

การศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน  
แถบความถี่ C ที่มุมเงยต่ำ

THE STUDY ON CHARACTERISTICS OF C-BAND SCINTILLATION  
AT LOW ELEVATION ANGLE

สมพงษ์ สุกรแก้วถนอม  
SOMPONG SUKKAEWTHANOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-536-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน  
แถบความถี่ C ที่มุมเงยต่ำ

THE STUDY ON CHARACTERISTICS OF C-BAND SCINTILLATION  
AT LOW ELEVATION ANGLE



สมพงษ์ สุกรแก้วถนอม

SOMPONG SUKKAEWTHANOM

เลขหน้.....  
เลขทะเบียน 47544  
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ค. 2546

.b.....  
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-536-7

**THE STUDY ON CHARACTERISTICS OF C-BAND SCINTILLATION  
AT LOW ELEVATION ANGLE**

**SOMPONG SUKKAEWTHANOM**

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

**2003**

**ISBN 974-324-536-7**

**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

-----

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันบนแถบความถี่ C ที่มุมเงยต่ำ  
THE STUDY ON CHARACTERISTICS OF C-BAND SCINTILLATION AT LOW ELEVATION ANGLE

**ชื่อนักศึกษา** นายสมพงษ์ สุกรณ์แก้วถนอม

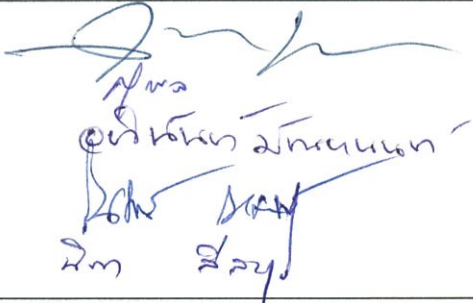
**รหัสประจำตัว** 43061079

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์** รศ.ณรงค์ เหมกรณ์

**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม** รศ.นิภา ลีลารุจิ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาถิพงษ์	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกภาค	
ผศ.อภิวัฒน์	มัธยานนท์	
รศ.ณรงค์	เหมกรณ์	
รศ.นิภา	ลีลารุจิ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 เมษายน 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

  
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๑๑.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๖.....

<b>Thesis Title</b>	The Study on Characteristics of C-Band Scintillation at Low Elevation Angle
<b>Student</b>	Mr.Sompong Sukkaewthanom
<b>Student ID.</b>	43061079
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Narong Hemmakorn
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc.Prof.Nipha Leelaruji

### **ABSTRACT**

This thesis proposes the characteristics of C-band scintillation at low elevation angle. In order to study the characteristics of long-term statistic of scintillation which received and recorded the C-band satellite signal from an INTELSAT satellite above the Pacific Ocean Region (POR) at Si-Racha satellite earth station, by the 32 meters in diameter antenna with 8 degrees of elevation. The analysis included the characteristic, occurrence numbers and signal level fluctuation (diurnal, monthly and seasonal) variations from 2000 to 2002. The short-term amplitude scintillation analysis is presented such as probability density distribution, cumulative distribution and also time-frequency structure of amplitude scintillation using autocorrelation and power spectral density respectively. In addition, it can be applied in the communication system such as scintillation rate, decorrelation distance. Moreover, this research has comparison between ionospheric scintillation and tropospheric scintillation. Finally, the characteristics of scintillation are analyzed and compared with the characteristics of scintillation signal from the India Ocean Region (IOR) at high elevation angle.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 แนวความคิดและขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	7
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจาก ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	8
2.2.2 ความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	10
2.2.2.1 เขตเฟรสเนล.....	14
2.2.2.2 การประมาณของ Rytov.....	18
2.2.3 คุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน อันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	19
2.2.3.1 การขึ้นกับชั้นสโตนัมเบอร์.....	19
2.2.3.2 การขึ้นกับเวลา.....	19
2.2.3.3 การขึ้นกับตำแหน่งบนโลก.....	20
2.2.3.4 การขึ้นกับความถี่.....	20
2.3 ผลกระทบของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	20
2.3.1 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจาก ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2	ดรรรชนีหักเห.....	21
2.3.3	คุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	24
2.3.3.1	การขึ้นกับสภาพอากาศ.....	24
2.3.3.2	การขึ้นกับเวลา.....	25
2.3.3.3	การขึ้นกับตำแหน่งบนโลก.....	25
2.3.3.4	การขึ้นกับความถี่.....	25
2.3.3.5	การขึ้นกับระบบ.....	25
2.4	ดรรรชนีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน และความเข้มของกระบวนการ.....	26
2.4.1	ดรรรชนี SI.....	26
2.4.2	ดรรรชนี S4.....	26
2.5	สรุป.....	28
บทที่ 3	การทดลองและผลการทดลอง.....	30
3.1	การทดลองและอุปกรณ์การทดลอง.....	30
3.2	วิธีการวิเคราะห์.....	34
3.3	ผลการวิเคราะห์.....	38
3.3.1	การวิเคราะห์ข้อมูลจากกระดาษกราฟ.....	38
3.3.1.1	การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล.....	38
3.3.1.2	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในแต่ละเดือน.....	43
3.3.1.3	การเปลี่ยนแปลงตามรายวัน.....	45
3.3.2	การวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิตอล.....	47
3.3.2.1	การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล.....	47
3.3.2.2	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในแต่ละเดือน.....	52
3.3.2.3	การเปลี่ยนแปลงตามรายวัน.....	53
3.4	สรุป.....	56

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในช่วงเวลาสั้น และแบบจำลองการทำนายค่าความเข้ม.....	58
4.1 การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในช่วงเวลาสั้น.....	58
4.1.1 การแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	58
4.1.2 โครงสร้างทางเวลาและความถี่.....	64
4.1.2.1 การวิเคราะห์ฟังก์ชันอัตโนมัติของสัญญาณที่มีการ การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน.....	67
4.1.2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน.....	71
4.1.2.3 การวิเคราะห์อัตราการผลิตแอมพลิจูด อย่างกระทันหัน.....	74
4.1.2.4 การคำนวณระยะคิดออร์เรชันสำหรับสายอากาศ แบบสเปซไคเวอร์ซิติ.....	76
4.2 แบบจำลองการทำนายความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน.....	78
4.3 สรุป.....	81
บทที่ 5 เปรียบเทียบคุณลักษณะของมุมเงยต่ำกับมุมเงยสูง.....	83
5.1 เปรียบเทียบลักษณะโดยทั่วไป.....	83
5.2 เปรียบเทียบลักษณะทางสถิติ.....	85
5.2.1 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล.....	86
5.2.2 การเปลี่ยนแปลงตามรายวัน.....	92
5.3 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเวลาและความถี่.....	95
5.3.1 เปรียบเทียบฟังก์ชันอัตโนมัติของสัญญาณ POR และ IOR.....	95
5.3.2 เปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR และ IOR.....	98
5.4 สรุป.....	101
บทที่ 6 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
6.1 บทสรุปและวิจารณ์.....	102

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยและพัฒนาต่อ.....	104
เอกสารอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก. แผนที่เขตบริการของดาวเทียม INTELSAT 802 และ INTELSAT 904.....	109
ภาคผนวก ข. การหาความยาววิถีระหว่างงานสายอากาศไปยังกลุ่มความ ไม่สม่ำเสมอของอิเล็กทรอนิกส์.....	111
ภาคผนวก ค. การปรับแต่งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม.....	112
ภาคผนวก ง. ผลของการเคลื่อนที่ของ Thermospheric winds ต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างชั้น ไอ ไอ โนสเฟียร์ในช่วงเดือน Equinox และ Solstice.....	115
ภาคผนวก จ. สถิติภูมิอากาศปี 2543-2545.....	118
ภาคผนวก ฉ. บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	131

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแปลงครรชนี $S_4$ กับค่ายอดถึงยอดของการแกว่งขึ้นลงโดยประมาณ.....	28
3.1 คุณลักษณะเฉพาะของการตรวจวัด.....	33
3.2 เปอร์เซนต์เวลาการแกว่งของแอมพลิจูดที่ระดับต่างๆ ในแต่ละเดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2543 ถึงกันยายน 2544.....	45
3.3 เปอร์เซนต์เวลาการแกว่งของแอมพลิจูดที่ระดับต่างๆ ในแต่ละเดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงธันวาคม 2545.....	53
4.1 ค่าทางสถิติของการแจกแจงแบบสะสมของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด อย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR.....	64
4.2 การคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน.....	75
4.3 ระยะเวลาที่รีเซ็ตที่พื้นโลก.....	77
5.1 เปรียบเทียบค่าเวลารวมนับของแต่ละเหตุการณ์.....	98
จ.1 อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	119
จ.2 ความกดบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	120
จ.3 ความดันไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	121
จ.4 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	122
จ.5 ปริมาณฝนทั้งหมดในแต่ละเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	123
จ.6 ปริมาณเมฆในท้องฟ้าเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง..... (ปี 2543 ถึง ปี 2545)	124

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระดับความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันตามความถี่ใช้งาน.....	2
2.1 ผลกระทบในความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์.....	6
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนกับความสูงเหนือผิวโลกในช่วงกลางวันและกลางคืน.....	8
2.3 การแบ่งขอบเขต 3 บริเวณของโลก.....	9
2.4 ละติจูดสนามแม่เหล็กโลก.....	9
2.5 ความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในแต่ละบริเวณ.....	10
2.6 แบบจำลอง 3 มิติของแผ่นม่านของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ.....	11
2.7 ชั้นของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอที่มีขนาด L.....	13
2.8 ลักษณะทางเรขาคณิตของเขตเฟรสเนล.....	14
2.9 เวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันทางแอมพลิจูดและเฟส.....	17
3.1 เครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียม YOKOGAWA 3057 Portable Model : 3057 22 ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 เครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล YOKOGAWA DAQSTATION Model : DX 106-1-2 Style : S4 ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.3 งานสายอากาศเคสซีเกรนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 เมตร รับสัญญาณดาวเทียมจากดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรแปซิฟิก (POR).....	32
3.4 งานสายอากาศเคสซีเกรนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 21 เมตร รับสัญญาณดาวเทียมจากดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรอินเดีย (IOR).....	32
3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบตรวจวัด.....	33
3.6 เปรียบเทียบค่าครรชนี $S_4$ ที่คำนวณด้วยช่วงเวลาการคำนวณที่แตกต่างกัน.....	35
3.7 ตัวอย่างแบบรูปโดยทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน.....	36
(ก) อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ข) อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	
3.8 ตัวอย่างแบบรูปโดยทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล.....	37
(ก) โทรโพสเฟียร์ริก ซินทิลเลชัน (ข) ไอโอโนสเฟียร์ริก ซินทิลเลชัน	
3.9 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้บนกระดาษกราฟ ตลอดช่วงเวลา 14 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544.....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในแต่ละเดือน ที่บ้านที่กได้บนกระดานกราฟ ในช่วงเดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544.....	39
3.11 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจาก ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในรายเดือน ตลอดช่วง 14 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544.....	39
3.12 ครรชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ รายเดือน ตั้งแต่ ปี 2543 ถึง ปี 2545.....	41
(ก) $N_{dry}$ , (ข) $N_{wet}$ และ (ค) $Nu$	
3.13 จำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ โทรโพสเฟียร์ เทียบกับค่าครรชนีหักเห $Nu$ ในรายเดือน ตลอดช่วง 14 เดือน ตั้งแต่ เดือน สิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544.....	42
3.14 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีหักเห $Nu$ ที่มีมากในเวลากลางวัน.....	43
3.15 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณ ในแต่ละระดับแอมพลิจูด peak to peak ในแต่ละเดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544.....	44
3.16 ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน แสดงการเปลี่ยนแปลง ในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน ตลอดทั้ง 14 เดือน (สิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544).....	46
(ก) ภาพ 3 มิติ (ข) คอนทัวร์	
3.17 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิตอล ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	48
3.18 แผนภูมิของระดับค่าครรชนี $S_4$ ของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึก สัญญาณดาวเทียมแบบดิจิตอลในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	48
3.19 แผนภูมิของระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้ จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิตอลในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด อย่างกะทันหัน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	49
3.20 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันทั้งหมดในแต่ละเดือน ที่บ้านที่กได้จากเครื่องวัดสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิตอล ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในรายเดือน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	51
3.22 จำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เทียบกับค่าครรชนีหักเห $N_u$ ในรายเดือน ตลอดช่วง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	51
3.23 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณที่แต่ละระดับแอมพลิจูด peak to peak ในแต่ละเดือน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	52
3.24 ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน แสดงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน ตลอดทั้ง 12 เดือน (มกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545).....	54
(ก) ภาพ 3 มิติ (ข) คอนทัวร์	
3.25 ค่าเฉลี่ยของครรชนี $S_4$ แสดงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน ตลอดทั้ง 12 เดือน (มกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545).....	55
(ก) ภาพ 3 มิติ (ข) คอนทัวร์	
4.1 เปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นระหว่างข้อมูลสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน กับการแจกแจงแบบเกาส์ และการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ $m$ จำนวน 6 เหตุการณ์.....	61
(ก) 1/04/45 13.00-13.09 น. (ข) 1/04/45 19.00-19.09 น. (ค) 1/04/45 20.20-20.29 น. (ง) 17/03/45 22.00-22.09 น. (จ) 25/09/45 19.00-19.09 น. (ง) 30/12/45 21.20-21.29 น.	
4.2 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมระหว่างข้อมูลสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน กับการแจกแจงแบบเกาส์ และการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ $m$ จำนวน 6 เหตุการณ์.....	62
(ก) 1/04/45 13.00-13.09 น. (ข) 1/04/45 19.00-19.09 น. (ค) 1/04/45 20.20-20.29 น. (ง) 17/03/45 22.00-22.09 น. (จ) 25/09/45 19.00-19.09 น. (ง) 30/12/45 21.20-21.29 น.	
4.3 กราฟอัตราสัมพันธ์ของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และ โทรโพสเฟียร์.....	68

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟอัตราสัมพัทธ์ของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่าง กะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จำนวน 3 เหตุการณ์ ใน 3 เดือน.....	68
4.5 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่าครรชนี $S_4$ เทียบกับค่าเวลาร่วมนัย $\tau$ .....	69
4.6 กราฟตัวอย่างค่าเวลาร่วมนัย $\tau$ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	70
(ก) 11 มีนาคม 2545 (ข) 4 เมษายน 2545	
4.7 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง แอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	72
4.8 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง แอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	72
4.9 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด อย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เทียบกับ ไอโอโนสเฟียร์.....	73
(ก) เหตุการณ์เกิดวันเดียวกัน (ข) เหตุการณ์เกิดต่างเดือนกัน	
4.10 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน.....	76
4.11 ค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ( $\sigma_x$ ) ของสัญญาณ ดาวเทียม POR ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ITU-R ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง ธันวาคม 2545.....	80
4.12 ค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ( $\sigma_x$ ) ของสัญญาณ ดาวเทียม IOR ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ITU-R ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545.....	80
5.1 ตัวอย่างลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณดาวเทียม POR และ IOR ที่บันทึกได้.....	84
(ก) เวลา 18.00 ถึง 22.30 น. (ข) เวลา 22.30 ถึง 03.00 น.	
5.2 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	87
5.3 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	87
5.4 แผนภูมิของระดับค่าครรชนี $S_4$ ของสัญญาณดาวเทียม IOR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 แผนภูมิของระดับค่าดัชนี $S_4$ ของสัญญาณดาวเทียม POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	88
5.6 แผนภูมิของระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดาวเทียม IOR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	89
5.7 แผนภูมิของระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดาวเทียม POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545.....	89
5.8 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันทั้งหมด ในแต่ละเดือน ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545.....	90
5.9 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจาก ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทั้งหมด ในแต่ละเดือน ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545.....	91
5.10 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจาก ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งหมด ในแต่ละเดือน ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545.....	91
5.11 คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละเดือน ตลอด 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545.....	93
(ก) IOR มุมเงย $40^\circ$ (ข) POR มุมเงย $8^\circ$	
5.12 คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยของดัชนี $S_4$ ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละเดือน ตลอด 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545.....	94
(ก) IOR มุมเงย $40^\circ$ (ข) POR มุมเงย $8^\circ$	
5.13 เปรียบเทียบกราฟอัตราสัมพัทธ์ของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	96
(ก) 25 พฤศจิกายน 2545 11.50-11.59 น. (ข) 7 ธันวาคม 2545 12.40-12.49 น.	
5.14 เปรียบเทียบกราฟอัตราสัมพัทธ์ของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	97
(ก) 24 กันยายน 2545 21.20-21.29 น. (ข) 25 สิงหาคม 2545 21.50-21.59 น.	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 เปรียบเทียบกราฟความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์.....	99
(ก) 25 พฤศจิกายน 2545 11.50-11.59 น. (ข) 7 ธันวาคม 2545 12.40-12.49 น.	
5.16 เปรียบเทียบกราฟความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	100
(ก) 24 กันยายน 2545 21.20-21.29 น. (ข) 25 สิงหาคม 2545 21.50-21.59 น.	
ข.1 ตำแหน่งดาวเทียมและความยาววิถีจากงานสายอากาศไปยังกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ.....	111
ค.1 บล็อกไดอะแกรมการปรับแต่งของระบบ.....	112
ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของระดับสัญญาณกับระดับไฟฟ้ากระแสตรงของสัญญาณดาวเทียม POR (มุมเงยต่ำ 8°).....	113
ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของระดับสัญญาณกับระดับไฟฟ้ากระแสตรงของสัญญาณดาวเทียม IOR (มุมเงยสูง 40°).....	113
ง.1 ผังการเคลื่อนที่ของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ในช่วงเดือน Solstice.....	115
ง.2 การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มพลาสมาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ในช่วงเดือน Solstice (เดือนมิถุนายนและธันวาคมของทุกปี).....	116
ง.3 การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มพลาสมาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ในช่วงเดือน Equinox (เดือนมีนาคมและกันยายนของทุกปี).....	116
จ.1 อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	119
จ.2 ความกดบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	120
จ.3 ความดันไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	121
จ.4 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	122
จ.5 ปริมาณฝนทั้งหมดในแต่ละเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545).....	123
จ.6 ปริมาณเมฆในท้องฟ้าเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง.....	124
(ปี 2543 ถึง ปี 2545)	

# บทที่ 1

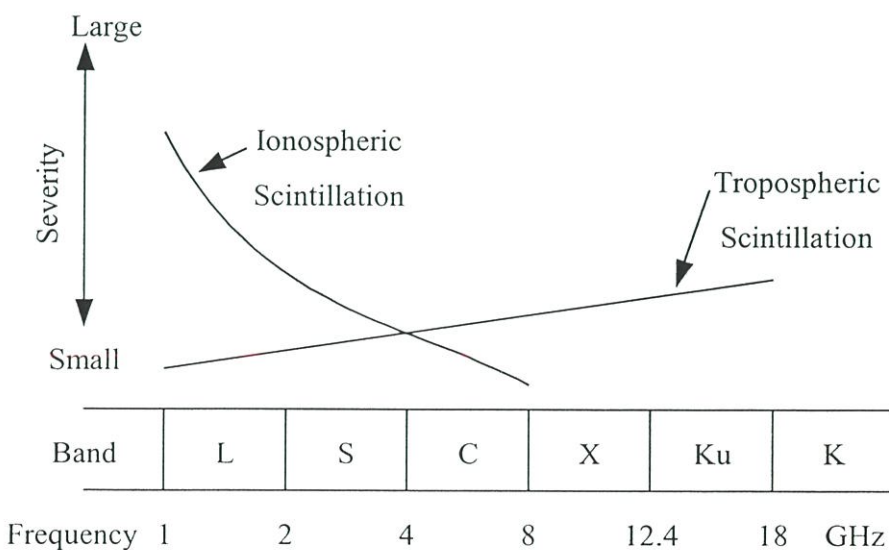
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นการติดต่อสื่อสารที่จำเป็นและใช้กันแพร่หลายอย่างมาก ทั้งในด้านการเชื่อมโยงโทรศัพท์ระหว่างประเทศและภายในประเทศ การแพร่ภาพสัญญาณโทรทัศน์ การใช้งานอินเทอร์เน็ตผ่านดาวเทียม เป็นต้น การสื่อสารผ่านดาวเทียมสามารถช่วยให้โลกมีการสื่อสารที่ไร้พรมแดน แต่เนื่องจากมีปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น สภาพภูมิอากาศ ชั้นบรรยากาศ มีผลทำให้สัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งแอมพลิจูดและเฟสเป็นแบบสุ่ม (Random) นำมาซึ่งความผิดพลาดในการสื่อสารข้อมูล ดังนั้นจำเป็นต้องเข้าใจในคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่น เพื่อเป็นการลดความเสียหาย หรือผลกระทบเนื่องจากความแปรเปลี่ยนทางธรรมชาติ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะในแต่ละพื้นที่ ที่ซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้า หรือป้องกันได้ ข้อมูลการศึกษาคุณลักษณะและการวิเคราะห์ทางสถิติของสัญญาณดาวเทียมภายใต้อิทธิพลของธรรมชาติในแต่ละปีและในแต่ละพื้นที่ จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบ หรือวางแผนจัดการระบบการรับส่งสัญญาณดาวเทียมเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด โดยอาศัยการศึกษาและการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลสัญญาณดาวเทียมในพื้นที่ใช้งานนั้นๆ

ระบบสื่อสารดาวเทียมได้รับผลกระทบเมื่อสัญญาณดาวเทียมแพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศโลก โดยชั้นบรรยากาศโลกที่มีผลกระทบเป็นส่วนใหญ่ คือ ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นั้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) การลดทอน (Absorption) การกระเจิง (Scatter) ของคลื่นเนื่องจากกลุ่มเมฆ กลุ่มฝน และหิมะ เป็นต้น โดยผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เริ่มมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าแถบความถี่ C (4-6 GHz) ขึ้นไป ส่วนผลกระทบจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าแถบความถี่ C ซึ่งจะทำให้สัญญาณเกิดการหน่วงเวลา (Time delay) สัญญาณเดินทางมาถึงจุดรับช้ากว่าคลื่นทางตรง การเกิดการหมุนแบบฟาราเดย์ (Faraday Rotation) มุมโพลาไรซ์ของสัญญาณเกิดการหมุนไปจากเดิม นอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณอย่างกระตันทัน (Scintillation) ซึ่งระดับสัญญาณเกิดการแกว่งขึ้นลงอย่างรวดเร็วจากระดับปกติ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับเวลาและลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่แต่ละระดับความสูง โดยโครงสร้างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนมักถูกพบในชั้น F และ E<sub>s</sub> ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระตันทันนั้น โดยมักเกิดขึ้นในช่วง

ความถี่ 30 MHz - 3 GHz ทั้งนี้ยังอาจเกิดขึ้นในช่วงความถี่ 4-6 GHz ด้วย ดังนั้นการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมแถบความถี่ C (4-6 GHz) จึงได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ซึ่งเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Scintillation) และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation) ตามลำดับ โดยระดับความรุนแรงตามความถี่ใช้งานต่างๆ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 1.1 ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบนี้ยังขึ้นกับตำแหน่งละติจูดของพื้นที่ที่ทำการศึกษ ฤดูกาล เวลาในแต่ละวัน มุมเงยของจานสายอากาศรับ และแถบความถี่ที่ใช้งาน งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองและวิจัยศึกษาคูณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม INTELSAT เหนือย่านมหาสมุทรแปซิฟิก (Pacific Ocean Region : POR) มีมุมเงยของจานสายอากาศรับสัญญาณต่ำ 8 องศา และนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรอินเดีย (Indian Ocean Region : IOR) ที่มีมุมเงยของจานสายอากาศรับสูง 40 องศา นั่นคือ ระบบมีมุมเงยต่างกัน และสัญญาณเดินทางผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอต่างกันมีผลทำให้เกิดความแตกต่างกันของลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ผลการทดลองที่ได้นำมาหาค่าคุณลักษณะต่างๆและการแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณเพื่อใช้ในการพิจารณาระบบ เช่น ค่าพิสัยพลวัตของเครื่องรับ (Receiver Dynamic Range) เป็นต้น เพื่อศึกษาให้ทราบถึงคุณลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นของสัญญาณดาวเทียมแถบความถี่ C ที่ระบบมีมุมเงยต่ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสถิติระยะยาว ในการออกแบบหรือพัฒนาระบบการสื่อสารต่อไป



รูปที่ 1.1 ระดับความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันตามความถี่ใช้งาน

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันประกอบด้วยการเพิ่มขึ้นและการลดต่ำลงของระดับสัญญาณปกติ โดยเฉพาะแก่ค่าการแกว่งของแอมพลิจูดแต่อัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดก็เป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาหาผลกระทบที่มีต่อการเชื่อมโยงการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันได้เริ่มทำการวัดมานานแล้ว ส่วนใหญ่จะทำการวัดบริเวณยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น ซึ่งตั้งอยู่บริเวณละติจูดกลาง แต่ในบริเวณละติจูดศูนย์สูตรซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมอย่างรุนแรงนั้นมีการวิจัยค่อนข้างน้อย จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาลักษณะและผลกระทบต่อการสื่อสารดาวเทียมในบริเวณนี้ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีมุมเงยต่ำ จะได้รับผลกระทบสูง ซึ่งงานวิจัยที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนมากจะศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมที่มีมุมเงยของงานสายอากาศสูง และมีขนาดของงานสายอากาศที่ไม่ใหญ่มาก วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของระบบที่มีมุมเงยต่ำเพียง  $8^\circ$  และมีขนาดงานสายอากาศรับที่ใหญ่มาก มีเส้นผ่าศูนย์กลางของงานสายอากาศรับ 32 เมตร บนระบบที่มีการใช้งานจริง ณ สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินศรีราชา โดยศึกษาและวิเคราะห์ถึงปริมาณการเกิด และความรุนแรงหรือความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาของแต่ละวัน แต่ละเดือน และแต่ละฤดูกาลศึกษาลักษณะโครงสร้างของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน เปรียบเทียบลักษณะของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศทั้งสอง รวมถึงศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในระยะสั้น สุดท้ายแล้วเป็นการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ กับระบบที่มีมุมเงยของงานสายอากาศสูง  $40^\circ$  เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันแถบความถี่ C ที่มีมุมเงยของงานสายอากาศต่ำ ที่ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการพิจารณาออกแบบแก้ไขปรับปรุงระบบสื่อสารดาวเทียม และช่วงเวลาในการให้บริการการสื่อสารดาวเทียม ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

## 1.3 แนวความคิดและขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาวงจรกรรมและผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของสิ่งรบกวนที่มีผลกระทบต่อระบบสื่อสาร ซึ่งผลกระทบจะรุนแรงมากน้อยต่างกันขึ้นกับตำแหน่งละติจูดและช่วงเวลาที่เกิด การศึกษาจะพิจารณาเกี่ยวกับลักษณะพฤติกรรม

ภายใต้อิทธิพลของความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และความไม่สม่ำเสมอในครรชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมแถบความถี่ C ที่ความถี่ 3952.5 MHz ซึ่งรับสัญญาณจากดาวเทียม INTELSAT ย่าน POR มีมุมเงยของจานสายอากาศต่ำ  $8^\circ$  ระดับการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาระดับการแกว่งสูงสุดและต่ำสุด การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล การแจกแจงความน่าจะเป็นของสัญญาณ สเปกตรัมกำลังสัญญาณ ค่าอัตโนมัติสัมพันธ์ (Autocorrelation) เป็นต้น ตลอดจนการวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และยังนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมแถบความถี่ C ที่ความถี่ 3947.5 MHz ซึ่งรับสัญญาณจากดาวเทียม INTELSAT ย่าน IOR ที่มีมุมเงยของจานสายอากาศ  $40^\circ$  เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของระบบที่มีมุมเงยสูงและมุมเงยต่ำ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาแบบจำลองการทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริง รายละเอียดเนื้อหาการวิเคราะห์ผลและการคำนวณต่างๆ มีดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง ลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และกระบวนการการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน นอกจากนี้ยังรวมถึงทฤษฎีการประมาณของ Rytov ซึ่งใช้อธิบายสมการคลื่นที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูด คุณลักษณะต่างๆ ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ลักษณะของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และกระบวนการการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของครรชนีหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ คุณลักษณะต่างๆ ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ สุดท้ายจะอธิบายถึงค่าความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันซึ่งแสดงด้วยค่าครรชนีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือความเข้มของกระบวนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ

บทที่ 3 กล่าวถึง ระบบการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ และผลการทดลองของงานวิจัย โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากกระดานกราฟ และข้อมูลที่เป็นดิจิทัล ทำการแสดงผลการทดลองทางสถิติของจำนวนครั้งการเกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณตามฤดูกาล เดือน และในรายชั่วโมง ในแต่ละระดับ dB peak-to-peak ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด และครรชนี  $S_4$  ตลอดจนการวิเคราะห์ปริมาณและความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

บทที่ 4 กล่าวถึง การวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในช่วงเวลาสั้น เช่น การหาลักษณะความหนาแน่นความน่าจะเป็น และการแจกแจงสะสมของระดับสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับ การแจกแจงตามทฤษฎีต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จะนำไปใช้ในการพิจารณาระบบ เช่น ค่าพีคสูงสุด, ค่าการจางหายสูงสุด, ค่าพีคที่ 5%, ค่าการจางหายที่ 95% และค่าพิสัยพลวัตของเครื่องรับ ต่อไปเป็นการศึกษาโครงสร้างทางเวลาและความถี่โดยใช้ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์และความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังวิเคราะห์หาอัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันหรืออัตราการจางหาย และระยะคิออร์รีเลชันสำหรับเทคนิคสเปซไคเวอร์ซิตี (Space Diversity) เพื่อปรับปรุงและลดการเลวลงในประสิทธิภาพของระบบอันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากระดับบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สุดท้ายแล้วเป็นการศึกษาแบบจำลองการทำนายความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในระยะยาวอันเนื่องมาจากระดับบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองวัดจริงอีกด้วย

บทที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของระบบที่มีมุมเงยต่ำ และสูง ตั้งแต่ลักษณะโดยทั่วไป ลักษณะทางสถิติ อันได้แก่ จำนวนครั้งที่เกิด ความรุนแรงหรือความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ในแต่ละเดือน การเปลี่ยนแปลงในรายวัน สุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างทางเวลาและความถี่ของระบบทั้งสอง โดยการใช้ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม

บทที่ 6 เป็นบทสรุป กล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ การเก็บข้อมูลสัญญาณ และข้อเสนอแนะต่างๆ สำหรับการพัฒนาวิจัยนี้ต่อไป

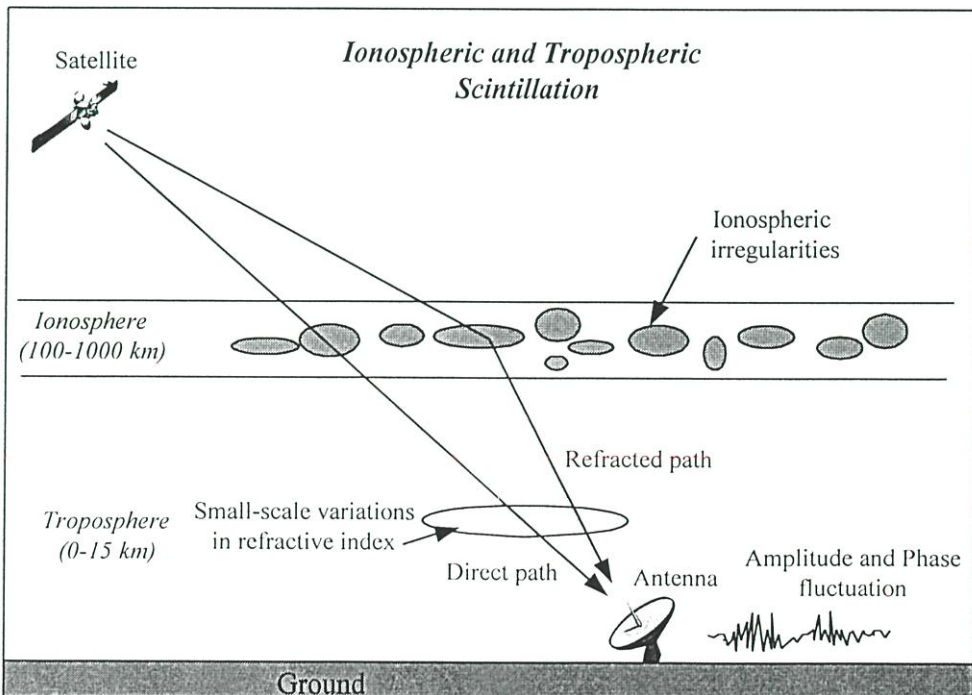
ในส่วนของภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับดาวเทียม และแผนที่เขตบริการของดาวเทียม INTELSAT 802 และ INTELSAT 904 ภาคผนวก ข. เสนอการหาความยาววิถีระหว่างจานสายอากาศและกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กทรอนิกส์ ภาคผนวก ค. วิธีปรับแต่งระบบรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อใช้ในการแปลงค่าสัญญาณในหน่วยโวลต์เป็นเดซิเบล ภาคผนวก ง. กล่าวถึง การเคลื่อนที่ของกระแสดมเทอร์โมสเฟียร์ ภาคผนวก จ. แสดงสถิติภูมิอากาศปี 2543-2545 และสุดท้าย ภาคผนวก ฉ. เป็นบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

## บทที่ 2

# ทฤษฎีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

### 2.1 บทนำ

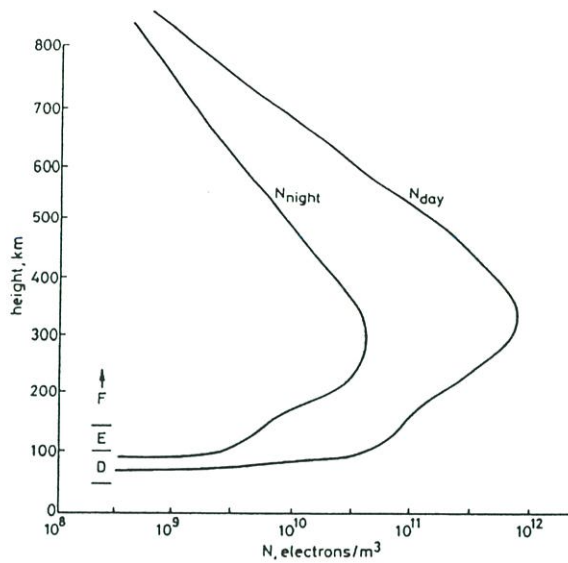
การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณอย่างกะทันหัน คือ การแกว่งขึ้นๆลงๆ อย่างกะทันหันของสัญญาณ ไปจากระดับเฉลี่ยของสัญญาณ โดยทั่วไประบบการสื่อสารดาวเทียมที่งานสายอากาศมีมุมเงย (Elevation Angle) สูง (มากกว่า  $20^\circ$ ) จะมีค่ายอดถึงยอด (Peak-to-Pek) ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันต่ำกว่าในกรณีของระบบที่มีมุมเงยต่ำ (ต่ำกว่า  $10^\circ$ ) ซึ่งค่ายอดถึงยอดของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณที่มากพอจะเป็นผลกระทบที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร [1] ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นเป็นผลจากทั้งสองชั้นบรรยากาศด้วยกัน คือ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Electron Density Irregularities) เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีผลต่อสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าประมาณ 6 GHz ส่วนความไม่สม่ำเสมอของดัชนีหักเห (Refractive Index Irregularities) เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีผลต่อสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า 3 GHz [2] ดังนั้นการสื่อสารดาวเทียมแถบความถี่ C (4-6 GHz) จึงได้รับผลกระทบจากทั้งสองชั้นบรรยากาศดังกล่าว รูปที่ 2.1 แสดงการจำลองผลกระทบของชั้นบรรยากาศทั้งสอง



รูปที่ 2.1 ผลกระทบในความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์

## 2.2 ผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นบริเวณชั้นบรรยากาศรอบโลกที่ก๊าซ มีการแตกตัวเป็น ไอออนหรือพลาสมาโดยมีสาเหตุหลักเนื่องจากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ เข้าหา ชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงาน เข้าสู่โมเลกุลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ให้เกิดการไอออไนซ์ (Ionization) ของ โมเลกุลขึ้น ซึ่งการไอออไนซ์ คือ ขบวนการวิธีดึงอิเล็กตรอน ออกจากอะตอม โดยอะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะมีลักษณะทางไฟฟ้าเป็นประจุไฟฟ้าบวก นอกจากนี้ยังได้ประจุไฟฟ้าลบและอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก ในการวัดปริมาณการไอโอไนซ์มาก หรือน้อยจากจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระต่อลูกบาศก์เมตร อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่จำนวนมาก จะ เดินทางไปตลอดทั้งชั้นบรรยากาศ ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจทำให้อิเล็กตรอนรวมตัวกับประจุไฟฟ้า บวกกลับเป็นอะตอมใหม่ได้อีก ดังนั้นกระบวนการไอโอไนซ์ และการรวมตัวกันใหม่จึงเกิดขึ้น ตลอดเวลา ที่ซึ่งมีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศไอโอ- โนสเฟียร์ กระบวนการแตกตัวของอะตอมมีมากในบริเวณที่อยู่ใกล้กับดวงอาทิตย์ เพราะมีปริมาณ การแผ่รังสีของอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์สูงมาก ส่วนในระดับที่ต่ำลงมาพบว่าการแตกตัว ของอะตอมน้อยกว่า เนื่องจากความเข้มของรังสีถูกลดลงระหว่างทางของชั้นบรรยากาศ และใน เวลากลางวันพบว่า ปริมาณการแตกตัวของอะตอมมีสูง และในเวลากลางคืนพบว่า ปริมาณการแตก ตัวของอะตอมมีน้อย ทำให้การรวมตัวของอะตอมเกิดภายในช่วงเวลาเร็วขึ้น โดยในช่วงเวลากลางวัน ชั้นของการแตกตัวจะปรากฏอยู่ที่ความสูงจากโลกประมาณ 90-1000 กิโลเมตร ความหนาแน่น ของกลุ่มอิเล็กตรอนนี้จะมีค่าประมาณ  $10^{10}$ - $10^{12}$  อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร โดยจะมีอยู่ 3 ชั้น หลักๆ คือ ชั้น D, E และ F ในช่วงเวลากลางวันชั้น F จะแยกตัวเป็นชั้น  $F_1$  และชั้น  $F_2$  ซึ่งความสูง จากพื้น โลกของแต่ละระดับจะไม่คงที่ มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดตามชั่วโมง วัน เดือน และฤดูกาลของ แต่ละปี ซึ่งตัวแปรสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ คือ ดวงอาทิตย์ เช่นในเวลากลางวัน มีการแผ่รังสี อัลตราไวโอเลตสูง เกิดการแตกตัวของอะตอมในปริมาณมาก ทำให้ระดับความสูงเฉลี่ยของชั้น ไอโอโนสเฟียร์ต่ำลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงภายในดวงอาทิตย์ เช่น จุดบอดบนดวงอาทิตย์ ยังมี ผลต่อชั้นบรรยากาศด้วย ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในชั้น D มีค่าน้อยเมื่อเปรียบ เทียบกับชั้นอื่น เนื่องจากอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์มากที่สุด จึงมีการแตกตัวของอะตอมน้อยมาก สำหรับเวลากลางคืนจะมีการรวมตัวของอะตอมอย่างรวดเร็วทำให้ชั้น D หายไป ส่วนชั้น F เป็น ชั้นที่มีการแตกตัวของอะตอมในปริมาณสูงมากที่สุด ในเวลากลางวัน ชั้น F จะแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ชั้น  $F_1$  และ  $F_2$  แต่ในเวลากลางคืนจะเหลือเพียงชั้นเดียว รูปที่ 2.2 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนเทียบกับระยะความสูงจากผิวโลกในช่วงเวลากลางวันและกลาง คืน โดยในเวลากลางคืนชั้น D จะหายไป การหาคุณลักษณะต่างๆ ของคลื่นที่แพร่กระจายไปในชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะสามารถหาได้โดยการนำสมการแมกซ์เวลล์มาประยุกต์ใช้



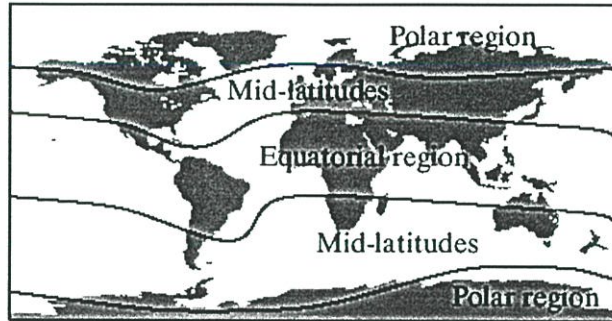
รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนกับความสูงเหนือผิวโลก ในช่วงกลางวันและกลางคืน

### 2.2.1 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

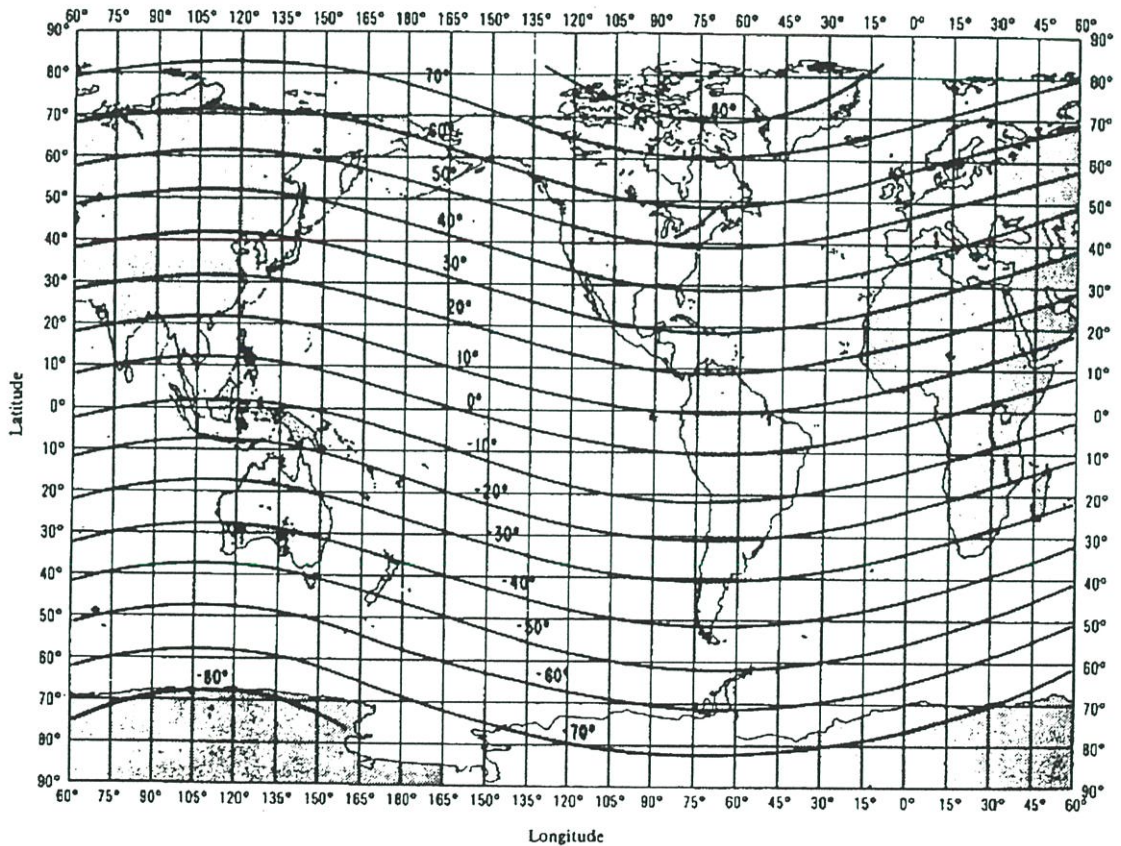
การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation) เป็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อระนาบคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนดังรูปที่ 2.1 โดยสัญญาณที่รับได้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งแอมพลิจูดและเฟส ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณนั้นจะขึ้นกับความถี่ สนามแม่เหล็กโลก ปฏิริยาโซล่า (Solar Activity) ช่วงเวลาในแต่ละวัน ฤดูกาลและตำแหน่งละติจูด ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันหลักๆ คือ ในชั้น F ที่ความสูง 200-1000 กิโลเมตร โดยเฉพาะที่ระดับความสูง 250-400 กิโลเมตร บริเวณที่ได้รับการรบกวนหลักๆ คือ แถบละติจูดสูง (High Latitude) และแถบศูนย์สูตร (Equatorial Latitude) และมักจะเกิดในเวลากลางคืน [3] และยังมีผลกระทบในความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้น E ที่ความสูง 90-100 กิโลเมตร โดยเฉพาะ Sporadic E และ Auroral E [4]

โดยทั่วไปบริเวณตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันแบ่งเป็น 3 บริเวณหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ บริเวณศูนย์สูตร ซึ่งครอบคลุมพื้นที่  $\pm 20^\circ$  ของเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Equator) ถัดมาคือ บริเวณละติจูดสูง ซึ่งรวมไปถึงพื้นที่แถบขั้วแม่เหล็กโลกด้วย และบริเวณสุดท้ายคือ บริเวณละติจูดกลาง (Middle Latitude) ณ บริเวณทั้งสามนี้ การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเกิดขึ้นมากที่สุดในเวลากลางคืน โดยที่บริเวณแถบศูนย์สูตรจะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากดวงอาทิตย์ตก การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

บริเวณศูนย์สูตรจะรุนแรงกว่าบริเวณละติจูดสูง และการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันบริเวณละติจูดกลางจะรุนแรงน้อยกว่าบริเวณอื่น และไม่ปรากฏว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ [5]



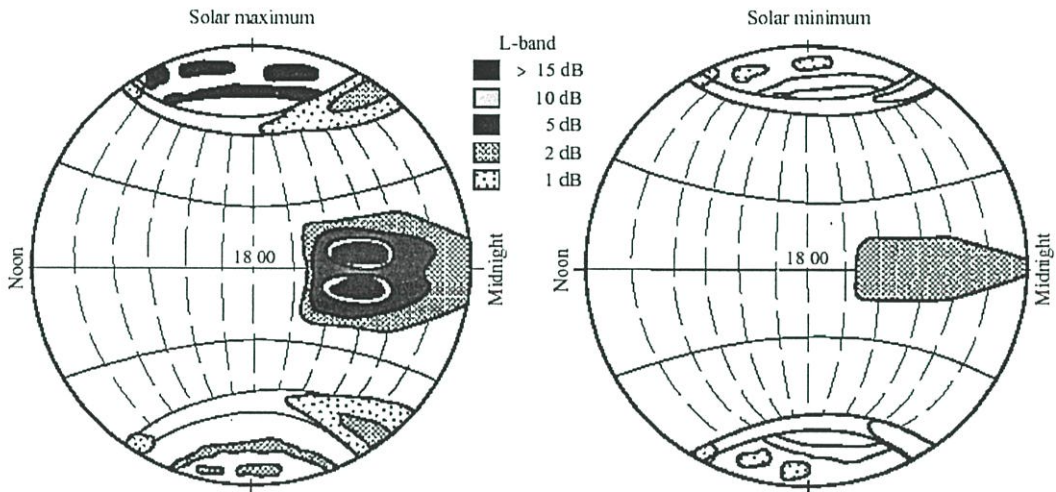
รูปที่ 2.3 การแบ่งขอบเขต 3 บริเวณของโลก [6]



รูปที่ 2.4 ละติจูดสนามแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Latitudes) [7]

รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งละติจูดสนามแม่เหล็กโลก การเฝ้าสังเกตในระหว่างวัฏจักรสุริยะมีค่าสูงสุด (Solar Maximum) (1979-81) แสดงให้เห็นว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันสูงสุดเกิดที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรโลก มากกว่าที่เส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่รุนแรงพบได้ คือ 9 เดซิเบล ที่ความถี่ 4 GHz ด้านขาลง (Downlink)

จากดาวเทียม COMSAT การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันสูงสุดที่ละติจูด ( $\lambda_m$ )  $\pm 10^\circ$  ของเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก และมีการลดลงด้วยรูปแบบเกาส์ (Gaussian Shape) คือ  $\exp\left\{-\left[(\lambda_m - 10)/10\right]^2\right\}$  [8] ตัวอย่างความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในแต่ละบริเวณแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจากรูปแสดงถึงคอนทัวร์ภายในโลกที่ถูกพิจารณาให้หมุนตามเข็มนาฬิกา [9]



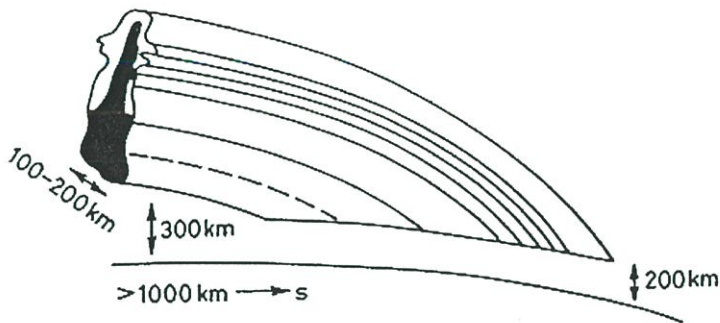
รูปที่ 2.5 ความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในแต่ละบริเวณ [10]

ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน เป็นฟังก์ชันของขนาดของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ ระยะทางระหว่างกลุ่มความไม่สม่ำเสมอกับเครื่องรับ และขนาดของเขตเฟรสเนล (Fresnel Zone Size)

### 2.2.2 ความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Irregularities)

กลุ่มความไม่สม่ำเสมอขนาดเล็ก (Small-Scale Irregularities) หลายๆ กลุ่ม จะถูกบรรจุอยู่ในแผ่นม่านขนาดใหญ่ (Large-Scale Patches) ที่เคลื่อนที่ขวางเส้นทางการเดินทางของคลื่น แบบรูปของการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันมีขนาดที่ใหญ่มาก แบบรูปของแผ่นม่านจะเกิดและหยุดหลายๆ ครั้งในหนึ่งคืน โดยแผ่นม่านจะเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นทางเดินของคลื่นในระยะเวลา 20 นาทีถึงหลายชั่วโมง ในบริเวณศูนย์สูตร มีแผ่นม่านของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอขนาดใหญ่เกิดขึ้นภายหลังที่ดวงอาทิตย์ตก แผ่กว้างไปตามสนามแม่เหล็กโลก มีลักษณะเหมือนกล้วย หรือกลีบส้ม ภาพตัดผ่ากลางของกล้วยแสดงดังรูปที่ 2.6 มีขนาดในทิศตะวันออก-ตะวันตก หลายร้อยกิโลเมตร มีความสูงในแนวตั้ง 50 ถึงหลายร้อยกิโลเมตร และมีขนาดในทิศเหนือ-ใต้ ประมาณ 2000 กิโลเมตร

ที่ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มความไม่สม่ำเสมอขนาดเล็กหลายกลุ่ม บางครั้งมีขนาดเล็กเพียง 1 เมตร ที่ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันของสัญญาณย่าน VHF และไมโครเวฟ [5]



รูปที่ 2.6 แบบจำลอง 3 มิติของแผ่นม่านของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ

คุณลักษณะของการเกิดเป็นแผ่นม่าน การเคลื่อนที่ และการสลายตัว (Decay) สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ [4]

ก) แผ่นม่านแผ่นใหม่จะเกิดขึ้นหลังดวงอาทิตย์ตก โดยแผ่กว้างไปทางทิศตะวันตก มีขนาดในทิศตะวันออก-ตะวันตก 100 กิโลเมตร ถึงหลายร้อยกิโลเมตร มีขนาดเล็กที่สุดที่ปรากฏประมาณ 100 กิโลเมตร แผ่นม่านมีขนาดในทิศเหนือ-ใต้ ประมาณ 2,000 กิโลเมตร หรือมากกว่า

ข) แผ่นม่านจะประกอบไปด้วยแผ่นความไม่สม่ำเสมอ ความหนาในแนวตั้งของแผ่นม่าน คือ 50 กิโลเมตรถึงหลายร้อยกิโลเมตร แผ่นม่านมีความเข้มของความไม่สม่ำเสมอสูงสุดที่บริเวณความสูง 225 - 450 กิโลเมตร ด้วยขนาดกลุ่มความไม่สม่ำเสมอมากกว่า 1,000 กิโลเมตร

ค) แผ่นม่านจะลอยไปในทิศตะวันออกด้วยความเร็วจาก 100-200 กิโลเมตรต่อวินาที และภายหลังเที่ยงคืนการเคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอจะหยุดลง และเคลื่อนที่ในทิศทางกลับกัน หลังจากนั้นจะลอยตัวไปในทิศตะวันตกด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น

ง) ระยะเวลา (Duration) ของแผ่นม่าน ที่ถูกวัดด้วยการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน มีค่ามากกว่า 2 ชั่วโมงครึ่ง บางครั้งอาจพบได้ถึง 8 ชั่วโมง

จ) ตามการศึกษาแผ่นม่านความไม่สม่ำเสมอในช่วงวัฏจักรสุริยะต่ำและไม่รุนแรง (Low Sunspot Activity) [11] แผ่นม่านจะสลายตัวภายหลังเที่ยงคืนในช่วงประมาณ 1 ชั่วโมง

ปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถจำลองได้ ดังรูปที่ 2.7 บริเวณโครงสร้างความหนาแน่นของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอแบบสแลบ อยู่ระหว่าง  $Z = 0$  ถึง  $Z = \ell$  เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าฮาร์มอนิกทางเวลาดกกระทบบนสแลบความไม่สม่ำเสมอ (Irregular Slab)  $Z = 0$  และรับคลื่นบนพื้นโลกที่  $(\vec{\rho}, z)$

มันจะถูกกำหนดให้สแลบความไม่สม่ำเสมอสามารถแสดงลักษณะด้วยสภาพยอมไดอิเล็กตริก (Dielectric Permittivity) [12]

$$\varepsilon = \langle \varepsilon \rangle [1 + \varepsilon_1(\vec{r}, t)] \quad (2.1)$$

ซึ่ง  $\langle \varepsilon \rangle$  คือ สภาพยอมไดอิเล็กตริกเฉลี่ยที่พื้นหลัง (Background Average Dielectric Permittivity) สำหรับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ กำหนดโดย

$$\langle \varepsilon \rangle = (1 - f_{p0}^2 / f^2) \varepsilon_0 \quad (2.2)$$

และ  $\varepsilon_1(\vec{r}, t)$  คือ ส่วนที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มอันเนื่องมาจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ และกำหนดโดย

$$\varepsilon_1(\vec{r}, t) = - \frac{(f_{p0} / f)^2 [\Delta N(\vec{r}, t) / N_0]}{1 - (f_{p0} / f)^2} \quad (2.3)$$

ที่ซึ่ง  $f_{p0}$  คือ ความถี่พลาสมา (Plasma Frequency) ที่ตรงกันกับ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่พื้นหลัง (Background Electron Density)  $N_0$  และ  $f$  คือ ความถี่ของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) เปอร์เซ็นต์การกระเพื่อม (Percentage Fluctuation)  $\Delta N / N_0 = \xi$  การเปลี่ยนแปลงทางเวลา (Temporal Variation) เป็นสาเหตุจากการเคลื่อนที่ในแต่ละกลุ่มของความไม่สม่ำเสมอใน Frozen Flow หรือการปรากฏเทอร์บิวเลนซ์ (Turbulence Evolution) ใน Non-Frozen Flow หรือทั้งสองอย่าง ที่ซึ่งถูกกำหนดให้ต้องมีคาบเวลาน้อยกว่าคลื่นตกกระทบ

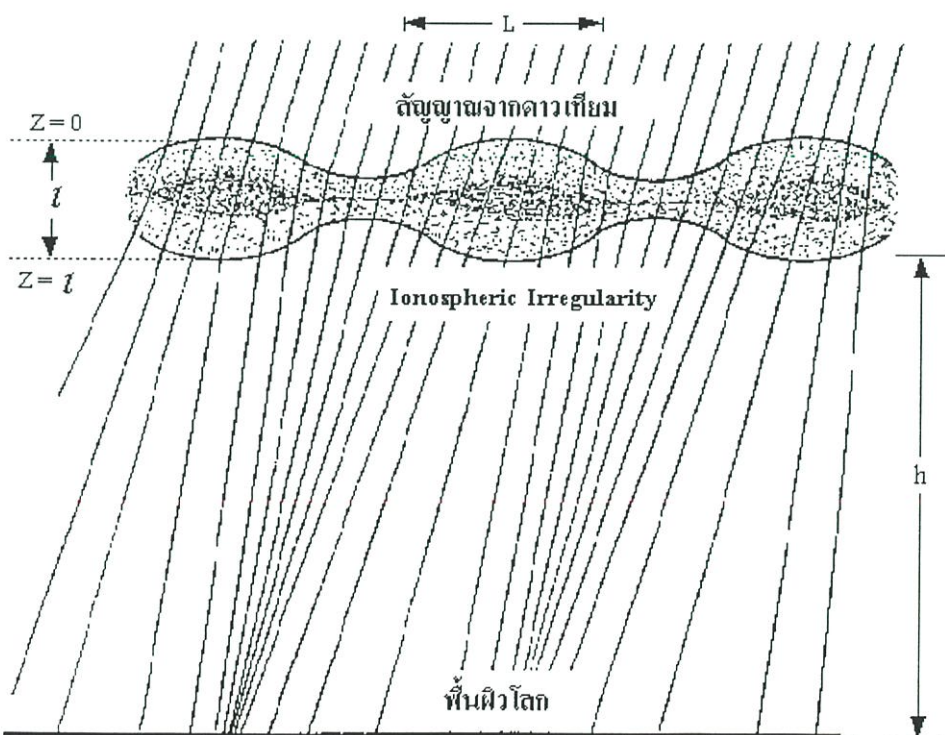
คลื่นที่แพร่กระจายผ่านสแลบความไม่สม่ำเสมอ อันดับแรกเฟสของสัญญาณเท่านั้นที่ได้รับผลกระทบโดยการกระเพื่อมแบบสุ่มในกรณีนี้หักเห ดังนั้นหลังจากที่คลื่นปรากฏออกมาจากการผ่านสแลบแบบสุ่ม หน้าเฟส (Phase Front) ของสัญญาณจะถูกมอดูเลตแบบสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และคลื่นนี้จะแพร่กระจายสู่พื้นดิน หน้าคลื่นที่เพี้ยนไป (Distorted Wave Front) จะก่อขึ้นเป็นแบบรูปการแทรกสอด (Interference Pattern) ซึ่งเป็นผลในการกระเพื่อมทางแอมพลิจูด

ความเข้มของสนามทั้งหมดที่พื้นดินเป็นผลรวมของส่วนประกอบที่ไม่ถูกรบกวน (Unperturbed Components) และรบกวน (Perturbation) ในความเข้มของสนามอันเนื่องมาจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ การรบกวนถูกกำเนิดโดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากความเข้มของสนามตกกระทบ กระแสไฟฟ้าเหล่านี้มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับอากาศรอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Surrounding Ionosphere) ดังนั้นกลุ่ม

ความไม่สม่ำเสมอจะกระทำตัวเป็นสายอากาศที่แผ่กระจายเป็นรูปกรวยดังแสดงในรูปที่ 2.7 คลื่นตกกระทบจะกระจัดกระจาย (Scatter) อย่างหักเห (Refractive) หรืออย่างเลี้ยวเบน (Diffractive) ขึ้นอยู่กับขนาดของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ ที่ซึ่งตั้งฉากกับคลื่นระนาบ (Plane Wave) การกระจัดกระจายอย่างหักเหเป็นผลจากการกระจัดกระจายอย่างรุนแรงที่ถูกพิจารณาให้เกี่ยวข้องกับกลุ่มความไม่สม่ำเสมอขนาดใหญ่ ซึ่งใหญ่กว่าขนาดเฟรสเนล และการกระจัดกระจายอย่างเลี้ยวเบนถูกกำหนดให้เกี่ยวข้องกับกลุ่มความไม่สม่ำเสมอที่มีขนาดเล็กกว่า หรือเท่ากับขนาดเฟรสเนล เมื่อกลุ่มความไม่สม่ำเสมอขนาดเล็ก จำนวนมาก ๆ ถูกพิจารณาเป็นการเลี้ยวเบน ดังนั้นการเคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของวงเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นจะทำให้เกิดแบบรูปของการเลี้ยวเบนต่างๆ หลายชนิดเมื่อสังเกตจากพื้นโลก ความเร็วขยับเลื่อน (Drift Velocity)  $v$  ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอนั้น สามารถประมาณได้จาก [9]

$$v = \sqrt{\lambda z} f_{\min} \quad \text{เมตร/วินาที} \quad (2.4)$$

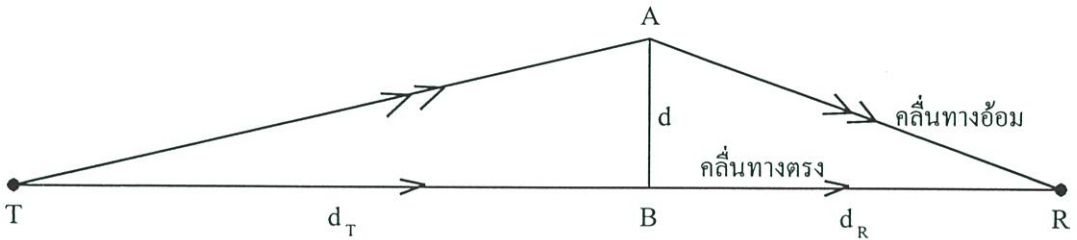
ซึ่ง  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ  $z$  คือ ความสูงของกลุ่มการเลี้ยวเบน (Diffraction Screen) และ  $f_{\min}$  คือ ความถี่เฟรสเนลต่ำสุดที่หนึ่ง จากสมการสังเกตว่า ถ้า  $\lambda$  และ  $z$  คงที่แล้วนั้น  $v$  จะเพิ่มขึ้นตาม  $f_{\min}$  ที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม  $v$  ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงสหสัมพันธ์ (Correlation Interval) ลดลง และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันรุนแรงมากขึ้น



รูปที่ 2.7 ชั้นของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอที่มีขนาด  $L$

### 2.2.2.1 เขตเฟรสเนล

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันจะนำขนาดและระยะของเขตเฟรสเนลมาทำการพิจารณาร่วมด้วย รูปที่ 2.8 แสดงคลื่นทางตรงและคลื่นทางอ้อม ที่ส่งจากเครื่องส่ง T มายังเครื่องรับ R โดยที่ระยะ  $d_T$  และ  $d_R$  เป็นระยะจากเครื่องส่ง และระยะจากเครื่องรับถึงเขตเฟรสเนล ตามลำดับ [9]



รูปที่ 2.8 ลักษณะทางเรขาคณิตของเขตเฟรสเนล

ถ้าความยาวคลื่น  $\lambda$  ของทั้งสองสัญญาณเท่ากัน และ

$$\text{ระยะทาง TAR} = \text{ระยะทาง TBR} + \lambda/2 \quad \text{เมตร} \quad (2.5)$$

นั่นคือ  $d$  คือ รัศมีเขตเฟรสเนลที่หนึ่ง (First Fresnel Zone Radius) ถ้าระยะ  $d_T$  และ  $d_R$  มีค่ามากกว่าค่ารัศมีเขตเฟรสเนล  $d$  มากๆ ดังนั้นรัศมีเขตเฟรสเนลที่หนึ่งจะเป็นดังสมการ

$$d = \sqrt{\frac{\lambda d_T d_R}{d_T + d_R}} \quad (2.6)$$

โดยปกติ สำหรับการสื่อสารดาวเทียมบริเวณศูนย์สูตรด้านขาลงที่ความถี่ 4 GHz ถ้าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดในบริเวณบรรยากาศชั้น F ที่ความสูง 420 กิโลเมตร ค่าต่างๆ ในสมการ (2.6) สามารถประมาณค่าได้ดังนี้ คือ  $\lambda = 0.075$  เมตร  $d_T = 35,500$  กิโลเมตร  $d_R = 420$  กิโลเมตร ดังนั้น  $d = 176$  เมตร ที่ซึ่งในด้านขาขึ้น ที่ความถี่ 6 GHz ที่ความสูงเดียวกันนี้ขนาดเขตเฟรสเนลจะเท่ากับ 144 เมตร ถ้าความสูงเปลี่ยนเป็น 200 กิโลเมตร เขตเฟรสเนลด้านขาลงและขาขึ้นจะเท่ากับ 125 เมตร และ 102 เมตร ตามลำดับ และถ้าความสูงเปลี่ยนเป็น 600 กิโลเมตร เขตเฟรสเนลด้านขาลงและขาขึ้นจะเท่ากับ 215 เมตร และ 175 เมตร ตามลำดับ

จากสมการ (2.6) ถ้าระยะทาง  $d_r$  มีความยาวมากๆ เมื่อเทียบกับระยะ  $d_R$  รัศมีเขตเฟรสเนลที่หนึ่งจะเป็น

$$d = \sqrt{\lambda d_R} \quad (2.7)$$

ขอบเขตเฟรสเนลจะมีลักษณะเป็นวงกลมเมื่อมองในภาคตัดขวาง และมีพื้นที่เป็น  $\pi d^2$  ถ้ากลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนมีขนาด  $L$  ดังรูปที่ 2.7 โดยที่  $L$  มีค่าประมาณเท่ากับ  $d$  และที่ความสูง  $h = z$  เหนือเครื่องรับ โดยเมื่อเราเปลี่ยนสัญลักษณ์ สมการ (2.7) จะเป็น

$$L = \sqrt{\lambda z} \quad (2.8)$$

ดังนั้น

$$z = L^2/\lambda \quad (2.9)$$

สมการ (2.8) สัญลักษณ์  $L$  จะแทน  $d$  และ  $z$  จะแทน  $d_R$  ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีหลักพื้นฐานมาจากการพิจารณาการกระจัดกระจายของคลื่นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งมีลักษณะเป็นม่านที่เต็มไปด้วยกลุ่มความไม่สม่ำเสมอรูปวงรี ขนาด  $L$  ดังรูปที่ 2.7

ค่า  $d$  ในสมการ (2.6) สำหรับเขตเฟรสเนลที่หนึ่ง รัศมีของเขตเฟรสเนลของอันดับที่สูงขึ้น ( $n = 2, 3, 4$ , และอื่นๆ) กำหนดโดย

$$d_n = \sqrt{n} \times d \quad \text{เมตร} \quad (2.10)$$

ขนาดของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอที่ซึ่งจะให้ผลกระทบมากที่สุด คือ มีขนาดเท่ากับขนาดเขตเฟรสเนลที่หนึ่ง ที่ซึ่งขนาดที่เล็กกว่านี้ ผลกระทบจะน้อยลงเนื่องจากคลื่นจำนวนเล็กน้อยเป็นโฟกัส (Focused) และถ้าขนาดของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอมีขนาดใหญ่มากกว่านี้ เริ่มต้นด้วยลำดับที่ 2 จะทำลายการรบกวนด้วยรังสีเขตเฟรสเนลที่หนึ่ง

จากสมการ (2.1)-(2.3) ความเบี่ยงเบนของความหนาแน่นอิเล็กตรอนเป็น  $\Delta N$  ซึ่งก็คือค่าความเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกลุ่มอิเล็กตรอน และความเบี่ยงเบนของค่าครชนีหักเห  $\Delta n$  จะสามารถหาได้จาก [13]

$$\Delta n = -40.3 \frac{\Delta N}{f^2} \quad (2.11)$$

ดังนั้นค่ากำลังสองเฉลี่ยของสมการ (2.11) จะได้ว่า

$$\overline{(\Delta n)^2} = 1.624 \times 10^3 \frac{\overline{(\Delta N)^2}}{f^4} \quad (2.12)$$

สมการ (2.12) สามารถเขียนในอีกรูปแบบคือ

$$\frac{\overline{(\Delta n)^2}}{n} = \frac{1}{4\pi^2} r_e^2 \lambda^4 \overline{(\Delta N)^2} \quad (2.13)$$

โดยที่  $r_e$  คือ รัศมีของอิเล็กตรอน (Electron Radius) ( $2.82 \times 10^{-15}$  เมตร) ค่าเบี่ยงเบนเฟส (Phase Deviation)  $\Delta\phi$  ของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอหนึ่งกลุ่มที่มีขนาด  $L$  คือ

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(L\Delta n) \quad (2.14)$$

โดยที่  $2\pi/\lambda$  เป็นค่าคงที่เฟส (Phase Constant)

ในระยะทาง  $D$  ตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น กำหนดให้มีกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ  $D/L$  และทุกๆ กลุ่มของความไม่สม่ำเสมอมีขนาดเดียวกัน ค่ากำลังสองเฉลี่ยทั้งหมดของค่าเบี่ยงเบนเฟส (Total Mean-Square Phase Deviation) ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอเหล่านี้ คือ

$$\overline{(\Delta\phi)^2} = \frac{D}{L} \left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right)^2 \overline{(\Delta n)^2} \quad (2.15)$$

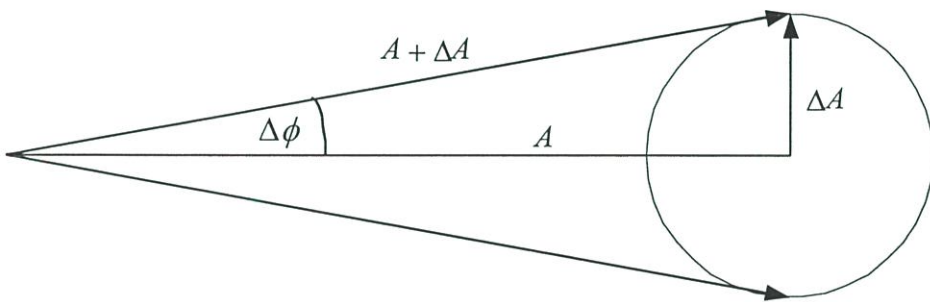
สมการ (2.15) สามารถเขียนในเทอมของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอน คือ

$$\overline{(\Delta\phi)^2} = \frac{D}{L} \left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{1.624 \times 10^3 \overline{(\Delta N)^2}}{f^4}\right) \quad (2.16)$$

ถ้าพิจารณาความหนาแน่นของชั้น ( $D$ ) ที่มุม Zenith  $\theta_z$  และแทนสมการ (2.13) ในส่วนของ  $\overline{(\Delta n)^2}$  ลงในสมการ (2.16) ดังนั้นสมการ (2.16) สามารถกำหนดได้ง่ายๆ เป็น [14]

$$\overline{(\Delta\phi)^2} = 4r_c^2 \lambda^2 \overline{(\Delta N)^2} LD \sec \theta_z \quad (2.17)$$

การเปลี่ยนแปลงเฟสจะเกิดขึ้นได้ชั้นของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอโดยทันที แต่การเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูดจะเกิดขึ้นที่ระยะไกลออกไปจากได้ชั้นความไม่สม่ำเสมอ นั้น โดยระยะ  $h$  ที่จะทำให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันขึ้นได้ จะมีค่าเท่ากับระยะของเฟรสเนล  $z = L^2/\lambda$  ในทางปฏิบัติถ้า  $h > \pi L^2/\lambda$  จะเริ่มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน [14] โดยรูปที่ 2.9 แสดงเวกเตอร์ความถี่เนื่องของการเปลี่ยนแปลงเฟสและการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด



รูปที่ 2.9 เวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันทางแอมพลิจูดและเฟส

จากรูปที่ 2.9  $(\Delta A)^2 = (\Delta\phi)^2 A^2$  ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของทั้ง 2 คือ

$$\overline{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2} = \overline{(\Delta\phi)^2} \quad (2.18)$$

ความเข้มของการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันทางแอมพลิจูด เพิ่มขึ้นทีละน้อยตามระยะทางที่ไกลออกไปจากได้กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สำหรับการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันทางเฟสจะไม่ไปถึงจุดอิ่มตัว (Saturation Point) แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มของการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหัน

ผลรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เครื่องรับ ณ ภาคพื้นดิน จะเป็นการรวมกันขององค์ประกอบของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ถูกรบกวนและที่ไม่ถูกรบกวน อันเนื่องมาจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน กลไกที่ทำให้เกิดความแปรปรวนในความเข้มสนามไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในกลุ่มความไม่สม่ำเสมออันเนื่องมาจากการตกกระทบของสนามไฟฟ้า เนื่องจากกระแสเหล่านี้มีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณรอบข้าง ดังนั้นกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนนี้จะเปรียบเสมือนสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายเป็นรูปกรวยดังรูปที่ 2.7 โดยความกว้างลำบีม (Beamwidth) จะประมาณเท่ากับ  $\lambda/L$  ที่ระยะ  $d$  จากจุดสังเกตด้านล่างของกลุ่ม

ความไม่สม่ำเสมอ โดยที่  $d \ll z$  และ  $z$  คือ ระยะเฟรสเนล (Fresnel Distance) จะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของเฟสและการทับซ้อนของลำคลื่นเพียงจุดเดียว แต่สำหรับระยะทางไกลออกไป พื้นที่ของกรวยลำคลื่นจะทับซ้อนกันมากขึ้น และกลายเป็นเงื่อนไขของการรบกวนซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน

### 2.2.2.2 การประมาณของ Rytov

ทฤษฎีการจำลองการเลี้ยวเบนของคลื่นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันมีอยู่หลายทฤษฎี โดยทฤษฎีที่สมบูรณ์สำหรับทุกเงื่อนไขนั้นยังไม่มี ในการหาคำตอบของสมการคลื่นนั้นจึงใช้ลักษณะการประมาณโดยกำหนดเงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไป ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า (1) ชั้นของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอเล็กตรอนมีความหนาแน่นน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะทางที่คลื่นเดินทางไปยังเครื่องรับ (2) คาบของการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มความไม่สม่ำเสมอจะช้ากว่าคาบเวลาของคลื่น และ (3) ขนาดของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่น จากสมการคลื่นสเกลาร์ (Scalar Wave Equation) สมการการแพร่กระจายคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอจะเป็นดังสมการ

$$(\nabla^2 + k_0^2 n^2) U(\vec{r}) = 0 \quad (2.19)$$

โดย  $U$  จะแสดงถึงองค์ประกอบของความเข้มสนามไฟฟ้า  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  และ  $n$  คือ ดรรชนีหักเหของคลื่น ปริมาณสเกลาร์  $U$  จะแสดงอยู่ในรูปเวกเตอร์ตำแหน่ง  $r$  ในกรณีที่มีการกระจายเกิดไม่รุนแรง การประมาณของ Rytov ในการหาคำตอบของสมการจะหาได้โดยกำหนดให้

$$U(\vec{r}) = U_0(\vec{r}) e^{\psi(\vec{r})} \quad (2.20)$$

$U_0(\vec{r})$  คือ องค์ประกอบของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ปราศจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ โดย  $U_0$  เป็นค่าเฉลี่ยของ  $U(\vec{r})$  หรือ  $U_0 = \langle U \rangle$  โดยทั่วไปแล้วฟังก์ชัน  $\psi(\vec{r})$  จะเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\psi(\vec{r}) = X + jS \quad (2.21)$$

ค่า  $U$  และ  $U_0$  สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของแอมพลิจูด  $A, A_0$  และ  $\phi, \phi_0$  ได้โดย

$$U(\vec{r}) = A e^{j\phi} \quad (2.22)$$

$$U_0(\vec{r}) = A_0 e^{i\phi_0} \quad (2.23)$$

ดังนั้นทำให้ได้ค่า  $X$  และ  $S$  ในสมการ (2.21) เป็น

$$X = \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (2.24)$$

$$S = \phi - \phi_0 \quad (2.25)$$

ส่วนจริง  $X$  ของตัวแปร  $\psi(\vec{r})$  จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าแอมพลิจูดเชิงลอการิทึมของ  $A$  ดังนั้นจึงเรียกค่า  $X$  ว่า การเปลี่ยนแปลงของล็อกแอมพลิจูด ส่วนจินตภาพ  $S$  ของ  $\psi(\vec{r})$  แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเฟส

### 2.2.3 คุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

คุณลักษณะต่างๆ ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถสรุปได้ ดังนี้ [15]

#### 2.2.3.1 การขึ้นกับชั้นสปอตนัมเบอร์ (Sun-Spot Number Dependence)

- ไม่มีความสัมพันธ์กันเลยระหว่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันแต่ละเหตุการณ์ กับ ชั้นสปอตนัมเบอร์รายวัน
- มีความสัมพันธ์กันดีระหว่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันรายปี กับ ชั้นสปอตนัมเบอร์รายปี
- มีความสัมพันธ์กันดีระหว่างการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน กับ ชั้นสปอตนัมเบอร์รายเดือน

#### 2.2.3.2 การขึ้นกับเวลา (Temporal Dependence)

- เหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันรายปีจะเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ 11 ปี ตามรอบชั้นสปอตนัมเบอร์ (Solar Sun-Spot Cycle)
- เหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันรายปีสูงสุดจะเกิดขึ้นหลังช่วงวันที่มีกลางวันกลางคืนเท่ากัน (Equinox Periods)
- เหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันรายวันสูงสุดจะเกิดขึ้นประมาณ 1 ชั่วโมงภายหลังที่ดวงอาทิตย์ตกที่ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

### 2.2.3.3 การขึ้นกับตำแหน่งบนโลก (Geographic Dependence)

- สำหรับการสื่อสารดาวเทียม การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่มีความรุนแรงจะเกิดภายในบริเวณละติจูด  $\pm 30^\circ$  ของเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็ก

### 2.2.3.4 การขึ้นกับความถี่ (Frequency Dependence)

- ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน หรืออัตราการจางหาย (Fading Rate) ต่ำกว่า 1 Hz ด้วยความถี่หักมุม (Corner Frequency) ประมาณ 0.1 Hz
- คาบ (Period) ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน โดยปกติน้อยกว่า 15 วินาที
- กำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectra) ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน โดยปกติมีโรลออฟ (Roll Off) ที่  $f^{-3}$
- การขึ้นอยู่กับความถี่จะเปลี่ยนแปลงตาม  $f^{-n}$  สำหรับความถี่จิกะเฮิร์ตซ์ ทฤษฎีกระจัดกระจายค่าน้อยๆ (Weak Scattering Theory) ทำนายให้  $n$  เป็น 2 แต่ในการทดลอง [15] ที่ความถี่ระหว่าง 4 และ 6 GHz พบค่า  $n$  เป็น 1.5

## 2.3 ผลกระทบของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นบริเวณชั้นบรรยากาศรอบโลกที่ความสูงเหนือผิวโลกถึงประมาณ 15 กิโลเมตร การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศที่ความสูงเพียงไม่กี่กิโลเมตร โดยเป็นผลจากความไม่สม่ำเสมอของความกดบรรยากาศ (Atmospheric Pressure), อุณหภูมิ และความดันไอน้ำ (Water Vapor Pressure) ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

### 2.3.1 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

โดยทั่วไปอากาศบนผิวโลกที่ความสูงต่างๆ จะมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลทำให้ค่าดัชนีหักเหของอากาศเหนือผิวโลกที่ความสูงต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน และคลื่นที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากันก็จะเบี่ยงเบนทิศทางไปจากเส้นตรง เมื่อบรรยากาศสงบนิ่ง ค่าดัชนีหักเหจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ตามความสูง และช้ามากๆ ในระนาบแนวนอน การกระเพื่อมขนาดเล็ก (Small-Scale Fluctuation) ของดัชนีหักเหตามเส้นทางการแพร่กระจายเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันทั้งทางเฟสและแอมพลิจูด ที่ซึ่งสามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงได้ที่ระดับสัญญาณของเครื่องรับ สามารถประยุกต์ใช้สภาวะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในส่วนของขนาดเฟรสนัลที่หนึ่ง และผลกระทบโดยปกติไม่ดูดกลืน (Non-Absorptive) และเกิดบนแกน (On-Axis) อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ไม่เหมือนกันของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่อง

จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ คือ ผลกระทบอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่เกิดขึ้น ชั้นแรกต้องประมาณค่าดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยโครงสร้างดัชนีหักเหสามารถพิจารณาได้เป็นชั้นๆ ตามแนวนอน และการเปลี่ยนแปลงนี้ปรากฏเป็นชั้นบางๆ ที่เปลี่ยนตามความสูง และพบว่า เส้นทางการเดินทางของคลื่นที่มุมเงยต่ำๆ นั้น โครงสร้างของชั้นก็จะลาดเอียงมาๆ ที่ซึ่งเป็นผลกระทบที่สำคัญของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน [2]

### 2.3.2 ดรรชนีหักเห (Refractive Index)

อัตราส่วนของความเร็วของคลื่นวิทยุในที่ว่าง (In Vacuo) ต่อความเร็วในตัวกลางที่ได้พิจารณา ถูกเรียกว่า ดรรชนีหักเห  $n$  ของตัวกลางนั้น สำหรับอากาศแห้งที่สะอาด (Clean Dry Air) ในบริเวณบรรยากาศต่ำๆ ดรรชนีหักเหกำหนดโดย [9]

$$n(\text{dry}) = 1 + 77.6(P/T) \times 10^{-6} \quad (2.26)$$

ซึ่ง  $P$  คือ ความกดบรรยากาศมีหน่วยเป็น มิลลิบาร์ (mb) และ  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature) มีหน่วยเป็น เคลวิน ส่วนประกอบก๊าซของบรรยากาศนั้นเป็นค่าคงที่ตามตำแหน่งภูมิศาสตร์ และตามความสูงเหนือพื้นโลกถึง 50 กิโลเมตร สมการ (2.26) นั้นสามารถประยุกต์ใช้สำหรับบรรยากาศแห้งที่สะอาด ที่ตำแหน่งใดๆ บนโลก อย่างไรก็ตามในส่วนของดรรชนีหักเหเปียก (Wet) กำหนดโดย

$$n(\text{wet}) = 375,000(e/T^2) - 5.6(e/T) \quad (2.27)$$

ซึ่ง  $e$  คือ ความดันไอน้ำมีหน่วยเป็น มิลลิบาร์ สองเทอมในสมการ (2.27) สามารถรวมกันเพื่อแสดงการประมาณได้ดังนี้

$$n(\text{wet}) = 373,000(e/T^2) \quad (2.28)$$

ดรรชนีหักเหเปียกและแห้งสามารถรวมกันทางคณิตศาสตร์เป็น ดรรชนีหักเหทั้งหมด  $n$  นำสองดรรชนีมาจัดใหม่รวมกันเป็น

$$n - 1 = (77.6/T) \times (P + 4,810(e/T)) \times 10^{-6} \quad (2.29)$$

ทั้งนี้เพื่อความสะดวก เพราะ  $n$  มีค่าใกล้ 1 มาก ( $n = 1.0003$ ) จึงมีการกำหนดให้อยู่ในเทอมของ  $N$  ที่ซึ่ง  $N$  คือ สภาพหักเห (Refractivity) จำนวนหนึ่งล้านครั้งที่ครรชนหักเหมีค่าเกินหนึ่ง นั่นคือ

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (2.30)$$

ดังนั้น

$$N = \frac{77.6}{T} \left[ p + 4,810 \frac{e}{T} \right] \quad (2.31)$$

หรือ [16]

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2.32)$$

$$\underbrace{\quad}_{N_{\text{dry}}} \quad \underbrace{\quad}_{N_{\text{wet}}}$$

ความดันไอน้ำ ( $e$ ) สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ( $U$  ในหน่วยเปอร์เซ็นต์) และความดันของไอน้ำอิ่มตัว ( $e_s$ ) ด้วยสมการ  $e = U \cdot e_s / 100$   $e_s$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิในบรรยากาศด้วยสมการ Goff Gratch สามารถหาได้จากสมการ (2.33) และจากลักษณะทางธรรมชาติของครรชนหักเห ในเทอมแรกของสมการ (2.32) ในบางครั้งเรียกว่า คายเทอม ( $N_{\text{dry}}$ ) และในเทอมที่สองเรียกว่า เว็ทเทอม ( $N_{\text{wet}}$ ) [16]

$$e_s = \frac{5,854 \times 10^{(20-2950/(273+t))}}{(273+t)^5} \quad \text{มิลลิบาร์} \quad (2.33)$$

ซึ่ง  $t$  คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็น เซลเซียส ในการคำนวณหาค่า  $N$  ที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงควรใช้สมการ (2.26)-(2.27) รวมกัน โดยไม่ใช้สมการ (2.28) อย่างไรก็ตามพบว่าสมการ (2.31) ให้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงอยู่ภายใน 0.5% สำหรับทุกความถี่ที่ต่ำกว่า 100 GHz ค่า  $N$  สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งในปริมาณที่เล็กและใหญ่ และตามความเร็วที่แตกต่าง การเปลี่ยนแปลงของ  $P$ ,  $T$  และ  $e$  สามารถพิจารณาที่ขนาดต่างๆ คือ [17]

(ก) บนขนาดที่ใหญ่ที่สุด (Largest Scale) ชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ถูกแบ่งเป็นชั้นๆ ในแนวนอน เนื่องจากผลกระทบของแรงโน้มถ่วง (Gravity)

- (ข) บนขนาดกลาง (Medium Scale) (100 เมตร ถึง 100 กิโลเมตร) พื้นดิน และอุตุนิยมวิทยา สามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระยะทาง และเวลา
- (ค) บนขนาดเล็ก (Small Scale) (น้อยกว่า 100 เมตร) เทอร์บิวเลน มิกซ์ซึ่ง ทำให้เกิดการกระจัดกระจาย และการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

ITU-R ได้แนะนำสมการที่เกี่ยวกับการหาค่า  $N$  สำหรับใช้ที่ความสูงจากพื้น โลกเพียงไม่กี่ กิโลเมตร พบว่า ค่า  $N$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามความสูงจากพื้นผิวโลก ( $h$ ) ด้วยลักษณะการจำลองแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Model) ดังนี้ [2]

$$N = 315e^{-(h/7.36)} \quad (2.34)$$

การเปลี่ยนแปลงในสภาพหักเหขนาดเล็ก ดังเช่นที่เกิดจากปรากฏการณ์ตรงข้ามของอุณหภูมิ (Temperature Inversion) หรือเทอร์บิวเลน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน การประมาณปริมาณของระดับการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่ซึ่งเกิดจากชั้นเทอร์บิวเลนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทำได้โดยการกำหนดว่า การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงมีเพียงเล็กน้อยในชั้นเทอร์บิวเลนบางๆ และใช้การพิจารณาทฤษฎีเทอร์บิวเลน การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันจะได้ดังนี้ [2]

$$x(\text{dB}) = \log r \quad (2.35)$$

$r$  คือ ค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ ความแปรปรวน (Variance) ของล็อกของค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ ( $\sigma_x^2$ ) หาได้ดังนี้

$$\sigma_x^2 = 42.25 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \int_0^L C_m^2(x) x^{5/6} dx \quad (2.36)$$

ซึ่ง  $C_m(x)$  คือ ค่าคงที่ของโครงสร้างดรรชนีหักเห,  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น,  $x$  คือ ระยะทางตามเส้นทาง และ  $L$  คือ ความยาวของเส้นทางทั้งหมด โดยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนี้จะขึ้นอยู่กับ  $C_m^2(x)$  ที่ซึ่งเป็นค่าที่หาได้ไม่ง่าย และจากสมการ (2.36) ยังแสดงให้เห็นถึงการขึ้นอยู่กับความถี่ และการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในรูป r.m.s ( $\sigma_x$ ) จะเปลี่ยนตาม  $f^{7/12}$  เช่น ที่ความถี่ 10 GHz ช่วงของ  $\sigma_x$  จะมีค่าประมาณ 0.1 ถึง 1 เดซิเบล และที่ความถี่ 100 GHz  $\sigma_x$  จะมีค่าประมาณ 0.38 ถึง 3.8 เดซิเบล ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการ

วิเคราะห์ทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในที่นี้อาศัยรูปแบบจำลองของ ITU-R Report 718-3 (1990) โดยมีสมการ คือ [9, 18]

$$\sigma_{\text{pre}} = \sigma_{\text{ref}} f^{7/12} g(x) / (\sin\theta)^{1.2} \quad (2.37)$$

ซึ่ง  $f$  คือ ความถี่มีหน่วยเป็น GHz,  $\theta$  คือ มุมเงยของจานสายอากาศมีหน่วยเป็นองศา,  $g(x)$  คือ ตัวประกอบค่าเฉลี่ยของสายอากาศ (Antenna Averaging Factor) ที่หาได้จากเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศ และประสิทธิภาพของสายอากาศ และ  $\sigma_{\text{ref}}$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งหาได้จากค่าครรชนีหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในเวทเทอม  $N_{\text{wet}}$  โดย  $\sigma_{\text{ref}}$  หาได้จาก

$$\sigma_{\text{ref}} = (3.6 \times 10^{-3}) + (1.03 \times 10^{-4}) N_{\text{wet}} \quad (2.38)$$

ที่ซึ่ง  $N_{\text{wet}}$  หาได้จากสมการ (2.32) สมการการคาดคะเนหรือทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ในสมการ (2.37) จะอธิบายโดยละเอียดและนำไปใช้ในการทำนายต่อไปในบทที่ 4

### 2.3.3 คุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

บนพื้นฐานของการทดลองวัดคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในระยะยาว ต่อเนื่องมากกว่า 1 ปี สามารถสรุปคุณลักษณะต่างๆ ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันได้ ดังนี้ [9]

#### 2.3.3.1 การขึ้นกับสภาพอากาศ (Meteorological Dependence)

- มีความสัมพันธ์กันดีกับอุณหภูมิและความชื้น โดยเมื่อ อุณหภูมิสูง และความชื้นสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรงมากด้วย
- การแสดงความสัมพันธ์กับลม ความเร็วลมเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์อย่างอ่อนๆ ตามทิศทางลม ที่องค์ประกอบใหญ่ของการเคลื่อนที่ของลมในแนวตั้งเนื่องจากการพาที่รุนแรงเป็นผลในระหว่างที่เหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันสูง
- ฝน ไม่เป็นผลกระทบที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันจนกระทั่งการลดทอนของเส้นทาง (Path Attenuation) มากกว่า 5 เดซิเบล ที่ปลายของความถี่ต่ำของกำลังเชิงสเปกตรัมถูกเปลี่ยนแปลงโดยฝน แต่ความถี่หักมุมและความถี่โรลล์ออฟจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

### 2.3.3.2 การขึ้นกับเวลา (Temporal Dependence)

- มีความสัมพันธ์กันดีกับวัฏจักรของฤดูกาล (Seasonal Cycle) และมีความสัมพันธ์อย่างอ่อนๆ กับวัฏจักรของวัน (Diurnal Cycle) ซึ่งเกิดขึ้นตรงกันกับช่วงที่อุณหภูมิสูงและความชื้นสูง การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่รุนแรงจะเกิดก่อนบ่าย และในช่วงกลางของฤดูร้อน สำหรับบริเวณละติจูดบริเวณเขตร้อน และใกล้เขตร้อน การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่รุนแรงจะตรงกับฤดูฝน ของบริเวณนั้นๆ

### 2.3.3.3 การขึ้นกับตำแหน่งบนโลก (Geographic Dependence)

- มีความสัมพันธ์หลักๆ ตามอุณหภูมิที่สูง และความชื้นที่สูง ดังนั้นจะขึ้นกับตำแหน่งละติจูด โดยที่ละติจูดสูงๆ จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่เย็นกว่า จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่ต่ำ หรือรุนแรงน้อยกว่าบริเวณละติจูดเขตร้อน และไม่ปรากฏว่ามีเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเส้นแวง (Longitude)

### 2.3.3.4 การขึ้นกับความถี่ (Frequency Dependence)

- เมื่อใช้จานสายอากาศที่มีขนาดและชนิดเดียวกัน วิศวกรรมการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ที่ 2 ความถี่ หรือมากกว่า มีความสัมพันธ์กันดีระหว่างการเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่วัดได้ที่ 2 ความถี่ตามเส้นทางเดียวกัน และระยะเวลาเดียวกัน [16]
- ระบบที่มีความถี่สูงกว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่รุนแรงกว่าระบบที่มีความถี่ต่ำกว่า [16] แอมพลิจูดของการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันที่ขึ้นกับความถี่ เป็นอัตราส่วนของความถี่ที่เพิ่มขึ้น  $f^{7/12}$
- อัตราการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูดนั้นจะน้อยกว่าในกรณีของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยความถี่ห่ากมมต่ำกว่า และความถี่โรตส์ออฟชันน้อยกว่า กำลังเชิงสเปกตรัมโรตส์ออฟที่  $f^{-8/3}$  โดยปกติไม่ขึ้นกับมุมเงยและความถี่ แต่ความถี่ห่ากมมและอัตราการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูดจะเปลี่ยนแปลงตามมุมเงย

### 2.3.3.5 การขึ้นกับระบบ (Systematic Dependence)

- ถ้ามุมเงยต่ำลง จะทำให้
  - การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเพิ่มขึ้น [16]
  - คาบ (Period) ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเพิ่มขึ้น
  - ความถี่ห่ากมมลดลง
  - มีการเพิ่มขึ้นในผลกระทบของมัลติพาท

- ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศเล็กลง จะทำให้
  - การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันเพิ่มขึ้น
  - ความน่าจะเป็นของมัลติพาทเพิ่มขึ้น
- การแยกกันของสายอากาศแบบไดเวอร์ซิตีตามแนวอนประมาณ 500 เมตร จะไม่เกี่ยวข้องกันอย่างแท้จริงในผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันตามเส้นทางทั้งสอง ที่มุมเงยต่ำมากๆ (น้อยกว่า 3°) การห่างกันของสายอากาศทั้งสองในแนวตั้งเป็นผลให้ไม่เกี่ยวข้องกันมากกว่าการห่างกันของสายอากาศที่ระยะห่างตามแนวอนเดียวกัน

## 2.4 ธรรมชาติการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันและความเข้มของกระบวนการ

การวัดระดับความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นสามารถวัดได้หลายวิธี โดยวิธีที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้กันมาก คือ การอ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของระดับสัญญาณที่รับได้ในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนด วิธีนี้เรียกว่า Peak to Peak แต่เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณมีความแปรปรวน และเกิดขึ้นแบบสุ่ม จึงมีการคำนวณค่าที่สามารถแสดงระดับการเปลี่ยนแปลงได้ละเอียดยิ่งขึ้น เรียกว่า ธรรมชาติการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน (Scintillation Index) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ คือ

### 2.4.1 ธรรมชาติ SI

ค่าธรรมชาติ SI เป็นการประมาณการวัดความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่ง่าย ๆ โดยมักใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันดับหนึ่ง (First-Order Analysis) กำหนดโดย

$$SI = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (2.39)$$

ซึ่ง  $P$  แทนค่ากำลังของสัญญาณ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงสภาวะปรากฏการณ์ที่เกินจริง (Overemphasizing) จึงได้พิจารณาค่ายอดที่สามจากค่าสูงสุดและต่ำสุดในช่วงเวลาหนึ่งๆ  $P_{\max}$  คือ ระดับกำลังของค่ายอดที่สามจากค่ายอดที่สูงสุดในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนด และ  $P_{\min}$  คือ ระดับกำลังของค่ายอดที่สามจากค่ายอดที่ต่ำสุดในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนด ซึ่งวัดในหน่วยของ เดซิเบล [19]

### 2.4.2 ธรรมชาติ $S_4$

เป็นค่าธรรมชาติการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่ใช้โดยทั่วไปเพื่อแสดงถึงความเข้มของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน Briggs และ Parkin [3] ได้นำ

เสนอชุดของครรชนีในเทอมของ  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ครรชนี  $S_4$  เป็นครรชนีที่ซึ่งสัมพันธ์กับเวลาที่กำหนดโดยค่ารากที่สองของค่าความแปรปรวน (Variance) ของกำลังสัญญาณที่รับได้หารด้วยค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณนั้น ในหน่วยวัตต์ ซึ่งเป็นค่าออร์เมทไลซ์ (Normalize) ความแปรปรวนของความเข้มสัญญาณ

$$S_4 = \left( \frac{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}{\langle A \rangle^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

ซึ่ง  $A$  คือ ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ และ  $\langle \rangle$  แทนค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนด

หรือหา  $S_4$  ได้จาก

$$S_4 = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (2.41)$$

โดยที่  $\sigma_x$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) หรือความเข้มของกระบวนการการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน (Scintillation Intensity)  $m_x$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล (Mean Value) โดยสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$m_x = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.42)$$

$$\sigma_x = s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.43)$$

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ในครรชนี  $S_4$  สามารถคำนวณได้โดยทำการเฉลี่ยสัญญาณทุกๆ ช่วงเวลาใดๆ ที่กำหนด โดยปกติใช้ 1 นาที [9] ค่าครรชนี  $S_4$  ที่เท่ากับ 0.5 เป็นตัวแบ่งระหว่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอย่างอ่อน (Weak Scintillation) และอย่างรุนแรง (Strong Scintillation) ซึ่งบางครั้งค่าครรชนี  $S_4$  อาจมากกว่า 1

ITU-R เสนอความสัมพันธ์ที่ได้จากการเฝ้าสังเกตระหว่างครรชนี  $S_4$  กับค่ายอดถึงยอดของการแกว่งขึ้นลงโดยประมาณ ( $P_{fluc}$ ) ในหน่วยเดซิเบล ได้ดังสมการต่อไปนี้ [10]

$$P_{fluc} = 27.5 S_4^{1.26} \quad (\text{เดซิเบล}) \quad (2.44)$$

เพื่อความสะดวกในการแปลงไปมาระหว่างค่าดัชนี  $S_4$  กับค่ายอดถึงยอดของการแกว่งขึ้นลงโดยประมาณ ( $P_{fluc}$ ) จึงได้คำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแปลงดัชนี  $S_4$  กับค่ายอดถึงยอดของการแกว่งขึ้นลงโดยประมาณ ( $P_{fluc}$ )

$S_4$	$P_{fluc}$ (dB)
0.1	1.5
0.2	3.5
0.3	6
0.4	8.5
0.5	11
0.6	14
0.7	17
0.8	20
0.9	24
1.0	27.5

## 2.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงลักษณะที่สำคัญต่างๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่มีผลทำให้สัญญาณความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสอย่างกระทันหัน ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและเฟสอย่างกระทันหันนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานีสังเกต โดยปกติการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มักจะเกิดในช่วงเวลากลางคืนหลังดวงอาทิตย์ตก ซึ่งระยะเวลาการเกิดและความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับขนาดรัศมีของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน โดยพิจารณาจากรัศมีขอบเขตเฟรสเนลที่หนึ่ง และระดับความสูงของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอนี้ด้วยที่จะทำให้ระดับความรุนแรงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแตกต่างกันไป ในขณะที่การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มักจะเกิดมากในช่วงอากาศร้อน ช่วงเวลากลางวัน โดยปริมาณการเกิดและความรุนแรงของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงในดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงใน ความกดบรรยากาศ อุณหภูมิ และความดันไอน้ำ เนื่องจากการวิเคราะห์และทำ

การทดลองสำหรับการเปลี่ยนแปลงเฟสอย่างกะทันหันนั้นค่อนข้างซับซ้อน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงพิจารณาเฉพาะกรณีของระดับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันเท่านั้น

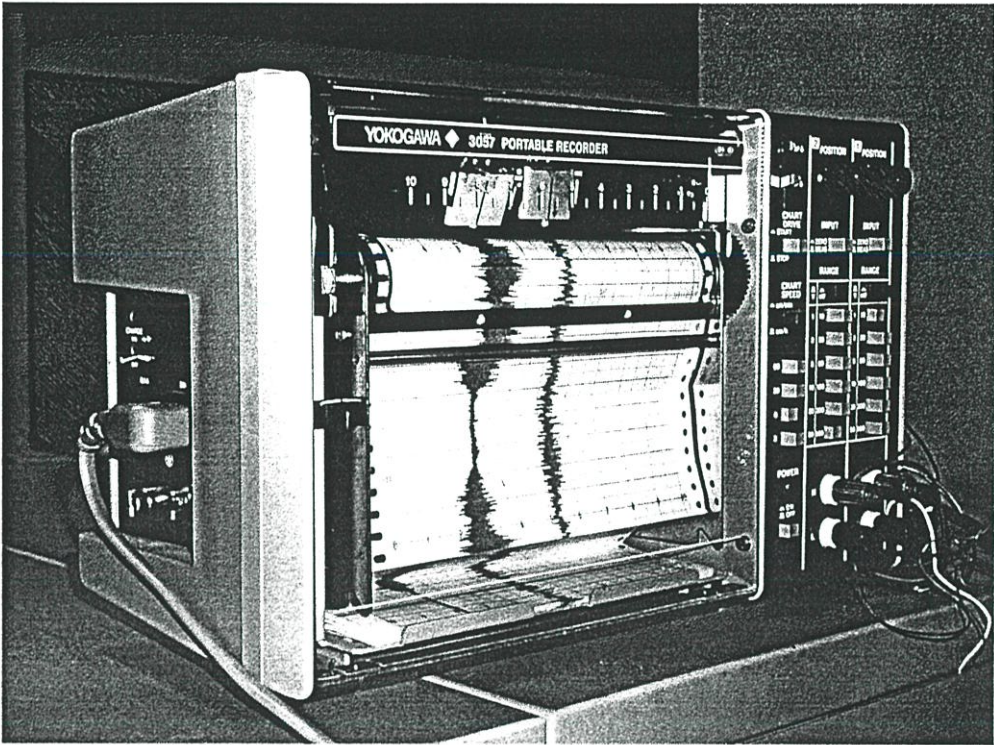
กรณีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน  $S_4$  และ  $\sigma_x$  ใช้ในการแสดงถึงความเข้มของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ซึ่งจะได้นำไปใช้ในบทที่ 3 ต่อไป

## บทที่ 3

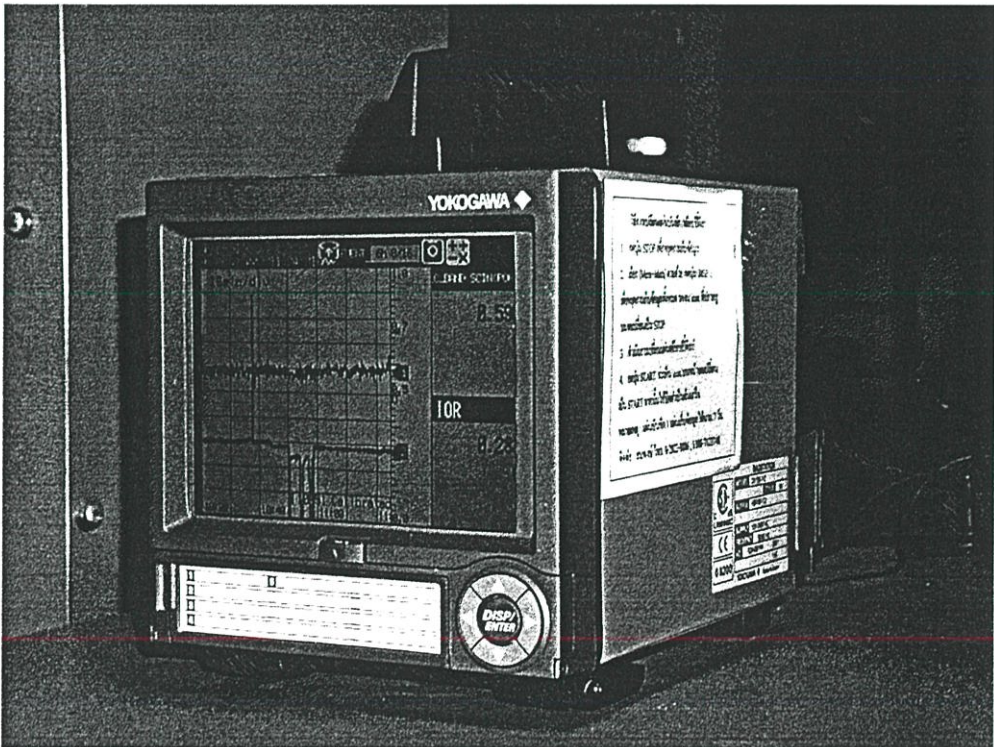
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 3.1 การทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

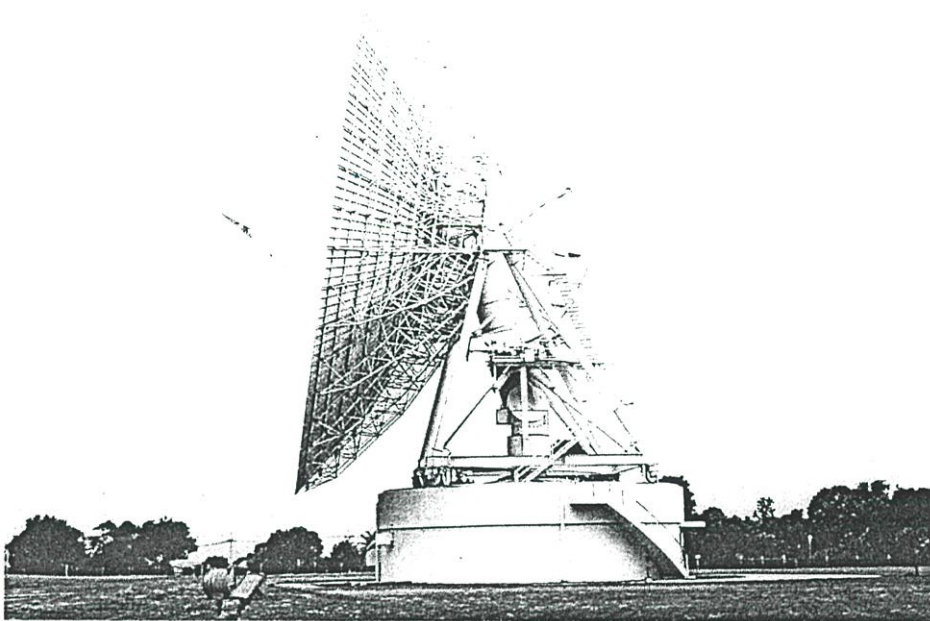
การทดลองนี้ได้ทำการติดตั้งเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมที่ สถานีดาวเทียมศรีราชา จ.ชลบุรี รับสัญญาณบีคอนแถบความถี่ C จากดาวเทียม INTELSAT 802 ( $174^{\circ}$  E) ที่อยู่เหนือมหาสมุทรแปซิฟิก (POR) มีมุมเงยของจานสายอากาศต่ำ 8 องศา และจากดาวเทียม INTELSAT 904 ( $60^{\circ}$  E) ที่อยู่เหนือมหาสมุทรอินเดีย (IOR) มีมุมเงยของจานสายอากาศ 40 องศา โดยแผนที่เขตบริการ (Coverage Map) ของดาวเทียมทั้งสองแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และจากค่ามุมเงยทั้ง 2 ดังกล่าวสามารถคำนวณหาความยาววิถีจากจานสายอากาศไปยังกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน จากภาคผนวก ข. โดยกำหนดให้ความสูงของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนประมาณ 350 กิโลเมตร ดังนั้นจะได้ความยาววิถีของการรับสัญญาณจากย่าน IOR และ POR เท่ากับ 544.5 กิโลเมตร และ 2,514.8 กิโลเมตร ตามลำดับ และจากภาคผนวก ข. ยังสามารถคำนวณหาความยาววิถีของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในช่วงที่คลื่นตัดผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในชั้น F ที่ความสูงตั้งแต่ 200 กิโลเมตร จนถึง 1,000 กิโลเมตร ดังนั้นจะได้ช่วงความยาววิถีของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในช่วงที่ตัดผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอจากย่าน IOR และ POR เท่ากับ 1,244.6 กิโลเมตร และ 5,748.3 กิโลเมตร ตามลำดับ ในช่วงแรกบันทึกสัญญาณดาวเทียม POR ด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณลงบนกระดาษบันทึก (Recording Chart) ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2543 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2544 รวม 14 เดือน (เนื่องจากในช่วงแรกยังไม่มีเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล) ทำการวิเคราะห์ความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในรูปของค่าการแกว่งยอดถึงยอด (Peak to Peak) ตามการเปลี่ยนแปลงในรายวัน และการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และในช่วงที่สองได้บันทึกสัญญาณดาวเทียม POR ด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2545 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2545 รวม 1 ปี เพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในรูปของค่าการแกว่งยอดถึงยอด, ค่าครรชน  $S_4$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma$  และได้ทำการบันทึกสัญญาณดาวเทียม IOR ด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2545 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2545 รวม 6 เดือน เพื่อนำข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างมุมเงยสูงกับมุมเงยต่ำ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูล POR รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียม YOKOGAWA 3057 Portable Model : 3057 22 ลงบนกระดาษบันทึกต่อเนื่องด้วยความเร็ว (Speed) 6 เซนติเมตรต่อชั่วโมง และรูปที่ 3.2 แสดงเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล YOKOGAWA DAQSTATION Model : DX 106-1-2 Style : S4 ลงบนแผ่นดิสก์แอกขนาด 3.5 นิ้ว อย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราการชักตัวอย่างทุกๆ 1 วินาที



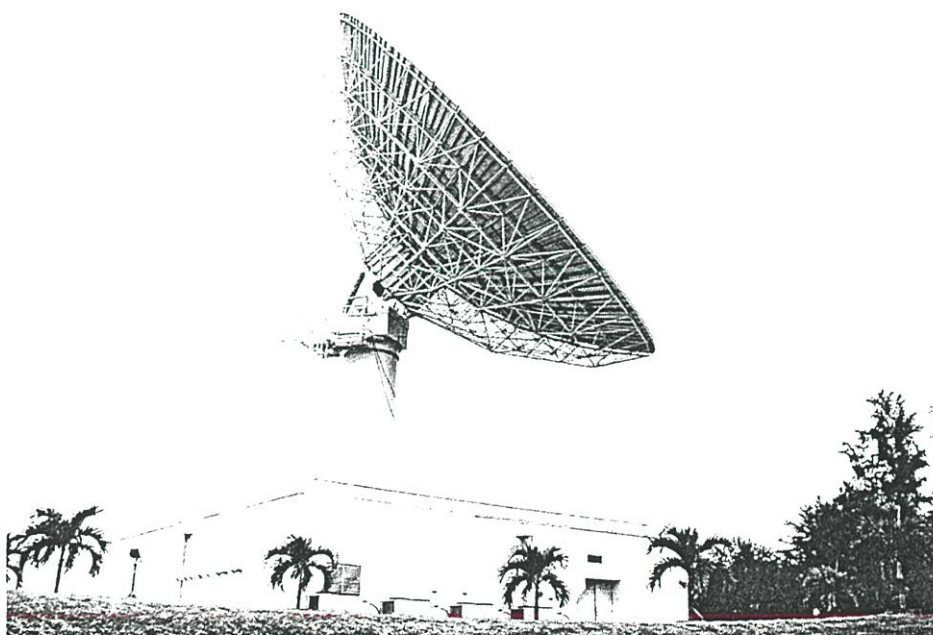
รูปที่ 3.1 เครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียม YOKOGAWA 3057 Portable Model : 3057 22  
ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 เครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล YOKOGAWA DAQSTATION  
Model: DX 106-1-2 Style : S4 ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 งานสายอากาศแคสซีเกรนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 เมตร รับสัญญาณดาวเทียมจากดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรแปซิฟิก (POR)

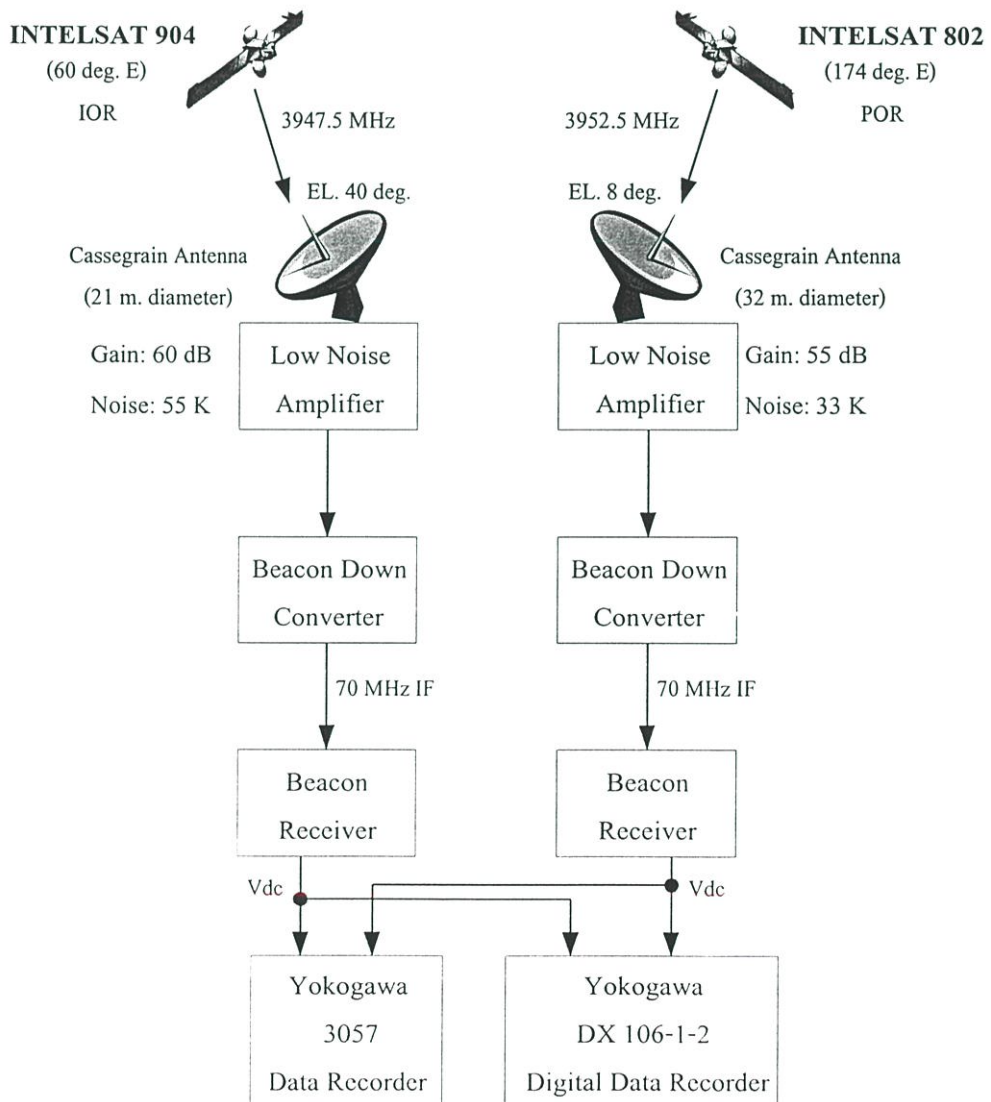


รูปที่ 3.4 งานสายอากาศแคสซีเกรนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 21 เมตร รับสัญญาณดาวเทียมจากดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรอินเดีย (IOR)

รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงภาพถ่ายงานสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณดาวเทียม POR มีมุมเงยของงาน  $8^\circ$  และ สัญญาณดาวเทียม IOR มีมุมเงยของงาน  $40^\circ$  ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของการตรวจวัด

ดาวเทียม	INTELSAT 904	INTELSAT 802
ตำแหน่งดาวเทียม	60° E (IOR)	174° E (POR)
มุมเงย	40°	8°
มุมแอดซิมัท	255.2°	93.96°
ความถี่ขาลง	3947.5 MHz	3952.5 MHz
โพลาไรเซชัน	RHCP	RHCP
ตำแหน่งของจานสายอากาศรับ	13° 06' N , 100° 56' E	
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจานสายอากาศ	21 เมตร	32 เมตร
อัตราขยายของจานสายอากาศ	60.4 เดซิเบล (4 GHz)	65 เดซิเบล (4 GHz)



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบตรวจวัด

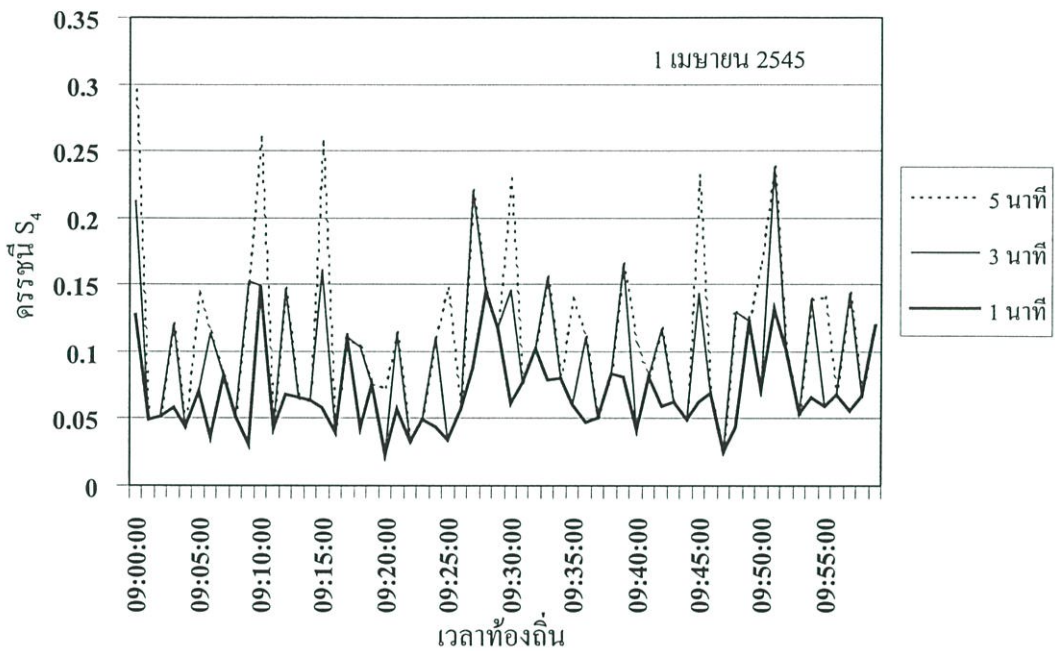
รายละเอียดของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1 และบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.5 สัญญาณบีคอน จากดาวเทียม ที่รับได้จะถูกแปลงความถี่เป็น 70 MHz IF ที่ Beacon Down Converter ส่งผ่านไป ที่ Beacon Receiver Converter ซึ่งจะเลือกสัญญาณบีคอนออกมาความถี่หนึ่ง และจะแปลงเป็น สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับความแรงของสัญญาณที่รับได้ จากนั้น จะส่งต่อไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมทั้งสอง ในระบบตรวจวัดที่ใช้งานจริงที่สถานีดาว เทียมศรีราชา นี้ สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวจะส่งต่อไปยังหน่วยควบคุมงานสายอากาศ (Antenna Control Unit, ACU) ACU จะรับผิดชอบในการพิจารณาค่าระดับสัญญาณบีคอนที่ เหมาะสม ผ่านขบวนการติดตาม (Tracking) แบบ Steptrack โดยสร้างสัญญาณควบคุมส่งไปยัง มอเตอร์ควบคุมงานสายอากาศ

### 3.2 วิธีการวิเคราะห์

โดยปกติการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณจะเกิดอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ คำนึงถึงสภาพของอากาศ ว่าท้องฟ้าปลอดโปร่ง หรือมีฝนตก อย่างไรก็ตามในสถานะที่มีฝนตก ระดับการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของสัญญาณอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน จะเกิดพร้อมกับระดับการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องจากฝน ดังนั้นจึงควรระวังในการวิเคราะห์ ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในระหว่างที่ฝนตก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำ การวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน โดยไม่ได้แยกผลจากการลดทอน ของสัญญาณอันเนื่องจากฝน

การวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันจากกระดาศกราฟ บันทึก ที่บันทึกด้วยเครื่องบันทึก Yokogawa 3057 จะทำการวิเคราะห์โดยแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ช่วงละ 5 นาที สาเหตุที่ต้องวิเคราะห์เพียงช่วงละ 5 นาที เพราะความละเอียดของกระดาศบันทึก ที่ ซึ่งมีขนาดละเอียดสุด คือ 1 ช่องเล็กของกระดาศมีขนาด 5 นาที ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลดิจิทัล ที่บันทึกด้วยเครื่องบันทึกดิจิทัล Yokogawa DX 106 ลงบนหน่วยความจำ ด้วยอัตราการชักตัว อย่าง (Sampling Rate) 1 Hz ทำการวิเคราะห์โดยแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ช่วงละ 1 นาที สาเหตุ ที่ต้องวิเคราะห์ช่วงละ 1 นาที เพราะการวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่าง กระทันหันด้วยครรชนี  $S_4$  โดยทั่วไปจะทำการพิจารณาเป็นช่วง ช่วงละตั้งแต่ 1 นาทีขึ้นไป [9] และ จากการทดลอง [20] พบว่าการแบ่งพิจารณาข้อมูลออกเป็นช่วง ช่วงละ 1 นาที, 3 นาที และ 5 นาที สำหรับการเกิดการแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอย่างอ่อน ( $S_4 < 0.5$ ) จะได้ค่าครรชนี  $S_4$  ที่ไม่ แตกต่างกันมาก และจากการทดลองคำนวณค่าครรชนี  $S_4$  ด้วยการแบ่งช่วงเวลาคำนวณที่แตกต่าง กันออกไป ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าการแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงละ 5 นาที จะให้ค่าของ ครรชนี  $S_4$  ที่สูงกว่าช่วงละ 3 นาที และช่วงละ 1 นาที ตามลำดับ แต่เพื่อการพิจารณาที่ละเอียดของ ค่าความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการวิเคราะห์

ข้อมูลช่วงละ 1 นาที สัญญาณดาวเทียมที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณทั้งสองเป็นสัญญาณในรูปของแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) แต่ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันนั้น ได้ทำการพิจารณาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ ในหน่วยเดซิเบล (dB) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับเทียบค่า (Calibrate) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังสัญญาณ (dB) ซึ่งจากภาคผนวก ก. จะทำให้ได้ค่าความแรงของสัญญาณในรูปกำลัง (dBm)



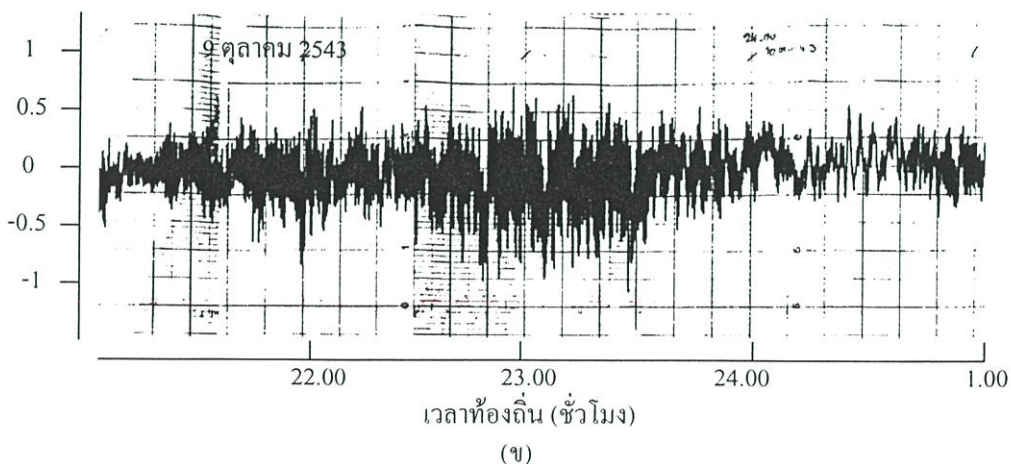
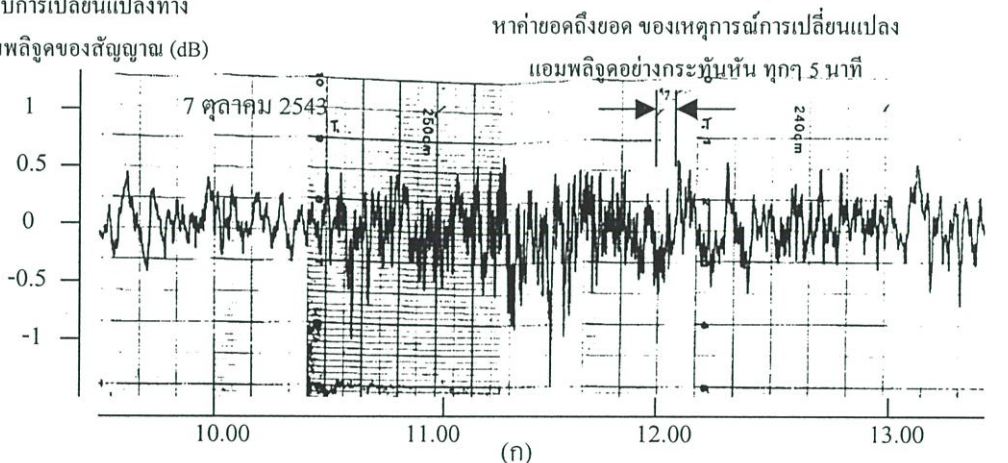
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบค่าครรชนี  $S_4$  ที่คำนวณด้วยช่วงเวลาการคำนวณที่แตกต่างกัน

จากทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 และจากผลการทดลองใน [20] พบว่า การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันโดยมากจะเกิดขึ้นหลังจากดวงอาทิตย์ตกดินจนกระทั่งหลังเที่ยงคืน ดังนั้นจึงสามารถกำหนดได้ว่า การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่เกิดขึ้นในเวลากลางวันเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์สามารถเกิดได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน แต่ในเวลากลางวัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรงกว่าในเวลากลางคืน ตามปริมาณการเปลี่ยนแปลงในครรชนีหลักของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้นการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในเวลากลางคืนจึงเป็นผลของทั้งสองชั้นบรรยากาศ โดยการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเห็นได้ชัดเจนกว่า ซึ่งเป็นการยากในการวิเคราะห์ผลของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันว่าเกิดเนื่องจากผลกระทบของ

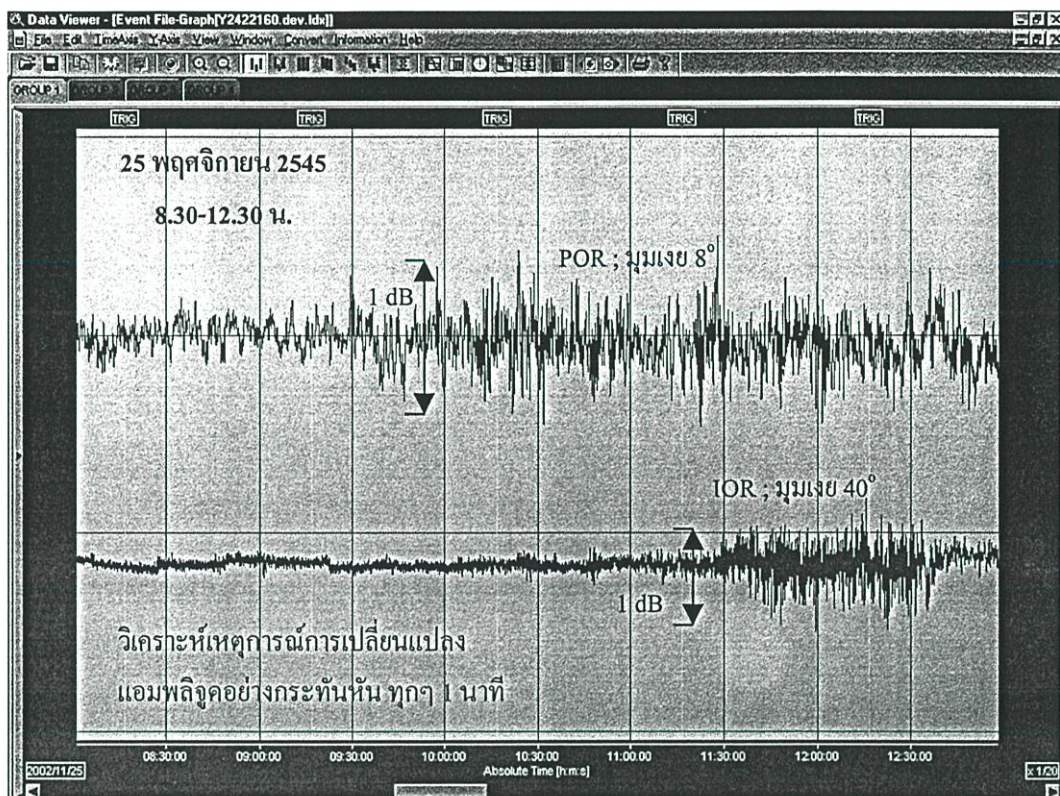
ชั้นบรรยากาศใด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในเวลากลางคืน เป็นผลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในเวลากลางวัน เป็นผลของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ตามเหตุผลดังกล่าวข้างต้นและจากการสังเกตลักษณะแบบรูปของสัญญาณที่บันทึกได้ โดยในตอนกลางคืน สัญญาณการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันจะมีความถี่ของการแกว่งที่สูงกว่า สัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในตอนกลางวัน ดังรูปที่ 3.7 (ก)-(ข) และรูปที่ 3.8 (ก)-(ข) ซึ่งบันทึกได้บนกระดาษกราฟ และเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล ตามลำดับ โดยรูป (ก) แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยปกติมีคาบเวลา (Period) ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันมากกว่า 15 วินาทีและน้อยกว่า 2 นาที [16] และในรูป (ข) แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีคาบเวลาของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันน้อยกว่า 15 วินาที

ระดับการเปลี่ยนแปลงทาง

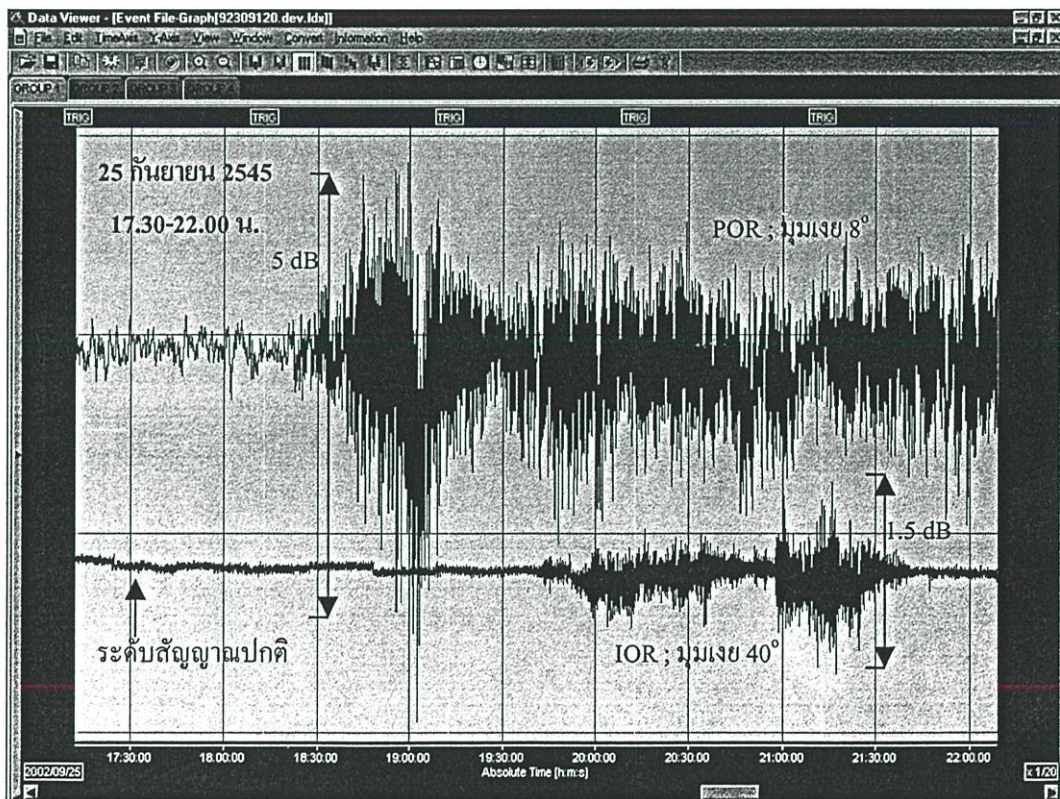
แอมพลิจูดของสัญญาณ (dB)



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างแบบรูปโดยทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน (ก) อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ข) อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



(ก) โทโร โปสเฟียร์ริก ซินทิลเลชัน



(ข) ไอโอ โนสเฟียร์ริก ซินทิลเลชัน

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแบบรูปโดยทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล

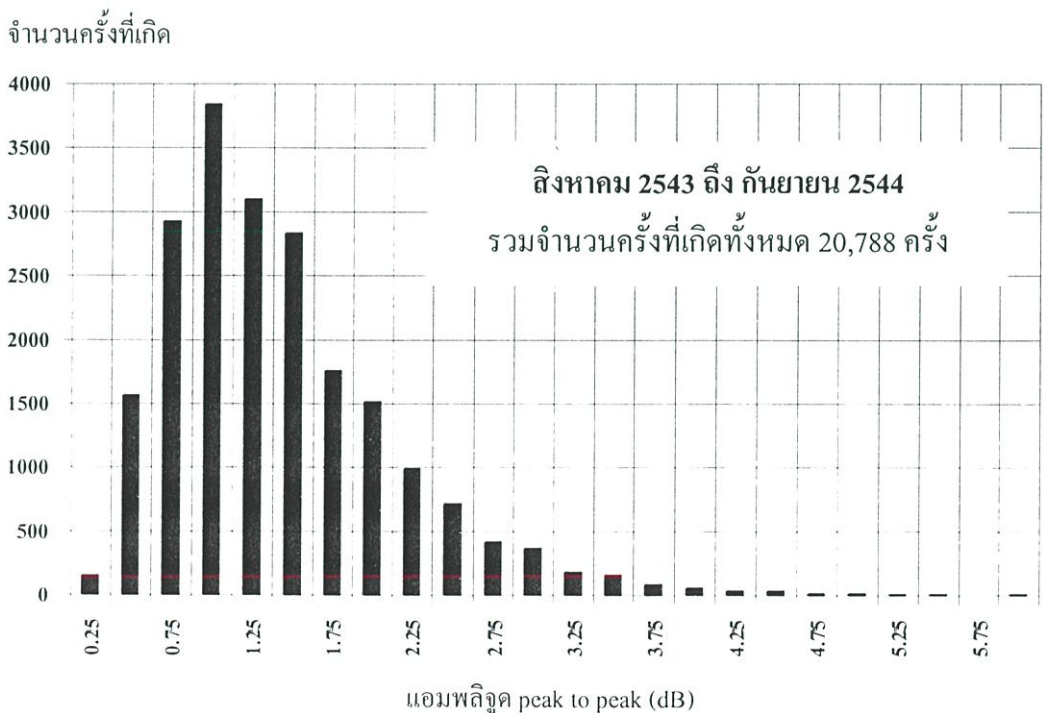
### 3.3 ผลการวิเคราะห์

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากกระดาศกราฟ

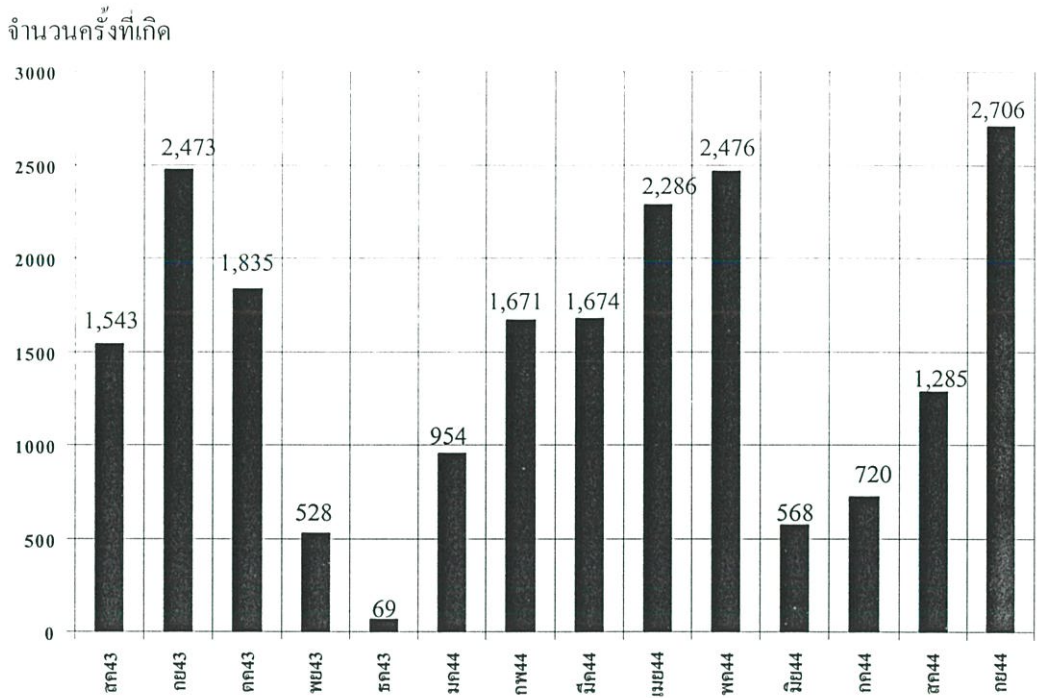
วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกจากกระดาศกราฟ จะวิเคราะห์เฉพาะสัญญาณดาวเทียม POR ที่มุมเงยต่ำ  $8^{\circ}$  เท่านั้น โดยจะวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลา 14 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2543 ถึง กันยายน พ.ศ. 2544 โดยการพิจารณาระดับการแกว่งขึ้นลงของเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ซึ่งใช้วิธีการวัดค่ายอดถึงยอดของเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน โดยการแบ่งข้อมูลเป็นช่วงๆ ช่วงละ 5 นาที ดังรูปที่ 3.7 ในแต่ละช่วงจะทำการหาผลต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด แล้วแยกเป็นช่วงความแรงที่มีหน่วยเป็น dB peak to peak ค่าต่างๆ โดยที่กำหนดให้การแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณยอดถึงยอดที่มากกว่า 0.25 เดซิเบล เกิดนาน 5 นาที คือ 1 ครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน

##### 3.3.1.1 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

รูปที่ 3.9 แสดงแผนภูมิของระดับการแกว่งของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ในช่วงเวลา 14 เดือน (สิงหาคม พ.ศ. 2543 ถึง กันยายน พ.ศ. 2544) จากรูปจะเห็นได้ว่าระดับการแกว่งของสัญญาณที่พบเป็นส่วนใหญ่ คือ ประมาณ 1 dB peak to peak และค่าการแกว่งขึ้นลงสูงสุดของสัญญาณ คือ 6 dB peak to peak แต่พบได้น้อยมาก



รูปที่ 3.9 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้บนกระดาศกราฟ ตลอดช่วงเวลา 14 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544



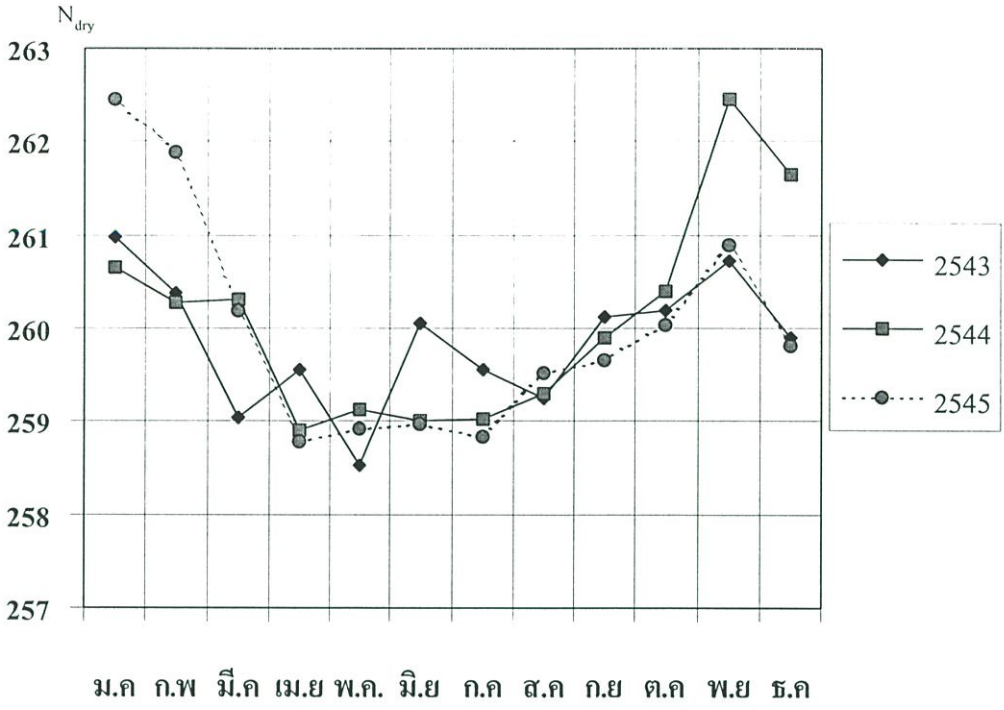
รูปที่ 3.10 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในแต่ละเดือน ที่บันทึกได้บนกระดาษกราฟ ในช่วงเดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544



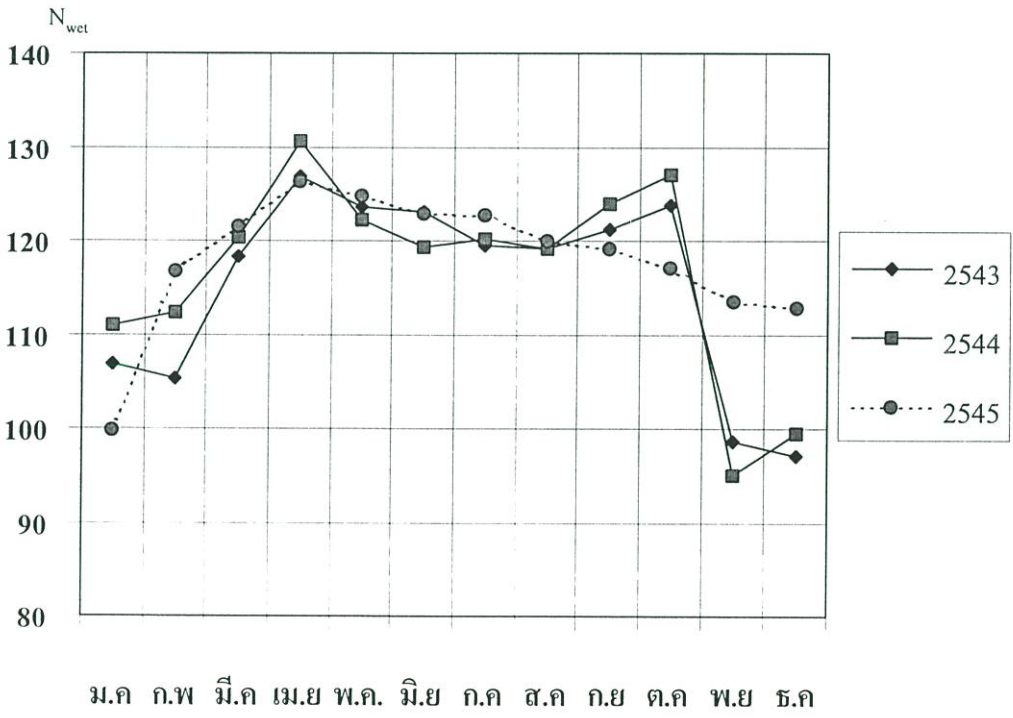
รูปที่ 3.11 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในรายเดือนตลอดช่วง 14 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544

รูปที่ 3.10 แสดงจำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในแต่ละเดือน จากรูปจะเห็นได้ว่า เดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันมากคือ ในเดือนกันยายน ของทั้ง 2 ปี และในเดือนเมษายน ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2544 และจากรูปยังเห็นได้อีกว่า เดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันน้อยที่สุดคือ เดือนธันวาคม พ.ศ. 2543 รูปที่ 3.11 แสดงจำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จากรูปจะเห็นได้ว่า จำนวนการเกิดสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีสองช่วง คือ ในเดือนกันยายน ของทั้ง 2 ปี และเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2544 ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Total Electron Content (TEC)) ที่เพิ่มขึ้น ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร และจำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่มากยังเป็นไปตามเดือน Equinox [21] (เดือนที่มีวันที่มีกลางวันและกลางคืนเท่ากัน) คือ ประมาณเดือนมีนาคม และเดือนกันยายน ส่วนเดือนที่มีจำนวนการเกิดค่อนข้างต่ำ คือ เดือนธันวาคม พ.ศ. 2543 และในเดือนมิถุนายนและกรกฎาคม พ.ศ. 2544 ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเดือน Solstice (เดือนที่มีวันที่ดวงอาทิตย์อยู่ไกลที่สุดจากเส้นศูนย์สูตรของโลกคือ ในเดือนมิถุนายน และเดือนธันวาคม) ตามที่ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ง. ส่วนจำนวนการเกิดสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ คือในเดือนเมษายน พ.ศ. 2544 และจำนวนการเกิดต่ำสุด คือ ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2543 ซึ่งช่วงเดือนที่เกิดมากหรือน้อยนี้ยังสอดคล้องตรงกับ [22, 23]

จาก [16] พบว่า ความแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงในค่าทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ, ความกดบรรยากาศ และความดันไอน้ำ ในรูปของครรชนีหัทเห (Nu = N Units) ดังที่ได้อธิบายและแสดงไว้ในสมการ (2.32) โดย  $Nu = N_{dry} + N_{wet}$  ซึ่งเราจะทำการคำนวณหาค่า Nu,  $N_{dry}$  และ  $N_{wet}$  ในรายเดือนจากสมการ (2.32) โดยใช้ข้อมูลสถิติภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือน จากตารางที่ จ.1-จ.3 ในภาคผนวก จ. ได้ค่าครรชนี Nu,  $N_{dry}$  และ  $N_{wet}$  รายเดือน ตั้งแต่ ปี 2543 ถึง ปี 2545 ในรูปที่ 3.12 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า  $N_{dry}$  มีค่าสูงกว่า  $N_{wet}$  ตลอด แต่ระดับการเปลี่ยนแปลงของค่าครรชนีของ  $N_{wet}$  จะมากกว่า และจะเห็นได้ว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $N_{wet}$  คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ Nu ทั้งหมด จากรูปที่ 3.12 (ค) ค่าของ Nu ในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน (ตั้งแต่เดือนมีนาคม ถึงตุลาคม) จะมีค่าสูงกว่าในช่วงฤดูหนาว (ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงกุมภาพันธ์) ที่ซึ่งถ้าทำการพิจารณาจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ร่วมกับครรชนีหัทเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Nu) ดังรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่า มีลักษณะที่สอดคล้องกันระหว่างค่าทั้งสอง โดยถ้าค่า Nu มากจะทำให้จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดมากด้วย



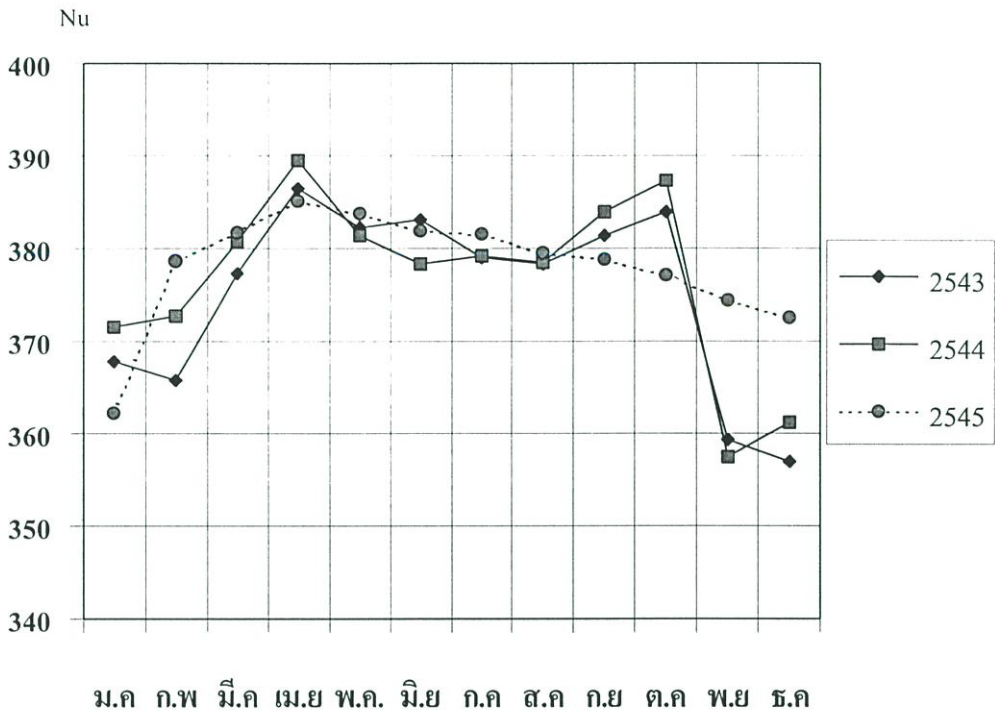
(ก)  $N_{dry}$



(ข)  $N_{wet}$

รูปที่ 3.12 ธรรมชาติหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ รายเดือน ตั้งแต่ปี 2543 ถึง ปี 2545

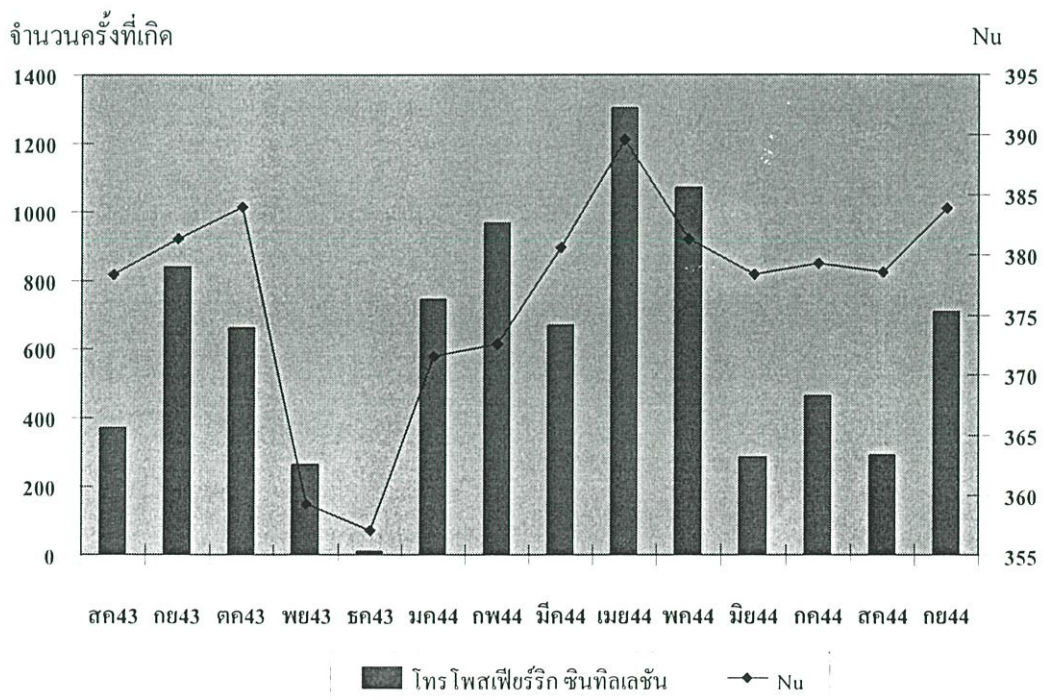
(ก)  $N_{dry}$ , (ข)  $N_{wet}$  และ (ค)  $Nu$



(ค) Nu

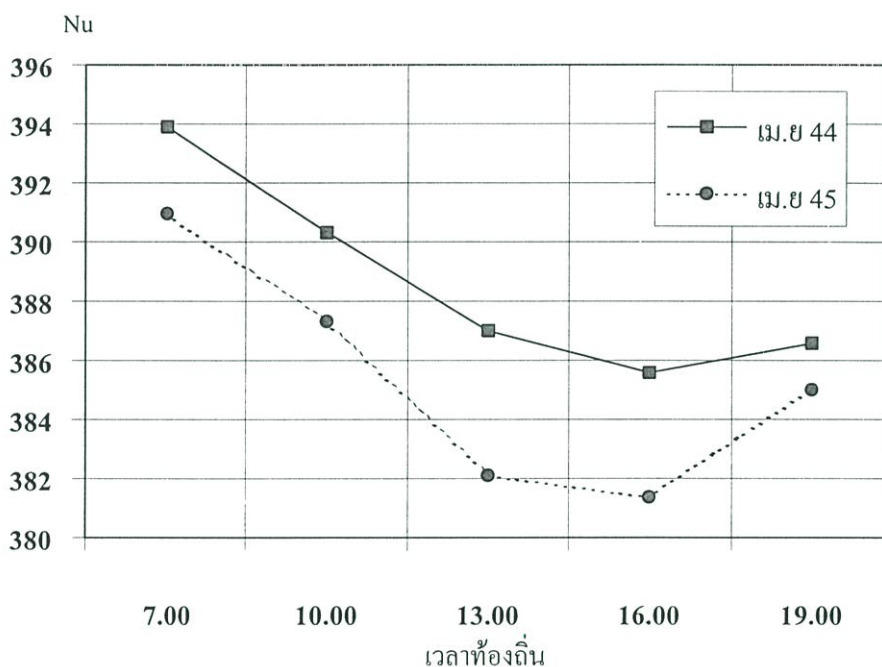
รูปที่ 3.12 (ต่อ) ธรรมชาติหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ รายเดือน ตั้งแต่ ปี 2543 ถึง ปี 2545

(ก)  $N_{dry}$ , (ข)  $N_{wet}$  และ (ค) Nu



รูปที่ 3.13 จำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เทียบกับค่าธรรมชาติหักเห Nu ในรายเดือน ตลอดช่วง 14 เดือน ตั้งแต่เดือน สิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544

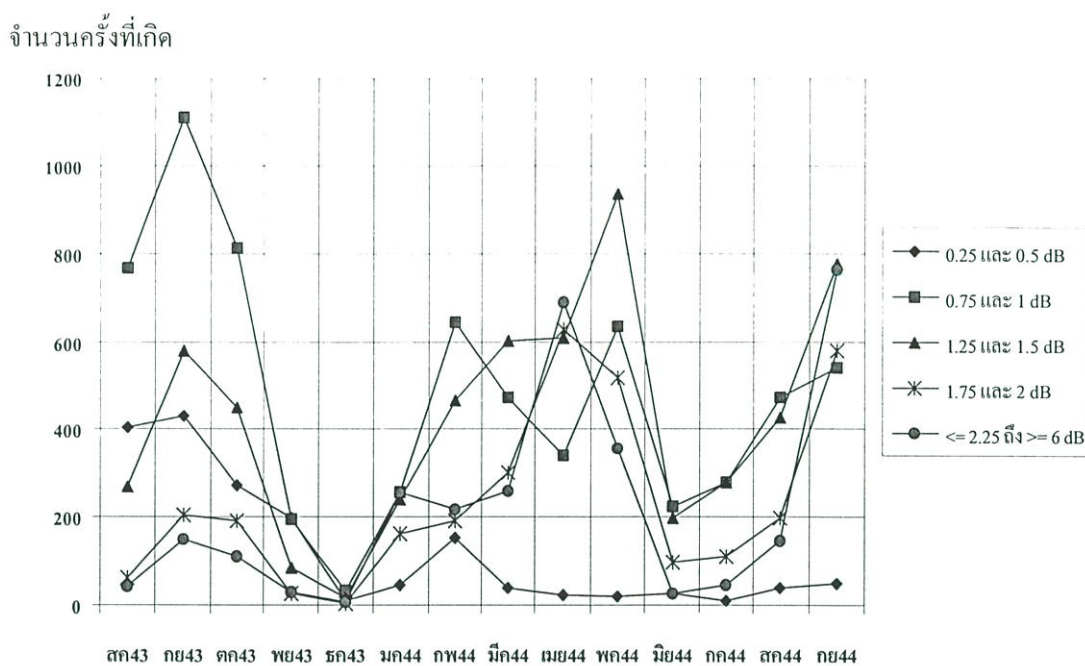
ต่อไปเป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีหักเห  $Nu$  ในรายวัน รูปที่ 3.14 เป็นตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีหักเห  $Nu$  ในรายวัน โดยเฉลี่ยแต่ละเวลา ของเดือนเมษายน พ.ศ. 2544 และ เมษายน พ.ศ. 2545 ซึ่งเห็นได้ว่า ในช่วงเวลากลางวัน ค่าครรชนีหักเห  $Nu$  จะน้อยกว่าในช่วงเวลาอื่น ซึ่งจากรูปที่ 3.14 นี้เราไม่สามารถเห็นถึงความแตกต่างระหว่างกลางวันกับกลางคืน ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากข้อมูลสถิติภูมิอากาศ ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง ทำการตรวจวัดภูมิอากาศเพียงวันละ 5 ครั้งเท่านั้น (เริ่มจาก 7.00-19.00 น.) แต่จาก [24] แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลากลางวันมีการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีหักเห  $Nu$  ที่มากกว่าในช่วงเวลากลางคืน โดยเฉพาะช่วงเวลาประมาณ 13.00-16.00 น. ที่ซึ่งสอดคล้องกันกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในช่วงเวลากลางวันที่มีมากกว่าในเวลากลางคืน



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีหักเห  $Nu$  ที่มีมากในเวลากลางวัน

### 3.3.1.2 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในแต่ละเดือน

จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่ขนาดแอมพลิจูด peak to peak ต่างๆ ในแต่ละเดือน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิดในแต่ละช่วงแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2543 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544 ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีจำนวนครั้ง หรือเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดมากที่สุด คือ 0.75 และ 1 dB peak to peak จากนั้นระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีจำนวนครั้งของการเกิดมากที่สุดเริ่มเพิ่มขึ้น คือในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2544 ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีจำนวนครั้งของการเกิดมากที่สุด คือ 1.25 และ 1.5 dB peak to peak



รูปที่ 3.15 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณที่แต่ละระดับแอมพลิจูด peak to peak ในแต่ละเดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544

ต่อจากนั้นในเดือนเมษายน พ.ศ. 2544 ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณมีจำนวนครั้งหรือเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดค่อนข้างมาก คือ ตั้งแต่ 1.25 ถึง 6 dB peak to peak จากนั้นในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2544 ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีจำนวนครั้ง หรือเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดมากที่สุด คือ 1.25 และ 1.5 dB peak to peak ในช่วงเดือนมิถุนายน ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2544 ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีจำนวนครั้ง หรือเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดมากที่สุด คือ 0.75 ถึง 1.5 dB peak to peak และสุดท้ายในเดือนกันยายน พ.ศ. 2544 ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณมีจำนวนครั้ง หรือเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดค่อนข้างมาก คือ ตั้งแต่ 1.25 ถึง 6 dB peak to peak และจากรูปยังสังเกตได้อีกว่า เดือนสิงหาคมและกันยายน พ.ศ. 2544 มีจำนวนครั้ง หรือเปอร์เซ็นต์เวลาที่เกิดมากที่สุดที่ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณที่ค่อนข้างรุนแรงกว่าในช่วงเดือนสิงหาคมและกันยายน พ.ศ. 2543 และในภาพรวมของทั้ง 14 เดือนจะเห็นได้ว่า ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณมีจำนวนครั้ง หรือเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดมากที่สุด คือ ช่วง 0.75 ถึง 1 dB peak to peak และ 1.25 ถึง 1.5 dB peak to peak ตามลำดับ

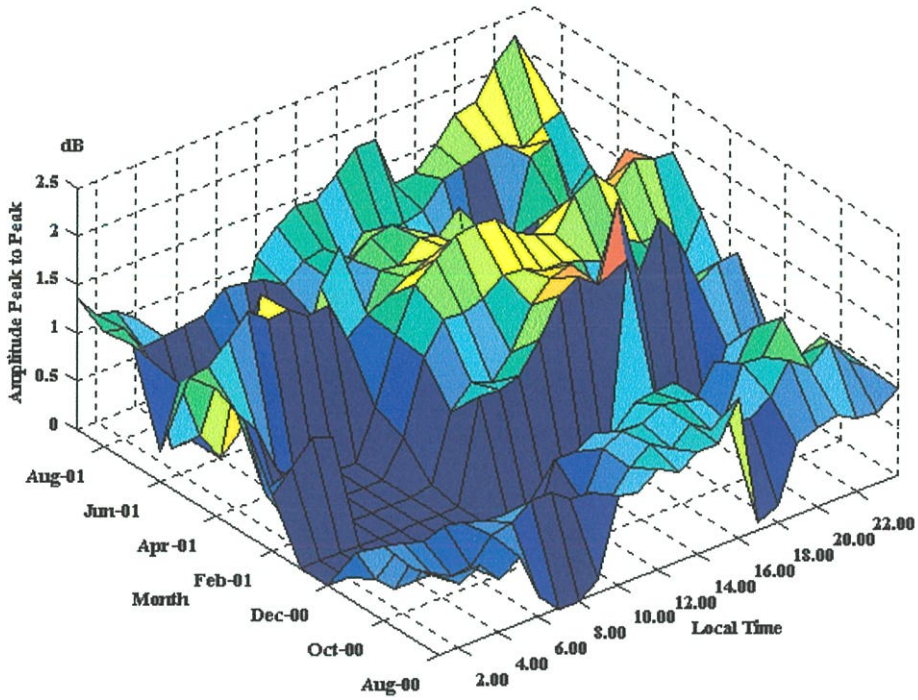
ตารางที่ 3.2 เปอร์เซ็นต์เวลาการแกว่งของแอมพลิจูดที่ระดับต่างๆ ในแต่ละเดือน ตั้งแต่เดือน สิงหาคม 2543 ถึง กันยายน 2544

เดือน	0.25 และ 0.5 dB p-p	0.75 และ 1 dB p-p	1.25 และ 1.5 dB p-p	1.75 และ 2 dB p-p	<= 2.25 ถึง >= 6 dB p-p
ส.ค. 43	26.18%	49.64%	17.43%	4.08%	2.66%
ก.ย. 43	17.43%	44.84%	23.45%	8.29%	5.98%
ต.ค. 43	14.88%	44.25%	24.47%	10.35%	6.05%
พ.ย. 43	37.12%	36.74%	16.10%	4.73%	5.30%
ธ.ค. 43	13.04%	46.38%	24.64%	5.80%	10.14%
ม.ค. 44	4.61%	26.62%	25.05%	17.09%	26.62%
ก.พ. 44	9.16%	38.60%	27.83%	11.37%	13.05%
มี.ค. 44	2.39%	28.20%	36.02%	17.98%	15.41%
เม.ย. 44	0.96%	14.87%	26.55%	27.52%	30.10%
พ.ค. 44	0.85%	25.67%	37.96%	21.05%	14.48%
มิ.ย. 44	4.41%	39.15%	34.74%	16.93%	4.76%
ก.ค. 44	1.25%	38.75%	38.47%	15.14%	6.39%
ส.ค. 44	3.04%	36.76%	33.33%	15.42%	11.45%
ก.ย. 44	1.81%	19.92%	28.71%	21.40%	28.16%
รวม	8.25%	32.58%	28.54%	15.74%	14.88%

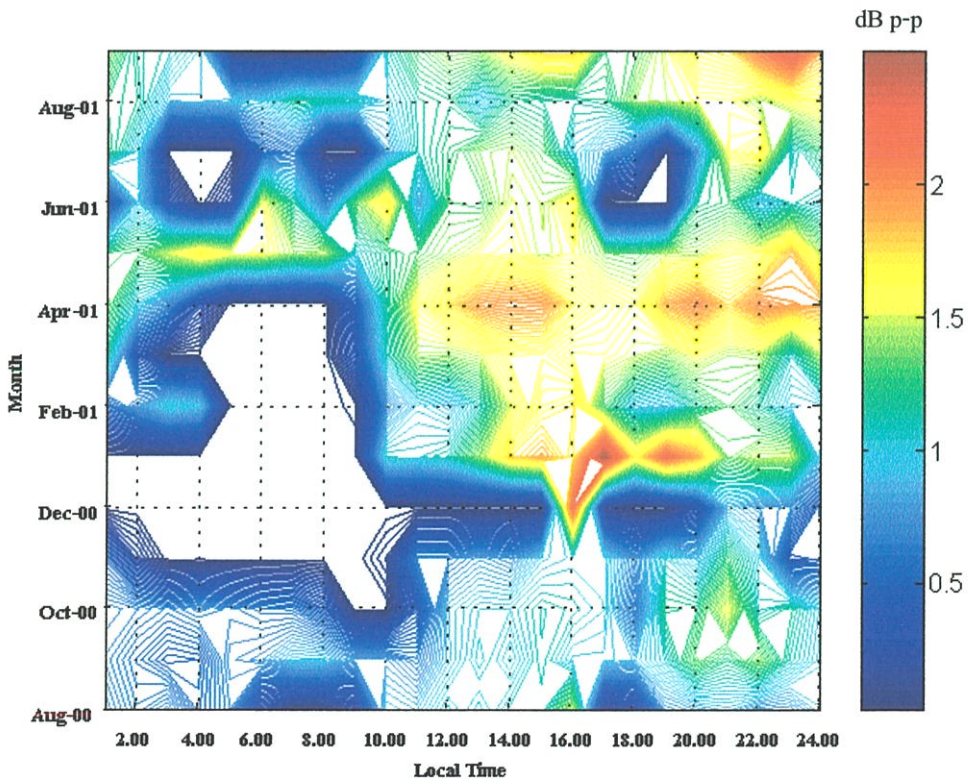
หมายเหตุ : กำหนดให้เปอร์เซ็นต์เวลารวมใน 1 เดือน เท่ากับ 100%

### 3.3.1.3 การเปลี่ยนแปลงตามรายวัน

สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงตามรายวันได้ โดยวิธีการหาค่าเฉลี่ย คือ ชั้นแรกหาค่าเฉลี่ยในแต่ละเวลา (เวลาละ 5 นาที) ตลอดทั้งเดือน จากนั้นนำข้อมูลเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที ที่ได้ไปทำการเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงของแต่ละเดือน ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระตั้นหันทั้งหมดในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละเดือน ตลอด 14 เดือน (สิงหาคม พ.ศ. 2543 ถึงกันยายน พ.ศ. 2544) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.16 (ก) ในระนาบ 3 มิติ และรูปที่ 3.16 (ข) ในแบบคอนทัวร์ โดยจากรูปจะไม่ได้แยกว่าเป็นผลมาจากชั้นบรรยากาศใด จากรูปสังเกตได้ว่า โดยส่วนมากค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระตั้นหัน ที่เกิดในช่วงเวลากลางวัน (11.00-18.00 น.) และในช่วงเวลากลางคืน (18.00-24.00 น.) จะมีขนาดค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา



(ก) ภาพ 3 มิติ



(ข) คอนทัวร์

รูปที่ 3.16 ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน แสดงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน ตลอดทั้ง 14 เดือน (สิงหาคม 2543 ถึงกันยายน 2544)

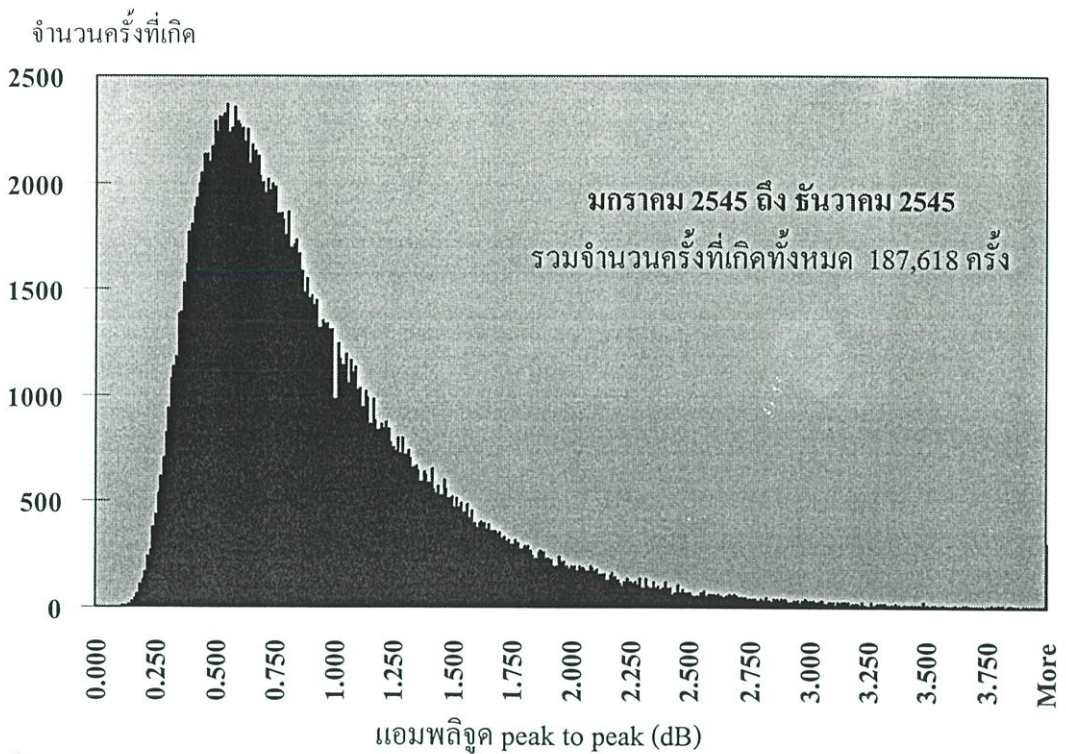
กลางคืนจะสูงกว่าช่วงเวลากลางวันเล็กน้อย กล่าวคือ ถ้าในช่วงเวลากลางวัน มีระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันสูง ในช่วงเวลากลางคืนก็จะสูงด้วย และในทางกลับกันถ้าในช่วงเวลากลางวัน มีระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันต่ำ ในช่วงกลางคืนก็จะต่ำไปด้วย และยิ่งสังเกตได้อีกว่า เดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกระทันหันที่รุนแรงในเวลากลางคืน คือ เดือนมกราคม พ.ศ. 2544, เมษายน พ.ศ. 2544 และเดือนกันยายน พ.ศ. 2544 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงประมาณ 1.5-2.1 dB peak to peak, 1.7-2.1 dB peak to peak และ 1.5-2.3 dB peak to peak ตามลำดับ ส่วนเดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกระทันหันที่รุนแรงที่สุดในเวลากลางวัน คือ เดือนเมษายน พ.ศ. 2544 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงประมาณ 1.5-1.9 dB peak to peak ในส่วนของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่เกิดขึ้นหลังเที่ยงคืนจนถึงก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น จะเห็นได้ว่า ส่วนมากจะเกิดอย่างต่อเนื่องมาจากก่อนเที่ยงคืน เดือนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรงในช่วงหลังเที่ยงคืนจนถึงก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น คือ เดือนพฤษภาคม และเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2544 โดยทั้งสองเดือนมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงประมาณ 1.0-1.5 dB peak to peak ส่วนเดือนที่เกิดน้อยหรือไม่เกิดเลยในช่วงหลังเที่ยงคืนจนถึงก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น คือ ช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2543 และเดือนมกราคม พ.ศ. 2544

### 3.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล

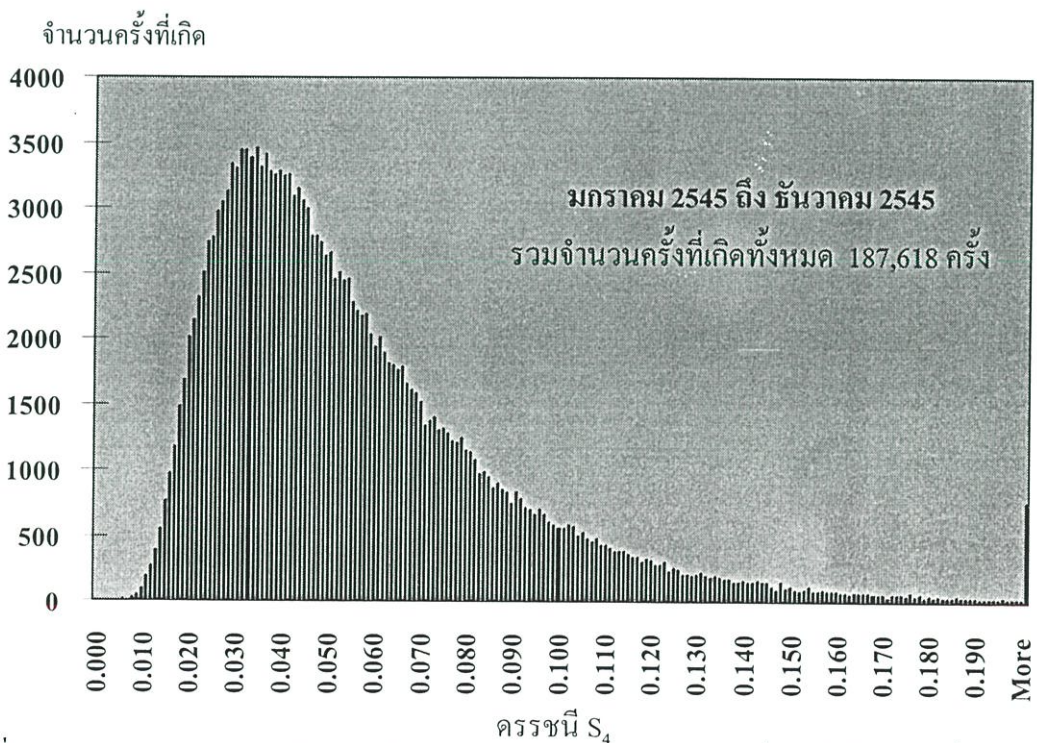
วิธีการวิเคราะห์สัญญาณดาวเทียม POR ที่มุมเงยต่ำ  $8^\circ$  ในช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2545 โดยการพิจารณาระดับความรุนแรงของเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ซึ่งใช้วิธีการวัดค่ายอดถึงยอดของเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน วิธีการคำนวณค่าครรชนี  $S_4$  และวิธีการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma$  โดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ช่วงละ 1 นาที ดังรูปที่ 3.8 วิธีการทำเริ่มจากนำข้อมูลดิบต่อเนื่อง (ในหน่วยโวลต์) ที่ได้ มาทำการแยกเอาข้อมูลเฉพาะในส่วนของสัญญาณในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน จากนั้นเอาข้อมูลที่ได้ออกไปเข้าสู่สูตรคำนวณค่ายอดถึงยอด ครรชนี  $S_4$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma$  ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โดยที่กำหนดให้การแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณใน 1 นาที คือ 1 ครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน

#### 3.3.2.1 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

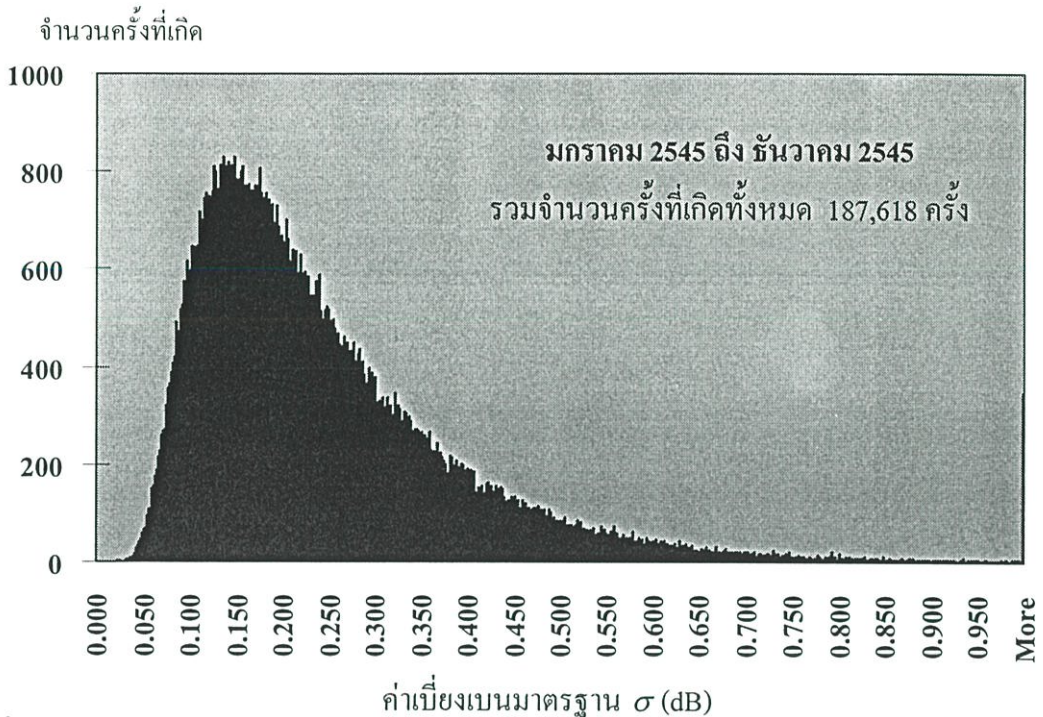
รูปที่ 3.17 แสดงแผนภูมิของระดับการแกว่งของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ตลอดช่วงเวลา 1 ปี (มกราคม พ.ศ. 2545 ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545) จะเห็นได้ว่า ตลอดระยะเวลา 1 ปี ช่วงที่มีจำนวนครั้งของการเกิดการแกว่งของสัญญาณมากอยู่ในช่วง 0.4-0.7 dB peak to peak ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิดได้ 33% ของการเกิดทั้งหมด



รูปที่ 3.17 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



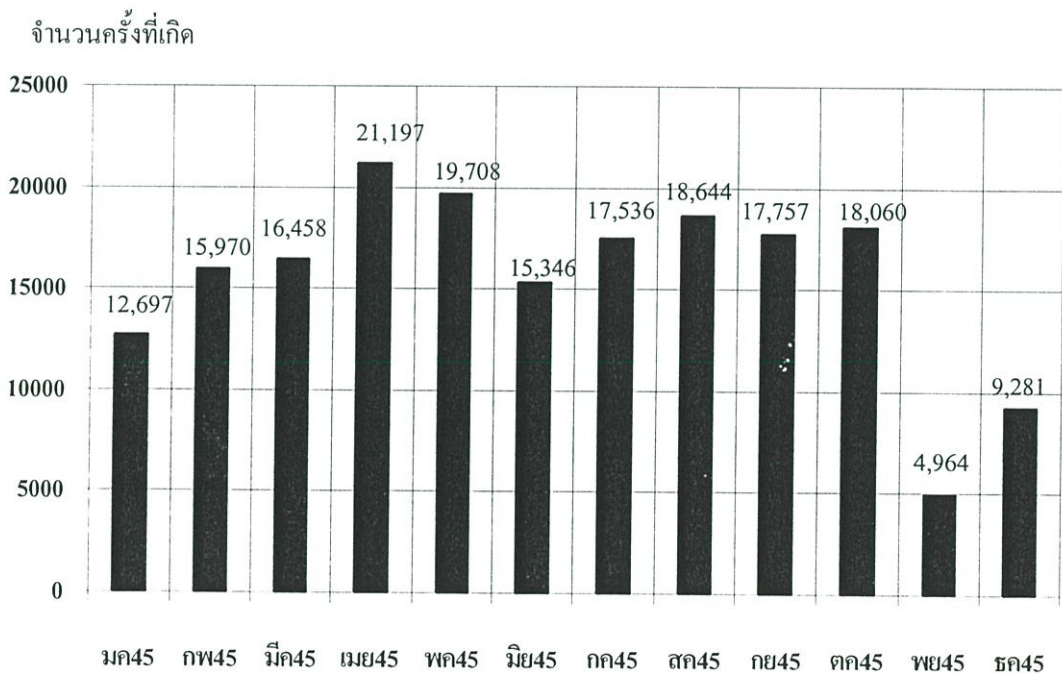
รูปที่ 3.18 แผนภูมิของระดับค่าครรชนี  $S_4$  ของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



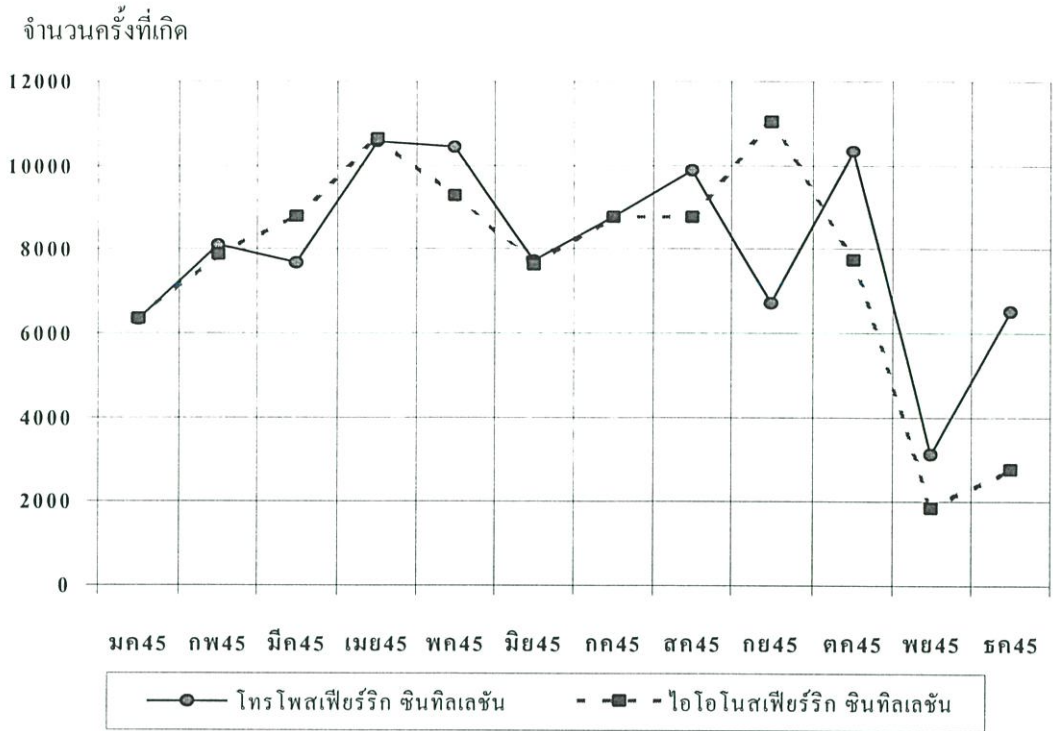
รูปที่ 3.19 แผนภูมิของระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของสัญญาณดาวเทียม POR ที่บันทึกได้จาก เครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัลในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่าง กระชกนหัน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545

และจากรูปที่ 3.17 ค่าเฉลี่ยของการแกว่งแอมพลิจูดตลอดระยะเวลา 1 ปี มีค่าเท่ากับ 0.935 dB peak to peak และช่วงค่าการแกว่งขึ้นลงสูงสุดของสัญญาณ คือ ประมาณ 5-9 dB peak to peak ซึ่ง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเกิดได้เพียง 0.04% ของการเกิดทั้งหมด และในรูปที่ 3.18 แสดงแผนภูมิของ ระดับค่าครรชนี  $S_4$  ตลอดระยะเวลา 1 ปี โดยจะเห็นได้ว่า ช่วงที่มีจำนวนครั้งการเกิดมากของค่า ครรชนี  $S_4$  อยู่ในช่วง 0.025-0.045 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิดได้ 35% ของการเกิดทั้งหมด ค่าเฉลี่ยของครรชนี  $S_4$  ตลอดระยะเวลา 1 ปี มีค่าเท่ากับ 0.056 และช่วงค่าครรชนี  $S_4$  สูงสุดที่พบ คือ ประมาณ 0.28-0.5 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเกิดจะได้เพียง 0.04% ของการเกิดทั้งหมด ดังนั้นจาก ค่าครรชนี  $S_4$  ที่พบดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.5 จึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระชกน- หันของสัญญาณดาวเทียม POR ที่มุมเงยต่ำ  $8^\circ$  นี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระชกนหัน อย่างอ่อน (Weak Scintillation) ดังที่ได้กล่าวไว้ในวิทยุบทที่ 2 และในรูปที่ 3.19 แสดง แผนภูมิของระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma$ ) หรือที่เรียกว่า ค่าความเข้มของกระบวนการการ เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระชกนหัน จากรูปเห็นได้ว่า ช่วงที่มีจำนวนครั้งการเกิดมากของค่า เบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 0.1-0.2 dB peak to peak ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิดได้ 40% ของการ เกิดทั้งหมด ค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตลอดระยะเวลา 1 ปี มีค่าเท่ากับ 0.243 dB peak to peak และช่วงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด คือ 1-2 dB peak to peak ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาการ เกิดได้เพียง 0.2% ของการเกิดทั้งหมด

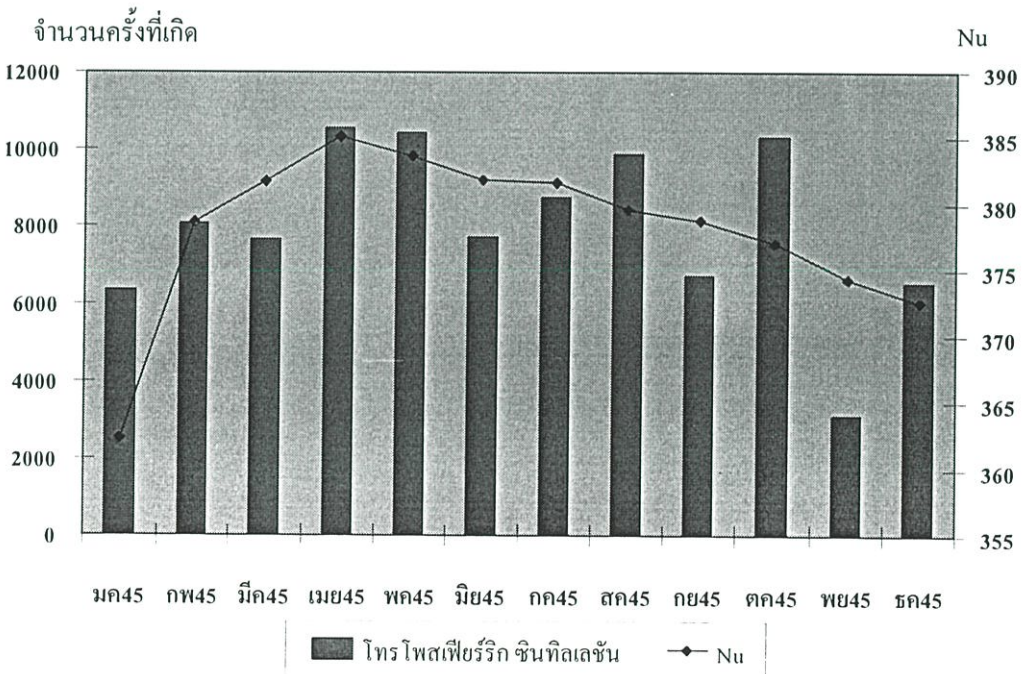
รูปที่ 3.20 แสดงจำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในแต่ละเดือนตลอดระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545 จะเห็นได้ว่า เดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันค่อนข้างมาก มี 2 ช่วง คือ ในช่วงเดือนเมษายน ถึง พฤษภาคม พ.ศ. 2545 และในช่วงเดือน สิงหาคม ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2545 ส่วนเดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันน้อยที่สุด คือ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2545 และในรูปที่ 3.21 แสดงจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จากรูปจะเห็นได้ว่า เดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดมาก ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือ เดือนเมษายน และเดือนกันยายน พ.ศ. 2545 ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (TEC) ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร และจำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่มากยังเป็นไปตามเดือน Equinox [21] คือ ประมาณเดือนมีนาคม และกันยายน ส่วนเดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดค่อนข้างน้อย คือ ช่วงเดือนพฤศจิกายน และธันวาคม พ.ศ. 2545 ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเดือน Solstice (เดือนมิถุนายน และเดือนธันวาคม) ตามที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 3.20 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันทั้งหมดในแต่ละเดือนที่บันทึกได้จากเครื่องวัดสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



รูปที่ 3.21 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในรายเดือน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



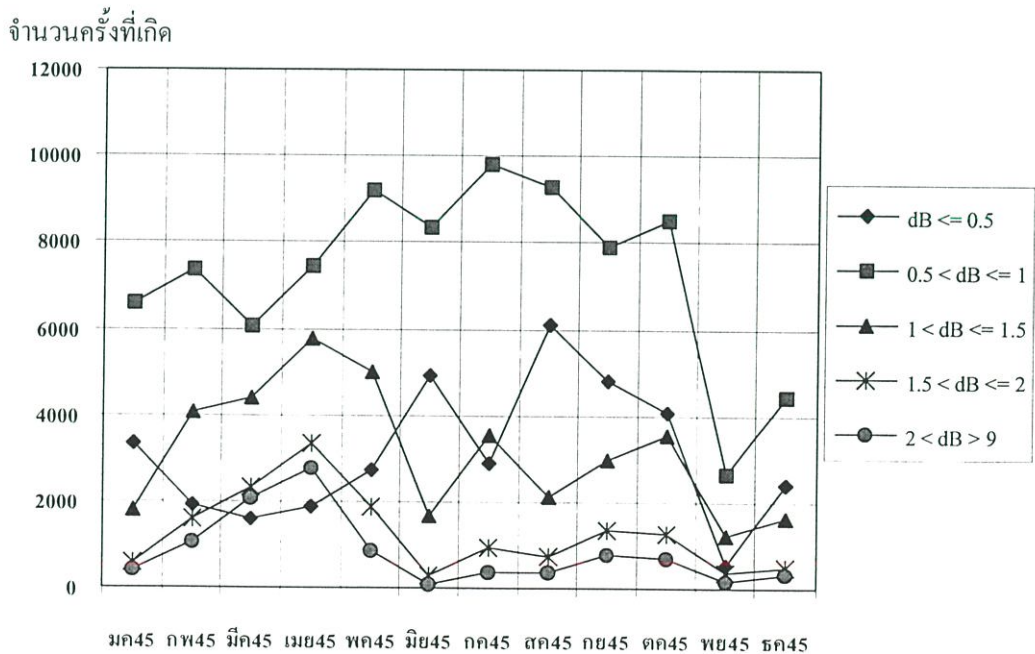
รูปที่ 3.22 จำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เทียบกับค่าความสัมพันธ์หักเห  $Nu$  ในรายเดือน ตลอดช่วง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545

ในส่วนขอเดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดมาก ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ คือ ในช่วงเดือนเมษายน และพฤษภาคม พ.ศ. 2545 และในเดือนสิงหาคม และเดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 และเดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดต่ำสุด คือ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2545

รูปที่ 3.22 แสดงจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ร่วมกับครรชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ( $N_u$ ) จะเห็นได้ว่า มีลักษณะที่สอดคล้องกันบ้างระหว่างค่าทั้งสอง โดยค่า  $N_u$  ที่มากในเดือนเมษายน พ.ศ. 2545 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดก็มากด้วย แต่ก็มีเดือนที่ไม่ค่อยสอดคล้องกันทั้งนี้อาจเกิดจากผลอื่นๆ ร่วมด้วยได้หลายกรณี เช่น ในเดือนพฤศจิกายน และธันวาคม พ.ศ. 2545 จะเห็นได้ว่าการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่มาก เมื่อเทียบกับเดือนเดียวกัน ในปีก่อนๆ นั้นอาจเป็นเพราะ ค่าครรชนี  $N_u$  ในระยะดังกล่าวมีค่าสูงมากเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับปีก่อนๆ ตามค่าอุณหภูมิและความดันไอน้ำเฉลี่ยที่สูงมากกว่าปกติ อาจดูได้จากรูปที่ 3.12

### 3.3.2.2 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในแต่ละเดือน

จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่ขนาดแอมพลิจูด peak to peak ต่างๆ ในแต่ละเดือน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.23 และเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิดในแต่ละช่วง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.23 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณที่แต่ละระดับแอมพลิจูด peak to peak ในแต่ละเดือน ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545

ตารางที่ 3.3 เปอร์เซ็นต์เวลาการแกว่งของแอมพลิจูดที่ระดับต่างๆ ในแต่ละเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม 2545

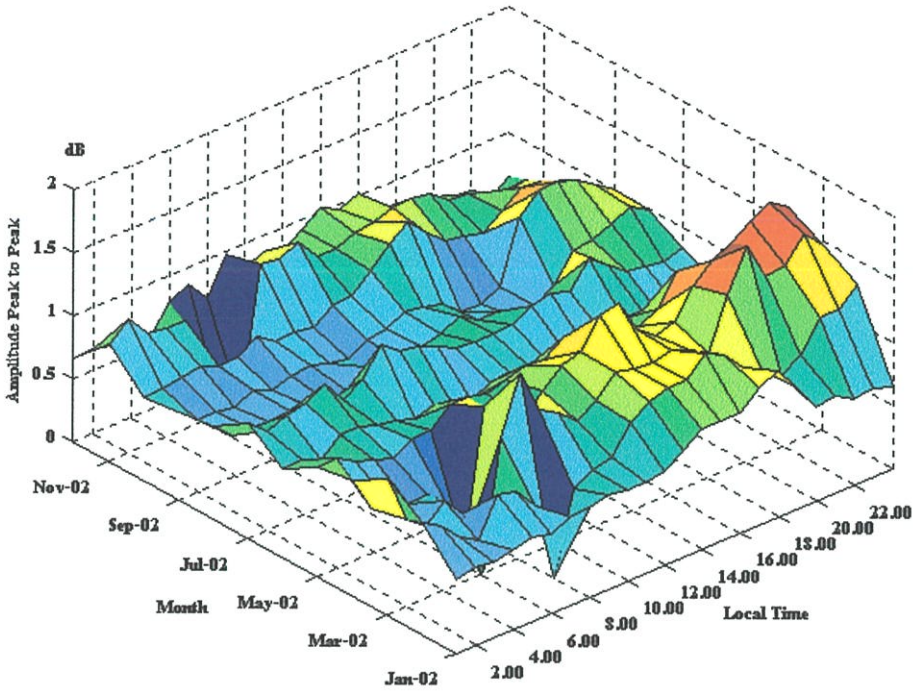
เดือน	dB ≤ 0.5	0.5 < dB ≤ 1	1 < dB ≤ 1.5	1.5 < dB ≤ 2	dB > 2
ม.ค. 45	26.34%	51.85%	14.11%	4.64%	3.06%
ก.พ. 45	12.02%	45.98%	25.37%	9.93%	6.69%
มี.ค. 45	9.59%	36.93%	26.74%	14.12%	12.62%
เม.ย. 45	8.81%	35.18%	27.25%	15.77%	12.98%
พ.ค. 45	13.91%	46.66%	25.47%	9.56%	4.41%
มิ.ย. 45	32.05%	54.42%	10.99%	1.95%	0.59%
ก.ค. 45	16.52%	55.82%	20.14%	5.33%	2.19%
ส.ค. 45	32.80%	49.74%	11.44%	3.98%	2.04%
ก.ย. 45	26.93%	44.43%	16.75%	7.46%	4.43%
ต.ค. 45	22.61%	47.06%	19.58%	6.94%	3.82%
พ.ย. 45	10.35%	53.57%	24.78%	7.76%	3.55%
ธ.ค. 45	25.68%	47.82%	17.43%	5.47%	3.60%
รวม	19.80%	46.67%	20.12%	8.09%	5.33%

หมายเหตุ : กำหนดให้เปอร์เซ็นต์เวลารวมใน 1 เดือน เท่ากับ 100%

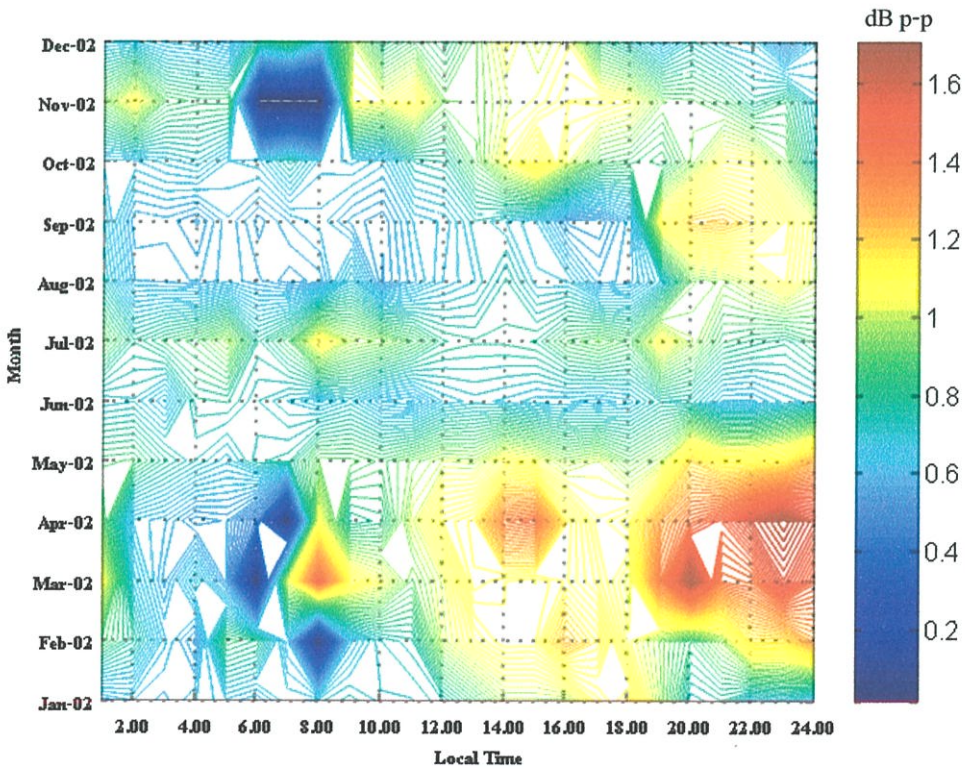
จากรูปที่ 3.23 และตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า ในภาพรวมตลอด 1 ปี ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีจำนวนครั้ง หรือเปอร์เซ็นต์เวลาของการเกิดมากที่สุด คือ ที่ระดับ  $0.5 < \text{dB} \leq 1$  และเดือนที่มีเปอร์เซ็นต์เวลาการเกิดที่ระดับการแกว่งแอมพลิจูดของสัญญาณสูงๆ ( $2 < \text{dB} > 9$ ) คือ ในช่วงเดือน มีนาคม ถึง เมษายน พ.ศ. 2545

### 3.3.2.3 การเปลี่ยนแปลงตามรายวัน

การเปลี่ยนแปลงตามรายวันของค่าการแกว่งทางแอมพลิจูดของสัญญาณ และค่าครรชนี  $S_4$  หาได้โดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงตลอดทั้งเดือน ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR และค่าครรชนี  $S_4$  ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละเดือน ตลอด 12 เดือน (มกราคม ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.24 (ก) ในระนาบ 3 มิติ และ (ข) ในแบบคอนทัวร์ และในรูปที่ 3.25 (ก) ในระนาบ 3 มิติ และ (ข) ในแบบคอนทัวร์ ตามลำดับ โดยจากรูปจะไม่ได้แยกว่าเป็นผลมาจากชั้นบรรยากาศใด

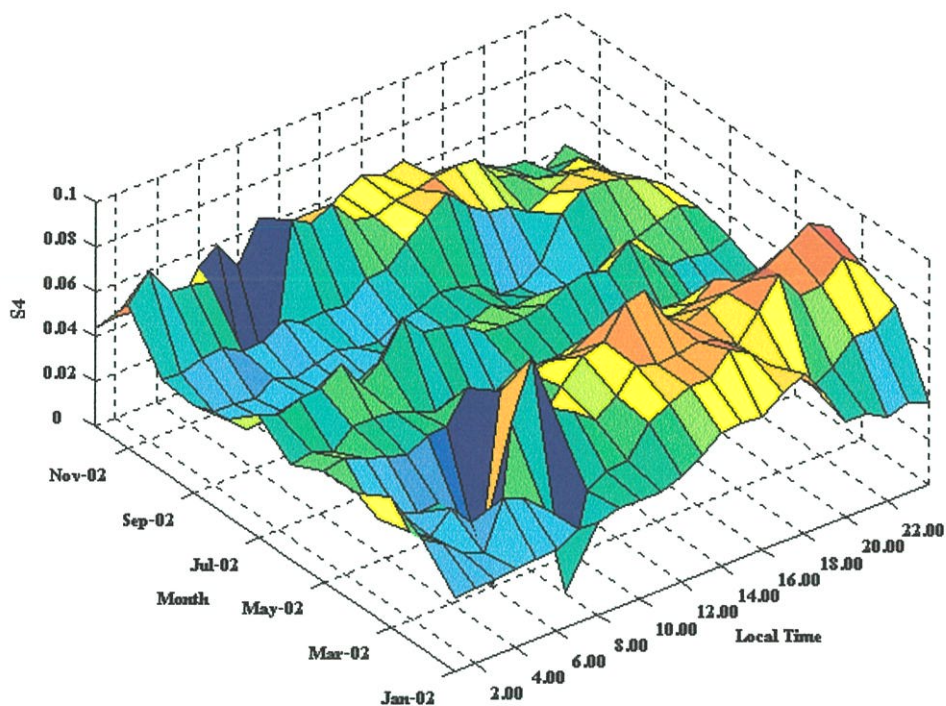


(ก) ภาพ 3 มิติ

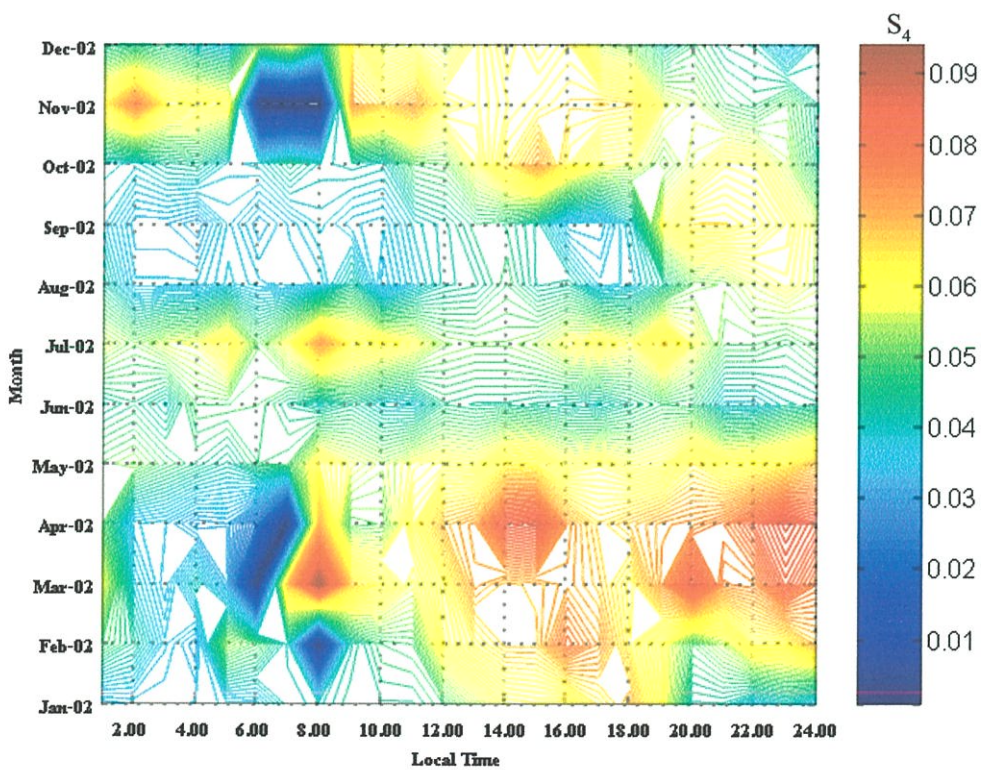


(ข) คอนทัวร์

รูปที่ 3.24 ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน แสดงการเปลี่ยนแปลงในในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน ตลอดทั้ง 12 เดือน (มกราคม 2545 ถึงธันวาคม 2545)



(ก) ภาพ 3 มิติ



(ข) คอนทัวร์

รูปที่ 3.25 ค่าเฉลี่ยของครรชนี  $S_4$  แสดงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน ตลอดทั้ง 12 เดือน (มกราคม 2545 ถึงธันวาคม 2545)

จากรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 เห็นได้ว่า เดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกระทันหันที่รุนแรงที่สุดในเวลากลางคืน (18.00-24.00 น.) คือ ช่วงเดือนมีนาคม ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณ ประมาณ 1.4-1.7 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.07-0.09 รองลงมา คือ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณ ประมาณ 1.0-1.2 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.05-0.07 ส่วนเดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกระทันหันที่รุนแรงที่สุดในเวลากลางวัน (11.00-17.00 น.) คือ ช่วงเดือนเดือนมีนาคม ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณ ประมาณ 1.1-1.4 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.07-0.09 ในส่วนของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรงที่สุดที่เกิดขึ้นหลังเที่ยงคืนจนถึงก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น คือ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณ ประมาณ 0.8-0.9 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.06-0.07 ส่วนเดือนที่เกิดน้อยหรือไม่เกิดเลยในช่วงหลังเที่ยงคืนจนถึงก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น คือ ช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2545

### 3.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงระบบทดลอง และการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และไอโอโนสเฟียร์ ของสัญญาณดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรแปซิฟิก (POR) มีมุมเงยของจานสายอากาศต่ำ  $8^\circ$  ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2543 ถึงกันยายน พ.ศ. 2544 และตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545 ส่วนมากค่าการแกว่งขึ้นลงทางแอมพลิจูดของสัญญาณขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันจะมีค่าไม่เกิน 5 dB peak to peak หรือมีค่าครรชนี  $S_4$  ไม่เกิน 0.2 หรือมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma$ ) ของการแกว่งไม่เกิน 1 dB peak to peak และมีเพียงส่วนน้อยมากที่การแกว่งของสัญญาณมีค่า 5-9 dB peak to peak การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันรวมทั้งหมดในรายเดือน มักเกิดขึ้นมากและมีความรุนแรงอยู่ในช่วงเดือนเมษายน ถึงพฤษภาคม และช่วงเดือนกันยายน ถึงตุลาคม การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มักเกิดขึ้นมากและมีความรุนแรงอยู่ในช่วงเดือนเมษายน ถึงพฤษภาคม และโดยมากมักเกิดขึ้นและมีความรุนแรงในช่วงเวลา 11.00-17.00 น. ซึ่งสอดคล้องตามค่าครรชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ( $N_u$ ) ที่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงเวลาและเดือนดังกล่าว ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มักเกิดขึ้นมากและมีความรุนแรงอยู่ในช่วงเดือนมีนาคม ถึงพฤษภาคม และในเดือนกันยายน ซึ่งในเดือนกันยายนจะมีจำนวนการเกิดที่มากกว่าในช่วงเดือนมีนาคม ถึงพฤษภาคม แต่มีความรุนแรงน้อยกว่า โดยจำนวนการเกิดที่มากในช่วงเดือนดังกล่าวสอดคล้องไปตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอ-

โนสเฟียร์และช่วงเดือน Equinox (เดือนมีนาคม และกันยายน) และโดยมากมักเกิดขึ้นและมีความรุนแรงในช่วงเวลาหลังดวงอาทิตย์ตก ตั้งแต่ประมาณ 18.00-24.00 น. ซึ่งสอดคล้องตามการปรากฏของแผ่นมันของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังที่ดวงอาทิตย์ตก และจะสลายตัวไปภายหลังเที่ยงคืน การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มักเกิดน้อยและไม่ค่อยรุนแรงในช่วงเดือนพฤศจิกายน ถึงธันวาคม ทั้งนี้สอดคล้องไปตามค่าดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Nu) ที่น้อย แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงเดือนพฤศจิกายน และธันวาคม พ.ศ. 2545 มีการจำนวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่มากและมีความรุนแรง กว่าในช่วงเดือนพฤศจิกายน และธันวาคม พ.ศ. 2543 ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงปลายปี 2545 ค่าดัชนีหักเห Nu มีมากกว่าในช่วงปลายปี 2543 อย่างเห็นได้ชัดในรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นไปตามอุณหภูมิและความดันไอน้ำที่สูงกว่าปกติ คุได้จากภาคผนวก จ. ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มักเกิดน้อยและไม่ค่อยรุนแรงในช่วงเดือนมิถุนายน และธันวาคม สอดคล้องไปตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่น้อย ในช่วงเดือน Solstice (เดือนมิถุนายน และธันวาคม) อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันประกอบไปด้วยการเพิ่มขึ้นและต่ำลงจากระดับสัญญาณปกติ ไม่เฉพาะแค่ค่าการแกว่งของแอมพลิจูดแต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงสั้นๆ ของสัญญาณก็เป็นสิ่งสำคัญที่ควรมีศึกษา ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 และผลการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้ในบทนี้ยังจะนำไปเปรียบเทียบกับระบบที่มีมุมสูง  $40^\circ$  ต่อไป ในบทที่ 5

## บทที่ 4

# ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ในช่วงเวลาสั้นและแบบจำลองการทำนายค่าความเข้ม

### 4.1 การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในช่วงเวลาสั้น

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันประกอบด้วยกระบวนการสุ่ม (Random Process) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Non-Stationary) กระบวนการสุ่มนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขทางอุณหพลศาสตร์ที่มีการแปรผันไปในแต่ละเวลา ในทางปฏิบัติความเข้มของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันจะแปรผันตามเวลาซึ่งข้อมูลความเข้มของกระบวนการนี้จะถูกนำไปพิจารณาในการหาค่าทางสถิติระยะยาว (Long-term Statistic) อย่างไรก็ตามเราสามารถพิจารณากระบวนการนี้ในลักษณะคล้ายจะคงที่ (Quasi-Stationary) โดยถือว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดนี้เป็นกระบวนการสุ่มแบบคงที่ (Stationary) ได้ หากพิจารณาในช่วงเวลาที่สั้นเพียงพอที่จะสามารถถือว่า กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอเล็กตรอนในช่วงเวลานั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นสามารถแสดงลักษณะทางสถิติของสัญญาณในช่วงเวลาสั้นๆ นี้ได้โดยถือว่า ความเข้มของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ( $\sigma_x$ ) คงที่

#### 4.1.1 การแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็น

ลักษณะฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function (PDF)) ของสัญญาณในช่วงเวลาสั้นๆ (Short-term)  $p(x, \sigma_x)$  คือ ความน่าจะเป็นของค่า  $x$  โดยที่มีเงื่อนไขเป็น  $\sigma_x$  โดยเราจะพิจารณาว่า ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของข้อมูลในช่วงเวลาสั้นๆ นี้มีลักษณะของฟังก์ชันความน่าจะเป็นอย่างไร โดยการแกว่งขึ้นลงของแอมพลิจูดในช่วงเวลาที่คงที่ สามารถหาความหนาแน่นความน่าจะเป็นในการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือที่เรียกว่า การแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) หรืออาจเป็นการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  (Nakagami- $m$  Distribution) ในบางกรณีของการแจกแจงสามารถประกอบด้วยการจำลองในทั้งสองแบบ สำหรับเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงของการแกว่งมาก หรือมีค่าครรชนี  $S_4$  ประมาณ 1.0 การแจกแจงจะเข้าใกล้การแจกแจงแบบเรย์ลี (Rayleigh Distribution) [10, 25-26] ดังนั้นในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะการแจกแจงแบบเกาส์ และการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  เท่านั้น เนื่องจากเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในวิทยานิพนธ์นี้ จัดว่า เป็นแบบที่ไม่รุนแรง (มีค่าครรชนี  $S_4$  ต่ำกว่า 0.5)

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function (CDF)) เป็นโอกาสการเกิดของค่าตัวแปรสุ่ม  $X$  เมื่อ  $X$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $x$  และใช้สัญลักษณ์ คือ  $F_x(x)$  ตามคำนิยามนี้เมื่อเขียนในเชิงคณิตศาสตร์จะได้ว่า [27]

$$F_x(x) = P(X \leq x) \quad (4.1)$$

โดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสม  $F(x)$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 นั่นคือ  $F(-\infty) = 0$  และ  $F(\infty) = 1$  ซึ่งค่าอนุพันธ์ของ  $F(x)$  นั่นคือ ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น  $p(x)$

$$p(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad -\infty < x < \infty \quad (4.2)$$

และในทางกลับกัน

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(u) du \quad -\infty < x < \infty \quad (4.3)$$

การแจกแจงแบบปกติ หรือแบบเกาส์ มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ [26]

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (4.4)$$

ซึ่ง  $m$  คือ ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณ (dB) ของตัวแปร  $x$  ทั้งหมดในช่วงเวลาที่พิจารณา และ  $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ดังนั้นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของเกาส์ จากความน่าจะเป็นที่ค่า  $x$  น้อยกว่า หรือเท่ากับค่าที่กำหนด (Not Exceeded) กำหนดโดย

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right] dt = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-m}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \quad (4.5)$$

ซึ่ง

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (4.6)$$

และความน่าจะเป็นที่ค่า  $x$  มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด (Exceeded) สามารถหาได้โดย  $1-F(x)$  ซึ่งโดยทั่วไปในการสื่อสารดาวเทียมจะนิยมใช้ความน่าจะเป็นที่ค่า  $x$  มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด ในการนำเสนอข้อมูล

การแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  มีความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ

$$p(X) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}x^2} \quad (4.7)$$

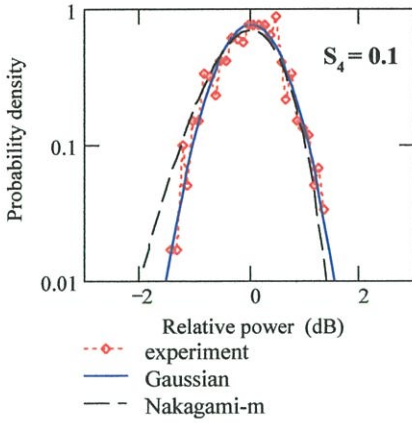
ซึ่ง  $\Omega = \overline{x^2}$  แทนค่าเฉลี่ยกำลังสัญญาณ และสัมประสิทธิ์  $m$  มีค่าตั้งแต่ 0.5 ถึง  $\infty$  [28] โดยมี ความสัมพันธ์กับครรชนีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน  $S_4$  คือ [10]

$$m = \left( \frac{\Omega}{x^2 - \Omega} \right)^2 = \frac{1}{S_4^2} \geq \frac{1}{2} \quad (4.8)$$

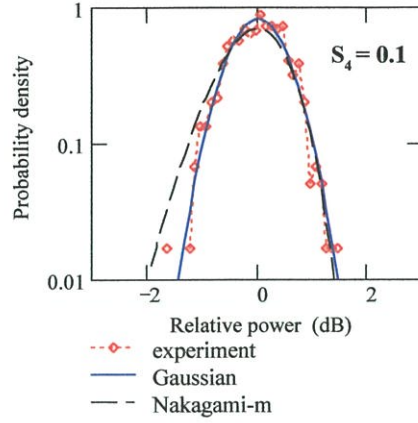
ซึ่งค่าการแจกแจงสะสมของนาคากามิแบบ  $m$  มีรูปสำเร็จ (Closed Form) แสดงดังสมการ (4.9) โดย  $\Gamma(m, mI)$  และ  $\Gamma(m)$  คือ แกมมาฟังก์ชันที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Gamma Function) และ แกมมาฟังก์ชัน (Gamma Function) ตามลำดับ

$$F(x) = \int_0^x p(x)dt = \frac{\Gamma(m, mI)}{\Gamma(m)} \quad (4.9)$$

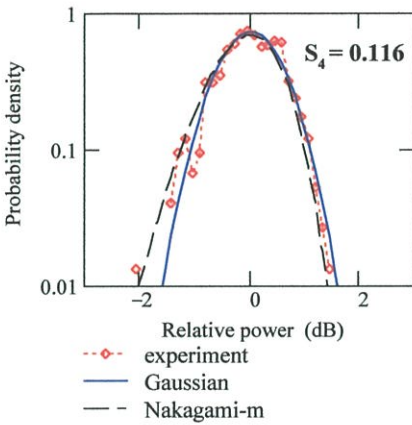
เราสามารถนำตัวอย่างข้อมูลสัญญาณดาวเทียม POR มุมเงยต่ำ ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันมาพล็อตกราฟความหนาแน่นความน่าจะเป็น เปรียบเทียบกับกราฟทฤษฎีความหนาแน่นความน่าจะเป็นในการแจกแจงแบบเกาส์ และการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  โดยการเลือกตัวอย่างเหตุการณ์การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน จำนวน 6 เหตุการณ์ มีช่วงเวลาเกิดนาน 10 นาที คือ 1 เมษายน พ.ศ. 2545 เวลา 13.00-13.09 น., 19.00-19.09 น. และ 20.20-20.29 น., 17 มีนาคม พ.ศ. 2545 เวลา 22.00-22.09 น., 25 กันยายน พ.ศ.2545 เวลา 19.00-19.09 น. และ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2545 เวลา 21.20-21.29 น. โดยรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่พล็อตเทียบกันระหว่างข้อมูลของสัญญาณกับฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็นทั้ง 2 แบบ โดยทำการนอร์มัลไลซ์สัญญาณให้มีค่ากลางเป็นศูนย์ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma_N$  ของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นสามารถคำนวณได้จากข้อมูลตามสมการ (2.43) ซึ่งจากรูปที่ 4.1 (ก), (ข), (ค), (จ) และ (ฉ) จะเห็นได้ว่า ลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดลองจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบเกาส์



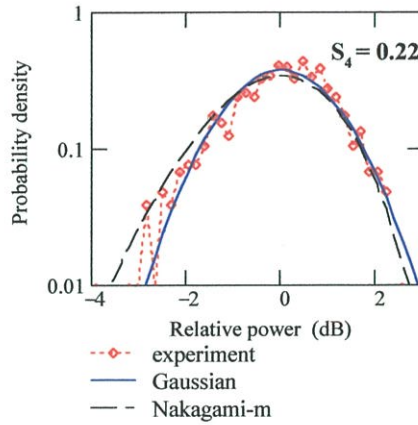
(ก) 1/04/45 (13.00-13.09 น.)



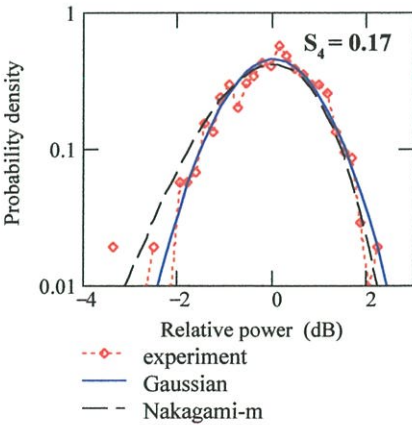
(ข) 1/04/45 (19.00-19.09 น.)



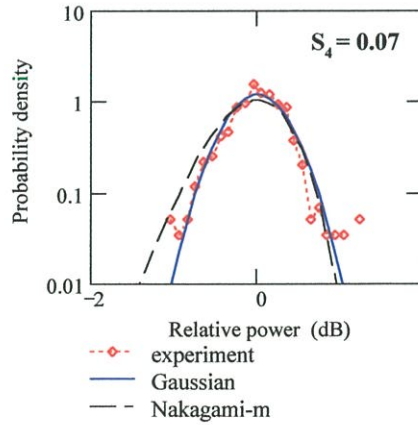
(ค) 1/04/45 (20.20-20.29 น.)



(ง) 17/03/45 (22.00-22.09 น.)

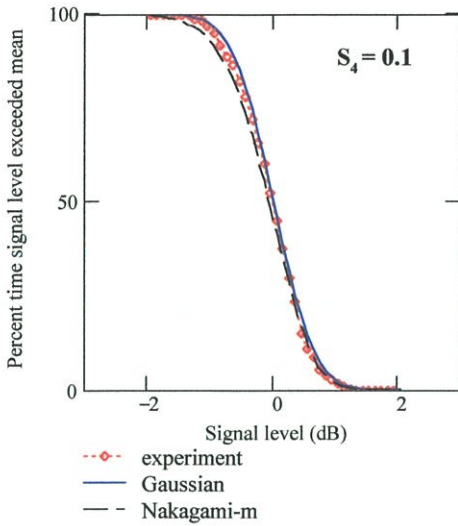


(จ) 25/09/45 (19.00-19.09 น.)

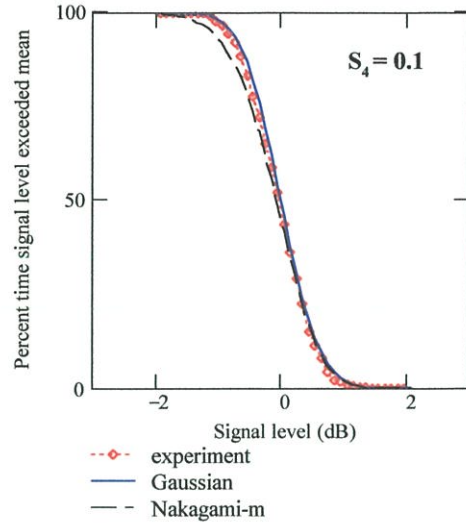


(ฉ) 30/12/45 (21.20-21.29 น.)

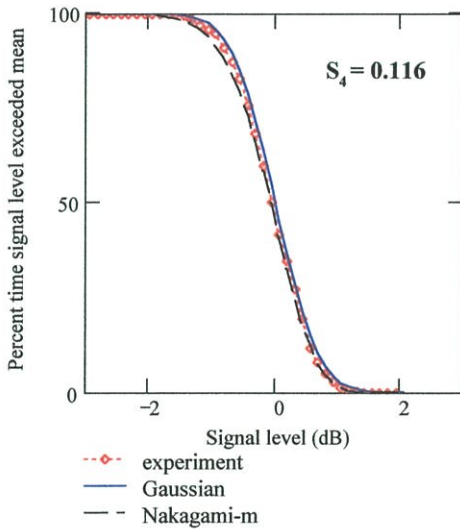
**รูปที่ 4.1** เปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นระหว่างข้อมูลสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน กับการแจกแจงแบบเกาส์ และการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  จำนวน 6 เหตุการณ์



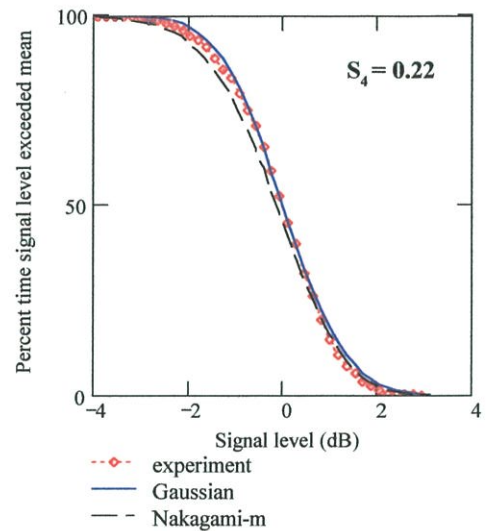
(ก) 1/04/45 (13.00-13.09 น.)



(ข) 1/04/45 (19.00-19.09 น.)



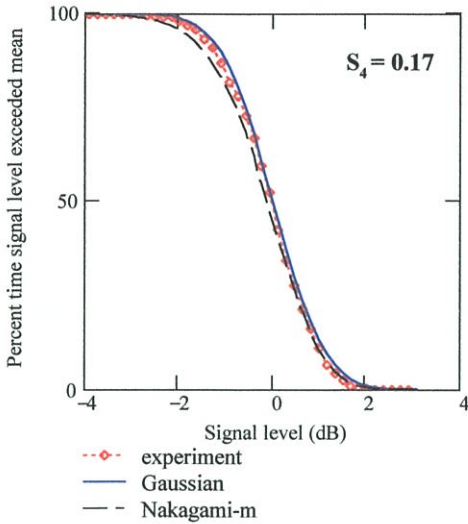
(ค) 1/04/45 (20.20-20.29 น.)



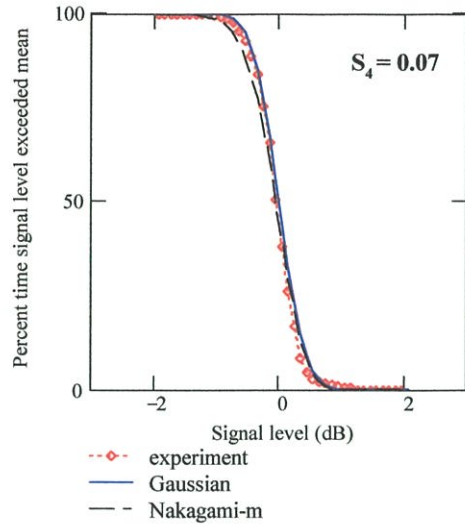
(ง) 17/03/45 (22.00-22.09 น.)

**รูปที่ 4.2** เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมระหว่างข้อมูลสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน กับการแจกแจงแบบเกาส์ และการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  จำนวน 6 เหตุการณ์

แต่จากรูปที่ 4.1 (ง) เป็นเหตุการณ์ที่มีการแกว่งรุนแรงที่สุดในจำนวน 6 เหตุการณ์ (ประมาณ 4.41 dB peak to peak) ลักษณะของกราฟทางด้านหางของสัญญาณ (Signal Fading) จะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  ที่ซึ่งสอดคล้องตาม [10, 25, 29-30] รูปที่ 4.2 แสดงกราฟการแจกแจงสะสม ที่พล็อตเทียบกันระหว่างข้อมูลของสัญญาณกับฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทั้ง 2 แบบ ที่ได้จากรูปความหนาแน่นความน่าจะเป็นในรูปที่ 4.1



(จ) 25/09/45 (19.00-19.09 น.)



(ข) 30 /12/45 (21.20-21.29 น.)

รูปที่ 4.2 (ต่อ) เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมระหว่างข้อมูลสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน กับการแจกแจงแบบเกาส์ และการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  จำนวน 6 เหตุการณ์

ซึ่งจากรูปที่ 4.2 เหตุการณ์ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบเกาส์ มีเพียงรูปที่ 4.2 (ง) ที่ลักษณะของกราฟด้านการจางหายของสัญญาณจะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  และจากรูปที่ 4.2 ถ้าเราพิจารณาความชันของกราฟร่วมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma_x$  จะเห็นได้ว่า ในตัวอย่างข้อมูลที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย ลักษณะกราฟจะมีความชันมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างของข้อมูลที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาก นั่นคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจะมีผลต่อความชันของกราฟ

ข้อมูลที่ได้จากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมสามารถกำหนดค่าเพื่อสัญญาณขาดหาย (Fade Margin) ของระบบการสื่อสาร เพื่อที่จะแก้ปัญหาการด้อยลงของคุณภาพการเชื่อมต่ออันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ในทางปฏิบัติค่าเปอร์เซ็นต์เวลาของระดับสัญญาณต่างๆ ในหน่วยเดซิเบล ที่มีความน่าสนใจและใช้ในการพิจารณาระบบ คือ พีคสูงสุด (Maximum Peak), ค่าการจางหายสูงสุด (Maximum Fade), ค่าพีคที่ 5% (5% Peak) และค่าการจางหายที่ 95% (95% Fade) ความแตกต่างระหว่างระดับสัญญาณที่ 5% และ 95% แสดงถึงพิสัยพลวัตของเครื่องรับ (Receiver Dynamic Range) [31] โดยสามารถอ่านค่าได้จากกราฟการแจกแจงสะสม ตารางที่ 4.1 แสดงค่าทางสถิติที่ซึ่งหาได้จากรูปที่ 4.2 ค่าพิสัยพลวัตนั้นจะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์คำนวณเหตุการณ์ความรุนแรง หรือความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันทั้งหมดในระยะยาวทำให้

สามารถประมาณค่าเฉลี่ยของค่าพิสัยพลวัตได้ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสถานีดาวเทียมนั้นๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าทางสถิติของการแจกแจงแบบสะสมของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR

เหตุการณ์	ครรชนี $S_4$	ค่าพีคสูงสุด (dB)	ค่าการจางหาย สูงสุด (dB)	ค่าพีคที่ 5% (dB)	ค่าการจางหาย ที่ 95% (dB)
1/04/45 (13.00-13.09)	0.10	1.336	-1.449	0.90	-0.85
1/04/45 (19.00-19.09)	0.10	1.477	-1.631	0.76	-0.88
1/04/45 (20.20-20.29)	0.116	1.486	-2.041	0.89	-0.92
17/03/45 (22.00-22.09)	0.22	2.845	-3.940	1.75	-1.81
25/09/45 (19.00-19.09)	0.17	2.193	-3.442	1.40	-1.46
30/12/45 (21.20-21.29)	0.07	1.225	-1.066	0.55	-0.55

#### 4.1.2 โครงสร้างทางเวลาและความถี่

หัวข้อก่อนหน้านี้นี้ได้กล่าวถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในเชิงขนาดว่ามีรูปแบบทางสถิติเปรียบเทียบได้กับฟังก์ชันการแจกแจงใด ในการศึกษาคูณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดนั้นไม่เฉพาะแต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางขนาดเท่านั้นที่ถูกนำมาพิจารณา โครงสร้างทางเวลาและความถี่ของสัญญาณก็มักจะถูกนำมาพิจารณา โดยการใชฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density (PSD) Function) ตามลำดับ

ความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม (Spectral Density) ของสัญญาณ เป็นการแสดงลักษณะการแจกแจง (Distribution) พลังงานหรือกำลังของสัญญาณในโดเมนความถี่ ถ้าสัญญาณกำลังเป็นสัญญาณรายคาบ (Periodic Signal)  $x(t)$  มีคาบเวลา  $T_o$  กำลังเฉลี่ย (Average Power) ของสัญญาณรายคาบคือ [32]

$$P_x = \frac{1}{T_o} \int_{-T_o/2}^{T_o/2} x^2(t) dt \quad (4.10)$$

ใช้ทฤษฎีบทของปาร์เซอวาล (Parseval's Theorem) สำหรับค่าจริงของสัญญาณรายคาบ (Real-Valued Periodic Signal) คือ

$$P_x = \frac{1}{T_o} \int_{-T_o/2}^{T_o/2} x^2(t) dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 \quad (4.11)$$

ซึ่งเทอม  $|c_n|$  เป็นสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Complex Fourier Series Coefficient) ของสัญญาณรายคาบ พลังค์ันความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม  $G_x(f)$  ของสัญญาณรายคาบ  $x(t)$  เป็นค่าจริง (Real) สม่าเสมอ และเป็นฟังก์ชันที่ไม่ติดลบ (Nonnegative) ของความถี่ จะให้การแจกแจงกำลังของสัญญาณ  $x(t)$  ในโดเมนความถี่ เป็น

$$G_x(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 \delta(f - nf_o) \quad (4.12)$$

นั่นคือ กำลังทั้งหมดถูกรวบรวมที่ฮาร์โมนิกของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) และกำลังที่ฮาร์โมนิกลำดับที่  $n$  ( $nf_o$ ) คือ  $|c_n|^2$  ซึ่งก็คือ ขนาดกำลังสองของอนุกรมฟูริเยร์ และ  $G_x(f)$  แทนความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณรายคาบ  $x(t)$  เป็นลำดับของฟังก์ชัน Weighted Delta ดังนั้น ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณรายคาบเป็นฟังก์ชัน ดิสครีต (Discrete Function) ของความถี่ ใช้ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมที่กำหนดในสมการ (4.12) สามารถเขียนกำลังนอร์แมลไลซ์เฉลี่ย (Average Normalized Power) ของค่าจริงของสัญญาณได้เป็น

$$P_x = \int_{-\infty}^{\infty} G_x(f) df = 2 \int_0^{\infty} G_x(f) df \quad (4.13)$$

สมการ (4.12) ใช้สำหรับสัญญาณรายคาบเท่านั้น ถ้าสัญญาณ  $x(t)$  เป็นสัญญาณไม่เป็นรายคาบ (Nonperiodic Signal) ที่ซึ่งจะไม่สามารถแสดงในรูปของอนุกรมฟูริเยร์ และถ้าสัญญาณเป็นสัญญาณกำลังไม่เป็นรายคาบ (มีพลังงานที่ไม่จำกัด) อาจจะไม่มีการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) อย่างไรก็ตามอาจจะแสดงความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของบางสัญญาณในแบบ *Limiting Sense* ถ้าเราทำการจำกัดเวลาสัญญาณ (Truncated Version)  $x_T(t)$  ของสัญญาณกำลังไม่เป็นรายคาบ  $x(t)$  โดยการสังเกตเฉพาะในช่วง  $(-T/2, T/2)$  ดังนั้นสัญญาณ  $x_T(t)$  จะมีพลังงานที่จำกัด และมีผลการแปลงฟูริเยร์  $X_T(f)$  ที่เหมาะสม ดังนั้น ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณไม่เป็นรายคาบ  $x(t)$  สามารถกำหนดได้เป็น

$$G_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X_T(f)|^2 \quad (4.14)$$

ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์  $R_x(\tau)$  มีไว้สำหรับวัดขนาดการแมตช์ของสัญญาณที่คัดลอก (Copy) ตัวเอง เลื่อนไป  $\tau$  หน่วย ค่า  $R_x(\tau)$  นี้ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา แต่มันเป็นฟังก์ชันของความแตกต่างทางเวลา  $\tau$  ระหว่างรูปคลื่น (Waveform) และที่คัดลอกเลื่อนออกไป ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ของค่าจริงของสัญญาณกำลัง  $x(t)$  กำหนดได้เป็น

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt \quad \text{สำหรับ } -\infty < \tau < \infty \quad (4.15)$$

เมื่อสัญญาณกำลัง  $x(t)$  เป็นสัญญาณรายคาบมีคาบเวลา  $T_o$  ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์สามารถแสดงได้เป็น

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T_o/2}^{T_o/2} x(t)x(t+\tau)dt \quad \text{สำหรับ } -\infty < \tau < \infty \quad (4.16)$$

ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ของสัญญาณรายคาบ มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีลักษณะสมมาตรของค่า  $\tau$  รอบๆ ค่า 0  $R_x(\tau) = R_x(-\tau)$
2. ค่ามากที่สุดของฟังก์ชัน คือ ค่าที่  $\tau$  มีค่าเท่ากับ 0  $R_x(\tau) \leq R_x(0)$  สำหรับทุกๆ ค่า  $\tau$
3. อัตสหสัมพันธ์ และความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD) เป็นคู่ของผลการแปลงฟูรีเยร์กันและกัน  $R_x(\tau) \leftrightarrow G_x(f)$
4. ค่าฟังก์ชันที่จุดเริ่มต้นจะเท่ากับค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณ

$$R_x(0) = \frac{1}{T_o} \int_{-T_o/2}^{T_o/2} x^2(t)dt$$

ในการหาค่าฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ ที่คำนวณในเชิงคิวิตอลมีอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีแรกเป็นวิธีมาตรฐานประมาณหาค่าฟังก์ชันโดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของผลคูณแต่ละค่าข้อมูลโดยตรง ส่วนวิธีที่ 2 เป็นวิธีทางอ้อมโดยการหาค่าสเปกตรัมกำลังสัญญาณก่อน โดยใช้การแปลงแบบฟูรีเยร์แล้วคำนวณหาค่าส่วนกลับของสเปกตรัมกำลังสัญญาณนี้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะการคำนวณโดยตรง

สำหรับข้อมูล  $N$  ค่า ของชุดข้อมูล  $\{x_n\}$  โดยที่  $n = 1, 2, \dots, N$  จากข้อมูล  $x(t)$  ที่ทำการบันทึก ซึ่งเป็นค่าคงที่ และมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์  $\bar{x} = 0$  ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ ที่ตำแหน่ง  $rh$  หาได้จากสูตร

$$\hat{R}_r = \hat{R}_x(rh) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n x_{n+r} \quad r = 0, 1, 2, \dots, m \quad (4.17)$$

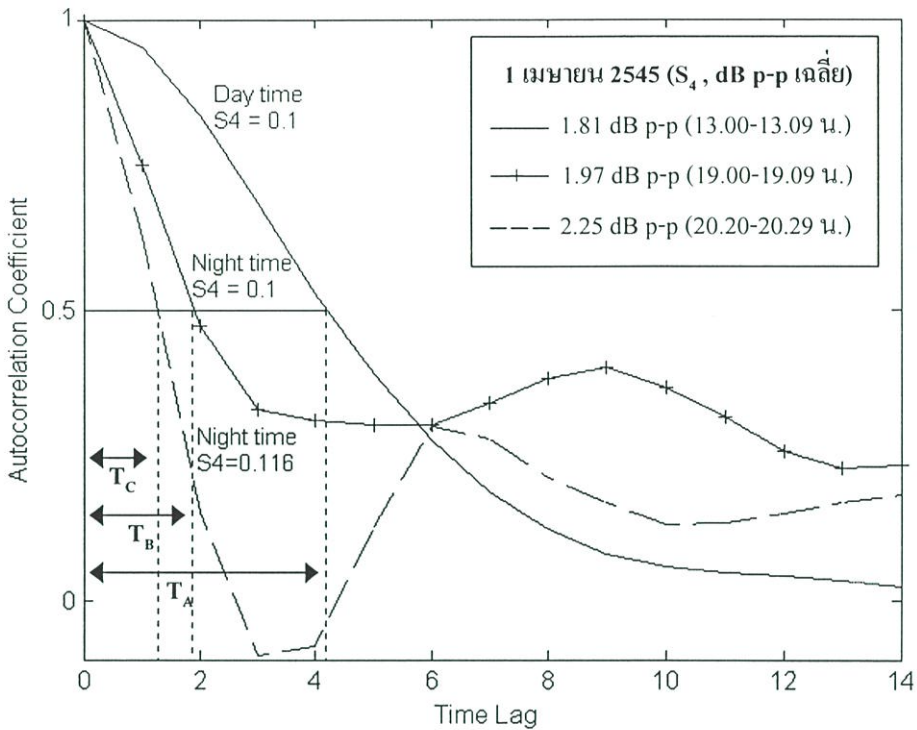
$r$  คือ ค่าล่าหลัง (Lag Number),  $m$  คือ ค่าล่าหลังที่มากที่สุด และ  $\hat{R}_r$  คือ ค่า  $R_r$  ที่หาได้จริงที่ค่าล่าหลัง  $r$  ค่าล่าหลังที่มากที่สุด  $m$  จะสัมพันธ์กับเวลาที่กระจัดออกไปมากที่สุด

$$\tau_{\max} = \tau_m = mh \quad (4.18)$$

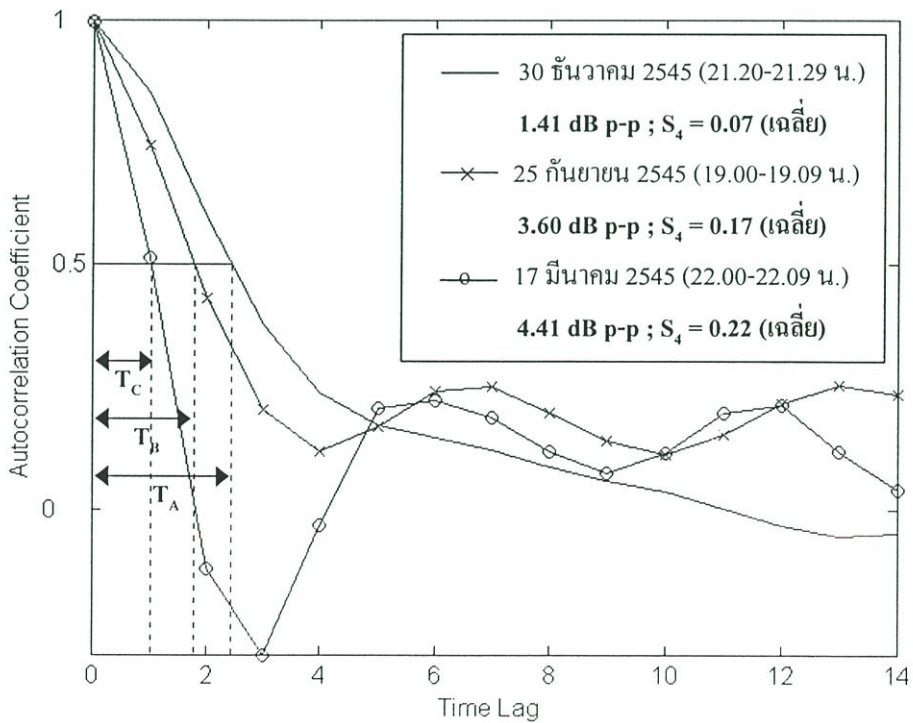
#### 4.1.2.1 การวิเคราะห์ฟังก์ชันอัตโนมัติของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

การคำนวณค่าอัตโนมัติของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันสามารถที่จะหา ช่วงสหสัมพันธ์ (Correlation Interval) หรือเวลาดีคอรีเลชัน (Decorrelation Time) หรือเวลาร่วมกัน (Coherent Time),  $\tau$  ซึ่งค่า  $\tau$  เป็นค่าเวลาล่าหลัง (Time Lag) ที่สัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์อัตโนมัติ (Autocorrelation Coefficient) ลดลงถึง 50% ของค่าสูงสุด [9, 13] Yeh และ Liu (1982) [12] ได้นำเสนอว่า ค่าเวลาร่วมกันขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดเขตเฟรสเนล (Fresnel Zone Size) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{\lambda(Z-l/2)}$  นิยามไว้ในสมการ (2.8) ซึ่ง  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ และ  $Z$  คือ ระยะทางเฉลี่ยของเส้นทางการแพร่กระจายระหว่างกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ความหนา  $\approx l$ ) และเครื่องรับสัญญาณ ส่วนอีกแฟกเตอร์ คือ ความเร็วขยับเลื่อน (Drift Speed) ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอที่ตัดผ่านเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณควมเทียมสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่รุนแรงมาจากขนาดของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอที่มีค่าประมาณใกล้เคียงกับขนาดเขตเฟรสเนลที่หนึ่ง คือ  $\sqrt{\lambda(Z-l/2)}$  ดังนั้นระยะสหสัมพันธ์ (Correlation Distance) จากค่าการแกว่งขึ้นลงที่รุนแรง ควรจะมีค่าประมาณเท่ากับขนาดเขตเฟรสเนล ความสัมพันธ์กันระหว่างระยะสหสัมพันธ์  $L$  กับเวลาร่วมกัน  $\tau$  คือ  $\tau = L/v$  ซึ่ง  $v$  คือ ความเร็วขยับเลื่อน (Drift Velocity) นั่นคือ ถ้า  $v$  มาก ทำให้ค่า  $\tau$  ลดลง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่รุนแรงมากขึ้น และจากสมการ (2.4) ,  $v = \sqrt{\lambda z} f_{\min}$  จะเห็นได้ว่า เวลาร่วมกันยังเป็นส่วนกลับของความถี่เฟรสเนลต่ำสุดที่หนึ่งตามทฤษฎี หรือความถี่เฟรสเนลในฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD)

รูปที่ 4.3 แสดงกราฟอัตโนมัติของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ของเหตุการณ์จำนวน 3 เหตุการณ์ ในวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2545 เวลา 13.00-13.09 น., 19.00-19.09 น. และ 20.20-20.29 น. ให้  $T$  (Time Unit) แทนเวลาล่าหลังในหน่วยการชักตัวอย่างการแปลงเป็นเชิงเลข (Digitized Sampling) (ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ 1 Hz) ดังนั้นเวลาร่วมกัน  $\tau$  (วินาที) สามารถหาได้จาก  $\tau = T/1$  ใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในระยะเวลา 10 นาทีต่อ 1 เหตุการณ์ ดังนั้นเวลาของแต่ละเหตุการณ์จะเท่ากับ 600 แต่ในการศึกษานี้จะพิจารณาเฉพาะในช่วงที่เวลาล่าหลัง มีค่าสัมพันธ์อัตโนมัติเท่ากับ 0.5 ที่ซึ่งเห็นได้จากรูป โดยที่ไม่จำเป็นต้องแสดงสัมพันธ์ฟังก์ชันอัตโนมัติที่อนุกรมเวลาล่าหลังไปให้มาก

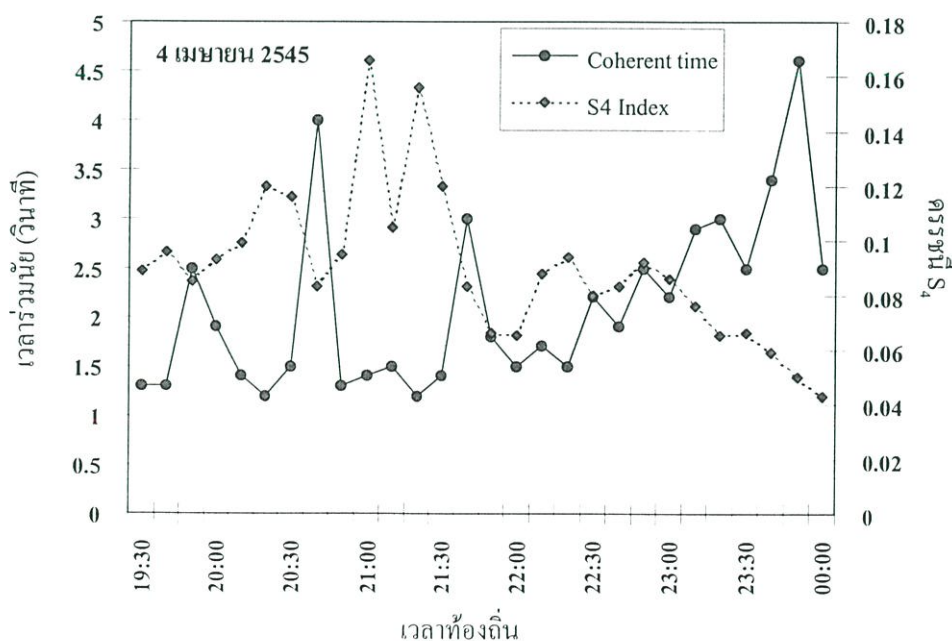


รูปที่ 4.3 กราฟอัตราสหสัมพันธ์ของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และโทรโพสเฟียร์

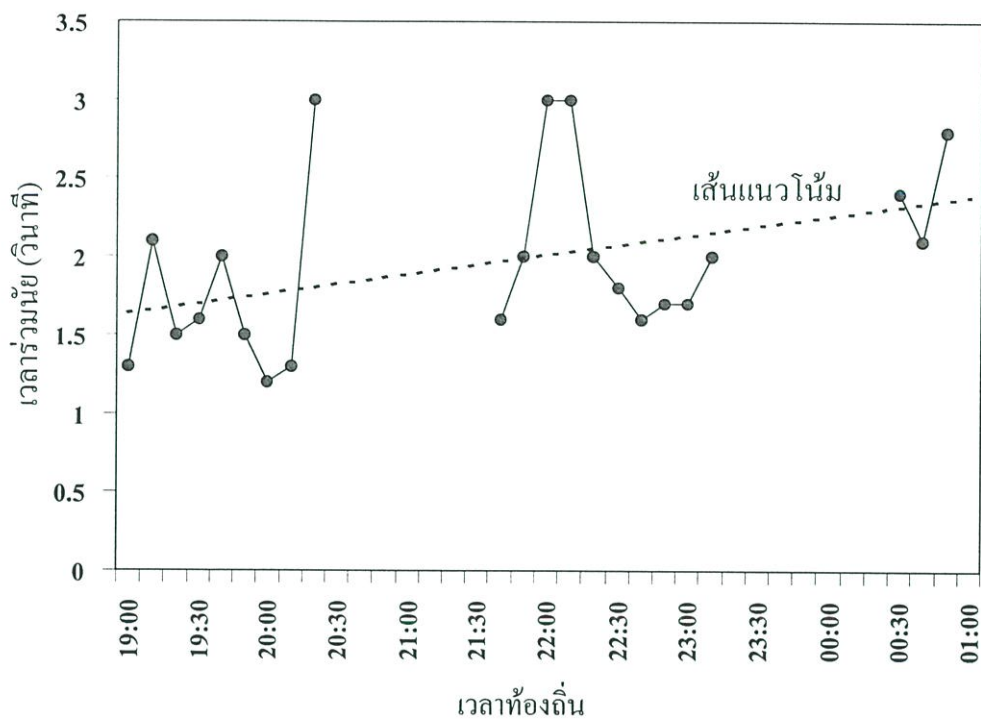


รูปที่ 4.4 กราฟอัตราสหสัมพันธ์ของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จำนวน 3 เหตุการณ์ ใน 3 เดือน

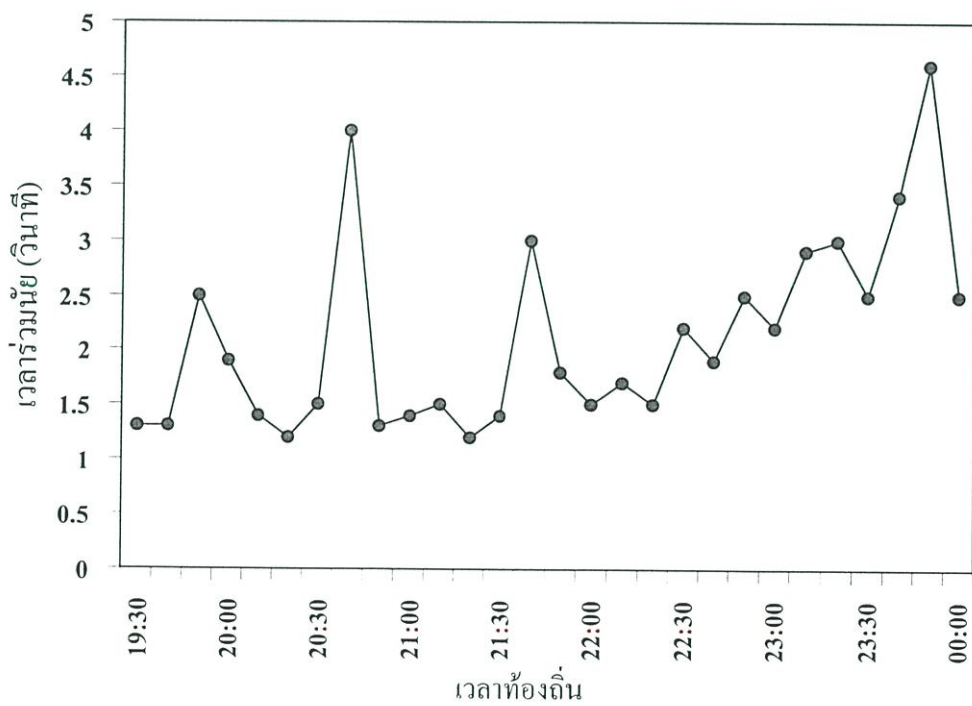
และจากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นได้ว่า เวลาเฉลี่ยหลังของเหตุการณ์ 13.00-13.09 น. คือ  $T_A = 4.2$ , เหตุการณ์ 19.00-19.09 น. คือ  $T_B = 1.9$  และเหตุการณ์ 20.20-20.29 น. คือ  $T_C = 1.3$  ซึ่งสามารถหาค่าเวลาร่วมกัน  $\tau$  ได้เท่ากับ  $\tau_A = 4.2$  วินาที,  $\tau_B = 1.9$  วินาที และ  $\tau_C = 1.3$  วินาที ตามลำดับ ค่าเวลาร่วมกันของเหตุการณ์ที่เกิดในตอนกลางวัน (13.00-13.09 น.) จะมากกว่าในกรณีที่เกิดตอนกลางคืนที่ซึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เกิดตอนกลางวัน) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับขึ้นลงที่ช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเกิดในตอนกลางคืน และจากรูปที่ 4.3 ยังเห็นได้อีกว่า ค่าครรชนี  $S_4$  ที่มากกว่า จะให้ค่าเวลาร่วมกัน  $\tau$  ที่น้อยกว่า หรือมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่รวดเร็วกว่าค่าครรชนี  $S_4$  ที่ต่ำกว่า ต่อไปมาดูอีกตัวอย่างหนึ่งดังรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบกราฟอัตราสัมพันธ์ของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เกิดตอนกลางคืน) จำนวน 3 เหตุการณ์ ที่เกิดขึ้นคนละเดือน โดยมีค่าครรชนี  $S_4$  ที่แตกต่างกัน คือ เหตุการณ์ที่เกิดในเดือนที่มีการแกว่งแอมพลิจูดอย่างไม่ค่อยรุนแรง (ธันวาคม) และในช่วงเดือนที่มีการแกว่งแอมพลิจูดอย่างรุนแรง (กันยายน และมีนาคม) ซึ่งจะมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยของแต่ละเหตุการณ์เท่ากับ 0.07, 0.17 และ 0.22 ตามลำดับ และจากรูปสามารถหาค่าเวลาเฉลี่ยหลังได้เท่ากับ  $T_A = 2.4$ ,  $T_B = 1.8$ ,  $T_C = 1$  ตามลำดับ ที่ซึ่งสามารถหาค่าเวลาร่วมกัน  $\tau$  ของแต่ละเหตุการณ์ได้เท่ากับ  $\tau_A = 2.4$  วินาที,  $\tau_B = 1.8$  วินาที และ  $\tau_C = 1$  วินาที ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่า ค่าครรชนี  $S_4$  ที่มากกว่า จะให้ค่าเวลาร่วมกัน  $\tau$  ที่น้อยกว่า หรือมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามเวลาที่รวดเร็วกว่า ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกันกับในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่าครรชนี  $S_4$  เทียบกับค่าเวลาร่วมกัน  $\tau$



(ก) 11 มีนาคม 2545



(ข) 4 เมษายน 2545

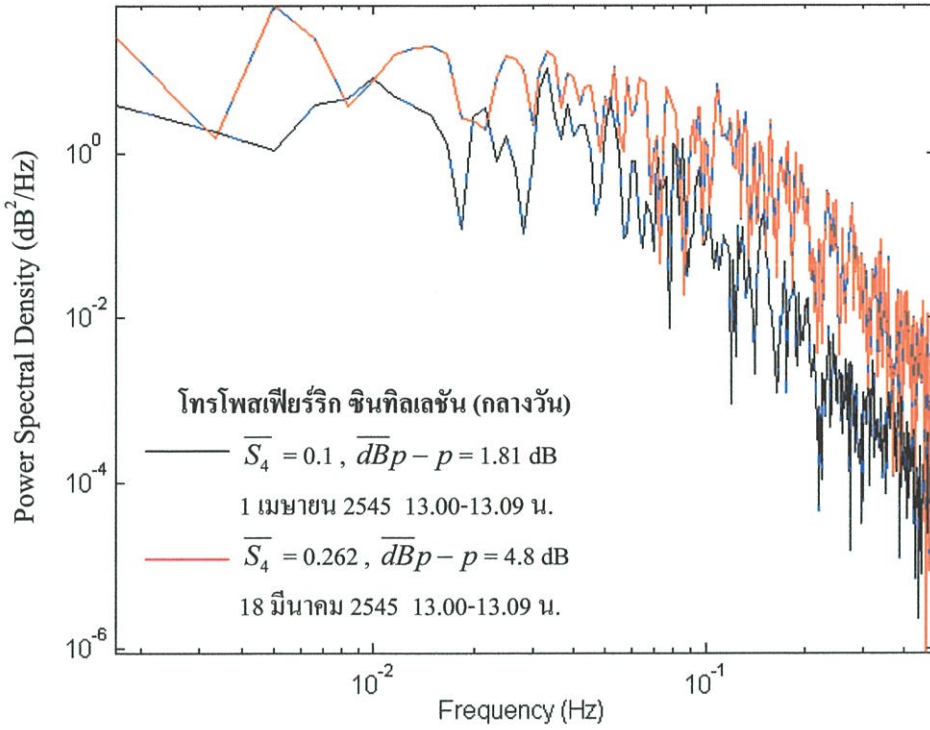
รูปที่ 4.6 กราฟตัวอย่างค่าเวลาร่วมกัน  $\tau$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

แต่อย่างไรก็ตาม ค่าครรชนี  $S_4$  ที่มากกว่า ก็ไม่ได้หมายความว่า จะมีค่าเวลาร่วมนัย  $\tau$  ที่น้อยกว่า หรือมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่รวดเร็วกว่าเสมอไป ดังจะดูได้จากการเปรียบเทียบรูปที่ 4.3 กับ 4.4 ในกรณีของ  $S_4 = 0.116$  มีค่าเวลาร่วมนัย  $\tau$  ที่น้อยกว่า หรือมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่รวดเร็วกว่าในกรณี  $S_4 = 0.17$  จึงอาจสรุปได้ว่า กรณีที่การแกว่งของสัญญาณอย่างรุนแรงนั้นไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณที่รวดเร็ว ( $\tau$  มีค่าน้อยๆ) ที่ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [29] แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการแกว่งของสัญญาณอย่างรุนแรงก็มีแนวโน้มว่าจะมีค่าเวลาร่วมนัยค่าน้อยๆ ด้วย [20] ดังจะดูได้จากผลของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่าครรชนี  $S_4$  เทียบกับค่าเวลาร่วมนัยในรูปที่ 4.5 ค่าครรชนี  $S_4$  จะมีค่าสูงสุด ( $S_4 = 0.1-0.17$ ) เวลาประมาณ 21.00-21.30 น. ซึ่งจะมีค่าเวลาร่วมนัยที่น้อย ( $\tau = 1.2-1.4$  วินาที) และในกรณีที่ครรชนี  $S_4$  มีค่าต่ำ ( $S_4 = 0.043-0.05$ ) ที่เวลาประมาณเที่ยงคืน ซึ่งจะมีค่าเวลาร่วมนัยที่มาก

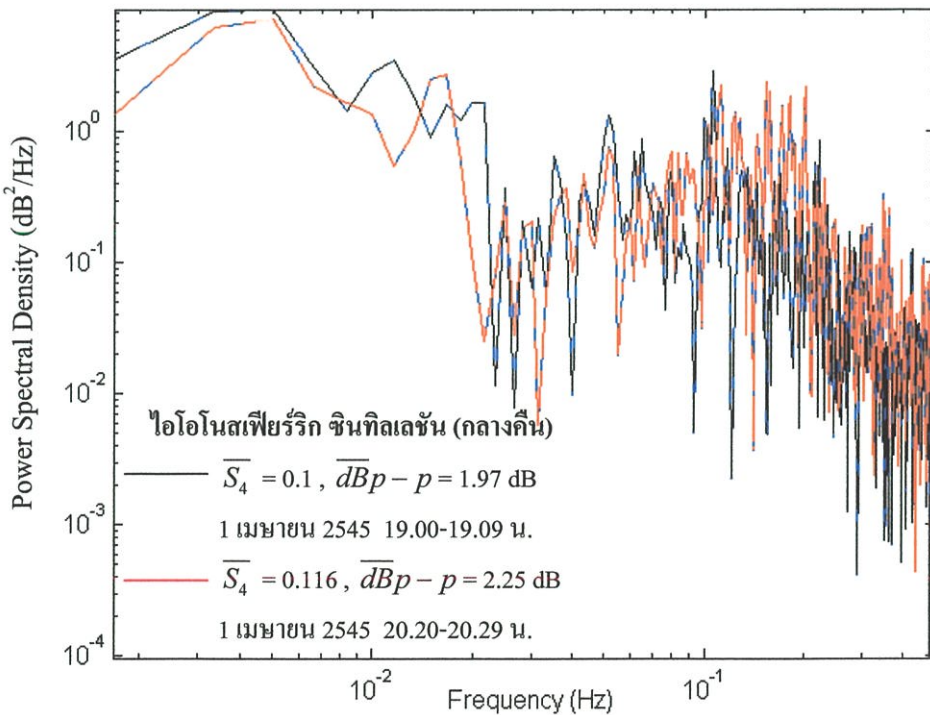
รูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) แสดงกราฟตัวอย่างค่าเวลาร่วมนัย  $\tau$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยจะเห็นได้จากรูปว่า ค่าเวลาร่วมนัยจะเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึงประมาณเที่ยงคืน (อาจดูได้จากเส้นแนวโน้ม) และในกรณีของรูปที่ 4.6 (ข) จะเห็นได้ว่า ค่าเวลาร่วมนัยมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณเที่ยงคืน ที่ซึ่งสอดคล้องตามการหยุดเคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ (Irregularities Movement) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประมาณเที่ยงคืน ก่อนที่กลุ่มความไม่สม่ำเสมอจะมีการเคลื่อนที่ถอยหลังไปทางทิศตะวันตก อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอก็ไม่สามารถกำหนดค่าเวลาร่วมนัยได้อย่างแน่ชัด ผลของการที่ค่าเวลาร่วมนัยเพิ่มขึ้นทีละน้อยหลังจากที่ดวงอาทิตย์ตกไปจนถึงเที่ยงคืน และการที่ค่าเวลาร่วมนัยมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณเที่ยงคืน สอดคล้องกับงานวิจัย [20]

#### 4.1.2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน

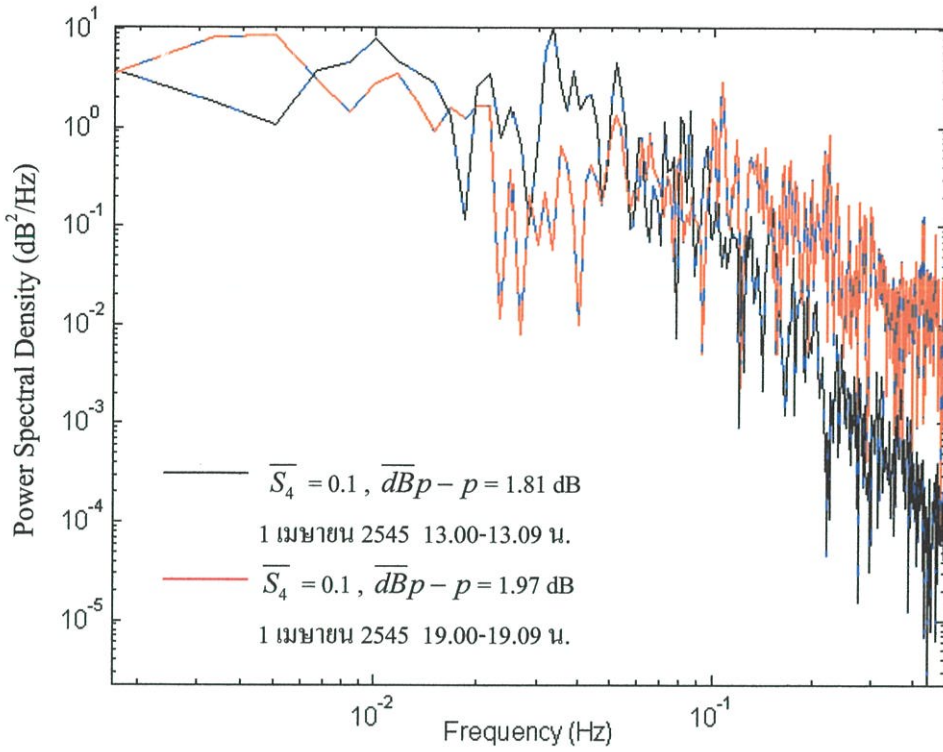
ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของเหตุการณ์การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของความถี่ต่ำ และส่วนของความถี่สูง ช่วงต่อระหว่างความถี่ต่ำและความถี่สูง เรียกว่า ความถี่เฟรสเนล (Fresnel Frequency) หรือความถี่หักมุม (Corner Frequency) [9-10] โดยปกติแล้วช่วงต่อของความถี่นี้จะเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งในหลายๆ การทดลองพบว่า ความชันของสเปกตรัมเป็นเรื่องที่ยากในการแสดงและวิเคราะห์โดยละเอียด เนื่องจากมีแฟคเตอร์ที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก จึงต้องวิเคราะห์ด้วยความระมัดระวัง เช่นในบางกรณี พบว่าความถี่หักมุมมีอยู่มากกว่า 1 ที่ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสัญญาณมีการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และโทรโพสเฟียร์ รวมกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่ขอก้าวถึงรายละเอียดมากนัก



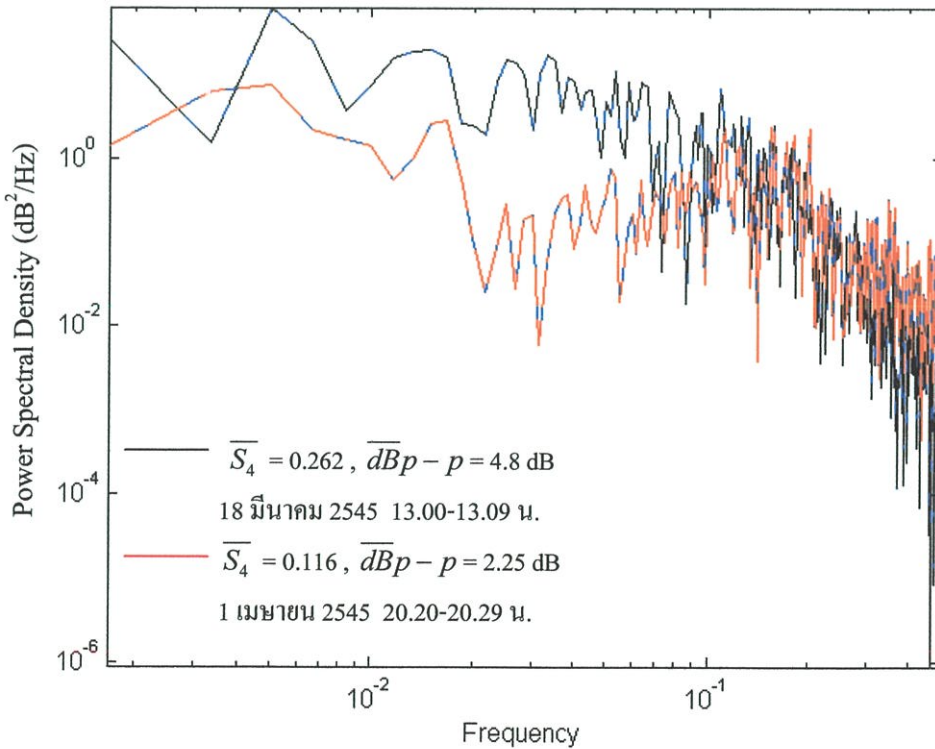
รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโทสเฟียร์



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



(ก) เหตุการณ์เกิดวันเดียวกัน



(ข) เหตุการณ์เกิดต่างเดือนกัน

**รูปที่ 4.9** ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เทียบกับไอโอโนสเฟียร์

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์ ตามลำดับ โดยจากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่า ในกรณีที่สัญญาณมีการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณที่รุนแรงหรือมีค่าครรชนี  $S_4$  ที่สูงกว่า จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟที่แผ่กว้างมากกว่า และถ้าดูจากรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นเหตุการณ์เดียวกันจะพบว่า ยังมีค่าเวลาร่วมนัยที่น้อยกว่าด้วย

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เทียบกับไอโอโนสเฟียร์ โดยจากรูปที่ 4.9 (ก) เป็นเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่เกิดในวันเดียวกัน (1 เมษายน พ.ศ. 2545) แต่เกิดคนละเวลา (เกิดตอนกลางวันและกลางคืน) โดยทั้งสองเหตุการณ์มีขนาดการแกว่งขึ้นลงของแอมพลิจูด หรือมีค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน (ครรชนี  $S_4 = 0.1$ ) สามารถเห็นได้จากรูปว่า ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เกิดตอนกลางคืน) จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟที่แผ่กว้างมากกว่า หรือมีค่าเวลาร่วมนัยที่น้อยกว่า ในกรณีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เกิดตอนกลางวัน) ดังจะดูได้จากรูปที่ 4.3 และจากรูปที่ 4.9 (ข) เป็นเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันสองเหตุการณ์ที่มีค่าความเข้ม หรือค่าครรชนี  $S_4$  ที่แตกต่างกัน คือ ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จะมีค่าครรชนี  $S_4$  ที่มากกว่าในกรณีของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยสามารถเห็นได้ว่า แม้ว่าในกรณีของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีค่าครรชนี  $S_4$  ที่มากกว่ามาก แต่ก็ยังมีลักษณะการแผ่กว้างของกราฟที่น้อยกว่าในกรณีของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จึงสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่รวดเร็วกว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ แม้ว่าในช่วงเวลานั้น ค่าครรชนี  $S_4$  ของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะต่ำกว่า ที่ซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3.3

#### 4.1.2.3 การวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

อัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน (Scintillation Rate)  $\overline{N}_0$  หรือ อัตราการจางหาย (Fade Rate) สามารถหาได้จาก [20] 1. ค่าเวลาร่วมนัย (Coherent Time) 2. เทคนิค Mean Crossing และ 3. ความถี่หักมุม 3 dB ของความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ (3 dB Corner Frequency of PSD) โดยในที่นี้จะขอกกล่าวเพียง 2 วิธีแรกเท่านั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของ

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณที่หาจากฟังก์ชันอัตโนมัติผ่านการพิจารณาค่าเวลาร่วมกัน ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงสามารถคำนวณได้จากการหาส่วนกลับของค่าเวลาร่วมกัน  $\overline{N}_o = 1/\tau$  โดยค่าเวลาร่วมกันที่ตำแหน่งลดลง 50% นี้ไม่ต้องหารด้วยอัตราการซีกตัวอย่าง (Sampling 1 Hz) และวิธีการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันโดยใช้เทคนิค Mean Crossing โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$\overline{N}_o = \frac{N(A_i \rightarrow \pm A_{average})}{2 \times period(sec)} \quad (4.19)$$

ที่ซึ่ง  $A_i$  คือ ระดับของสัญญาณใดๆ และ  $A_{average}$  คือ ค่าเฉลี่ยระดับของสัญญาณ หรือ 0 เดซิเบล เครื่องหมายบวก ( $\pm A_{average}$ ) หมายถึง สัญญาณสามารถแกว่งขึ้นลงเหนือระดับค่าเฉลี่ยสองครั้ง คือ ในทิศทางบวกและลบในช่วงเวลาหนึ่ง (10 นาที) วิธีการหานี้เริ่มจากนับจำนวนครั้งที่สัญญาณแกว่งตัดผ่านค่าเฉลี่ย หรือ 0 เดซิเบล ขึ้นและลง นับเป็น 1 ครั้ง เช่น ได้  $N = 163$  ครั้ง ดังนั้น  $\overline{N}_o = 163/(2 \times 600 \text{ sec})$  เท่ากับ 0.136 Zero Crossings ต่อวินาที หรือ 0.136 Hz หรือ Crossing ทุกๆ 7.35 วินาที

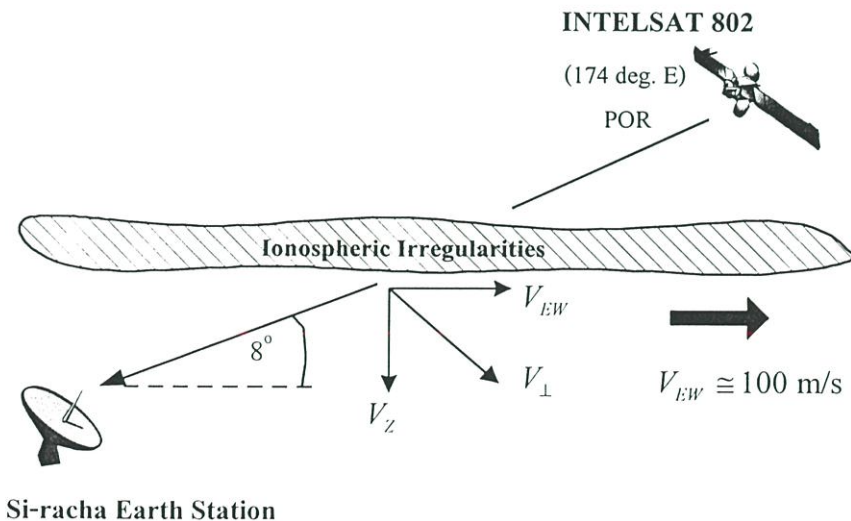
#### ตารางที่ 4.2 การคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน

เหตุการณ์	ครรชนี $S_4$	จำนวนครั้งที่ตัดผ่านค่า 0	เวลาร่วมกัน ( $\tau$ วินาที)	Scintillation Rate $\overline{N}_o$ ที่คำนวณจาก	
				Mean Crossing	Autocorrelation
30/12/45 (21.20-21.29 น.)	0.07	104	2.4	0.087	0.42
1/4/45 (13.00-13.09 น.)	0.10	60	4.2	0.05	0.24
1/4/45 (19.00-19.09 น.)	0.10	123	1.9	0.1	0.53
1/4/45 (20.20-20.29 น.)	0.116	163	1.3	0.136	0.77
25/9/45 (19.00-19.09 น.)	0.17	141	1.8	0.117	0.56
17/3/45 (22.00-22.09 น.)	0.22	180	1	0.15	1.00

อัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่คำนวณได้จากทั้งสองวิธี ของเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในรูปที่ 4.3 และ 4.4 จำนวน 6 เหตุการณ์ สามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่คำนวณได้จากทั้ง 2 วิธี จะไม่สัมพันธ์กัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสาเหตุของโครงสร้างของตัวกลางที่สัญญาณดาวเทียมแพร่กระจายผ่าน หรืออาจเกิดจากการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณเนื่องจากการกระจัดกระจายหลายทาง (Multiple Scattering) [20, 33] ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ว่า วิธีไหนจะให้ค่าที่เที่ยงตรงที่สุด ซึ่งขึ้นกับจำนวนเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่ใช้ในการวิเคราะห์ และวิธีการที่ใช้ อย่างไรก็ตาม อัตราการจางหายอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.1 ถึง 1 Hz [10] และอาจสังเกตได้จากตารางที่ 4.2 ว่า เหตุการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรง หรือมีค่าครรชน  $S_4$  ที่สูง มีแนวโน้มว่าจะให้ค่าเวลาร่วมนัยที่ต่ำ มีจำนวนครั้งที่ตัดผ่านค่าเฉลี่ย หรือ 0 เดซิเบล ที่มาก ซึ่งทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน หรืออัตราการจางหาย มากด้วย

#### 4.1.2.4 การคำนวณระยะดีคอรัลเลชันสำหรับสายอากาศแบบสเปซไคเวอร์ซิตี

การศึกษาในหัวข้อก่อนหน้าสามารถประยุกต์ใช้กับระบบการสื่อสารได้ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงหรือปรับปรุงแก้ไขการเลวลง (Degradation) เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ระยะดีคอรัลเลชัน (Decorrelation Distance) บนพื้นโลก หรือระยะห่างในการติดตั้งงานสายอากาศ จะใช้สำหรับเทคนิคสายอากาศแบบสเปซไคเวอร์ซิตี (Space Diversity Antenna) ซึ่งเทคนิคสเปซไคเวอร์ซิตีนี้เป็นการใช้สายอากาศ 2 ชุด ติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่คาดว่าถ้าชุดหนึ่งรับคลื่นได้ค่าอีกชุดหนึ่งจะรับคลื่นได้สูง



รูปที่ 4.10 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอน

โดยสามารถหาค่าระยะดีคอรรีเลชันได้จากผลคูณระหว่างค่าเวลาร่วมนัย กับความเร็วขยับเลื่อน (Drift Velocity) ของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ สำหรับบริเวณเส้นศูนย์สูตร กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกหลังจากที่ดวงอาทิตย์ตก ด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 100 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.10  $V_{EW}$  และ  $V_Z$  คือ ความเร็วของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในทิศทางตะวันออก-ตะวันตก และในแนวตั้ง ตามลำดับ ความเร็วเหล่านี้ถูกสมมุติให้กลุ่มความไม่สม่ำเสมออยู่ที่ความสูง 400 กิโลเมตร และค่าอัตราส่วนของ  $V_{EW} : V_Z$  เท่ากับ 5 : 1 [34] และให้  $V_{\perp}$  คือ ความเร็วขยับเลื่อนที่ตั้งฉากกับเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น กำหนดโดย

$$V_{\perp} = V_{EW} \sin \theta + V_Z \cos \theta \quad (4.20)$$

ซึ่ง  $\theta$  คือ มุมเงยของสายอากาศเท่ากับ  $8^\circ$  ดังนั้น ความเร็วขยับเลื่อนที่ตั้งฉาก  $V_{\perp}$  กำหนดได้ คือ

$$V_{\perp} = 100\sin(8^\circ) + 20\cos(8^\circ) = 33.722 \text{ เมตรต่อวินาที} \quad (4.21)$$

ดังนั้น ระยะดีคอรรีเลชัน เท่ากับ  $V_{\perp} \times \tau = 33.722 \tau$  โดยสามารถคำนวณและแสดงดังตารางที่ 4.3 จำนวน 5 เหตุการณ์ ซึ่งเป็นเหตุการณ์เดียวกับที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 ความเร็วในการขยับเลื่อนนี้ในแต่ละสถานีหรือแต่ละตำแหน่งจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับมุมเงยของสายอากาศ และระยะทางในการแพร่กระจาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระยะดีคอรรีเลชันนี้ไม่ควรเกินขนาดเขตเฟรตเนลโดยคำนวณได้จากสมการ (2.6) ที่ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 176 เมตร อย่างไรก็ตามระยะดีคอรรีเลชันที่เหมาะสมนั้นควรจะมีการวิเคราะห์คำนวณหาค่าเฉลี่ยในระยะยาว เพื่อที่จะได้กำหนดระยะห่างของสายอากาศ อย่างถูกต้องเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.3 ระยะดีคอรรีเลชันที่พื้น โลก

เหตุการณ์	ครรชนี $S_4$	เวลาร่วมนัย ( $\tau$ วินาที)	ระยะดีคอรรีเลชันที่พื้น โลก ( $V \times \tau$ เมตร)
30/12/45 (21.20-21.29 น.)	0.07	2.4	80.93
1/04/45 (19.00-19.09 น.)	0.10	1.9	64.07
1/04/45 (20.20-20.29 น.)	0.116	1.3	43.84
25/09/45 (19.00-19.09 น.)	0.17	1.8	60.70
17/03/45 (22.00-22.09 น.)	0.22	1	33.72

## 4.2 แบบจำลองการทำนายความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

จาก [9, 18] ITU-R Report 718-3 (1990) เสนอวิธีการทำนายค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ( $\sigma_{pre}$ ) ที่ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองของ Karasawa, Yamada และ Allnutt (1988) แบบจำลองนี้เป็นการทำนายความเข้มในระยะยาว ไม่เหมาะแก่การทำนายในระยะสั้นตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในรายวัน [35] โดยมีพารามิเตอร์อินพุต คือ ค่าเฉลี่ยในรายเดือนของอุณหภูมิ  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), ความชื้นสัมพัทธ์  $H$  (%), ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสายอากาศ (Antenna Diameter)  $D_{geom}$ , ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)  $\eta$ , ความถี่  $f$  และมุมเงย  $\theta$  โดยมีสมการ คือ

$$\sigma_{pre} = \sigma_{ref} f^{7/12} g(x) / (\sin\theta)^{1.2} \quad (4.22)$$

โดยมีขั้นตอนในการคำนวณ คือ

ขั้นแรกหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ  $t$  และความชื้นสัมพัทธ์  $H$  ในช่วงเวลาที่สนใจ (ช่วงเวลาที่สนใจไม่ควรน้อยกว่า 1 เดือน)

ขั้นที่สอง ทำการคำนวณความดันไอน้ำอิ่มตัว

$$e_s = \frac{5854 \times 10^{(20-2950/(273+t))}}{(273+t)^5} \quad \text{มิลลิบาร์} \quad (4.23)$$

ขั้นที่สาม คำนวณค่าครรชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในเทอม  $N_{wet}$  จากความดันไอน้ำ  $e_s$  และความชื้นสัมพัทธ์  $H$

$$N_{wet} = \frac{3730 H e_s}{(273+t)^2} \quad (4.24)$$

ขั้นที่สี่ คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอ้างอิง

$$\sigma_{ref} = (3.6 \times 10^{-3}) + (1.03 \times 10^{-4}) N_{wet} \quad \text{เดซิเบล} \quad (4.25)$$

ขั้นที่ห้า คำนวณความยาวเส้นทางประสิทธิผล  $L$  จาก

$$L = \frac{2000}{\sqrt{(\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4}) + \sin \theta}} \quad \text{เมตร} \quad (4.26)$$

มุมเงย  $\theta$  ควรจะมากกว่า 4 องศา

ขั้นที่หก หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางสายอากาศประสิทธิภาพ  $D_{\text{eff}}$  จากเส้นผ่าศูนย์กลางสายอากาศจริง  $D_{\text{geom}}$  และประสิทธิภาพของสายอากาศ  $\eta$

$$D_{\text{eff}} = \sqrt{\eta} D_{\text{geom}} \quad \text{เมตร} \quad (4.27)$$

ถ้าไม่ทราบประสิทธิภาพของสายอากาศ  $\eta$  ให้กำหนดเป็น  $\eta = 0.5$

ขั้นที่เจ็ด คำนวณค่าแฟคเตอร์ค่าเฉลี่ยของสายอากาศ (Antenna Averaging Factor)  $g(x)$  จาก

$$g(x) = \left\{ 3.86(x^2 + 1)^{11/12} \sin[(11/6)\arctan(1/x)] - 7.08x^{5/6} \right\}^{1/2} \quad (4.28)$$

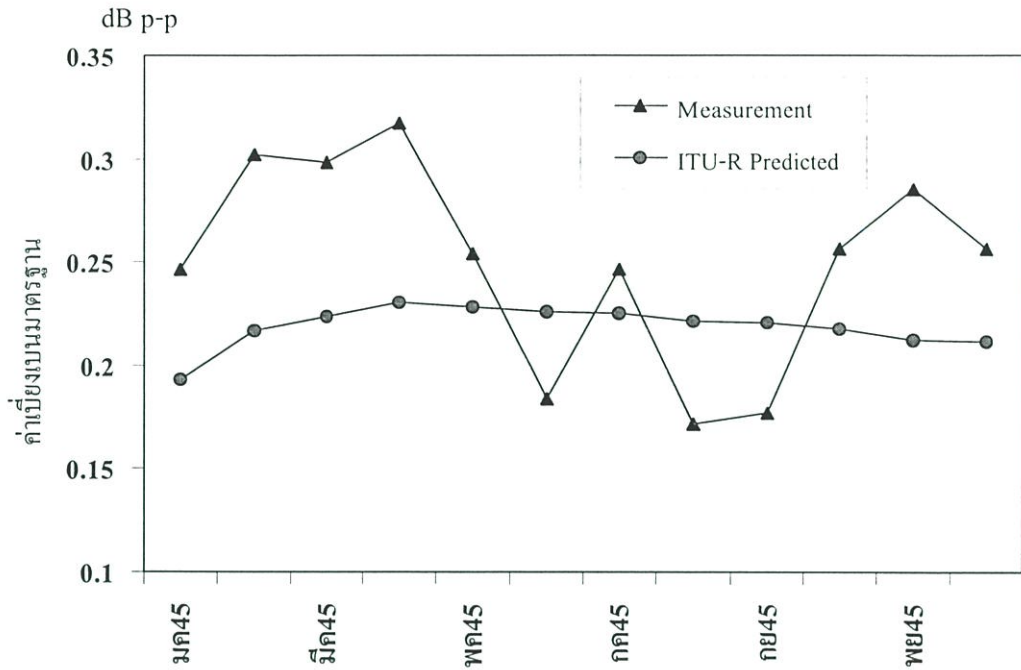
โดยที่

$$x = 1.22 D_{\text{eff}}^2 \times \frac{f}{L} \quad (4.29)$$

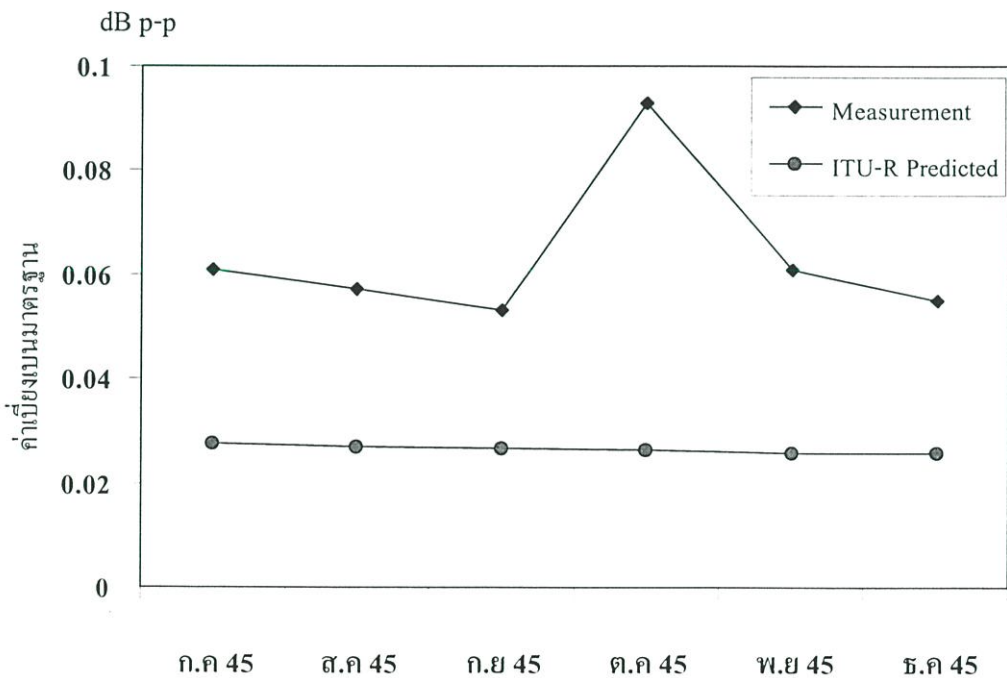
ซึ่ง  $f$  คือ ความถี่คลื่นพาห์ (Carrier Frequency) ในหน่วย จิกะเฮิรตซ์

ขั้นสุดท้ายคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณในสมการ (4.22)

ต่อไปเราจะทำการทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ของสัญญาณดาวเทียม POR ที่มีมุมเงยต่ำ  $8^\circ$  และสัญญาณดาวเทียม IOR ที่มีมุมเงยสูง  $40^\circ$  โดยในที่นี่จะทำนายค่าความเข้มเป็นรายเดือน ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่ต้องการจากตารางที่ 3.1 ซึ่งในที่นี้ไม่ทราบประสิทธิภาพของสายอากาศ  $\eta$  ดังนั้นจึงกำหนดให้  $\eta = 0.5$  ตามการแนะนำของ ITU-R ส่วนค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า  $N_{\text{wet}}$  นั้นใช้ค่าจากภาคผนวก จ. ตารางที่ จ.1 และ จ.4 หรืออาจใช้ค่า  $N_{\text{wet}}$  ที่ได้คำนวณไว้แล้วจากรูปที่ 3.12 (ข) หลังจากที่ได้ทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ( $\sigma_{\text{prc}}$ ) แล้ว เราก็ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ของสัญญาณดาวเทียม POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ ) ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545 และของสัญญาณดาวเทียม IOR (มุมเงยสูง  $40^\circ$ ) ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545 เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ทำนายไว้



รูปที่ 4.11 ค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ( $\sigma_x$ ) ของสัญญาณดาวเทียม POR ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ITU-R ตลอดช่วงเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง ธันวาคม 2545



รูปที่ 4.12 ค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ( $\sigma_x$ ) ของสัญญาณดาวเทียม IOR ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ITU-R ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ( $\sigma_x$ ) อันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ของสัญญาณดาวเทียม POR และ IOR ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ITU-R ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทำการทดลองวัดจริง มีค่าที่สูงกว่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง ITU-R โดยในกรณีของสัญญาณ POR ค่าที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าและต่ำกว่าค่าที่ทำนายได้อยู่ในช่วง 0.1 dB peak to peak ส่วนในกรณีของสัญญาณ IOR ค่าที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ทำนายได้อยู่ในช่วง 0.06 dB peak to peak อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทำนายก็เป็นเพียงค่าเฉลี่ยในรายเดือนเท่านั้น ซึ่งจะไม่ทราบค่าสูงสุด และการเปลี่ยนแปลงในรายวัน และสาเหตุที่ทำให้ค่าที่ทำนายได้ไม่ตรงกับค่าที่ทดลองวัดจริงมากนัก อาจเกิดจากข้อผิดพลาดได้หลายประการ เช่น ค่าเฉลี่ยของภูมิอากาศในรายวันของสถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง เนื่องจากที่สถานีนี้ จะทำการตรวจวัดภูมิอากาศเป็นราย 3 ชั่วโมง วันละ 5 ครั้งเท่านั้น คือ 7.00, 10.00, 13.00, 16.00 และ 19.00 น. ซึ่งการตรวจวัดภูมิอากาศเป็นราย 3 ชั่วโมง และทำการตรวจวัดเพียงวันละ 5 ครั้งเท่านั้น (สถานีตรวจวัดอื่นๆ ที่ตรวจวัดเป็นราย 3 ชั่วโมง ปกติตรวจวัด 8 ครั้งต่อวัน) อาจทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้เกิดข้อผิดพลาด เป็นต้น

### 4.3 สรุป

ในบทนี้เป็นการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในช่วงเวลาสั้น และแบบจำลองการทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ข้อมูลการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณในช่วงเวลาสั้นมีการแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็น (PDF) และการแจกแจงสะสม (CDF) ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบเกาส์ แต่ในกรณีที่สัญญาณมีการแกว่งที่รุนแรงระดับสัญญาณทางด้านการจางหายจะมีแนวโน้มการแจกแจงเข้าใกล้การแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  เมื่อพิจารณาการแจกแจงสะสมจะทำให้ทราบค่าเปอร์เซ็นต์เวลาต่างๆ ของระดับสัญญาณ เช่น ค่าพิกสูงสุด, ค่าการจางหายสูงสุด, ค่าพิกที่ 5% และค่าการจางหาย 95% โดยค่าความแตกต่างระหว่างค่าพิกที่ 5% และค่าการจางหาย 95% นี้ ทำให้ทราบถึงค่าพิสัยพลวัตของเครื่องรับได้

ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ และความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม นำมาใช้พิจารณาโครงสร้างทางเวลาและความถี่ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ตามลำดับ สัญญาณ POR ที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เกิดตอนกลางวัน) จะมีค่าเวลาร่วมนัยที่มากกว่าสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เกิดตอนกลางคืน) และจากความสัมพันธ์ในเชิงคู่ฟูรีเยร์กันและกัน มีผลทำให้สเปกตรัมกำลังสัญญาณของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์แผ่กว้างน้อยกว่าสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นั่นคือ สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับ

แอมพลิจูดของสัญญาณที่ช้ากว่าสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น ยังมีการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสาร ใช้ค่าเวลาร่วมกัน และเทคนิค Mean Crossing หาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน เพื่อใช้ในการออกแบบเวลาตอบสนองที่รวดเร็วสำหรับระบบติดตาม (Tracking) แบบ Steptrack หรือ ระบบควบคุมกำลังขาขึ้น (Uplink Power Control System) เพื่อที่จะชดเชยผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน และยังใช้ค่าเวลาร่วมกันหาค่าระยะดีคอร์ดรีเลชันบนพื้นโลก  $V_{\perp} \times \tau$  หรือระยะห่างในการติดตั้งงานสายอากาศ สำหรับเทคนิคสายอากาศแบบสเปซไคเวอร์ซิตี เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงหรือปรับปรุงแก้ไขการเลเวล อันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

สุดท้ายการทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน ( $\sigma_X$ ) โดยการใช้แบบจำลองของ ITU-R ทำนาย เปรียบเทียบกับที่ได้จากการทดลองของทั้งสัญญาณ POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ ) และสัญญาณ IOR (มุมเงยสูง  $40^\circ$ ) พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงของสัญญาณ POR มีค่าสูงกว่าและต่ำกว่า ค่าที่ได้จากการทำนาย อยู่ในช่วง 0.1 dB peak to peak และค่าที่ได้จากการทดลองจริงของสัญญาณ IOR มีค่าสูงกว่า ค่าที่ได้จากการทำนาย อยู่ในช่วง 0.06 dB peak to peak

## บทที่ 5

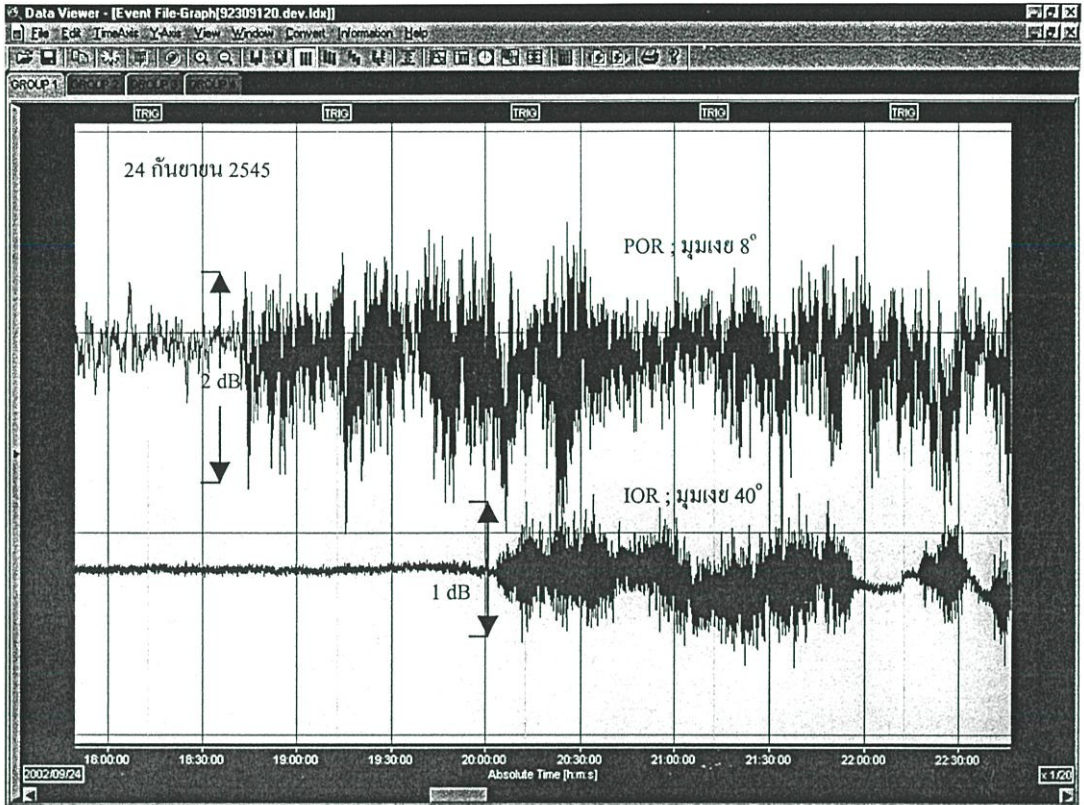
# เปรียบเทียบคุณลักษณะของมูมเงยต่ำกับมูมเงยสูง

โดยทั่วไประบบการสื่อสารดาวเทียมที่งานสายอากาศมีมูมเงยต่ำ จะได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรงกว่าระบบที่มีมูมเงยสูง [1] และครรชนี  $S_4$  จะเพิ่มขึ้นตามระยะทางการแพร่กระจายของคลื่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งระบบที่มีมูมเงยต่ำกว่า จะมีระยะทางการแพร่กระจายของคลื่นที่มากกว่าระบบที่มีมูมเงยสูง จึงทำให้ค่าครรชนี  $S_4$  ที่มากกว่า [25] ดังการคำนวณหาระยะทางจากระบบที่เราได้ทำการทดลอง คือที่มูมเงย  $40^\circ$  และมูมเงย  $8^\circ$  โดยจากภาคผนวก ข. กำหนดให้ความสูงของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนประมาณ 350 กิโลเมตร ดังนั้นจะได้ความยาววิถีของการรับสัญญาณจากงานสายอากาศไปยังกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรอินเดีย (IOR) (มูมเงย  $40^\circ$ ) และดาวเทียมที่อยู่เหนือมหาสมุทรแปซิฟิก (POR) (มูมเงย  $8^\circ$ ) เท่ากับ 544.5 กิโลเมตร และ 2,514.8 กิโลเมตร ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาความยาววิถีของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในช่วงที่คลื่นตัดผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอในชั้น F ที่ความสูงตั้งแต่ 200 กิโลเมตร จนถึง 1,000 กิโลเมตร ของย่าน IOR และ POR เท่ากับ 1,244.6 กิโลเมตร และ 5,748.3 กิโลเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบที่มีมูมเงยต่ำจะให้ระยะทางการแพร่กระจายคลื่นที่ยาวกว่า

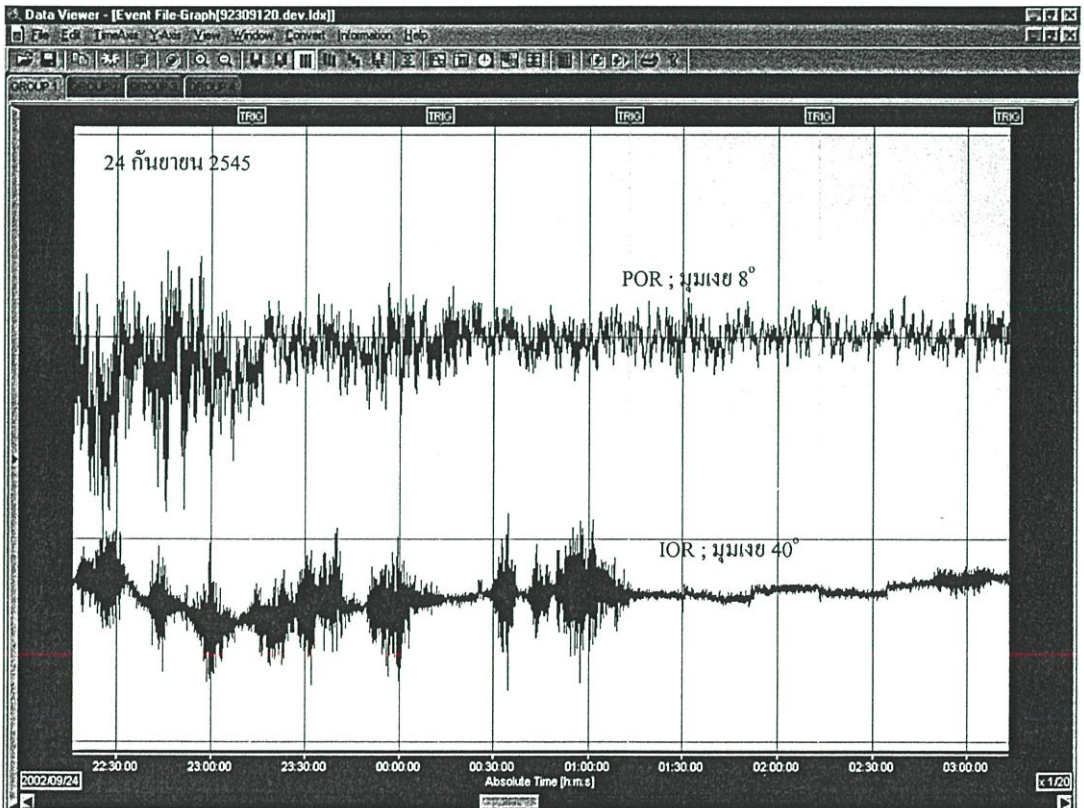
ในบทนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่แถบความถี่ C เดียวกัน แต่มีมูมเงยของระบบที่ต่างกัน คือ มูมเงยต่ำ  $8^\circ$  รับสัญญาณดาวเทียมจากย่าน POR และมูมเงยสูง  $40^\circ$  รับสัญญาณดาวเทียมจากย่าน IOR การเปรียบเทียบมูมเงยต่ำกับมูมเงยสูงโดยการรับสัญญาณจากย่านมหาสมุทรที่ต่างกัน มีสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่านต่างกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ แต่เพื่อต้องการแสดงให้เห็นถึงผลของคุณลักษณะต่างๆ โดยทั่วไปของระบบ เนื่องจาก ณ สถานีดาวเทียมศรีราชา ไม่มีการรับสัญญาณมูมเงยสูงจากย่านมหาสมุทร POR จึงจำเป็นต้องรับสัญญาณจากย่านมหาสมุทรที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของระบบการตรวจวัดของทั้ง 2 ระบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยมีระยะเวลาในการวัด ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545

### 5.1 เปรียบเทียบลักษณะโดยทั่วไป

ลักษณะแบบรูปทั่วไปของสัญญาณดาวเทียม POR และ IOR ที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) บันทึกเมื่อวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2545 ตั้งแต่เวลา 18.00 ถึง 03.00 น. เห็นได้จากรูปว่า ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ที่มีมูมเงยต่ำ  $8^\circ$  การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด



(ก) เวลา 18.00 ถึง 22.30 น.



(ข) เวลา 22.30 ถึง 03.00 น.

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างลักษณะ โดยทั่วไปของสัญญาณดาวเทียม POR และ IOR ที่บันทึกได้

อย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์ โดยมากมักจะเกิดอย่างต่อเนื่องกันไป กล่าวคือ มีคาบเวลาการเกิดที่ติดต่อกันยาวนาน และการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มักจะเริ่มเกิดหลังจากดวงอาทิตย์ตกดิน เวลาประมาณ 18.00 ถึง 19.00 น. ต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งหลังเที่ยงคืน หรืออาจจะต่อเนื่องไปจนถึงเวลา 02.00 น. หรือจนถึงก่อนที่ดวงอาทิตย์ขึ้น

ส่วนลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR ที่มีมุมเงยสูง  $40^\circ$  การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยมากมักจะเกิดอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยมากมักจะเกิดเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน ดังรูปที่ 5.1 กล่าวคือ มีคาบเวลาการเกิดเป็นช่วงสั้นๆ ทั้งช่วงและเกิดอีก ซึ่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของสัญญาณ IOR นี้ มักจะเริ่มเกิดในช่วงเวลาประมาณ 20.00 ถึง 20.30 น. ซึ่งเกิดหลังจากที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณ POR ประมาณ 2-3 ชั่วโมง และจะหมดในช่วงเวลาประมาณหลังเที่ยงคืน 1 ชั่วโมง ทั้งนี้เกิดจากการที่กลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ POR ก่อน IOR จากผลของคาบเวลาการเกิดเป็นช่วงสั้นๆ ทั้งช่วงของสัญญาณดาวเทียม IOR และคาบเวลาการเกิดที่ต่อเนื่องของสัญญาณดาวเทียม POR สอดคล้องตรงกันกับการวิจัยใน [29]

อีกลักษณะหนึ่งที่ได้จากการเฝ้าสังเกต พบว่า ถ้าช่วงเวลาใดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR (มุมเงยสูง  $40^\circ$ ) ช่วงเวลานั้นก็มักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ ) ด้วยเสมอ แต่ในกรณีที่ช่วงเวลาใดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ช่วงเวลานั้นอาจไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR ก็ได้

## 5.2 เปรียบเทียบลักษณะทางสถิติ

ทั้งสัญญาณดาวเทียม POR และ IOR บันทึกด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 3.2 ด้วยอัตราการซัดตัวอย่าง 1 Hz บันทึกในช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลช่วงละ 1 นาที โดยสัญญาณดาวเทียม POR ได้ทำการวิเคราะห์ไปแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.2 และการวิเคราะห์สัญญาณดาวเทียม IOR ก็ใช้วิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์ข้อมูล POR โดยการพิจารณาถึงระดับความรุนแรงของเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน โดยวิธีการวัดค่ายอดถึงยอด, วิธีการคำนวณหาค่าครรชนี  $S_4$  และวิธีการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_x$ ) โดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ช่วงละ 1 นาที และ

กำหนดให้การแกว่งขึ้นลงทางแอมพลิจูดของสัญญาณใน 1 นาที คือ 1 ครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

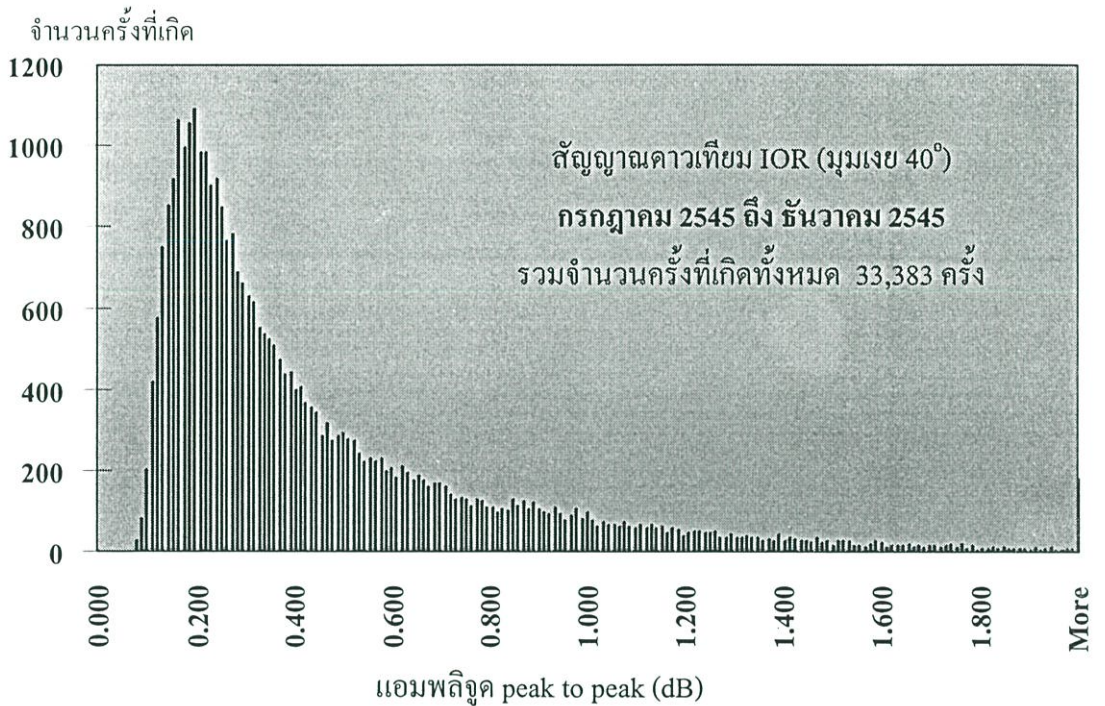
### 5.2.1 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

ในช่วงแรกทำการพิจารณาในภาพรวม ตลอดระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545 รูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงแผนภูมิของระดับการแกว่งของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545) ตามลำดับ จากทั้ง 2 รูป จะเห็นได้ว่า ระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของ IOR ต่ำกว่า POR อย่างเห็นได้ชัด ค่าระดับการแกว่งที่มีจำนวนครั้งที่เกิดมากในกรณีของ IOR มีค่าประมาณ 0.2 dB peak to peak ต่ำกว่าในกรณีของ POR ที่มีค่าประมาณ 0.5 dB peak to peak และค่าเฉลี่ยระดับการแกว่งของ IOR เท่ากับ 0.451 dB peak to peak ต่ำกว่า POR ที่เฉลี่ยเท่ากับ 0.839 dB peak to peak สอดคล้องกับจำนวนครั้งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันทั้งหมดของ IOR เท่ากับ 33,383 ครั้ง ต่ำกว่า POR ที่มีจำนวนครั้งที่เกิดรวมสูงถึง 86,242 ครั้ง

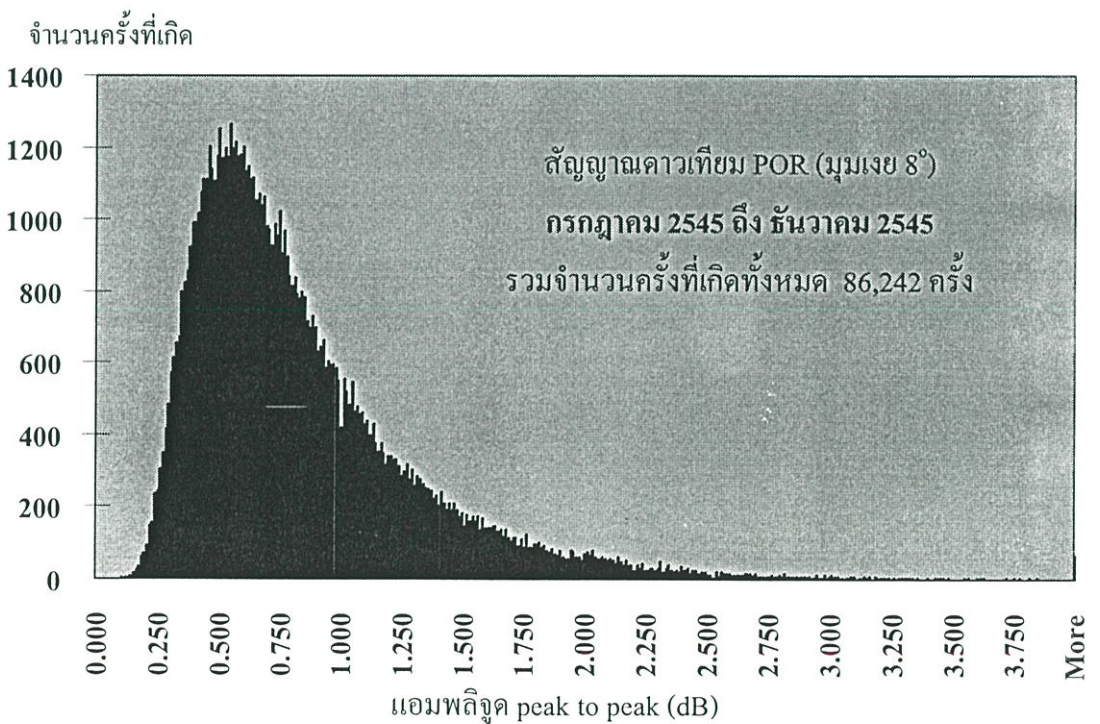
รูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงแผนภูมิของระดับค่าครรชนี  $S_4$  ของสัญญาณ IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545) ตามลำดับ จากทั้ง 2 รูป จะเห็นได้ว่า ระดับค่าครรชนี  $S_4$  ของ IOR ต่ำกว่า POR อย่างเห็นได้ชัด โดยค่าครรชนี  $S_4$  ส่วนมากของ IOR จะมีค่าไม่เกิน 0.1 แต่ในกรณีของ POR ส่วนมากค่าครรชนี  $S_4$  จะมีค่าไม่เกิน 0.2 ค่าระดับของครรชนี  $S_4$  ที่มีจำนวนครั้งที่เกิดมากในกรณีของ IOR มีค่าประมาณ 0.01 ต่ำกว่าในกรณีของ POR ที่มีค่าประมาณ 0.03 และค่าเฉลี่ยของครรชนี  $S_4$  ของ IOR มีค่าเท่ากับ 0.023 ต่ำกว่าของ POR ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.051

รูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงแผนภูมิของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma_x$  ของสัญญาณ IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545) ตามลำดับ จากทั้ง 2 รูป จะเห็นได้ว่า ระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ IOR ต่ำกว่า POR อย่างเห็นได้ชัด โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานส่วนมากของ IOR จะมีค่าไม่เกิน 0.5 dB peak to peak แต่ในกรณีของ POR ส่วนมากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน 1 dB peak to peak ค่าระดับของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีจำนวนครั้งที่เกิดมากในกรณีของ IOR มีค่าประมาณ 0.05 dB peak to peak ต่ำกว่าในกรณีของ POR ที่มีค่าประมาณ 0.15 dB peak to peak และค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ IOR มีค่าเท่ากับ 0.1 dB peak to peak ต่ำกว่าของ POR ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.222 dB peak to peak

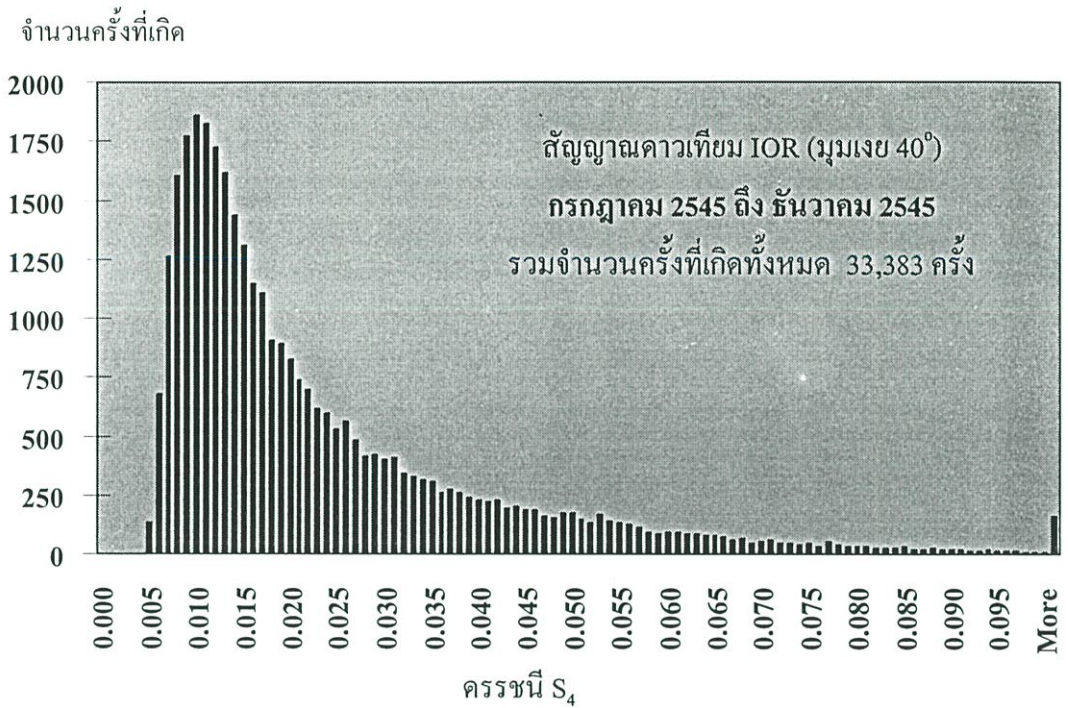
ผลที่ได้จากรูปที่ 5.2 ถึง 5.7 ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ในกรณีของสัญญาณดาวเทียม POR ที่มีมุมเงยต่ำ  $8^\circ$  เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่มากกว่า และมีความรุนแรงกว่า ในกรณีของสัญญาณดาวเทียม IOR ที่มีมุมเงยสูง  $40^\circ$



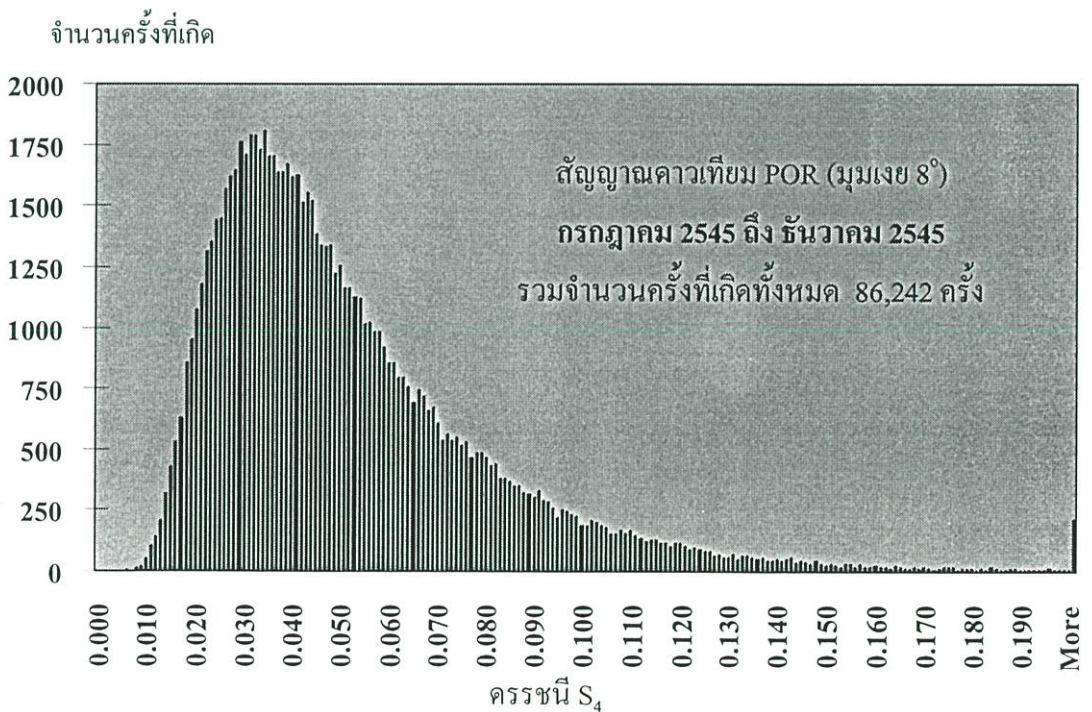
รูปที่ 5.2 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



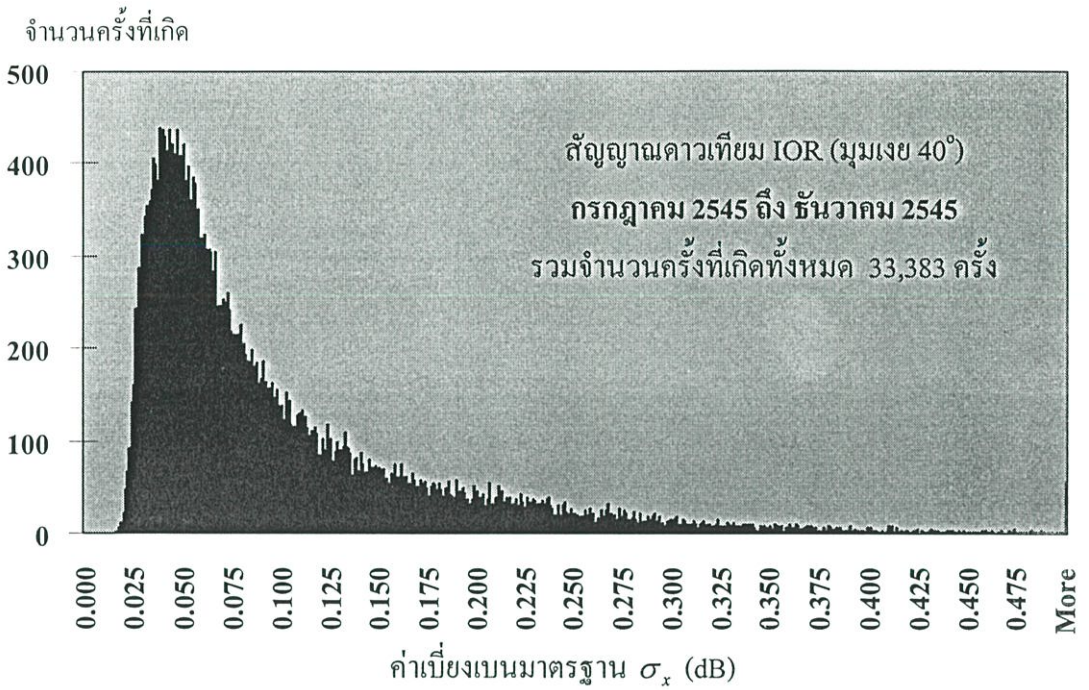
รูปที่ 5.3 แผนภูมิของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



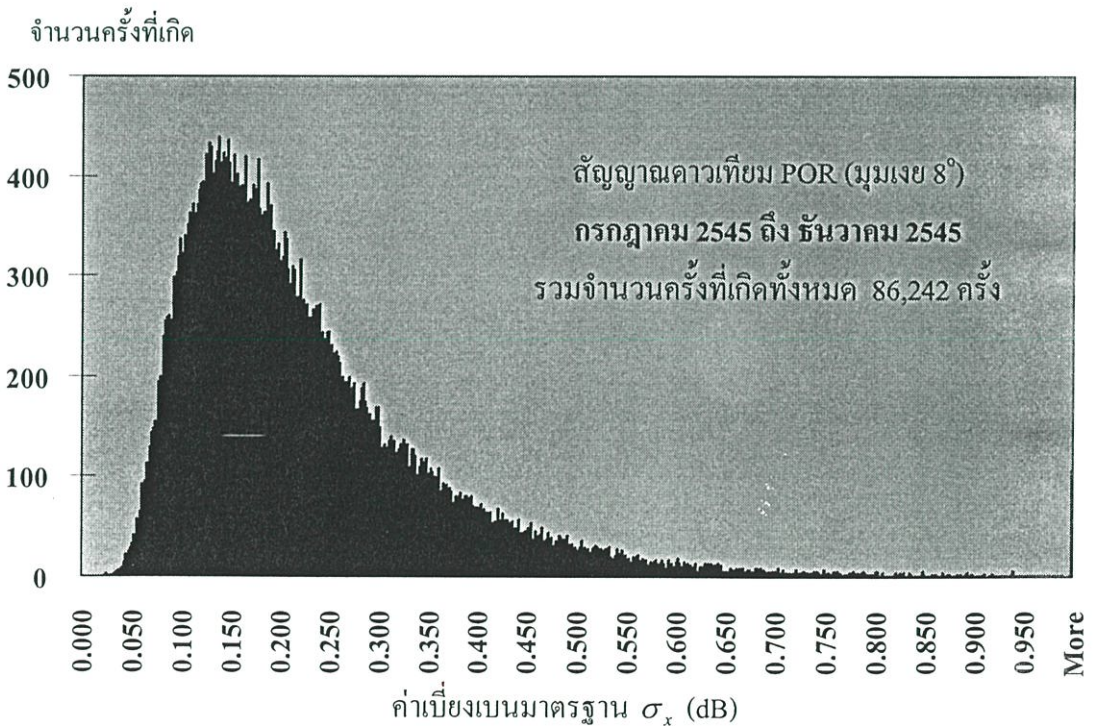
รูปที่ 5.4 แผนภูมิของระดับค่าครรชนี  $S_4$  ของสัญญาณดาวเทียม IOR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



รูปที่ 5.5 แผนภูมิของระดับค่าครรชนี  $S_4$  ของสัญญาณดาวเทียม POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545

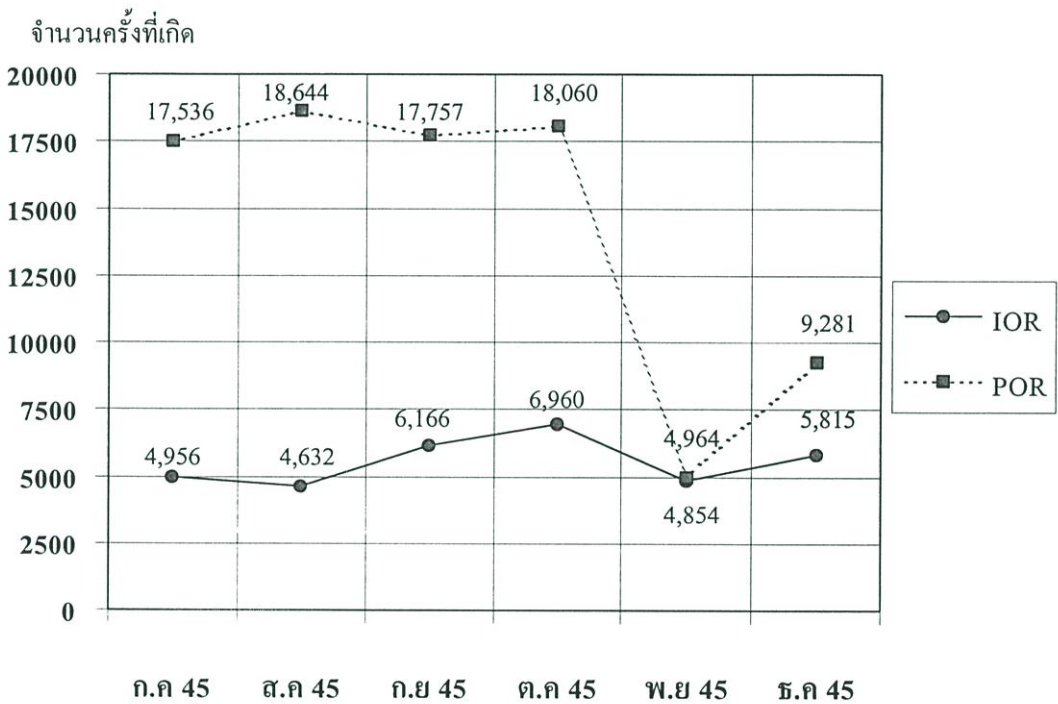


รูปที่ 5.6 แผนภูมิของระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดาวเทียม IOR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545



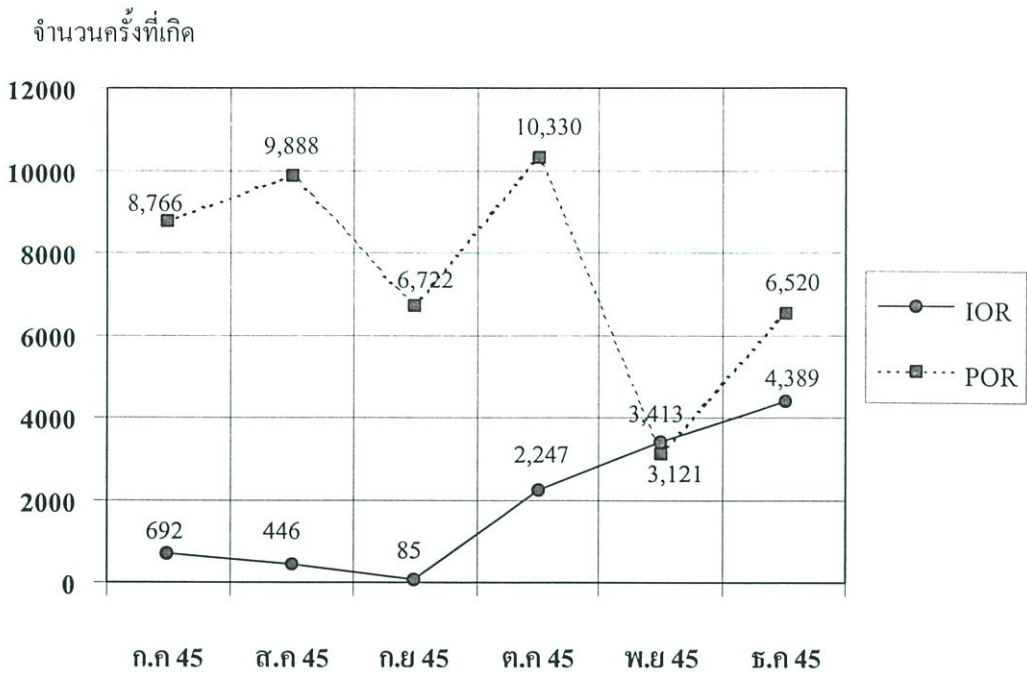
รูปที่ 5.7 แผนภูมิของระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดาวเทียม POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2545 ถึง ธันวาคม 2545

รูปที่ 5.8 แสดงจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันทั้งหมดในแต่ละเดือนของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545 เห็นได้จากรูปว่า จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณ POR ในแต่ละเดือน มีค่ามากกว่าของสัญญาณ IOR และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงมากน้อยในแต่ละเดือนที่คล้ายกัน ยกเว้นเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2545 ที่จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของทั้งสัญญาณ IOR และ POR มีจำนวนครั้งที่เกิดน้อยที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกัน

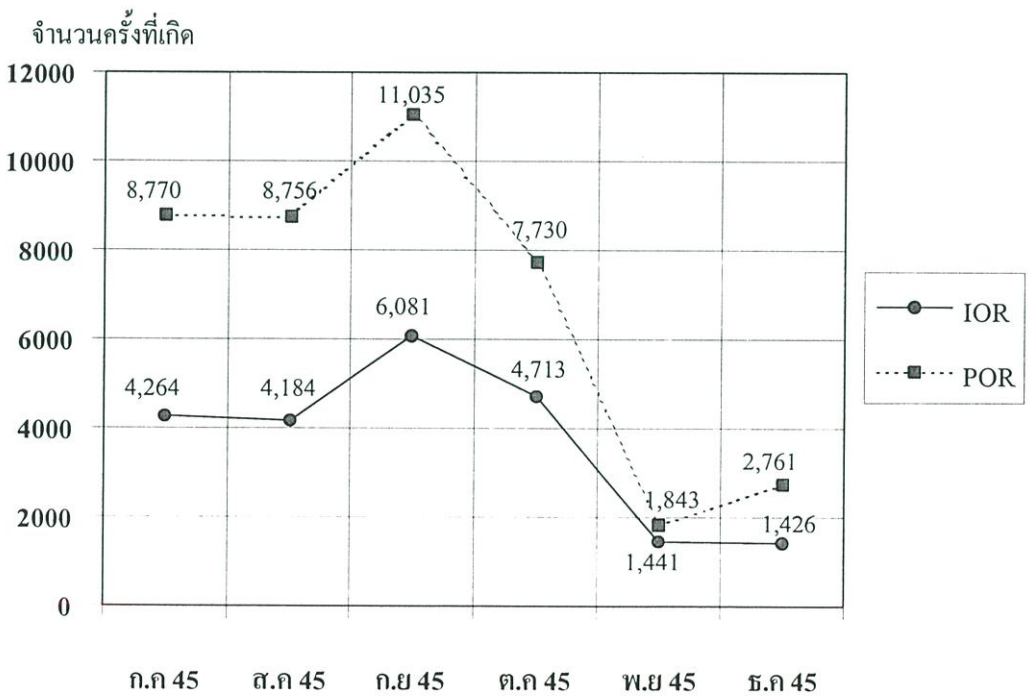


รูปที่ 5.8 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันทั้งหมดในแต่ละเดือนของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545

รูปที่ 5.9 แสดงจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทั้งหมด (เกิดในตอนกลางวัน) ในแต่ละเดือนของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545 จะเห็นได้ว่าในกรณีของสัญญาณ IOR มุมเงยสูง 40° การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในช่วงเดือนกรกฎาคม ถึง กันยายน พ.ศ. 2545 มีจำนวนครั้งที่เกิดน้อยมาก จากนั้นจำนวนครั้งที่เกิดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 จนถึงเกิดมากที่สุดในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2545



รูปที่ 5.9 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทั้งหมดในแต่ละเดือน ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึงธันวาคม 2545



รูปที่ 5.10 จำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งหมดในแต่ละเดือน ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545

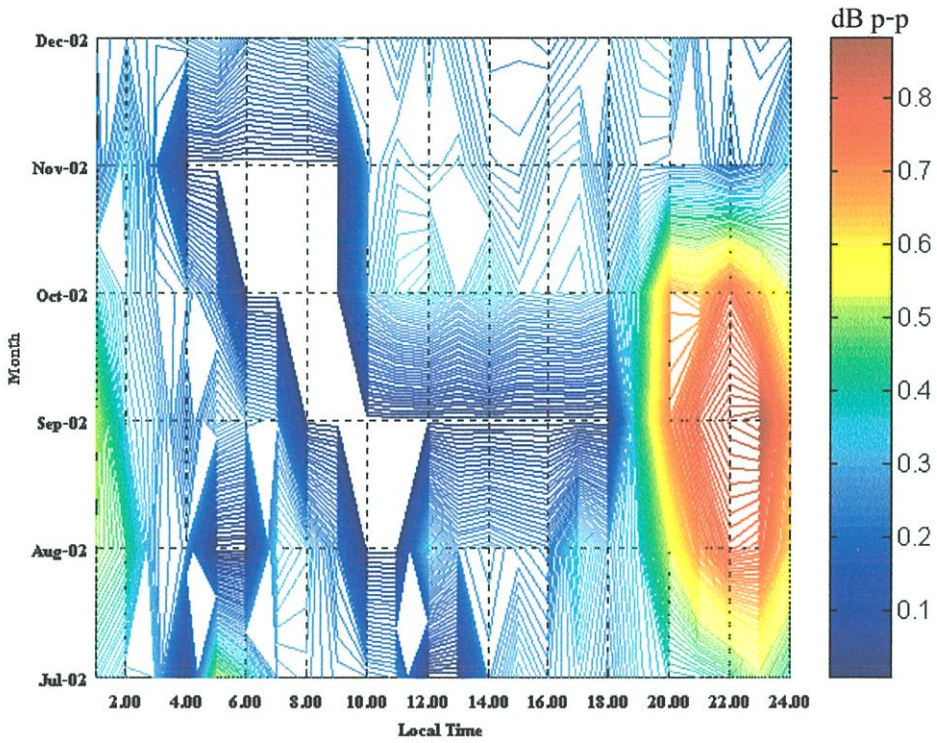
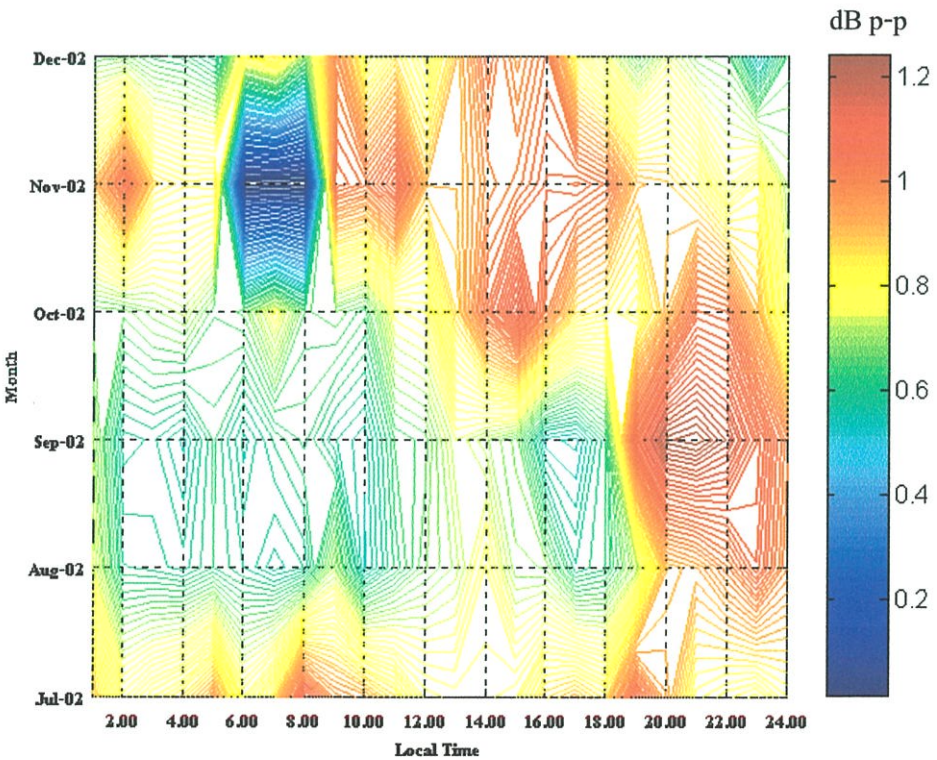
ทั้งนี้อาจสอดคล้องกันไปตามค่าครรชนีหักเหของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Nu) ที่มีค่าสูงในช่วงปลายปี 2545 ซึ่งโดยปกติค่าครรชนีหักเห Nu จะมีค่าต่ำลงมากในช่วงฤดูหนาว (ดูได้จากกราฟ Nu ของปี 2543-2545 ในรูปที่ 3.12) ซึ่งค่า Nu ที่มีค่ามากในช่วงฤดูหนาวของปี 2545 เนื่องจากค่าของอุณหภูมิและความดันไอน้ำที่ค่อนข้างสูงในช่วงปลายปีดังกล่าว (ดูได้จากกราฟในภาคผนวก จ. รูปที่ จ.1 และ จ.3) และในกรณีของสัญญาณ POR มุมเงยต่ำ  $8^\circ$  เดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มากที่สุด คือ เดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 และเดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดน้อยที่สุด คือ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2545

รูปที่ 5.10 แสดงจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งหมด (เกิดในตอนกลางคืน) ในแต่ละเดือน ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ตลอดช่วงเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545 จากรูปเห็นได้ว่า ลักษณะจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันมากน้อยสัมพันธ์กันทั้งของสัญญาณ IOR และ POR กล่าวคือ เดือนที่มีจำนวนครั้งของการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากที่สุดของสัญญาณ IOR และ POR คือ เดือนกันยายน พ.ศ. 2545 และเดือนที่มีจำนวนครั้งการเกิดน้อยที่สุด คือ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2545 ทั้งนี้สอดคล้องไปตามเดือน Equinox และ Solstice ในภาคผนวก ง.

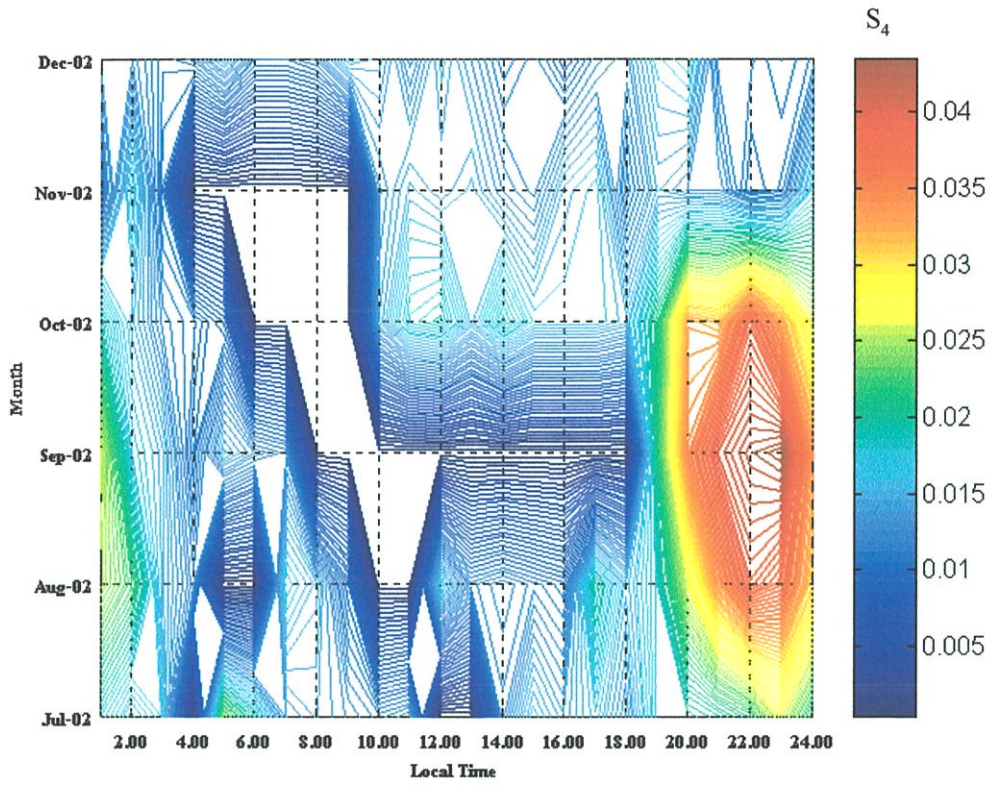
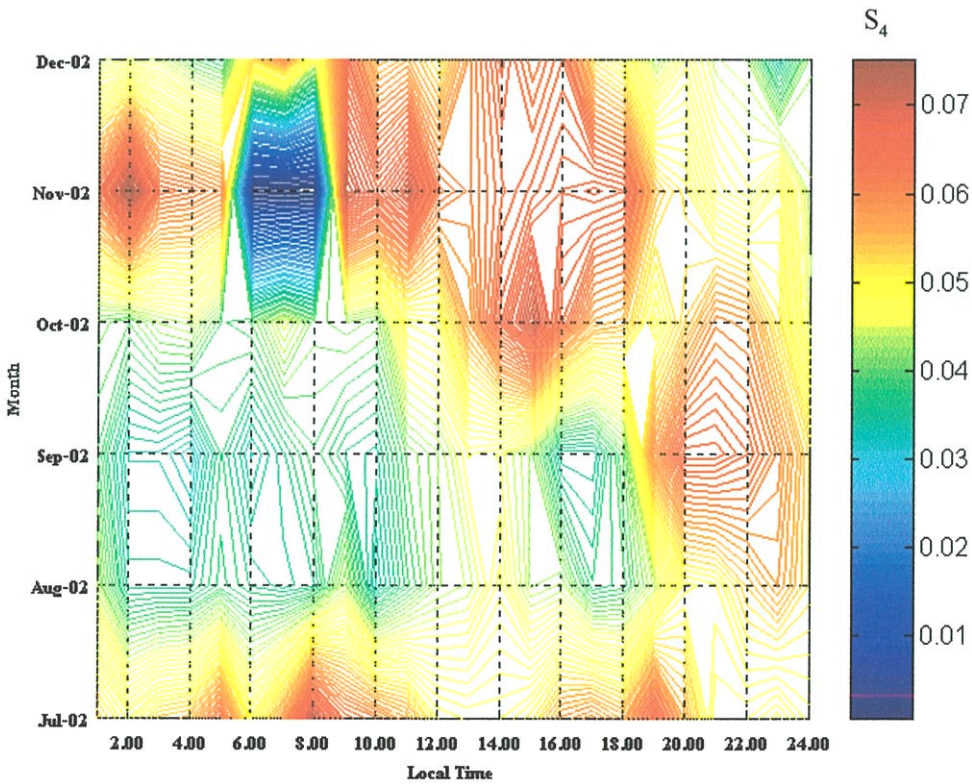
### 5.2.2 การเปลี่ยนแปลงตามรายวัน

การเปลี่ยนแปลงตามรายวันของค่าการแกว่งทางแอมพลิจูดของสัญญาณ และค่าครรชนี  $S_4$  ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR หาโดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงตลอดทั้งเดือน ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละเดือน ตลอด 6 เดือน (กรกฎาคม ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545) สามารถแสดงในแบบคอนทัวร์ได้ในรูปที่ 5.11 (ก) IOR และ (ข) POR และค่าเฉลี่ยของค่าครรชนี  $S_4$  ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละเดือน ตลอด 6 เดือน (กรกฎาคม ถึงธันวาคม พ.ศ. 2545) สามารถแสดงในแบบคอนทัวร์ได้ในรูปที่ 5.12 (ก) IOR และ (ข) POR โดยจากรูปไม่ได้แยกว่าเป็นผลมาจากชั้นบรรยากาศใด

จากรูปที่ 5.11 (ก) IOR และ 5.12 (ก) IOR เห็นได้ว่า เดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกะทันหันที่รุนแรงที่สุดในเวลากลางคืน (20.00-24.00 น.) คือ ช่วงเดือนสิงหาคม ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 0.5-0.9 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.025-0.04 ส่วนเดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกะทันหันที่รุนแรงที่สุดในเวลากลางวัน (11.00-17.00 น.) คือ เดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 0.3-0.35 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.016-0.019 และเดือนที่แทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

(ก) IOR มุมเงย  $40^\circ$ (ข) POR มุมเงย  $8^\circ$ 

รูปที่ 5.11 คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยของระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันของสัญญาณ  
 ดาวเทียม IOR และ POR ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละเดือน ตลอด 6 เดือน ตั้งแต่เดือน  
 กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545

(ก) IOR มุมเงย  $40^\circ$ (ข) POR มุมเงย  $8^\circ$ 

รูปที่ 5.12 คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยของครรชนี  $S_4$  ของสัญญาณดาวเทียม IOR และ POR ในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน ตลอด 6 เดือน ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2545

แอมพลิจูดในเวลากลางวันเลข คือ เดือนกันยายน พ.ศ. 2545 ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.11 (ข) POR และ 5.12 (ข) POR เห็นได้ว่า เดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกระทันหันที่รุนแรงที่สุดในเวลากลางคืน (18.00-24.00 น.) คือ ช่วงเดือนสิงหาคม ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 1.0-1.2 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.05-0.07 ส่วนเดือนที่มีการเกิดการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอย่างกระทันหันที่รุนแรงที่สุดในเวลากลางวัน (12.00-17.00 น.) คือ เดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 โดยมีค่าเฉลี่ยของการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 0.8-1.1 dB peak to peak และมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.05-0.07

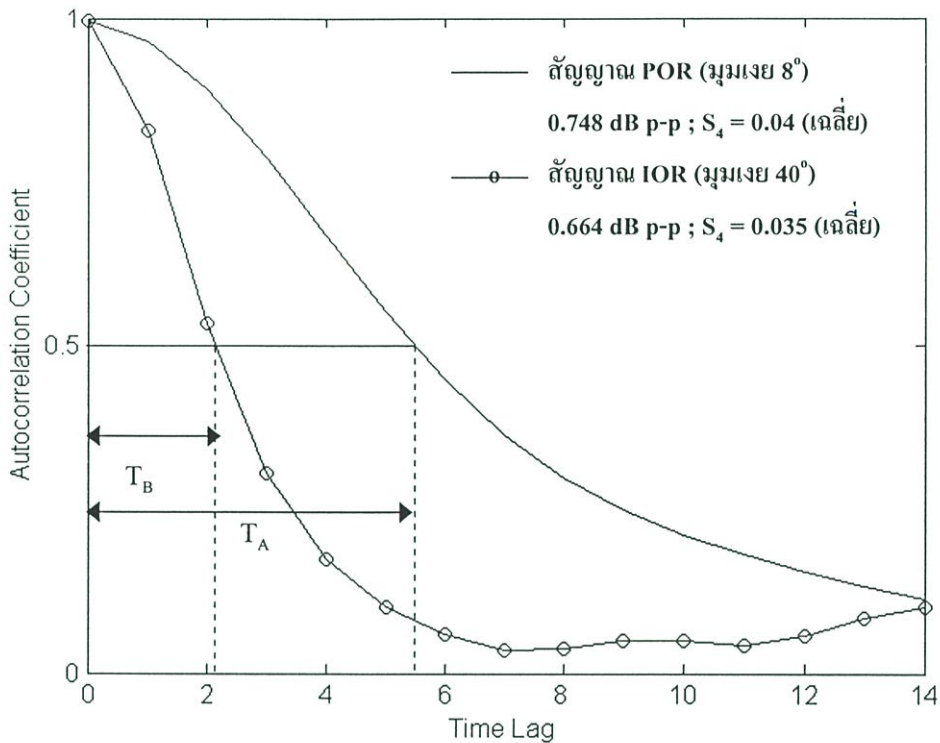
สรุปผลการเปลี่ยนแปลงในรายวันของสัญญาณ IOR และ POR การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีความรุนแรงในช่วงเดือนสิงหาคม ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2545 ส่วนการเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีความรุนแรงในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ ในกรณีของสัญญาณ POR จะมีความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงที่มากกว่า IOR

### 5.3 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเวลาและความถี่

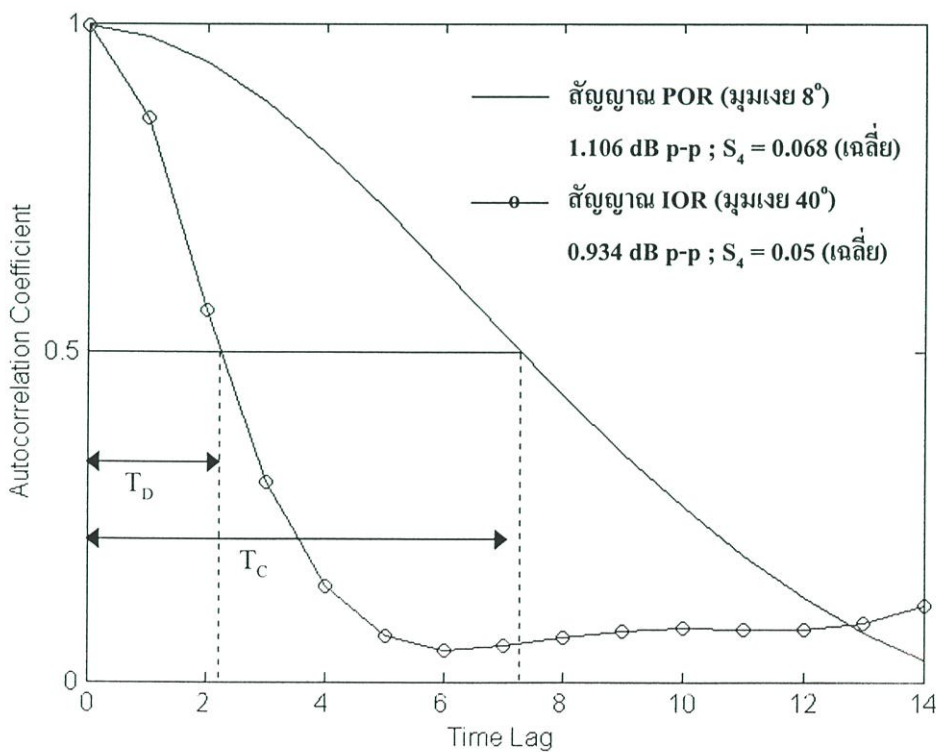
ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างทางเวลาและความถี่ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันระหว่างสัญญาณดาวเทียม POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ ) และสัญญาณดาวเทียม IOR (มุมเงยสูง  $40^\circ$ ) โดยใช้ฟังก์ชันออสซิลโลแกรม และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม ซึ่งวิธีการในการวิเคราะห์ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 โดยในที่นี้จะทำการยกตัวอย่างเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน จำนวน 4 เหตุการณ์ แบ่งเป็นสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ 2 เหตุการณ์ คือ ในวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2545 และ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2545 และอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ 2 เหตุการณ์ คือ ในวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2545 และ 25 สิงหาคม พ.ศ. 2545 โดยแต่ละเหตุการณ์เกิดต่อเนื่องนาน 10 นาที

#### 5.3.1 เปรียบเทียบฟังก์ชันออสซิลโลแกรมของสัญญาณ POR และ IOR

รูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงกราฟออสซิลโลแกรมของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เกิดตอนกลางวัน) และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เกิดตอนกลางคืน) ตามลำดับ โดยสามารถหาค่าเวลาร่วมนัย  $\tau$  ของแต่ละเหตุการณ์ได้จาก  $\tau = T/1$  (ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความถี่ในการชักตัวอย่าง 1 Hz) ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัญญาณ IOR (มุมเงยสูง  $40^\circ$ ) จะมีค่าเวลาร่วมนัยที่น้อยกว่าสัญญาณ POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ ) เสมอ ทั้งสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน

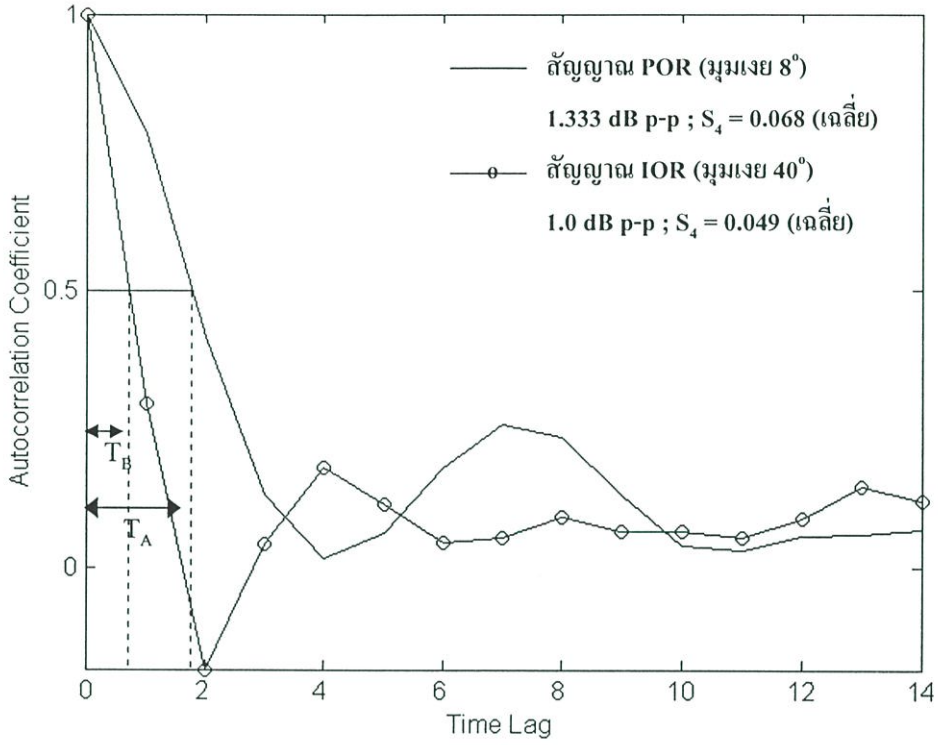


(ก) 25 พฤศจิกายน 2545 11.50-11.59 น.

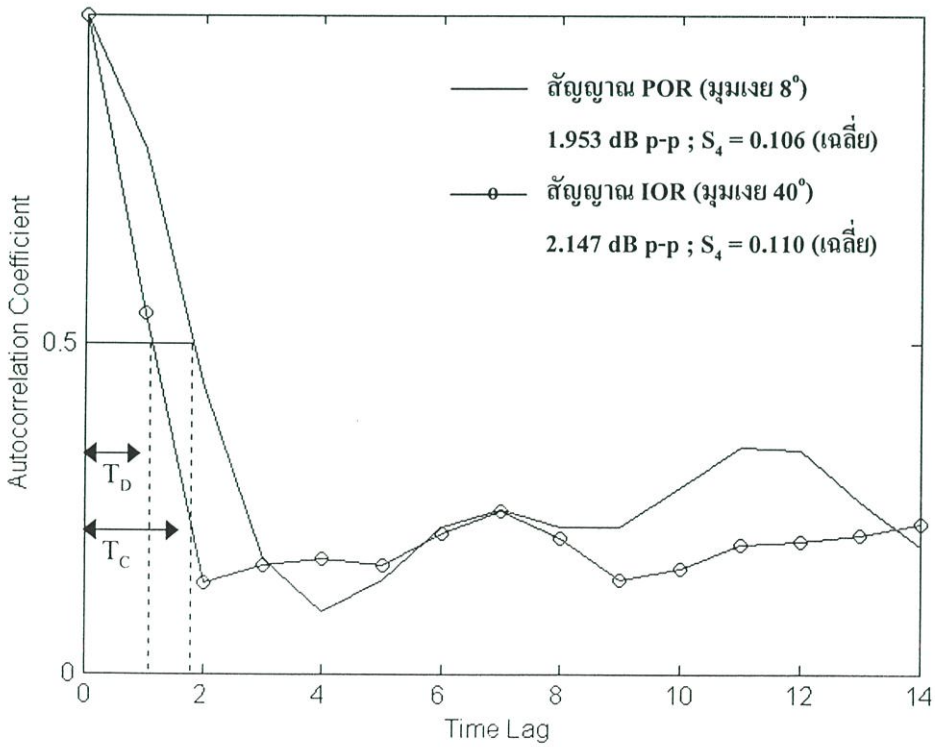


(ข) 7 ธันวาคม 2545 12.40-12.49 น.

รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบกราฟอัตราสหสัมพันธ์ของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์



(ก) 24 กันยายน 2545 21.20-21.29 น.



(ข) 25 สิงหาคม 2545 21.50-21.59 น.

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบกราฟอัตราสหสัมพันธ์ของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

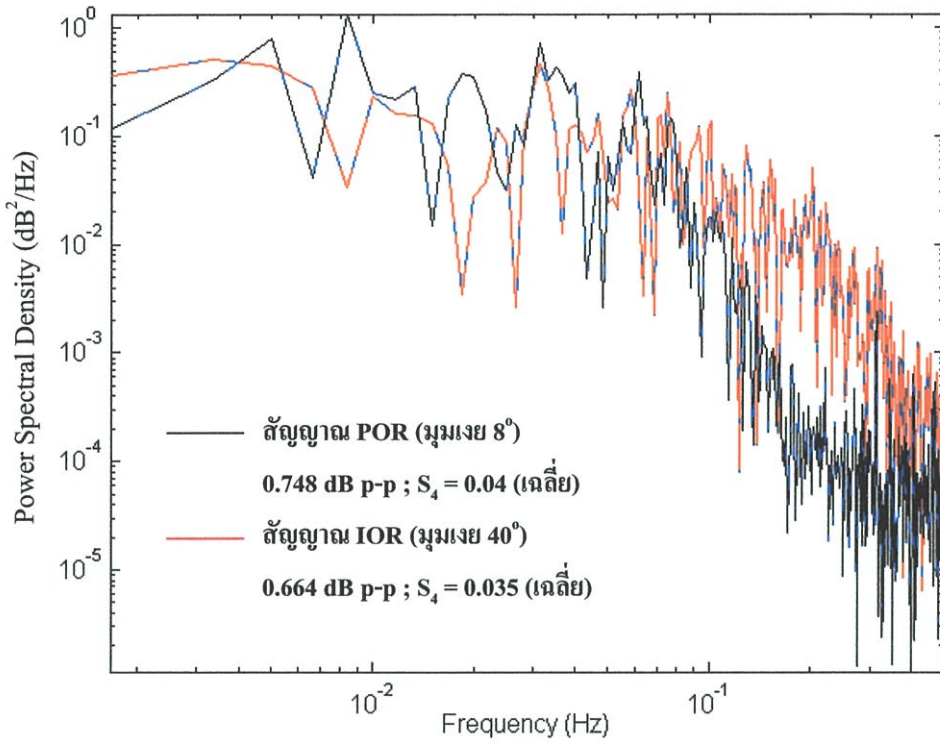
อันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์ โดยไม่สนใจค่าครรชนี  $S_4$  โดยเห็นได้จากตารางที่ 5.1 ว่า ค่าเวลาร่วมนัยนั้นไม่ขึ้นกับค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน หรือครรชนี  $S_4$  ที่ซึ่งได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 4 และการที่สัญญาณ IOR มีค่าเวลาร่วมนัยที่น้อยกว่าสัญญาณ POR เสมอ จึงอาจสรุปได้ว่า สัญญาณดาวเทียม IOR ที่มุมเงยสูง มีการเปลี่ยนแปลงระดับแอมพลิจูดที่รวดเร็วกว่า สัญญาณดาวเทียม POR ที่มุมเงยต่ำ

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าเวลาร่วมนัยของแต่ละเหตุการณ์

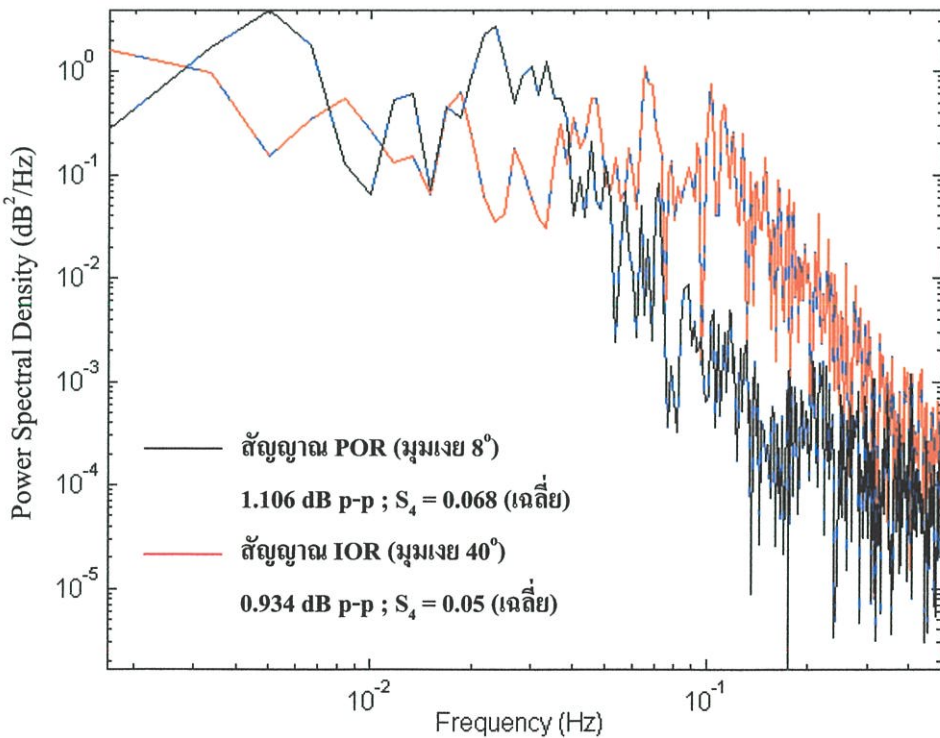
	โทรโพสเฟียร์รีก ซินทิลเลชัน				ไอโอโนสเฟียร์รีก ซินทิลเลชัน			
	25 พฤศจิกายน 45 (11.50-11.59 น.)		7 ธันวาคม 45 (12.40-12.49 น.)		24 กันยายน 45 (21.20-21.29 น.)		25 สิงหาคม 45 (21.50-21.59 น.)	
	IOR	POR	IOR	POR	IOR	POR	IOR	POR
ครรชนี $S_4$ เหลือ	0.035	0.04	0.05	0.068	0.049	0.068	0.11	0.106
เวลาล่าหลัง T	2.1	5.5	2.2	7.3	0.7	1.8	1.1	1.8
เวลาร่วมนัย $\tau$ (วินาที)	2.1	5.5	2.2	7.3	0.7	1.8	1.1	1.8

### 5.3.2 เปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ POR และ IOR

รูปที่ 5.15 และ 5.16 แสดงกราฟความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD) ของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เกิดตอนกลางวัน) และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เกิดตอนกลางคืน) ตามลำดับ ซึ่งเป็นเหตุการณ์เดียวกันกับที่ได้พิจารณาฟังก์ชันอัตโนมัติในหัวข้อที่แล้ว ในรูปที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ โดยจากรูปจะเห็นได้ว่า ลักษณะกราฟของสัญญาณ IOR จะแผ่กว้างออกไปมากกว่าสัญญาณ POR ทั้งสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์ โดยไม่สนใจค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน หรือครรชนี  $S_4$  ว่าจะมากหรือน้อย ที่ซึ่งเป็นไปตาม ค่าเวลาร่วมนัยที่น้อยจะให้ลักษณะความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมที่แผ่กว้างกว่า

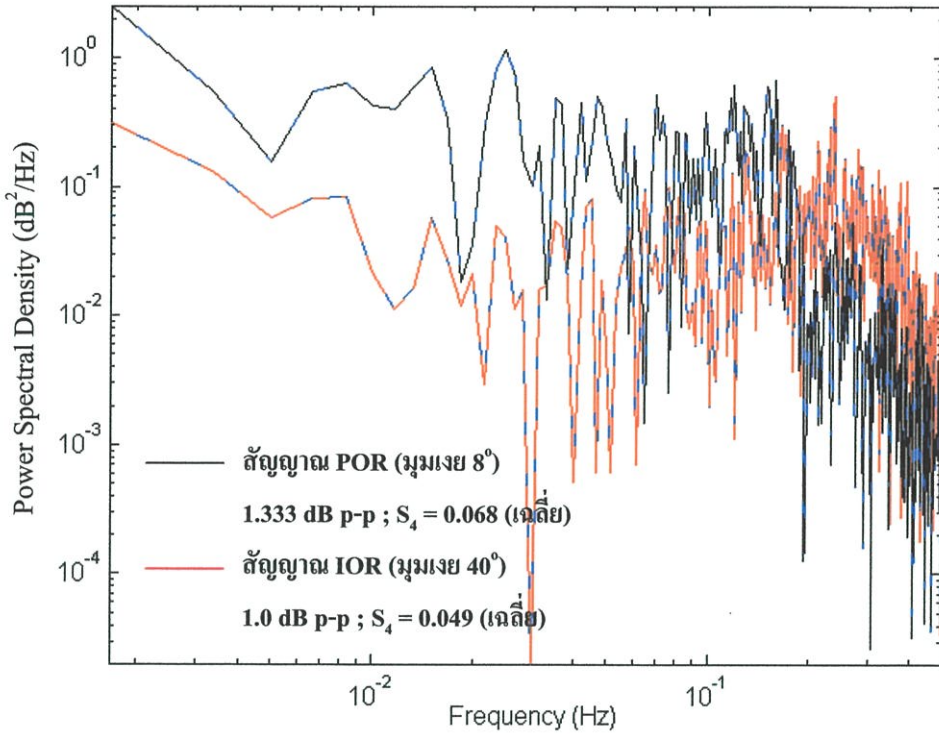


(ก) 25 พฤศจิกายน 2545 11.50-11.59 น.

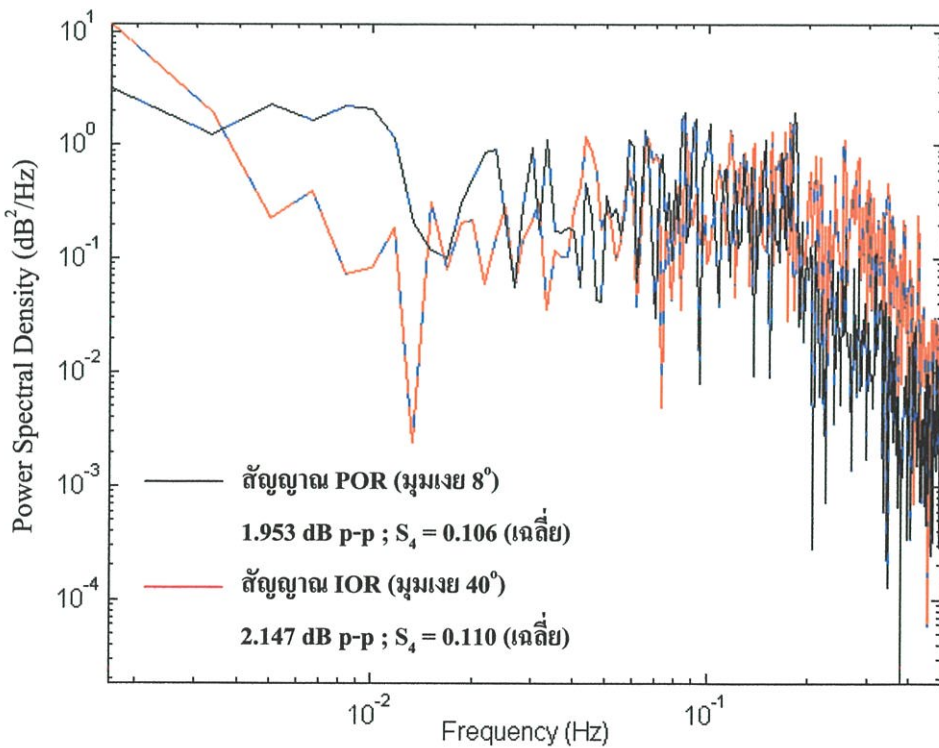


(ข) 7 ธันวาคม 2545 12.40-12.49 น.

**รูปที่ 5.15** เปรียบเทียบกราฟความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์



(ก) 24 กันยายน 2545 21.20-21.29 น.



(ข) 25 สิงหาคม 2545 21.50-21.59 น.

รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบกราฟความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณ IOR และ POR ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

## 5.4 สรุป

ในบทนี้จะวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันระหว่างระบบที่มีมุมเงยต่ำ ( $8^\circ$ ) กับระบบที่มีมุมเงยสูง ( $40^\circ$ ) ทั้งลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณ, ลักษณะทางสถิติในด้านจำนวนครั้งของการเกิด และความรุนแรงของการเกิด และการเปรียบเทียบวิเคราะห์โครงสร้างทางเวลาและความถี่ของสัญญาณทั้งสอง แม้ว่าการเปรียบเทียบมุมเงยต่ำกับมุมเงยสูงโดยการรับสัญญาณจากย่านมหาสมุทรที่ต่างกัน มีสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่านต่างกัน ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ แต่เนื่องจาก ณ สถานีดาวเทียมศรีราชา ไม่มีการรับสัญญาณมุมเงยสูงกับมุมเงยต่ำจากย่านมหาสมุทรเดียวกัน จึงรับสัญญาณดาวเทียมจากย่านมหาสมุทรที่แตกต่างกัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของคุณลักษณะต่างๆ โดยทั่วไป ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบระบบที่มีมุมเงยสูง รับสัญญาณดาวเทียม IOR กับระบบที่มีมุมเงยต่ำ รับสัญญาณดาวเทียม POR สามารถสรุปได้ว่า เวลาในการเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะขึ้นกับระยะเวลาที่กลุ่มความไม่สม่ำเสมอเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นทางการแพร่กระจาย ซึ่งโดยปกติจะเกิดหลังจากดวงอาทิตย์ตก เป็นต้นไป โดยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR จะเกิดก่อนสัญญาณดาวเทียม IOR ตามตำแหน่งของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น และจากลักษณะทางสถิติจะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม POR ที่มีมุมเงยต่ำ  $8^\circ$  มีระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดที่รุนแรง และมีปริมาณการเกิดที่มากกว่า ในกรณีสัญญาณดาวเทียม IOR ที่มีมุมเงยสูง  $40^\circ$  แต่เมื่อดูโครงสร้างทางเวลาและความถี่แล้ว จะเห็นว่า ในกรณีของสัญญาณดาวเทียม IOR จะมีค่าเวลาร่วมกันที่น้อยกว่า ส่งผลให้สัญญาณมีการแผ่กว้างในทางสเปกตรัมที่มากกว่า หรือกล่าวได้ว่า สัญญาณดาวเทียม IOR ที่มีมุมเงยสูง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่รวดเร็วกว่า สัญญาณดาวเทียม POR ที่มีมุมเงยต่ำ

ในบทนี้จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ในระบบที่มีมุมเงยต่ำจะได้รับผลกระทบในการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่มากกว่า ระบบที่มีมุมเงยสูง

## บทที่ 6

# สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะต่างๆ ของปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ ในช่วงปี 2543-2545 จากการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ C ของระบบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศที่ใหญ่มากถึง 32 เมตร มีมุมเงยของจานสายอากาศต่ำ  $8^\circ$  รับสัญญาณความถี่วิทยุจากดาวเทียม INTELSAT ที่อยู่เหนือย่านมหาสมุทรแปซิฟิก (POR) พบว่า การแกว่งขึ้นลงของระดับแอมพลิจูดโดยรวมทั้งหมดจัดได้ว่า เป็นการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันชนิดไม่รุนแรง (ค่าครรชนี  $S_4 < 0.5$ ) โดยมีค่าเฉลี่ยการแกว่งประมาณ 0.5-1.0 dB peak to peak หรือมีค่าครรชนี  $S_4$  เฉลี่ยประมาณ 0.03-0.05 หรือมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยประมาณ 0.15-0.2 dB peak to peak โดยรวมแล้วเดือนที่มีจำนวนครั้งการเกิดที่มากและมีความรุนแรงมี 2 ช่วง คือ ในช่วงเดือนเมษายนและพฤษภาคม และในช่วงเดือนกันยายนและตุลาคม ส่วนเดือนที่มีจำนวนครั้งการเกิดน้อยและไม่ค่อยรุนแรง คือ ในช่วงเดือนพฤศจิกายนและธันวาคม

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เกิดตอนกลางวัน) ส่วนใหญ่จะเกิดมากและรุนแรงที่สุดในช่วงเวลา 13.00-16.00 น. ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงครรชนีหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์  $N_u$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างมากในช่วงเวลาดังกล่าว ส่วนเดือนที่มีจำนวนครั้งการเกิดที่มากและรุนแรง คือ ในช่วงเดือนเมษายนและพฤษภาคม และเดือนที่มีจำนวนครั้งการเกิดน้อยและไม่ค่อยรุนแรง คือ ในช่วงฤดูหนาว เดือนพฤศจิกายนและธันวาคม ซึ่งทั้งหมดเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงในค่าครรชนีหักเหของชั้นบรรยากาศ ( $N_u = N_{dry} + N_{wet}$ ) โดยเฉพาะค่าครรชนี  $N_{wet}$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิและความดันไอน้ำ และเป็นที่น่าสังเกตว่า ในช่วงปลายปี 2545 (เดือนตุลาคม ถึงธันวาคม) เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในจำนวนที่มากกว่าปกติและค่อนข้างรุนแรง ทั้งนี้เป็นเพราะ ค่าครรชนีหักเห  $N_u$  ในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่ามากกว่า ในปีก่อนๆ ดูได้จากรูปที่ 3.12 (ค) ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิและความดันไอน้ำที่สูงกว่าระดับปกติ ดูได้จากรูป จ.1 และ จ.3

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เกิดตอนกลางคืน) โดยส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงเวลา 18.00-24.00 น. ซึ่งสอดคล้องกับการปรากฏของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในช่วงเวลาดังกล่าว เดือนที่มีจำนวนครั้งการเกิดที่มากและรุนแรง มี 2 ช่วง คือ ในช่วงเดือนมีนาคม ถึงพฤษภาคม และในช่วงเดือนสิงหาคมและกันยายน ซึ่ง

สอดคล้องไปตามเดือน Equinox [21] (เดือนมีนาคมและกันยายน) ตามการเปลี่ยนแปลงของความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสการเคลื่อนที่ของลมเทอร์โมสเฟียร์ ดังที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ง. และยังคงเกิดได้อีกว่าในช่วงเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคม จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรงมากที่สุด ส่วนเดือนที่มีการเกิดน้อยและไม่ค่อยรุนแรง คือ ในช่วงเดือนมิถุนายนและกรกฎาคม และในช่วงเดือนพฤศจิกายนและธันวาคม ซึ่งสอดคล้องไปตามเดือน Solstice (เดือนมิถุนายนและธันวาคม) ตามที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ง. เช่นกัน

ในการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในช่วงเวลาสั้น สามารถเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันในวิทยานิพนธ์นี้มีการแจกแจงที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบเกาส์ แต่ในกรณีที่มีการแกว่งของแอมพลิจูดที่รุนแรง ลักษณะกราฟทางการจางหายของสัญญาณจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบนาคากามิแบบ  $m$  และจากการศึกษาการแจกแจงแบบสะสม สามารถนำไปใช้ในการหาค่าพิสัยพลวัตของเครื่องรับได้ (Receiver Dynamic Range) โดยค่าพิสัยพลวัตจะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่เพิ่มขึ้น สำหรับโครงสร้างทางเวลาและความถี่นั้น สัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะมีค่าเวลาร่วมนัย  $\tau$  ที่น้อยกว่า และมีการแผ่กว้างทางสเปกตรัมของสัญญาณที่มากกว่า หรือเรียกได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงระดับแอมพลิจูดของสัญญาณที่รวดเร็วกว่า ของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ แม้ว่าในช่วงเวลานั้นจะมีค่าความรุนแรงของการแกว่งขึ้นลงทางแอมพลิจูดที่มากกว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ก็ตาม อีกทั้งยังสามารถนำค่าเวลาร่วมนัยที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด หรืออัตราการจางหาย และยังสามารถนำไปใช้คูณกับค่าความเร็วของการขับเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเส้นทางการแพร่กระจาย เพื่อให้ได้ระยะดิสคอร์ริเลชันของสายอากาศแบบสเปซโคเวอร์ซิตี เพื่อปรับปรุงแก้ไขการเลเวลลง อันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันแต่อย่างไรก็ตามเป็นเพียงการศึกษาตัวอย่าง ดังนั้นควรมีการพิจารณาในระยะยาวเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมต่อไป โดยที่ระยะดิสคอร์ริเลชันนี้ไม่ควรเกินขนาดเขตเฟรสเนลซึ่งเท่ากับ 176 เมตร

จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ของสัญญาณดาวเทียม POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ ) มาเปรียบเทียบกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม IOR ที่ระบบมีมุมเงยสูง  $40^\circ$  สามารถสรุปได้ว่า สัญญาณ POR มีระดับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันที่รุนแรงและมีจำนวนครั้งของการเกิดที่มากกว่า สัญญาณ IOR การเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในรายเดือนจะเกิดมากน้อยสัมพันธ์กันเป็นอัตราส่วน แต่ในกรณีของสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีจำนวนการเกิดของสัญญาณ POR และ IOR ที่ไม่สัมพันธ์กันนัก

สำหรับโครงสร้างทางเวลานั้น จากการเปรียบเทียบเวลาร่วมกัน พบว่า สัญญาณ IOR จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับที่รวดเร็วกว่า สัญญาณ POR เนื่องจากย่านการวัดสัญญาณ POR มีมุมเงยที่ต่ำมาก ความยาววิถีจากกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนมายังจานสายอากาศจะมากขึ้นด้วย (ความยาววิถี  $L_s$  ของการรับสัญญาณจากย่าน IOR และ POR เท่ากับ 544.5 กิโลเมตร และ 2,514.8 กิโลเมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ความสูงของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนประมาณ 350 กิโลเมตร) องค์ประกอบของสัญญาณที่ถูกทำให้กระจัดกระจาย โดยกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกดูดซับไปบางส่วนในชั้นบรรยากาศตลอดเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ทำให้องค์ประกอบของสัญญาณที่มารบกวน (Interference Signal) ที่จานสายอากาศ POR น้อยกว่าของ IOR ซึ่งอาจเป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงระดับแอมพลิจูดของสัญญาณช้ากว่าด้วย และยังสังเกตได้อีกว่า ระยะเวลาการเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ส่วนมากสัญญาณดาวเทียม POR จะเกิดก่อน ที่เวลาประมาณ 18.00-19.00 น. แต่สัญญาณดาวเทียม IOR จะเริ่มเกิดที่เวลาประมาณ 20.00-21.00 น. ทั้งนี้เป็นไปตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่ตัดผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ สัญญาณย่าน POR จะตัดผ่านกลุ่มความไม่สม่ำเสมอก่อน

สุดท้ายผลการศึกษาแบบจำลองการทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์  $\sigma_{pre}$  ของ ITU-R พบว่า ในแบบจำลองมีค่าตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ คือ ครรชนหักเห  $N_{wet}$  โดยจากการเปรียบเทียบค่าความเข้มที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดลองวัดจริงของทั้งสัญญาณดาวเทียม POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ ) และ IOR (มุมเงยสูง  $40^\circ$ ) พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงของสัญญาณดาวเทียม POR มีค่าสูงกว่าและต่ำกว่า ค่าที่ได้จากการทำนาย อยู่ในช่วง 0.1 dB peak to peak และค่าที่ได้จากการทดลองจริงของสัญญาณดาวเทียม IOR มีค่าสูงกว่า ค่าที่ได้จากการทำนาย อยู่ในช่วง 0.06 dB peak to peak จากผลดังกล่าวเห็นได้ว่า ผลของการทำนายค่าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในระยะยาว ของ ITU-R มีค่าที่ใกล้เคียงกับที่ทดลองวัดได้จริง ณ สถานีดาวเทียมศรีราชา

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยและพัฒนาต่อ

ปัญหาที่พบคือ อัตราการชั้ตัวอย่างข้อมูลของเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมแบบดิจิทัล มีขนาดที่ต่ำ (ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ 1 Hz) ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างทางเวลาและความถี่ของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน และการวิเคราะห์โครงสร้างของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนได้อย่างละเอียด ดังนั้นเพื่อการวิเคราะห์ที่ละเอียดยิ่งขึ้นจึงควรมีการใช้อัตราการชั้ตัวอย่างให้มากกว่านี้ และควรมีการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหัน โดยการทำการทดลองวัดสัญญาณในแนวลองจิจูดเดียวกัน แต่ละติจูดต่างกัน เช่น ทำการทดลองวัดสัญญาณที่จังหวัดเชียงใหม่ และภูเก็ต เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Banjo O. P. and Vilar E. "Measurement and Modeling of Amplitude Scintillations on Low-Elevation Earth-Space Paths and Impact on Communication Systems." IEEE Trans. on Commun., vol. COM-34, no. 8, August 1986. pp. 774-780.
- [2] Louis J. Ipplito Jr. **Radiowave Propagation in Satellite Communications.** Newyork : Van Nostrand Reinhold Company. 1986. pp. 139-157.
- [3] Briggs B. H. and Parkins I. A. "On the Variation of Radio Star and Satellite Scintillations with Zenith Angle." J. Atmos. Terr. Phys., 1963. pp. 334-365.
- [4] Aarons J. "Global Morphology of Ionospheric Scintillations." Proceedings of the IEEE, vol. 70, no. 4, April 1982. pp. 360-378.
- [5] Davies K. **Ionospheric Radio.** London : Peter Peregrinus Ltd. 1990. pp. 288-307.
- [6] Kunches J. "Navigation." Space Environment Topics., SE-11, 1995.
- [7] Recommendation ITU-R P. 1239. "ITU-R Reference Ionospheric Characteristics." 1997.
- [8] Goodman J. M. "A Resume of Anticipated FLEETSATCOM and GAPFILLER Scintillation Effects During the Peak of Solar Cycle 21 (1980-1982)." in Donnelly R. F (Ed.) "Solarterrestrial Predictions Proceedings IV." US Govt. Printing Office, Washington, DC. 1980.
- [9] Allnutt J. E. **Satellite to Ground Radiowave Propagation Theory, Practice and System Impact at Frequencies above 1 GHz.** London : Peter Peregrinus Ltd. 1989.
- [10] Recommendation ITU-R P. 531-5. "Ionospheric Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Satellite Services and Systems." 1999.
- [11] Livingston R. C., Weber E. and Buchau J. "Multiscale Observations of Irregularities in an Isolated and Decaying Plasma Bubble." Proc. VI ISEA., Aguadilla, Puerto Rico, 1980.
- [12] Yeh K. C. and Liu C. H. "Radio Wave Scintillations in the Ionosphere." Proceedings of the IEEE, vol. 70, no. 4, April 1982. pp. 324-360.
- [13] Flock W. J. **Propagation Effects on Satellite Systems at Frequencies below 10 GHz ; A Handbook for Satellite System Design.** NASA Reference Publication 1108. : NASA. December 1983.
- [14] Booker H. G. "The Role of the Magnetosphere in Satellite and Radio-Star Scintillation." Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics., vol. 37, August 1975. pp. 1089-1098.

- [15] Fang D. J. “4/6 GHz Ionospheric Scintillation Measurements.” AGARD Conf. Proc. 284, Propagation Effects in Space/Earth Paths, 1980. pp. 33-1 to 33-12.
- [16] Karasawa Y., Yasukawa K. and Yamada M. “Tropospheric Scintillation in the 14/11-GHz Bands on Earth-Space Paths with Low Elevation Angles.” IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 36, no. 4, April 1988. pp. 563-569.
- [17] Hall M. P. M., Barclay L. W. and Hewitt M. T., Editors **Propagation of Radiowaves.** London : Short Run Press, Ltd. 1996. pp.106-107.
- [18] Brussaard G. and Watson P. A. **Atmospheric Modelling and Millimetre Wave Propagation.** London : Chapman & Hall. 1995.
- [19] Whitney H. E., Malik C. and Aarons J. “A Proposed Index for Measuring Ionospheric Scintillation.” Planet. Space Sci., vol. 17, 1969. pp. 1069-1073.
- [20] Makaratat K. “Analysis of 1.694 GHz Ionospheric Scintillation and Its Impact on Satellite Communication System.” Master Thesis of Engineering in Electrical Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang. 2002.
- [21] อรอนงค์ เพชรน้อม. “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรที่มีผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [22] Hemmakorn N., Leelaruji N., Kitsadawanich S., Kawaguchi H. and Moriya Y. “The Characteristics of C-Band Satellite Signal at Low Elevation Propagation.” Technical Report of IEICE, A. P97-23. 1997.
- [23] Sukkaewthanom S., Decharat A., Leelaruji N. and Hemmakorn N. “The Characteristics of C-Band Scintillation at Low Elevation Propagation.” Proc. 2001 International Symposium on Communications and Information Technology, Chiang Mai, Thailand, Nov. 2001. pp. 670-673.
- [24] วิสุทธิ์ อธิพรธรรม. “การเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูดอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2536.
- [25] Beniguel Y. “Global Ionospheric Propagation Model (GIM): A Propagation Model for Scintillations of Transmitted Signals.” Radio Science., vol. 37, no. 3, May.-Jun. 2002. pp. 4-1 – 4-12.

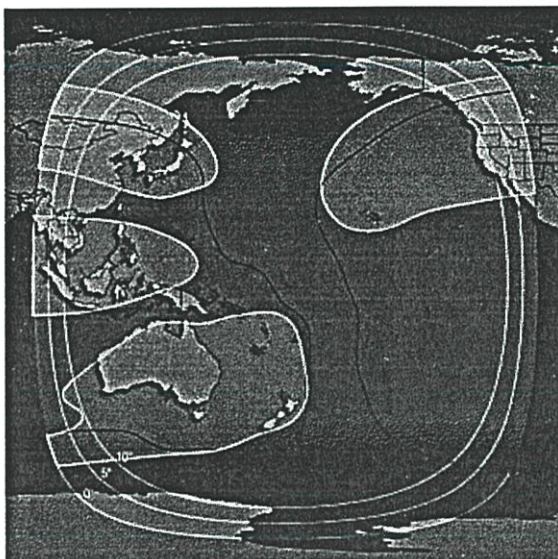
- [26] Recommendations ITU-R PN. 1057. “Probability Distributions Relevant to Radiowave Propagation Modelling.” 1994.
- [27] Proakis J. K. **Digital Communications**. 4th Ed. Singapore : McGraw-Hill, Inc. 2001.
- [28] Simon M. K. and Alouini M. S. **Digital Communication over Fading Channels**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- [29] อติสร เดชรัตน์. “การศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันต่อประสิทธิภาพการสื่อสารดาวเทียมย่านความถี่ L.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [30] Nakagami M. “The m-distribution- A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading.” *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, New York : Pergamon. 1960. pp 3-36.
- [31] Banerjee P. K., Dabas R. S. and Reddy B. M. “C and L band Transionospheric Scintillation Experiment: Some Results for Applications to Satellite Radio System.” *Radio Science.*, vol. 27, no. 6, Nov.-Dec. 1992. pp. 955-969.
- [32] Sklar B. **Digital Communications Fundamentals and Applications**. 2nd Ed. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 2001.
- [33] Fang D. J. and Liu C. H. “Statistical Characterizations of Equatorial Scintillation in the Asian Region.” *Radio Science.*, vol. 19, no. 1, 1984. pp. 345-358.
- [34] Mollen T. A. “A Study of C band Equatorial Scintillation in the Asian Sector.” *Radio Science.*, vol. 23, no. 3, 1988. pp. 337-345.
- [35] Van de kamp. M. M. J. L., Tervonen J. K., Salonen E. T. and Poiaras Baptista J. P. V. “Improved Models for Long-Term Prediction of Tropospheric Scintillation on Slant Paths.” *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 2, Feb. 1999. pp. 249-260.
- [36] Ondoh T. and Marubashi K., Editors. **Wave Submit Course : Science of Space Environment**. Tokyo : Ohmsha, Ltd. 2001.

## ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

Coverage Map:

INTELSAT 802 @ 174° E (POR)



### Key Parameters

**Total Transponders**

C-Band: 64 (in equiv. 36 MHz units)

Ku-Band: 12 (in equiv. 36 MHz units)

**Polarization**

C-Band: Circular – Right Hand or Left Hand

Ku-Band: Linear – Horizontal or Vertical

**e.i.r.p. (C-Band)**

Global Beam: 29.0 up to 33.7 dBW

(Beam Edge to Beam Peak)

Hemi Beam: 34.5 up to 40.6 dBW

Zone Beam: 34.5 up to 44.3 dBW

**Uplink Frequency**

C-Band: 5850 to 6425 MHz

Ku-Band: 14.00 to 14.50 GHz

**Downlink Frequency**

C-Band: 3625 to 4200 MHz

Ku-Band: 10.95 to 11.20 GHz or

11.70 to 11.95 GHz or

12.50 to 12.75 GHz plus 11.45 to 11.70 GHz

**G/T (C-Band)**

Global Beam: -12.0 up to -7.8 dB/K

(Beam Edge to Beam Peak)

Hemi Beam: -8.0 up to -0.5 dB/K

Zone Beam: -6.5 up to +5.2 dB/K

**G/T (Ku-Band)**

Spot 1: Up to +10.8 dB/K

(Beam Peak)

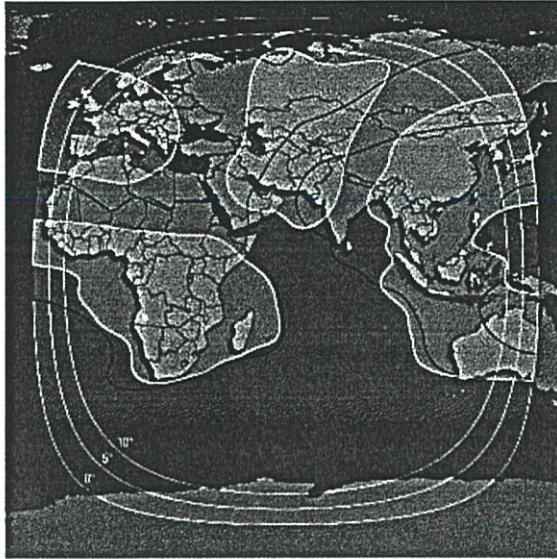
Spot 2: Up to +9.5 dB/K

**SFD Range**

C-Band: -89.0 to -67.0 dBW/m<sup>2</sup>

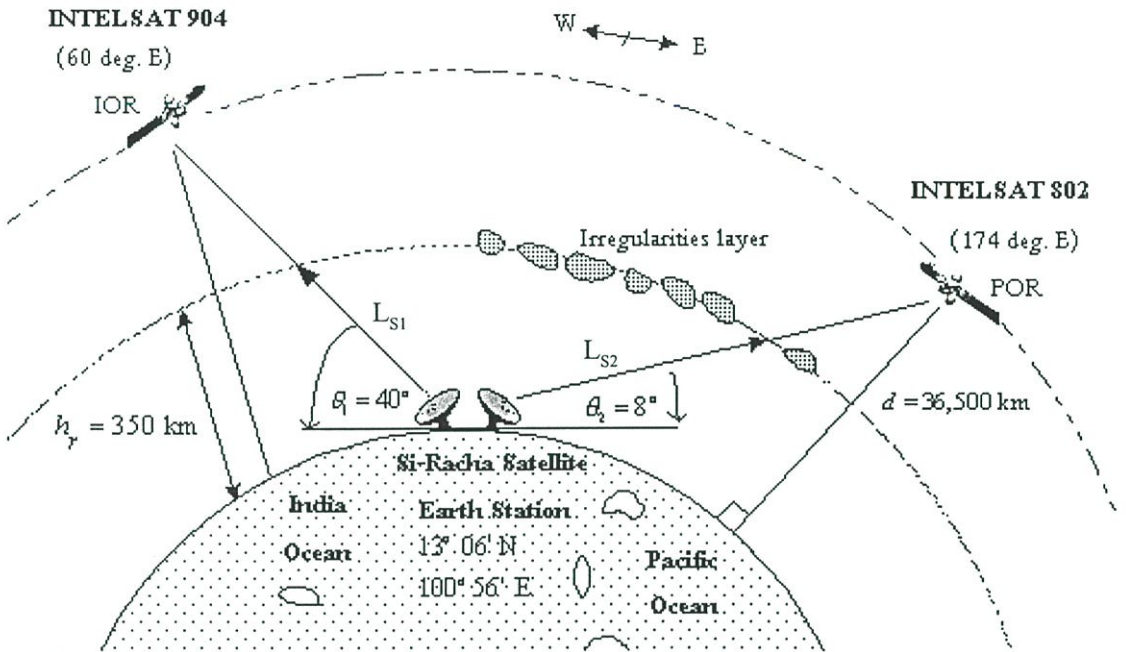
(Beam Edge)

Ku-Band: -87.0 to -69.0 dBW/m<sup>2</sup>

**Coverage Map: INTELSAT 904 @ 60° E (IOR)****Key Parameters**

<b>Total Transponders</b>	C-Band: up to 76 (in equiv. 36 MHz units) Ku-Band: 22 (in equiv. 36 MHz units)
<b>Polarization</b>	C-Band: Circular – Right Hand or Left Hand Ku-Band: Linear – Horizontal or Vertical
<b>e.i.r.p. (C-Band)</b> (Beam Edge to Beam Peak)	Global Beam: 31.0 up to 35.9 dBW Hemi Beam: 37.0 up to 45.5 dBW Zone Beam: 35.1 up to 47.8 dBW
<b>Uplink Frequency</b>	C-Band: 5850 to 6425 MHz Ku-Band: 14.00 to 14.50 GHz
<b>Downlink Frequency</b>	C-Band: 3625 to 4200 MHz Ku-Band: 10.95 to 11.20 GHz and 11.45 to 11.70 GHz
<b>G/T (C-Band)</b> (Beam Edge to Beam Peak)	Global Beam: -11.2 up to -5.6 dB/K Hemi Beam: -7.4 up to +2.0 dB/K Zone Beam: -5.0 up to +5.4 dB/K
<b>G/T (Ku-Band)</b> (Beam Peak)	Spot 1: up to +9.0 dB/K Spot 2: up to +9.0 dB/K
<b>SFD Range</b> (Beam Edge)	C-Band: -89.0 to -67.0 dBW/m <sup>2</sup> Ku-Band: -87.0 to -69.0 dBW/m <sup>2</sup>

ภาคผนวก ข.



รูปที่ ข.1 ตำแหน่งดาวเทียมและความยาววิถีจากงานสายอากาศไปยังกลุ่มความไม่สม่ำเสมอ

สามารถคำนวณความยาววิถี  $L_S$  จากงานสายอากาศไปยังกลุ่มความไม่สม่ำเสมอของอิเล็คตรอนได้โดยแยกออกเป็น 2 กรณี ดังสมการต่อไปนี้ คือ  
 ในกรณีที่  $\theta \geq 5^\circ$  จะได้

$$L_S = \left( \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \right) \quad \text{กิโลเมตร} \quad (\text{ข.1})$$

ในกรณีที่  $\theta < 5^\circ$  จะได้

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left( \sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} \quad \text{กิโลเมตร} \quad (\text{ข.2})$$

$\theta$  = มุมเงยของงานสายอากาศ (องศา)

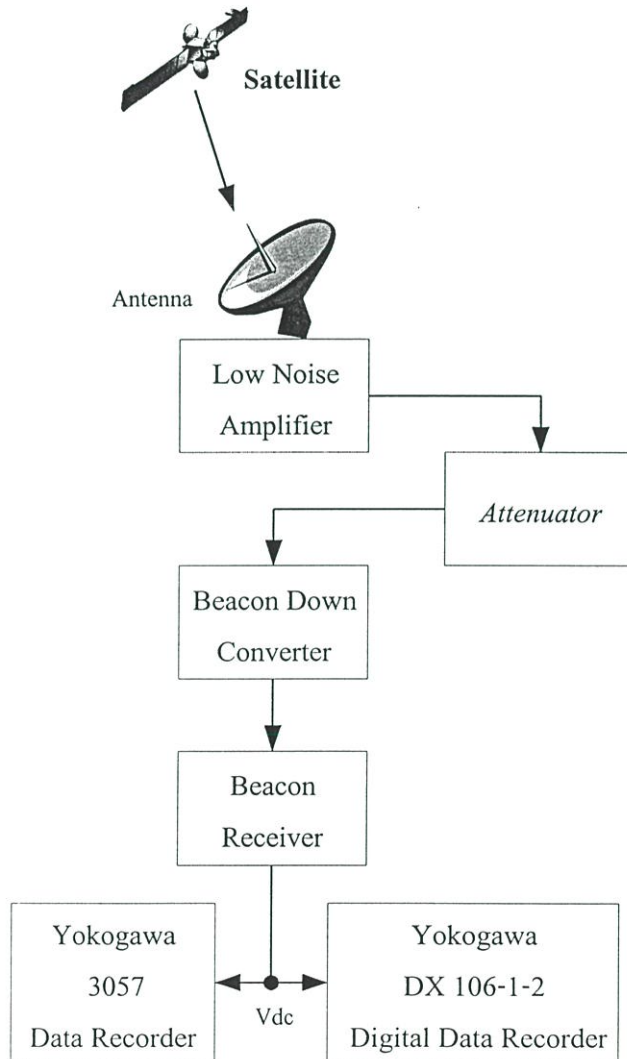
$h_S$  = ความสูงของงานสายอากาศเหนือระดับน้ำทะเล (กิโลเมตร)

$h_R$  = ความสูงของกลุ่มความไม่สม่ำเสมอเหนือระดับน้ำทะเล (กิโลเมตร)

$R_e$  = รัศมีประสิทธิผลของโลก (8,500 กิโลเมตร)

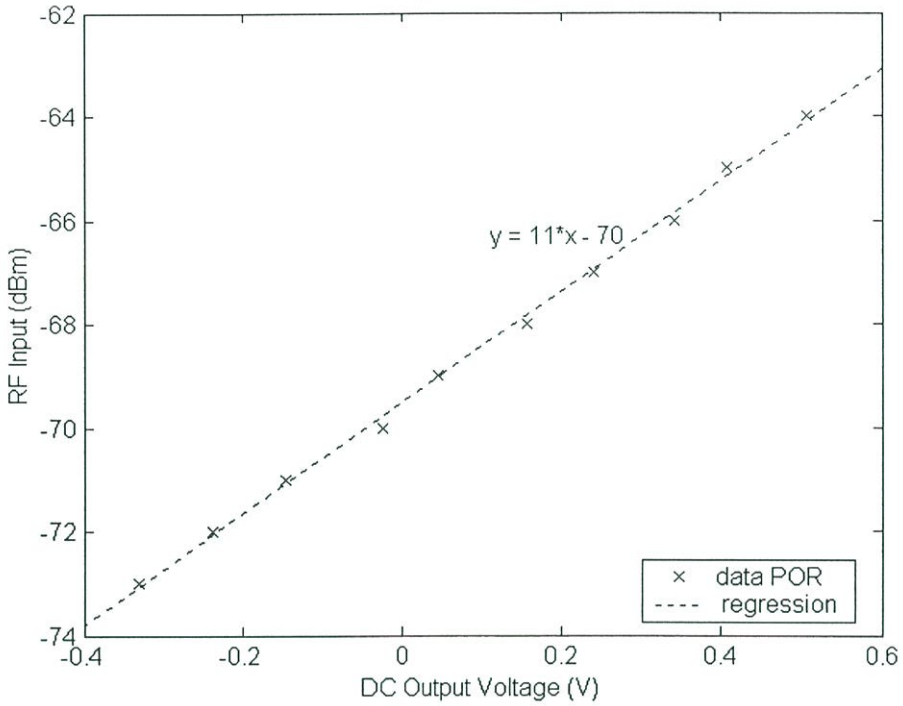
## ภาคผนวก ค.

ในการทดลองวัดสัญญาณความถี่วิทยุโดยใช้เครื่องรับและบันทึกสัญญาณ เราจะทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่เอาต์พุตของ Beacon Receiver การที่เราจะทราบค่าระดับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงค่าหนึ่งว่ามีค่าเท่ากับความแรงของสัญญาณที่เดซิเบลนั้น จะต้องทำการปรับแต่งค่า เพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องรับกับระดับพลังงานของสัญญาณ โดยความสัมพันธ์นี้จะเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละเครื่องรับ

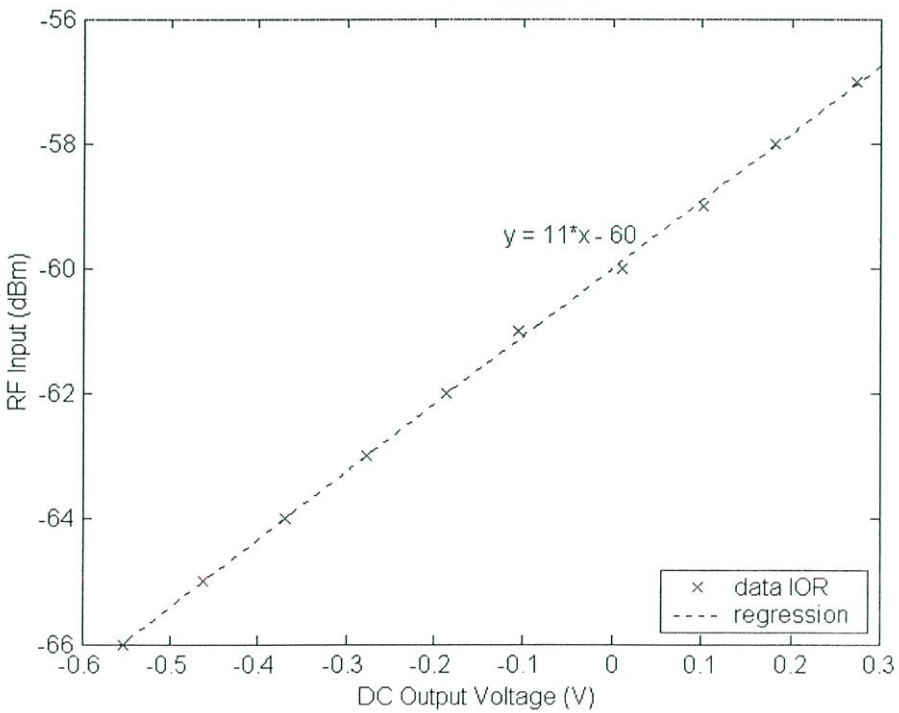


รูปที่ ค.1 บล็อกไดอะแกรมการปรับแต่งของระบบ

วิธีการในการปรับแต่งค่าในที่นี้ คือ ในขณะที่ระบบมีการใช้งานจริง ให้ทำการต่อตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator) เข้าไปในระบบ โดยต่อไว้หน้า Beacon Down Converter แสดงดังรูปที่ ค.1 จากนั้นจึงค่อยๆ ปรับลดระดับความแรงของสัญญาณลงทีละเดซิเบล ในขณะที่เดียวกันก็ทำการ



รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของระดับสัญญาณกับระดับไฟฟ้ากระแสตรงของสัญญาณดาวเทียม POR (มุมเงยต่ำ  $8^\circ$ )

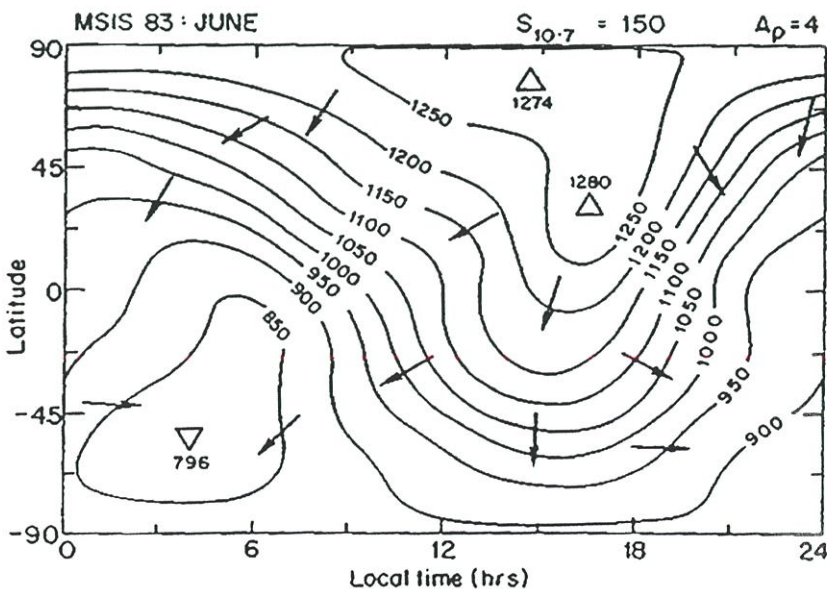


รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของระดับสัญญาณกับระดับไฟฟ้ากระแสตรงของสัญญาณดาวเทียม IOR (มุมเงยสูง  $40^\circ$ )

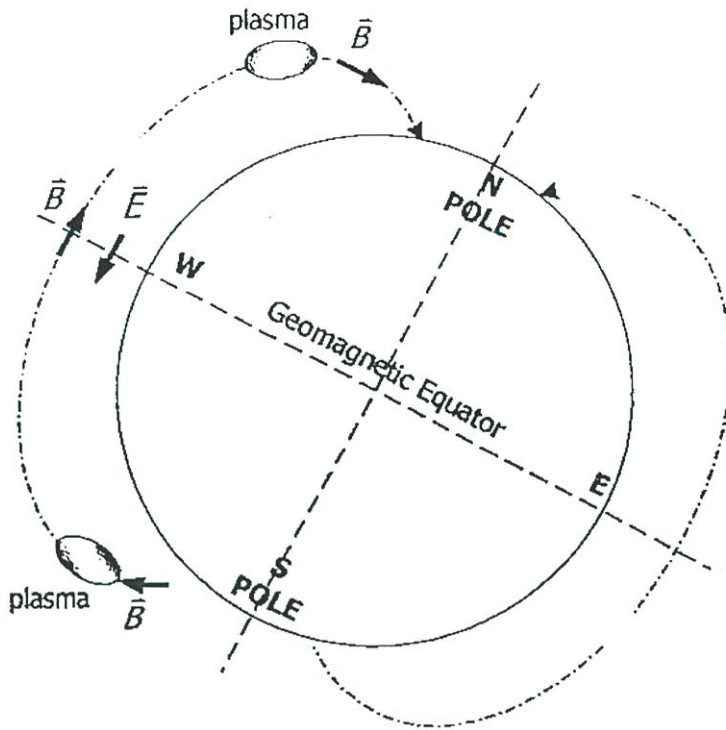
บันทึกค่าระดับไฟฟ้ากระแสตรงที่เอาต์พุตของ Beacon Receiver หรือสามารถอ่านได้จากเครื่องบันทึกสัญญาณดาวเทียมทั้งสองนั่นเอง โดยให้ทำการปรับลดความแรงของสัญญาณอย่างน้อย 3 รอบ เพื่อที่จะได้นำค่าที่ได้ออกมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของระดับสัญญาณกับระดับไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression) ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณดาวเทียม POR และสัญญาณดาวเทียม IOR แสดงได้ในรูปที่ ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ ที่ซึ่งค่าระดับสัญญาณปกติของสัญญาณดาวเทียม POR และ IOR ที่อ่านได้จากเครื่องวัดสเปกตรัม (Spectrum Analyzer) หลังตัว LNA คือ  $-64$  dBm และ  $-57$  dBm ตามลำดับ

## ภาคผนวก ง.

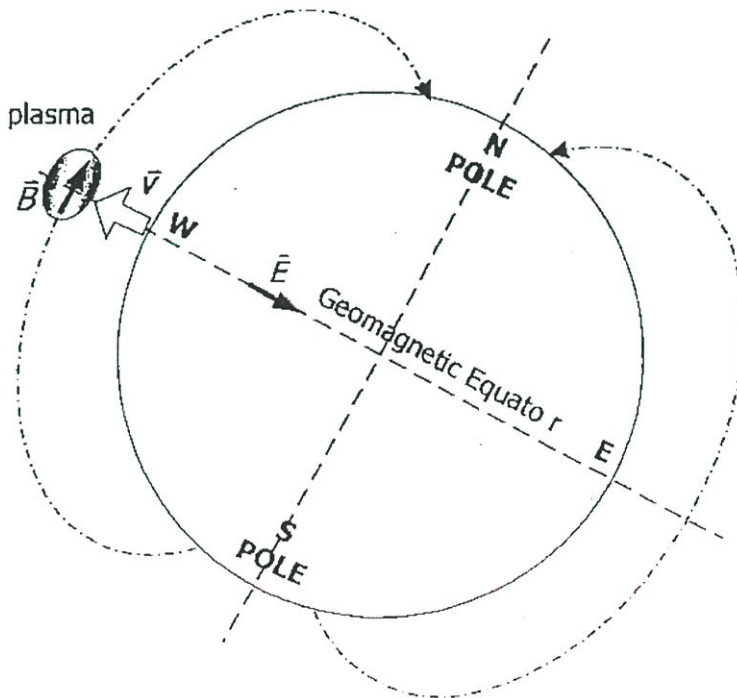
การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกระทันหันเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในช่วงเดือน Equinox (เดือนมีนาคมและกันยายนของทุกๆ ปี) ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอน (TEC) และความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศนั้น สืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ (Thermospheric Winds) ซึ่งเป็นกระแสการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนิวตรอนตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กระแสลมเทอร์โมสเฟียร์นี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคนิวตรอนและไอออน รูปที่ ง.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ในช่วงเดือน Solstice (ช่วงเดือนมิถุนายนและธันวาคมของทุกปี) กระแสลมเทอร์โมสเฟียร์มีการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงในแนวซีกโลกเหนือได้เท่านั้น จากความสัมพันธ์ของผลคูณเชิงเวกเตอร์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและเวกเตอร์สนามแม่เหล็กโลกทำให้เกิดเวกเตอร์ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (Drift Velocity)  $\vec{V} = \vec{E} \times \vec{B}$  เฉพาะบริเวณขั้วโลกเหนือและใต้เท่านั้นที่เกิดการลอยตัวต่ำลงและสูงขึ้นของกลุ่มอิเล็กตรอน หรือพลาสมาตามลำดับ ที่ระดับความสูงไม่มากนัก ซึ่งเป็นระดับความสูงที่เกิดการรวมตัวกันของอนุภาค (Recombination) เท่านั้น ทำให้ความหนาแน่นและความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนมีไม่มากนัก สำหรับบริเวณศูนย์สูตรนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ของกลุ่มพลาสมาเกิดขึ้นเลยเนื่องจากสนาม  $\vec{E}$  ที่บริเวณนี้ขนานกับสนาม  $\vec{B}$  นั่นคือ ช่วงเดือน Solstice ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนมีน้อยมาก และเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณขั้วโลกเหนือและใต้เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.1 พังการเคลื่อนที่ของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ในช่วงเดือน Solstice [17]



รูปที่ ง.2 การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มพลาสมาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ ในช่วงเดือน Solstice (เดือนมิถุนายนและธันวาคมของทุกปี)



รูปที่ ง.3 การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มพลาสมาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ ในช่วงเดือน Equinox (เดือนมีนาคมและกันยายนของทุกปี)

สำหรับช่วงเดือน Equinox เมื่อพิจารณาเฉพาะบริเวณศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก กระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ จะเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกในช่วงเวลากลางคืน และเคลื่อนที่ย้อนกลับไปทางทิศตะวันตกหลังเที่ยงคืน ด้วยสาเหตุนี้การชนกันของอนุภาคนิวตรอนและไอออนทำให้เกิดสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ตามแนวการเคลื่อนที่ของกระแสลมเทอร์โมสเฟียร์ไปทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกตามลำดับ [36] จากผลคูณเชิงเวกเตอร์ เวกเตอร์ความเร็วลอยเลื่อนของกลุ่มพลาสมาจะมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นโลกในทิศทางขึ้น ดังรูปที่ ๓.3 นั่นคือ กลุ่มพลาสมามีการเคลื่อนที่ลอยสูงขึ้นจนถึงระดับความสูงที่มีการชนกัน (Collision) และแตกตัวกันของอนุภาคอยู่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความหนาแน่นและความไม่สม่ำเสมอของกลุ่มอิเล็กตรอนขึ้นในตอนกลางคืนของช่วงเดือน Equinox บริเวณศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก

## ภาคผนวก จ.

### สถิติภูมิอากาศ

ข้อมูลสถิติภูมิอากาศในที่นี้ ได้แก่ อุณหภูมิเฉลี่ย (Temperature), ความกดบรรยากาศ หรือความดันอากาศ (Atmospheric Pressure), ความดันไอน้ำ (Water Vapor Pressure), ปริมาณฝน (Rain), ปริมาณเมฆในท้องฟ้า (Cloud), ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ตั้งแต่ปี 2543 ถึง ปี 2545 ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ( $13^{\circ} 04' N, 100^{\circ} 48' E$ ) ซึ่งเป็นสถานีตรวจอากาศที่ใกล้ตำแหน่งที่ตั้งงานดาวเทียมที่ใช้ในการทดลองมากที่สุด ณ สถานีดาวเทียมศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ( $13^{\circ} 06' N, 100^{\circ} 56' E$ ) โดยข้อมูลสถิติภูมิอากาศทั้งหมดนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากงานบริการข้อมูล กลุ่มภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอู่ศูนย์นิคมวิทยา กรมอู่ศูนย์นิคมวิทยา บังนา โทร. 0-23994568-74 ต่อ 148 โดยมีรายละเอียดเพิ่มเติม ดังนี้

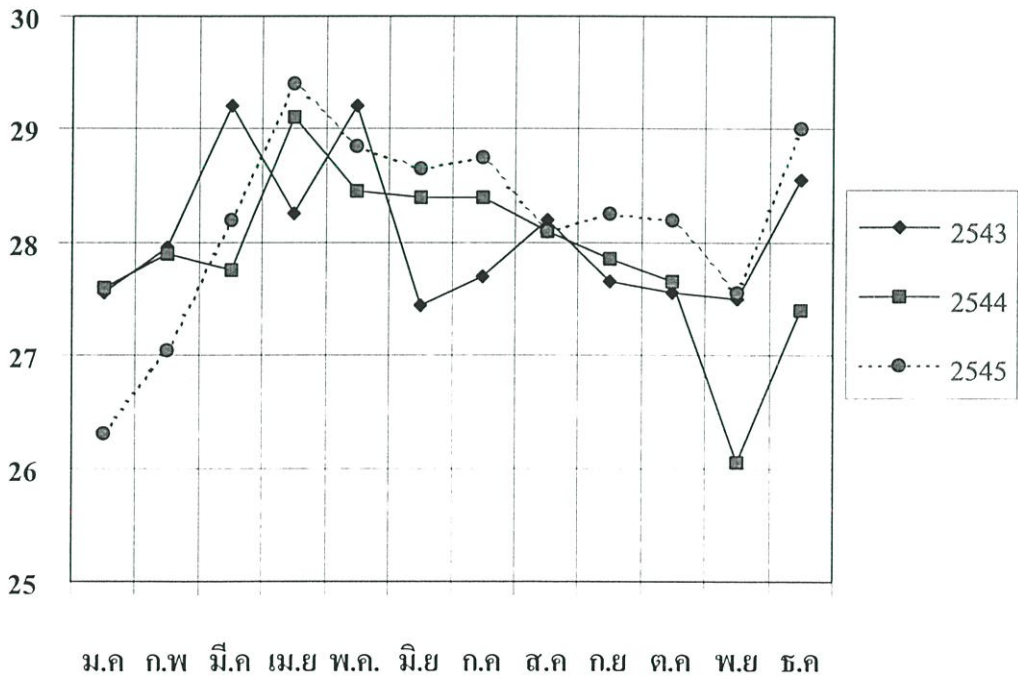
- อุณหภูมิเฉลี่ย, ความกดบรรยากาศ, ความดันไอน้ำเฉลี่ย และความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ยรายเดือน จากข้อมูลจริงที่เก็บเป็นราย 3 ชั่วโมง วันหนึ่งเก็บข้อมูล 5 ครั้ง คือ 7.00, 10.00, 13.00, 16.00 และ 19.00 น.
- ปริมาณฝน (มิลลิเมตร) ทั้งหมดที่ตกเป็นรายเดือน ได้จากข้อมูลจริงที่เก็บเป็นราย 3 ชั่วโมง วันหนึ่งเก็บข้อมูล 5 ครั้ง คือ 7.00, 10.00, 13.00, 16.00 และ 19.00 น.
- ปริมาณเมฆในท้องฟ้า (ส่วน) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 ส่วน (ส่วน หมายถึง 1/10 ของท้องฟ้า) เฉลี่ยเป็นรายเดือน จากข้อมูลจริงที่เก็บเป็นราย 3 ชั่วโมง วันหนึ่งเก็บข้อมูล 5 ครั้ง คือ 7.00, 10.00, 13.00, 16.00 และ 19.00 น.

## 1. อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ จ.1 อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

เดือน	ปี 2543	ปี 2544	ปี 2545
ม.ค.	27.55	27.60	26.30
ก.พ.	27.95	27.90	27.05
มี.ค.	29.20	27.75	28.20
เม.ย.	28.25	29.10	29.40
พ.ค.	29.20	28.45	28.85
มิ.ย.	27.45	28.40	28.65
ก.ค.	27.70	28.40	28.75
ส.ค.	28.20	28.10	28.10
ก.ย.	27.65	27.85	28.25
ต.ค.	27.55	27.65	28.20
พ.ย.	27.50	26.05	27.55
ธ.ค.	28.55	27.40	29.00

องศาเซลเซียส

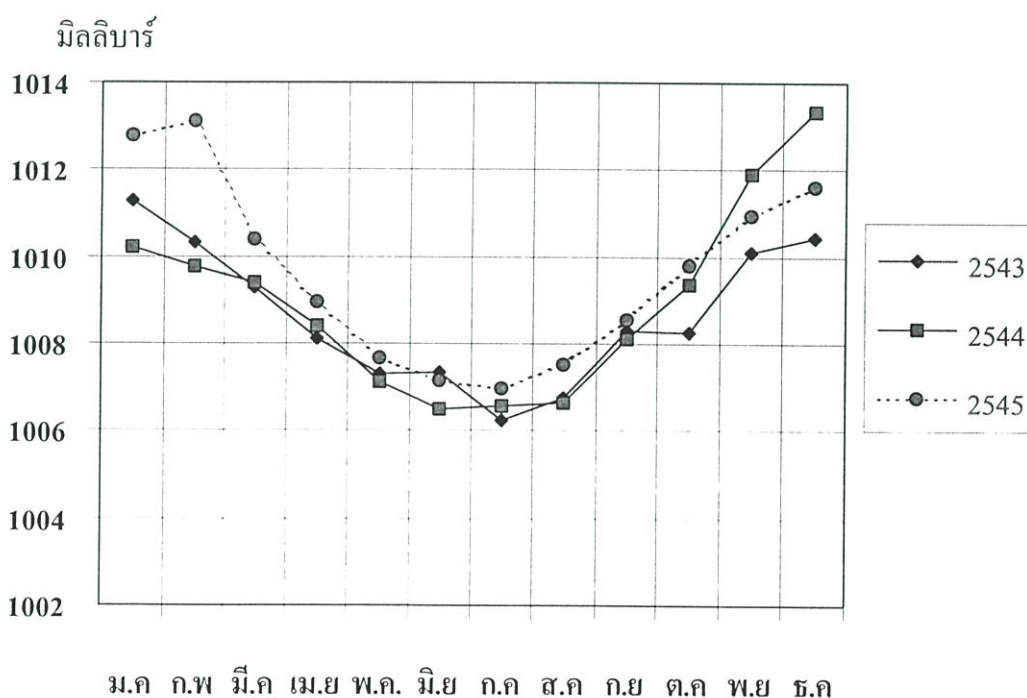


รูปที่ จ.1 อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

## 2. ความกดบรรยากาศ (มิลลิบาร์)

ตารางที่ จ.2 ความกดบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

เดือน	ปี 2543	ปี 2544	ปี 2545
ม.ค.	1011.29	1010.20	1012.77
ก.พ.	1010.31	1009.75	1013.13
มี.ค.	1009.27	1009.39	1010.39
เม.ย.	1008.10	1008.39	1008.95
พ.ค.	1007.31	1007.13	1007.68
มิ.ย.	1007.34	1006.49	1007.16
ก.ค.	1006.25	1006.58	1006.98
ส.ค.	1006.74	1006.62	1007.51
ก.ย.	1008.30	1008.10	1008.54
ต.ค.	1008.26	1009.36	1009.81
พ.ย.	1010.09	1011.91	1010.95
ธ.ค.	1010.43	1013.34	1011.62

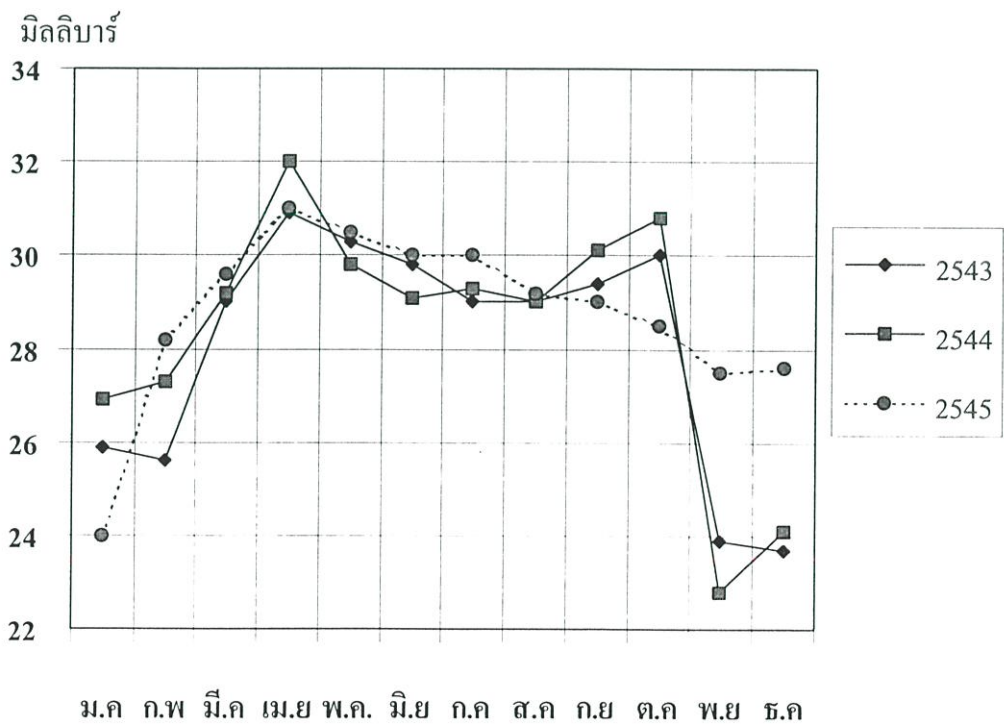


รูปที่ จ.2 ความกดบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

### 3. ความดันไอน้ำ (มิลลิบาร์)

ตารางที่ จ.3 ความดันไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

เดือน	ปี 2543	ปี 2544	ปี 2545
ม.ค.	25.90	26.90	24.00
ก.พ.	25.60	27.30	28.20
มี.ค.	29.00	29.20	29.60
เม.ย.	30.90	32.00	31.00
พ.ค.	30.30	29.80	30.50
มิ.ย.	29.80	29.10	30.00
ก.ค.	29.00	29.30	30.00
ส.ค.	29.00	29.00	29.20
ก.ย.	29.40	30.10	29.00
ต.ค.	30.00	30.80	28.50
พ.ย.	23.90	22.80	27.50
ธ.ค.	23.70	24.10	27.60

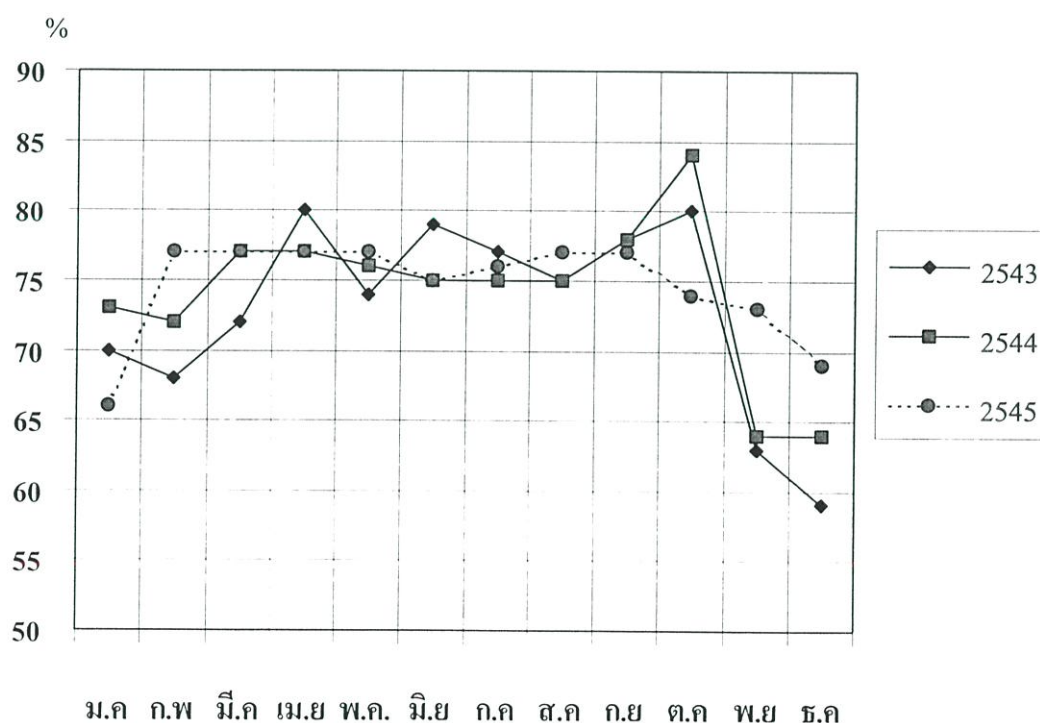


รูปที่ จ.3 ความดันไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

## 4. ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

ตารางที่ จ.4 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

เดือน	ปี 2543	ปี 2544	ปี 2545
ม.ค.	70	73	66
ก.พ.	68	72	77
มี.ค.	72	77	77
เม.ย.	80	77	77
พ.ค.	74	76	77
มิ.ย.	79	75	75
ก.ค.	77	75	76
ส.ค.	75	75	77
ก.ย.	78	78	77
ต.ค.	80	84	74
พ.ย.	63	64	73
ธ.ค.	59	64	69



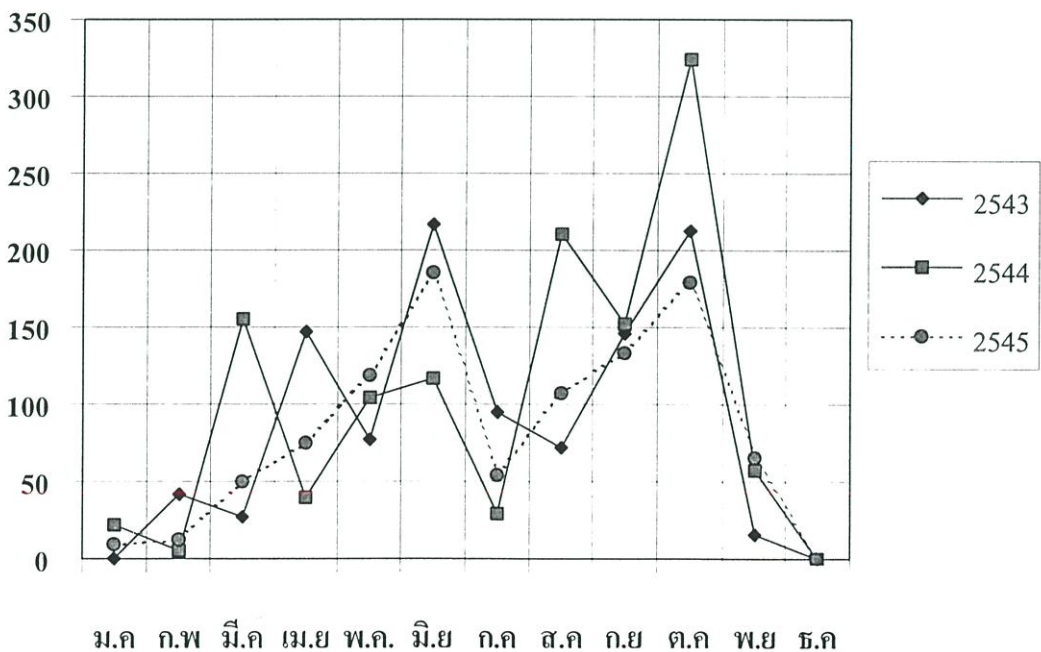
รูปที่ จ.4 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

## 5. ปริมาณฝน (มิลลิเมตร)

ตารางที่ จ.5 ปริมาณฝนทั้งหมดในแต่ละเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

เดือน	ปี 2543	ปี 2544	ปี 2545
ม.ค.	0.0	21.6	9.5
ก.พ.	41.5	4.8	12.9
มี.ค.	27.2	155.7	50.0
เม.ย.	147.1	39.2	75.2
พ.ค.	77.0	104.1	119.1
มิ.ย.	216.6	116.9	185.2
ก.ค.	94.6	28.7	53.7
ส.ค.	72.0	209.9	107.8
ก.ย.	145.8	152.4	132.9
ต.ค.	212.8	323.8	178.7
พ.ย.	15.2	57.7	65.4
ธ.ค.	0.0	0.0	0.0

มิลลิเมตร

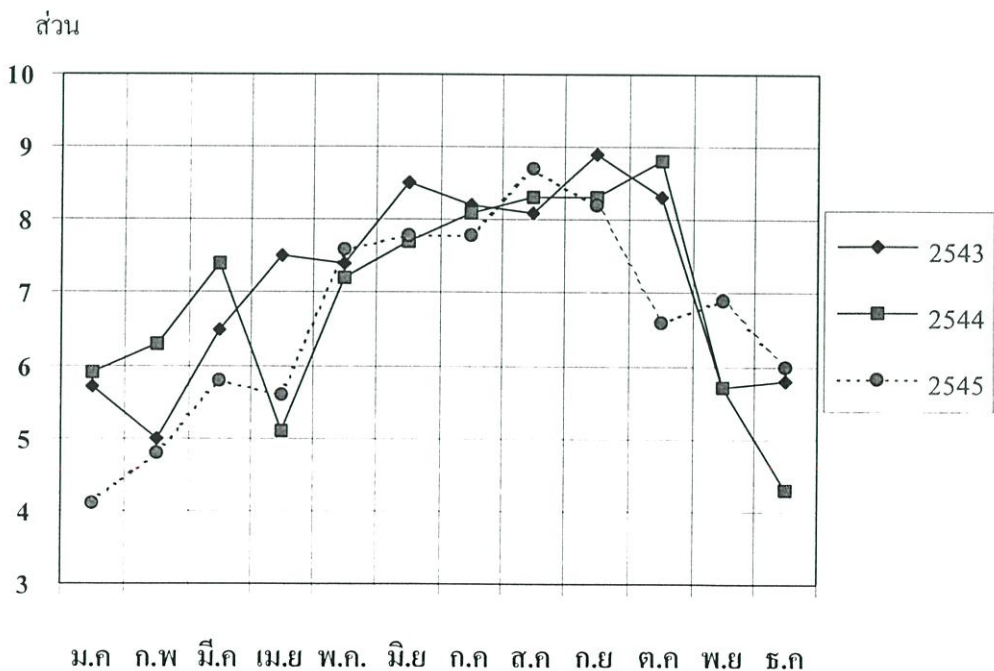


รูปที่ จ.5 ปริมาณฝนทั้งหมดในแต่ละเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

## 6. ปริมาณเมฆในท้องฟ้า (ส่วน)

ตารางที่ จ.6 ปริมาณเมฆในท้องฟ้าเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง  
(ปี 2543 ถึง ปี 2545)

เดือน	ปี 2543	ปี 2544	ปี 2545
ม.ค.	5.7	5.9	4.1
ก.พ.	5.0	6.3	4.8
มี.ค.	6.5	7.4	5.8
เม.ย.	7.5	5.1	5.6
พ.ค.	7.4	7.2	7.6
มิ.ย.	8.5	7.7	7.8
ก.ค.	8.2	8.1	7.8
ส.ค.	8.1	8.3	8.7
ก.ย.	8.9	8.3	8.2
ต.ค.	8.3	8.8	6.6
พ.ย.	5.7	5.7	6.9
ธ.ค.	5.8	4.3	6.0



รูปที่ จ.6 ปริมาณเมฆในท้องฟ้าเฉลี่ยรายเดือน ณ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง (ปี 2543 ถึง ปี 2545)

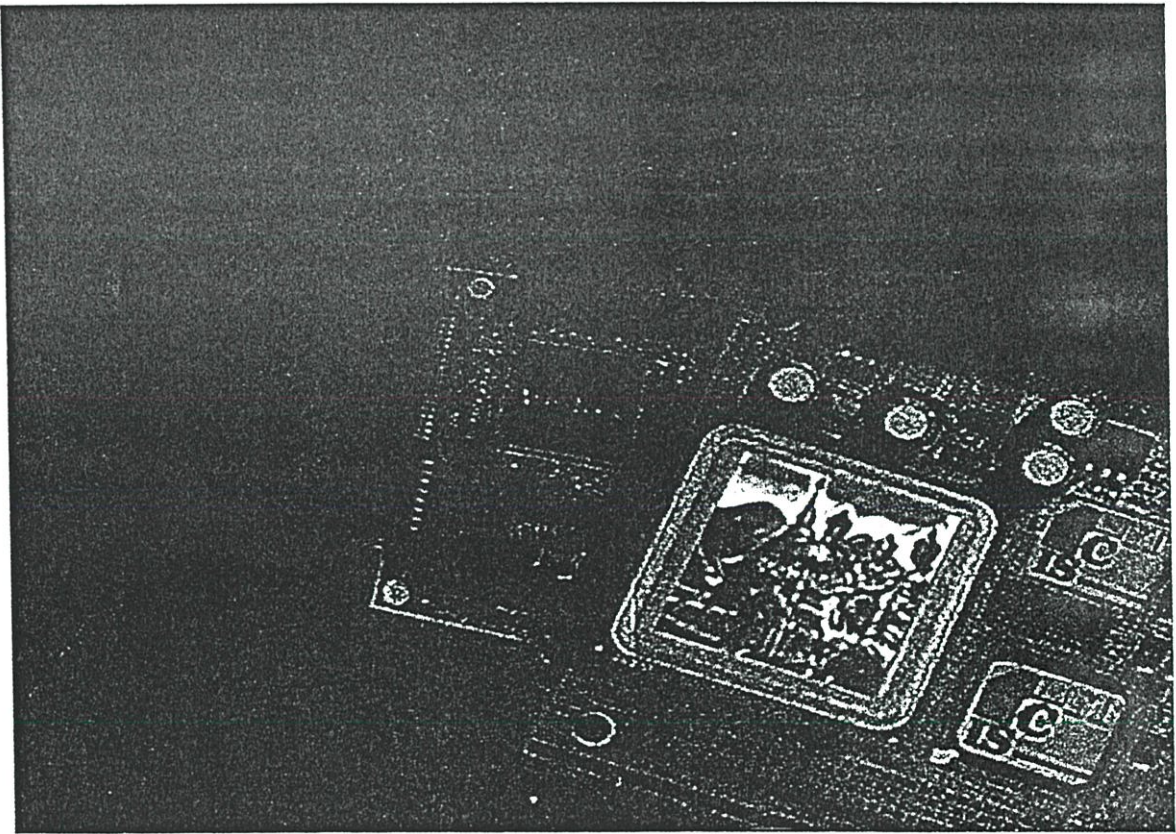
## ภาคผนวก จ.

### บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

1. Sukkaewthanom S., Decharat A., Leelaruji N. and Hemmakorn N. “The Characteristics of C-Band Scintillation at Low Elevation Propagation.” Proc. 2001 International Symposium on Communications and Information Technology, Chiang Mai, Thailand, Nov. 2001. pp. 670-673.

# PROCEEDINGS

## 2001 International Symposium on Communications and Information Technology ISCIT 2001



*The Merging Decade of  
Communication Systems and Information Technology*

November 14 - 16, 2001

Chiang Mai Orchid Hotel, Chiang Mai, Thailand



## THE CHARACTERISTICS OF C-BAND SCINTILLATION AT LOW ELEVATION PROPAGATION

*Sompong Sukkaewthanom  
Nipha Leelarui*

*Adit Decharat  
Narong Hemmakorn*

Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.  
Phone:+66-2-737-3000 Ext. 3345, Fax:+66-2-326-9086, Email: khnarong@kmitl.ac.th

### ABSTRACT

Thailand is located in the tropical zone and temperature is always high, Disturbance from ionospheric may occur because Thailand is located near the equator. We measured the characteristics of low elevation propagation at the antenna elevation of 8 degrees by receiving the beacon signal from INTELSAT 802, then tropospheric scintillation may occur. We found that diurnal and seasonal differences were found clearly in scintillation severity. Occurrence of scintillation was most frequently in September.

### 1. INTRODUCTION

Satellite communications is very popular now, many countries used satellite communications system for international telephone link or domestic link and also for broadcasting its TV program to rural area. Satellite communication systems have a lot of problems to be solved in the area of radiowave propagation. The users need to understand the characteristics of radiowave propagation in this area.

For the design of low margin system, especially those at high frequencies and low elevation angles, scintillation effects must be accounted for to complete a link budget accurately. We received C band beacon signals from an INTELSAT satellite in orbit above the Pacific Ocean Region to analyze scintillation phenomena. Many researchers have been studied on scintillation in the C band [1-2]. We received signal and analyze in C band scintillation event from our data of low elevation angle propagation gathered for six months from August, 2000 to January, 2001 to determine scintillation characteristics.

### 2. SCINTILLATION PHENOMENA

When signal from satellite pass through the ionosphere and troposphere, then scintillation may occur due to small-scale refractive index variations in the atmosphere. These refractive index variations are the result of temperature, humidity and pressure irregularities called atmospheric turbulence.

Scintillation may impact on a communication system in three ways: firstly, low-fade margin systems may be significantly affected by periods of deep scintillation fading. Secondly, wavefront

incoherence may impinge upon the ability of tracking and beamforming systems to accurately measure the angle-of-arrival. Finally, systems that employ power control algorithms may be adversely affected by the rapid fluctuation of a scintillation event.

Scintillation phenomena are classified according to their cause:

1. Ionospheric irregularities include the E<sub>s</sub> layer and spread F.
2. Tropospheric irregularities include those arising from changes in the refractive index of the atmosphere and those caused by rain particles. The formers are called dry scintillation and the latter wet scintillation [3].

Ionospheric scintillation very according to the places of observation, the equatorial, mid-latitude and high-latitude regions. The characteristics of scintillation occurrence also vary with solar activity. Both ionospheric and tropospheric scintillations have diurnal and seasonal variations.

There are two methods to measure the magnitude of fluctuations in scintillation; one is to read the maximum and minimum of receiving levels in any desired time, we call peak to peak method, and the other is to express the variance by using the standard deviation.

To express ionospheric scintillation, the following two methods are used in addition to the peak to peak method [4]. The method using the S index can be presented by the following formula:

$$S_4 = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (1)$$

where  $\sigma_x$  is the standard deviation of received signal power and  $m_x$  is the mean value. The other method, which employs the SI index,

$$SI = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (2)$$

where  $P_{\max}$  is the third peak value counted from the highest one, and  $P_{\min}$  is the third lowest value counted from the lowest level.

CCIR express tropospheric scintillation by means of the standard deviation using the following formula [5].

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin\theta)^{1.2}} \quad (3)$$

where  $f$  is the receiving frequency (GHz),  $\theta$  is the elevation angle,  $\sigma_{ref}$  is the wet term of the refractive index  $N$  of the atmosphere,  $g(x)$  is the antenna averaging function.

Various techniques are used to analyze measured data depending on measuring conditions.

This paper we considered only the peak to peak of signal level fluctuation.

### 3. EXPERIMENTAL SYSTEM

We received C band beacon signals from the INTELSAT 802 satellite which was in orbit above the Pacific Ocean Region from August, 2000 to January, 2001 at the Si-Racha satellite earth station of Thailand. It is about 150 kms southeast of Bangkok. All data collected in experiments were recorded on strip chart. Table 1 gives the specification employed in the measuring.

Table 1. Specification for measurement.

Satellite	INTELSAT 802 (174°E)
Receiving Position	SI-RACHA earth station
Latitude	13° 06' N
Longitude	100° 56' E
Elevation angle	8°
Azimuth angle	93.96°
Receiving frequency	3.9525 GHz (beacon)
Antenna aperture	32 mØ
Antenna gain	61 dB (4 GHz)

Figure 1 shows a sample signal of scintillation observed in daytime that may be due to troposphere and Figure 2 shows a sample signal of scintillation observed in nighttime that may be due to ionosphere. These figures recorded in October, 2000. The signal fluctuation of ionospheric scintillation change more rapidly.

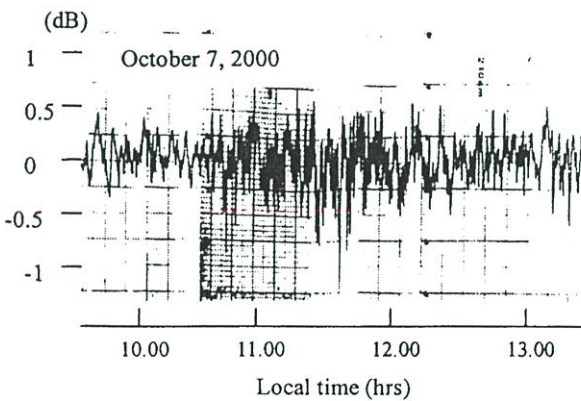


Fig. 1 Typical pattern of tropospheric scintillation.

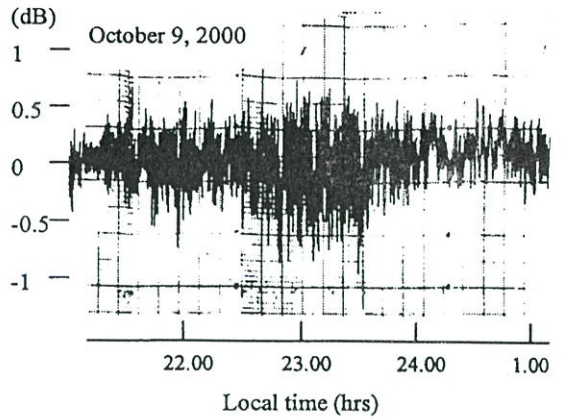


Fig. 2 Typical pattern of ionospheric scintillation.

### 4. SCINTILLATION OBSERVATION AND ITS RESULTS

We examined the level fluctuation of scintillation that occurred in the observation period from August, 2000 to January, 2001 in term of peak to peak values by dividing scintillation event in to five minutes. Histogram of the level fluctuation during our observation has shown in the figure 3. From the figure, the value of fluctuation was mostly about 0.75 dB peak to peak. Figure 4 shows the cumulative distribution of level fluctuation of scintillation during the month.

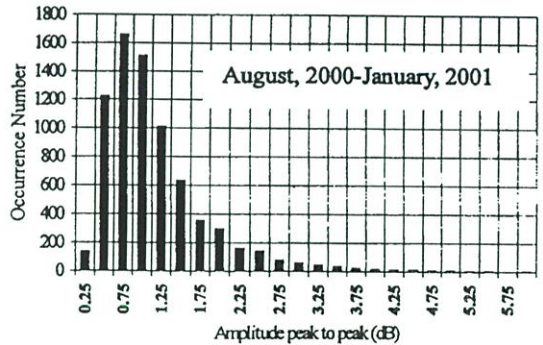


Fig. 3 Histogram of the signal level fluctuation.

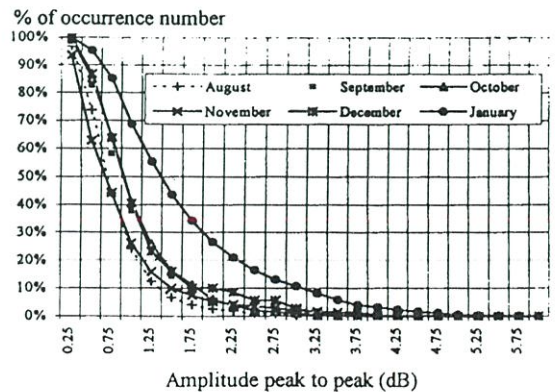


Fig.4 Cumulative occurrence distribution of level fluctuation of scintillation during the month.

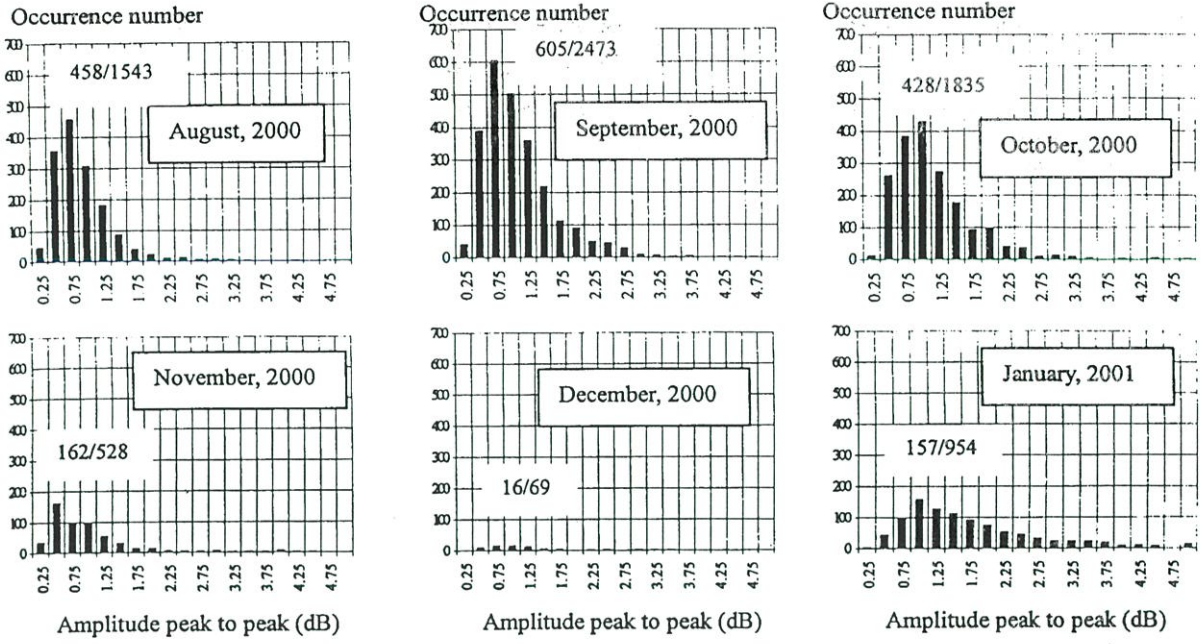


Fig. 5 Histogram of the signal level fluctuation by monthly

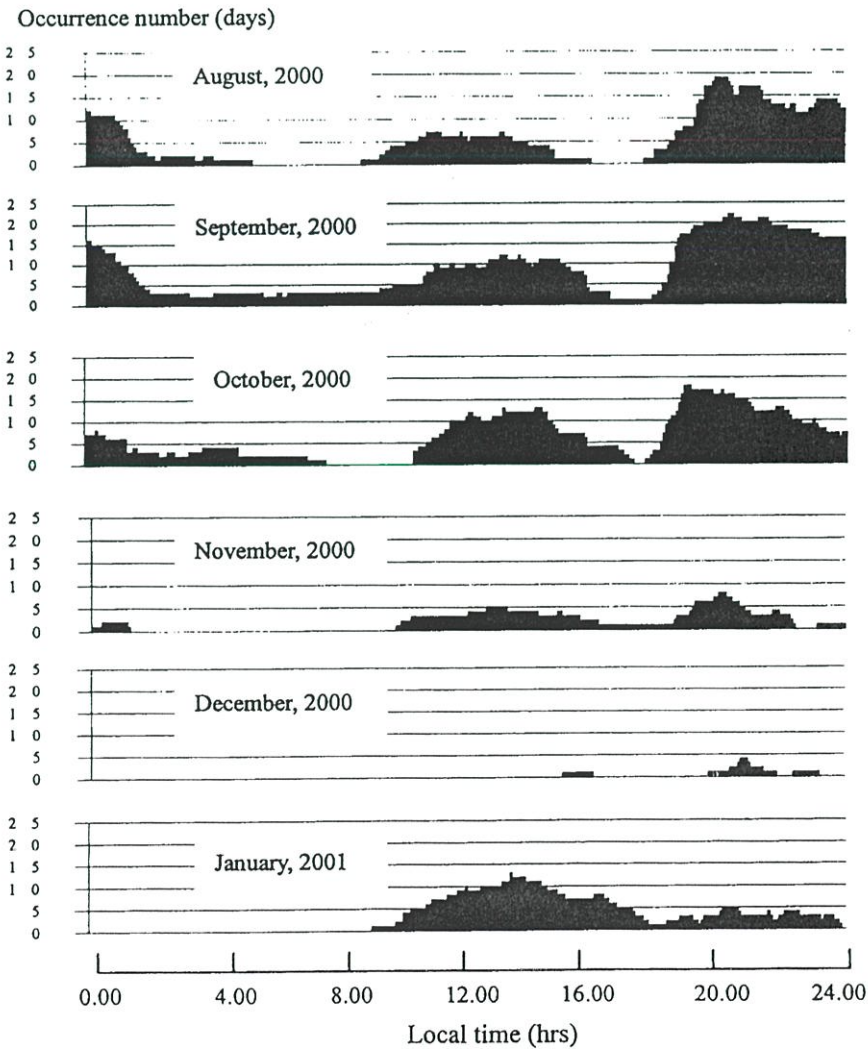


Fig. 6 Diurnal total occurrence number of scintillation.

Figure 5 shows histogram of the signal level fluctuation by monthly. Assume amplitude fluctuation more than 0.25 dB peak to peak occurring over five minutes are one time of scintillation occurrence. From the Figure, scintillation occurrence was most frequently in September about 2473 times and the maximum of occurrence was at 0.75 dB peak to peak, occurring 605 times. Occurrence of scintillation was minimum in December about 69 times. In August, the maximum of occurrence was at 0.75 dB peak to peak, occurring 458 times from 1543 times of total occurrence number. In October, the maximum of occurrence was at 1 dB peak to peak, occurring 428 times from 1835 times of total occurrence number. In November, the maximum of occurrence was at 0.5 dB peak to peak, occurring 162 times from 528 times of total occurrence number. In January, the maximum of occurrence was at 1 dB peak to peak, occurring 157 times from 954 times of total occurrence number. The maximum amplitude fluctuation was about 6 dB peak to peak in January, 2001. Figure 6 shows diurnal variation of the occurrence number of scintillation. Ionospheric scintillation mostly occurred between 1800-0100 LT but Tropospheric scintillation mostly occurred between 1000-1600 LT.

Figure 7 shows the percentage of scintillation occurred monthly. Occurrence of tropospheric scintillation was more than ionospheric scintillation only in January, 2001 about 78% of total scintillation and the occurrence of tropospheric scintillation was minimum in December about 18% of total scintillation.

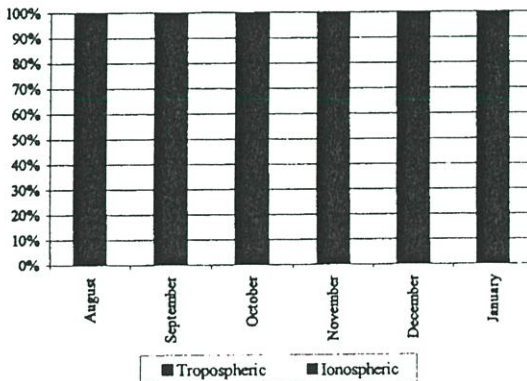


Fig.7 Percentage of scintillation occurred

## 5. CONCLUSION

We analyzed and studied the characteristics of C band satellite signal at low elevation propagation. It was found that ionospheric scintillation occurrence depends on seasonal variation. Occurrence of scintillation was most frequently in September and minimum in December. The value

of amplitude fluctuation was mostly about 0.75 dB peak to peak. Scintillation rarely occurred in November and December because they are in winter season. Occurrence of tropospheric scintillation was more than ionospheric scintillation only in January, 2001. This paper was analyzed just only short-term data. Therefore, to analyze more accurately, relates to season variation, solar activity, latitude-longitude position and statistical probability. Long-term data should be considered.

## 6. ACKNOWLEDGMENT

The authors are thankful to the engineers of the SI-RACHA satellite earth station for observations. Help and cooperation extended by the engineers, Mr. Banharn Boonshome, Mr. Surawit akekatat and Mr. Sumate Damtong in recording the data are also gratefully acknowledged.

We would like to thank Dr. Matsuichi Yamada for the many helpful discussions.

## REFERENCES

- [1] H. Yokoi, M. Yamada and T. Satoh: "Attenuation and scintillation of microwave originating from space sources," *Trans. IECE*, 53-B, No. 5, pp.238-245, May 1970.
- [2] R.R. Taur: "Ionospheric scintillation at 4 and 6 GHz," *COMSTTech. Rev.*, Vol. 3.1, pp.145-163, 1973
- [3] Project COST 205: "Scintillations in Earth-satellite links," *Alta Freq*, Vol. 54, No. 3, pp.209-211, May-June 1985.
- [4] Louis J.Ippolite Jr.: "Radiowave propagation in satellite communications," Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- [5] Report 718-3: "Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation," CCIR V (Propagation in non-ionized media), 1990.

## ประวัติผู้เขียน

นายสมพงษ์ สุกรแก้วถนอม เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม จากภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542 จากนั้นในปีการศึกษา 2543 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท มีบทความตีพิมพ์ทั้งสิ้น 1 บทความ

ปี พ.ศ. 2540 เข้าทำงานในตำแหน่งช่างอุปกรณ์การแพทย์ ของสถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี สังกัดกรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข รับผิดชอบในด้านการซ่อม บำรุงรักษา และสอบเทียบเครื่องมือทางการแพทย์ และปัจจุบันดำรงตำแหน่งนักวิชาการคอมพิวเตอร์

ทุนที่เคยได้รับ คือ ทุนเรียนดีแต่ขาดแคลนทุนทรัพย์ (ทุนงบประมาณ), ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ และทุนมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ในขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท