกของฝนที่ความถี่ของสัญญาณสูง ๆ เช่น Ku-band [3] ส่วนผลกระทบเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะเกิด time-delay ซึ่งจะทำให้สัญญาณมาถึงจุดที่รับสัญญาณช้ากว่าการเดินทางของคลื่นในระยะทางตรง ผลจากการเกิดฟาราเดย์โรเทชัน(Faraday rotation) ซึ่งจะทำให้มุมโพลาไรซ์ของสัญญาณนั้นเกิดการหมุนไปจากมุมเดิม และผลของการแกว่งของสัญญาณอย่างกะทันหัน(scintillation) ซึ่งจะทำให้ระดับสัญญาณเกิดการแกว่งขึ้น ๆ ลง ๆ ซึ่งเกิดเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างที่มีความไม่สม่ำเสมอ และปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในชั้นย่อยต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเวลา ฤดูกาลหรือปัจจัยอื่น ๆ [4] โดยผลกระทบทั้งหมดนี้ส่วนมากจะเกิดผลกระทบรุนแรงที่ความถี่ที่ต่ำกว่าย่าน C-band จึงต้องมีการวิเคราะห์หารูปแบบลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่ โดยวิเคราะห์ถึงปริมาณ, การเปลี่ยนแปลง และความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอน[5] ซึ่งการหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนนั้นมีหลายวิธี ซึ่งผลก็จะได้ค่าต่าง ๆ กันเช่น ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน หรือค่าความถี่วิกฤต ซึ่งจะมีประโยชน์ในการศึกษาในระบบวิทยุ AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในการสื่อสารดาวเทียมนั้น ค่าตัวแปรที่มีส่วนสำคัญมากในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับผลกระทบต่าง ๆ ของการสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดินนั้น คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่เรียกว่า Total Electron Content (TEC) [6]

การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน (TEC) ในกรุงเทพมหานคร สถานที่ตั้งของอุปกรณ์การทดลองนั้นติดตั้งอยู่ที่ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก รวมถึงการวัดที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยที่สถานที่ตั้งของอุปกรณ์การทดลองนั้นติดตั้งอยู่ที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดภูเก็ต ที่ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต โดยการทดลองนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการร่วมมือ PARTNERS Project ซึ่งร่วมมือกับ Communications Research Laboratory (CRL) ซึ่งเป็นหน่วยงานในกระทรวง Ministry of Post and Telecommunications (MPT) ประเทศญี่ปุ่น ส่วนตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีที่วัดค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC [7] จะแสดงดังภาพที่ 1 และตารางที่ 1

ภาพที่ 1



แสดงตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีที่วัดค่าปริมาณ TEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1

สถานที่ทดลอง	พิกัดทางภูมิศาสตร์	
	เส้นรุ้ง	เส้นแวง
เชียงใหม่	18.8°N	99.0°E
กรุงเทพ	13.7°N	100.8°E
ภูเก็ต	7.9°N	98.4°E

แสดงรายละเอียดพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ทดลอง

ตารางที่ 2

สถานีวัด / ปี	2536	2537	2538	2539	2540
เชียงใหม่			ต.ค.	←→	ธ.ค.
กรุงเทพ	พ.ย.	←→	มิ.ย. / ต.ค.	←→	ธ.ค.
ภูเก็ต				22 มิ.ย.	←→ 27 มิ.ย.

แสดงรายละเอียดของช่วงเวลาที่ใช้ทดลองวัดและบันทึกค่า

ช่วงเวลาของการศึกษานั้นช่วงเวลาเป็นที่ครอบคลุมช่วงจุดดับบนดวงอาทิตย์กำลังลดลง และช่วงที่มีค่าต่ำที่สุดในรอบ 11 ปี รวมข้อมูลที่ทำการศึกษาวิเคราะห์นั้นทั้งหมดได้เป็น 47 เดือน(รวมทุกสถานี) โดยการวัดที่ภูเก็ตนั้นมีปัญหาคาการติดตั้งจึงทำให้บันทึกข้อมูลได้ 6 วัน

วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณและการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์(Total Electron Content: TEC) เนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้จะมีผลกระทบต่อการเดินทางของคลื่นสัญญาณจากดาวเทียมในเวลาต่าง ๆ ซึ่งแบ่งการศึกษาเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในรูปแบบความสัมพันธ์กับเวลาในแต่ละวัน, ค่าปริมาณและการเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาล และต่อปีหลายปีเปรียบเทียบกับกัน และในสถานที่ต่างกันในประเทศไทย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมี กรุงเทพฯ เชียงใหม่และภูเก็ต เพื่อศึกษาว่าจะมีลักษณะต่างกันอย่างไรและมีปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างไร แล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อใช้ในการทำนายความถี่ของผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงลักษณะของสัญญาณหรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้ดีขึ้น และมีประสิทธิภาพ หรือเพื่อใช้ในการประมาณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ที่วันเวลาต่าง ๆ ในประเทศไทย หรือเป็นข้อมูลทางสถิติ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบดาวเทียม หรือพัฒนาระบบอย่างเหมาะสมต่อไป

รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงเนื้อหาเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ และประโยชน์ของการศึกษา ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงสถานที่และช่วงเวลาที่ทำการศึกษา วัดและบันทึกค่าดังที่กล่าวมา โดยในบทต่อไปจะมีรายละเอียดเนื้อหาดังนี้

บทที่ 2 เกี่ยวกับลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สมการพื้นฐานในการคำนวณผลกระทบของคลื่นสัญญาณดาวเทียมที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

บทที่ 3 เกี่ยวกับหลักการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้สัญญาณจากดาวเทียม GPS ซึ่งจะกล่าวถึงระบบดาวเทียมนำร่อง GPS และวงโคจรอย่างคร่าว ๆ รวมถึงสมการพื้นฐานในการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์จากสัญญาณดาวเทียม GPS, อุปกรณ์และวิธีการทดลอง และหลักการวิเคราะห์ที่ใช้วิธีการทางสถิติ

บทที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งจะวิเคราะห์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่แปรเปลี่ยนตามปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้คือ การเปลี่ยนแปลงต่อเวลาระหว่างวัน, ฤดูกาล, วัฏจักรสุริยะ, เส้นรุ้งแม่เหล็ก, การเปลี่ยนแปลงในช่วงการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา และความสัมพันธ์ของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ในรูปแบบต่าง ๆ

บทที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการประมาณจากแบบจำลองอื่น

บทที่ 6 จะเกี่ยวกับการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง วิเคราะห์ และเปรียบเทียบทั้งหมด

บทที่ 2

ผลกระทบของปริมาณและการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อสัญญาณจากดาวเทียม

กล่าวนำ

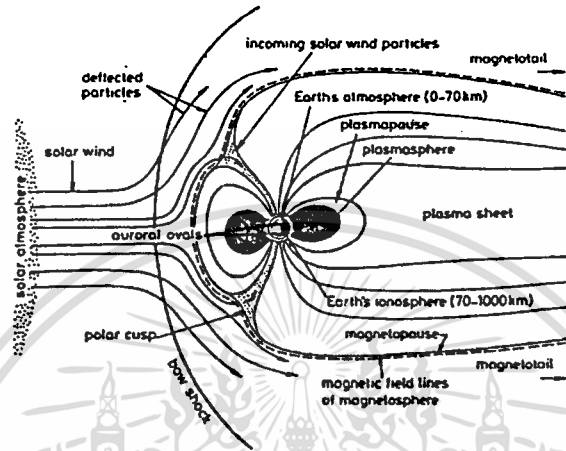
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เริ่มมีความสำคัญเมื่อมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์ได้เมื่อปี ค.ศ. 1901 โดย Marconi ได้ประสบความสำเร็จในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก [1] โดยที่ก่อนหน้านี้การส่งสัญญาณวิทยุส่งได้ประมาณ 200-300 กิโลเมตรเท่านั้น ซึ่งการศึกษาต่อมาได้อธิบายโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบน(diffraction) ของคลื่นดิน(ground wave) ซึ่งต่อมาพบว่าการทดลองของ Marconi นั้นไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นดินเพียงอย่างเดียว จึงสรุปว่าต้องมีการเดินทางของคลื่นในลักษณะอื่นนอกจากใช้ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่น ปี ค.ศ. 1902 Heaviside ได้เสนอแนวความคิดที่ว่าการศึกษาคลื่นวิทยุสามารถเดินทางได้ไกลมากนั้นน่าจะมีการสะท้อนจากชั้นบรรยากาศที่มีโมเลกุลหรืออะตอมของชั้นบรรยากาศเมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ก็จะเกิดการแตกตัวซึ่งเรียกว่ากระบวนการไอออไนเซชัน การที่คลื่นสามารถเดินทางได้ไกลนั้นคลื่นสัญญาณวิทยุจะมีการสะท้อนไปมาระหว่างชั้นบรรยากาศนี้กับพื้นดินหลายครั้งจนมาถึงเครื่องรับ [8] ปีค.ศ. 1925 Appleton และ Barnett ใช้เครื่องส่งวิทยุของ BBC ในการทดลอง ซึ่งมีการพบชั้นย่อยต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศนี้ซึ่งให้ชื่อเรียกว่า ชั้น E และชั้น F จากคำว่า “Electric” และ “Field” ซึ่งหลังจากนั้นก็ได้มีการค้นพบชั้นย่อยที่ต่ำกว่าชั้น E และชั้น F อีก 2 ชั้นจึงตั้งชื่อตามตัวอักษรว่า ชั้น D และชั้น C ช่วงแรกมีการใช้ชื่อชั้นบรรยากาศนี้หลายชื่อเช่น “Heaviside layer” หรือ “Appleton layer” จึงทำให้ Plendl ได้เสนอชื่อชั้นบรรยากาศนี้ว่า “Ionosphere” และต่อมาได้มีการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อย่างแพร่หลาย จึงกลายเป็นการศึกษาแขนงใหม่ซึ่งเรียกว่า “Ionosphere physics”

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่มีการไอออไนซ์ของก๊าซ มีขอบเขตประมาณ 50-2,000 กม.เหนือพื้นโลก เนื้อชั้นไอโอโนสเฟียร์คือชั้นพลาสมาสเฟียร์หรือโปรโตโนสเฟียร์ ซึ่งก็ยังคงมีอิเล็กตรอนอิสระหลงเหลืออยู่ ซึ่งทั้ง 2 ชั้นอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กของโลกซึ่งเรียกว่าชั้น แมก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่คือเพียร์ที่ทำหน้าที่ต่อต้านลมสุริยะ (Solar wind) ที่เกิดจากการขยายตัวของบรรยากาศชั้นนอกของดวงอาทิตย์ ปฏิกริยาระหว่างดวงอาทิตย์กับโลกสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2

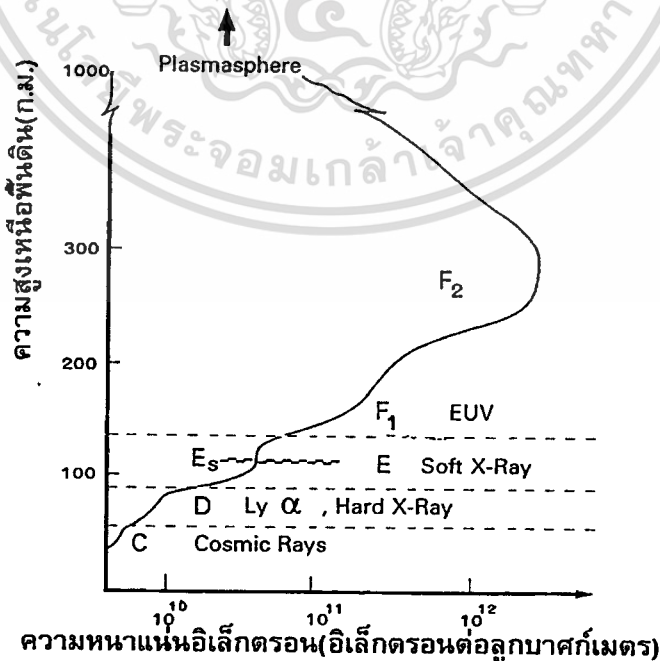
ภาพที่ 2



แสดงปฏิกริยาระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก

โครงสร้างของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4

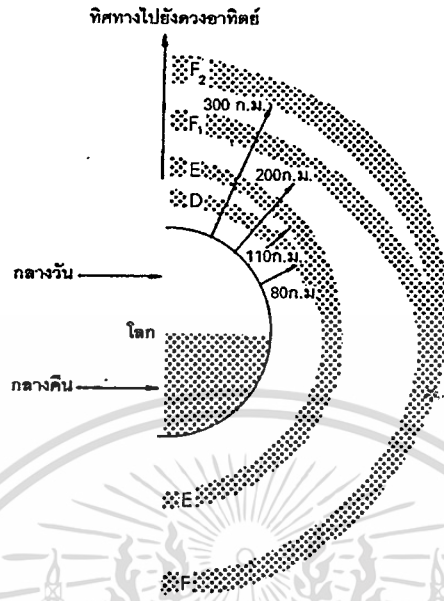
ภาพที่ 3



แสดงโครงสร้างความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4



แสดงชั้นย่อยต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

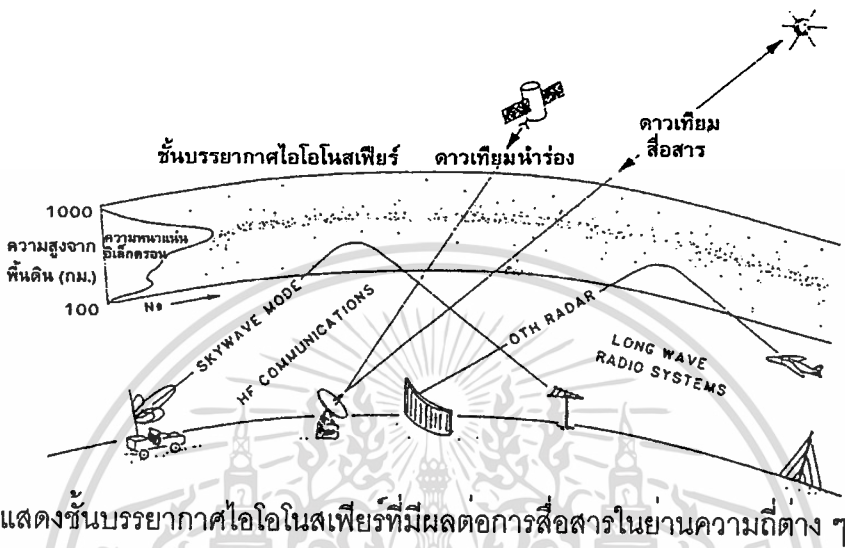
จากภาพที่ 3 และ 4 ลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์(4) จะแบ่งเป็นชั้นย่อย ๆ ได้ดังนี้

1. ชั้น F (140 กม. ขึ้นไป) ประกอบด้วย 2 ชั้นคือ F₁ และ F₂ ซึ่งเกิดจากแสงอาทิตย์ในย่าน Extreme Ultra Violet (EUV) ชั้น F₁ และ F₂ จะเกิดในเวลากลางวันซึ่งเวลากลางคืนชั้นทั้ง 2 จะรวมกันเป็นชั้นเดียวคือชั้น F
2. ชั้น E (90 กม. - 140 กม.) ประกอบด้วยชั้น E ธรรมดา และชั้น Sporadic E (Es) ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว เกิดจากแสงอาทิตย์ที่อยู่ในย่าน Soft X-Rays
3. ชั้น D (60 กม. - 90 กม.) เกิดจากแสงอาทิตย์ในย่าน Ly α, Hard X-Rays
4. ชั้น C (50 กม. - 60 กม.) เกิดจากแสงอาทิตย์ในย่าน Cosmic Rays

การเกิดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์(8) สามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการแตกตัวของก๊าซอันเนื่องมาจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นเมื่อมีแสงอัลตราไวโอเล็ตมาก(ถ้าความสูงจากพื้นดินมาก ปริมาณแสงอัลตราไวโอเล็ตก็จะมาก) และมีโมเลกุลของก๊าซมาก(คือที่ที่ความกดดันอากาศสูงซึ่งความสูงจากพื้นดินมีค่าน้อย) แสดงว่าที่ความสูงจากพื้นดินจุดหนึ่งจะมีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระที่แตกตัวเกิดขึ้นมาก ซึ่งก็คือความสูงที่ตรงกับชั้น E นั่นเอง แต่อิเล็กตรอนอิสระนี้จะสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระเมื่อชนกับไอออนบวกซึ่งเกิดจากอะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่(Recombination process) ในชั้น E ได้ง่ายกว่าชั้น F ซึ่งมีความสูงจากพื้นดินมากกว่าทำให้ความกดดันอากาศน้อยกว่า เนื่องจากชั้น F มีการรวมตัวกันใหม่ได้ยากกว่า จึงเป็นสาเหตุที่ชั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F มีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากกว่าชั้น E ทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F นั้นจะมากกว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนใน ชั้น E นั้นเอง

ภาพที่ 5



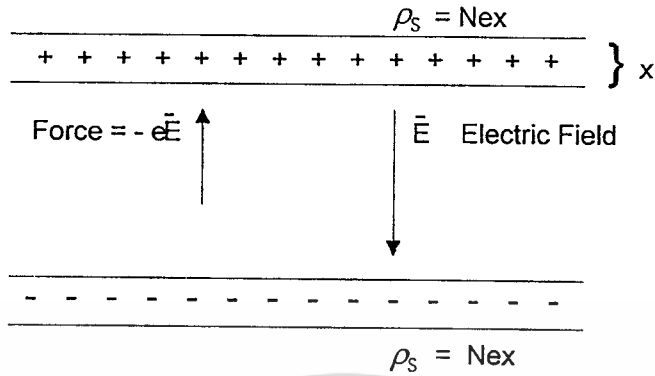
ผลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการสื่อสารในย่านความถี่ต่าง ๆ มีดังนี้

1. ย่านความถี่ LF และ MF ใช้ในงานประเภทการกระจายเสียงวิทยุซึ่งจะใช้ชั้น E และ ชั้น D ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการสะท้อนคลื่น
2. ย่านความถี่ VHF และ ย่านความถี่ดาวเทียม สัญญาณจากดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะถูกผลกระทบต่าง ๆ ซึ่งตัวแปรของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สำคัญตัวหนึ่งในการใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์ก็คือปริมาณ Total Electron Content หรือ TEC ซึ่งจะกล่าวถึงนิยามในหัวข้อต่อไป

ทฤษฎีพื้นฐาน

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะพิจารณาได้ว่าเป็นชั้นที่ประกอบด้วยก๊าซไอออนไนซ์ชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่าพลาสมา[4] โดยที่ในธรรมชาตินั้นประกอบด้วยประจุบวก(ไอออน)และประจุลบ(อิเล็กตรอน) ในปริมาณที่เท่ากัน ในกรณีนี้คือเราจะศึกษาพลาสมาที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนในปริมาณที่เท่ากับไอออนบวก โดยมีแรงบอนด์ผูกประจุในสนามไฟฟ้า E ที่เกิดจากขั้วของแผ่นประจุไฟฟ้าธรรมชาติของพลาสมา ดังแสดงดังภาพ

ภาพที่ 6



แสดงแรงบนอนุภาคประจุในสนามไฟฟ้า E ที่เกิดจากชั้นของแผ่นประจุไฟฟ้าธรรมชาติของพลาสมา

จากภาพได้ค่าความหนาแน่นประจุพื้นผิว (Surface charge density) ρ_s คือ

$$\rho_s = Nex \quad (\text{C/m}^2) \quad (2.1)$$

เมื่อ N คือ ความหนาแน่นอนุภาค(อิเล็กตรอนหรือไอออนบวก) (จำนวนอนุภาค/เมตร³)

e คือ ประจุไฟฟ้า = 1.6×10^{19} (C)

x คือ ความหนาของแผ่นประจุไฟฟ้าธรรมชาติ (เมตร)

ดังนั้นจาก

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} \quad (2.2)$$

เมื่อ m คือ มวลอิเล็กตรอน = 9.1×10^{-31} (กิโลกรัม)

v คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (เมตร/วินาที)

ถ้าเป็น สนามแบบ Sinusoidal [9] สามารถเขียนได้เป็น

$$j\omega m \vec{v} = -e\vec{E} \quad (2.3)$$

ค่ากระแสเหนี่ยวนำของพลาสมา(ไอออนไนซ์ก๊าซ) จะได้ดังสมการ

$$\vec{J} = -\rho_v \vec{v} = \frac{Ne^2}{j\omega m} \vec{E} \quad (\text{A/m}^2) \quad (2.4)$$

เมื่อ ρ_v คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า = $\frac{\rho_s}{x} = Ne$ (C/m³)

จากสมการแมกซ์เวลล์เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_0\vec{E} + \vec{J} = j\omega\epsilon_0\left(1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m\epsilon_0}\right)\vec{E} \quad (2.5)$$

เราก็จะสามารถหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสมา (ϵ_r) ซึ่งสัมพันธ์กับดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้ดังนี้คือ

$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_N^2}{\omega^2} = n^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ n คือ ดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

$$\text{และ } \omega_N^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \quad (2.7)$$

เมื่อ ω_N คือ ความถี่เชิงมุมของพลาสมา

ความถี่พลาสมา นั้นจะเป็นอิสระต่อสัญลักษณ์ของประจุ เราสามารถหาค่าความถี่พลาสมาออกมาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก } \omega &= 2\pi f \\ \text{จะได้ } \omega_N^2 &= 4\pi^2 f_N^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

เมื่อ f_N คือ ความถี่พลาสมา [Hz]

เมื่อแทนลงในสมการที่ (2.7) จะได้ความถี่พลาสมาออกมาดังสมการ

$$f_N^2 = \frac{Ne^2}{4\pi^2\epsilon_0 m} \approx 80.6N \quad (2.9)$$

$$f_N = 8.9788 \times 10^{16} \sqrt{N} \quad [\text{MHz}] \quad (2.10)$$

พลาสมา นั้นเป็นก๊าซประจุไฟฟ้าซึ่งในอะตอมแต่ละอะตอมจะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว หลุดออกมา โดยที่เหลือในอะตอมพลาสมาจะเป็นประจุบวก ซึ่งความถี่พลาสมา ก็จะประกอบด้วย ทั้งความถี่อิเล็กตรอนและความถี่ไอออนบวก แต่ในความถี่สัญญาณหนึ่ง ๆ นั้นจะถูกครอบคลุมโดยอิเล็กตรอนอิสระเป็นส่วนมากจึงทำให้ความถี่พลาสมา นั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนอย่างเดียว ซึ่งสมการที่ (2.10) ค่า N นั้นจากนี้จะกำหนดให้เป็นความหนาแน่นอิเล็กตรอน (อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร)

จากความถี่พลาสมาเราก็จะสามารถหาความถี่วิกฤตของคลื่นสัญญาณได้โดยอ้างอิงจาก ดัชนีการหักเหของคลื่นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จาก [1] คลื่นแบบ Ordinary wave เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(คุณสมบัติของคลื่นแสดงในแผนภูมิที่ 7) ซึ่งมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแนวสนามแม่เหล็กโลกและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กโลก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในแนวทิศทางเดียวกับเส้นแรงคงที่ของสนามแม่เหล็กโลกโดยที่ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น จะได้ค่าดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$n^2 = 1 - \frac{f_N^2}{f^2} \tag{2.11}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของคลื่นสัญญาณ [Hz]

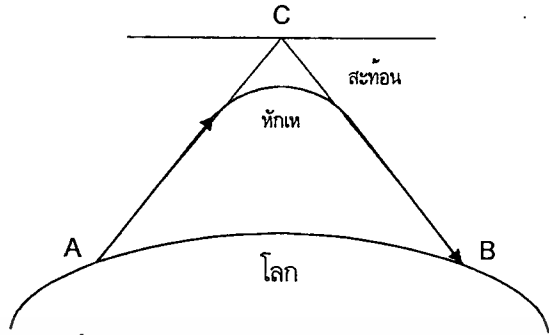


เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า

B คือ สนามแม่เหล็กโลก

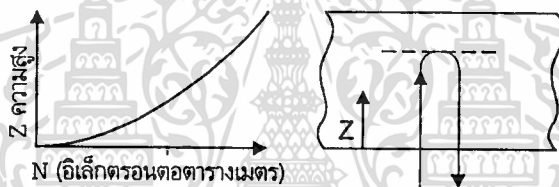
จากสมการ (2.11) จะเห็นว่าถ้าความถี่ของคลื่นสัญญาณ (f) น้อยกว่าความถี่พลาสมา (f_N) มาก ๆ ค่าดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเป็นจำนวนจินตภาพทำให้คลื่นสัญญาณถูกลดทอนจนหมด ถ้าความถี่ของคลื่นสัญญาณ (f) น้อยกว่าความถี่พลาสมา (f_N) แต่ใกล้เคียงกันจะทำให้ค่าดัชนีการหักเหเป็นจำนวนบวกน้อยกว่า 1 คลื่นสัญญาณจะเกิดการหักเหโดยที่ส่วนใหญ่นั้นเป็นการยากที่จะแยกคลื่นที่สะท้อนหรือหักเห จากภาพที่ 8 คลื่นสัญญาณที่จุด B นั้นสามารถมีสัญญาณจากการหักเหจากจุด A และสะท้อนที่ชั้นย่อยของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่จุด C

ภาพที่ 8

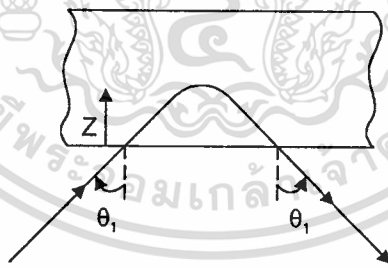


แสดงการสะท้อนและหักเหสัญญาณที่ส่งจากจุด A ไปยังจุด B

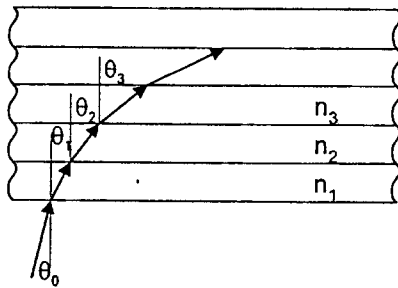
ภาพที่ 9



ก.) แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่อความสูงและการสะท้อนในแนวตั้ง



ข.) แสดงการหักเหของสัญญาณในแนวเอียง



ค.) แสดงแบบจำลองของความหนาแน่นไอโอโนสเฟียร์ที่คลื่นเดินทางผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 9 จากกฎของสเนลจะได้ความสัมพันธ์ของดัชนีการหักเหและทิศทางของคลื่น ดังนี้[10]

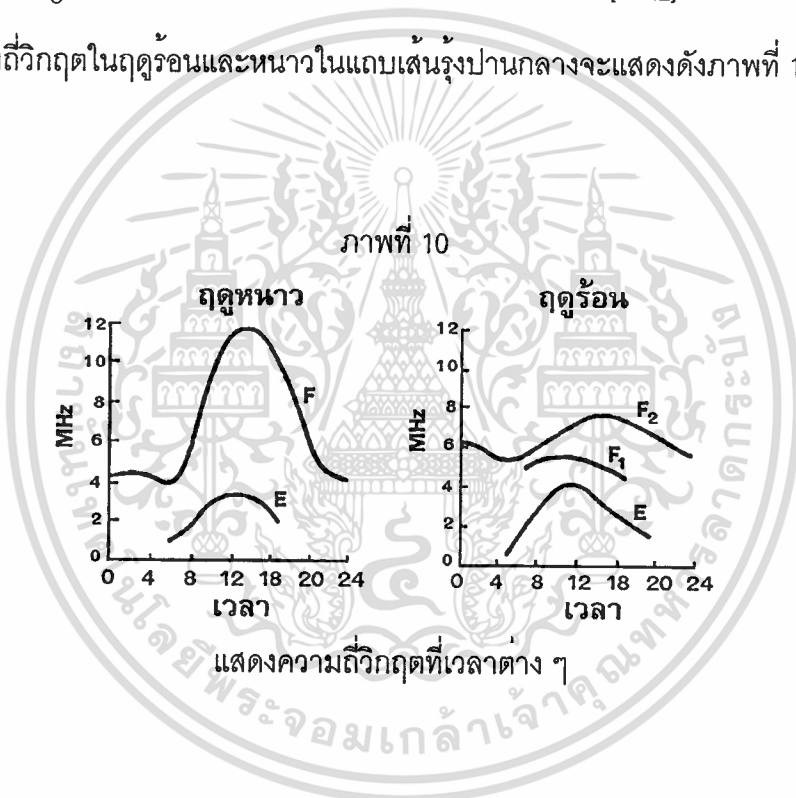
$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3 = n_n \sin \theta_n = \dots \tag{2.12}$$

ส่วนความถี่วิกฤตหรือ f_0 นั้นคือความถี่สูงสุดของคลื่นสัญญาณที่จะมีการหักเหบางส่วนมายังพื้นโลกเมื่อส่งคลื่นขึ้นไปในแนวตั้ง ($\theta_0=0^\circ$) ความถี่ที่สูงกว่านี้จะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศนี้ไป นั่นคือดัชนีการหักเหจะเท่ากับ 0 เพราะฉะนั้นความถี่วิกฤตก็จะเท่ากับความถี่พลาสมา

$$f_0 = 8.9788 \times 10^{16} \sqrt{N} \tag{2.13}$$

[MHz]

ความถี่วิกฤตในฤดูร้อนและหนาวในแถบเส้นรุ้งปานกลางจะแสดงดังภาพที่ 10



ส่วนในคลื่นที่หักเหมายังโลกโดยการส่งแบบเอียงนั้นจะหาได้จากสมการดังนี้

$$f = f_0 \sec \theta_1 \tag{2.14}$$

เมื่อ f คือ maximum usable frequency (MUF) [Hz]

ค่าสูงสุดของมุมตกกระทบที่ทำให้ MUF มีค่ามากที่สุดคือประมาณ 74 องศา เพราะฉะนั้นจากสมการ (2.14) จะได้

$$MUF = f_{\max} = 3.6f_0 \tag{2.15}$$

ดัชนีการหักเหของสัญญาณดาวเทียมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารดาวเทียมนั้นอยู่ในย่านความถี่ที่สูงกว่าความถี่วิกฤตมาก แต่สัญญาณนั้นก็จะมีการหักเหอยู่ ซึ่งจะทำให้สัญญาณจะมีเวลาหน่วง (group delay) เพิ่มขึ้น และเฟสเปลี่ยนไปจึงต้องศึกษาถึงความเร็วกลุ่มและความเร็วเฟส จากสมการของ Rayleigh [11]

$$v_{gr} = v_{ph} - \lambda \frac{dv_{ph}}{d\lambda} \quad (2.16)$$

เมื่อ v_{gr} คือ ความเร็วกลุ่มของคลื่นสัญญาณ

v_{ph} คือ ความเร็วเฟสของคลื่นสัญญาณ

λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นสัญญาณ

คลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางนั้นความเร็วจะขึ้นอยู่กับดัชนีการหักเห (n) โดยทั่วไปความเร็วในการเดินทางของคลื่น (v) หาได้จาก

$$v = \frac{c}{n}$$

เมื่อ c คือ ความเร็วแสง

การประยุกต์สมการนี้ไปเป็นความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่มโดยใช้ค่าดัชนีการหักเหที่สอดคล้องกันได้ดังนี้

$$v_{ph} = \frac{c}{n_{ph}} \quad \text{และ} \quad v_{gr} = \frac{c}{n_{gr}} \quad (2.17)$$

เมื่อแทนไปในสมการที่ (2.16) แล้วใช้วิธีปรับเปลี่ยนสมการ Rayleigh จะได้ความสัมพันธ์ของดัชนีการหักเหกลุ่มและดัชนีการหักเหเฟสดังนี้

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df} \quad (2.18)$$

ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตั้งแต่ความสูง 50-1,000 กิโลเมตรเหนือพื้นโลกเป็นตัวอย่างแบบ Dispersive ซึ่งจาก [11] ดัชนีการหักเหของเฟสสามารถประมาณได้ดังนี้

$$n_{ph} = 1 + \frac{C_2}{f^2} + \frac{C_3}{f^3} + \frac{C_4}{f^4} + \dots \quad (2.19)$$

โดยที่ C_2, C_3, C_4 คือค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ แต่ขึ้นกับปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวทางการแพร่กระจายคลื่น โดยที่ใช้การประมาณโดยตัดส่วนขยายของเทอมควอดราติกจะได้

$$n_{ph} = 1 + \frac{C_2}{f^2} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.11) นั้นเป็นดัชนีการหักเหของเฟสดังนี้

$$n_{ph} = \sqrt{1 - \frac{80.6N^2}{f^2}} \quad (2.21)$$

เราสามารถใช้ในการกระจายเทอมในรากที่ 2 ของสมการที่ (2.21) โดยใช้สมการดังนี้ [12]

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots \quad (2.22)$$

โดยที่ $|nx| < 1$

เมื่อประมาณโดยใช้ 2 เทอมแรกของสมการที่ (2.22) จะได้ดัชนีการหักเหเฟสจากสมการ (2.21) ดังนี้

$$n_{ph} = 1 - \frac{40.3N}{f^2} \quad (2.23)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.20) จะเห็นว่า $C_2 = -40.3N$ แทนในสมการที่ (2.18) ได้ดัชนีการหักเหกลุ่มดังนี้

$$n_{gr} = 1 + \frac{40.3N}{f^2} \quad (2.24)$$

เนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอน (N) มีค่าเป็นบวกเสมอจะเห็นว่าดัชนีการหักเหกลุ่มนั้นจะมากกว่าดัชนีการหักเหเฟสเสมอ ดังนั้นการเดินทางของคลื่นสัญญาณนั้นจะต้องผ่านตัวกลางที่มีดัชนีการหักเหไม่เท่ากับ 1 นั้นจะทำให้ระยะทางที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับนั้นจะไม่เท่ากับระยะทางจริงซึ่งจะมีผลกระทบของเวลาหน่วงและเฟสก้าวหน้า (Phase advance) นั้น สามารถหาได้โดยทฤษฎีของ Fermat ซึ่งการวัดระยะทาง S ซึ่งแสดงดังภาพที่ 11 มีนิยามดังนี้

$$S = \int n ds_0 \quad (2.25)$$

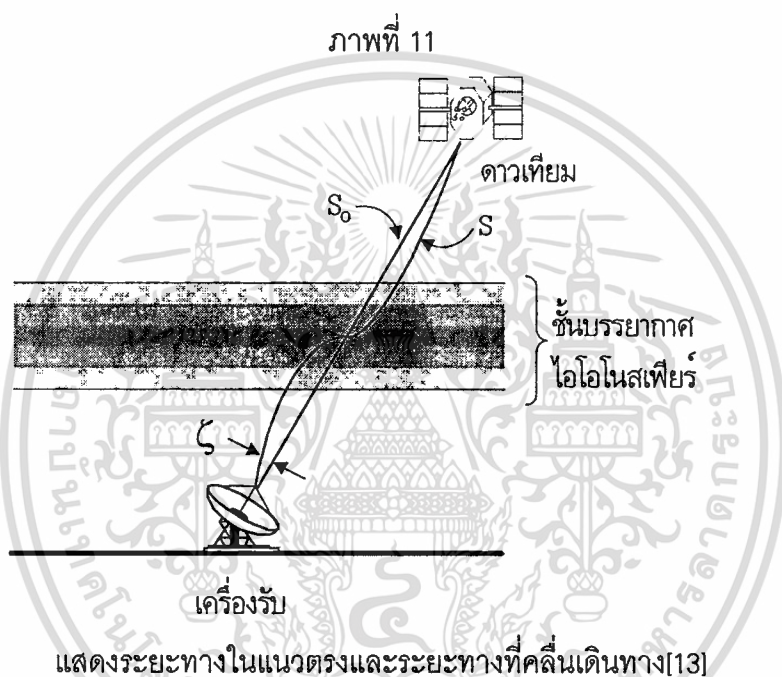
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการวัดระยะทางตรงในแนวดาวเทียมกับเครื่องรับจะหาได้โดยกำหนดให้ $n=1$ ดังนี้

$$S_0 = \int dS_0 \quad (2.26)$$

ความแตกต่างของระยะทางที่วัดได้กับระยะทางจริงจะเรียกว่า ΔR

$$\Delta R = \int n dS_0 - \int dS_0 \quad (2.27)$$



แทนค่าดัชนีการหักเหกลุ่มจากสมการที่ (2.24) จะได้

$$\Delta R_{gr} = \int \left(1 + \frac{40.3N}{f^2}\right) dS_0 - \int dS_0 \quad (2.28)$$

จะได้

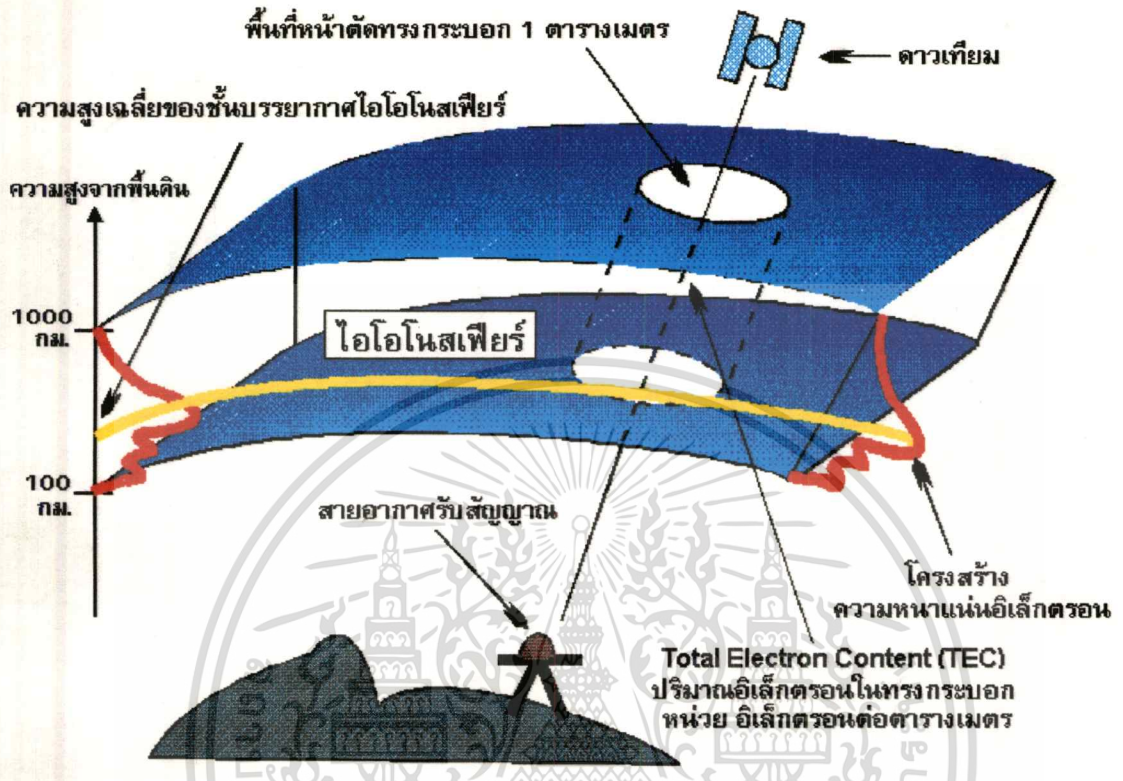
$$\Delta R_{gr} = \frac{40.3}{f^2} \int N dS_0 \quad (2.29)$$

เราจะนิยามเทอมอินทิเกรตให้เป็นค่า Total Electron Content ดังนี้

$$\int N dS_0 = TEC \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 12



แสดงค่าจำกัดความของ Total Electron Content

จากภาพที่ 12 และสมการที่ (2.30) ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอไอโนสเฟียร์ หรือ Total Electron Content คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดในชั้นบรรยากาศไอไอโนสเฟียร์ ในพื้นที่ 1 ตารางเมตรจากดาวเทียมมายังสถานีภาคพื้นดิน (หลังจากนี้จะเรียกว่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC) มีหน่วยเป็น อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร

จากสมการที่ (2.29) จะได้ค่าระยะทางที่เพิ่มขึ้นดังนี้

$$\Delta R_{gr} = \frac{40.3}{f^2} TEC \tag{2.31}$$

ส่วนความคลาดเคลื่อนระยะทางเฟสจะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับความคลาดเคลื่อนระยะทางกลุ่ม

$$\Delta R_{ph} = -\frac{40.3}{f^2} TEC \tag{2.32}$$

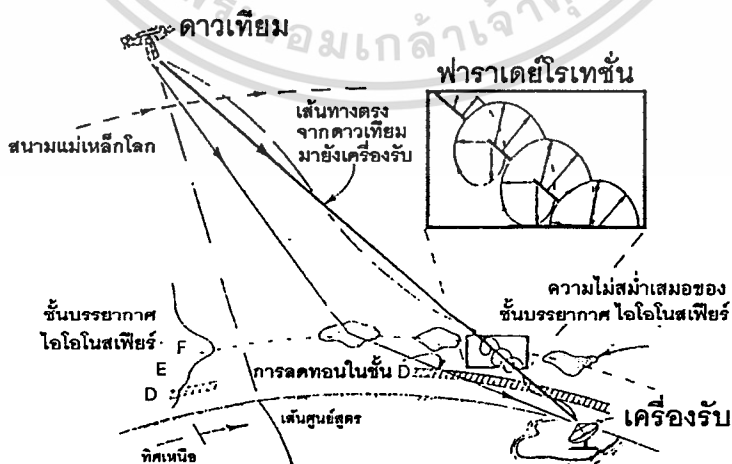
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อสัญญาณดาวเทียม

ผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อสัญญาณดาวเทียมนั้นมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะในย่านที่มีความถี่ต่ำคุณสมบัติต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุดาวเทียม [6] มีดังนี้

1. Dispersive ดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นฟังก์ชันกับความถี่และความเร็วกลุ่มจะไม่เท่ากับความเร็วเฟส
 2. Absorptive ในแถบขั้วโลกดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งมีทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ การลดทอนนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของคลื่นไปในกระบวนการชนกันของอนุภาค (Collision process) ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
 3. Birefringent ดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มี 2 ค่าไม่เท่ากันเนื่องจากการมีอยู่ของสนามแม่เหล็กโลกและโมบิลิตี้ของอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งคุณสมบัตินี้อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น 2 ทางที่มีความเร็วกลุ่มและความเร็วเฟสต่างกัน
 4. Anisotropic แต่ละดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ 2 ดัชนีนั้นจะต่างเป็นฟังก์ชันของการเรียงตัวของผิวของ constant wave phase ที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กโลก
- จากคุณสมบัติดังกล่าว ผลกระทบต่าง ๆ ของคลื่นสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะแบ่งได้หลายประเภทจากภาพที่ 13 ดังนี้

ภาพที่ 13



แสดงผลกระทบหลัก ๆ ของคลื่นสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ผลกระทบนั้นจะประกอบด้วย การหมุนของมุมสนามไฟฟ้าของคลื่นหรือฟาราเดย์โรเทชัน, เวลาหน่วง, การรับคลื่นที่แตกกระจายจากหลายทาง และการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ซึ่งเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์, การลดทอนของสัญญาณจากชั้น D ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นต้น ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

ฟาราเดย์โรเทชัน

คลื่นสัญญาณวิทยุที่มีโพลาไรซ์แบบเส้นตรงนั้นเมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเกิดการหมุนของระนาบโพลาไรซ์เนื่องจากการผ่านตัวกลางที่เป็นแบบ Anisotropy ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าฟาราเดย์โรเทชัน[5] มีสมการในการหาค่าดังนี้

$$\Omega = \frac{2.365 \times 10^4}{f^2} \int NB \cos \theta_B dS_0 \quad \text{[เรเดียน]} \quad (2.33)$$

เมื่อ B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กโลก (เวเบอร์ต่อตารางเมตร)

θ_B คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดที่ตั้ง)

ส่วนมากปริมาณ $B \cos \theta_B$ จะใช้ค่าเฉลี่ย B_{av} แทนซึ่งสมการ (2.33) ก็จะลดลงเหลือ

$$\Omega = \frac{2.365 \times 10^4}{f^2} B_{av} \int N dS_0 \quad \text{[เรเดียน]} \quad (2.34)$$

เนื่องจากนิยามที่ว่า $TEC = \int N dS_0$

ดังนั้นฟาราเดย์โรเทชันจะกลายเป็น

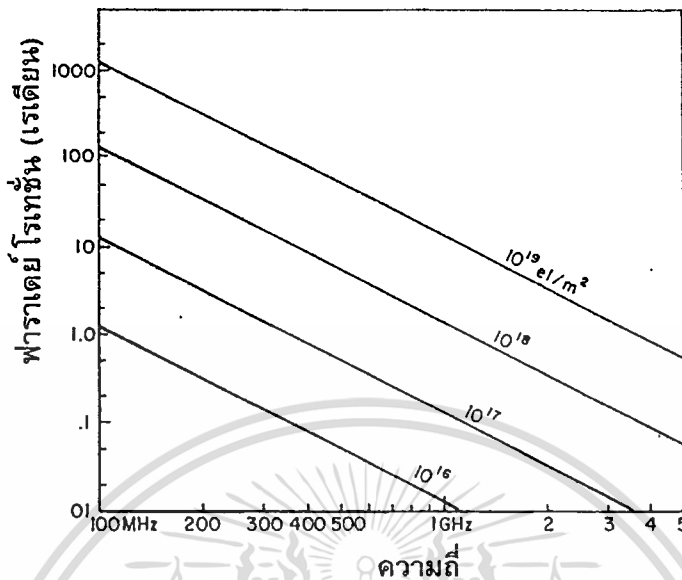
$$\Omega = \frac{C}{f^2} TEC \quad \text{[เรเดียน]} \quad (2.35)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่มีค่า $2.365 \times 10^4 B_{av}$

จะเห็นว่าปริมาณฟาราเดย์โรเทชันนั้นจะแปรผกผันกับความถี่และแปรผันตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็กโลกและปริมาณ TEC เมื่อรู้ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ค่ามุมฟาราเดย์และปริมาณอื่น ๆ ก็สามารถคำนวณได้ [1], [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 14



แสดงค่าประมาณของฟาราเดย์โรเทชันเป็นฟังก์ชันกับความถี่และปริมาณอิเล็กตรอน TEC สำหรับเส้นทางของคลื่นสัญญาณในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก [4]

เวลาหน่วง

เนื่องจากในสมการที่ (2.24) แสดงให้เห็นว่าดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งทำให้ระยะทางของคลื่นที่เดินทางนั้นจะมากกว่าระยะทางจริงซึ่งระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นนั้นได้ดังสมการที่ (2.31) ถ้าค่า TEC มีค่า 10^{17} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร ค่าระยะทางที่คลาดเคลื่อนของสัญญาณ 4 GHz จะมีค่า 2.5 เมตร

จากสมการที่ (2.31) เราสามารถคำนวณเวลาที่เพิ่มขึ้นได้จากสมการที่ (2.36)

$$T_d = \frac{40.3}{c^2} TEC \quad \text{[วินาที]} \quad (2.36)$$

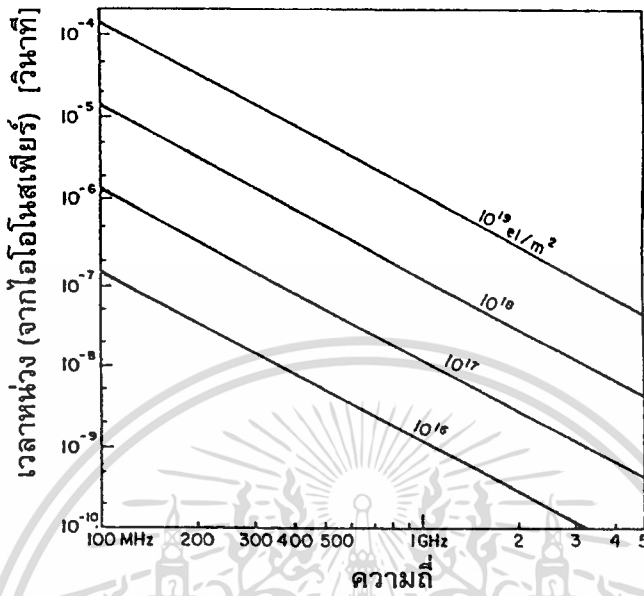
$$T_d = \frac{134}{f^2} TEC \quad \text{[ไมโครวินาที]} \quad (2.37)$$

เมื่อ T_d คือ เวลาหน่วงของสัญญาณ

c คือ ความเร็วของแสง

จะเห็นว่าเมื่อทราบปริมาณ TEC ก็จะสามารถคำนวณค่าเวลาหน่วงได้

ภาพที่ 15



ค่าเวลาหน่วงเป็นฟังก์ชันกับความถี่สำหรับค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC = 10^{16} - 10^{19} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร

การหักเหของสัญญาณ

จากภาพที่ 11 แสดงการหักเหของสัญญาณที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มุมคลาดเคลื่อน ξ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าระยะทางคลาดเคลื่อนดังสมการนี้ [4]

$$\xi \approx \frac{(S_0 + R_e \sin^2 el) R_e \cos el}{h_m (2R_e + h_m) + R_e^2 \sin^2 el} \times \frac{\Delta R_{gr}}{S_0} \approx \frac{(S_0 + R_e \sin^2 el) \cos el}{2h_m + R_e \sin^2 el} \times \frac{\Delta R_{gr}}{S_0} \quad (2.38)$$

- เมื่อ S_0 คือ ระยะทางตรงจากดาวเทียมถึงสถานีภาคพื้นดิน
- R_e คือ รัศมีเฉลี่ยของโลก
- h_m คือ ความสูงเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
- el คือ มุมเงยของสายอากาศที่แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ถ้า $f = 100$ MHz, $TEC = 10^{18}$ อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร, $h_m = 400$ กิโลเมตร, มุมเงย (el) = 45° และ $S_o = 1,000$ กิโลเมตร จะได้ $\xi = 5$ มิลลิเรเดียน หรือ 0.3°

ถ้า el มีค่าน้อย ๆ จะได้

$$\xi = \frac{\Delta R_{gr} \cos el}{2h_m} \quad (2.39)$$

ถ้า el มีค่ามาก ๆ และ $\Delta R_{gr} \ll R_e \sin el$ จะได้

$$\xi = \frac{\Delta R_{gr} \cot el}{S_o} \quad (2.40)$$

ส่วนผลกระทบอื่น ๆ จะแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3

ผลกระทบ	แปรผันกับความถี่	100 MHz	300 MHz	1 GHz	3 GHz	10 GHz
ฟาราเดย์โรเทชัน	$1/f^2$	30 รอบ	3.3รอบ	108°	12°	1.1°
เวลาหน่วง (ไมโครวินาที)	$1/f^2$	25	2.8	0.25	0.028	0.0025
การหักเหของสัญญาณ	$1/f^2$	$\leq 1^\circ$	$\leq 7'$	$\leq 0.6'$	$\leq 4.2''$	$\leq 0.36''$
การลดทอน (แถบขั้วโลก) (dB)	$1/f^2$ ($1 < x \leq 2$)	5	1.1	0.2	0.04	0.008
การลดทอน (เส้นรุ้งปานกลาง) (dB)	$1/f^2$	< 1	0.1	< 0.01	0.001	$< 10^{-4}$
Dispersion (ps/Hz)	$1/f^3$	0.4	0.15	0.0004	1.5×10^{-5}	4×10^{-7}

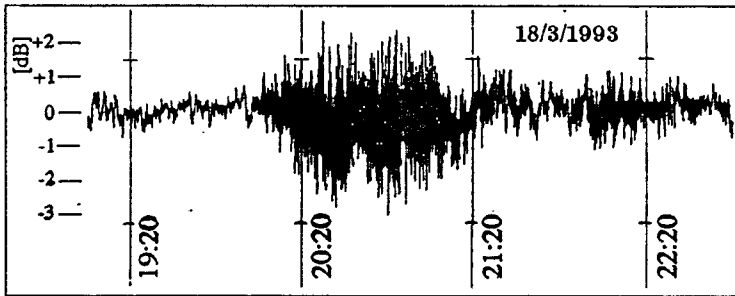
แสดงค่าประมาณผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อสัญญาณดาวเทียม (ที่มุมเงย 30° แถบเส้นรุ้งปานกลาง)

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันคือการที่สัญญาณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของเฟส(phase scintillation) หรือแอมพลิจูด(amplitude scintillation) จากระดับค่าเฉลี่ยอย่างกะทันหัน ซึ่งตัวอย่างรูปของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของระดับสัญญาณดาวเทียมย่าน C-band ในวันที่ 18 มีนาคม 2536 แสดงดังภาพที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 16



แสดงลักษณะของระดับสัญญาณดาวเทียมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ซึ่งพบว่าจะมีผลกระทบต่อลักษณะสัญญาณดาวเทียม จึงได้มีการกำหนดเป็นตัวแปรหนึ่งในการออกแบบระบบดาวเทียม โดยมีการเผื่อค่าไว้ชัดเจนเกี่ยวกับค่าระดับสัญญาณที่อาจเพิ่มหรือลดลงเกินกว่าระดับที่ต้องการเช่นเดียวกับตัวแปรอื่น ๆ [14]

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นเกิดจากชั้นบรรยากาศหลัก 2 ชั้น

1. ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีผลกระทบต่อคลื่นความถี่ 4 GHz ขึ้นไป ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหภายในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์
2. ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีผลกระทบต่อคลื่นความถี่น้อยกว่า 4 GHz เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นอิเล็กตรอน

การหาระดับการเปลี่ยนแปลงสามารถวัดได้จากดัชนีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันซึ่งโดยมากใช้ดัชนี S_4 ซึ่งเป็นค่า RMS ของค่าระดับสัญญาณ P กับค่าระดับสัญญาณเฉลี่ย \bar{P}

$$S_4 = \frac{\sqrt{\sum (P - \bar{P})^2}}{\bar{P}} \quad (2.41)$$

เมื่อ P คือ ค่าระดับสัญญาณ

\bar{P} คือ ค่าระดับสัญญาณเฉลี่ย

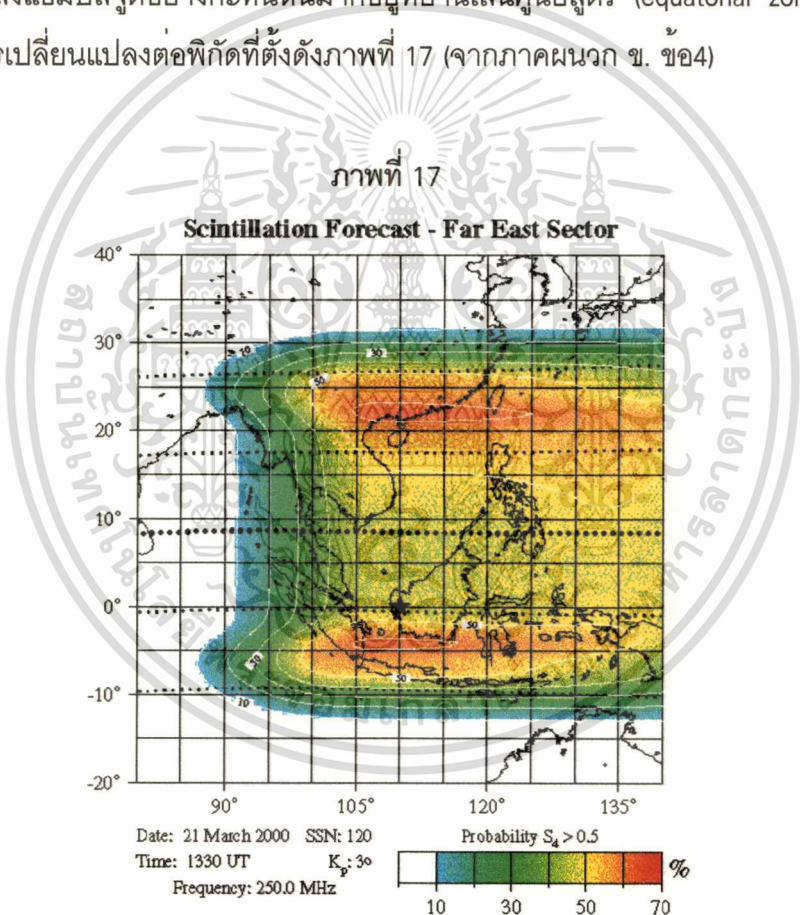
อีกดัชนีหนึ่งซึ่งง่ายกว่าการคำนวณดัชนี S_4 คือ Scintillation Index หรือ SI

$$SI = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P_{max} คือ ค่ามากที่สุดของระดับสัญญาณอันดับที่ 3
 P_{min} คือ ค่าน้อยที่สุดของระดับสัญญาณอันดับที่ 3

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในย่านความถี่ต่ำกว่า 4 GHz นั้นมีสาเหตุมาจากความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และขึ้นอยู่กับ จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปี เวลาระหว่างวัน ฤดูกาล จุดพิกัดที่ตั้ง และอื่น ๆ ในการสื่อสารดาวเทียมนั้นย่านที่มีผลกระทบของปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันมากอยู่ที่ย่านเส้นศูนย์สูตร (equatorial zone) [5] ซึ่งมีการทำนายการเปลี่ยนแปลงต่อพิกัดที่ตั้งดังภาพที่ 17 (จากภาคผนวก ข. ข้อ 4)

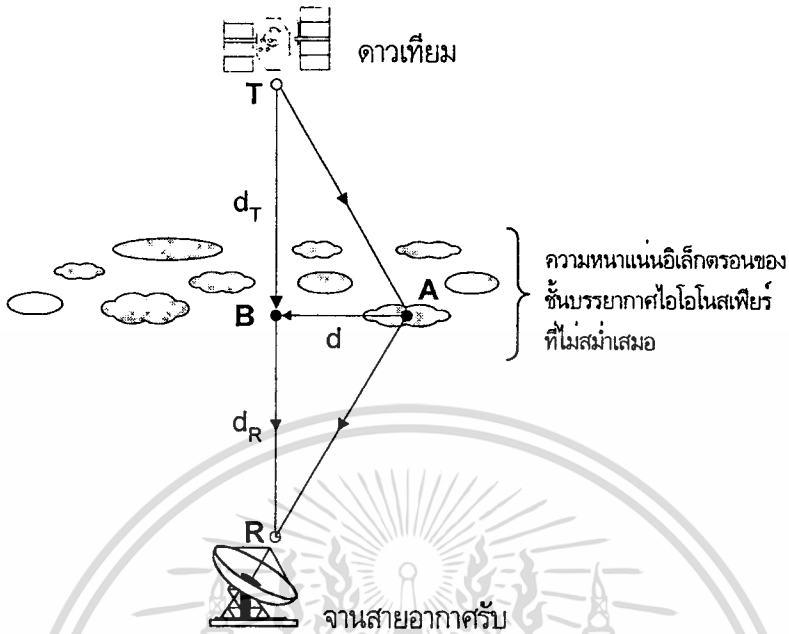


แสดงการทำนายการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันต่อพิกัดที่ตั้งในย่านเส้นศูนย์สูตร
 วันที่ 21 มีนาคม 2543 เวลา 1330 UT

สาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถแสดงเป็นแบบจำลองได้ดังภาพที่ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 18



แสดงความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

จากภาพที่ 18 ถ้าระยะทาง TAR มากกว่า ระยะทาง TBR อยู่ $\lambda/2$ จะได้ดังสมการ

$$TAR = TBR + \lambda/2 \tag{2.43}$$

สัญญาณที่เดินทางในเส้นทาง TAR จะกลับเฟส 180° กับคลื่นที่เดินทางในเส้นทางตรงทำให้ระดับความแรงสัญญาณที่เครื่องรับมีค่าน้อยลง ซึ่งเรียกว่าเฟรดเนลโซนอันดับที่หนึ่ง (First Fresnel zone) [1,9]

$$d = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_T d_R}{d_T + d_R}} \tag{2.44}$$

เมื่อ d คือ รัศมีเฟรดเนลโซนอันดับที่หนึ่ง

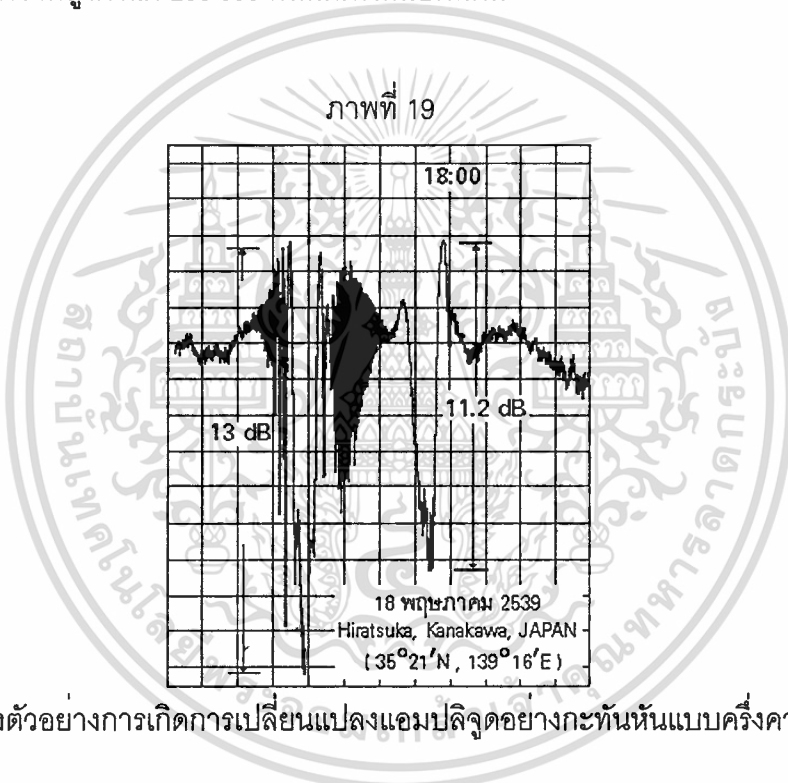
λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ

ส่วนรัศมีเฟรดเนลโซนอันดับสูง (อันดับที่ n) จะหาได้ดังนี้

$$d_n = \sqrt{n} \times d \tag{2.45}$$

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเกิดจากสาเหตุที่สัญญาณเกิดการหักเหจากความไม่สม่ำเสมอในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟรสนเอลไซนอันดับต่าง ๆ หลาย ๆ เส้นทางนั้นมารวมกันทำให้เกิดการรวมเฟสและต่างเฟสทำให้ระดับสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นเกิดจากหลายสาเหตุ ซึ่งในตอนกลางวันจะเกิดที่ชั้น E ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเรียกว่า Sporadic-E ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันแบบครึ่งคาบ (Quasi-Periodic Scintillation) [15] แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 19 ส่วนในเวลากลางคืนความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะเกิดขึ้นในชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งจะอยู่ที่ระยะความสูงตั้งแต่ 200-600 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน



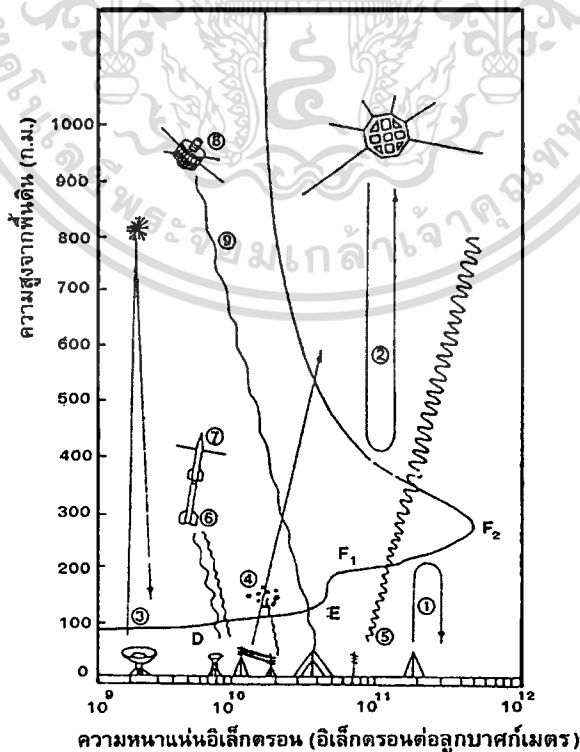
บทที่ 3

หลักการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

กล่าวนำ

จากบทที่ 2 เราจะเห็นความจำเป็นในการหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งจะนำมาใช้เป็นตัวแปรหนึ่งในการหาค่าประมาณของผลกระทบต่าง ๆ ของคลื่นสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และเป็นตัวแปรหนึ่งในการออกแบบระบบดาวเทียม โดยที่วิธีการวัดนั้นมีหลายวิธี [16] ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้

ภาพที่ 20



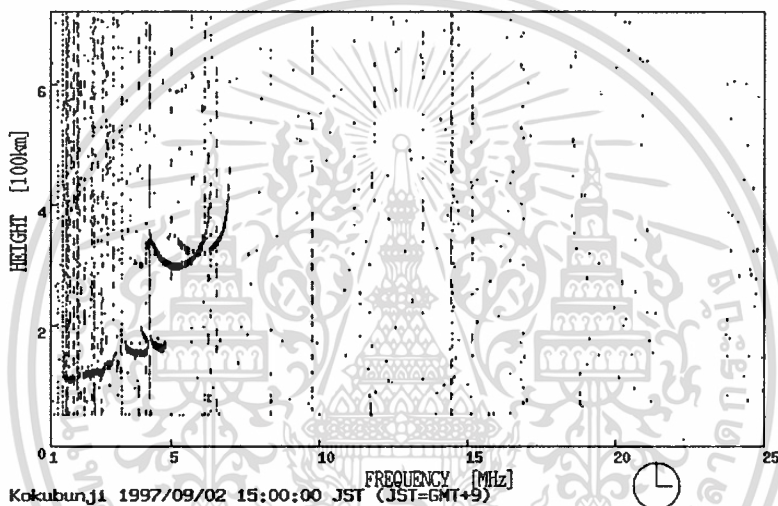
แสดงวิธีต่าง ๆ ในการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ 1 คือวิธี Vertical Sounder หรือ Ionosonde เป็นวิธีแรกที่ใช้วัดและเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด ซึ่งวิธีการนั้นจะใช้การส่งความถี่คลื่นวิทยุขึ้นไปในแนวตั้งโดยเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อย ๆ แล้วรับคลื่นความถี่ที่สะท้อนกลับมามีค่าเป็นความถี่สูงสุดและเวลาที่เท่าใดซึ่งก็จะนำมาใช้ในการหาค่าความถี่วิกฤต, ความสูงของชั้นย่อยในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนได้

ภาพที่ 21



แสดงภาพตัวอย่างผลการวัดโดยวิธี Vertical Sounder ที่ Kokubunji ประเทศญี่ปุ่น

วิธีที่ 2 คือวิธี Topside Sounding Satellite หรือ In Situ ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกับวิธีแรกแต่ใช้ดาวเทียมส่งสัญญาณลงมาแทน ซึ่งจะได้ค่าที่เป็นปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยวิธีแรกไม่สามารถวัดออกมาได้

วิธีที่ 3 คือวิธี Incoherent Backscatter Radar เป็นการใช่วิธี Back scatter จากอนุภาคในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยคำนวณจากความเข้มของสัญญาณที่ Back scatter กลับมา แต่มีข้อเสียคือใช้กำลังงานสูงและถูกสัญญาณอื่น ๆ รบกวนได้ง่าย

วิธีที่ 4 คือวิธี Partial Reflection Method เป็นการส่งความถี่เป็นพื้นที่ขึ้นไปแล้วส่งความถี่ขึ้นไปตัดกับความถี่เดิมซึ่งสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศจะได้รับเฉพาะส่วนที่สะท้อนลงมาเท่านั้น

วิธีที่ 5 คือวิธี Riometer (Relative Ionospheric Opacity meter) ใช้สำหรับวัดสัญญาณรบกวนจากรังสีคอสมิก ซึ่งเป็นสาเหตุของการลดทอนโดยชั้น D ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยวัดจากความเข้มของสัญญาณรบกวนซึ่งได้รับโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยมากแล้วจะมีประโยชน์ในแถบขั้วโลกที่มีการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมในชั้น D

วิธีที่ 6 คือวิธี Doppler Method with a Rocket จะใช้การคำนวณจากค่าแตกต่างความถี่ดอปเพลอร์ของ 2 ความถี่ที่ส่งลงมาจากรวดที่กำลังขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ

วิธีที่ 7 และ 8 คือวิธี Probe Techniques จะเป็นการตรวจจับจากโพรบที่ติดอยู่กับจรวดหรือดาวเทียมซึ่งจะได้ค่าการวัดโดยตรงในดวงกลางนั้น ๆ

วิธีที่ 9 คือวิธี Faraday Rotation Method โดยใช้ดาวเทียม เป็นการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ VHF จากดาวเทียมค้างฟ้าหรือดาวเทียมวงโคจรต่ำ ซึ่งจะได้รับผลกระทบจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทำให้มุมของโพลาไรซ์ของมันเกิดการหมุนไป (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 2). เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากเครื่องรับนั้นง่ายและไม่ซับซ้อน ในการหา นั้นจะใช้สมการที่อ้างอิงโดย CCIR [5] ซึ่งค่าที่ได้ออกมาจะเป็นค่า Total Electron Content ดังสมการที่ (2.35)

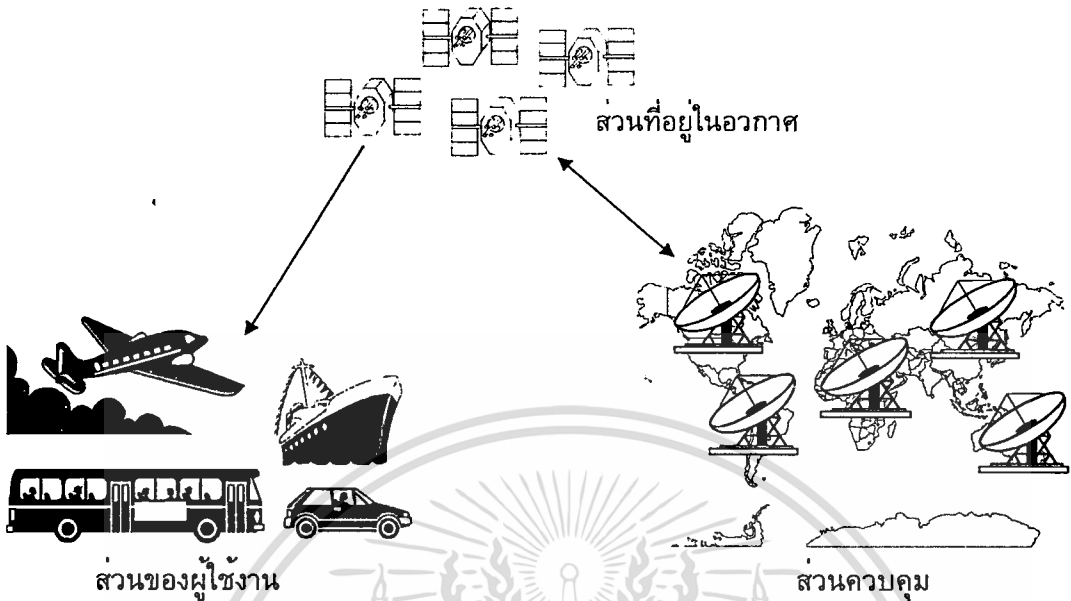
วิธีการวัดของวิทยานิพนธ์นี้เป็นวิธีที่คล้ายกับวิธีที่ 9 แต่ในปัจจุบันนี้หาดาวเทียมที่ส่งสัญญาณความถี่ VHF ได้ยากเนื่องจากสัญญาณความถี่ VHF มีความผิดพลาดอันเกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ค่อนข้างมาก จึงใช้วิธีรับค่าเวลาหน่วงที่แตกต่างของดาวเทียม GPS ซึ่งมีวงโคจรอยู่ทั่วโลกจึงทำให้สะดวกในการใช้งานมากกว่า โดยรายละเอียดลักษณะทั่ว ๆ ไปของระบบดาวเทียม GPS วิธีการและอุปกรณ์ในการวัดหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ลักษณะโดยทั่วไปของระบบดาวเทียมนำร่อง GPS

ระบบการหาตำแหน่งบนพื้นโลกหรือการนำร่องซึ่งใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้านเช่นการสำรวจ, การนำทาง, การทหาร เป็นต้น มีวิวัฒนาการมาจากการสังเกตทางดาราศาสตร์เป็นหลักซึ่งจะมีความผิดพลาดสูง จึงมีการพัฒนาระบบมาตามลำดับ[17] ระบบการหาตำแหน่งในระยะแรกนั้นเรียกระบบ Radio Direction Finding ซึ่งใช้ในการนำทางเรือ โดยมีสถานีส่งสัญญาณวิทยุอยู่ตามชายฝั่ง ตำแหน่งของเรือคำนวณจากความแตกต่างของการรับคลื่นวิทยุผ่านทางน้ำกับทางอากาศ ระบบที่พัฒนาต่อมาคือระบบ Different Time of Arrival of Radio Signal อาศัยหลักการที่คลื่นวิทยุเดินทางด้วยความเร็วคงที่ แล้วหาตำแหน่งพิกัดจากการคำนวณหาจุดที่ตัดกันของคลื่นสัญญาณที่ส่งเป็นพัลส์ที่มาจากหลายจุด ระบบหาตำแหน่งที่ใช้หลักการนี้เช่นระบบ LORAN-C ซึ่งจะมีความผิดพลาดของจุดที่ทำนายประมาณ 200 เมตร และระบบ OMEGA แต่แหล่งกำเนิดสัญญาณเป็นแบบ Continuous Wave แทนที่จะเป็นพัลส์ และมีการวัดความแตกต่างของเฟสของสัญญาณที่รับได้คำนวณเป็นตำแหน่งพิกัด ส่วนระบบการหาตำแหน่งบนพื้นโลกซึ่งใช้ดาวเทียมใช้เป็นระบบแรกคือระบบ Transit ซึ่งเป็นของทัพเรือสหรัฐ โดยมีดาวเทียมวงโคจรต่ำแบบ Polar Orbit ที่โคจรในแนวขั้วโลกเหนือกับขั้วโลกใต้ ดาวเทียมจะส่งสัญญาณแสดงตำแหน่งของตนลงมายังโลก เครื่องรับก็จะคำนวณจากรูปร่างของเส้นโค้งดอปเพลอร์ซีพท์ การส่งสัญญาณจากดาวเทียมนั้นจะใช้การส่งสัญญาณวิทยุ VHF 2 ความถี่คือ 150 MHz และ 400 MHz เพื่อใช้ในการคำนวณค่าเวลาหน่วงของคลื่นสัญญาณที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ระบบการหาตำแหน่งที่มีการใช้งานแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดและมีความแม่นยำมากที่สุดในปัจจุบันคือระบบ Navigation System with Time And Range Global Positioning System หรือ NAVSTAR GPS พัฒนาโดยกองกำลังป้องกันประเทศสหรัฐอเมริกา กระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา (The U.S. Department of Defense หรือ DoD) ซึ่งมีการใช้งานครั้งแรกในสงครามอ่าวเปอร์เซีย พ.ศ. 2534 ซึ่งขณะนั้นระบบยังไม่สมบูรณ์ แต่ก็ยังใช้งานได้ดี หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาระบบต่อจนสมบูรณ์เมื่อ พ.ศ. 2536 โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการทหารและต่อมาได้เปิดบริการให้บุคคลทั่วไปได้ใช้ทางธุรกิจ โดยส่งคลื่นวิทยุที่เป็นข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลจะประกอบด้วยสัญญาณเวลาอ้างอิง ข้อมูลของวงโคจรดาวเทียม และตำแหน่งของดาวเทียมซึ่งจะสามารถคำนวณตำแหน่งเครื่องรับได้ ระบบดาวเทียม GPS แบ่งเป็น 3 ส่วน [11] ดังภาพต่อไปนี้

ภาพที่ 22

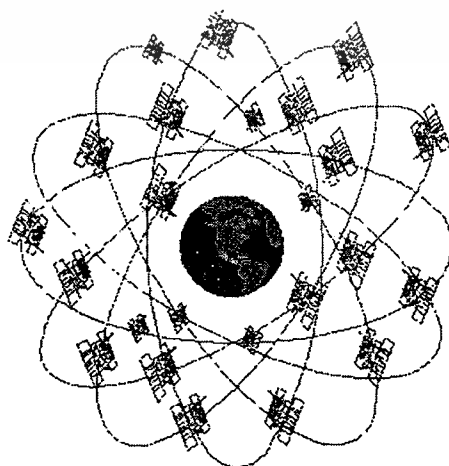


แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบดาวเทียม GPS

1. ส่วนที่อยู่ในอวกาศ

ดาวเทียม GPS มีหลายชนิดตามการพัฒนาใช้ชื่อว่า Block I Block II และ Block IIR (วันที่ปล่อยขึ้นสู่อวกาศและคุณสมบัติต่าง ๆ ดูในภาคผนวก จ.) ดาวเทียม GPS จะมีจำนวน 24 ดวง อยู่เหนือพื้นโลกประมาณ 20,200 กม. โคจรด้วยระบบ Non-Geostationary Orbit 6 วงโคจรเอียง ทำมุม 55 องศา แต่ละวงโคจรประกอบด้วยดาวเทียม 4 ดวง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

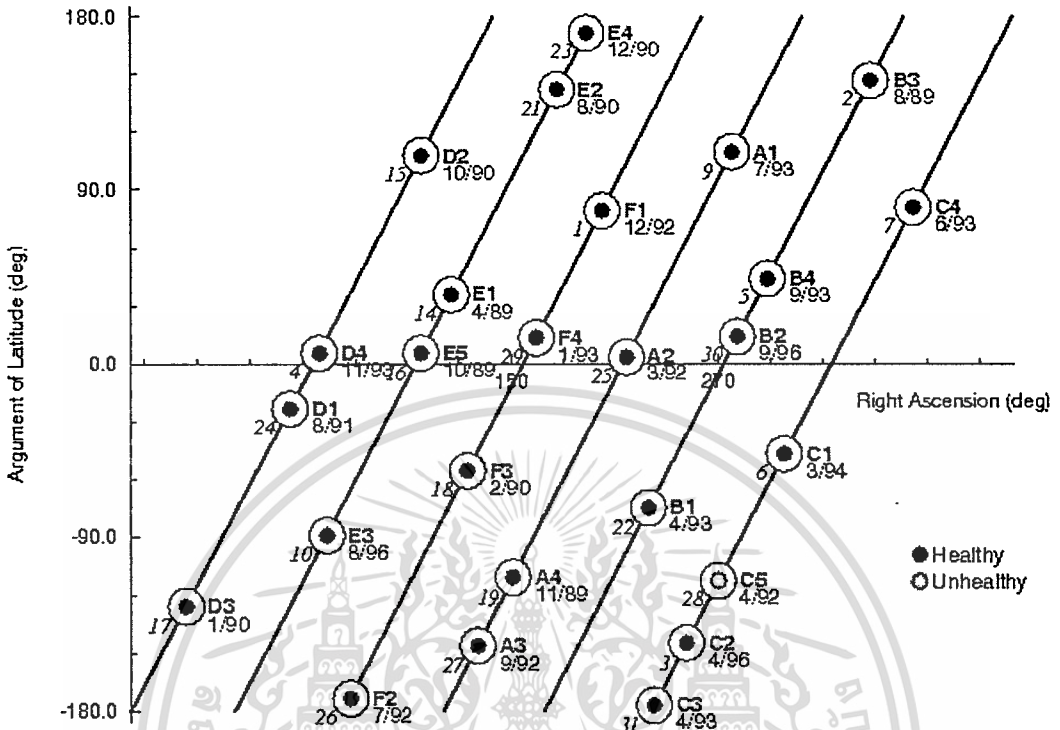
ภาพที่ 23



แสดงวงโคจรของระบบดาวเทียม GPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 24



แสดงวงโคจรแบบแยกระนาบวงโคจรของระบบดาวเทียม GPS

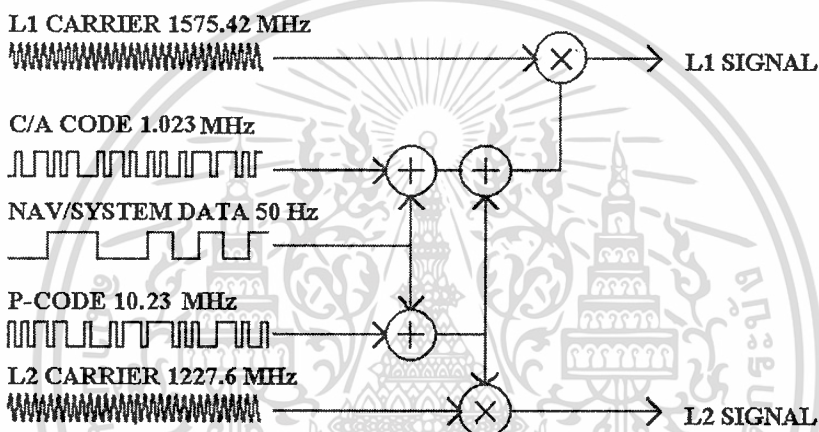
จากภาพที่ 23 และ 24 วงโคจรในรูปแบบนี้จุดใด ๆ บนพื้นโลกจะรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงตั้งแต่มุมเงยของสายอากาศ 15 องศาขึ้นไป และ มุมเงย 5 องศาขึ้นไปสามารถรับสัญญาณได้ถึง 12 ดวง ความแม่นยำของการบอกตำแหน่งของระบบ GPS เกิดขึ้นโดยใช้นาฬิกาอะตอมเป็นสัญญาณ Clock บนดาวเทียมเช่น ดาวเทียม GPS Block II จะมีนาฬิกาอะตอมแบบรูบิเดียม 2 เครื่องและแบบซีเซียม 2 เครื่องให้ความผิดพลาดต่อวันไม่เกิน 10^{-14} วินาที (เนื่องจากความผิดพลาดของเวลาเพียง 10^9 วินาทีจะทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งถึง 30 เซนติเมตร) ดาวเทียมจะใช้สัญญาณจากนาฬิกาอะตอมนี้เป็น Clock สร้างความถี่พื้นฐาน 10.23 MHz แล้วสร้างความถี่พื้นฐานในแบนด์ L_1 และ L_2 โดยการคูณความถี่พื้นฐานด้วย 154 และ 120 ดังนั้นความถี่ของคลื่นพาห์ในแบนด์ L_1 จะเท่ากับ 1,575.42 MHz ความถี่ของคลื่นพาห์ในแบนด์ L_2 จะเท่ากับ 1,227.60 MHz การคำนวณหาระยะทางจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับเรียกว่า Pseudorange จะคำนวณจากระยะเวลาที่สัญญาณทั้งสองที่อยู่ในรูป Psuedorandom Noise (PRN) Code ที่ผสมมากับคลื่นพาห์ทั้งสองแบนด์เดินทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ สัญญาณรหัสแรกที่ส่งเรียกว่า C/A code (Coarse/Acquisition-Code) เป็นสัญญาณที่ให้บุคคลทั่วไปใช้งาน สัญญาณจะผสมออกมาที่แบนด์ L_1 เท่านั้น สัญญาณรหัสที่สองคือ P-Code (Precision Code) เป็นสัญญาณที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางทหารสหรัฐและบุคคลที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น สัญญาณที่ผสมจะออกมาทั้ง 2 แบบคือ L_1 และ L_2 ทำให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำกว่า ซึ่งก็มีการเข้ารหัสไว้เพื่อความปลอดภัยของการทหารสหรัฐอเมริกา ในคลื่นพาหะ L_1 นั้นใช้สำหรับการส่งสัญญาณทั้ง 2 แบบจึงต้องมีการชิฟท์เฟสของแคเรียร์เพื่อมิให้สัญญาณรบกวนกัน หลังจากรหัส PRN จะมีข้อมูลอื่น ๆ ที่ผสมมาในสัญญาณด้วยได้แก่ ข้อมูลที่เกี่ยวกับวงโคจรดาวเทียม สัมประสิทธิ์สภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สภาพการใช้งานของดาวเทียม เวลาของระบบและสัญญาณเวลาของดาวเทียม เป็นต้น

ภาพที่ 25



แสดงลักษณะการมอดดูเลทสัญญาณของ GPS

2. ส่วนควบคุม

ส่วนนี้จะประกอบด้วยสถานีควบคุมหลัก (Master control Station) อยู่ที่โคโรราโดสปริง สหรัฐอเมริกา และสถานี Monitor อยู่กระจายตามส่วนต่าง ๆ ของโลก สถานี Monitor นี้จะมีนาฬิกาอะตอมแบบซีเซียมที่มีความแม่นยำสูงและเครื่องรับที่สามารถคำนวณ P-Code Psuedo-Range ของดาวเทียมทุกดวงรับสัญญาณได้ ข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการจะถูกคำนวณแล้วส่งไปให้สถานีควบคุมหลัก ซึ่งจะนำข้อมูลมาหาตัวแปรต่าง แล้วส่งกลับไปยังดาวเทียม GPS เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ

3. ส่วนของผู้ใช้

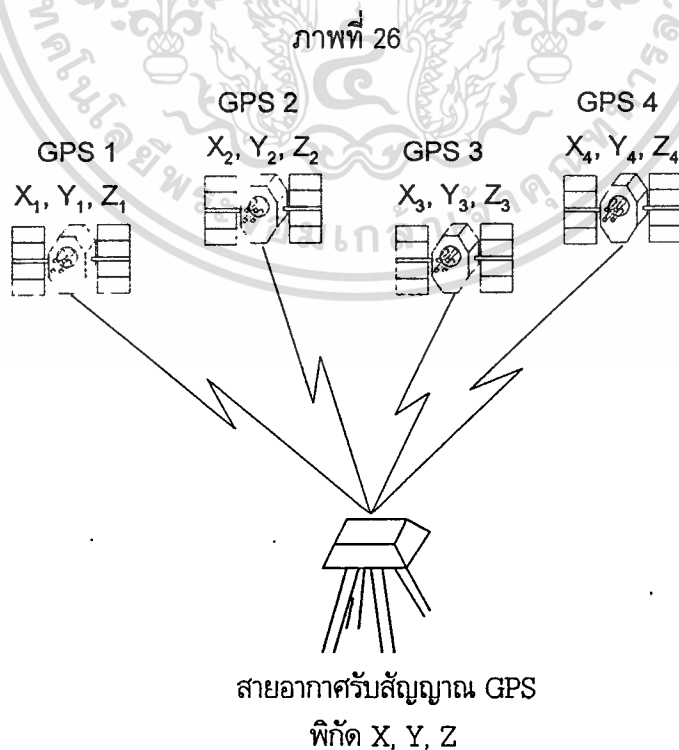
ส่วนของผู้ใช้จะแบ่งเป็น 2 ประเภทตามลักษณะความละเอียดของความแม่นยำในการหาตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานในลักษณะแรกคือการใช้งานที่มีความแม่นยำในการบอกตำแหน่งสูงเช่น การสำรวจภูมิประเทศ งานหาตำแหน่งทางทหารเป็นต้น ซึ่งจะให้ความแม่นยำในการหาตำแหน่งสูงมากในระดับเซนติเมตรถึง 20 เมตร แล้วแต่ตำแหน่งของเครื่องรับ การบริการในลักษณะนี้เรียกว่า Precise Positioning Service (PPS) โดยระบบนี้จะส่งข้อมูลที่ถูกลมอดดูเลตรวมมาใน P-Code ซึ่ง P-Code เป็นรหัสที่มีความยาวมากทำให้ดูเหมือน Random Noise ทำให้ยากต่อการถอดรหัส

การใช้งานในลักษณะที่ 2 นี้คือ Standard Positioning Service (SPS) มีความแม่นยำในการบอกตำแหน่งต่ำกว่าแบบแรกมากมีความผิดพลาดในระดับ 100 เมตร โดยทาง DoD เปิดให้บุคคลทั่วไปใช้งาน โดยข้อมูลจากดาวเทียมถูกเข้ารหัส C/A Code ไว้ซึ่ง C/A Code นี้จะมีความยาว 1,023 บิต ที่ความเร็ว 1.023 Mbps รหัสนี้จะซ้ำเดิมทุก ๆ 1 มิลลิวินาที ซึ่งทำให้ง่ายต่อการตรวจจับ เครื่องรับจะรับสัญญาณมาทำการถอดรหัสให้ข้อมูลออกมา ซึ่งผลที่ได้จะประกอบด้วยข้อมูลหลัก ๆ ได้แก่ เส้นรุ้ง, เส้นแวง, ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล(Altitude), เวลา, วันเดือนปี, ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องรับ เป็นต้น

หลักการพื้นฐานในการคำนวณนั้นจะคำนวณจากตำแหน่งของดาวเทียมและเวลาที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับดังนี้



แสดงพิกัดของดาวเทียม GPS เพื่อการคำนวณตำแหน่งพิกัดของจุดบนพื้นโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการในการหาตำแหน่งของผู้รับจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 &= (c \times (t_1 - t_0))^2 \\(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 &= (c \times (t_2 - t_0))^2 \\(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 &= (c \times (t_3 - t_0))^2 \\(X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2 &= (c \times (t_4 - t_0))^2\end{aligned}\quad (3.1)$$

เมื่อ (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) , (X_3, Y_3, Z_3) , (X_4, Y_4, Z_4) , คือ ค่าพิกัดที่ส่งมาจากดาวเทียม GPS ดวงที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

(X, Y, Z) คือ พิกัดที่ต้องการทราบ

t_0 คือ ค่าเวลาที่ผิดพลาดของดาวเทียมกับบนพื้นโลก

t_1, t_2, t_3, t_4 คือ เวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึงเครื่องรับจากดาวเทียม GPS ดวงที่ 1, 2, 3, 4 ตามลำดับ

ส่วนปัจจัยที่ทำให้ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับลดลงก็มีดังเช่น

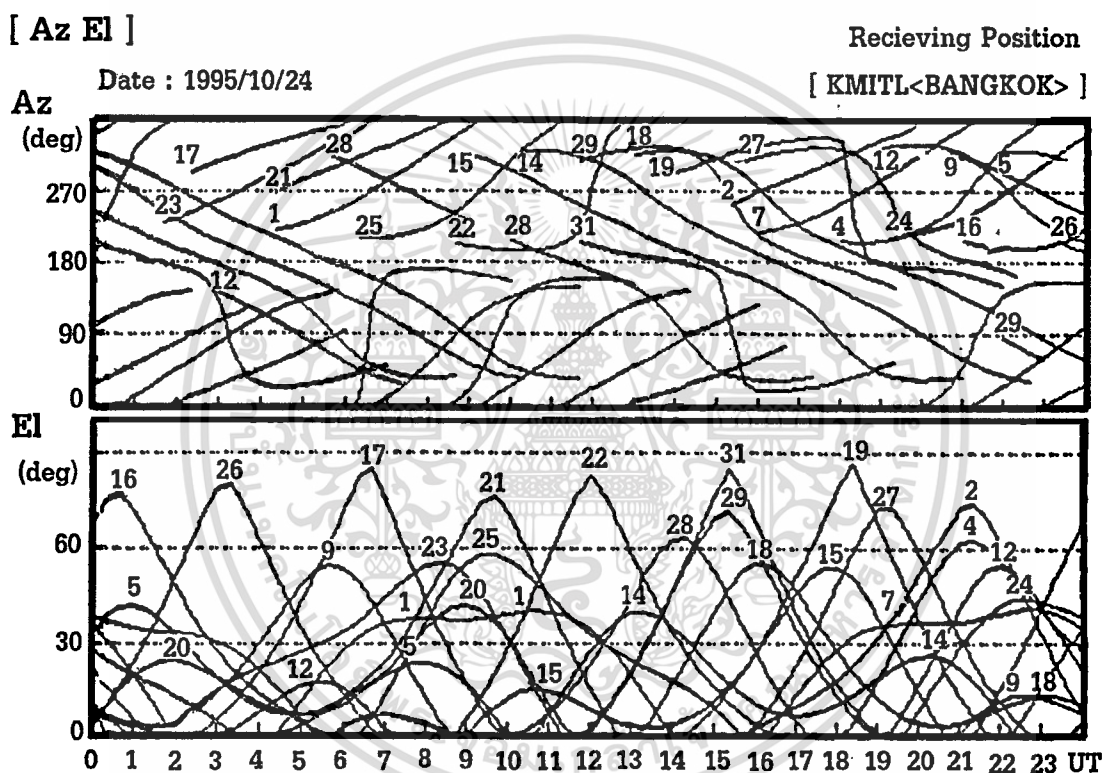
- ข้อมูลจากดาวเทียมถูกหน่วงเวลาโดยชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์
- ค่าความผิดพลาดจากสัญญาณเวลาบนดาวเทียม
- ค่าความผิดพลาดจากวงโคจรของดาวเทียม
- ค่าความผิดพลาดจากเครื่องรับ เช่น การรบกวนจากสัญญาณอื่น ๆ
- การหน่วงเวลาที่เกิดจากการสะท้อนหลายทาง

ในการรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ของ TEC meter จะรับสัญญาณ P code 2 ความถี่ โดยจะใช้เฉพาะเวลาหน่วง (time-delay) ของแคเรียร์เฟสของความถี่ทั้ง 2 นั้นมาเปรียบเทียบกับกันแล้ว นำมาคำนวณเป็นค่าปริมาณ TEC ซึ่งดาวเทียม GPS นั้นในปี พ.ศ. 2538 รับได้ 25 ดวง และมีเลขประจำดาวเทียม หรือ PRN Number ดังนี้

1 2 • 4 5 6 7 •
9 • • 12 • 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 • 31 •

ส่วนสายอากาศที่ทำการรับนั้นจะรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ตั้งแต่มุมเงยมีค่า 30 องศาขึ้นไป และจะเปลี่ยนดวงของการรับในประมาณทุก ๆ 3-4 นาที และบันทึกค่าทุก ๆ 1 นาที เพื่อว่าค่าที่ได้นั้นจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่ได้จากการรับดวงเดียว เพื่อค่าที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ตัวอย่างลักษณะการโคจรของดาวเทียม GPS แสดงได้ดังภาพที่ 27 และ 28

ภาพที่ 27

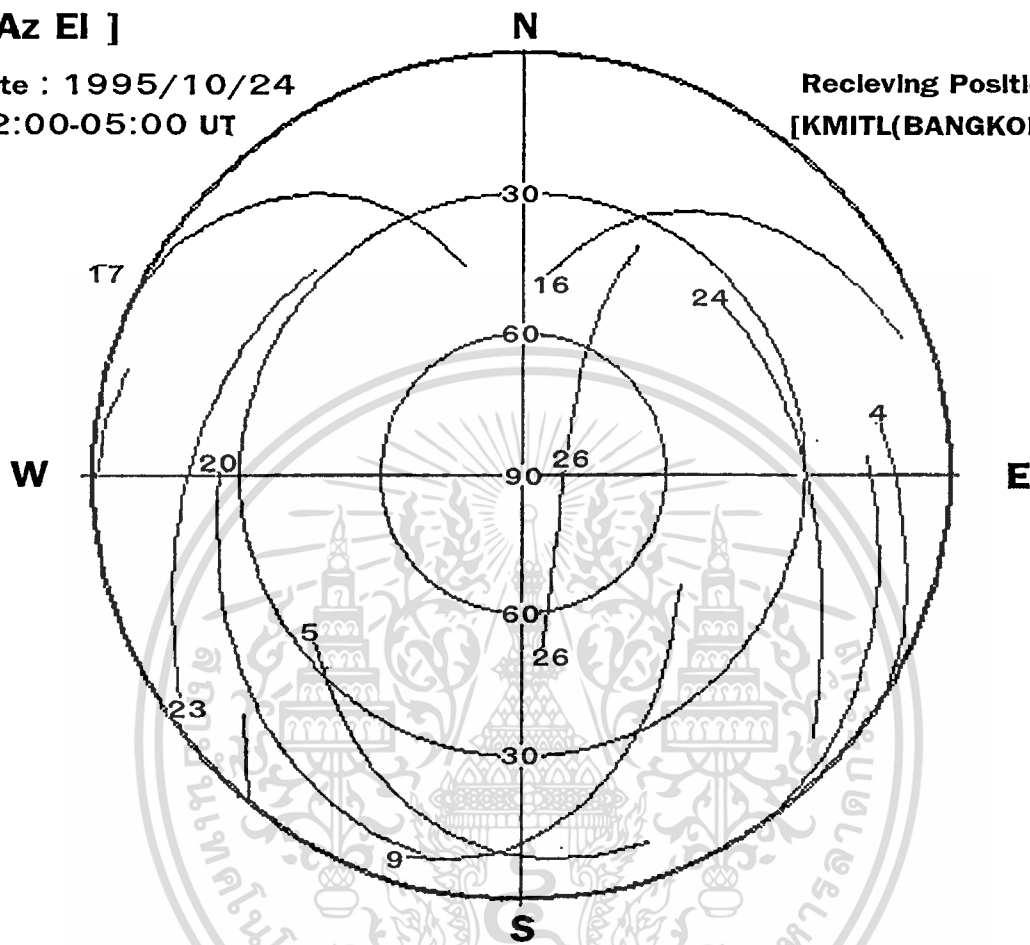


แสดงวงโคจรของดาวเทียม GPS ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538

จากภาพที่ 27 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงมุมเงย (El) และ มุมอาซิมุท (Az) ต่อเวลาในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 ซึ่งเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาในช่วงเวลา 9:30-10:30 น. (0230-0330 UT) จะเห็นว่า การรับสัญญาณในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคานั้นค่าที่รับได้มาจากดาวเทียม GPS ดวงที่ 26 เพราะดาวเทียม GPS ดวงอื่น ๆ ไม่ผ่านมาในตอนนั้น (มุมเงยไม่ถึง 30 องศา)

ภาพที่ 28

[Az El]

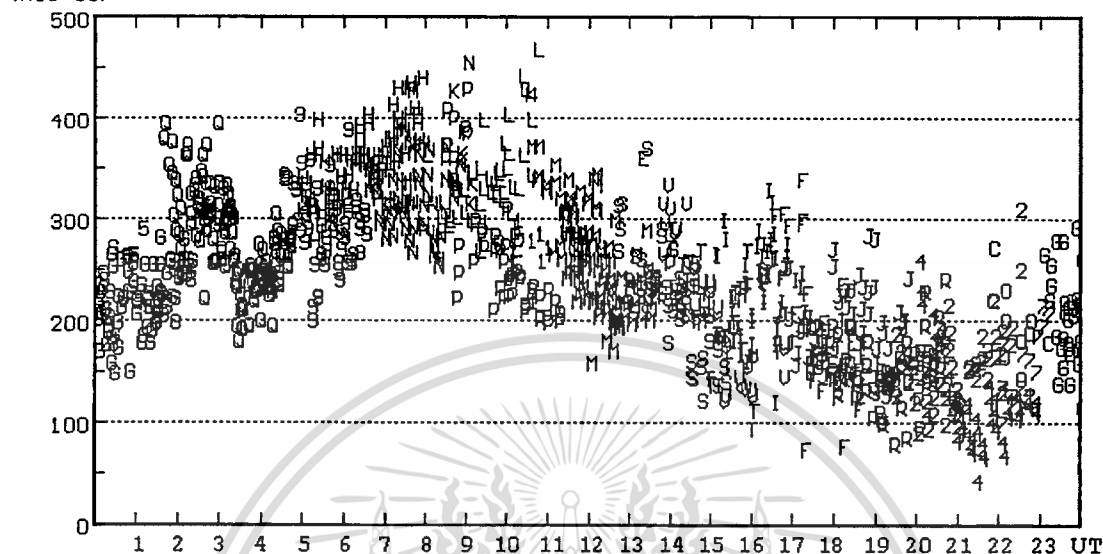
Date : 1995/10/24
02:00-05:00 UTReceiving Position
[KMITL(BANGKOK)]

แสดงวงโคจรของดาวเทียม GPS ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538
ในช่วงเวลา 0200-0500 UT (9:00-12:00 น.)

จากภาพที่ 28 แสดงตัวอย่างกราฟวงกลมแสดงวงโคจรของดาวเทียมในมุมเงยและอาซิมุทเข้าด้วยกัน ในช่วงเวลา 0200-0500 UT (9:00-12:00 น.) เห็นว่าเมื่อต้นชั่วโมงที่ 0200 UT (9:00 น.) เครื่อง GPS TEC meter รับสัญญาณได้ 2 ดวงคือดวงที่ 16 และดวงที่ 26 หลังจากนั้นดวงที่ 16 เคลื่อนออกไปจนมุมเงยต่ำกว่า 30 องศา จะรับสัญญาณไม่ได้ ซึ่งก็จะรับได้แต่ดาวเทียม GPS ดวงที่ 26 เพียงดวงเดียว กราฟของผลการรับสัญญาณและค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่คำนวณได้นั้น แสดงในกราฟดังภาพที่ 29

ภาพที่ 29

[TEC] File: 951024 .dat Receiving Position Lon: +100°46'34
 Date: 1995/10/24 [KMITL] Lat: + 13°43'39



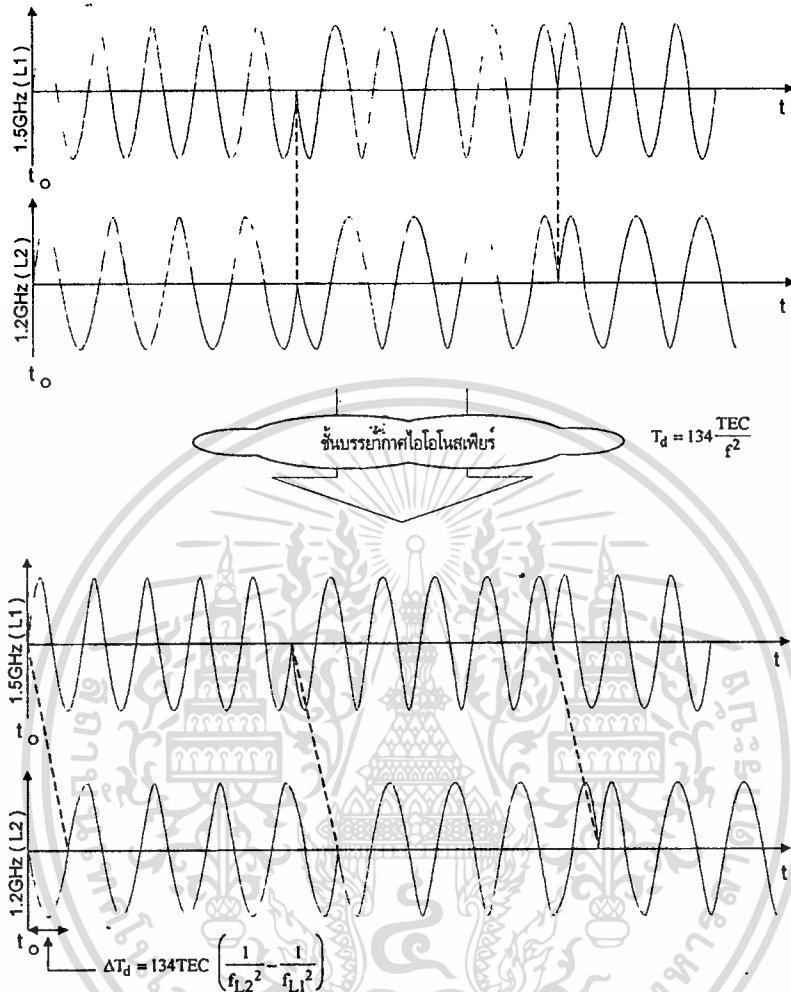
แสดงปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 ที่กรุงเทพฯ

จากกราฟภาพที่ 29 ตัวอักษรที่ปรากฏบนกราฟคือเลขดาวเทียม GPS ที่รับได้ในขณะนั้น ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1-9 และ อักษร A คือดวงที่ 10, อักษร B คือดวงที่ 11 ตามลำดับไปจนถึงดวงที่ 32 จะเห็นว่าช่วงเกิดสุริยุปราคาได้รับได้จากดวงที่ 26 ดวงเดียวคืออักษร Q นั่นเอง

หลักการของการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (TEC) โดยใช้สัญญาณจาก GPS

การคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (TEC) โดยใช้สัญญาณจาก GPS จะใช้ประโยชน์จากการที่ดาวเทียม GPS ซึ่งจะส่งสัญญาณในย่าน L แบนด์ 2 ความถี่คือ $L_1(1,575.42 \text{ MHz})$ และ $L_2(1,227.60 \text{ MHz})$ สัญญาณที่รับได้นั้นจะมีเวลาหน่วงที่ไม่เท่ากันเนื่องจากดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งจะทำให้เกิดระยะทางการเดินทางของคลื่นสัญญาณมากขึ้นทำให้ใช้เวลาเดินทางนานขึ้นดังสมการ (2.31) และ (2.37) ในบทที่ 2 และความแตกต่างระหว่างเวลาหน่วงเมื่อสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะใช้ในการคำนวณปริมาณอิเล็กตรอน TEC

ภาพที่ 30



แสดงความแตกต่างของเวลาหน่วงเมื่อแคเรียร์เฟสของคลื่นสัญญาณ GPS ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากภาพที่ 30 เมื่อสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างเวลาหน่วงของสัญญาณ L_1 และ L_2 เมื่อกำหนดให้ ΔT_d เป็นผลต่างระหว่างเวลาหน่วงที่ได้รับจากสัญญาณ L_1 และ L_2 จากดาวเทียม GPS ซึ่งจะได้สมการดังต่อไปนี้ [18]

$$\Delta T_d = T_d (f_{L2}) - T_d (f_{L1}) \quad [ns] \quad (3.2)$$

แทนค่า T_d จากสมการที่ (2.37)

$$\Delta T_d = 134 TEC \left(\frac{1}{(f_{L2})^2} - \frac{1}{(f_{L1})^2} \right) \quad [ns] \quad (3.3)$$

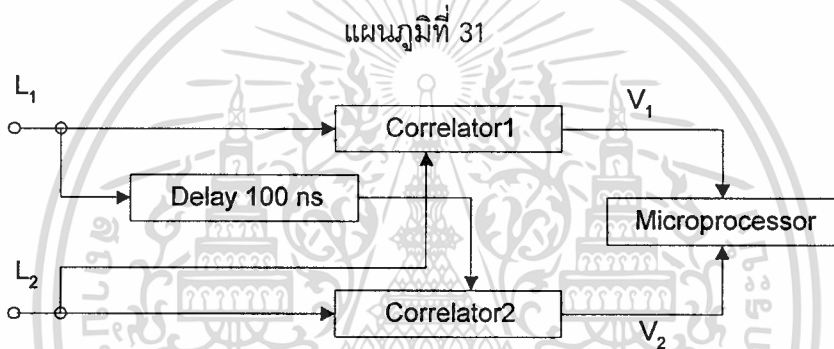
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้ค่าของ Total electron content (TEC) ดังสมการที่ (3.4) [19]

$$TEC = \frac{\Delta T_d}{134} \left(\frac{(f_{L_1})^2 (f_{L_2})^2}{(f_{L_1})^2 - (f_{L_2})^2} \right) \quad [\text{electrons/m}^2] \quad (3.4)$$

$$TEC = 28.6 \times 10^3 \Delta T_d \quad [\text{electrons/m}^2] \quad (3.5)$$

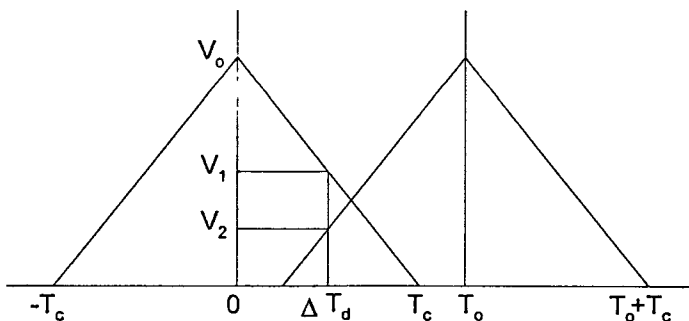
ซึ่งจะได้สมการคำนวณค่า TEC เป็นสมการที่ใช้ในเครื่อง 7633 Realtime TEC meter ส่วนค่า ΔT_d นั้นเครื่องรับจะสามารถคำนวณได้ดังนี้



แสดงบล็อกไดอะแกรมของสัญญาณ GPS ในเครื่องรับ TEC meter

สัญญาณ L_1 และ L_2 นั้นจะถูก Down converter 3 ครั้ง หลังจากนั้นก็จะผ่านมายัง Correlator ทั้ง 2 ตัวดังภาพที่ 31 ซึ่ง output ของ correlator นั้นจะได้เป็นค่าระดับสัญญาณ V_1 และ V_2 ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 32

ภาพที่ 32



แสดงระดับสัญญาณ V_1 และ V_2 ของ Correlator ในเครื่อง TEC meter

จากภาพเราจะได้สมการดังนี้

$$V_1 = V_0 \frac{T_c - \Delta T_d}{T_c} \quad (3.6)$$

$$V_2 = V_0 \frac{\Delta T_d + T_c - T_0}{T_c} \quad (3.7)$$

เมื่อ T_c คือ Clock Rate ของ P code = 97.75 ns

T_0 คือ Fixed delay = 100 ns

V_0 คือ ระดับสัญญาณอ้างอิง

โดยที่ $0 < \Delta T_d < T_c$ และ T_0

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\Delta T_d = \frac{(V_2 - V_1)T_c + V_1T_0}{V_1 + V_2} \quad (3.8)$$

แต่เนื่องจากขณะที่เครื่องรับรับสัญญาณมาประมวลผลนั้นเครื่องรับก็จะมี ความแตกต่างของเวลาหน่วง L_1 และ L_2 ด้วย คือ T_r ซึ่งก็ต้องถูกกำจัดออกไปด้วย เพราะฉะนั้นสมการ (3.8) ก็จะได้เป็น

$$\Delta T_d = \frac{(V_2 - V_1)T_c + V_1T_0}{V_1 + V_2} - T_r \quad (3.9)$$

เมื่อแทน ΔT_d ลงในสมการที่ (3.5) ก็จะได้ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ออกมา

โดยส่วนมากการอ้างอิงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ นั้นจะอ้างอิงถึงปริมาณที่อยู่เหนือหัวหรือในแนวตั้ง แต่โดยมากดาวเทียม GPS นั้นจะผ่านมาในแนวตั้งไม่บ่อยนัก เราจึงต้องเปลี่ยนค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแนวเส้นทางระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียมหรือ Slant TEC ไปเป็นค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแนวตั้งหรือ Vertical TEC ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบเป็นมาตรฐาน โดยใช้การคำนวณโดยใช้มุมซีโนที่อยู่บนพื้นฐานในภาพที่ 33 ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (3.10) ถึง(3.13) [11]

$$\text{vertical TEC} = \text{SF} \times \text{slant TEC} \quad (3.10)$$

$$\text{โดยที่ } \text{SF} = \text{Slant Factor} = \cos Z' \quad (3.11)$$

จากภาพได้ค่ามุม Z' ดังนี้

$$\sin Z' = \frac{R_e}{R_e + h_m} \sin Z \quad (3.12)$$

$$Z = 90 - el$$

เพราะฉะนั้นแทนในสมการ (3.11) จะได้

$$\text{SF} = \cos \left(\arcsin \left[\frac{R_e}{R_e + h_m} \sin(90 - el) \right] \right) \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R_e คือ รัศมีเฉลี่ยของโลก (กม.)

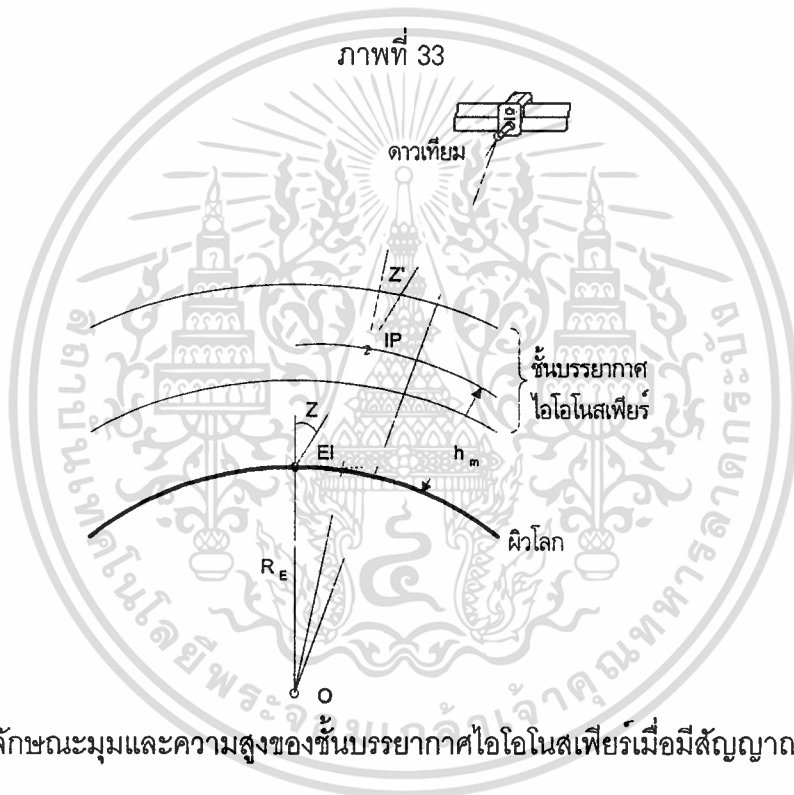
h_m คือ ความสูงเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (กม.)

el คือ มุมเงย (องศา)

Z คือ มุมซิมิทที่สถานีภาคพื้นดิน (องศา)

Z' คือ มุมซิมิทที่จุด IP (Ionospheric Point)

เพราะฉะนั้นคำว่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในความหมายต่อจากนี้คือปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแนวตั้ง หรือ Vertical TEC



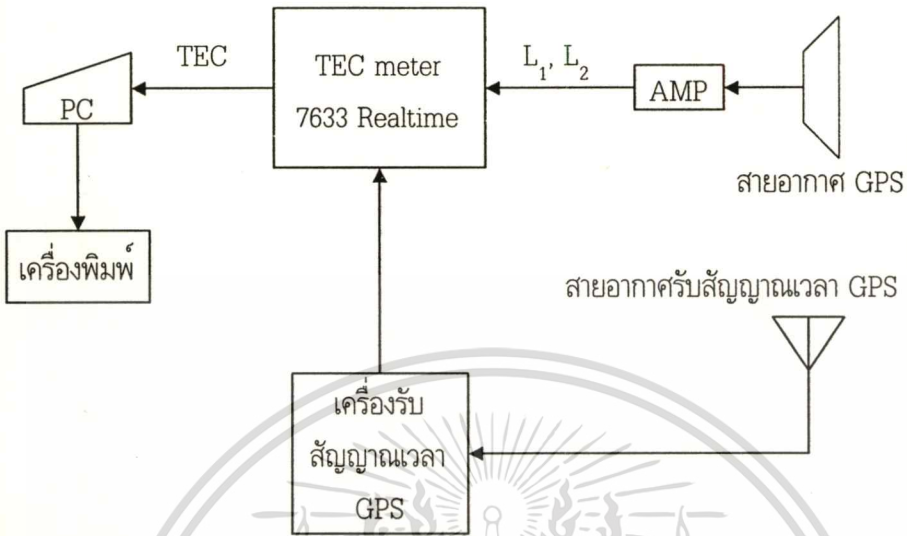
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณ [18]

1. 7633 Realtime TEC meter
2. Personal Computer
3. GPS Time Receiver SKI-93034
4. 990A Standard Antenna
5. GPS Time Antenna

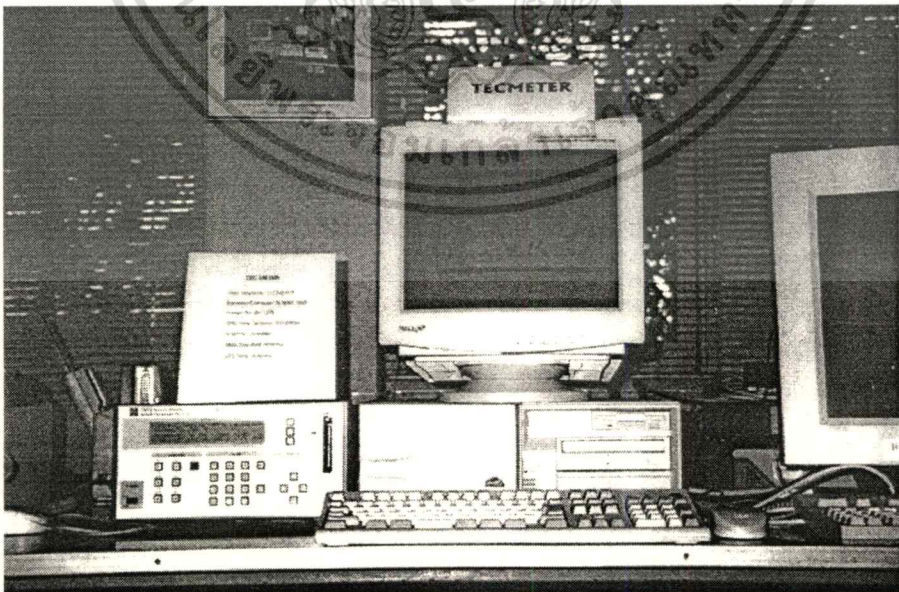
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 34



แสดงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

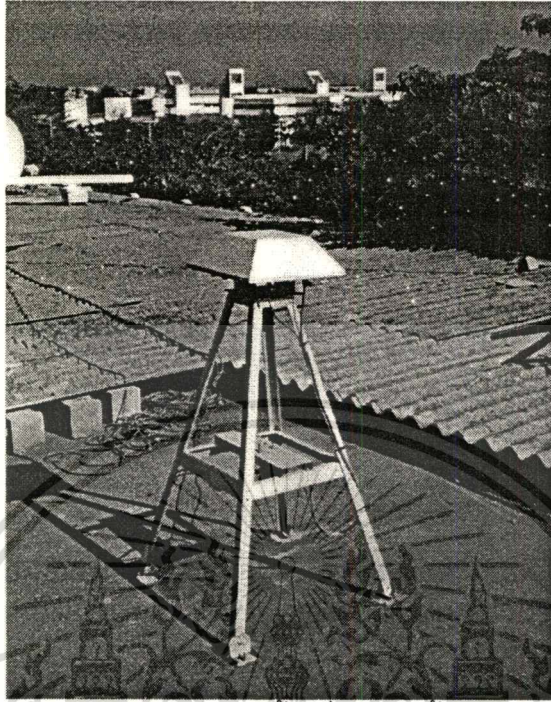
ภาพที่ 35



แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 36



แสดงสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS ติดตั้งอยู่บนดาดฟ้าตึกวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล.

ภาพที่ 37



แสดงสายอากาศรับสัญญาณเวลาจากดาวเทียม GPS
ติดตั้งอยู่บนดาดฟ้าตึกวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานที่ตั้งของอุปกรณ์การทดลองนั้นติดตั้งอยู่ที่ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร รวมถึงที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ และ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต

วิธีการทำงานของเครื่องรับนั้นจะเริ่มตั้งแต่เมื่อสัญญาณจากดาวเทียม GPS เข้ามาทางจานสายอากาศรับสัญญาณ GPS แล้วผ่านตัวขยายสัญญาณเข้าไปที่เครื่อง TEC meter ซึ่งก็จะแปลงสัญญาณที่ได้นั้นให้ลดความถี่ลงแล้วผ่านตัว Correlator (ดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา) ซึ่งก็จะได้อาปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ออกมาทุก 1 นาที แล้วบันทึกลงในคอมพิวเตอร์

การคำนวณข้อมูลโดยใช้โปรแกรมภาษาปาสคาล

ข้อมูลที่บันทึกในเครื่องคอมพิวเตอร์จะเป็นข้อมูลในรูปแบบไฟล์ .DAT 1 ไฟล์ต่อวัน เราสามารถแปลงเป็นเท็กซ์ไฟล์ โดยใช้โปรแกรม TMFC.EXE ซึ่งเขียนโดยผู้ผลิตเครื่อง TEC meter บริษัท NITSUKI [18] ซึ่งการทำงานจะใช้คำสั่ง TMFC/E เป็นโหมดที่เปลี่ยนจากไฟล์ข้อมูล (*.DAT) เป็นเท็กซ์ไฟล์ (*.TEC) ดังตัวอย่างการทำงานดังนี้

ภาพที่ 38

```
C:\TEC\CMU>tmfc/e

== Model 7633 Realtime TECMETER Utility ==
== TECMETER Data File Format Converter ==      [ TMFC ver1.50 ]

Input File name >951023.dat

Input File : 951023.dat [TMFTEC] 1995/10/21 06:53 - 1995/10/23 11:58
Output File: 951023.TEC [TXTTEC] 1995/10/21 06:53 - 1995/10/23 11:58

--- End of Convert. ---

C:\TEC\CMU>
```

แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม TMFC.EXE

เมื่อใส่ชื่อไฟล์ที่ต้องการลงไปผลจะได้เป็นไฟล์ในรูปแบบเท็กซ์ไฟล์ดังตัวอย่างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 39

SV #	MJD	TIME HH MM SS	NUM	EL DEG	AZ DEG	DOP HZ	V1 -	V2 -	Tr NS	TEC *10 ¹⁵ /M ²	RMS
16	0012	00:00:35	24	60	205	412	4674	2257	-25	240	63
16	0012	00:01:29	28	60	206	406	4785	2258	-25	227	48
16	0012	00:02:29	29	61	206	399	4755	2332	-25	250	55
24	0012	00:03:37	22	46	339	-105	1647	923	-25	321	109
24	0012	00:04:30	29	45	340	-105	1666	961	-25	339	109
24	0012	00:05:30	29	45	340	-105	1542	872	-25	327	99
16	0012	00:06:35	24	63	208	369	3690	1899	-25	278	61
16	0012	00:07:30	29	63	208	362	3692	1916	-25	282	71
16	0012	00:08:30	29	64	209	355	3954	2074	-25	292	69
24	0012	00:09:33	24	45	343	-105	1912	1207	-25	394	108
24	0012	00:10:28	29	45	343	-105	2098	1184	-25	327	89
24	0012	23:45:34	24	47	330	-94	2440	1249	-25	266	94
24	0012	23:46:29	29	47	331	-96	2377	1279	-25	302	111
24	0012	23:47:29	29	47	331	-96	2178	1224	-25	322	104
24	0012	23:48:37	21	46	332	-97	2237	1225	-25	307	100
24	0012	23:49:29	29	46	333	-98	2186	1285	-25	354	121
24	0012	23:50:29	29	46	333	-100	2244	1069	-25	223	131
24	0012	23:51:36	22	46	334	-101	2483	1133	-25	195	113
24	0012	23:52:28	29	46	335	-101	2540	1335	-25	282	83
24	0012	23:53:28	29	46	335	-101	2521	1450	-25	339	94
24	0012	23:59:33	26	46	339	-106	1929	1029	-25	289	89

แสดงตัวอย่างข้อมูลของ TEC ทุก ๆ 1 นาที เมื่อแปลงเป็นเท็กซ์ไฟล์
จากข้อมูลที่เชียงใหม่ วันที่ 22 ต.ค. 2538

จากภาพที่ 39 โดยที่ข้อมูลแต่ละคอลัมน์จะอธิบายได้ดังนี้

- SV คือ Satellite Volume หรือ เลขที่ของดาวเทียม GPS
- MJD คือ Modified Julian Date คือ เลขวันทางดาราศาสตร์
- TIME คือ เวลาที่เครื่องคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ (Universal Time, UT)
- NUM คือ จำนวนข้อมูลที่เครื่องใช้คำนวณใน 1 นาที
- EL คือ มุมเงยของสายอากาศไปยังดาวเทียม GPS (องศา)
- AZ คือ มุมอาซิมุทของสายอากาศไปยังดาวเทียม GPS (องศา)
- DOP คือ ค่าความถี่ดอปเพลอร์ (Hz)
- V1 คือ ค่าระดับเอาต์พุตที่ออกจาก Correlator 1
- V2 คือ ค่าระดับเอาต์พุตที่ออกจาก Correlator 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tr คือ ค่าความแตกต่างของเวลาหน่วงของทั้ง 2 ความถี่ที่เกิดจากเครื่อง TEC meter (ns)

TEC คือ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ($\times 10^{15}$ อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร)

RMS คือ SD หรือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ($\times 10^{15}$ อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร)

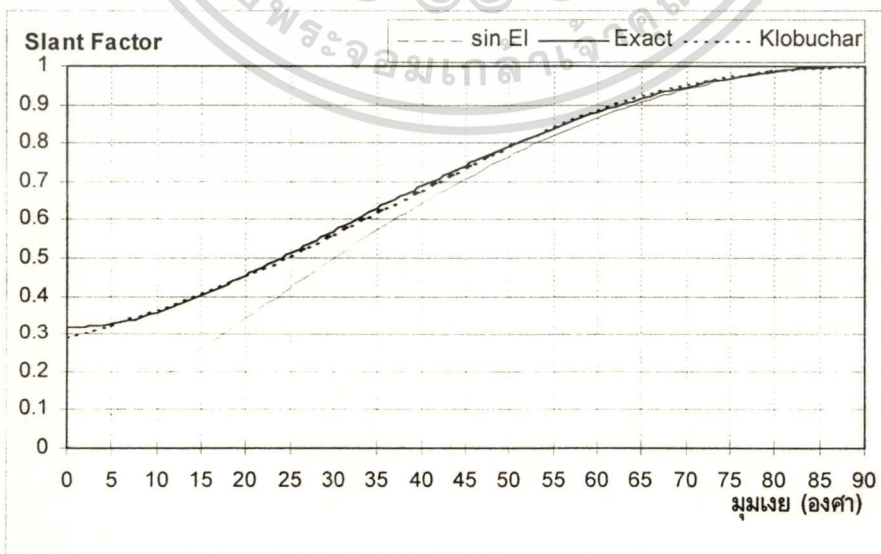
จากนั้นปรับเปลี่ยนค่าปริมาณอิเล็กตรอนในแนวเครื่องรับกับดาวเทียมไปเป็นปริมาณอิเล็กตรอนในแนวตั้ง โดยใช้สมการการประมาณของ Klobuchar [20] ที่ใช้แทนสมการที่ (3.13) เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณของโปรแกรม

สมการการประมาณของ Klobuchar จะใช้หา Slant Factor ดังนี้

$$SF = \frac{1}{1 + 2 \left(\frac{96 - el}{90} \right)^3} \tag{3.14}$$

เมื่อวาดในกราฟเดียวกับสมการจริง (ใช้ $R_e = 6,372$ กม. และ $h_m = 350$ กม.) และสมการการประมาณอย่างง่ายที่สุด ($SF = \sin EL$) จะได้ดังภาพที่ 40 ซึ่งเห็นว่าสมการการประมาณ SF ของ Klobuchar นั้นจะใกล้เคียงกับค่าจริงมากเมื่อมุมเงยมากกว่า 5 องศา

ภาพที่ 40



แสดงค่า Slant factor จริงและค่าประมาณ กับมุมเงย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นก็ทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ทุก ๆ 15 นาที ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดของทั้งคู่ออกมา โดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นเอง AVG.PAS (ภาคผนวก ค.) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแนวเครื่องรับกับดาวเทียมไปเป็นปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแนวตั้งสำหรับอ้างอิงเพื่อเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ และกำจัดข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อน แล้วหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD) ของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ออกมา (ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานก็มีการหาค่าในการศึกษาปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ในต่างประเทศ) โดยโปรแกรมนี้อ้างอิงการทำงานดังไฟล์เวิร์กบุ๊กในภาคผนวก ง.

ส่วนข้อมูลในบางนาฬิกาจะเป็นข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ ซึ่งเราก็จะไม่นำมาคำนวณ โดยจะกำจัดข้อมูลนั้นออกไปโดยมีเงื่อนไขดังนี้

1. $EL \geq 45$ มุมเงยต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 45 องศา เพื่อที่ค่าจะได้ออกมาใกล้เคียงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแนวตั้ง
2. $NUM \geq 10$ ค่าจำนวนข้อมูลที่ใช้คำนวณในแต่ละนาฬิกาต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 10 เพื่อที่คำนวณนั้นจะมีความผิดพลาดน้อยที่สุด
3. $SD < 100$ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต้องน้อยกว่า 100 เพราะที่ค่า STD ที่สูง ๆ จะเกิดเนื่องมีการกระจายข้อมูลที่คำนวณในแต่ละนาฬิกาสูง ทำให้ค่าที่ได้ออกมาจะเกิดความผิดพลาด
4. $TEC > 0$ ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ต้องเป็นค่าบวก เนื่องจากบางครั้งเครื่อง TEC meter จะมีข้อผิดพลาดอันเนื่องจากการรับสัญญาณ, การคำนวณ หรือสาเหตุอื่น ๆ ซึ่งทำให้เกิดค่าปริมาณ TEC ที่เป็นลบขึ้นมา ทำให้การหาค่าเฉลี่ยนั้นมีความผิดพลาดสูง

ตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม AVG.EXE แสดงได้ดังนี้

ภาพที่ 41

```
C:\TEC\CMU>avg
=== PROGRAM AVERAGE VERTICAL TEC : Range 15 min ===
=== Program Design by KAN LAOIPATTANA KMITL ===

Input name of Source TEC file : 951022.tec
Save average vertical TEC file : 951022.AVG

C:\TEC\CMU>
```

แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม AVG.EXE

หมายเหตุ ไฟล์ที่จะใช้ในการหาค่าเฉลี่ยโดยโปรแกรม AVG.EXE ต้องเป็นเท็กซ์ไฟล์ที่มีข้อมูล 1 วันเท่านั้น

จากการทำงานภาพที่ 41 จะได้ผลการทำงานเป็นเท็กซ์ไฟล์แสดงดังภาพต่อไปนี้

ภาพที่ 42

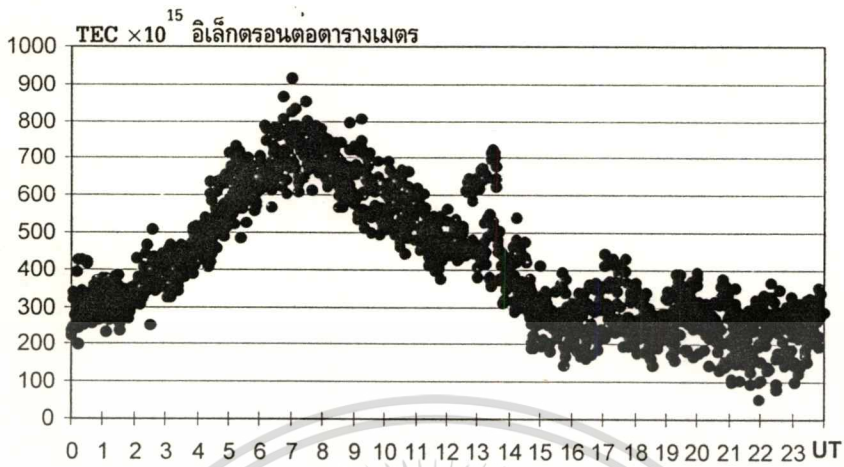
MJD	TIME	AvgTEC	SD	;el>=45
	hh:mm	10^{15}	%	
12	0: 0	236.8564	9.65	
12	0:15	280.7995	7.00	
12	0:30			
12	0:45	286.7774	7.30	
12	1: 0	298.8869	9.65	
12	1:15	291.8297	3.15	
12	1:30	283.8780	10.29	
12	1:45	284.1171	7.29	
12	2: 0	274.8560	4.44	
12	2:15	299.8151	13.07	
12	2:30	343.2119	11.07	
12	2:45	386.9744	4.11	
12	3: 0	325.5448	14.16	
12	3:15	381.5651	11.08	
12	21: 0	187.8347	36.80	
12	21:15	199.6238	24.46	
12	21:30	176.1751	30.11	
12	21:45	173.2358	50.12	
12	22: 0	199.7551	34.93	
12	22:15	192.0934	39.54	
12	22:30	184.5576	21.45	
12	22:45	160.5094	23.33	
12	23: 0	144.7512	30.59	
12	23:15	201.6610	16.29	
12	23:30	198.0814	14.40	
12	23:45	231.3016	15.29	
MJD	12			
TECmax	7: 0	617.4277		
TECmin	23: 0	144.7512		
SDmax	21:45	50.12		
SDmin	8: 0	2.43		

แสดงตัวอย่างไฟล์ 951022.AVG

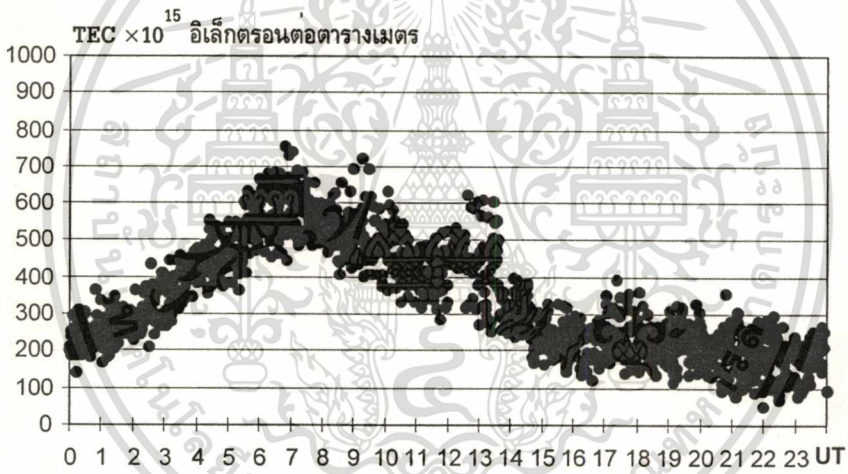
จากผลที่ได้พลอตเป็นกราฟได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

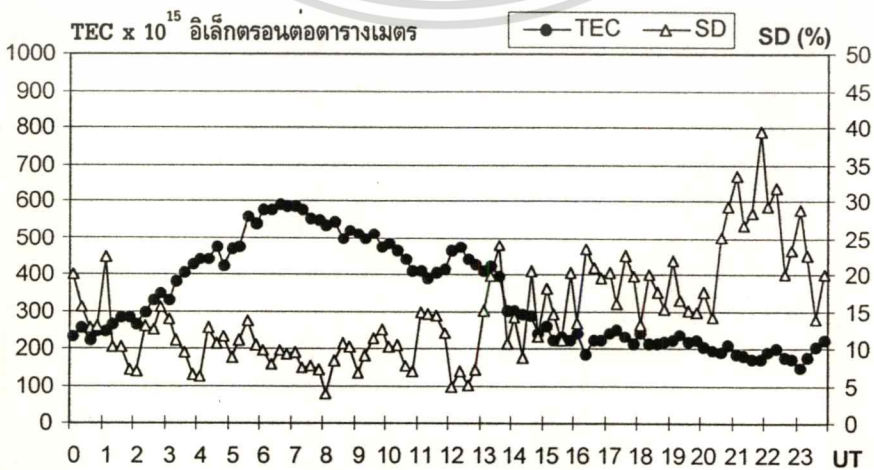
ภาพที่ 43



(ก) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแนวสายอากาศกับดาวเทียม



(ข) ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแนวตั้ง



(ค) ค่าเฉลี่ยปริมาณอิเล็กตรอน TEC และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 43 แสดงค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ขณะปรับเปลี่ยนเป็นปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแนวดิ่ง และค่าเฉลี่ยกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในวันที่ 22 ต.ค. 2538 ที่เชียงใหม่ จากภาพที่ 43 (ก) นั้น เป็นค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ในแนวสายอากาศกับดาวเทียม เมื่อปรับเปลี่ยนไปเป็นปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในแนวดิ่ง โดยใช้สมการการประมาณของ Klobuchar จะได้ดังภาพ 43 (ข) ส่วนภาพที่ 43 (ค) เป็นค่าเฉลี่ยปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

เมื่อได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละวันและจะปรับเปลี่ยนค่าเวลาจาก UT (Universal Time) เป็น LT (Local Time) โดย

$$LT = UT + 7 \quad (3.15)$$

หลังจากนั้นนำไปหาค่าเฉลี่ยต่อเดือนอีกครั้งก็ได้ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยต่อเดือนซึ่งใช้เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์และจะแสดงผลการทดลองและวิเคราะห์ในบทต่อไป

หลักการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้

เนื่องจากค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ที่วัดได้นั้นจะเป็นข้อมูลที่ได้ทุก ๆ 1 นาที ซึ่งการนำมาใช้งานนั้นจะลำบากและไม่เป็นมาตรฐานจึงต้องมีการหาค่าเฉลี่ยในช่วง 15 นาทีและกำจัดค่าที่มีความคลาดเคลื่อนออกไปรวมถึงการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในช่วงและหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดของแต่ละวัน

การหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(Standard Deviation: SD) จะหาได้โดยใช้สมการดังนี้

$$SD = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (x_i^2) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n(n-1)}} \quad (3.16)$$

เมื่อ x_i คือ ค่าของข้อมูลที่ i

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ส่วนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในบทที่ 4 นั้นจะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ 2 ชุด คือ x และ y ซึ่งความสัมพันธ์จะหาได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ r_{xy} ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.17)$$

เมื่อ ρ_{xy} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 และ

$$\text{Cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.18)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (x_i^2) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n^2}} \quad (3.19)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (y_i^2) - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n^2}} \quad (3.20)$$

โดยที่ \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลชุด x

\bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลชุด y

นอกจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้วยังมีการใช้ความสัมพันธ์ของ 2 ชุดข้อมูล (ชุดข้อมูล x และชุดข้อมูล y) ที่เป็นสมการเชิงเส้นโดยมีสมการพื้นฐานดังนี้

$$y = mx + c \quad (3.21)$$

$$\text{เมื่อ } m = \text{Slope} = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.22)$$

$$c = \bar{y} - m\bar{x} \quad (3.23)$$

ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าที่ได้จะแสดงในบทต่อไป

บทที่ 4

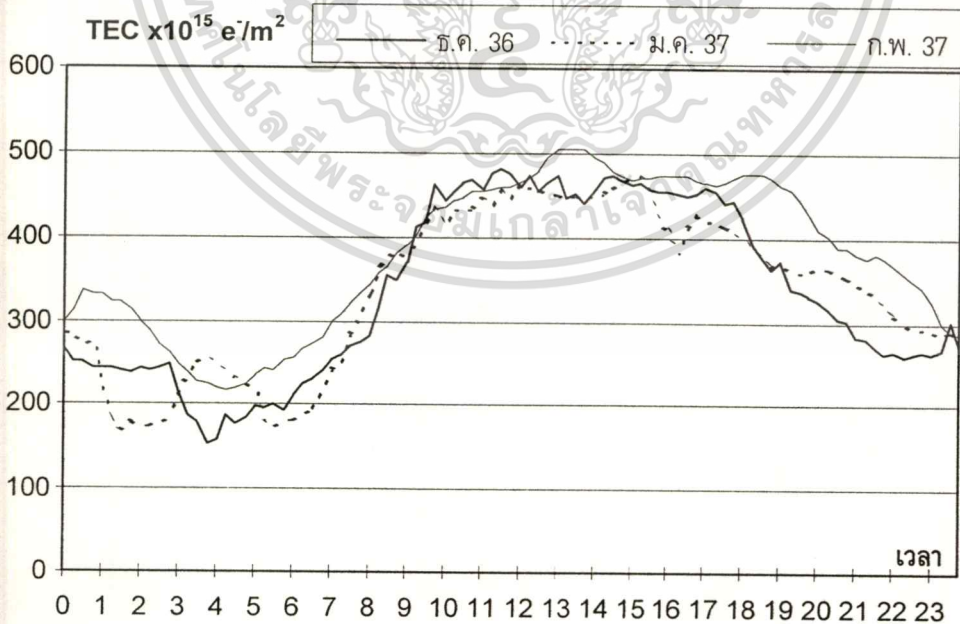
ผลการวิเคราะห์ลักษณะปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกับเวลาระหว่างวัน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คือ เวลา, ฤดูกาล, ความเข้มของแสงอาทิตย์, เส้นรุ้ง และการรบกวนของสนามแม่เหล็กโลก [5]

ผลการวัดและคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยต่อเดือนที่กรุงเทพฯ ตั้งแต่ธันวาคม 2536 ถึง สิงหาคม 2537 และ ธันวาคม 2537 ถึง กุมภาพันธ์ 2538 แสดงกับเวลาท้องถิ่น (LT) แสดงดังภาพที่ 44 (ก) ถึงภาพที่ 44 (ง) และแสดงพร้อมกันทั้งเชียงใหม่และกรุงเทพฯ ตั้งแต่ตุลาคม 2538 ถึงธันวาคม 2539 แสดงดังภาพที่ 45 (ก) ถึงภาพที่ 45 (ง)

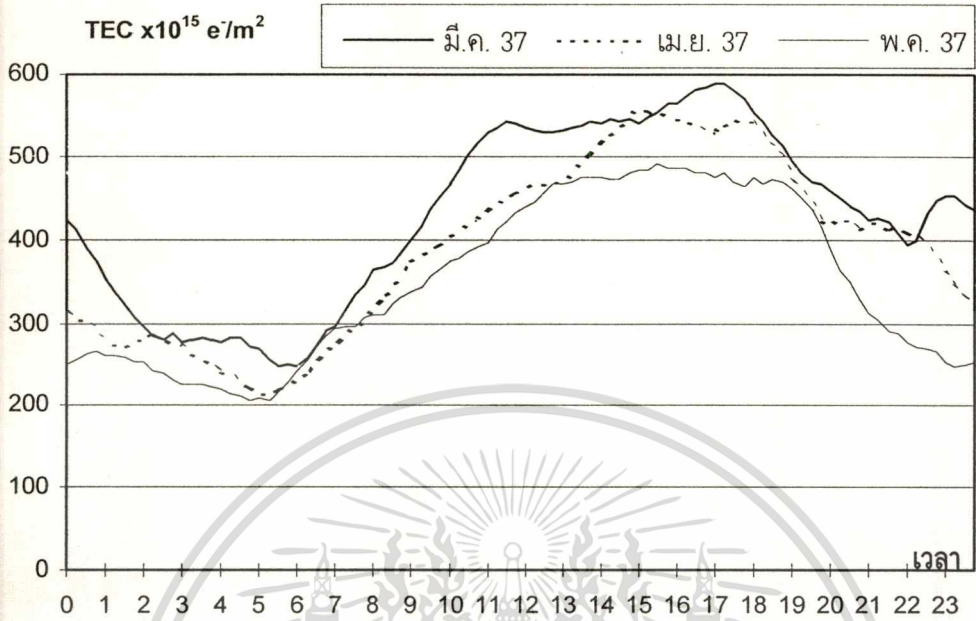
ภาพที่ 44



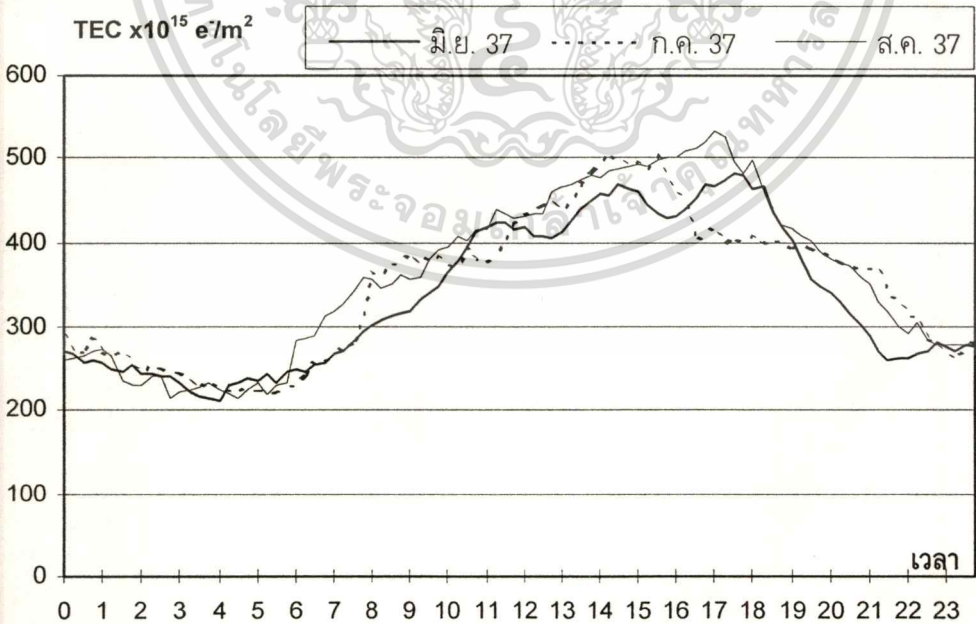
(ก) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพฯ

ในเดือนธันวาคม 2536 ถึง กุมภาพันธ์ 2537

ภาพที่ 44 (ต่อ)



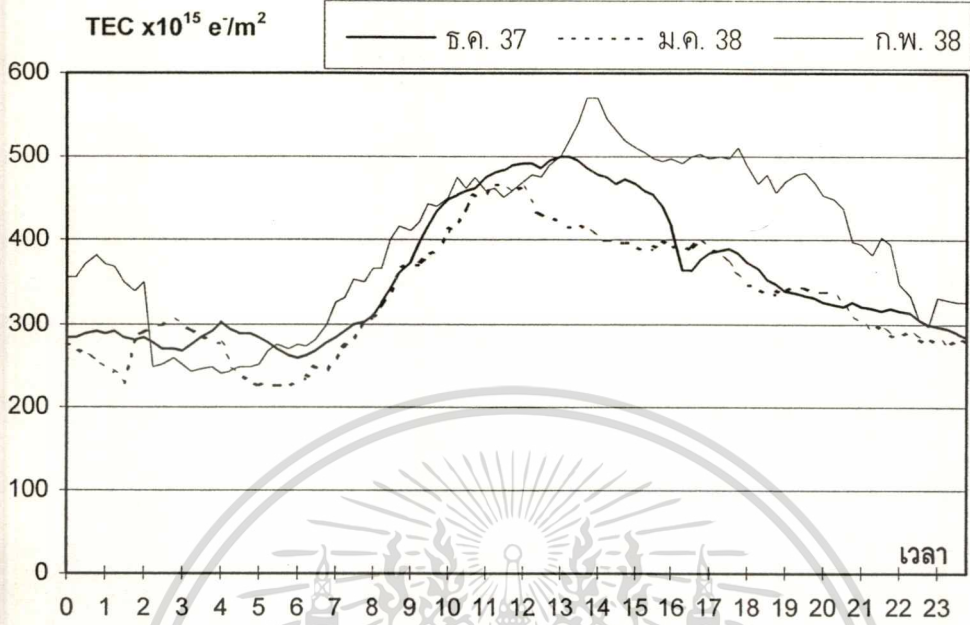
(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพ
ในเดือนมีนาคม ถึงพฤษภาคม 2537



(ค) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพ
ในเดือนมิถุนายน ถึงสิงหาคม 2537

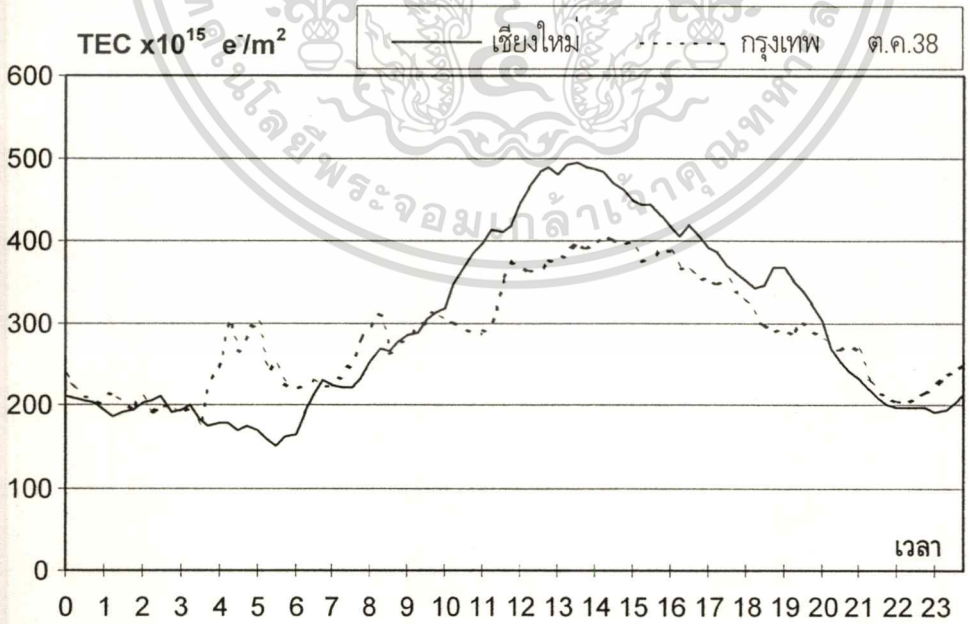
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 44 (ต่อ)



(ง) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของกรุงเทพฯ ในเดือน ธันวาคม 2537 ถึง กุมภาพันธ์ 2538

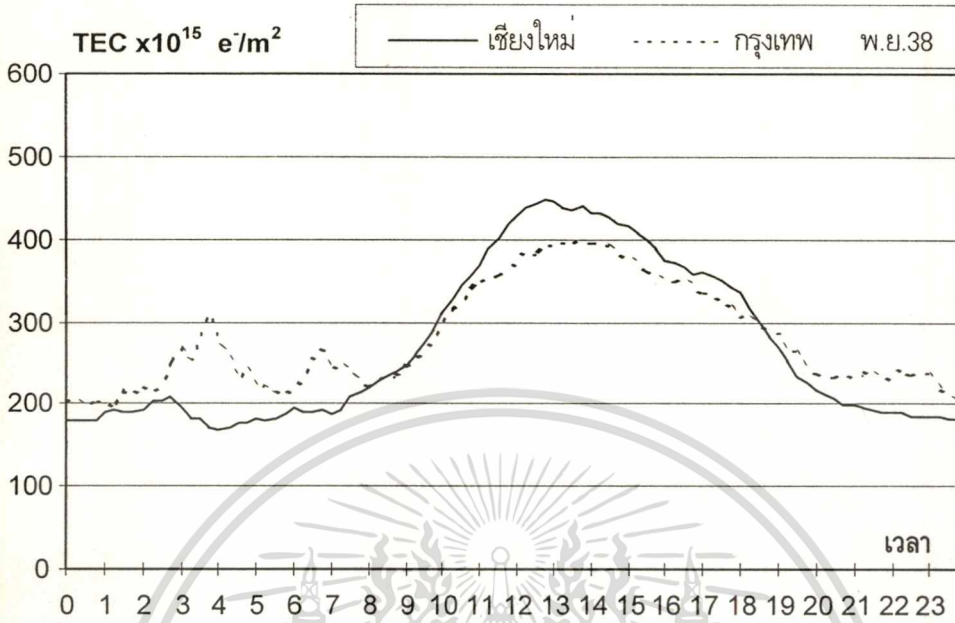
ภาพที่ 45



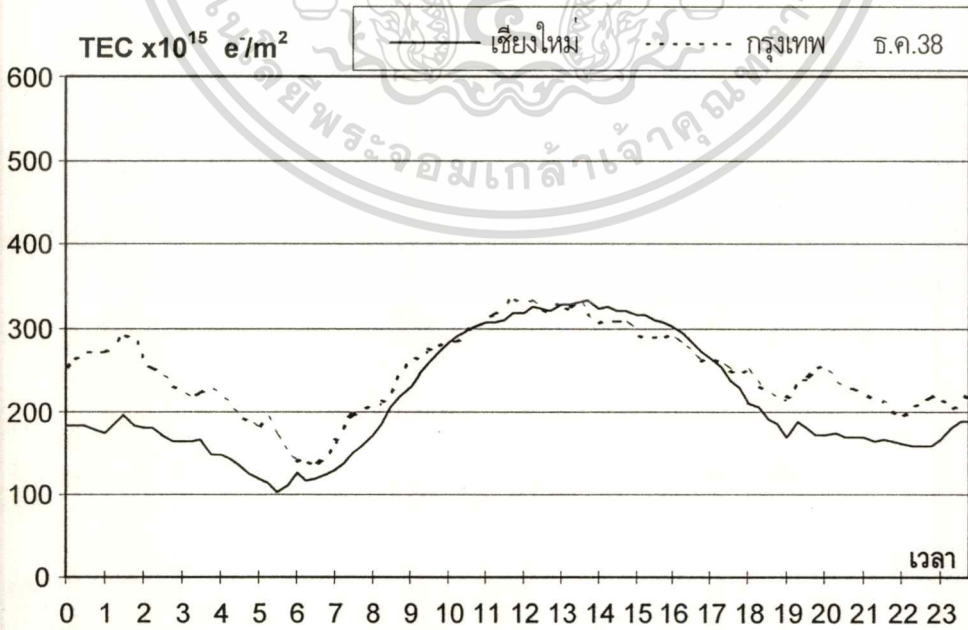
(ก) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพฯ เดือนตุลาคม 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ เดือนพฤศจิกายน 2538

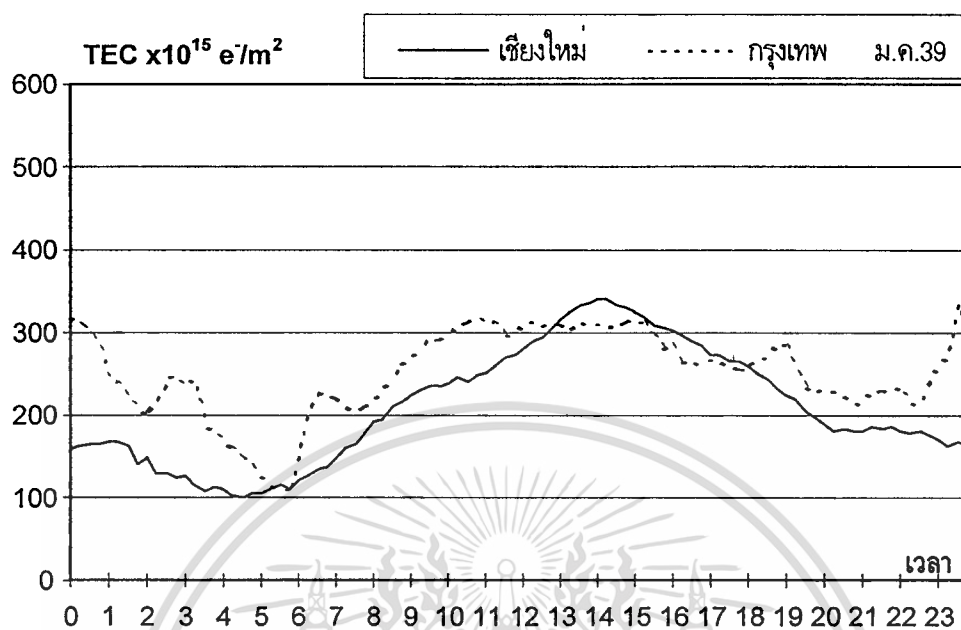


(ค) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ

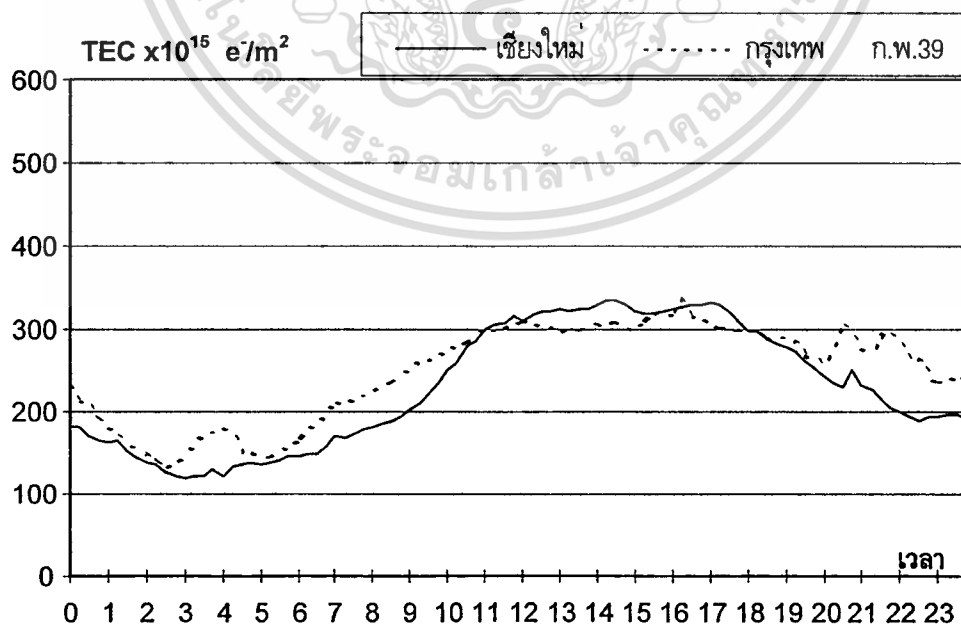
เดือนธันวาคม 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



(ง) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ
เดือนมกราคม 2539



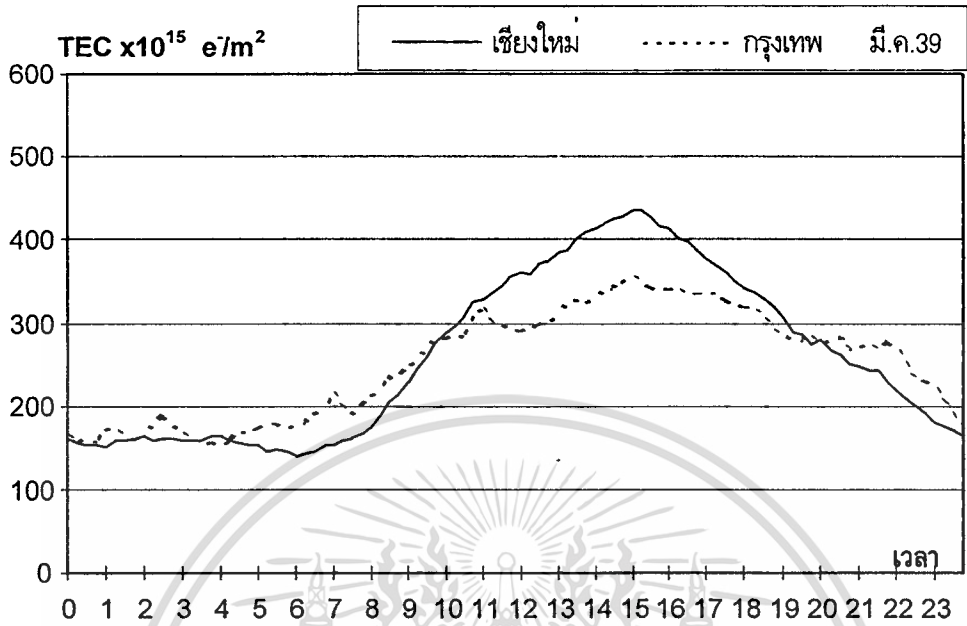
(จ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ

เดือนกุมภาพันธ์ 2539

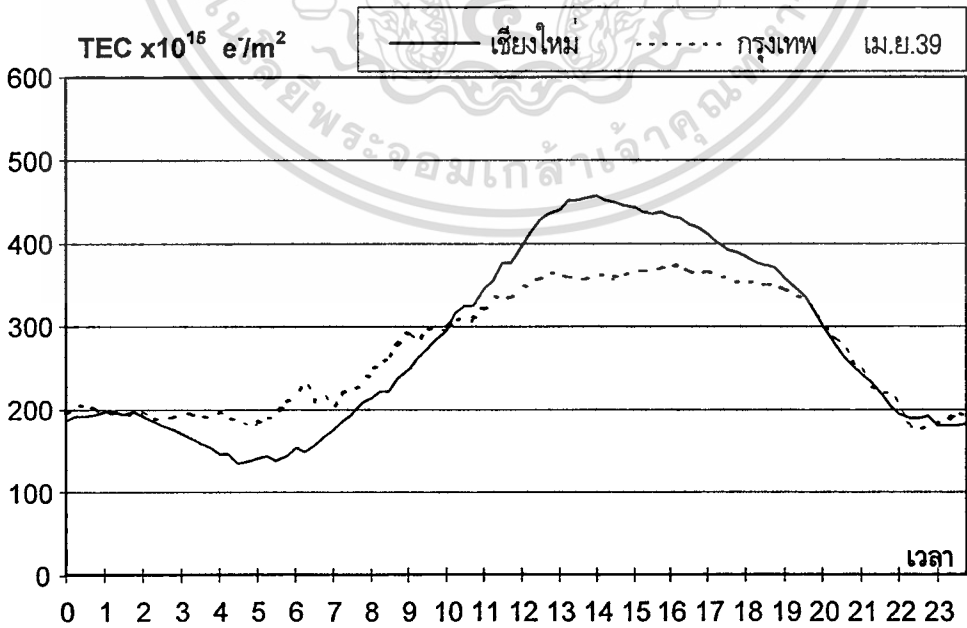
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



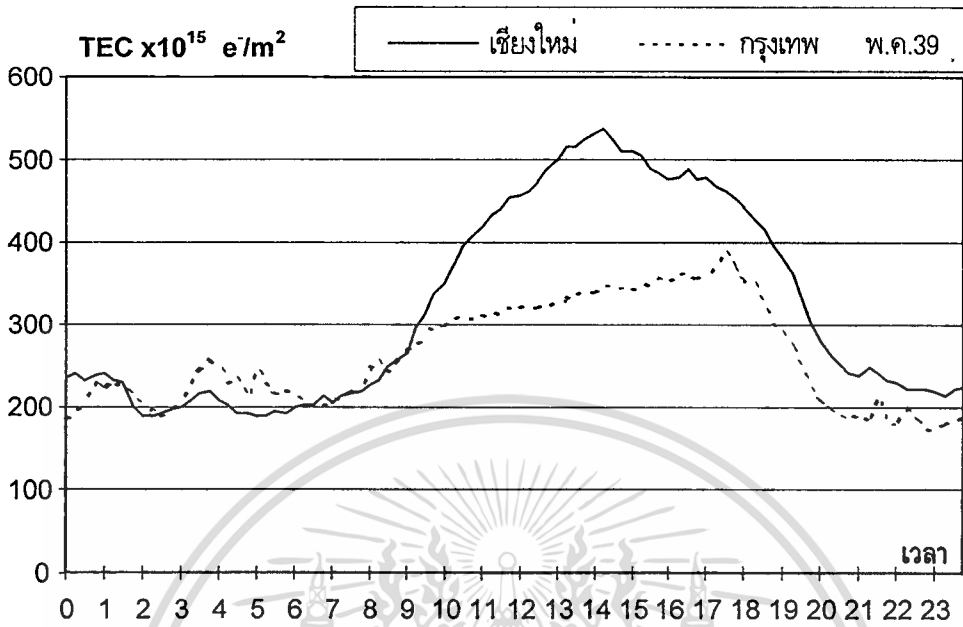
(จ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพฯ เดือนมีนาคม 2539



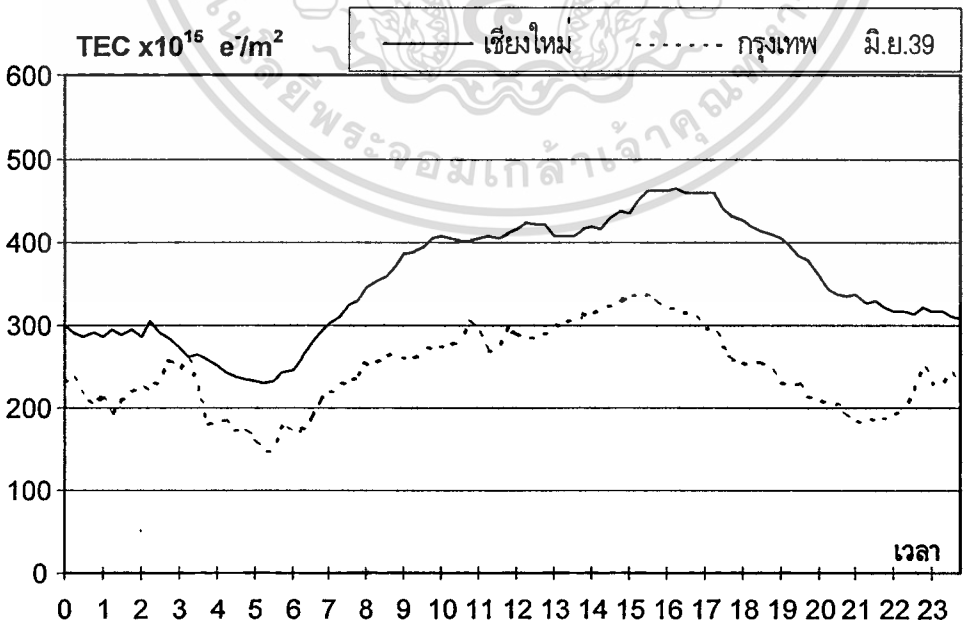
(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพฯ เดือนเมษายน 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ
เดือนพฤษภาคม 2539

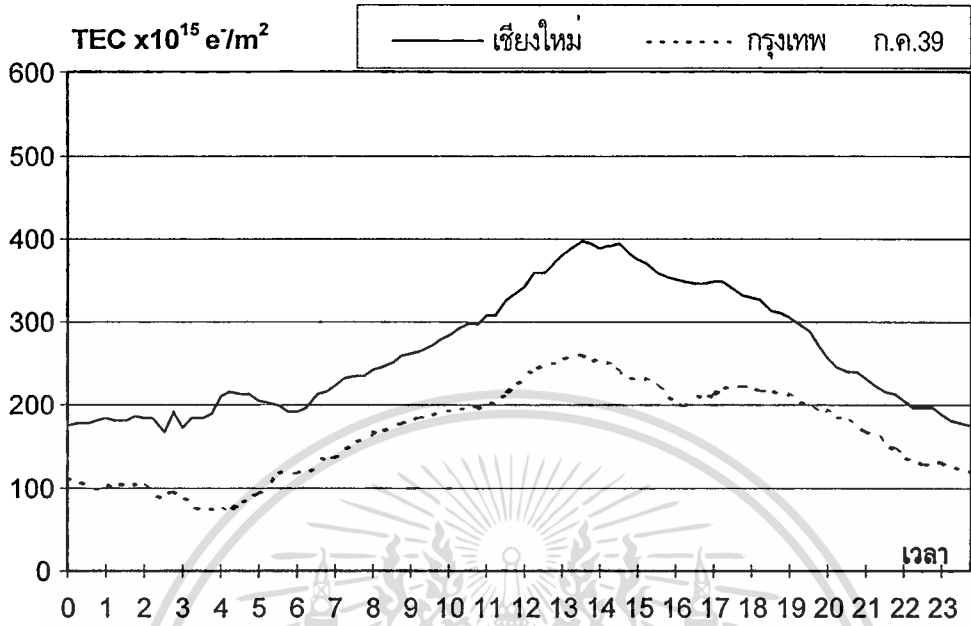


(ค) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ

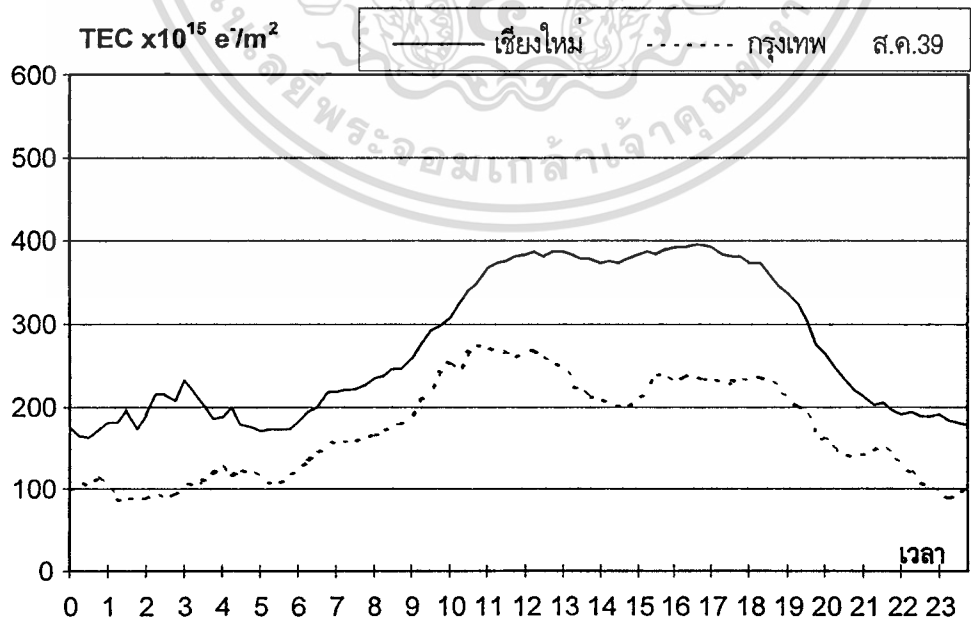
เดือนมิถุนายน 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



(ญ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ
เดือนกรกฎาคม 2539

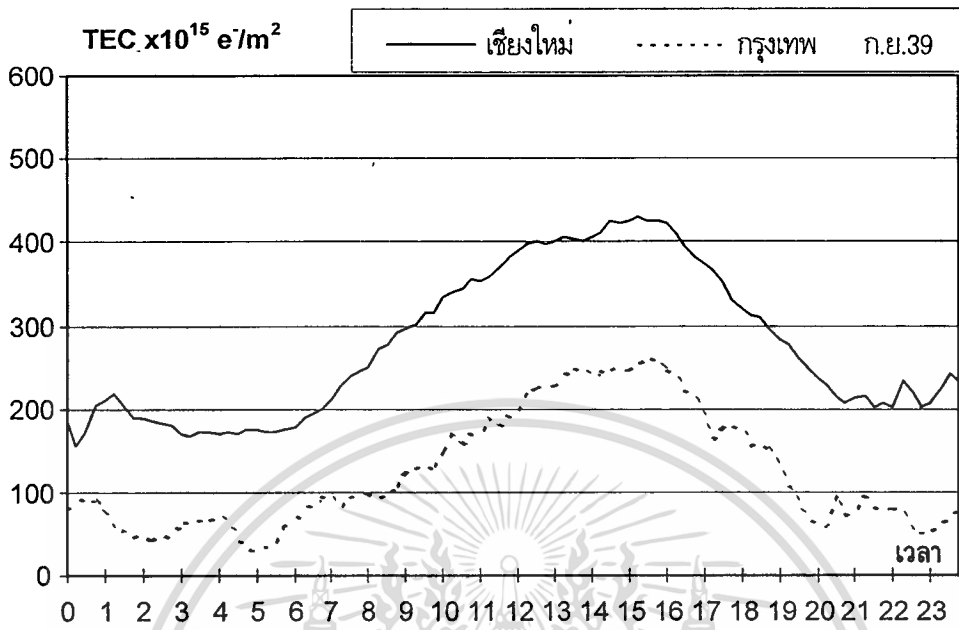


(ฎ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ

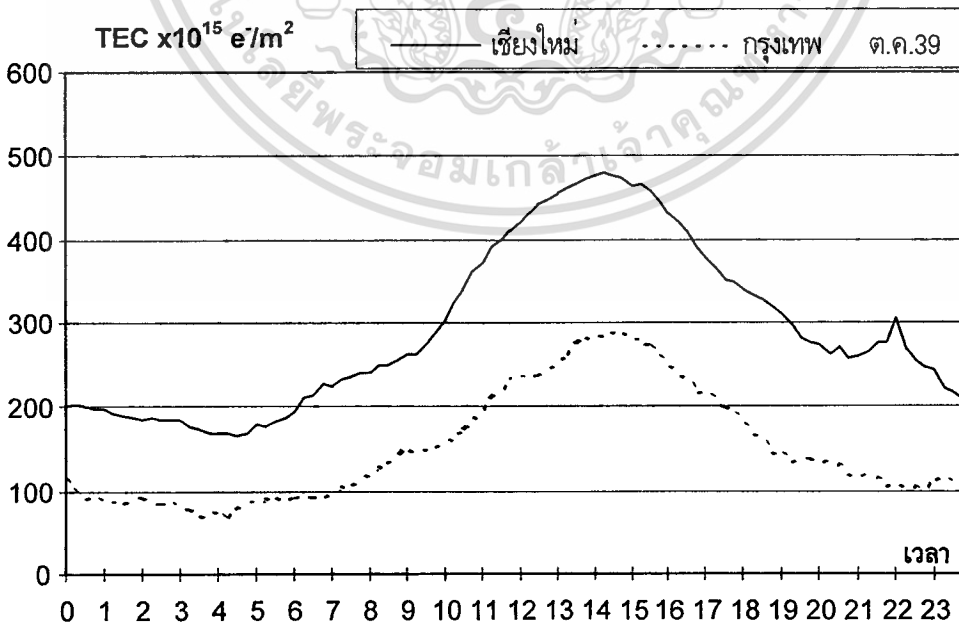
เดือนสิงหาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



(จ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพฯ เดือนกันยายน 2539

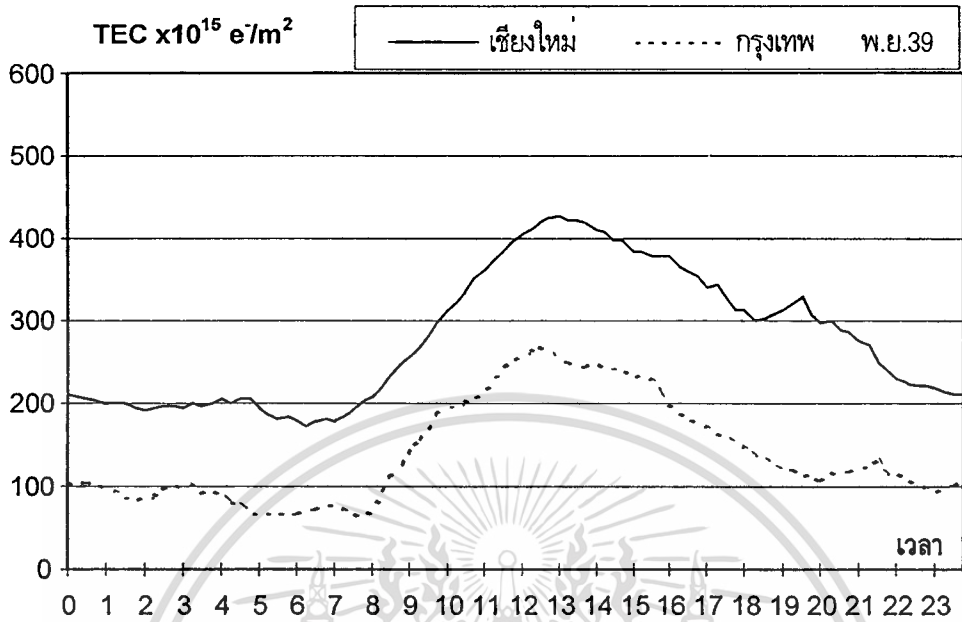


(ข) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพฯ

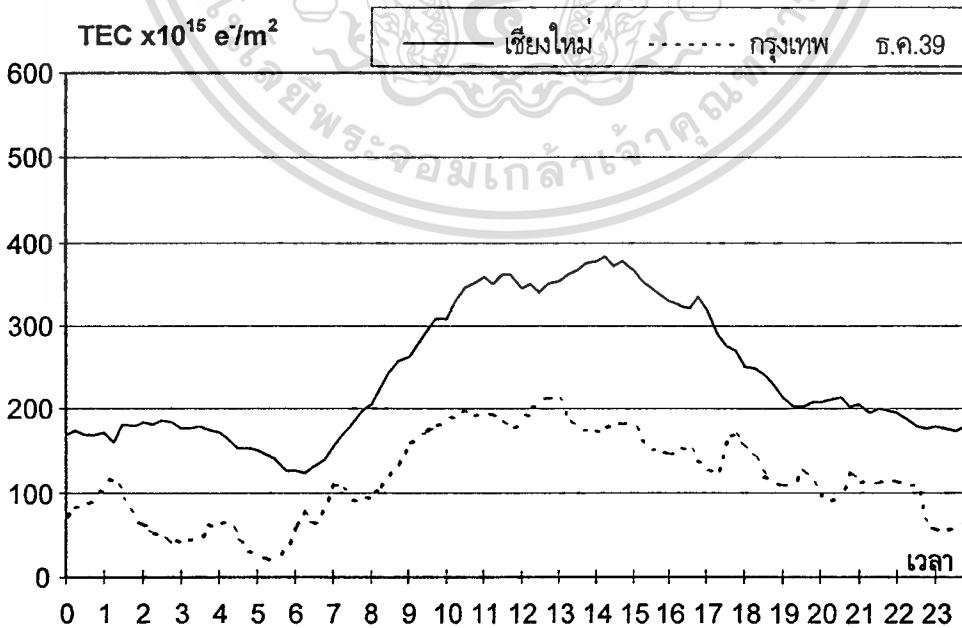
เดือนตุลาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45 (ต่อ)



(ต) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ
เดือนพฤศจิกายน 2539



(ถ) แสดงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เฉลี่ยต่อเดือนของเชียงใหม่และกรุงเทพ

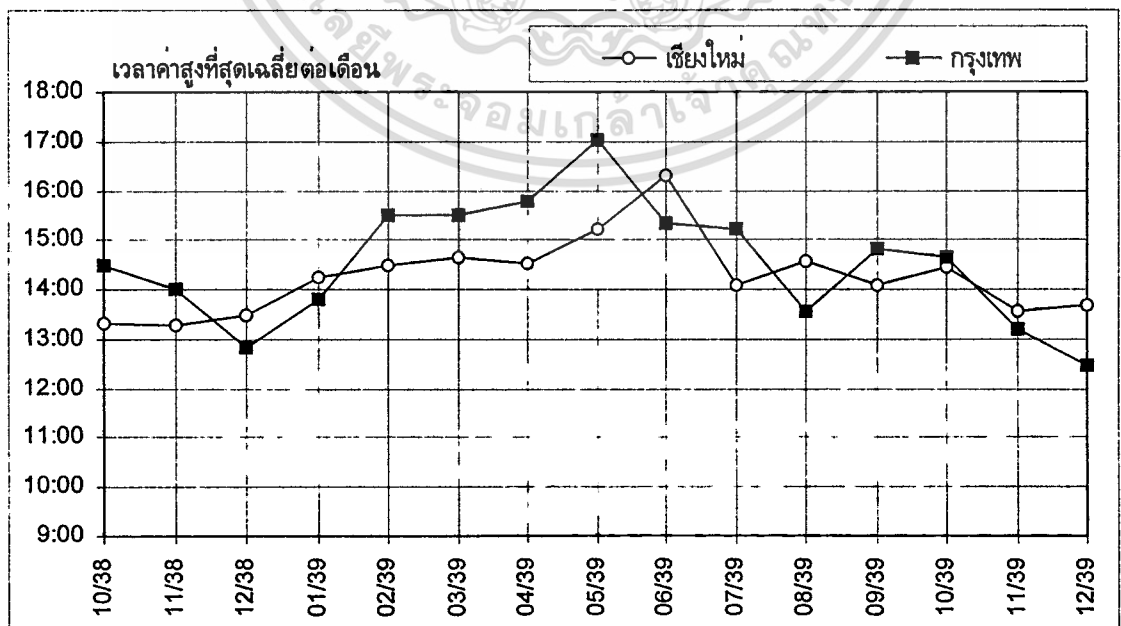
เดือนธันวาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลในช่วงเดือน กันยายนถึงพฤศจิกายน 2537 ของสถานีวัดกรุงเทพ เป็นช่วงที่เครื่องมือวัดวัดค่าได้ไม่สมบูรณ์และมีความคลาดเคลื่อนมากจึงไม่นำมาแสดงในผลการทดลองแต่สามารถเห็นค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุดได้เป็นบางเดือน ส่วนหลังจากเดือนกุมภาพันธ์เครื่องมือก็มีความคลาดเคลื่อนสูงและสายอากาศรับที่เคลื่อนที่ได้ไม่ทำงาน จึงได้ทำการติดตั้งใหม่ในเดือน ตุลาคม 2538 และรับค่าจนถึงปัจจุบัน ในการแสดงผลการทดลองนั้นจะแสดงตั้งแต่เริ่มรับจนกระทั่งถึงปลายปี 2539 ยกเว้น ที่ภูเก็ตที่เครื่องมือมีความผิดพลาดสามารถรับค่าได้ประมาณ 6 วัน ตั้งแต่วันที่ 22 ถึง 27 มิถุนายน 2539 และจะแสดงเป็นค่าเพื่อเปรียบเทียบในหัวข้อการเปลี่ยนแปลงต่อเส้นรุ้งแม่เหล็ก

จากภาพที่ 44 ถึงภาพที่ 45 จะเห็นว่าในการเปลี่ยนแปลงระหว่างวันค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จะต่ำที่สุดอยู่ช่วงก่อนที่ดวงอาทิตย์ขึ้น และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมากที่สุดในช่วงประมาณ 14.00 น.[4] และหลังจากนั้นจะลดต่ำลงในช่วงบ่ายถึงกลางคืน ส่วนเวลาเฉลี่ยของจุดต่ำที่สุดและจุดที่สูงที่สุด ซึ่งคำนวณจากการที่นำเวลาของจุดสูงที่สุดและจุดต่ำที่สุดของข้อมูลแต่ละวันใน 1 เดือนมาหาค่าเฉลี่ยแสดงดังภาพที่ 46 (ก) และภาพที่ 46 (ข) ตามลำดับ (ซึ่งต่างจากจุดต่ำที่สุดและจุดสูงที่สุดของค่าเฉลี่ยต่อเดือนปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ในภาพที่ 44 ถึงภาพที่ 45) และร้อยละของเวลาที่เป็นจุดต่ำที่สุดและสูงที่สุดของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ในแต่ละวันของเชียงใหม่และกรุงเทพฯ แสดงดังภาพที่ 47 ถึงภาพที่ 48

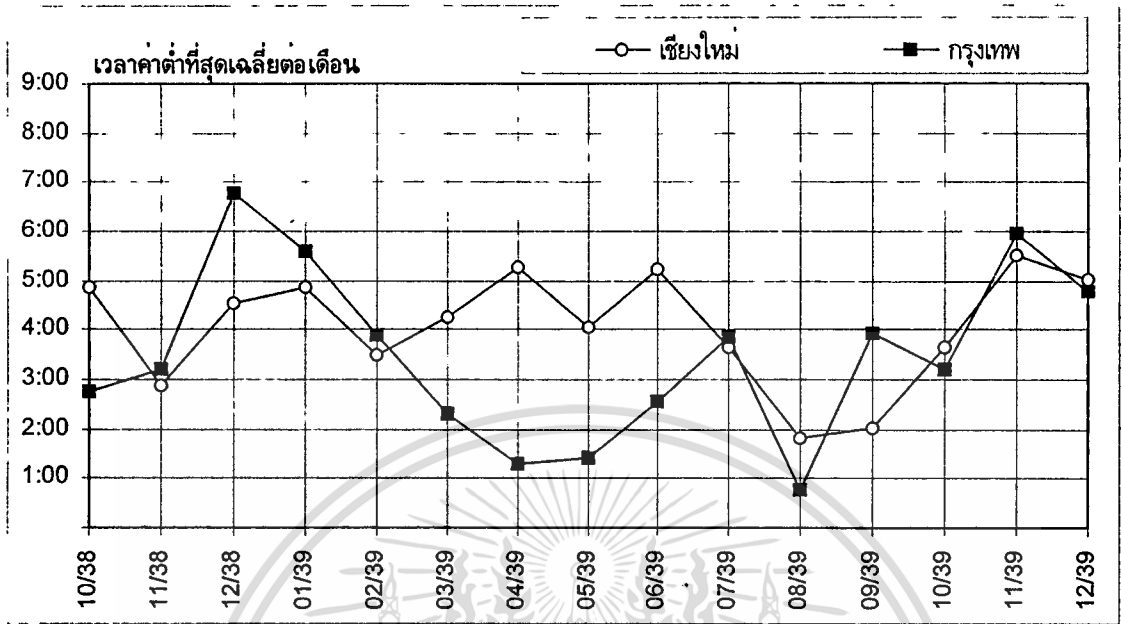
ภาพที่ 46



(ก) แสดงค่าเวลาเฉลี่ยต่อเดือนของจุดสูงที่สุดของข้อมูลแต่ละวัน

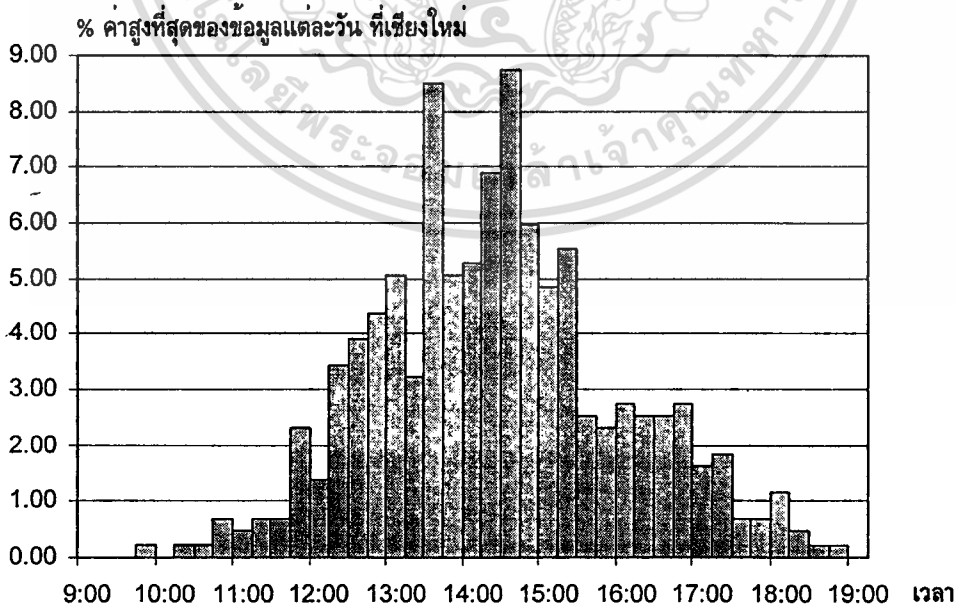
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 46 (ต่อ)



(ข) แสดงค่าเวลาเฉลี่ยต่อเดือนของจุดต่ำที่สุดของข้อมูลแต่ละวัน

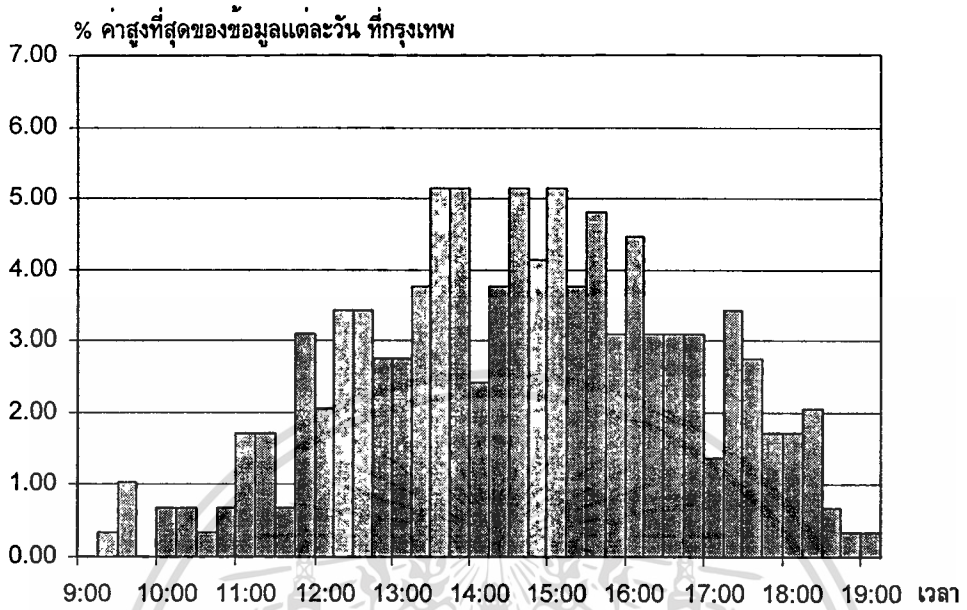
ภาพที่ 47



(ก) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็นจุดสูงสุดที่สุดของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รอน TEC ในแต่ละวัน ที่เชียงใหม่

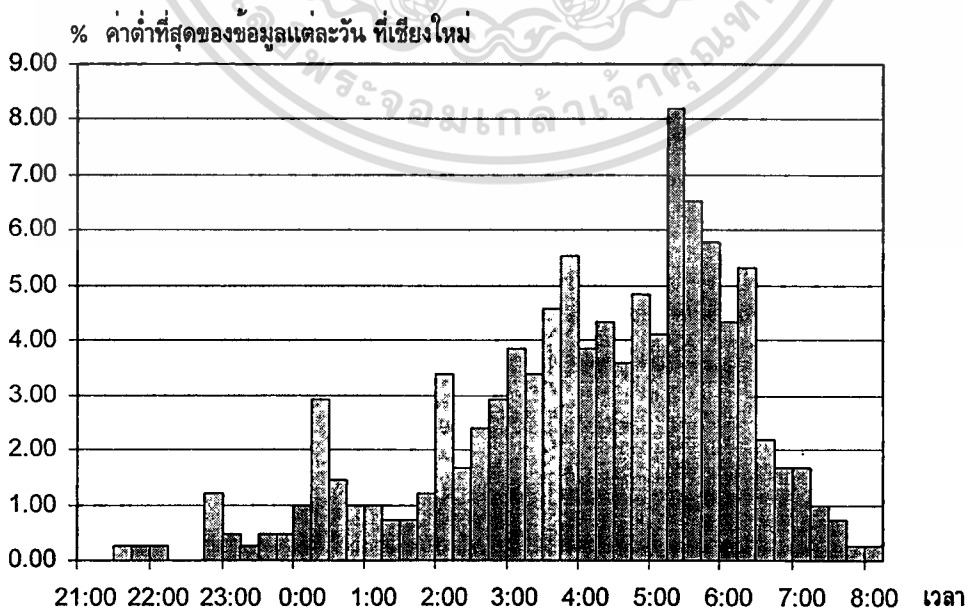
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 47 (ต่อ)



(ข) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็จุดสูงสุดที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแต่ละวัน ที่กรุงเทพฯ

ภาพที่ 48

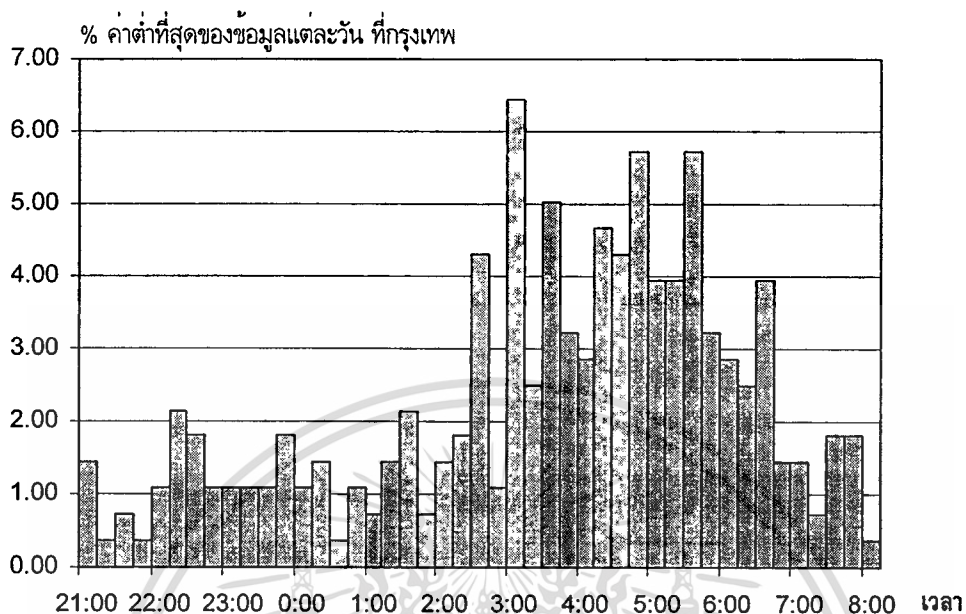


(ก) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็จุดต่ำที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแต่ละวัน ที่เชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 48 (ต่อ)



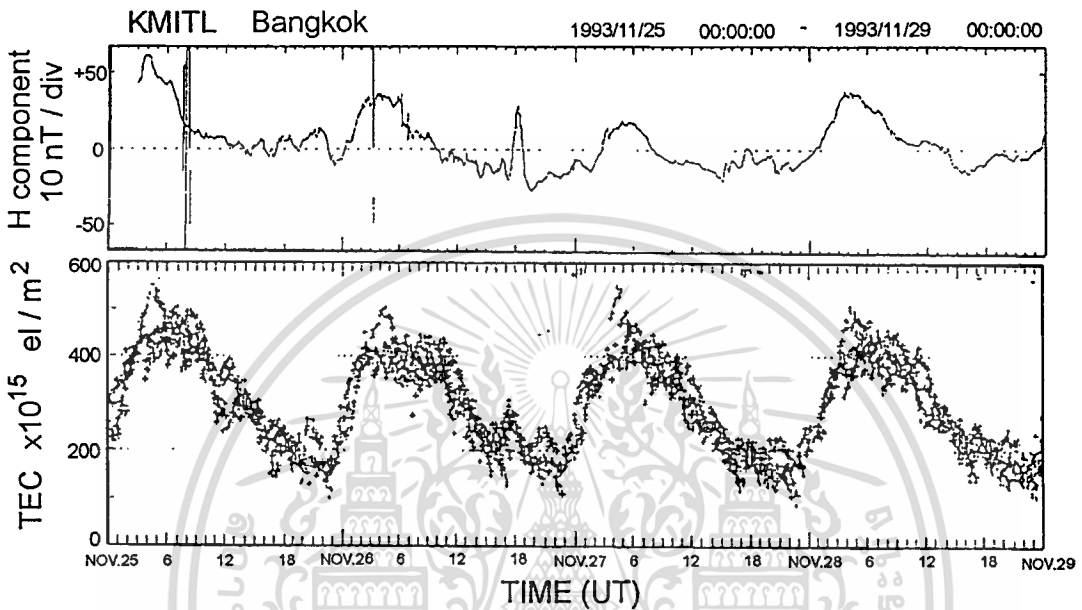
(ข) แสดงร้อยละของเวลาที่เป็จุดต่ำที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแต่ละวัน ที่กรุงเทพ

จากภาพที่ 46 (ก) และภาพที่ 46 (ข) ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของเวลาที่ปริมาณอิเล็กตรอน TEC สูงที่สุดและต่ำที่สุดรวมตั้งแต่เดือนตุลาคม 2538 ถึง เดือนธันวาคม 2539 ของกรุงเทพคือ 14:32 น. และ 3:29 น. และเชียงใหม่คือ 14:15 น. และ 4:04 น. ตามลำดับ นั้นจะเห็นว่าเวลาเฉลี่ยของค่าต่ำที่สุดของกรุงเทพนั้นจะเกิดก่อนที่เชียงใหม่ ซึ่งค่าต่ำที่สุดนั้นอาจจะมีช่วงกว้าง ซึ่งเกิดจากค่าความไม่สม่ำเสมอในตอนก่อนดวงอาทิตย์ขึ้นทำให้ค่าต่ำที่สุดของแต่ละวันเกิดขึ้นในเวลาที่ไม่แน่นอน แต่ส่วนมากแล้วจากภาพที่ 48 (ก) และภาพที่ 48 (ข) จะเห็นว่าค่าต่ำที่สุดของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC จะเกิดมากที่เวลาประมาณ 5.00 น. ถึง 6.00 น. ส่วนเวลาที่ปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่ามากที่สุดเฉลี่ยตั้งแต่เดือนตุลาคม 2538 ถึง เดือนธันวาคม 2539 ของกรุงเทพซึ่งได้เท่ากับ 14.32 น. และเชียงใหม่เท่ากับ 14.15 น. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกครั้งหลังจากค่าสูงที่สุดในเวลาประมาณ 14.00 น. ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การเพิ่มขึ้นของปริมาณอิเล็กตรอน TEC (TEC enhancement) ซึ่งเกิดเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้น F ในเวลากลางคืน หรือเกิดจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน [21] ส่วนตัวอย่างของการเกิดการรบกวน

ของสนามแม่เหล็กโลกที่กรุงเทพมหานครนั้นจะแสดงดังภาพที่ 49 ที่เปรียบเทียบค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC กับค่าสนามแม่เหล็กโลกแนวนอน (H-component) ในช่วง 25-28 พ.ย. 2536

ภาพที่ 49



แสดงการเปรียบเทียบสนามแม่เหล็ก H-component และปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ

จากภาพที่ 49 เมื่อสนามแม่เหล็กของโลกถูกรบกวนโดยดวงอาทิตย์จะทำให้สนามแม่เหล็กโลกเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กโลกในแนวนอน(H-component) เกิดการเปลี่ยนแปลง (ประเทศไทยอยู่ในแถบศูนย์สูตร สนามแม่เหล็กโลกส่วนหลักจะเป็นสนามแม่เหล็กแนวนอน) และจะส่งผลกระทบต่อปริมาณอิเล็กตรอนทำให้ปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ TEC enhancement

ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักอย่างหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ความไม่สม่ำเสมอเกิดนั้นจะขึ้นจากสาเหตุหลัก ๆ ดังนี้

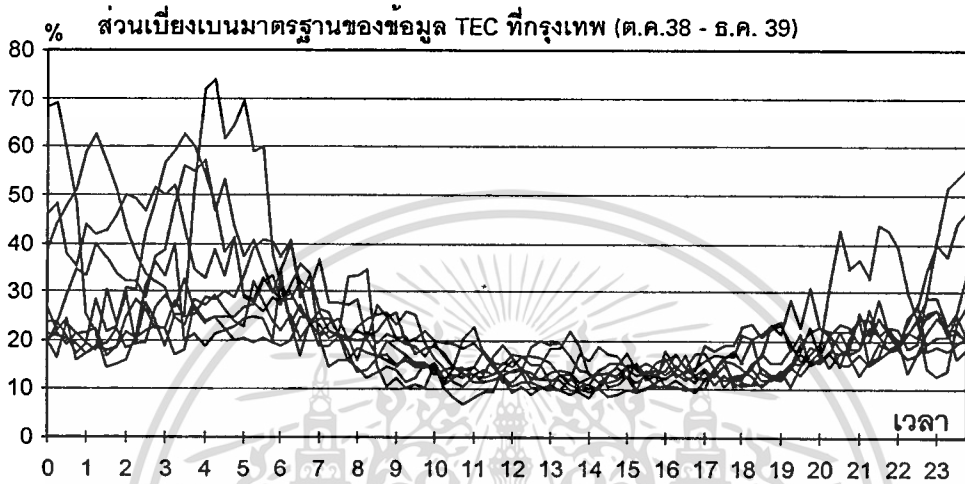
1. เกิดเทอร์บิวเลนซ์ในชั้นย่อย D
2. ก๊าซไอออไนซ์ที่เกิดจากดาวตกที่ผ่านมาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
3. ชั้น Spread F
4. ชั้น Sporadic E ซึ่งอิเล็กตรอนจะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

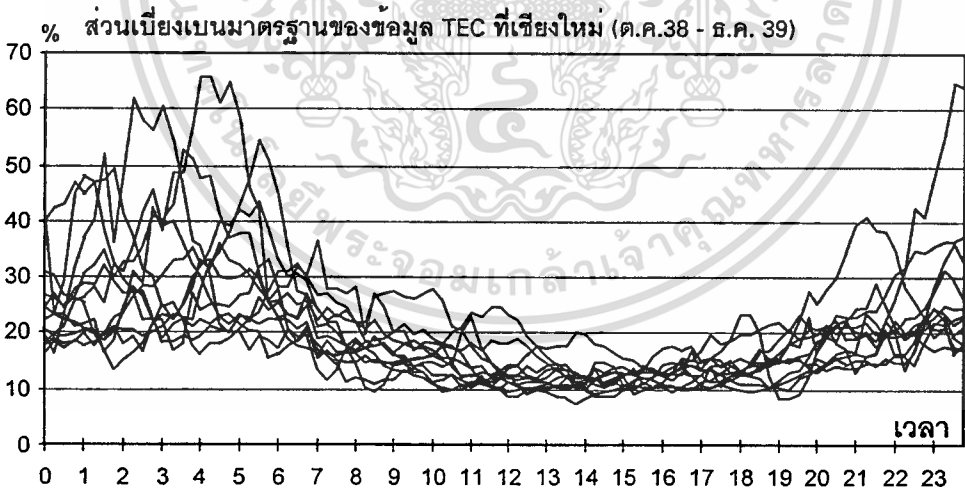
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถวัดค่าความไม่สม่ำเสมอได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่ได้มาจากการคำนวณ และนำมาหาค่าเฉลี่ยต่อเดือน จะแสดงได้ดังภาพ

ภาพที่ 50



(ก) แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ

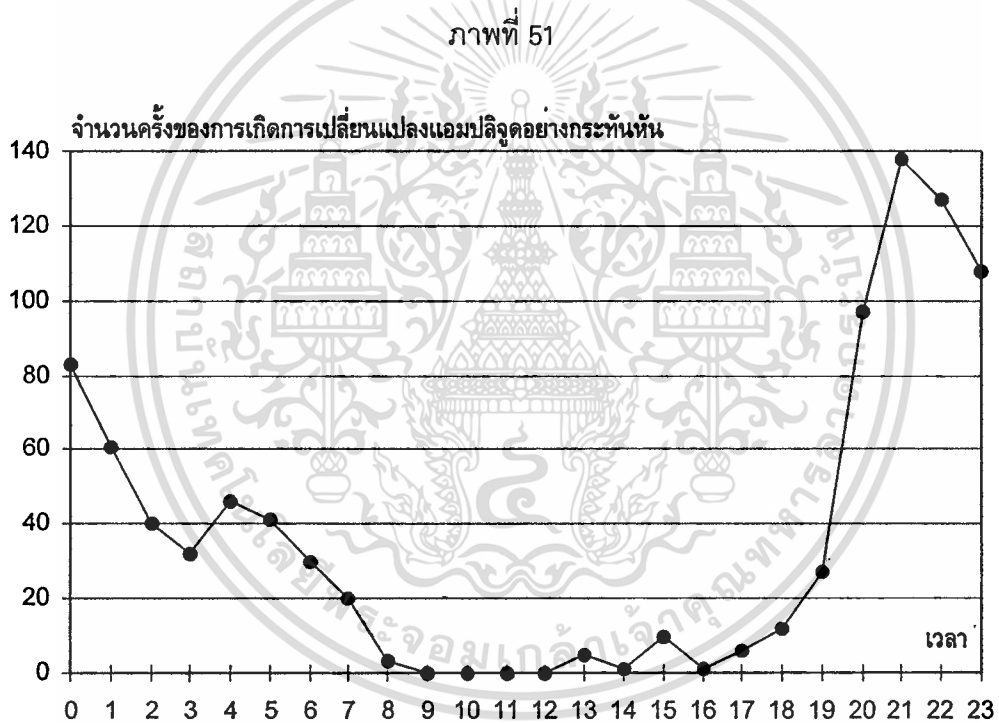


(ข) แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่

และจากการวิเคราะห์ของเอกสารอ้างอิง[4] ได้วัดการเปลี่ยนแปลงค่าข้อมูลต่อวันโดยการวิเคราะห์เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ค่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ในเวลากลางวันและ 25 เปอร์เซ็นต์ในเวลากลางคืน ส่วนผลการทดลองที่ได้จากภาพที่ 50 (ก) และภาพที่ 50 (ข) นั้นจะได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ในเวลากลางวัน และ 20-25 เปอร์เซ็นต์ในเวลากลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คืน ส่วนค่ามากที่สุดของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยต่อเดือนนั้นจะมีค่ามากที่สุดประมาณ เวลา 2.00-5.00น. ซึ่งมีค่าถึง 40-70 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

จากบทความ[22] สรุปว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในเวลากลางคืนนั้นจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในเวลากลางคืนประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในเวลากลางคืนนั้นส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันสามารถแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา[14] ได้ดังภาพ



แสดงตัวอย่างจำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันรวมทั้งหมด
ในเดือนเมษายน 2536 ที่กรุงเทพฯ

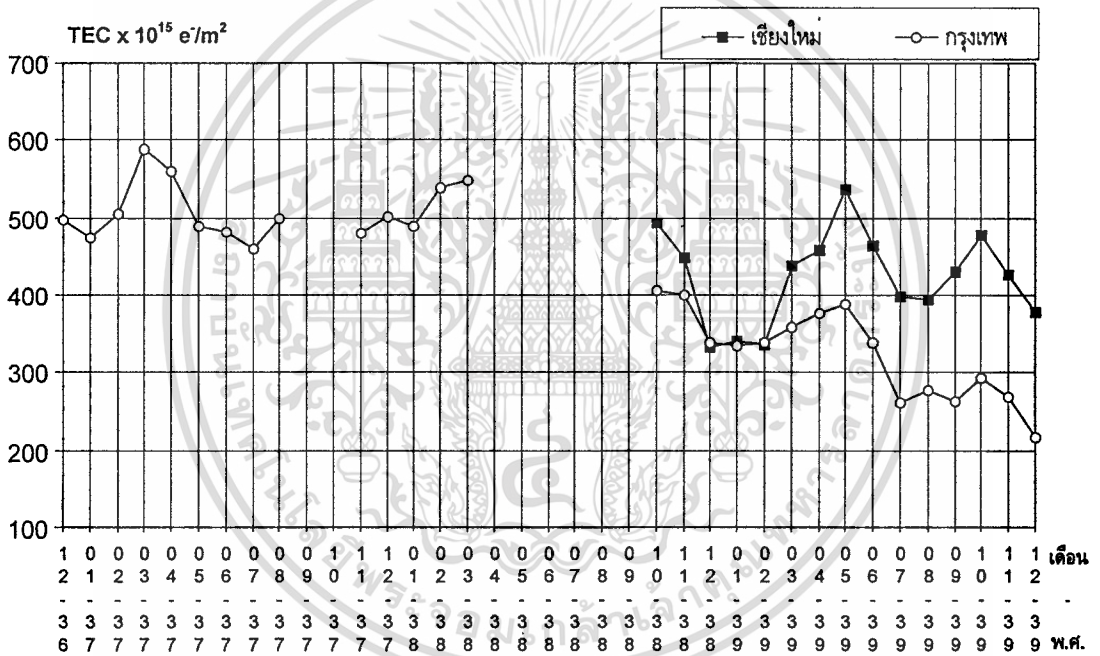
จากภาพที่ 51 จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในเวลากลางคืนมากกว่าในเวลากลางวัน จะมีการเกิดมาก 2 ช่วงคือ ประมาณ 20.00-23.00 น. และ 3.00-5.00 น. นั้นเป็นสาเหตุจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนในเวลากลางคืนนั้นมักจะไม่มีความสม่ำเสมอในระดับที่สูงกว่าในเวลากลางวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาล

การเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาลของปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้น เราจะอาศัยค่าสูงที่สุดของค่าเฉลี่ยต่อเดือนของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ซึ่งจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพตั้งแต่เดือนธันวาคม 2536 ถึง สิงหาคม 2537, พฤศจิกายน 2537 ถึงมีนาคม 2538 และ ตุลาคม 2538 ถึงธันวาคม 2539 และที่เชียงใหม่ตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2538 ถึงธันวาคม 2539 ซึ่งจะแสดงได้ดังภาพ

ภาพที่ 52

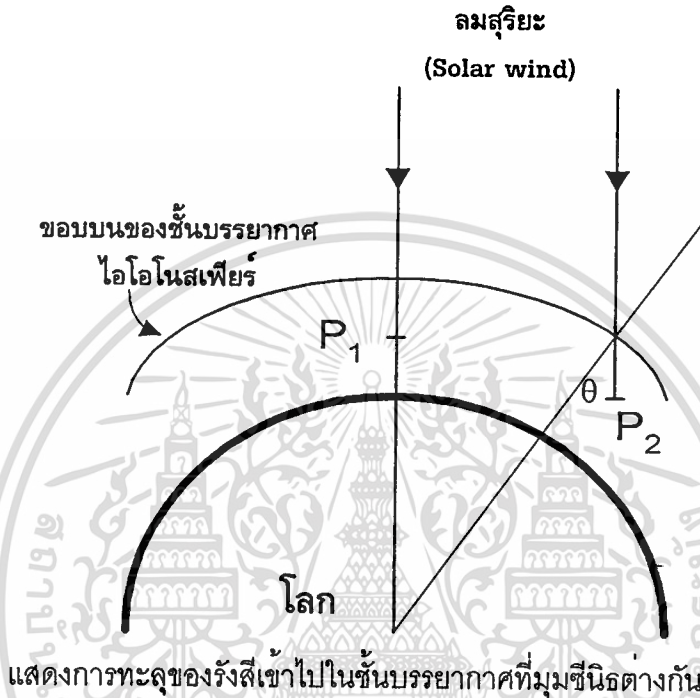


รูปแสดงค่าเฉลี่ยต่อเดือนของแต่ละสถานีและแต่ละเดือนที่บันทึกค่าปริมาณ TEC

จากภาพที่ 52 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาลของปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้น ใน 1 ปีจะมีจุดที่มีค่าสูงที่สุดอยู่ 2 ที่คือประมาณเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคมและเดือนตุลาคม และจุดต่ำที่สุดอยู่ 2 ที่ คือประมาณเดือนมิถุนายนและเดือนธันวาคม ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ซึ่งจะมีการโคจรโดยเปลี่ยนแปลงมุมตรงศีรษะหรือมุมซีกินิธ(Zenith angle) ของดวงอาทิตย์ เนื่องจากแกนโลกเอียงเป็นมุมประมาณ 23.5° กับดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้แต่ละซีกโลกหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์สลับกันไป ใน 1 ปี ทำให้ซีกโลกที่หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์จะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมซีนิธของดวงอาทิตย์ที่น้อยเพราะดวงอาทิตย์จะอยู่ตรงศีรษะในเวลากลางวัน และมีช่วงกลางวันที่ยาว และจะเกิดเป็นฤดูกาลขึ้น ซึ่งมุมซีนิธของดวงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ดังภาพ

ภาพที่ 53

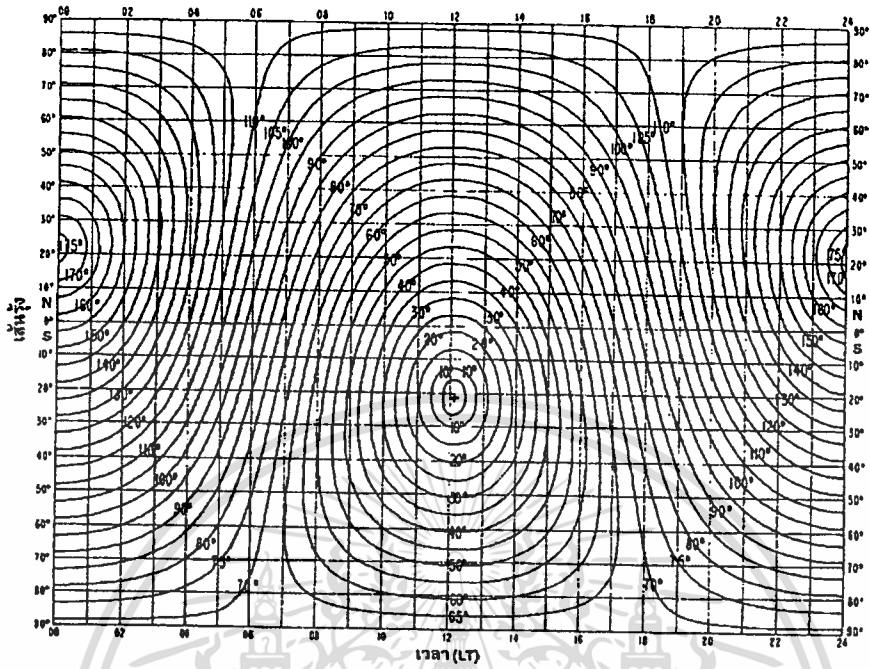


จากภาพที่ 53 จะเห็นว่าเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ในแนว P_1 ระยะทางจากชั้นบรรยากาศมาถึงโลกจะสั้นกว่าเพราะมุมซีนิธมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนอีกเส้นทางหนึ่งคือ P_2 ซึ่งมีมุมซีนิธเท่ากับ θ จะมีระยะทางจากชั้นบรรยากาศมาถึงพื้นโลกมากกว่า ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์ในการไอออไนเซชันมีค่าน้อยกว่า ทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนน้อยตามไปด้วย ซึ่งค่ามุมซีนิธของโลกในเดือนมกราคมที่เวลาต่าง ๆ จะแสดงดังภาพที่ 54

จากภาพที่ 54 เป็นภาพจาก CCIR[23] ซึ่ง แสดงมุมซีนิธของดวงอาทิตย์ในเดือนมกราคมที่เส้นรุ้งต่าง ๆ ของโลกในเวลาต่าง ๆ จะเห็นว่าที่กรุงเทพฯซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 13.7° เหนือ และที่เชียงใหม่ 18.8° เหนือ จะมีมุมซีนิธในเวลากลางวันประมาณ 35° และ 40° ตามลำดับ เราสามารถนำภาพที่ 54 ซึ่งเป็นมุมซีนิธในเดือนมกราคมและในเดือนอื่นอีก 11 เดือนที่ไม่ได้แสดง นำมาวาดกราฟเป็นกราฟแสดงตำแหน่งที่มุมซีนิธมีค่าเท่ากับศูนย์ที่เส้นรุ้งต่าง ๆ ของโลกโดยอ้างอิงเวลาเท่ากันคือเวลา 12.00 น. จะได้ดังกราฟภาพที่ 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

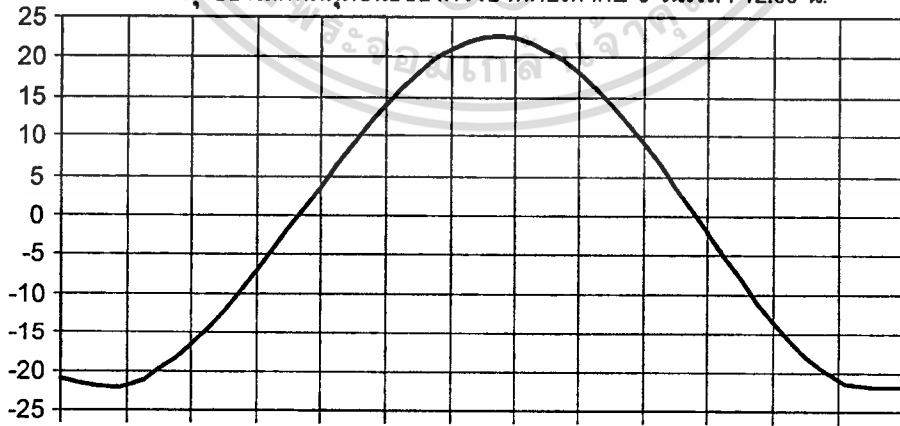
ภาพที่ 54



แสดงมุมซันิธของดวงอาทิตย์ในเดือนมกราคม

ภาพที่ 55

ตำแหน่งเส้นรุ้งของโลกที่มีมุมซันิธของดวงอาทิตย์เท่ากับ 0 ในเวลา 12.00 น.



ธ.ค. ม.ค. ก.พ. มี.ค. เม.ย. พ.ค. มิ.ย. ก.ค. ส.ค. ก.ย. ต.ค. พ.ย. ธ.ค. ม.ค.

แสดงตำแหน่งเส้นรุ้งของโลกที่ดวงอาทิตย์โคจรตรงศีรษะในเวลากลางวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการดูค่าจากกราฟแล้วค่ามุมซีกนิตของดวงอาทิตย์(χ) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังนี้

$$\cos \chi = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h \quad (4.1)$$

โดยที่ χ คือ มุมซีกนิตดวงอาทิตย์

ϕ คือ ตำแหน่งเส้นรุ้งของโลก

h คือ มุมของดวงอาทิตย์ที่วัดไปในทิศทางตะวันตกจากเวลาเที่ยงวัน (ในที่นี้วัดในเวลาเที่ยงวันค่ามุม h เท่ากับ 0°)

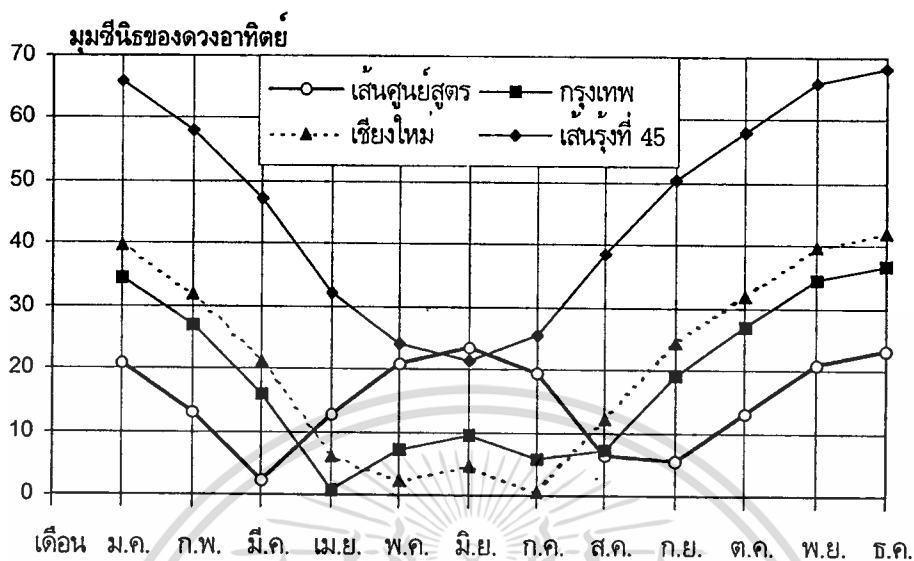
δ คือ มุมเอียงของดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\delta = 23.44 \sin[0.9856(Y - 80.7)] \quad (4.2)$$

โดยที่ Y คือ ค่าเลขประจำวันใน 1 ปี (เริ่มนับตั้งแต่ 1 ม.ค.)

จากการศึกษาที่ผ่านมาในต่างประเทศพบว่าการเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาลของปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้นจะขึ้นอยู่กับมุมซีกนิตที่เส้นศูนย์สูตร เนื่องจากปริมาณอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ในย่านเส้นศูนย์สูตรซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณอิเล็กตรอนในทุกจุดของโลกด้วย เวลาของจุดสูงที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ใน 1 ปีจะอยู่ในวันที่ 21 มีนาคม และ 22 กันยายนของทุกปีซึ่งเป็นวันที่ดวงอาทิตย์โคจรตรงศีรษะในแนวเส้นศูนย์สูตรในเวลาเที่ยงวันพอดี ซึ่งจะทำให้โลกมีกลางวันและกลางคืนเท่ากัน เรียกว่าวันอีควินอกซ์ (Equinoxes) และค่าต่ำที่สุดของปีอยู่ในวันที่ 21 มิถุนายนและ 22 ธันวาคม ของทุกปี ซึ่งเป็นวันที่ดวงอาทิตย์อยู่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรมากที่สุด เรียกว่าวันโซลสติก(Solstices) [4] ซึ่งจากการทดลองดังแสดงในภาพที่ 52 จะเห็นว่าจุดต่ำที่สุดจะอยู่ที่เดือนกรกฎาคม และธันวาคมของทั้ง 2 สถานีซึ่งอยู่ในช่วงวันโซลสติก ค่าสูงที่สุดของปี 2537 นั้นจะอยู่ที่เดือนมีนาคม ซึ่งตรงกับช่วงวันอีควินอกซ์ แต่จุดสูงที่สุดของปี 2539 อยู่ที่เดือนพฤษภาคม และเดือนตุลาคม ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเดือนพฤษภาคมแทนที่จะเป็นเดือนมีนาคมนั้นอาจเป็นเพราะในช่วงนี้ประเทศไทยมีมุมซีกนิตของดวงอาทิตย์เข้าใกล้ 0 ซึ่งอาจส่งผลทำให้ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่ามากกว่าในเดือนมีนาคมได้ มุมซีกนิตของดวงอาทิตย์ที่เส้นศูนย์สูตร กรุงเทพฯ เชียงใหม่ และที่เส้นรุ้งที่ 45 องศา(Middle Latitude) แสดงดังภาพที่ 56

ภาพที่ 56



แสดงมมซีนิธของดวงอาทิตย์ที่เส้นรุ้งต่าง ๆ

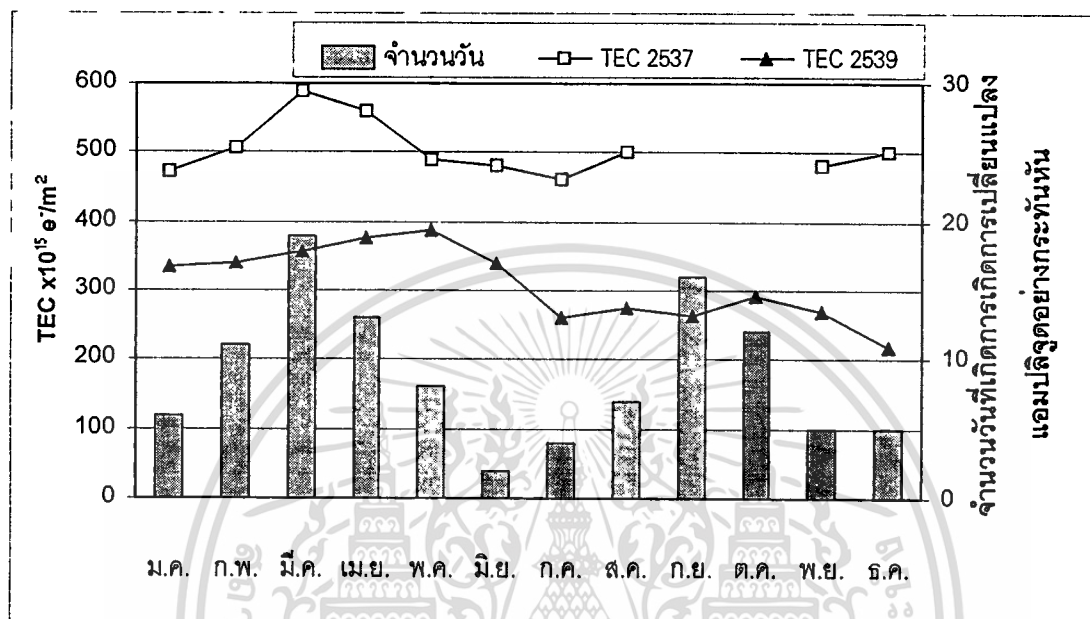
จากภาพจะเห็นว่ามมซีนิธที่เชียงใหม่และกรุงเทพ ในช่วงเดือนเมษายนและเดือนพฤษภาคมมีค่าใกล้เคียง 0 หรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะว่าเกิดจากความผิดปกติในย่านเส้นศูนย์สูตร (Equatorial anomaly) ที่มีการพบในการศึกษาที่ประเทศฟิลิปปินส์พบว่ามีความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาลอยู่ [24] ความผิดปกติในย่านเส้นศูนย์สูตรนั้นจะอธิบายได้ในหัวข้อต่อไป

ส่วนค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ต่อฤดูกาลที่มีผลกระทบต่อลักษณะคลื่นสัญญาณดาวเทียมนั้น จะแสดงจากตัวอย่างผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมในย่าน C แบนด์จากกราฟวัดที่กรุงเทพ [25] แสดงดังตัวอย่างดังภาพที่ 57

จากภาพที่ 57 เป็นตัวอย่างผลกระทบจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมในย่าน C แบนด์แต่ละเดือนรวมทั้งปี จะเห็นการเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาล ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นมากอยู่ในช่วงเดือนเมษายน และเดือนกันยายน ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่าสูงที่สุดในปี 2537 พอดี ซึ่งก็จะเห็นว่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เปลี่ยนแปลงไปฤดูกาลนั้นเป็นสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมที่มีความถี่ของการเกิดเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลด้วย ซึ่งในช่วงที่ปริมาณมากผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ก็มีค่ามากขึ้น ซึ่งนั่นก็เป็นผลที่ได้จากการศึกษาในหลายบทความ ซึ่งสรุปว่าการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณดาวเทียมในย่านความถี่ต่ำกว่า C แบนด์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณและความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ภาพที่ 57



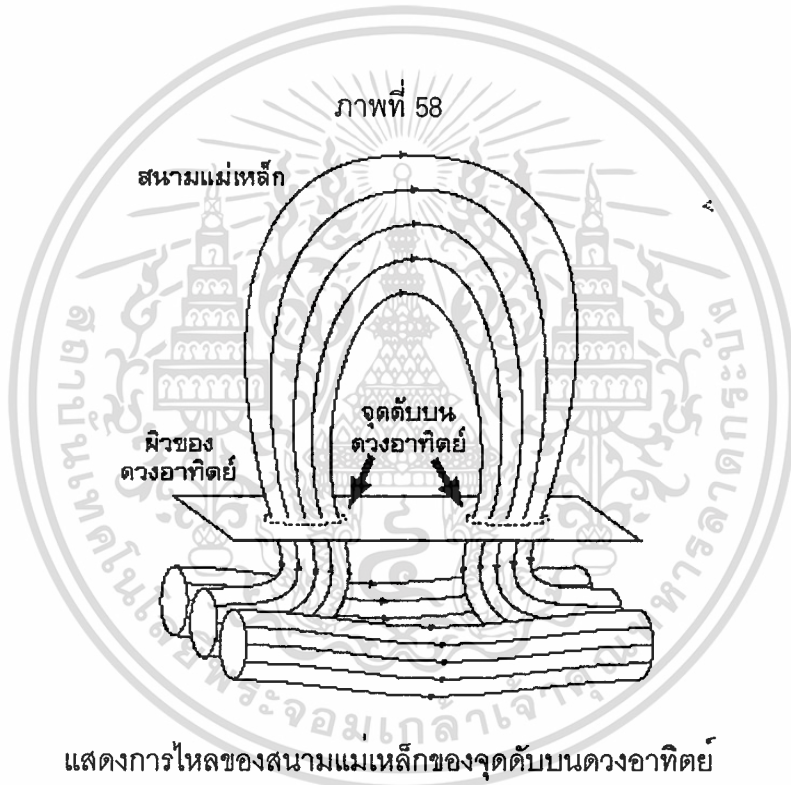
แสดงตัวอย่างผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมในย่าน C แบนด์ ต่อเดือน ในช่วงกรกฎาคม 2535 ถึง มิถุนายน 2536 กับค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ ในปี 2537 และ 2539

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อวัฏจักรสุริยะ

วัฏจักรของดวงอาทิตย์ (Solar cycle) คือการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar flux) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักรประมาณ 11.1 ปี ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar flux) ที่วัดได้จากดวงอาทิตย์จะครอบคลุมความถี่ของแสงในช่วงกว้าง แต่วิธีวัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่นิยมใช้โดยรับที่ความถี่ที่ 2,800 MHz (ความยาวคลื่น 10.7 เซนติเมตร) จะมีความสะดวกในการวัดและสามารถอธิบายระดับการเปลี่ยนแปลงความเข้มของดวงอาทิตย์ได้ดีและมีความสัมพันธ์ที่ดีกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเรียกความเข้มของแสงอาทิตย์แบบนี้ว่า $F_{10.7}$ ในปี ค.ศ. 1848 Rudolph Wolf ได้ใช้วิธีประมาณค่าความเข้มของแสงอาทิตย์โดยใช้การนับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Solar sunspot) จุดดับบนดวงอาทิตย์เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวของดวงอาทิตย์ ซึ่งเห็นเป็นสีดำเพราะอุณหภูมิของจุดดับนั้นจะประมาณ 3,000 เคลวิน จะเย็นกว่าผิวของดวงอาทิตย์รอบ ๆ ที่มีอุณหภูมิประมาณ 6,000 เคลวิน จุดดับบนดวงอาทิตย์นี้จะเปลี่ยนไปตามเวลาโดยมีอายุประมาณ 2-3 วัน จนถึง 3-4 เดือน จุดดับบนดวงอาทิตย์บางจุดจะเกิดขึ้นเดี่ยว ๆ แต่โดยมากแล้วเป็นคู่หรือกลุ่ม ซึ่งจุดดับก็จะเป็นคู่ของขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการไหลวนของสนามแม่เหล็ก(Magnetic-loop) ออกมาจากโคโรนาหรือผิวของดวงอาทิตย์ ซึ่งสนามแม่เหล็กก็เป็นส่วนหลักของพลาสมาของดวงอาทิตย์และปรากฏการณ์ต่าง ๆ บนดวงอาทิตย์ ซึ่งทำให้ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์มีค่าแปรเปลี่ยนไป การไหลของสนามแม่เหล็กของจุดดับบนดวงอาทิตย์จะสามารถแสดงได้ดังภาพ



การประมาณของ Wolf ในการคำนวณจุดดับบนดวงอาทิตย์(R) จะใช้สมการดังนี้

$$R = k(10g + s) \quad (4.3)$$

เมื่อ g คือ จำนวนกลุ่มของจุดดับบนดวงอาทิตย์

s คือ จำนวนจุดดับเดี่ยวบนดวงอาทิตย์

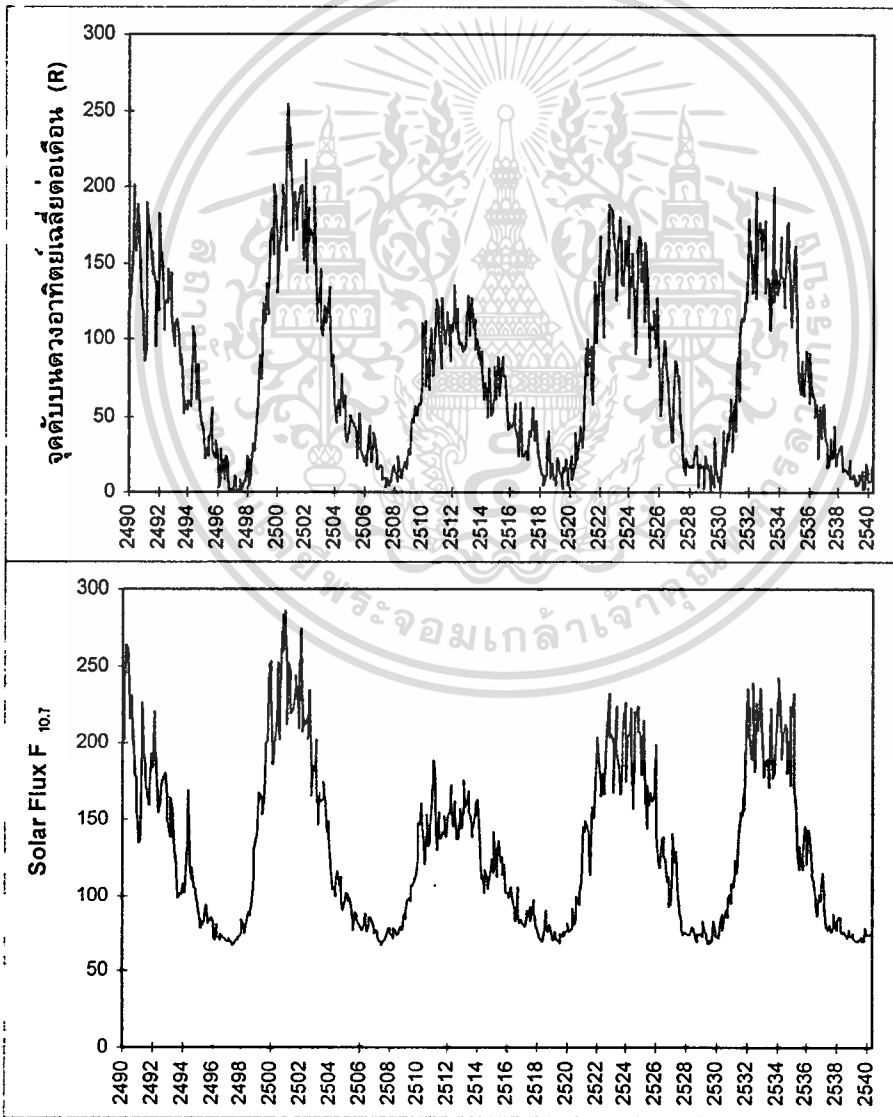
k คือ ค่า Sensitivity ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเกตดวงอาทิตย์

(โดยมากจะให้เท่ากับ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจุดดับที่ได้จากการประมาณโดยวิธีนี้เรียกว่า จุดดับบนดวงอาทิตย์ของ Wolf (Wolf sunspot number) หรือ Zurich sunspot number (เนื่องจากสถานที่ที่ทำการศึกษายู่ที่ Zurich) จนถึงปัจจุบันนี้ก็มีวิธีการคำนวณจุดดับบนดวงอาทิตย์แบบต่าง ๆ แต่ยังไม่มีการปริมาณใดที่สามารถอธิบายระดับความเข้มของแสงอาทิตย์ได้ดีเท่ากับจุดดับบนดวงอาทิตย์ของ Wolf ซึ่งจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือนกับค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ $F_{10.7}$ ซึ่งแปรผันตรงกันสามารถแสดงได้ดังภาพ

ภาพที่ 59



แสดงจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือนกับค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ $F_{10.7}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

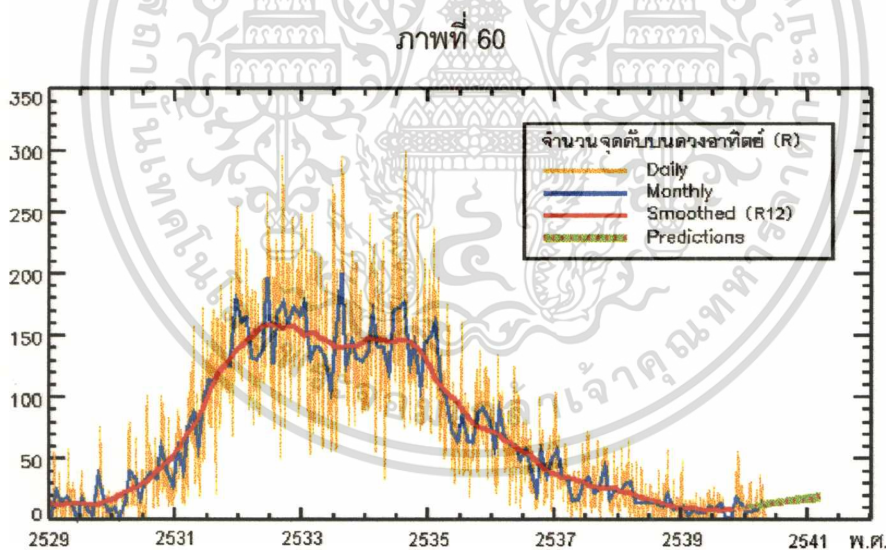
จุดดับบนดวงอาทิตย์นั้นมีการวัดทั้งค่าที่วัดได้ต่อวัน และคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยต่อเดือน และค่าเฉลี่ย 12 เดือน (12 month running mean : R_{12} หรือ Smooth Sunspot Number : SSN) ค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ R_{12} เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ บนดวงอาทิตย์ หรือเพื่อคำนวณแบบจำลองต่าง ๆ ซึ่งค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ R_{12} เป็นค่าเฉลี่ยต่อเดือน อย่างหนึ่ง ซึ่งใช้ค่า 6 เดือนก่อนหน้าและ 6 เดือนหลังในการคำนวณเพื่อให้ค่าเฉลี่ยต่อเดือนรวมค่าเป็นเส้นที่เรียบขึ้น[4] โดยใช้สมการดังนี้

$$R_{12} = \left[\sum_{i=n-5}^{n+5} (R_i) + \frac{(R_{n+6} + R_{n-6})}{2} \right] / 12 \quad (4.4)$$

เมื่อ R_{12} คือ ค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ย 12 เดือนที่เดือน n

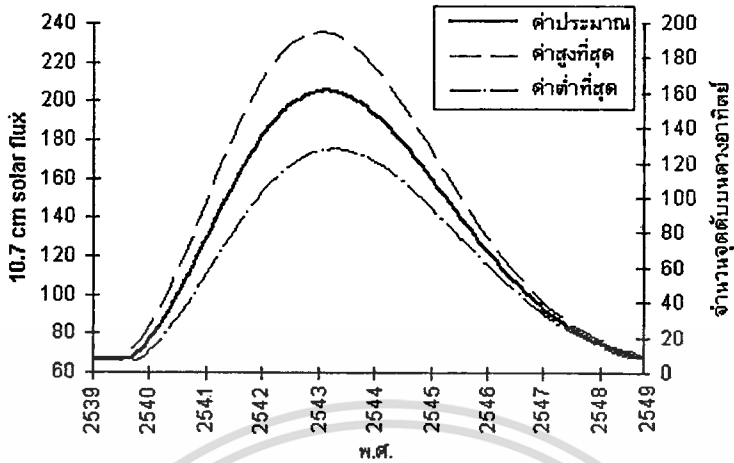
R_i คือ ค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือนที่เดือน i โดยที่ $n-5 \leq i \leq n+5$

จุดดับบนดวงอาทิตย์ต่อวัน ค่าเฉลี่ยต่อเดือน และค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ R_{12} ตั้งแต่ปี 2529 ถึง 2540 จะแสดงได้ดังภาพที่ 60



จากภาพที่ 59 และภาพที่ 60 วัฏจักรหนึ่งๆ จะมีคาบประมาณ 11.1 ปี จากจุดที่ต่ำที่สุดของวัฏจักรจนถึงจุดสูงที่สุดนั้นจะกินเวลาประมาณ 4.8 ปี และจากจุดสูงที่สุดถึงจุดต่ำที่สุดกินเวลาประมาณ 6.3 ปี การศึกษาจุดดับบนดวงอาทิตย์อย่างเป็นระบบเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1749 และหลังจากนั้นก็นับเป็นวัฏจักรที่ 1 ซึ่งในวัฏจักรถัดไปจะเป็นวัฏจักรที่ 23 ก็มีการศึกษาและทำนายค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ล่วงหน้าเช่น NOAA Space Environment Center (ภาคผนวก ข. ข้อ 3) ค่าประมาณนั้นแสดงได้ดังภาพที่ 61

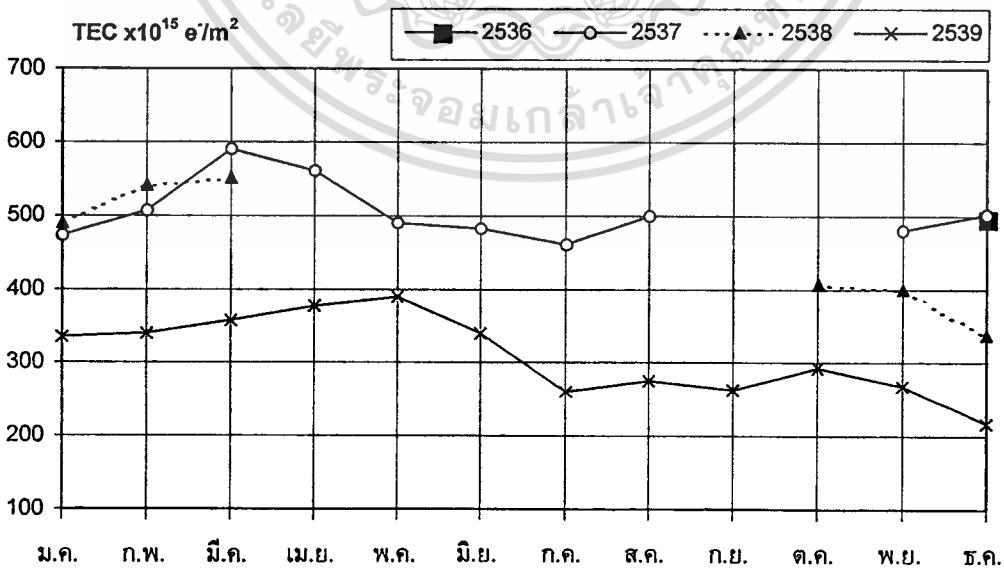
ภาพที่ 61



แสดงการทำนายจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีในวัฏจักรที่ 23

จากการทดลองค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่ได้มีบันทึกข้อมูลหลายปีในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงต่อปีนั้นจะแสดงได้จากข้อมูลที่สถานีกรุงเทพเท่านั้น ซึ่งเป็นการศึกษาที่อยู่ในช่วงที่ต่ำที่สุดในรอบ 11 ปี จะแสดงข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงต่อปีได้โดยเปรียบเทียบค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC สูงที่สุดของค่าเฉลี่ยต่อเดือนกับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ได้ดังภาพที่ 62 และภาพที่ 63

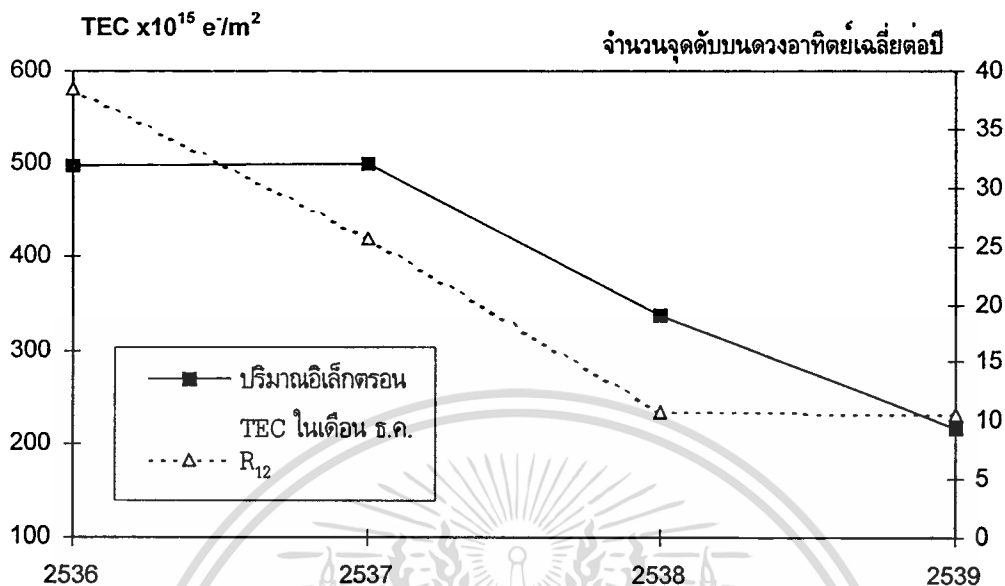
ภาพที่ 62



แสดงปริมาณอิเล็กตรอน TEC สูงที่สุดของค่าเฉลี่ยต่อเดือนในแต่ละปีเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 63



แสดงปริมาณอิเล็กตรอน TEC สูงที่สุดของค่าเฉลี่ยต่อเดือนในเดือนธันวาคมของแต่ละปี
เปรียบเทียบกับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ R_{12}

จากภาพที่ 62 และ 63 จะเห็นว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC จะขึ้นอยู่กับวัฏจักรของดวงอาทิตย์ซึ่งค่าจะลดลงมาเรื่อย ๆ ในแต่ละปีที่ศึกษา ในช่วงที่ศึกษาจะอยู่ในช่วงที่ต่ำที่สุดของวัฏจักร ในบทความ[26] ซึ่งเป็นการวิจัยของ California Institute of Technology กล่าวว่าจุดต่ำที่สุดนั้นอยู่ประมาณเดือนสิงหาคม 2538 เพราะว่ามี การพบจุดดับบนดวงอาทิตย์ที่เส้นรุ้งของดวงอาทิตย์ที่ 21° จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในช่วงแรกของวัฏจักรจุดดับบนดวงอาทิตย์จะอยู่ที่ประมาณเส้นรุ้ง $20-30^\circ$ ของดวงอาทิตย์ทั้งซีกเหนือและใต้ ในช่วงสูงที่สุดของวัฏจักรนั้นจุดดับบนดวงอาทิตย์จะอยู่ที่เส้นรุ้งของดวงอาทิตย์ประมาณ $\pm 15^\circ$ และในช่วงที่เป็นช่วงขาลงของวัฏจักรจุดดับบนดวงอาทิตย์จะอยู่ที่เส้นรุ้งของดวงอาทิตย์ประมาณ $\pm 5-10^\circ$ ทั้งซีกเหนือและใต้ นั้นแสดงว่าวัฏจักรใหม่เริ่มในเดือนกันยายน 2538 แต่โดยทั่วไปจากการศึกษาของ NGDC [27] (ภาคผนวก ข. ข้อ 1) ซึ่งใช้วิธีการทางสถิติของการศึกษาในหลาย ๆ วัฏจักรที่ผ่านมา พบว่าจุดต่ำที่สุดนั้นอยู่ที่ประมาณเดือนพฤษภาคม 2539 เวลาจากจุดต่ำที่สุดจนถึงจุดสูงที่สุดของวัฏจักรสุริยะจะกินเวลาประมาณ 4.8 ปี ซึ่งนับต่อไปจากการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ จุดสูงที่สุดจะอยู่ประมาณปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ.2000) แต่ถ้าการศึกษาของบทความ[26] ซึ่งใช้การสังเกตดวงอาทิตย์โดยตรงเป็นจริง จะทำให้ค่าสูงที่สุดของวัฏจักรที่ 23 จะมาถึงเร็วกว่าซึ่งจะเกิดประมาณต้นปี 2542

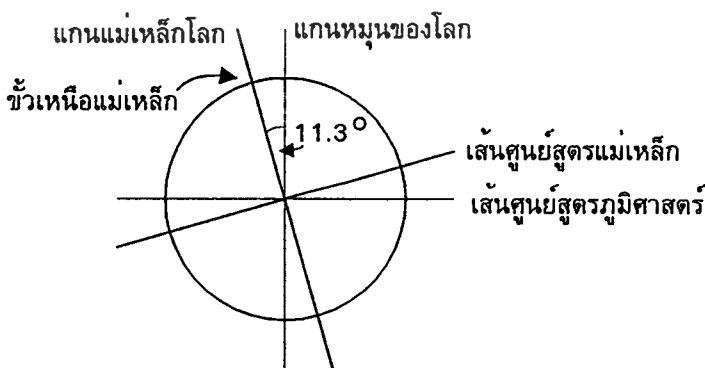
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลกระทบต่อคลื่นสัญญาณดาวเทียมต่าง ๆ ดังแสดงในบทที่ 2 ที่ขึ้นอยู่กับค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC จะมีค่ามากที่สุดเมื่อปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่ามากที่สุดในช่วงที่จุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่ามากที่สุดด้วย โดยมีการศึกษาผลกระทบของการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมของ NWRA (ภาคผนวก ข. ข้อ 4) และมีการทำนายจุดที่มากที่สุดของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมดังภาพที่ 17 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการทำนายในวันเวลาที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่ามากที่สุดคือในวันที่ 21 มีนาคม 2543 เวลา 13:30 UT ซึ่งตรงกับประเทศไทยในเวลา 20:30 น. ซึ่งเป็นเวลากลางคืน ส่วนความเข้มของการเกิดเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมที่เห็นว่าจะแบ่งเป็น 2 ส่วนนั้นจะเกิดจากกลุ่มของอิเล็กตรอนในย่านเส้นศูนย์สูตรที่เกิดความผิดปกติที่เรียกว่า Equatorial anomaly ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเส้นรุ้งแม่เหล็กซึ่งรายละเอียดจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อเส้นรุ้งแม่เหล็ก

การเปลี่ยนแปลงตามเส้นรุ้งของปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้นไม่ได้แปรตามเส้นรุ้งทางพิกัดทางภูมิศาสตร์(Geographic coordinate) แต่จะเปลี่ยนตามพิกัดแม่เหล็ก(Geomagnetic coordinate) เนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันอยู่ในชั้นแมกนีโตสเฟียร์ ซึ่งเป็นชั้นที่แม่เหล็กโลกที่ทำปฏิกิริยาต่อต้านกับดวงอาทิตย์ดังแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งแกนแม่เหล็กของโลกจะชี้พิกัดไปจากแกนหมุนของโลกเป็นมุมประมาณ 11.3° องศา ดังภาพ

ภาพที่ 64

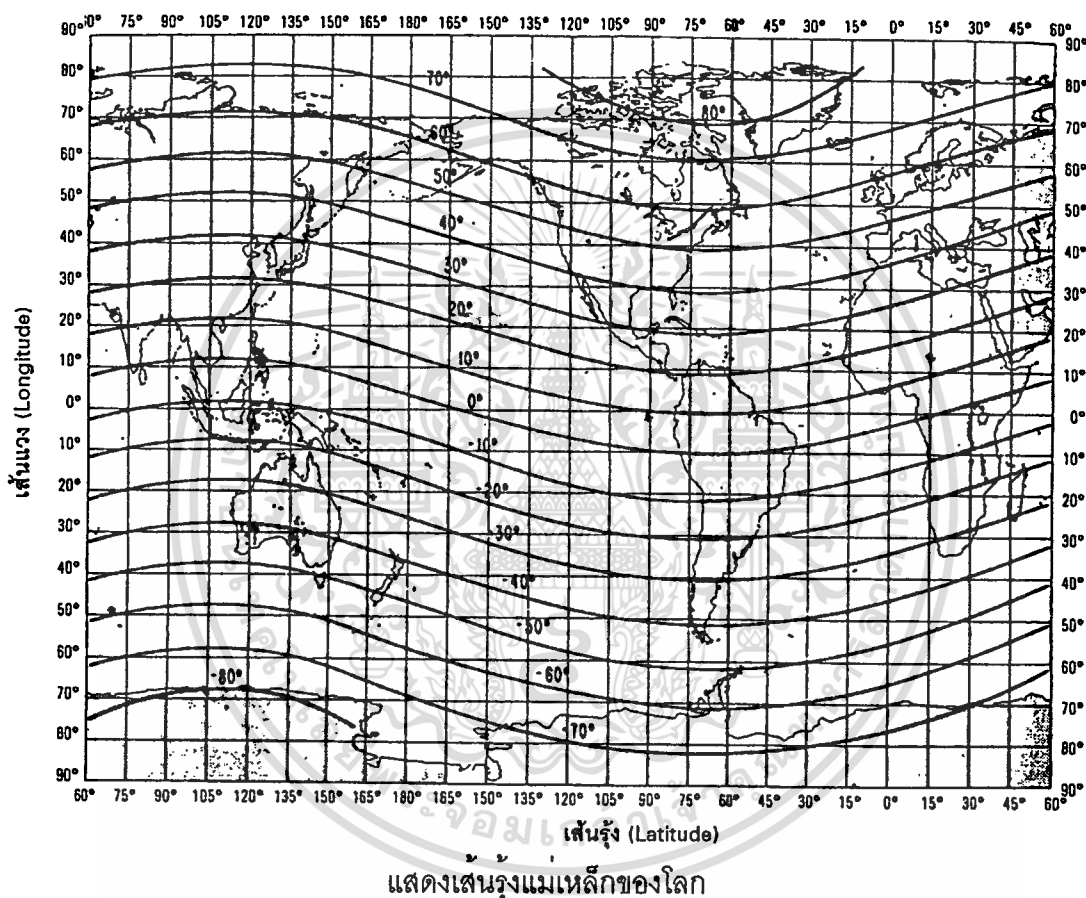


แสดงแกนแม่เหล็กของโลกและแกนหมุนของโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพจะเห็นว่าแกนแม่เหล็กโลกจะไม่ตรงกับแกนหมุนของโลกซึ่งแกนแม่เหล็กของโลกซึ่งขั้วเหนือแม่เหล็กจะอยู่ที่พิกัด เส้นรุ้ง 78.3° เหนือ เส้นแวงที่ 291.0° ตะวันออก (อยู่ในแถบเกาะกรีนแลนด์) ดังนั้นพิกัดแม่เหล็กก็จะต้องอ้างอิงตามแกนแม่เหล็กซึ่งก็จะแตกต่างไปจากพิกัดทางภูมิศาสตร์ ภาพเส้นรุ้งแม่เหล็กจะแสดงได้ดังภาพ

ภาพที่ 65



ค่าพิกัดแม่เหล็กสามารถคำนวณได้โดยสมการดังนี้

$$\sin \Phi = \sin \phi \cdot \sin \phi_0 + \cos \phi \cdot \cos \phi_0 \cdot \cos(\lambda - \lambda_0) \quad (4.5)$$

$$\sin \Lambda = \frac{\cos \phi \cdot \sin(\lambda - \lambda_0)}{\cos \Phi} \quad (4.6)$$

เมื่อ (Φ, Λ) คือ พิกัดเส้นรุ้งและเส้นแวงทางแม่เหล็ก

(ϕ, λ) คือ พิกัดเส้นรุ้งและเส้นแวงทางภูมิศาสตร์

(ϕ_0, λ_0) คือ พิกัดเส้นรุ้งและเส้นแวงทางภูมิศาสตร์ของขั้วเหนือแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงตามเส้นรุ้งแม่เหล็กจากบทความ [28] พบว่าปริมาณอิเล็กตรอนนั้นจะแปรตามเส้นรุ้งแม่เหล็กที่เรียกว่า Magnetic Inclination หรือ Magnetic dip latitude หรือเส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสัดส่วนของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งและแนวนอน สามารถคำนวณโดยใช้โดยสมการดังนี้

$$\tan I = \frac{Z}{H} = 2 \tan \Phi \quad (4.7)$$

เมื่อ I คือ เส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก

Z คือ สนามแม่เหล็กโลกในแนวตั้ง

H คือ สนามแม่เหล็กโลกในแนวนอน (มีทิศทางชี้ไปทางเหนือ)

จากค่าพิกัดต่าง ๆ ของสถานที่ทดลองที่ได้ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4

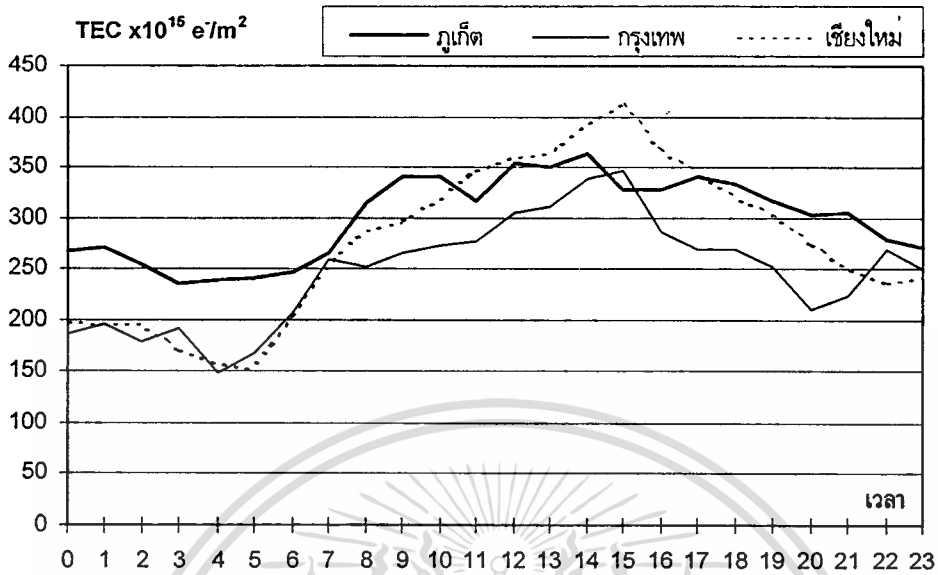
ตารางที่ 4

สถานที่ทดลอง	พิกัดภูมิศาสตร์		พิกัดแม่เหล็ก		เส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก
	เส้นรุ้ง	เส้นแวง	เส้นรุ้ง	เส้นแวง	
เชียงใหม่	18.8°N	99.0°E	8.1°N	170.4°E	15.9°N
กรุงเทพ	13.7°N	100.8°E	2.9°N	171.9°E	5.8°N
ภูเก็ต	7.9°N	98.4°E	2.8°S	169.4°E	5.6°S

แสดงรายละเอียดพิกัดต่าง ๆ ของสถานที่ทดลอง

การเปลี่ยนแปลงตามเส้นรุ้งแม่เหล็กเราสามารถดูได้จากภาพที่ 45 (ก) ถึงภาพที่ 45 (ง) ซึ่งเป็นค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่และกรุงเทพ ส่วนที่ภูเก็ตซึ่งวัดค่าได้ประมาณ 6 วัน (21 มิ.ย. ถึง 27 มิ.ย. 2539) และนำมาหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงทุก ๆ 1 ชม. รวมถึงค่าเฉลี่ยของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่และกรุงเทพในช่วงเวลาเดียวกันแสดงดังภาพที่ 66

ภาพที่ 66



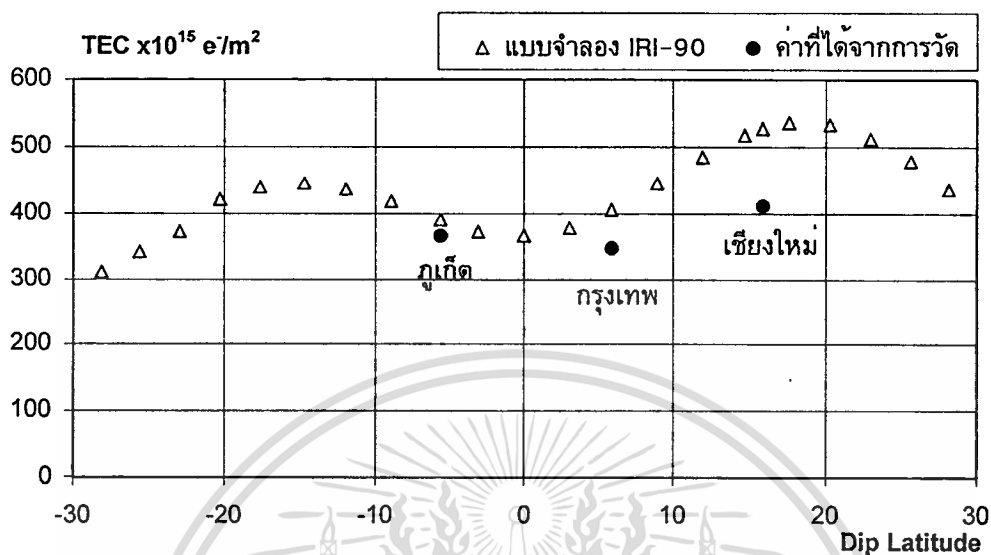
แสดงค่าเฉลี่ยทุก ๆ 1 ชม. ของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ทั้ง 3 สถานีวัด ในช่วง 21 มิ.ย. ถึง 27 มิ.ย. 2539

จากภาพที่ 45 (ก) ถึงภาพที่ 45 (ง) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่และกรุงเทพ จะเห็นว่าที่เส้นรุ้งดพแม่เหล็กสูงกว่าคือที่เชียงใหม่ นั้นจะมีค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC มากกว่าที่กรุงเทพ ซึ่งเกิดจากความผิดปกติในแถบศูนย์สูตรของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เรียกว่า Equatorial Anomaly [5] โดยที่ในเวลาเช้าปริมาณอิเล็กตรอนจะมีความหนาแน่นมากที่สุดแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก เนื่องจากการไอออไนซ์มากในแถบเส้นศูนย์สูตรเมื่อหลังดวงอาทิตย์ขึ้น ซึ่งจากการศึกษาในบทความ [29] พบว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า Crest นั้นจะเกิดขึ้นในเวลาประมาณ 9.00-10.00 น. แล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเคลื่อนที่ออกจากกันแนวทิศเหนือและใต้ แต่จากการศึกษาในเดือนตุลาคม 2538 ถึงธันวาคม 2539 ในภาพที่ 45 (ก) ถึงภาพที่ 45 (ง) และในภาพที่ 66 พบว่าเมื่อ Crest เดินทางผ่านกรุงเทพจะทำให้ปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพในเวลาเช้ามากกว่าเชียงใหม่แต่เมื่อ Crest เคลื่อนที่อยู่ระหว่างกลางระหว่าง 2 สถานีวัดนั้น ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ของทั้ง 2 สถานีวัดจะเท่ากันซึ่งอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 8.00-10.00 น. ซึ่งจะคลาดเคลื่อนกับในเอกสารอ้างอิง [23] ที่ว่า Crest จะเกิดที่เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กในเวลาประมาณ 9.00-10.00 น. หลังจากที่ Crest เคลื่อนที่ออกจากกันแล้วจะมีความหนาแน่นของการไอออไนซ์มากขึ้นไปจนถึงเวลาที่ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าสูงที่สุดคือประมาณเวลา 14.00 น. ที่เส้นรุ้งดพแม่เหล็กประมาณ $\pm 15-20^\circ$ [5],[30] โดยพบว่าความ

ห่างของ Crest ทั้ง 2 จากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กไม่จำเป็นต้องเท่ากัน โดย Crest ทางเหนือจะห่างจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กมากกว่า Crest ทางใต้ในช่วงฤดูหนาว (ฤดูหนาวในแถบเส้นรุ้งสูง ๆ อยู่ประมาณเดือนพฤศจิกายน ถึงกุมภาพันธ์) และในช่วงฤดูร้อน (ประมาณเดือนมิถุนายน ถึงสิงหาคม) Crest ทางเหนือจะเข้าใกล้เส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก $15-20^\circ$ ก่อนทางใต้ประมาณ 2-3 ชม. ซึ่งคือผลของมุมซีกขั้วของดวงอาทิตย์ที่จะทำให้ Crest มีความเข้มเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล และเวลาที่ Crest ห่างจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปตามวัฏจักรของดวงอาทิตย์ หลังจากที่ Crest เคลื่อนที่ไปถึงเส้นรุ้งแม่เหล็กประมาณ $\pm 15-20^\circ$ แล้วการไอออไนซ์จะลดลงและ Crest ทั้ง 2 จะเคลื่อนที่เข้าหากันในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กและหายไปในเวลากลางคืน จากการทดลองที่ได้จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยต่อเดือนของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่จะมีค่าสูงที่สุดมากกว่าค่าสูงที่สุดที่กรุงเทพทั้งหมด ยกเว้นในช่วงธันวาคม 2538 ถึงกุมภาพันธ์ 2539 ซึ่งเป็นค่าที่ปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่าต่ำที่สุดของฤดูกาล และในช่วงที่ดวงอาทิตย์มีจุดดับต่ำที่สุดในรอบ 11 ปีในช่วงกลางปี 2539 ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพจะมีค่าต่ำกว่าที่เชียงใหม่มาก ส่วนในภาพที่ 66 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่กรุงเทพและเชียงใหม่จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันเพราะอยู่ในซีกโลกทางเหนือทางพิกัดแม่เหล็กซึ่ง Crest ทางเหนือมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ซึ่งจะต่างกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่ภูเก็ตซึ่ง Crest ทางใต้จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง ส่วนค่ามากที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่ภูเก็ตและกรุงเทพที่อยู่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กใกล้เคียงกันคืออยู่ที่เส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก -5.6° และ 5.8° ตามลำดับ จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนแปลงค่าสูงที่สุดของค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ตามภาพที่ 66 นั้นจะนำมาวาดใหม่เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นรุ้งดิพแม่เหล็กและแบบจำลอง IRI-90 ในช่วง 21 ถึง 27 มิ.ย. 2539 แสดงดังภาพที่ 67 และภาพจากการศึกษาในบทความ[31] แสดงดังภาพที่ 68

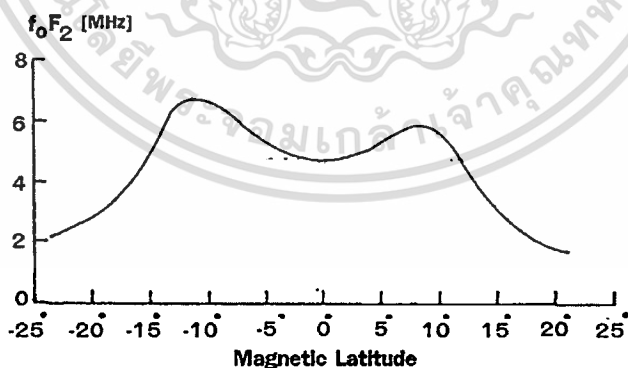
จากภาพที่ 67 จะเห็นว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากแบบจำลองและสอดคล้องกับการศึกษาในภาพที่ 68 แตกต่างตรงที่เป็นการศึกษาในฤดูกาลที่ต่างกันซึ่งมีผลทำให้ crest ทางด้านเหนือและใต้มีความเข้มต่างกัน ซึ่งแบบจำลองในภาพที่ 67 เป็นแบบจำลอง IRI-90 ในวันที่ 25 มิถุนายน 2539 ในเวลา 14.00 น. แต่ค่าจากแบบจำลองที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จริงซึ่งเกิดจากเป็นการวัดในช่วงที่ต่ำที่สุดของวัฏจักรสุริยะพอดี ซึ่งจากภาพที่ 52 จะเห็นว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่กรุงเทพจะลดต่ำลงมาในปี 2539 มาก แต่ที่เชียงใหม่ไม่ค่อยลดลงมากนักเกิดจากเชียงใหม่ตั้งอยู่ใกล้กับเส้นรุ้งดิพแม่เหล็กที่ Crest มีค่าสูงที่สุดจึงทำให้ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ลดลงไม่มาก ส่วนรายละเอียดของแบบจำลองนั้นจะได้อธิบายในบทต่อไป

ภาพที่ 67



แสดงค่าสูงที่สุดของค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC กับเส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก และค่าจากแบบจำลอง IRI-90 ในช่วง 21 ถึง 27 มิ.ย. 2539

ภาพที่ 68



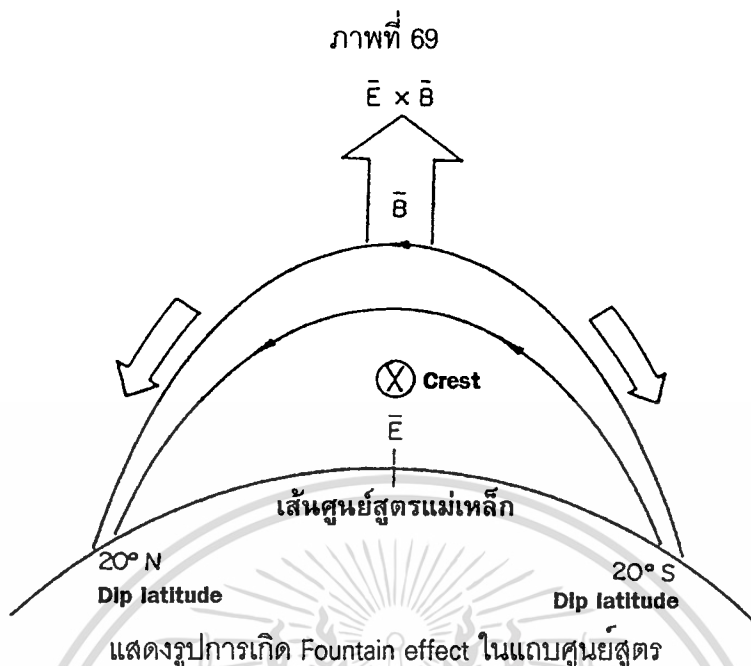
แสดงค่าความถี่วิกฤตของชั้น F₂ กับเส้นรุ้งแม่เหล็ก [31]

ส่วนสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติในแถบศูนย์สูตรและเกิด Crest นั้นจะอธิบายด้วย

กระบวนการ Equatorial fountain หรือ Fountain effect [4] ซึ่งจะอธิบายได้จากภาพที่ 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากภาพที่ 69 Crest ที่เกิดขึ้นในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก (สัญลักษณ์ \otimes ในภาพ) จะถูกแรง $\vec{E} \times \vec{B}$ ทำให้ลอยขึ้นไปสูงเหนือพื้นดินมากและแบ่งเป็น 2 ส่วนตกลงมาในแถบเส้นรุ้งคิพแม่เหล็กประมาณ $\pm 15-20^\circ$ ซึ่งลักษณะของอิลีกตรอนที่เคลื่อนที่จะคล้ายกับน้ำพุ และการเปลี่ยนแปลงของ Crest ทั้ง 2 ที่บางครั้งไม่สมมาตรนั้นเกิดจาก Thermalspheric wind ซึ่งจะพัดก๊าซไอออไนซ์ในแนวเส้นศูนย์สูตรจะเป็นผลให้ Crest ทั้ง 2 นั้นไม่สมมาตรกัน

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิลีกตรอน TEC

ในช่วงการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา

ปรากฏการณ์สุริยุปราคาเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นไม่บ่อยนักโดยเฉพาะการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการศึกษาทางด้านต่าง ๆ เช่น ทางดาราศาสตร์ในเรื่องการสังเกตโคโรนาของดวงอาทิตย์ หรือการทดสอบทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ซึ่งกล่าวว่าดวงอาทิตย์มีแรงโน้มถ่วงพอที่จะดึงให้แสงโค้งได้ ซึ่งผลการทดสอบก็เป็นจริงตามนั้น ส่วนการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาที่ทำให้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เปลี่ยนแปลงนั้นก็ได้มีการศึกษามานาน เช่นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นอิลีกตรอนและความถี่วิกฤตในชั้น F_2 [32] หรือการศึกษามลกระทบของการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาซึ่งใช้สัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดาวเทียมในการศึกษา [33] เป็นต้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน TEC เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาในประเทศไทย โดยเป็นการวัดค่าปริมาณอิเล็กตรอนจากการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 ซึ่งเส้นทางที่เงามืดพาดผ่านประเทศไทยจะแสดงดังภาพที่ 70 ส่วนสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและช่วงเวลาของการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาจะแสดงดังตารางที่ 5

ภาพที่ 70



ตารางที่ 5

สถานที่ทดลอง	เวลาเริ่มเกิดสุริยุปราคาบางส่วน	เวลาเริ่มเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง	เวลากึ่งกลางการเกิดสุริยุปราคา	เวลาสิ้นสุดสุริยุปราคาเต็มดวง	รวมเวลาเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง	เวลาสิ้นสุดสุริยุปราคาบางส่วน	รวมเวลาเกิดสุริยุปราคาทั้งหมด(ข.ม.)	ดวงอาทิตย์ถูกบังเต็มที่ %
คลองขลุง	09:18:33	10:45:49	10:46:33	10:47:17	1:28	12:24:17	3:05:34	100.0
เชียงใหม่	09:09:09	-	10:39:00	-	-	12:27:16	3:18:07	94.5
กรุงเทพฯ	09:15:25	-	10:51:31	-	-	12:39:57	3:24:12	96.1

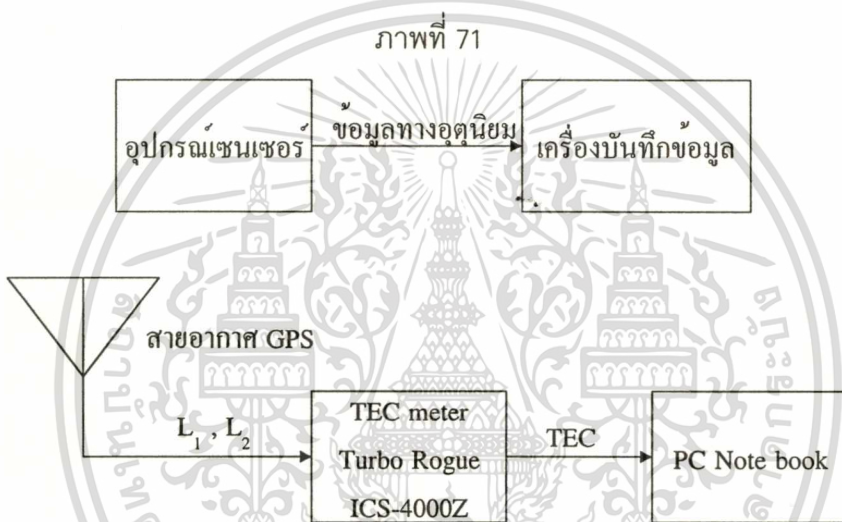
แสดงสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและช่วงเวลาของการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา

การทดลองวัดปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในช่วงการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคานี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคืออุปกรณ์ที่ติดตั้งที่เชียงใหม่และกรุงเทพฯดังที่แสดงในบทที่ 3 และอุปกรณ์ที่ติดตั้งที่อำเภอคลองขลุง จังหวัดกำแพงเพชร ซึ่งเป็นสถานที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวง ตั้งอยู่ที่พิกัดภูมิศาสตร์ที่ 16.2° เหนือ 99.7° ตะวันออก, พิกัดแม่เหล็กที่ 5.4° เหนือ 170.9° ตะวันออก, เส้นรุ้งดิพแม่เหล็กที่ 10.7° เหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

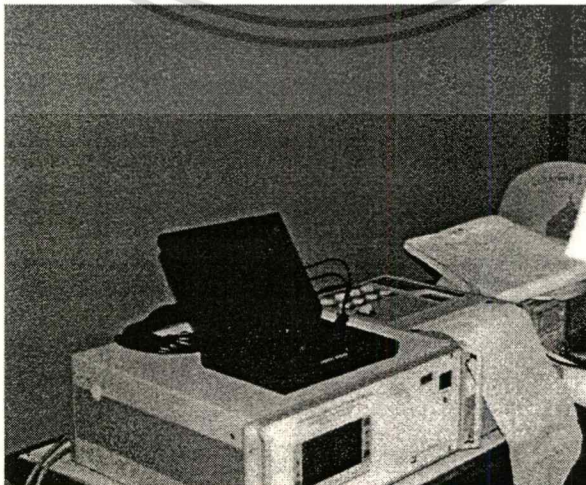
อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณที่อำเภอคลองขลุง จังหวัดกำแพงเพชร แสดงดังภาพที่ 71 ถึงภาพที่ 74 [34]

1. อุปกรณ์เซนเซอร์ ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มของแสงอาทิตย์
2. เครื่องบันทึกข้อมูล ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มของแสงอาทิตย์
3. TEC meter (Turbo Rogue ICS-4000Z)
4. จานสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS
5. PC Notebook



แสดงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่อำเภอคลองขลุง จังหวัดกำแพงเพชร

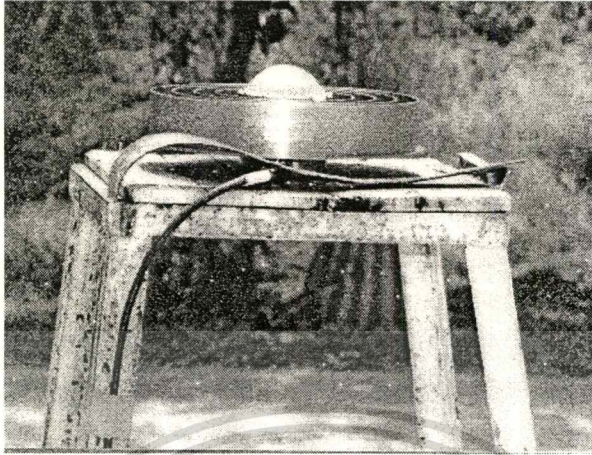
ภาพที่ 72



แสดงรูป TEC meter (Turbo Rogue ICS-4000Z)

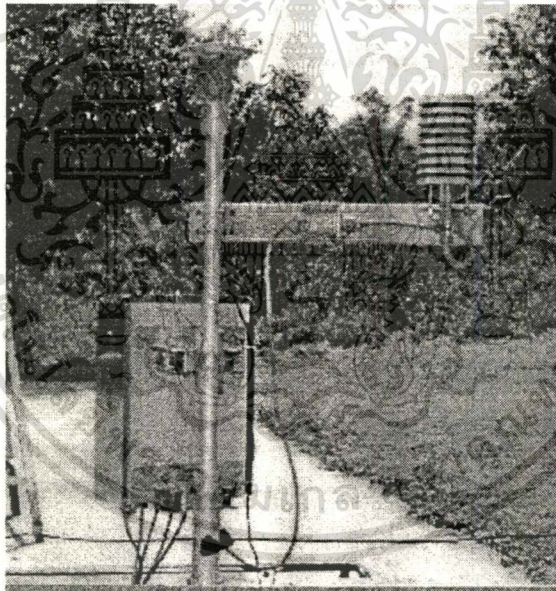
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 73



แสดงรูปสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS

ภาพที่ 74



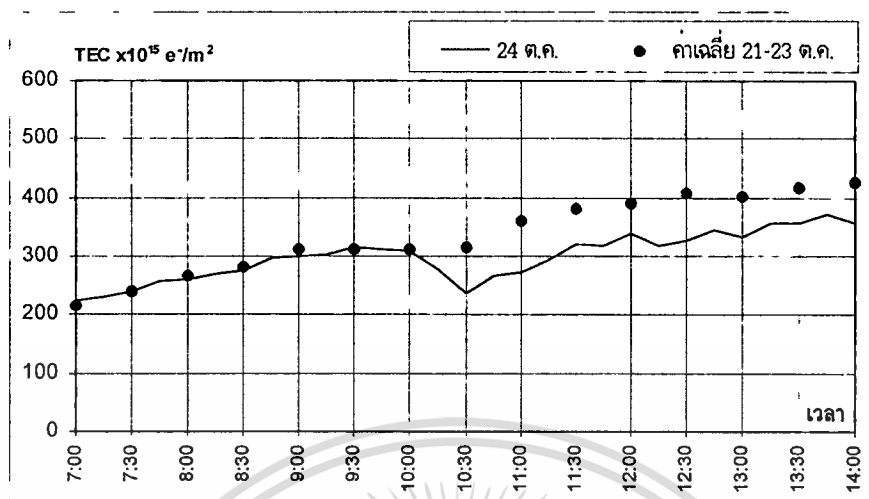
แสดงรูปอุปกรณ์เซนเซอร์

อุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ทำการบันทึกข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาในวันที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา และเครื่อง TEC meter (Turbo Rogue ICS-4000Z) ใช้บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนตั้งแต่วันที่ 21-24 ตุลาคม 2538 ที่อำเภอ คลองขลุง จังหวัด กำแพงเพชร

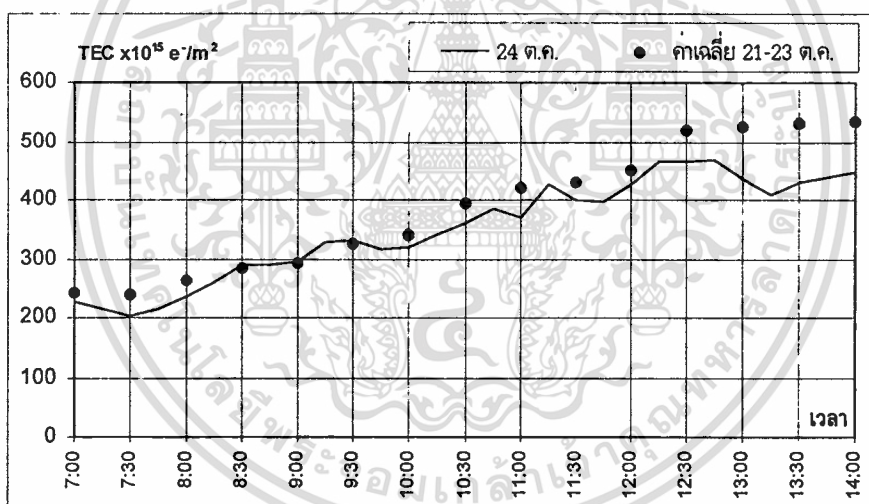
ผลการทดลองที่ได้ที่กรุงเทพและเชียงใหม่ในวันที่ 22-24 ตุลาคม 2538 จะแสดงดังภาพที่ 75 (ก) และภาพที่ 75 (ข) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 75



(ก) แสดงผลการวัดปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 และค่าเฉลี่ยในวันที่ 21-23 ตุลาคม 2538

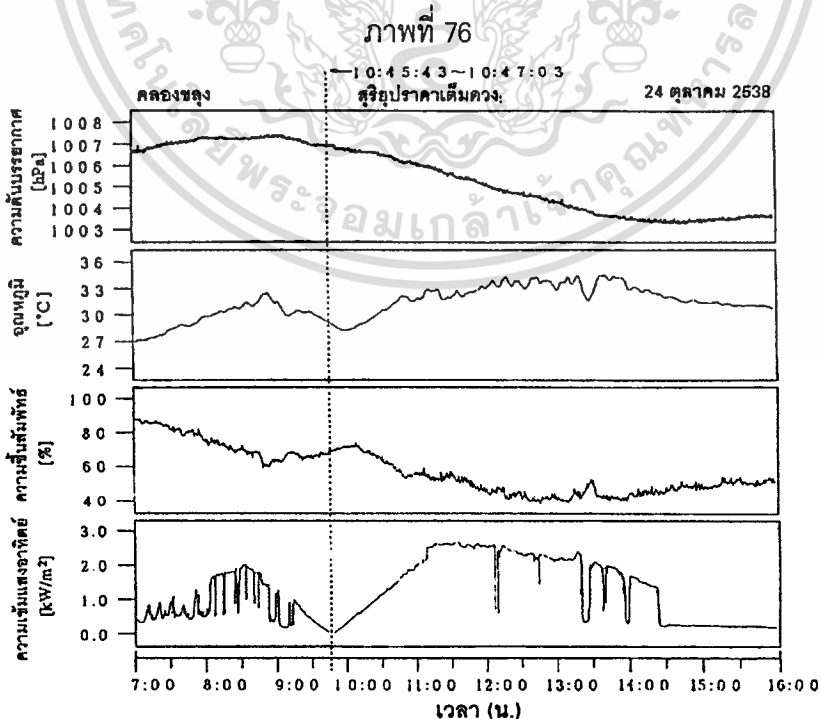


(ข) แสดงผลการวัดปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่ ในวันที่ 24 ตุลาคม 2538 และค่าเฉลี่ยในวันที่ 21-23 ตุลาคม 2538

จากภาพที่ 75 (ก) และภาพที่ 75 (ข) จะสังเกตเห็นว่าในขณะที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา เมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2538 นั้น ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯ จะลด ต่ำกว่าปริมาณอิเล็กตรอนในวันปกติ โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของวันที่ 21-23 ตุลาคม ในช่วงเวลาเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด แต่ที่เชียงใหม่จะไม่เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจเกิดเนื่องจากในช่วงเวลานั้น Crest จะเคลื่อนที่ไปถึงพอดิในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา การลดลงของปริมาณอิเล็กตรอน TEC จึงไม่เด่นชัด ส่วนที่กรุงเทพฯ เวลาที่ค่าปริมาณ TEC เริ่มลดจะอยู่ประมาณ 9:30 น. ค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 10:30 น. (ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยทุก ๆ 15 นาที) ซึ่งใกล้เคียงกับเคียงกับเวลาที่

เริ่มเกิดสุริยุปราคาและเวลาดำมืดกลางการเกิดสุริยุปราคาตามลำดับ ซึ่งค่าต่ำที่สุดนั้นจะลดลงจากค่าเฉลี่ยของ 3 วันก่อนหน้าวันที่เกิดสุริยุปราคาประมาณ 78×10^{15} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร ซึ่งลดลงคิดเป็น 24.7 % ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาในบทความ [33] ซึ่งสรุปว่าการเกิดค่าปริมาณอิเล็กตรอนต่ำที่สุดในช่วงสุริยุปราคาจะเกิดช้ากว่าเวลาดำมืดกลางการเกิดสุริยุปราคาในแถบเส้นรุ้งสูง ๆ ประมาณ 20-50 นาที แต่แถบศูนย์สูตรจะช้ากว่าประมาณ 5 นาที ซึ่งการทดลองนี้ค่าต่ำที่สุดของปริมาณอิเล็กตรอน TEC จะเกิดก่อนเวลาดำมืดกลางการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคานั้น อาจเป็นเพราะว่าเกิดจากใช้วิธีการวัดเวลาหน่วงจากดาวเทียม GPS ซึ่งผลที่ได้จะต่างจากวิธีที่วัดโดยวิธีฟาราเดย์โรเทชันในบทความ[33] ส่วนค่าต่ำที่สุดของค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในช่วงการเกิดสุริยุปราคามีค่าลดลงเกิดจากค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นลดลงเนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์ในช่วงสุริยุปราคาลดลงทำให้เกิดการไอออไนซ์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์น้อยลง ยกเว้นในชั้น F_2 ซึ่งบางครั้งจะเพิ่มขึ้น[32] แต่เกิดขึ้นไม่บ่อยนัก เนื่องจากอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออนบวกมีค่าต่ำลงจะทำให้การไอออไนซ์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้านบนมีค่าน้อยลงและการไอออไนซ์จะเลื่อนลงมาที่ชั้น F_2 ทำให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F_2 จะมีค่ามากขึ้นขณะเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาในบางครั้ง

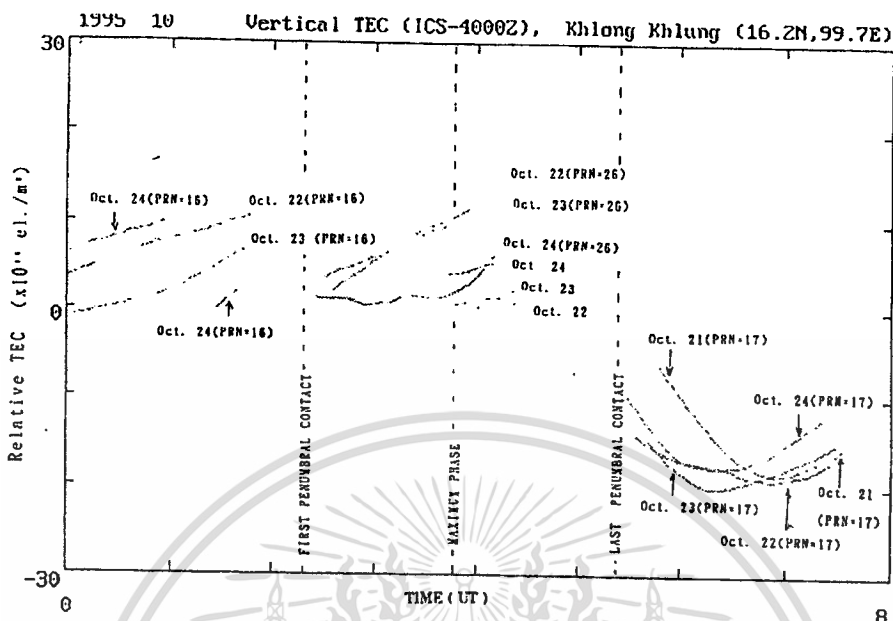
ส่วนผลการทดลองที่อำเภอคลองขลุง แสดงได้ดังภาพที่ 76 ถึงภาพที่ 77



แสดงข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่วัดได้โดยอุปกรณ์เซนเซอร์ที่อำเภอคลองขลุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 77



แสดงกราฟการเปรียบเทียบปริมาณอิเล็กตรอนในวันที่ 21-24 ตุลาคม 2538 ที่อำเภอคลองขลุง ซึ่งวัดได้โดย TEC meter (Turbo Rogue ICS-4000Z)

จากภาพที่ 76 จะเป็นข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่วัดได้โดยอุปกรณ์เซนเซอร์ที่อำเภอคลองขลุง จะเห็นว่าความเข้มของแสงอาทิตย์จะลดลงตั้งแต่สัมผัสแรกของการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเรื่อยไปจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงและความเข้มแสงค่อยๆ เพิ่มขึ้นหลังจากปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงผ่านไป อุณหภูมิจะลดลงประมาณ 5 องศาเซลเซียสระหว่างการพาดผ่านของเงาสุริยุปราคา อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดจะเกิดเมื่อปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงผ่านไปประมาณ 13.5 นาที ความชื้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในขณะเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา

จากภาพที่ 77 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณอิเล็กตรอนในวันที่ 21-24 ตุลาคม 2538 ที่อำเภอคลองขลุง ซึ่งวัดได้โดย TEC meter (Turbo Rogue ICS-4000Z) ตัวอย่างเช่นในวันที่ 23 กับ 24 ตุลาคมในเวลา 07:00 น. ปริมาณอิเล็กตรอนในวันที่ 24 จะสูงกว่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในวันที่ 23 อยู่ประมาณ 70×10^{15} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร จากภาพที่ 77 จะพบว่าปริมาณอิเล็กตรอนในวันที่ 24 ตุลาคม ในช่วงเวลาระหว่างการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาจะน้อยกว่าปริมาณอิเล็กตรอนในวันที่ 22 และ 23 ตุลาคม อย่างเห็นได้ชัด ปริมาณอิเล็กตรอนจะเริ่มลดลงตั้งแต่สัมผัสแรกของการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา และหลังจากเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงผ่านไปปริมาณอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของปริมาณอิเล็กตรอนในตอนพระอาทิตย์ขึ้น ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนตั้งแต่

สัมผัสแรกของการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาจนถึงก่อนเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวง จะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงคือ จะมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณอิเล็กตรอนโดยมีคาบของการเพิ่มขึ้นและลดลงประมาณ 13-23 นาที โดยปริมาณอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนแปลงจะอยู่ที่ประมาณ $\pm 5.8 \times 10^{15}$ อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร[35] การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของปริมาณอิเล็กตรอน TEC อาจเกิดจากการเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เรียกว่า Traveling Ionospheric Disturbance (TID) แต่เป็นการยากที่จะแยกจากความไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นปกติ ปริมาณอิเล็กตรอนที่น้อยที่สุดจะพบก่อนเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงที่เวลาประมาณ 9.48 น. และในขณะที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงปริมาณอิเล็กตรอนจะลดลงประมาณ 117×10^{15} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอิเล็กตรอนในวันที่ 23 ในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะแตกต่างจากบทความ [32] แต่จะสอดคล้องกับปริมาณอิเล็กตรอนที่กรุงเทพฯ ซึ่งค่าต่ำที่สุดในช่วงสุริยุปราคาจะเกิดก่อนจุดกึ่งกลางการเกิดสุริยุปราคา

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์รูปแบบต่าง ๆ ของปริมาณอิเล็กตรอนในประเทศไทย

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอน TEC ของทั้ง 2 สถานีรับจะใช้การประมาณเป็นเชิงเส้นในการวิเคราะห์ค่า ซึ่งจะมีประโยชน์ในการประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในสถานที่ที่ไม่มีเครื่องวัด และตั้งอยู่ระหว่าง 2 สถานีที่มีเครื่องมือวัดปริมาณอิเล็กตรอน TEC [36] ซึ่งมีการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในแต่ละคู่ของสถานีวัด ซึ่งอยู่ในทิศตะวันออกตะวันตก หรือทิศเหนือใต้ หรือศึกษาใน 2 สถานีที่ใกล้เส้นรุ้งดิพแม่เหล็กที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนมีค่าสูงที่สุดคือประมาณ 15° โดยการศึกษาในหัวข้อนี้จะหาความสัมพันธ์และการประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่และกรุงเทพฯ ซึ่งอยู่ในทิศทางเหนือ รวมทั้งจะมีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์(ρ) โดยใช้สมการพื้นฐานดังนี้

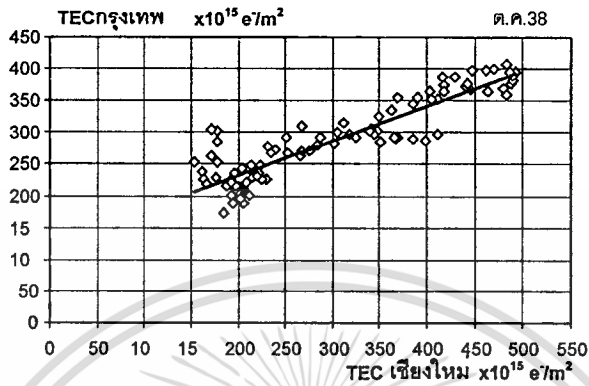
$$TEC(\text{Bangkok}) = m \times TEC(\text{Chiangmai}) + C \quad (4.8)$$

เมื่อ m คือ ความชันของเส้นกราฟ

C คือ ค่าคงที่

เมื่อวาดปริมาณ TEC ของ ทั้ง 2 สถานีด้วยกันจะได้ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 78

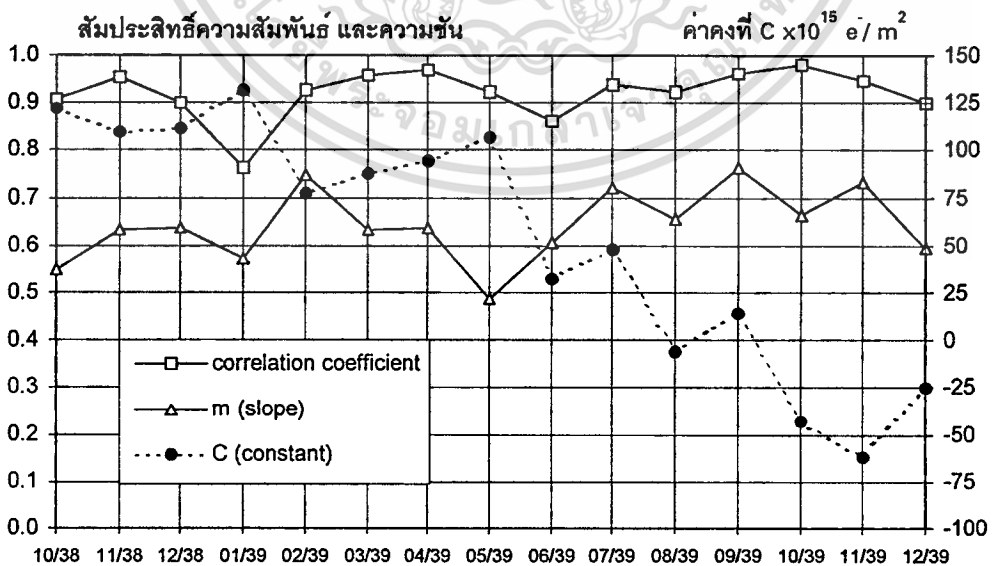
ภาพที่ 78



แสดงค่าเฉลี่ย TEC ของทั้ง 2 สถานีรวมกันในเดือนตุลาคม 2538

จากภาพที่ 78 ก็จะหาค่า m , C และ ρ ได้เท่ากับ 0.91, 0.55 และ 122.2 ตามลำดับ และทำการหาค่าทั้ง 3 ตัวแปรตั้งแต่เดือนตุลาคม 2538 จนถึง ธันวาคม 2539 แล้วนำมาวาดรวมกันดังแสดงในภาพที่ 79

ภาพที่ 79



แสดงผลจากการวิเคราะห์ค่า m , C และ ρ ระหว่าง 2 สถานี

ตั้งแต่ตุลาคม 2538 จนถึง ธันวาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 79 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์นั้นจะมีค่ามากกว่า 0.76 ซึ่งความสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ทั้ง 2 สถานีนั้นดีมากและมีค่าต่ำที่สุดในเดือนมกราคม และมิถุนายน ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ต่ำที่สุดในฤดูกาลพอดี จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จะขึ้นอยู่กับฤดูกาลด้วย[37] ส่วนค่าความชันนั้นจะมีค่าค่อนข้างจะกระจายแต่จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ถึง 0.75 ส่วนค่า C นั้นจะมีแนวโน้มลดลงมาซึ่งค่า C จะขึ้นกับความแตกต่างระหว่างค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ทั้ง 2 สถานีวัดดังแสดงในภาพที่ 52 ตั้งแต่ต้นปี 2539 ค่าความห่างระหว่างปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ของทั้ง 2 สถานีวัดมีมากขึ้นซึ่งเกิดเนื่องจากปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ที่กรุงเทพฯได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรสุริยะมากกว่าที่เชียงใหม่ซึ่งอยู่ใกล้แนวเส้นรุ้งดิพแม่เหล็กที่ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC สูงที่สุดที่ $\pm 15-20^\circ$ ดังกล่าวมาแล้ว ซึ่งจะทำให้ค่าคงที่ C นั้นมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ต้นปี 2539 เป็นต้นมา



บทที่ 5

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูลกับการประมาณจากแบบจำลอง

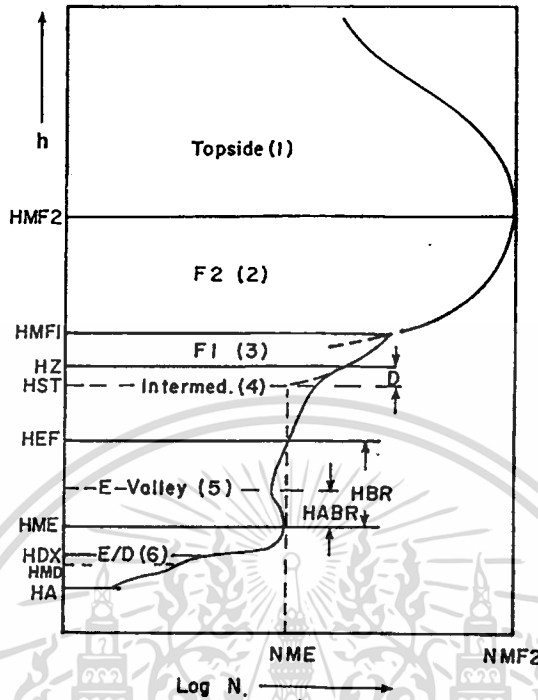
กล่าวนำ

แบบจำลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC กับเส้นรุ้งแม่เหล็กในบทที่ผ่านมาคือแบบจำลอง International Reference Ionosphere หรือ IRI ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สร้างบนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยได้รับการสนับสนุนจาก Committee on Space Research (COSPAR) และ International Union of Radio Science (URSI) ซึ่งกลุ่มองค์กรทั้ง 2 ได้ตั้งกลุ่มในการวิจัยตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษที่ 1960 เพื่อสร้างแบบจำลองมาตรฐานของไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป้าหมายของ IRI คือสร้างแบบจำลองที่เป็นฟังก์ชันกับความสูงของตัวแปร 4 ตัวคือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอน อุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอน และ Ion composition ที่ความสูงเหนือพื้นดินตั้งแต่ 60-2,000 กิโลเมตร โดยเฉพาะความหนาแน่นอิเล็กตรอนซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายและสามารถใช้ในการประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC และเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้

แบบจำลองความหนาแน่นอิเล็กตรอนได้มีการศึกษามานาน ซึ่งจะมีโครงสร้างของความหนาแน่นอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันกับความสูง ($N(h)$ Profile) ต่าง ๆ กันไป แบบจำลองโครงสร้างความหนาแน่นอิเล็กตรอนของ IRI แสดงได้ดังภาพที่ 80

จากภาพที่ 80 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง(หมายเลข 2-6) เช่น HMF2 (ความสูงเหนือพื้นดินที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนชั้น F_2 มีค่ามากที่สุด) จะใช้ค่าจากแบบจำลองของ CCIR [23] และค่าที่วัดได้จากการใช้ Vertical Sounder และ Incoherent Scatter Radar ในสถานีวัดที่กระจายกันทั่วโลกเช่น Jicamarca, Arecibo, Millstone hill, Malvern เป็นต้น ส่วนค่าไอโอโนสเฟียร์ด้านบนหรือ Topside Ionosphere (หมายเลข 1 ในภาพที่ 80) ซึ่งไม่สามารถจะวัดได้จากพื้นโลกและ CCIR ไม่ได้ทำแบบจำลอง ในแบบจำลอง IRI จะใช้ค่าที่วัดโดยวิธีวัดแบบ Topside Sounder ซึ่งได้ค่าจากยานอวกาศเช่น Alouette และ ISIS เป็นต้น

ภาพที่ 80



แสดงโครงสร้างความหนาแน่นอิเล็กตรอนของแบบจำลอง IRI [24]

ส่วนแบบจำลองอื่น ๆ ก็มีการทดสอบในบทความ[38] ซึ่งจะทดสอบแบบจำลอง 6 แบบคือ IRI model (เป็นแบบจำลองในปี 1987), Bent model, Ionospheric Conductivity and Electron Density model (ICED), Penn State University model (PSU), Fully Analytic Ionosphere Model (FAIM) และ Hybrid model ซึ่งพบว่าแบบจำลองทั้งหมดสามารถเปรียบเทียบได้ใกล้เคียงกับความถี่วิกฤตในชั้น F_2 แต่ไม่มีแบบจำลองใดสามารถประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ได้ดีเนื่องจากความผิดพลาดของการประมาณค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่อความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้านบน ซึ่งในการศึกษาในบทความก่อนหน้านั้นคือ[24] พบว่าการคำนวณค่าจากแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่สถานีวัดที่ตำแหน่งเส้นรุ้งสูง ๆ จะมีค่าจากแบบจำลองใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงทั้งในช่วงปีที่จุดดับบนดวงอาทิตย์สูงที่สุดและต่ำที่สุด แต่ค่าการประมาณในสถานีที่ตั้งอยู่ที่เส้นรุ้งต่ำ ๆ คือสถานีวัดที่ฟิลิปปินส์ซึ่งอยู่ในแถบศูนย์สูตร พบว่าค่าจากแบบจำลองที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่เส้นรุ้งสูง ๆ แต่แบบจำลอง IRI ก็มีการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องประมาณทุก ๆ 2 ปีและแบบจำลอง IRI-90 ซึ่งเป็นรุ่นที่เราจะทำการเปรียบเทียบได้มีการปรับปรุงที่พัฒนาจาก IRI-86 หลายอย่างรวมทั้งมีการเพิ่มค่าตัวแปรในการคำนวณความถี่วิกฤตในชั้น F_2 จากแบบจำลองของ URSI-1989 และตัวแปรที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของไอออนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ด้วย และแบบจำลอง IRI-95 ก็ได้มีการพัฒนาจาก IRI-90 ขึ้นมาอีก แบบจำลอง IRI ทั้ง 2 รุ่นได้มีการจัดทำเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์และสามารถหาได้จาก NSSDC (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข. ข้อ 2) ส่วนวิธีการคำนวณปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จากความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ และการเปรียบเทียบจะได้แสดงในหัวข้อถัดไป

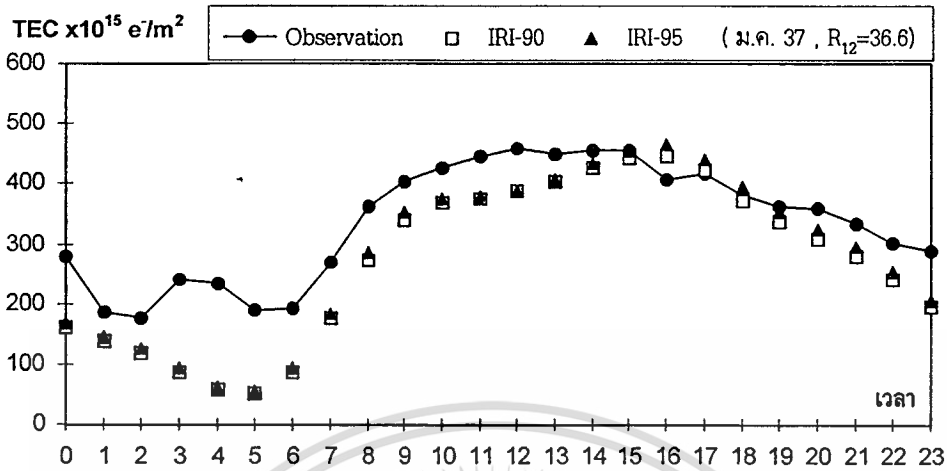
วิธีการคำนวณปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จากแบบจำลอง

จากโปรแกรมแบบจำลอง IRI เราสามารถป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการเช่นวันที่ เวลา จำนวนจุดดับเฉลี่ยบนดวงอาทิตย์(R_{12}) ความสูงเหนือพื้นดิน พิกัดเส้นรุ้งเส้นแวงของที่ตั้งซึ่งสามารถเลือกได้ทั้งพิกัดทางภูมิศาสตร์และพิกัดแม่เหล็ก โดยต้องกำหนดตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนค่าได้(Variable parameter) โดยในการทดสอบในบทนี้จะใช้ค่าความสูงเหนือพื้นดินเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ เพื่อใช้ในการอินทิเกรตเพื่อหาค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ซึ่งใช้ความสูงตั้งแต่ 60-2,000 กิโลเมตร ซึ่งความสูง 60 และ 2,000 กิโลเมตรเป็นค่าต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่แบบจำลองจะสามารถคำนวณได้ตามลำดับ ค่าช่วงความสูงใช้ค่าที่ 50 กิโลเมตรเพื่อความสะดวกในการอินทิเกรต และใช้ค่าตัวแปรของแบบจำลองต่าง ๆ เช่น URSI-89 ที่ผู้เขียนโปรแกรมแนะนำให้ใช้ในการคำนวณ ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม IRI-90 จะให้ความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ความสูงต่าง ๆ และตัวแปรอื่น ๆ เช่นอนุกรมของอิเล็กทรอนิกส์ที่แบบจำลอง IRI-90 คำนวณได้ของสถานีวัดที่กรุงเทพฯ ในวันที่ 15 มีนาคม 2537 เวลา 14.00 น. จุดดับบนดวงอาทิตย์(R_{12})มีค่า = 34.1 จะแสดงได้ดังภาพที่ 81

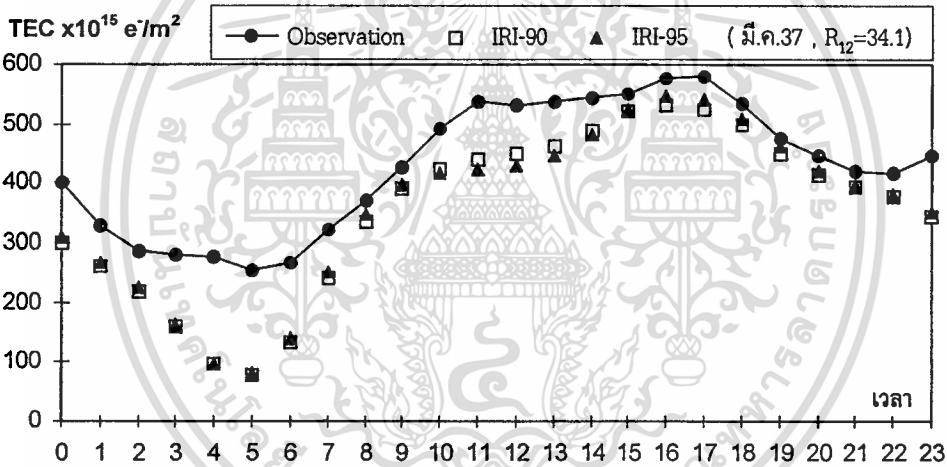
จากภาพที่ 81 ความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์มีหน่วยเป็น อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (e/cm^3) ซึ่งก็ต้องมีการปรับหน่วยเป็น อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร (e/m^3) โดยใช้ 10^6 คูณ หลังจากนั้นจะทำการอินทิเกรตโดยรวมค่าความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดตั้งแต่ค่าความสูง 60-2,000 กิโลเมตร ซึ่งจะมีช่วงความสูงหรือ ds ของการอินทิเกรตคือ 50 กิโลเมตร ซึ่งจากภาพที่ 81 ค่าการรวมความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์จะได้เท่ากับ $9,809,339 \times 10^6 e/m^3$ ซึ่งก็จะหาค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ได้ดังนี้

$$9.8094 \times 10^{12} \times 50 \times 10^3 = 490.5 \times 10^{15} \quad (e^-/m^2)$$

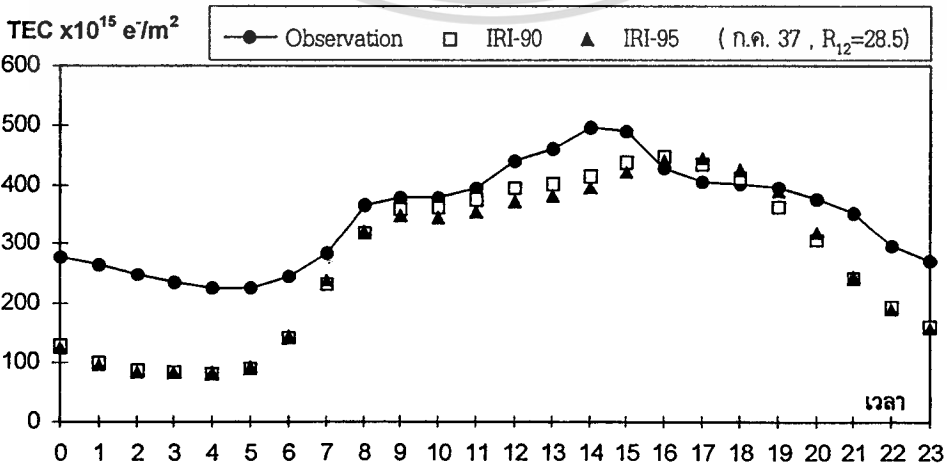
ภาพที่ 82



(ก) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนมกราคม 2537



(ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนมีนาคม 2537

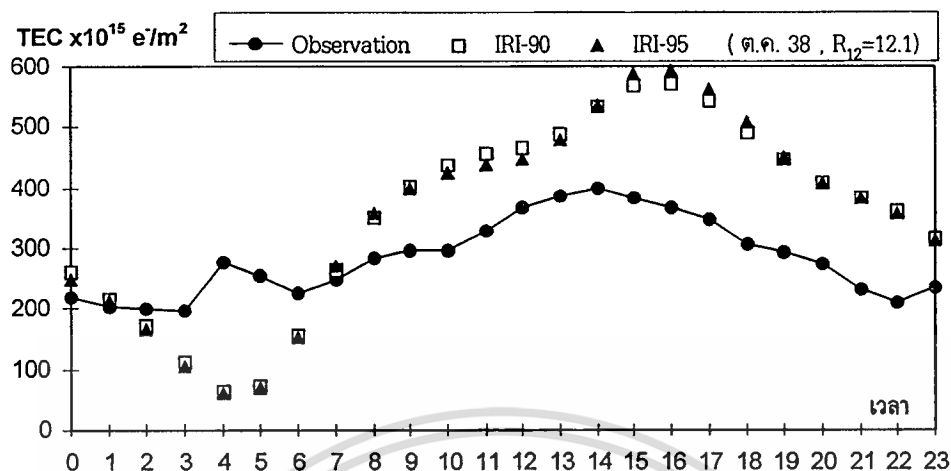


(ค) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนกรกฎาคม 2537

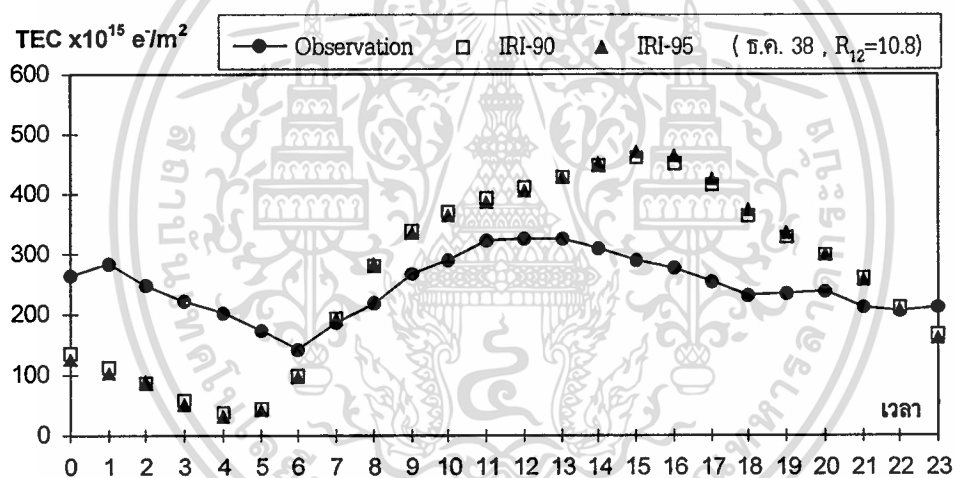
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

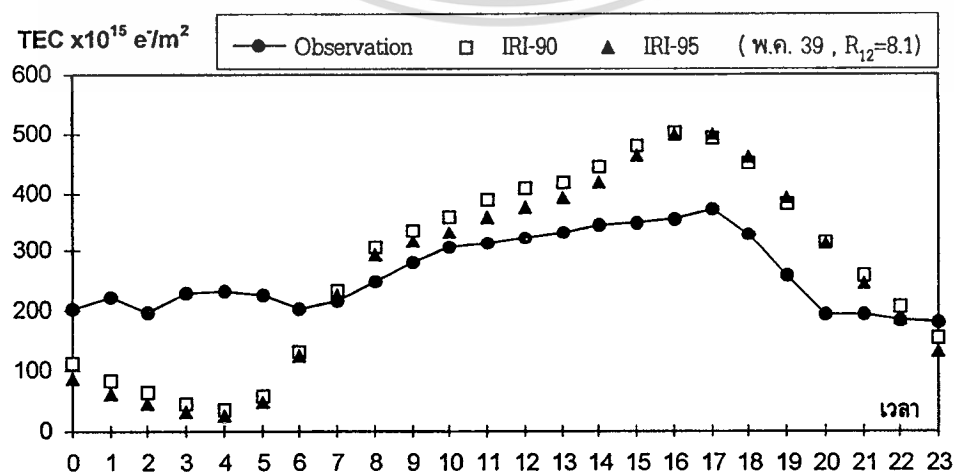
ภาพที่ 82 (ต่อ)



(ง) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพฯ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2538



(จ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพฯ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2538

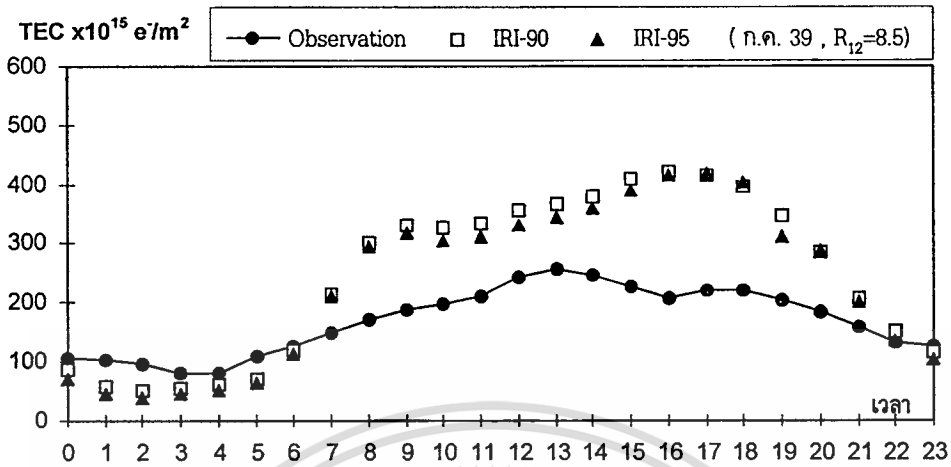


(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพฯ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนพฤษภาคม 2539

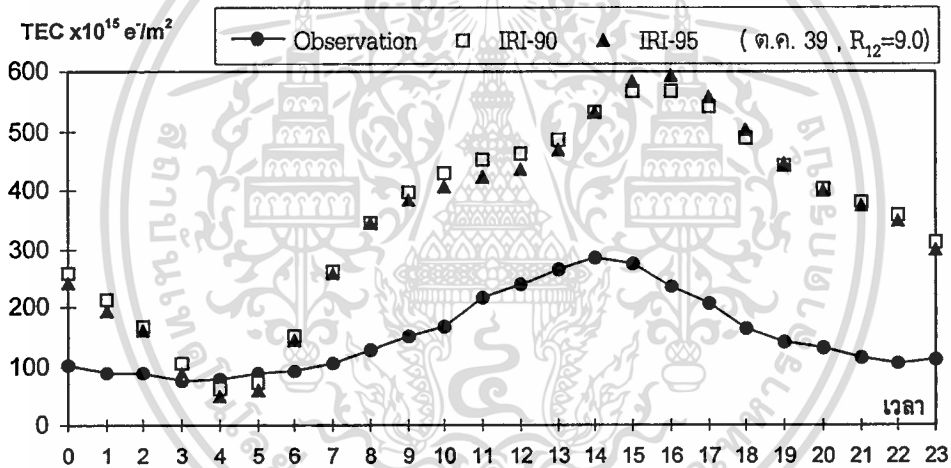
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

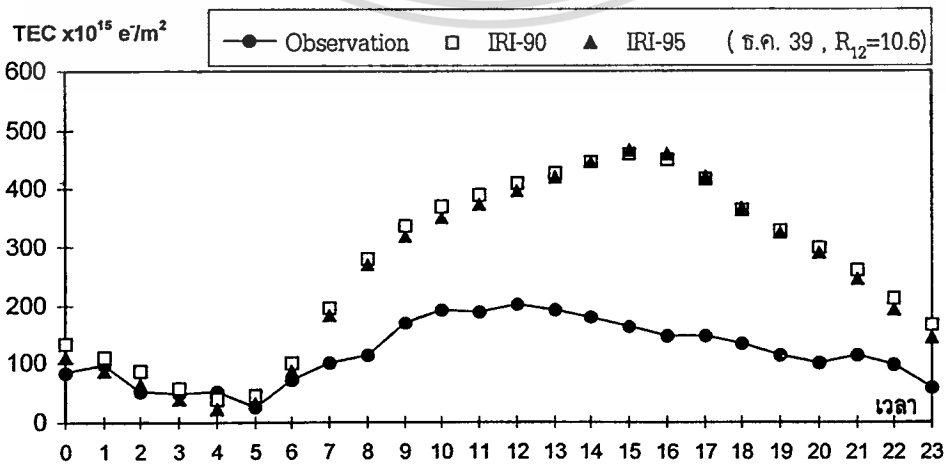
ภาพที่ 82 (ต่อ)



(ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพฯ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนกรกฎาคม 2539



(ค) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพฯ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2539

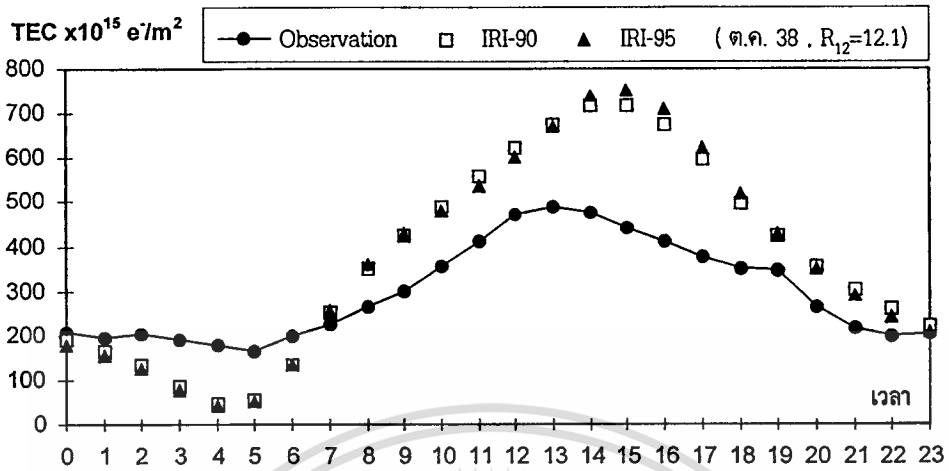


(ง) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่กรุงเทพฯ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2539

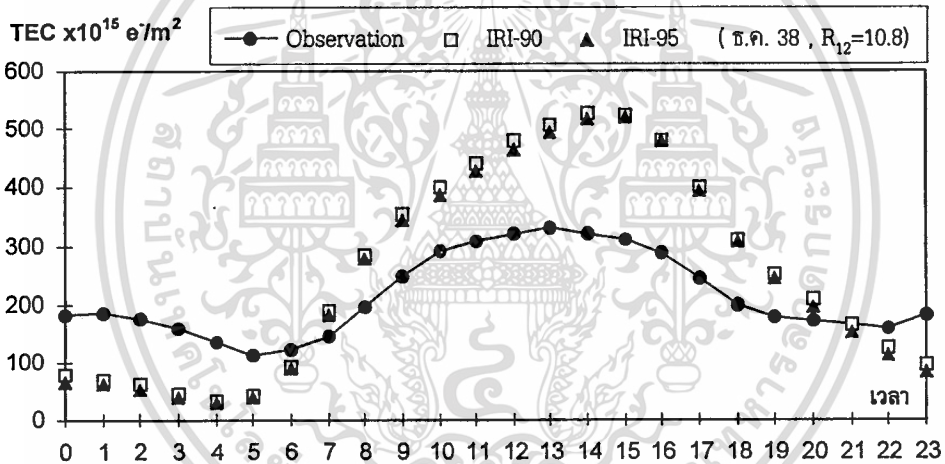
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

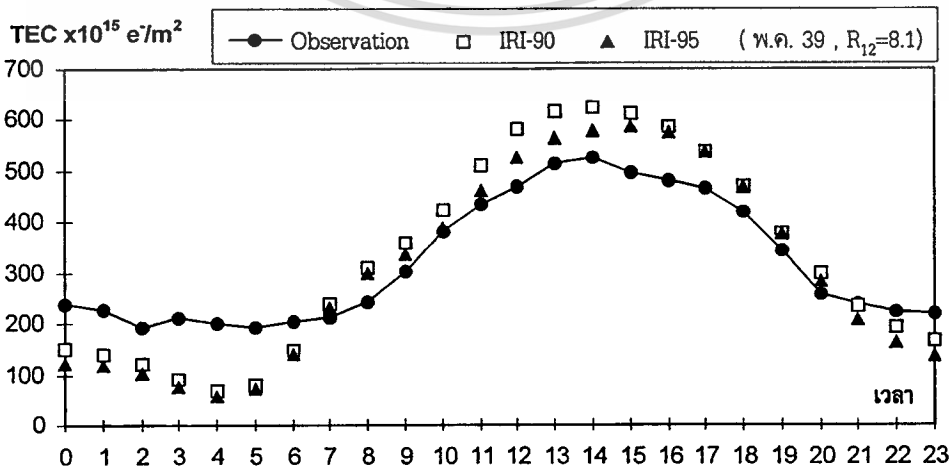
ภาพที่ 83



(ก) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2538



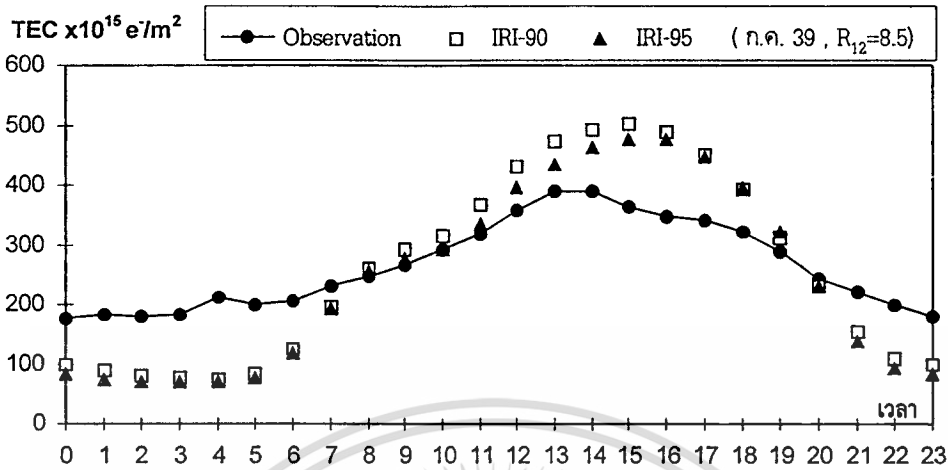
(ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2538



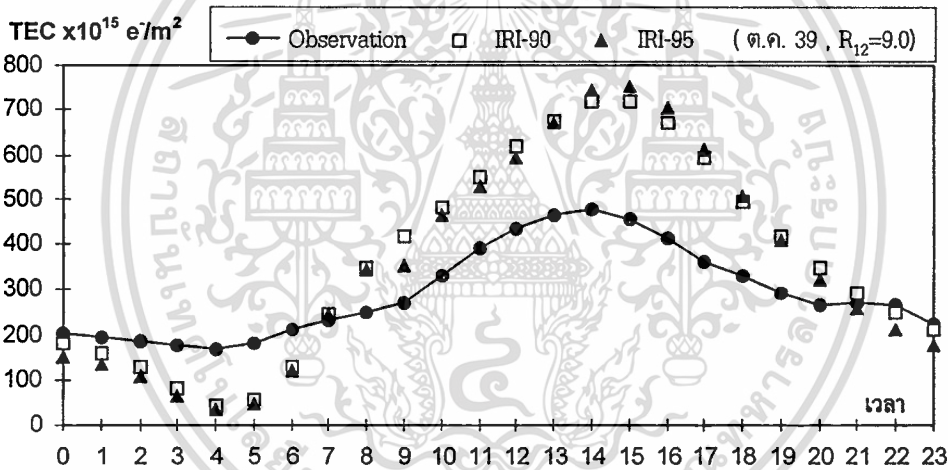
(ค) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนพฤษภาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

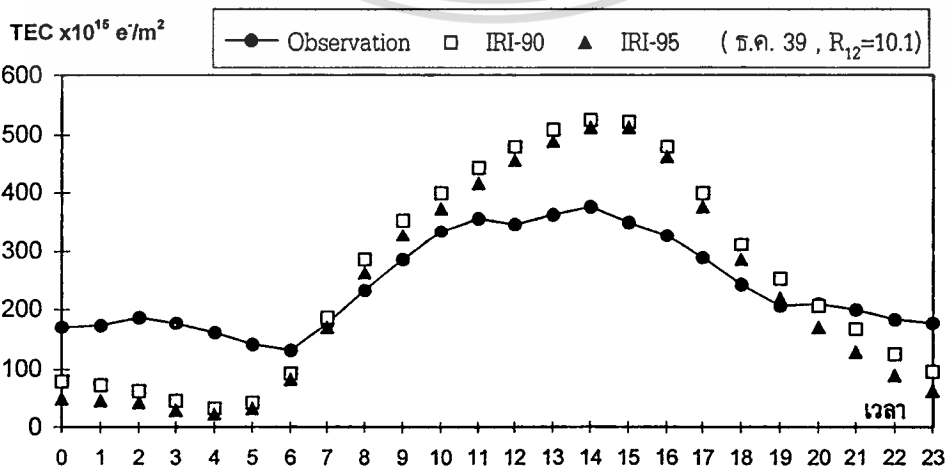
ภาพที่ 83 (ต่อ)



(ง) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนกรกฎาคม 2539



(จ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนตุลาคม 2539



(ฉ) แสดงการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ กับค่าจากแบบจำลอง IRI ในเดือนธันวาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในภาพที่ 82 (ก) ถึง (ง) และภาพที่ 83 (ก) ถึง (ง) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์จะแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6

% ความคลาดเคลื่อน	ม.ค.37	มี.ค.37	ก.ค.37	ต.ค.38	ธ.ค.38	พ.ค.39	ก.ค.39	ต.ค.39	ธ.ค.39
IRI-90 กับค่าที่เชียงใหม่	-	-	-	40.1	49.9	22.8	29.2	41.4	37.0
IRI-95 กับค่าที่เชียงใหม่	-	-	-	41.7	49.3	21.2	27.8	43.4	36.7
IRI-90 กับค่าที่กรุงเทพ	20.8	17.1	22.6	41.7	41.5	37.9	54.9	133.2	126.2
IRI-95 กับค่าที่กรุงเทพ	19.2	16.4	23.7	42.4	42.7	36.6	51.8	130.1	118.6
R_{12}	36.6	34.1	28.5	12.1	10.8	8.1	8.5	9.0	10.6

แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแบบจำลอง IRI-90 และ IRI-95 กับค่าที่วัดได้ที่เชียงใหม่ และกรุงเทพ และค่าจุดดับเฉลี่ยบนดวงอาทิตย์ (R_{12})

จากภาพที่ 82 (ก) ถึง (ง) และภาพที่ 83 (ก) ถึง (ง) และตารางที่ 6 ค่าที่ได้จากการประมาณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จากแบบจำลอง IRI ทั้ง 2 แบบนั้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่โดยส่วนใหญ่ค่าจากแบบจำลอง IRI-95 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลอง IRI-90 เล็กน้อย การประมาณในช่วงที่ค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่ากำลังลดในปี 2537 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทั้ง 2 จะมีไม่มากนัก แต่ในปีที่ค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ต่ำที่สุดในปี 2359 ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะมีความคลาดเคลื่อนมาก จากการศึกษาในบทความ [24] ซึ่งสรุปว่าความคลาดเคลื่อนในย่านเส้นศูนย์สูตรจะมีค่ามาก ในบทความเป็นการเปรียบเทียบในขณะที่จุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุดในรอบ 11 ปี ค่าที่ประมาณได้จาก IRI จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงมาก แต่จากภาพที่ 82 (ก) ถึง (ค) พบว่าช่วงที่จุดดับกำลังลดนั้นค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงในทุก ๆ เดือนที่ทำการเปรียบเทียบ ส่วนในปี 2539 ค่าประมาณจาก IRI-90 และ IRI-95 ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้มาก ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดของแบบจำลองซึ่งอาจจะไม่มีข้อมูลในย่านนี้ในช่วงที่จุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจากการศึกษาในบทความ[24] และการเปรียบเทียบในบทนี้สรุปได้ว่าค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ที่ได้จากแบบจำลอง IRI จะมีค่าคลาดเคลื่อนในย่านเส้นศูนย์สูตรซึ่งจะมีมากในช่วงที่จุดดับบนดวงอาทิตย์มีจำนวนมากที่สุดและน้อยที่สุดในรอบ 11 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุป

จากการศึกษาและจากผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณและการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ส่งผลกระทบต่อต่าง ๆ ต่อลักษณะสัญญาณดาวเทียมขาลงในย่านความถี่ที่สูงถึง C-band เช่นเวลาหน่วงของสัญญาณ หรือการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาระหว่างวัน ต่อฤดูกาล ต่อวัฏจักรสุริยะ ต่อเส้นรุ้งแม่เหล็ก เป็นต้น ซึ่งผลสรุปจากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ระหว่างวันจะมีค่าต่ำสุดก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น ซึ่งค่าเวลาเฉลี่ยที่เชียงใหม่มีค่า 4:04 น. และที่กรุงเทพฯมีค่า 3:29 น. ซึ่งเกิดจากการไอออไนซ์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีค่าต่ำที่สุดและค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าไม่สม่ำเสมอ
- 2) ค่าสูงที่สุดการเปลี่ยนแปลงระหว่างวันของค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC จะอยู่ในช่วงประมาณ 14.00 น. ซึ่งค่าเวลาเฉลี่ยที่เชียงใหม่มีค่า 14:15 น. และที่กรุงเทพฯมีค่า 14:32 น. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และหลังจากนั้นจะลดต่ำลงในช่วงบ่ายถึงกลางคืน
- 3) การเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC กับเวลาจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากปริมาณอิเล็กตรอน TEC ก็คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่ได้จากการอินทิเกรตความหนาแน่นอิเล็กตรอนเทียบกับความสูงนั่นเอง
- 4) การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกครั้งหลังจากค่าสูงที่สุด ซึ่งเกิดในช่วงเวลากลางคืน เรียกว่าปรากฏการณ์ TEC enhancement ซึ่งเกิดนี้เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้น F ในเวลากลางคืน หรือเกิดจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

5) ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักอย่างหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน เราสามารถหาได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC

6) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในตอนกลางวันมีค่าประมาณ 15% ตอนกลางคืนมีค่าประมาณ 25% จุดสูงที่สุดนั้นอยู่ประมาณ 2.00-5.00 น. ซึ่งมีค่า 40-70% แสดงถึงในช่วงกลางคืนปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความไม่สม่ำเสมอมากกว่าเวลากลางวัน ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่เกิดเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation) ในเวลากลางคืนมากกว่าเวลากลางวัน

7) การเปลี่ยนแปลงต่อฤดูกาลของปริมาณอิเล็กตรอน TEC นั้น ใน 1 ปีจะมีจุดที่มีค่าสูงที่สุดอยู่ 2 ที่คือประมาณเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคมและเดือนตุลาคม และจุดต่ำที่สุดอยู่ 2 ที่คือประมาณเดือนมิถุนายนและเดือนธันวาคม ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ซึ่งจะมีการโคจรโดยเปลี่ยนแปลงมุมตรงศีรษะหรือมุมซีก (Zenith angle) ของดวงอาทิตย์ เนื่องจากแกนโลกเอียงเป็นมุมประมาณ 23.5° กับดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้แต่ละซีกโลกหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์สลับกันไป ใน 1 ปีทำให้ซีกโลกที่หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์มีช่วงกลางวันที่ยาว และจะเกิดเป็นฤดูกาลขึ้น

8) ผลกระทบจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมในย่าน C แบนด์แต่ละเดือนรวมทั้งปีนั้นจะเปลี่ยนแปลงเป็นฤดูกาล ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นมากอยู่ในช่วงเดือนเมษายน และเดือนกันยายน ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่าสูงที่สุดในปีพอดี ซึ่งก็จะเห็นว่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลนั้นเป็นสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมที่เกิดเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation) มีความถี่ของการเกิดเปลี่ยนไปตามฤดูกาลด้วย

9) ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC จะขึ้นอยู่กับวัฏจักรของดวงอาทิตย์ (Solar cycle) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar flux) และจุดดับบนดวงอาทิตย์ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักรที่มีคาบประมาณ 11 ปี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันปีต่อปีค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC จะลดลงมาเรื่อย ๆ ตั้งแต่ปี 2536 จนต่ำที่สุดในปี 2539 ซึ่งเกิดจากเป็นการศึกษาในช่วงที่จุดดับบนดวงอาทิตย์กำลังลดและต่ำที่สุดของวัฏจักร

10) การเปลี่ยนแปลงตามเส้นรุ้งของปริมาณอิเล็กตรอนจะแปรตามเส้นรุ้งแม่เหล็กที่เรียกว่าเส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสัดส่วนของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งและแนวนอน

11) การเปลี่ยนแปลงต่อเส้นรุ้ง ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่เชียงใหม่มีค่ามากกว่าที่กรุงเทพฯ เป็นเพราะกลุ่มของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน(Crest) จะเกิดที่ตำแหน่งเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กและจะแบ่งเป็น 2 ส่วนเคลื่อนที่แนวแนวทางทิศเหนือและทิศใต้ไปอยู่ที่ตำแหน่งเส้นรุ้งดิพแม่เหล็ก $\pm 15-20^\circ$ ซึ่งอยู่ใกล้เชียงใหม่มากกว่ากรุงเทพฯ ส่วนค่าที่กรุงเทพฯและภูเก็ตที่อยู่ในเส้นรุ้งดิพแม่เหล็กที่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กที่ใกล้เคียงกันทำให้ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC มีค่าใกล้เคียงกัน

12) สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติในแถบศูนย์สูตรและเกิด Crest นั้นเกิดจากกระบวนการ Fountain effect จะทำให้ Crest ที่เกิดขึ้นในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กจะถูกแรง $\vec{E} \times \vec{B}$ ทำให้อันขึ้นไปสูงเหนือพื้นดินมากและแบ่งเป็น 2 ส่วนตกลงมาในแถบเส้นรุ้งดิพแม่เหล็กประมาณ $\pm 15-20$ องศา ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะคล้ายกับน้ำพุ

13) ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา เมื่อวันที่ 24 ตุลาคมนั้น ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ที่กรุงเทพฯจะลดต่ำกว่าปริมาณอิเล็กตรอนในวันปกติ โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของวันที่ 21-23 ตุลาคม ในช่วงเวลาเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด แต่ที่เชียงใหม่จะไม่เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจเกิดเนื่องจากในช่วงเวลานั้น Crest จะเคลื่อนที่ไปถึงพอดิในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา ทำให้การลดลงของปริมาณอิเล็กตรอน TEC จึงไม่เด่นชัด ส่วนที่กรุงเทพฯเวลาที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC เริ่มลดจะอยู่ประมาณ 9:30 น. ค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 10:30 น. ซึ่งใกล้เคียงกับเคียงกับเวลาที่เริ่มเกิดสุริยุปราคาและเวลาถึงกลางการเกิดสุริยุปราคาตามลำดับ ซึ่งค่าต่ำที่สุดนั้นจะลดลงจากค่าเฉลี่ยของ 3 วันก่อนหน้าวันที่เกิดสุริยุปราคาประมาณ 78×10^{15} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร ซึ่งลดลงคิดเป็น 24.7 %

14) ปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในขณะที่ปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวง ที่อำเภอคลองขลุงจะลดต่ำลงประมาณ 117×10^{15} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 23 ตุลาคม และจะมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณอิเล็กตรอนในระหว่างการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาทีประมาณ $\pm 5.8 \times 10^{15}$ อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร ซึ่งเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา และเมื่อหลังเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงแล้วปริมาณอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

15) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอน TEC ของทั้ง 2 สถานีรับจะใช้การประมาณเป็นเชิงเส้นในการวิเคราะห์ค่า ซึ่งจะมีประโยชน์ในการประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ในสถานที่ที่ไม่มีเครื่องวัด และตั้งอยู่ระหว่าง 2 สถานีที่มีเครื่องมือวัดปริมาณอิเล็กตรอน TEC

16) ความสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ทั้ง 2 สถานีนั้นดีมากและมีค่าต่ำที่สุดในเดือนมกราคมและมิถุนายน ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ต่ำที่สุดในฤดูกาลพอดิ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จะขึ้นอยู่กับฤดูกาลด้วย

17) การประมาณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC จากแบบจำลอง IRI ทั้ง 2 แบบนั้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่โดยส่วนใหญ่ค่าจากแบบจำลอง IRI-95 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลอง IRI-90 เล็กน้อยประมาณ 1% การประมาณในช่วงที่ค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่ากำลังลด คือในปี 2537 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทั้ง 2 จะมีไม่มากนัก ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 20% แต่ในปีที่ค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ต่ำที่สุดในปี 2539 ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะมีความคลาดเคลื่อนมาก ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามากถึงที่ระดับประมาณ 130%

18) ค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC ที่ได้จากแบบจำลอง IRI จะมีค่าคลาดเคลื่อนในย่านเส้นศูนย์สูตรซึ่งจะมีมากในช่วงที่จุดดับบนดวงอาทิตย์มีจำนวนมากที่สุดและน้อยที่สุดในรอบวัฏจักร 11 ปี

จากการวิเคราะห์ค่าปริมาณและการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ TEC เป็นค่าที่วัดได้ในประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตแถบเส้นศูนย์สูตร ซึ่งจะเป็นค่าของข้อมูลที่จะสามารถนำไปเป็นข้อมูลอ้างอิง หรือเป็นตัวแปรในการเปรียบเทียบผลกระทบของการแพร่กระจายของคลื่นสัญญาณดาวเทียมผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เพื่อการวิเคราะห์และการออกแบบระบบการทำงานของ การควบคุมการส่งสัญญาณอย่างเหมาะสมต่อไป

บรรณานุกรม

1. Allnutt J. E., Satellite-to-ground radiowave propagation, (Peter Peregrinus, 1989).
2. Ippolito, Louis J. Jr., Radiowave Propagation in Satellite Communication, (Van Nostrand Reinhold, 1986).
3. สุรศักดิ์ กฤษดาภาณิชย์, ประเสริฐ เคนพันค้อ, กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา และ ณรงค์ เหมกรณ์, “การศึกษาการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมย่าน Ku”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, ชลบุรี, (2538), หน้า 286-289.
4. Davies, Kenneth, Ionospheric Radio, (Peter Peregrinus, 1989).
5. CCIR Report 725-3, “Ionospheric Properties”, Reports of the CCIR, 1990: Volume VI Propagation in Ionized Media, (ITU, Geneva, 1990).
6. Goodman, John M. and Jules Aarons, “Ionospheric Effect on Modern electronic systems”, Proceeding of the IEEE, vol.78, no.3, (Mar. 1990): 512-526.
7. Igarashi, K., et.al., “GPS Observations of Ionospheric Total Electron Content and Scintillation in the Equatorial Zone as part of PARTNERS Project”, International Beacon Satellite Symposium, United Kingdom, (Jul. 1994).
8. อภินันท์ มัณยานนท์, การเดินทางของคลื่นวิทยุ, (กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2527).
9. Hunsucker, R. D., Radio Techniques for Probing the Terrestrial Ionosphere, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991).
10. Collin, Robert E. , Antennas and Radiowave Propagation, (Mcgraw-Hill, 1985).
11. Hofmann-Wellenhof B., H. Lichtenegger and J. Collin, Global Positioning System Theory and Praticce, (Springer-Verlag Wien New York, 1994).
12. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, หลักการไฟฟ้าสื่อสาร, (กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537).
13. Lawrence, R.S., C.G. Little and H.J.A. Chivers, , “A Servey of Ionospheric Effect Upon Earth-Space Radio Propagation”, Proceeding of the IEEE, (Jan. 1964): 4-27.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. วิสุทธิ์ อธิพรธรรม, “การเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม”, (วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง, 2536).
15. กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา, นิภา ลีลาจุจิ, Mana Piamkulvanish และ Yoshiaki Moriya, “ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันแบบครึ่งคาบที่พบในสัญญาณดาวเทียม”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19, ขอนแก่น, (2539), หน้า CM29-32.
16. Tohmatsu, T., Compendium of Aeronomy, (Terra Scientific. 1990).
17. บุษกร กาญจนาลัย, “GPS: Global Positioning System”, Wireless Communication Journal, ปีที่ 3, ฉบับที่ 10, (มีนาคม 2539) หน้า 28-42.
18. Model 7633 Realtime TECMETER Operation Manual, (Nihon Tsushinki).
19. ประเสริฐ เคนพันค้อ, สุรศักดิ์ กฤษดาวณิชย์, กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา และ ณรงค์ เหมภรณ์, “การวัดการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ดาวเทียม GPS”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, ชลบุรี, (2538), หน้า 290-295.
20. Klobuchar, John A., “Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, vol. AES-23, No. 3, (May 1987): 325-331.
21. Kersley, L., J. Aarons and J. A. Klobuchar, “Nighttime Enhancement in Total Electron Content Near Arecibo and Their Association With VHF Scintillations”, Journal of Geophysical Research, v.85, no.A8, (Aug. 1980): 4214-4222.
22. Dao-heng, Wang , Xu Ji-sheng and Yeh K. C., “Nocturnal Disturbances of TEC and Their Correlation with VHF Radio Wave Scintillations in the Pacific-Asia Region”, Proceedings of 1993 International Symposium on Radio Propagation (ISRP’93), Beijing China, (1993): 392-395.
23. CCIR Report 340-4, “CCIR atlas of ionospheric characteristics”, Propagation in Ionized Media. Vol.V, Recommendations and reports of the CCIR-1982, (1982).
24. McNamara, L.F., “Prediction of total Electron Content Using the International Reference Ionosphere”, Advance Space Research, Vol.4, No.1, (1984): 25-50.

25. Narong Hemmakorn, H. Kawaguchi, Y. Moriya, "The Characteristics of Low Elevation Propagation in Equatorial District with C-band", 1994 International Telecommunication Symposium, Taipei Taiwan, (Sep. 1994) vol.2 : 147-152.
26. "Sunspot hints that new cycle is on the way", Radio and Communications, (Nov. 1995): 12-13.
27. NOAA, Solar-Geophysical Data prompt reports, no.628-part1, (Dec.1996).
28. Mendonca, F., I. J. Kantor and B. R. Clemesha, "Low-latitude Ionospheric Electron Content Measurements During Half a Solar Cycle", Radio Science, Vol4, No.9, (Sep. 1969): 823-828.
29. Golton, E., G.O. Walker, "Observations of Ionospheric Electron Content Across the Equatorial Anomaly at Sunspot Minimum", Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 33, (1971): 1-11.
30. Ezquer, Rodolfo G. , Nieves Ortiz de Adler, and Teresita Heredia, "Predicted and measured total electron content at both peaks of the equatorial anomaly", Radio Science, vol 29 ,no.4, (Jul-Aug 1994): 831-838.
31. Rush, C.M., D. Miller, "Some Aspects of the Day-to-day Variability of the Equatorial Anomaly: American and Japanese Sectors", Radio Science, vol 7 ,no. 12, (Dec. 1972): 1085-1094.
32. Evans, J. V., "On the Behavior of f_oF_2 during Solar Eclipse", Journal of Geophysical Research, v.70, no.3, (Feb. 1965): 733-738.
33. Cohen, Elizabeth A., "The Study of the Effect of Solar Eclipse on the Ionosphere Based on Satellite Beacon Observations", Radio Science, Vol.19, No.3, (May-June 1984): 769-777.
34. Igarashi, K., et.al., "Ionospheric Total Electron Content Observation with the GPS Chain in THAILAND during the October 24, 1995 Total Solar Eclipse" , Workshop for data comparison and results for the October 24,1995 Total Solar Eclipse, Taiwan, (May 1996): 51-54.
35. อติเทพ ชัยสังข์, จักรพันธ์ แก้วพิบูลย์, สุรศักดิ์ กฤษดาวาณิชย์, กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา และ ณรงค์ เหมกรณ์, "การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา", การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (กุมภาพันธ์ 2540), หน้า 362-368.

36. Huang, Yinn-Nien , “Spatial Correlation of the Ionospheric Total Electron Content at the Equatorial Anomaly Crest”, Journal of Geophysical Research, v.89, no.a11, Nov 1, (1984): 9823-9827.
37. Kan Laopipattana, Nipha Leelaruji, Narong Hemmakorn, K. Igarashi, “The Variability of Total Ionospheric Electron Content in Thailand”, 1997 Thailand Japan Symposium on Antenna and Propagation (TJSAP’97), Bangkok Thailand, (1997): 97-102.
38. Brown, Lincoln D., Robert E. Daniell, Jr., Matthew W. Fox, John A. Klobuchar and Patricia H. Doherty, “Evaluation of Six Ionospheric Model as Predictors of Total Electron Content”, Radio Science, Vol.26, No.4, (Jul.-Aug. 1991): 1007-1015.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. “การวัดการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ดาวเทียม GPS”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, ชลบุรี, (2538), หน้า 290-295.
2. “การศึกษาการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมย่าน Ku”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, ชลบุรี, (2538), หน้า 286-289.
3. “ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันแบบครึ่งคาบที่พบในสัญญาณดาวเทียม”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19, ขอนแก่น, (2539), หน้า CM29-32.
4. “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา”, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (กุมภาพันธ์ 2540), หน้า 362-368.
5. “The Variability of Total Ionospheric Electron Content in Thailand”, 1997 Thailand Japan Symposium on Antenna and Propagation (TJSAP'97), Bangkok Thailand, (May 1997) : 97-102.
6. “Ionospheric Electron Content Variation in Thailand”, Proceedings of 1997 International Symposium on Radio Propagation (ISRP'97), Qingdao China, (Aug. 1997) : 259-262.
7. “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, กรุงเทพฯ (2540).

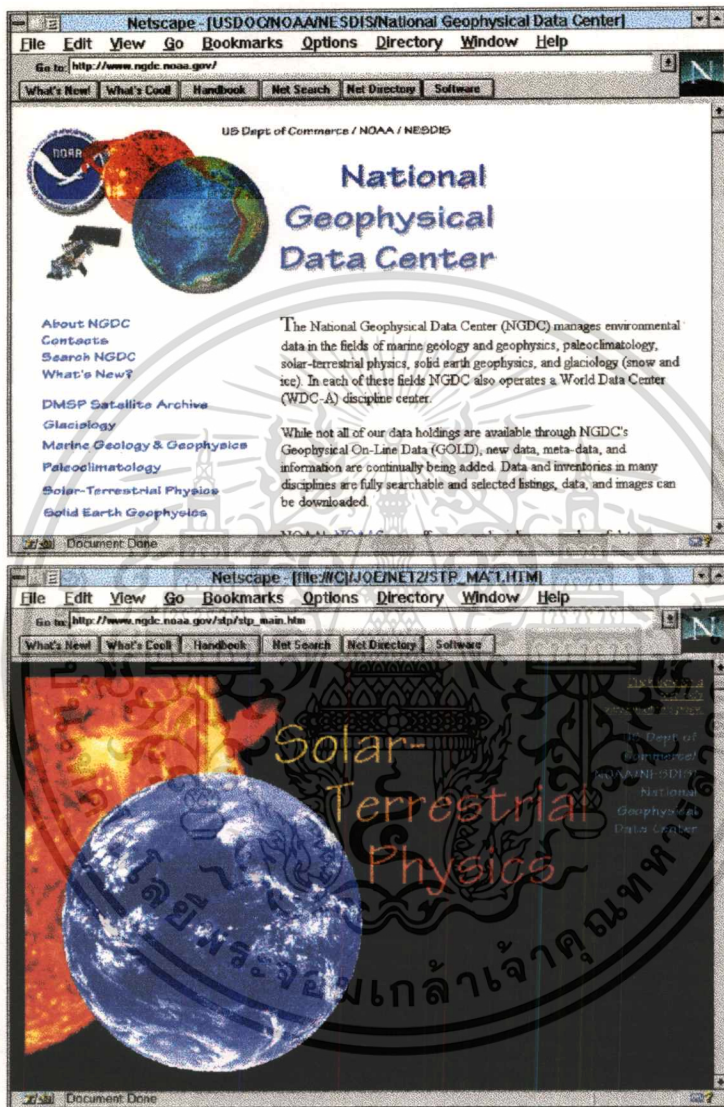


ภาคผนวก ข.
รายชื่อเว็บไซต์เกี่ยวกับการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
และดาวเทียม GPS ที่น่าสนใจ

1. National Geophysical Data Center

http://www.ngdc.noaa.gov

ภาพที่ 84



แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ National Geophysical Data Center

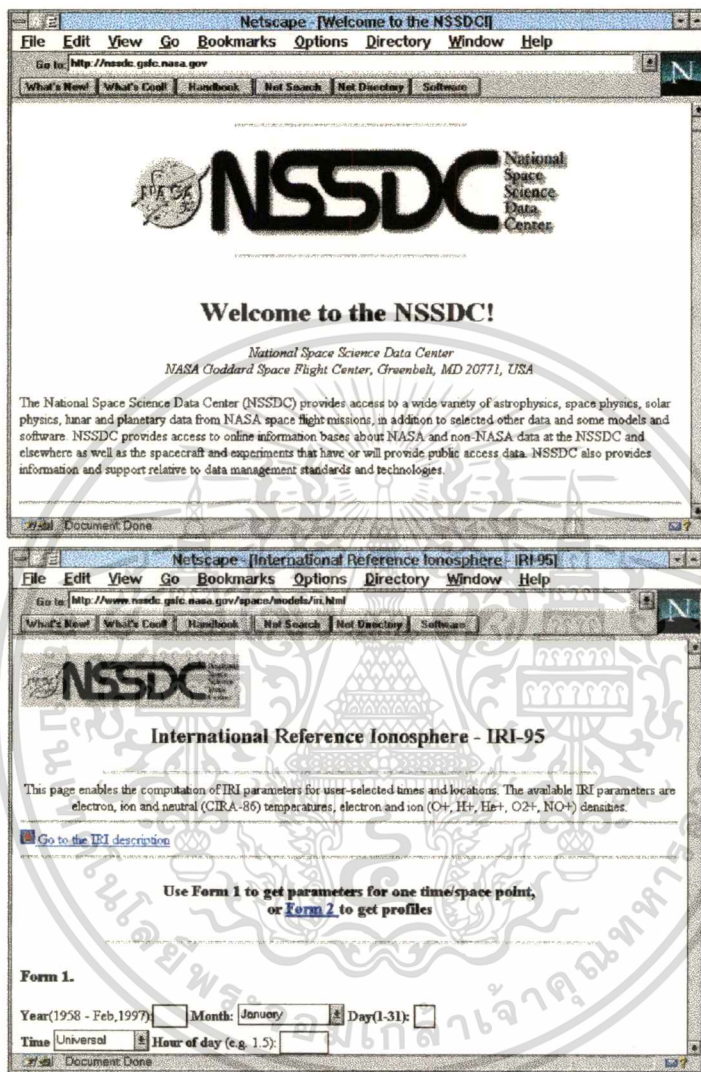
เว็บไซต์ของหน่วยงาน National Geophysical Data Center (NGDC) ซึ่งเป็นหน่วยงานของ NOAA จะจัดการข้อมูลทางสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับภูมิศาสตร์ทางทะเลและทางธรณีวิทยา รวมถึงทางด้าน Solar Terrestrial Physics ซึ่งจะมีข้อมูลต่าง ๆ ทางด้านข้อมูลสนามแม่เหล็กโลกและชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วย ซึ่งส่วนที่น่าสนใจก็จะประกอบด้วยแบบจำลองของความหนาแน่นปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และดัชนีของจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Solar Sunspot Index) ซึ่งจะแสดงปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือนตั้งแต่ ค.ศ. 1957

นอกจากนี้เว็บไซต์นี้ยังมีข้อมูลเกี่ยวกับกิจกรรมของดวงอาทิตย์ เช่น การปล่อยมวลโคโรนา (CME) และการลุกจ้า (Solar Flare) ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสารและระบบนำทางได้ นอกจากนี้ยังมีข้อมูลเกี่ยวกับกิจกรรมของดวงจันทร์ เช่น การปล่อยมวลโคโรนา (CME) และการลุกจ้า (Solar Flare) ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสารและระบบนำทางได้

2. National Space Science Data Center

http://nssdc.gsfc.nasa.gov

ภาพที่ 85



แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ National Space Science Data Center

หน่วยงาน National Space Science Data Center เป็นหน่วยงานของ NASA Goddard Space Flight (GSFC) เป็นหน่วยงานที่จัดเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับฟิสิกส์ทางด้านดาราศาสตร์ต่าง ๆ ฟิสิกส์ทางด้านอวกาศ, ดวงอาทิตย์, ดวงจันทร์ และดาวเคราะห์ต่าง ๆ ให้องค์การ NASA และบุคคลทั่วไป รวมถึงข้อมูลอื่น ๆ และแบบจำลองต่าง ๆ และซอฟต์แวร์ต่าง ๆ และยังจัดเตรียมข้อมูลที่สนับสนุนเกี่ยวกับทางด้านเทคโนโลยีอีกด้วย ซึ่งส่วนที่น่าสนใจคือโครงสร้างทั่วไปของแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบต่าง ๆ รวมถึงแบบจำลอง IRI-95 แบบ Online จะทำได้โดยใส่ค่าตัวแปรที่ต้องการลงไปเช่น เวลา เดือน ปี หรือตำแหน่งพิกัด ซึ่งเลือกได้ทั้งพิกัดภูมิศาสตร์และพิกัดแม่เหล็ก ก็จะได้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนออกมา

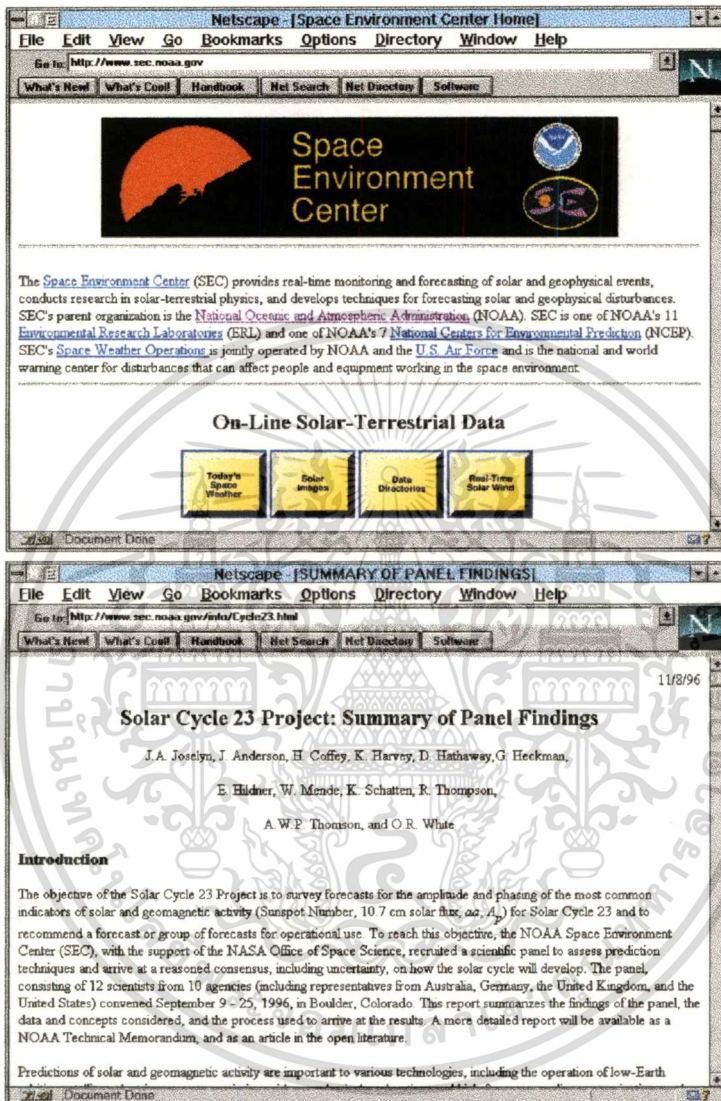
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. NOAA Space Environment Center

http://www.sec.noaa.gov

ภาพที่ 86



แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ NOAA Space Environment Center

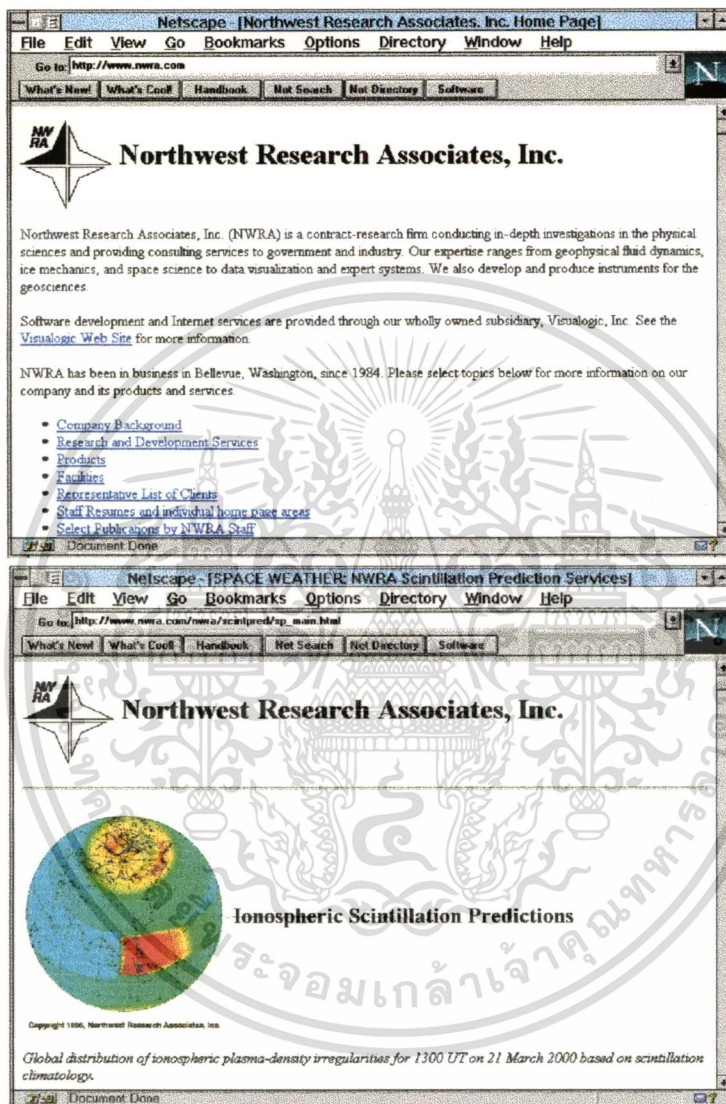
Space Environment Center เป็นหน่วยงานของ NOAA ซึ่ง SEC เป็น 1 ใน 11 ของ Environmental Research Laboratory (ERL) และ 1 ใน 7 หน่วยงาน National Center Environmental Prediction (NCEP) ของ NOAA ส่วนเว็บไซต์ของ Space Environment Center (SEC) นั้นจะเกี่ยวกับการแสดงข้อมูลแบบ Real-time และทำนายเหตุการณ์ทางด้านดวงอาทิตย์และธรณีวิทยาและข้อมูลวิจัยทางด้าน Solar Terrestrial Physics และพัฒนาเทคนิคของการทำนายและการรบกวนของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะมีโฮมเพจเกี่ยวกับการศึกษาและการทำนายจุดดับบนดวงอาทิตย์ในวัฏจักรสุริยะที่ 23 (ประมาณ ค.ศ. 1997-2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Northwest Research Associates, Inc.

<http://www.nwra.com>

ภาพที่ 87



แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ Northwest Research Associates, Inc.

Northwest Research Associates, Inc. (NWRA) เป็นบริษัทที่วิจัยทางด้านการศึกษาในสายงานทางด้านฟิสิกส์และให้บริการทางการให้คำปรึกษาแก่รัฐบาลสหรัฐและอุตสาหกรรมทั่วไป และมีความชำนาญทางด้าน Geophysical fluid dynamics และ Space science และมีการพัฒนาทางด้านผลิตภัณฑ์สำหรับทางธรณีวิทยาอีกด้วย ส่วนไฮมเพจที่น่าสนใจจะเกี่ยวกับการทำนายลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในส่วนต่าง ๆ ของโลก เช่น แถบละติจูดกลาง ย่านเส้นศูนย์สูตร และขั้วโลก

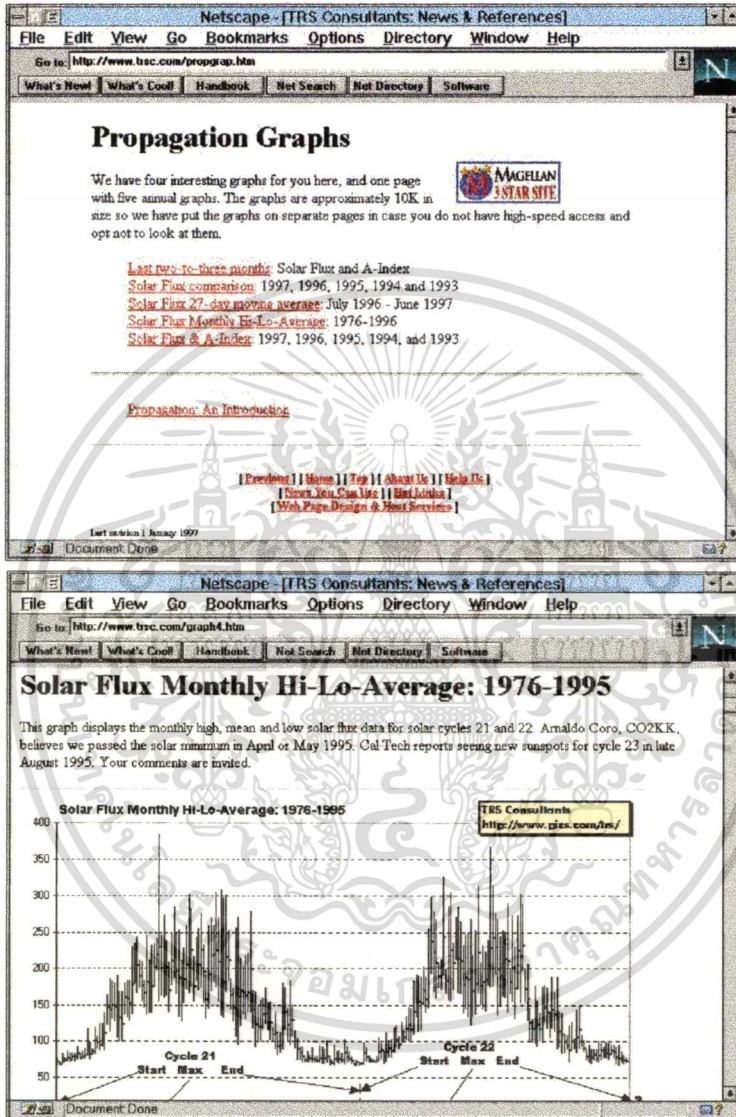
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่วารณี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. TRS Consultant

<http://www.trsc.com> หรือ <http://www.pics.com/trs>

ภาพที่ 88



แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ TRS Consultant

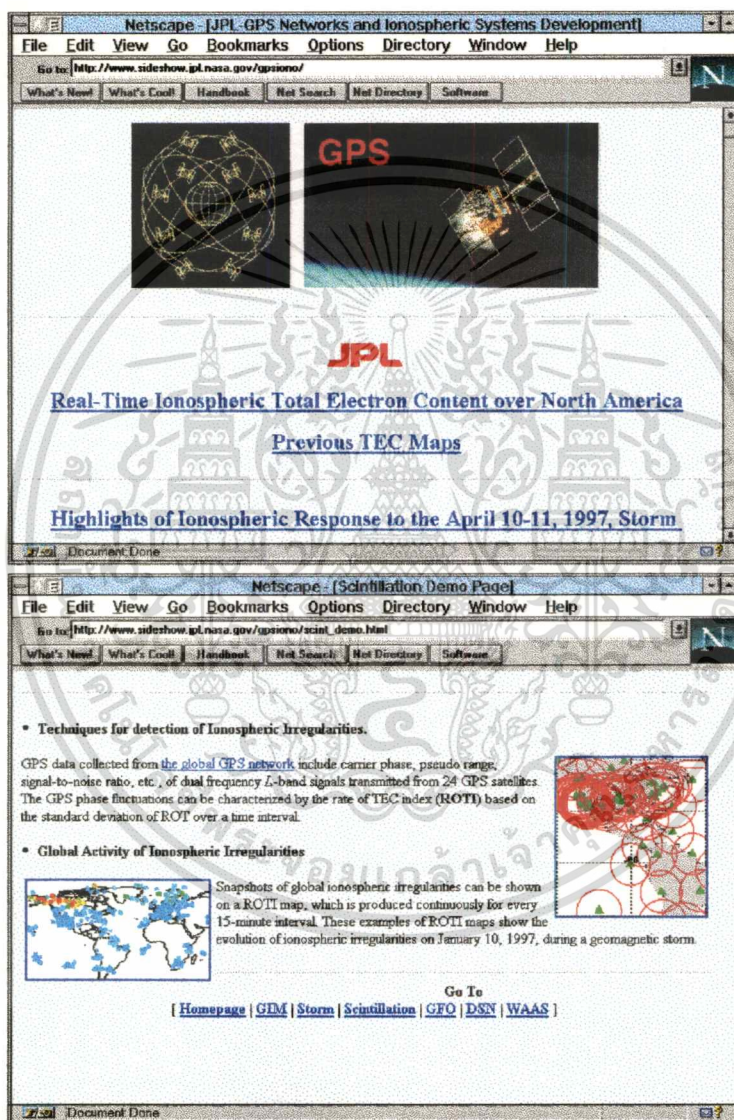
TRS Consultant เป็นบริษัทที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการส่งสัญญาณวิทยุทั้งคลื่นยาวและคลื่นสั้น รวมถึงย่าน VHF ย่านความถี่โทรทัศน์ ย่านความถี่ดาวเทียม ย่านความถี่วิทยุสมัครเล่น และอื่น ๆ ส่วนไฮมเพจที่น่าสนใจของ TRS Consultant จะเกี่ยวข้องกับค่า Solar flux จากดวงอาทิตย์ ซึ่งมีการเก็บข้อมูลมาตั้งแต่ ค.ศ. 1976 ซึ่งอยู่ในวัฏจักรสุริยะที่ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Jet Propulsion Laboratory - GPS Network and Ionospheric Systems Development (JPL)

<http://www.sideshow.jpl.nasa.gov/gpsiono/>

ภาพที่ 89



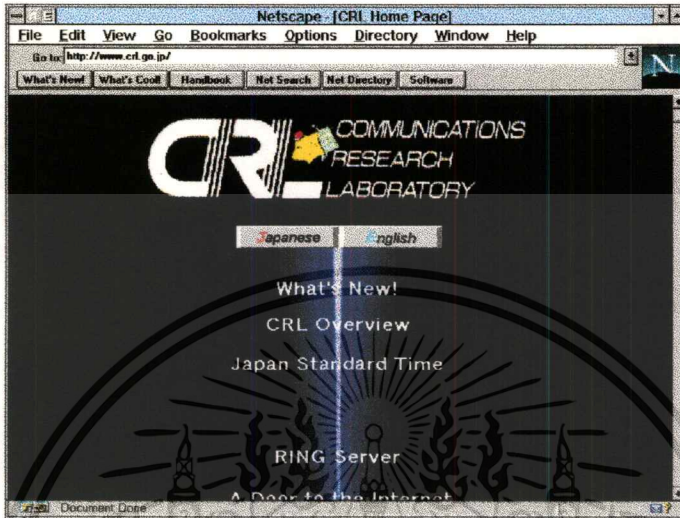
แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ JPL

Jet Propulsion Laboratory (JPL) เป็นหน่วยงานในองค์การ NASA ซึ่งจะมีส่วนงานการศึกษาทางด้านการพัฒนารูปแบบคุณสมบัติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้สัญญาณดาวเทียม GPS ซึ่งไฮเมพที่นำเสนอคือการศึกษากลับเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม GPS ซึ่งมีการวางโครงข่ายในการศึกษาทั่วประเทศสหรัฐอเมริกา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Communications Research Laboratory Japan <http://www.crl.go.jp>

ภาพที่ 90



(ก) แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ CRL



(ข) แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ของ Hiraiso Solar Terrestrial Research Center

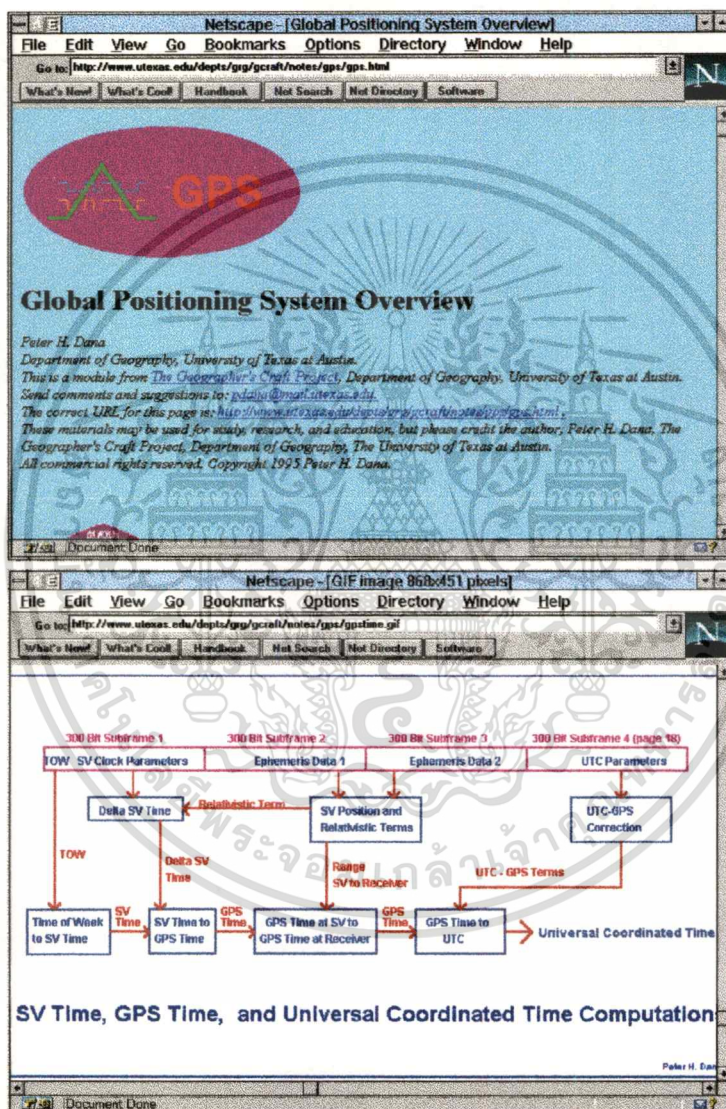
Communications Research Laboratory (CRL) อยู่ในหน่วยงาน Ministry of Post and Telecommunications ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งจะทำการวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารในทุก ๆ ด้านรวมถึงการพัฒนาการแพร่กระจายคลื่นในชั้นบรรยากาศ ซึ่งโฮมเพจที่น่าสนใจก็มีโฮมเพจของ Hiraiso Solar Terrestrial Research Center (<http://hiraiso.crl.go.jp>) ซึ่งจะมีข้อมูลเกี่ยวกับ Space environment และข้อมูลความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่วัดโดย World Data Center (WDC) C-2 รวมอยู่ด้วย

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. GPS Overview (University of Texas)

<http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/gps/gps.html>

ภาพที่ 91



แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ GPS ของมหาวิทยาลัย TEXAS

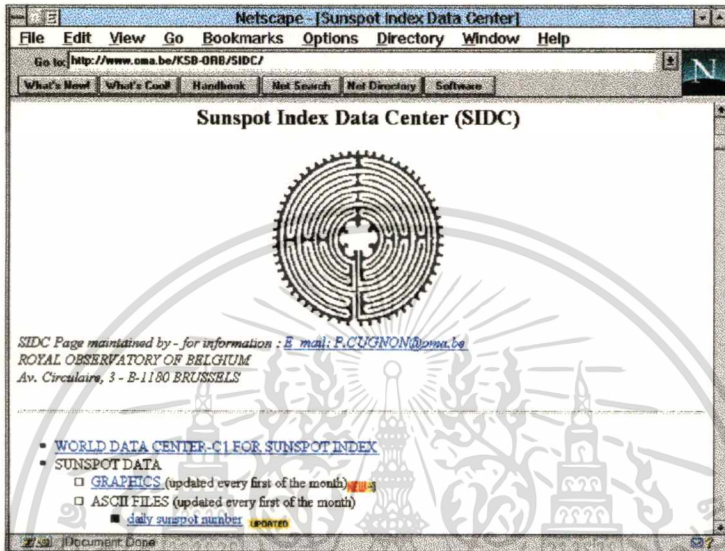
เว็บไซต์ GPS ของมหาวิทยาลัย TEXAS เป็นเว็บไซต์ที่แสดงข้อมูลส่วนที่น่าสนใจเกี่ยวกับดาวเทียม GPS ซึ่งจะแสดงข้อมูลทางด้านส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบดาวเทียม GPS รูปแบบการใช้งาน ลักษณะรูปแบบของสัญญาณ GPS ข้อมูลแบบต่าง ๆ ของ GPS รวมถึงระบบต่าง ๆ ที่พัฒนาเพื่อความก้าวหน้าและความถูกต้องแม่นยำในการบอกตำแหน่งพิกัด และอื่น ๆ อีกมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขข้อนี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Sunspot Index Data Center (Belgium)

http://www.oma.be/KSB-ORB/SIDC/

ภาพที่ 92



แสดงรูปตัวอย่างเว็บไซต์ Sunspot Index Data Center (SIDC)

SIDC อยู่ในหน่วยงาน Royal Observatory of Belgium ซึ่งเป็นหน่วยงานย่อยของ Observatory Meteorology Aeronomy เป็นหน่วยงานที่เกี่ยวกับการศึกษาทางภูมิศาสตร์ของโลก รวมถึงทางด้านจุดดับบนดวงอาทิตย์ที่อยู่ในหน่วยงาน SIDC ด้วย

ภาคผนวก ค.
โปรแกรม AVG.PAS

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาปาสคาล สำหรับหาค่าเฉลี่ยของค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์และค่า
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลทุก ๆ 15 นาที

```

Program AverageTEC; { Program Average Data of TEC and Standard }
Uses crt;           { Deviation of TEC Data for 1 Day in Range }
                   { 15 Minute }
Var
  SourceFile : text; { The Source Parameter }
  SourceLine : string[80];
  mjd1 : string[4];
  hh1 : string[2];
  mm1 : string[2];
  ss1 : string[2];
  num1 : string[2];
  ell : string[2];
  az1 : string[3];
  v1s : string[5];
  v2s : string[4];
  tec1 : string[5];
  std1 : string[3];

  AverFile : text; { The Destination Parameter }
  AverLine : string[80];
  mjd2 : string[6];
  hh2 : string[2];
  mm2 : string[2];
  ave2 : string[8];
  stdev2: string[7];
  pstd2 : string[5];

  elev1 : string[2];
  savename : string[12];
  SourceTec : string[12];

  elev, count, code, i, num, std, hour,
  el, hh, mm, mjd, min, codemjd, linenum : integer;

  tec, v1, v2 : longint;

  ave, stdev, pstd,
  temptec, sqrtec, sqtec, vertec,
  TECmax, TECmin, SDmax, SDmin : real;

  hhTECmax, mmTECmax, hhTECmin, mmTECmin,
  hhSDmax, mmSDmax, hhSDmin, mmSDmin : integer;

  hhTECmax2, mmTECmax2, hhTECmin2, mmTECmin2,
  hhSDmax2, mmSDmax2, hhSDmin2, mmSDmin2 : string[2];
  TECmax2, TECmin2 : string[8];
  SDmax2, SDmin2 : string[5];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Begin

```

writeln;

writeln(' === PROGRAM AVERAGE VERTICAL TEC : Range 15 min
===');
writeln(' === Program Design by KAN LAOPIPATTANA KMITL
===');
writeln;

write(' Input name of Source TEC file : ');
readln(SourceTec);
assign(SourceFile,SourceTec);      { Open Source File }
reset(SourceFile);

write(' Save average vertical TEC file : ');
i:=1;
repeat
SaveName:=SaveName+SourceTec[i];
i:=i+1
until SourceTec[i]= '.' ;
SaveName:=SaveName+'.AVG';
writeln(SaveName);                { Save Name Destination File }

assign(AverFile,savename);        { Open Destination File }
rewrite(AverFile);
writeln(AverFile,' MJD      TIME      AvgTEC      SD ;el>=45');
writeln(AverFile,'          hh:mm      10^15      % ');

temptec:=0; count:=0; sqtec:=0;
repeat
readln(SourceFile,SourceLine);
mjd1 := SourceLine[4] +SourceLine[5]+
SourceLine[6] +SourceLine[7];
hh1  := SourceLine[9] +SourceLine[10];
mm1  := SourceLine[12]+SourceLine[13];
num1 := SourceLine[20]+SourceLine[21];
el1  := SourceLine[24]+SourceLine[25];
v1s  := SourceLine[37] +SourceLine[38]+
SourceLine[39] +SourceLine[40]+SourceLine[41];
v2s  := SourceLine[43] +SourceLine[44]+
SourceLine[45] +SourceLine[46];
tec1 := SourceLine[52]+SourceLine[53]+SourceLine[54]+
SourceLine[55]+SourceLine[56];
std1 := SourceLine[59]+SourceLine[60]+SourceLine[61];
val(hh1,hh,code);
val(mm1,mm,code);
val(mjd1,mjd,codemjd);
until codemjd=0;
linenum := 0;
hour    := 0;
min     := 0;

while not eof(SourceFile) do
begin

while (mm >= min*15)and(mm < (min+1)*15)and(not
eof(SourceFile))
and (hh=hour) do
begin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    val (e1, el, code);
    val (num1, num, code);
    val (v1s, v1, code);
    val (v2s, v2, code);
    val (std1, std, code);
    val (tec1, tec, code);
    if (el >= 45) and (num >= 10) and (std < 100) and (tec > 10) and
        (v1 >= 500) and (v2 >= 500)
    then
    begin
        val (tec1, tec, code);
        vertec := tec / (1 + (2 / 729000 * (96 - el) * (96 - el) *
            (96 - el)));
        temptec := temptec + vertec;
        sqtec := sqtec + sqr (vertec);
        count := count + 1;
        hour := hh;
    end; {if}

    readln (SourceFile, SourceLine);
    mjd1 := SourceLine[4] + SourceLine[5] +
        SourceLine[6] + SourceLine[7];
    hh1 := SourceLine[9] + SourceLine[10];
    mm1 := SourceLine[12] + SourceLine[13];
    num1 := SourceLine[20] + SourceLine[21];
    e1 := SourceLine[24] + SourceLine[25];
    az1 := SourceLine[27] + SourceLine[28] + SourceLine[29];
    v1s := SourceLine[37] + SourceLine[38] +
        SourceLine[39] + SourceLine[40] + SourceLine[41];
    v2s := SourceLine[43] + SourceLine[44] +
        SourceLine[45] + SourceLine[46];
    tec1 := SourceLine[52] + SourceLine[53] + SourceLine[54] +
        SourceLine[55] + SourceLine[56];
    std1 := SourceLine[59] + SourceLine[60] + SourceLine[61];
    val (hh1, hh, code);
    val (mm1, mm, code);
    val (mjd1, mjd, code);

end; {while}

if eof (SourceFile) then
begin
    val (e1, el, code);
    val (num1, num, code);
    val (v1s, v1, code);
    val (v2s, v2, code);
    val (std1, std, code);
    val (tec1, tec, code);
    if (el >= 45) and (num >= 10) and (std < 100) and (tec > 10) and
        (v1 >= 500) and (v2 >= 500)
    then
    begin
        val (tec1, tec, code);
        vertec := tec / (1 + (2 * (96 - el) * (96 - el) * (96 - el)
            / 729000));
        temptec := temptec + vertec;
        sqtec := sqtec + sqr (vertec);
        count := count + 1;
        hour := hh;
    end {if}
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if count<=1 then ave:=0      { Determine the Average and SD }
else
  begin
    ave := temptec/count;
    stdev:= sqrt((count*sqtec-sqr(temptec))/(count*
      (count-1)));
    pstd := 100*stdev/ave;
    linenum:=linenum+1
  end;

str(ave:8:4,ave2);
str(stdev:7:3,stdev2);
str(pstd:5:2,pstd2);
if ave=0 then
  begin
    ave2 :='          ';
    stdev2:= '        ';
    pstd2 :='         ';
  end;
str(hour:2,hh2);
str(min*15:2,mm2);
str(mjd:6,mjd2);
Averline:=mjd2+' '+hh2+' ':'+mm2+' '+ave2+' '+pstd2;
writeln(AverFile,averline) ;

if linenum=1 { Get Maximum and Minimum }
then
  begin
    TECmax := ave ;
    TECmin := ave ;
    SDmax := pstd ;
    SDmin := pstd ;
  end
else
  begin
    if ave>TECmax then
      begin
        TECmax:=ave;
        hhTECmax:=hour;
        mmTECmax:=min*15
      end;
    if (ave<TECmin)and(ave<>0) then
      begin
        TECmin:=ave;
        hhTECmin:=hour;
        mmTECmin:=min*15
      end;
    if pstd>SDmax then
      begin
        SDmax:=pstd;
        hhSDmax:=hour;
        mmSDmax:=min*15
      end;
    if pstd<SDmin then
      begin
        SDmin:=pstd;
        hhSDmin:=hour;
        mmSDmin:=min*15
      end;
  end;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

min:=min+1;
if min=4 then
  begin
  min:=0;
  hour:=hour+1
  end;

temptec:=0; count:=0; sqtec:=0;

end; {while not eof}

hour := hh;
min := (mm div 15) +1 ;

if min=4 then
  begin
  min:=0;
  hour:=hour+1
  end;

if (hour<23) or ((hour=23)and(min<4)) then
begin
  repeat
    str(hour:2, hh2);
    str(min*15:2, mm2);
    Averline:=mjd2+' '+hh2+' ':'+mm2;
    writeln(AverFile, averline) ;
    min:=min+1;
    if min=4 then
      begin
        min:=0;
        hour:=hour+1
      end;
    until (hour=24)
  end;

  writeln(Averfile, ' '); { Write Average and SD into File}
  Averline:=' MJD '+mjd2;
  writeln(AverFile, averline) ;

  str(TECmax:8:4, TECmax2); { Write Max and Min into File }
  str(hhTECmax:2, hhTECmax2);
  str(mmTECmax:2, mmTECmax2);
  Averline:='TECmax '+hhTECmax2+' ':'+mmTECmax2+' '+TECmax2;
  writeln(AverFile, averline) ;

  str(TECmin:8:4, TECmin2);
  str(hhTECmin:2, hhTECmin2);
  str(mmTECmin:2, mmTECmin2);
  Averline:='TECmin '+hhTECmin2+' ':'+mmTECmin2+' '+TECmin2;
  writeln(AverFile, averline) ;

  str(SDmax:5:2, SDmax2);
  str(hhSDmax:2, hhSDmax2);
  str(mmSDmax:2, mmSDmax2);
  Averline:='SDmax '+hhSDmax2+' ':'+mmSDmax2+' '+SDmax2;
  writeln(AverFile, averline) ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

str(SDmin:5:2,SDmin2);
str(hhSDmin:2,hhSDmin2);
str(mmSDmin:2,mmSDmin2);
Averline:='SDmin '+hhSDmin2+' ':'+mmSDmin2+' '+SDmin2;
writeln(AverFile,averline) ;

```

```
close(AverFile)
```

End.

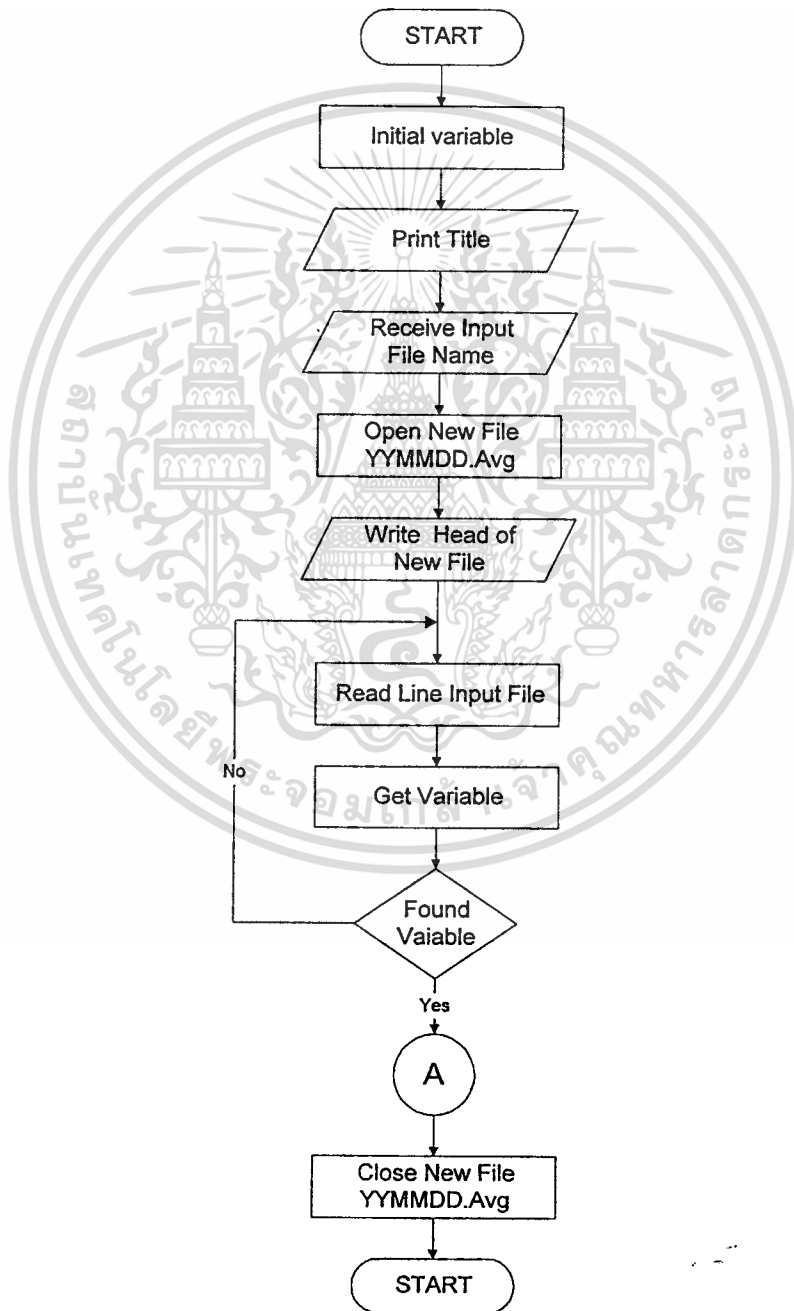


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
 ไหลชาร์ทของโปรแกรม AVG.PAS

ไหลชาร์ทของโปรแกรม AVG.PAS แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 93

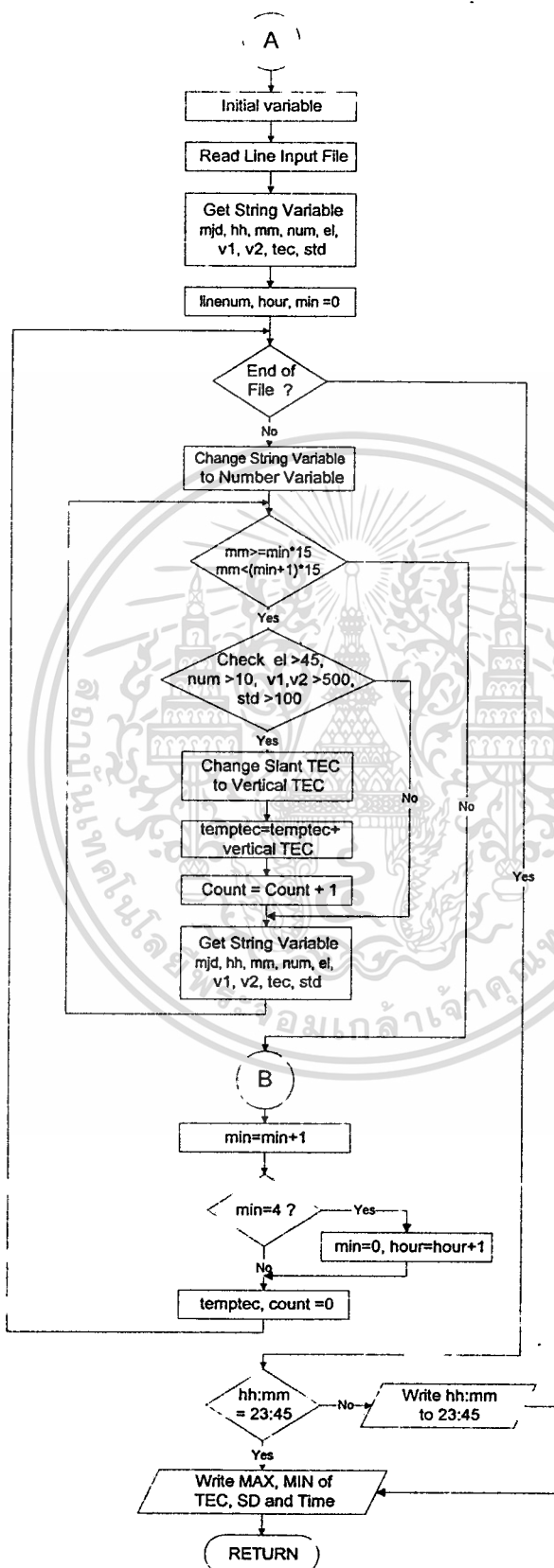
แผนภูมิที่ 93



(ก) แสดงไหลชาร์ทของโปรแกรม AVG.PAS

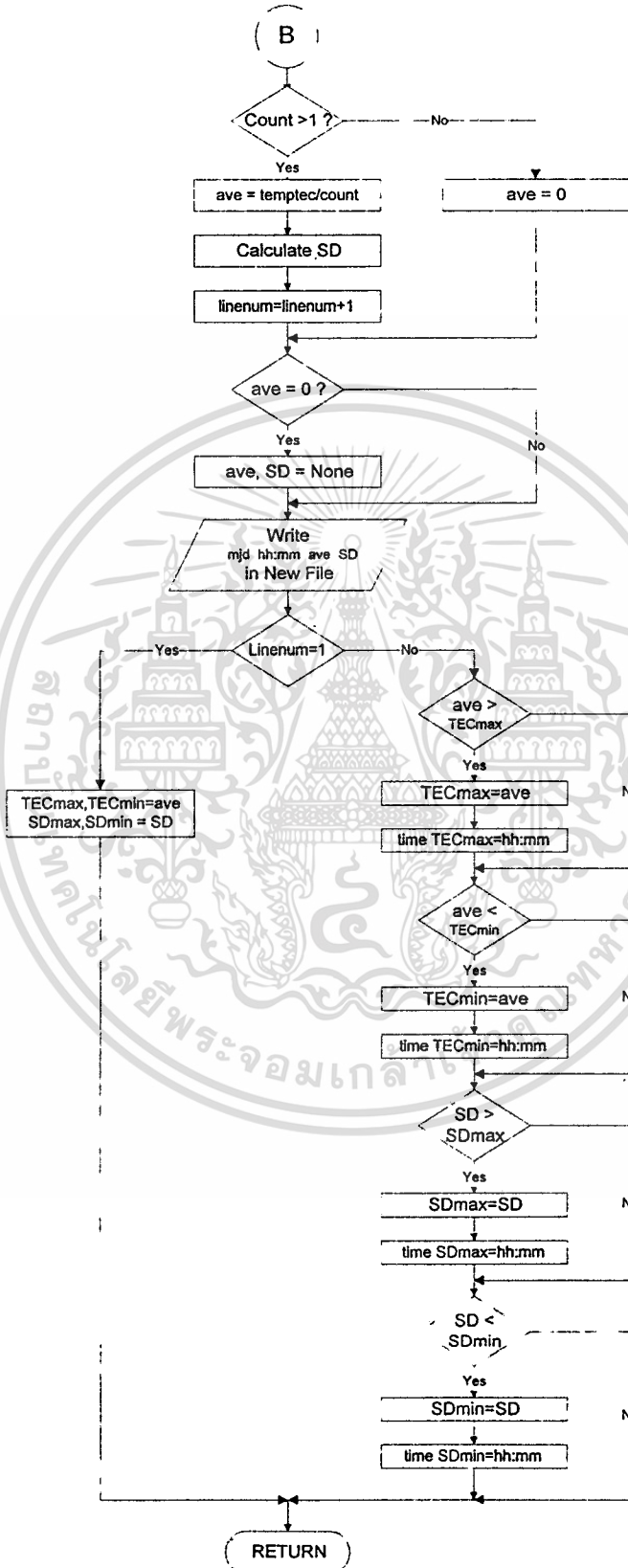
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิที่ 93 (ต่อ)



(ข) แสดงไฟลวซารทของสวนยอย A ของโปรแกรม AVG.PAS

แผนภูมิที่ 93 (ต่อ)



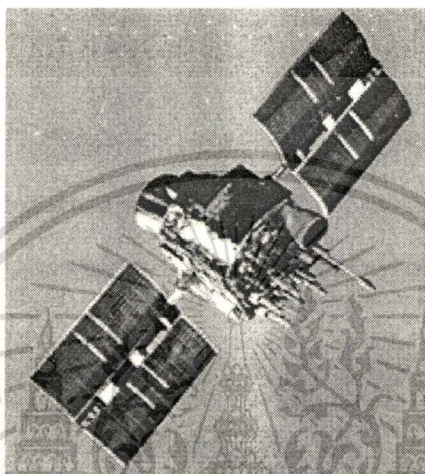
(ค) แสดงไฟลวซารทของสวนยอย B ของโปรแกรม AVG.PAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.
รายละเอียดของคุณสมบัติของดาวเทียม GPS

GPS บล็อก 1

ภาพที่ 94

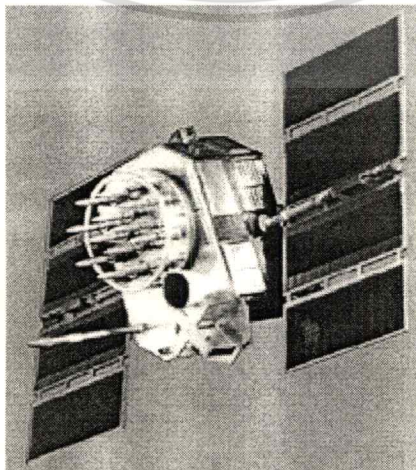


แสดงรูปดาวเทียม GPS บล็อก 1

เป้าหมาย	เป็นดาวเทียมที่เป็นระบบ Demonstration เพื่อทดสอบระบบการทำงาน	
ประเทศผู้ผลิต	สหรัฐอเมริกา	
ผู้ใช้งาน	USAF	
วันที่ส่งดาวเทียม	1-1	22/2/78
	1-2	13/5/78
	1-3	6/10/78
	1-4	11/12/78
	1-5	9/2/80
	1-6	26/4/80
	1-7	18/12/81
	1-8	14/7/83
	1-9	13/6/84
	1-10	8/9/84
	1-11	9/10/85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงโคจร	วงกลม 20,200 กม., คาบ 12 ชม., มุมเอียง(incline) 63° , 6 ระนาบวงโคจร
ขนาด	5.3 เมตร
น้ำหนัก	445 กิโลกรัม (ในวงโคจร)
อายุการใช้งาน	5 ปี
ผู้ผลิต	Rockwell Space System
ดาวเทียมในระบบ	11 ดวง
ลักษณะระบบดาวเทียม	<ul style="list-style-type: none"> — สมดุลแบบ 3 แกน, nadir pointing ใช้ reaction wheels — แผงเซลล์รับแสงอาทิตย์คู่ ผลิตได้มากกว่า 400 W (EOL) — แบตเตอรี่ NiCd — การติดต่อสำหรับการควบคุมและ Telemetry ใช้ S-band (SGLS) — UHF Cross-link ระหว่างดาวเทียม — ระบบ Hydrazine propulsion
ระบบส่งสัญญาณ	สัญญาณ 2 ความถี่สำหรับการนำร่องย่าน L-band ที่ 1,575.42 MHz (L_1) และ 1,227.60 MHz (L_2)
GPS บล็อก 2 และ 2A	ภาพที่ 95



แสดงรูปดาวเทียม GPS บล็อก II และ IIA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป้าหมาย เป็นดาวเทียมที่เป็นระบบ Operation ส่วนบล็อก 2A คือ รุ่น Advance
กลุ่มดาวเทียมที่สมบูรณ์มี 24 ดวง 6 วงโคจร

ประเทศผู้ผลิต สหรัฐอเมริกา

ผู้ใช้งาน USAF

วันที่ส่งดาวเทียม	2-1	14/2/89	2-13	9/4/92
	2-2	10/6/89	2-14	7/7/92
	2-3	17/8/89	2-15	9/9/92
	2-4	21/10/89	2-16	22/11/92
	2-5	11/12/89	2-17	18/12/92
	2-6	24/1/90	2-18	2/2/93
	2-7	25/3/90	2-19	30/3/93
	2-8	2/8/90	2-20	13/5/93
	2-9	1/10/90	2-21	26/6/93
	2-10	26/11/90	2-22	30/8/93
	2-11	3/7/91	2-23	26/10/93
	2-12	23/2/92	2-24	3/3/94

วงโคจร วงกลม 20,200 กม., คาบ 12 ชม., มุมเอียง(incline) 55° , 6 ระนาบวงโคจร

ขนาด 5.3 เมตร

อายุการใช้งาน 7.5 ปี

ผู้ผลิต Rockwell Space System

ดาวเทียมในระบบ บล็อก 2: 9 ดวง, บล็อก 2A: 15 ดวง

ลักษณะระบบดาวเทียม

- สมดุลแบบ 3 แกน, nadir pointing ใช้ reaction wheels
- แผงเซลล์รับแสงอาทิตย์คู่ 710 W (EOL)
- การติดต่อสำหรับการควบคุมและ Telemetry ใช้ S-band (SGLS)
- UHF Cross-link ระหว่างดาวเทียม
- ระบบ Hydrazine propulsion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบส่งสัญญาณ

- สัญญาณ 2 ความถี่สำหรับการนำร่องย่าน L-band ที่ 1,575.42 MHz (L_1) และ 1,227.60 MHz (L_2)
- ทุกดาวเทียมบรรจุนาฬิกาอะตอม Rubidium 2 เครื่องและ Cesium 2 เครื่อง
- บรรจุนเซนเซอร์สำหรับการตรวจการกระเบิดของนิวเคลียร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายกาญจน์ เหล่าพิพัฒนา
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดพิษณุโลก
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้