

การศึกษาแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน
ของสัญญาณดาวเทียม

STUDY ON PREDICTION MODEL OF TROPOSPHERIC SCINTILLATION
ON SATELLITE LINKS

จินตนา ไกรวัลย์
JINTANA GRIWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-516-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน
ของสัญญาณดาวเทียม

STUDY ON PREDICTION MODEL OF TROPOSPHERIC SCINTILLATION
ON SATELLITE LINKS



จินตนา ไกรวัลย์

JINTANA GRIWAN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 47535
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ค. 2546

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-516-2

**STUDY ON PREDICTION MODEL OF TROPOSPHERIC SCINTILLATION
ON SATELLITE LINKS**

JINTANA GRIWAN

**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 974-324-516-2

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียม
STUDY ON PREDICTION MODEL OF TROPOSPHERIC SCINTILLATION ON SATELLITE LINKS

ชื่อนักศึกษา นางสาวจินตนา ไกรวัลย์

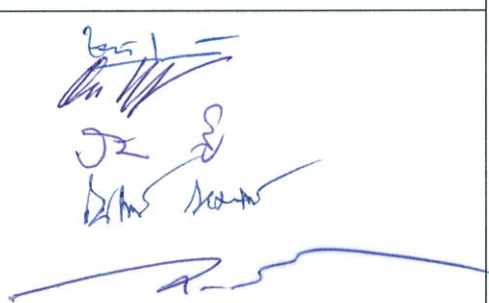
รหัสประจำตัว 43061146

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.อรลภก แสงอรุณ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	
รศ.อรลภก	แสงอรุณ	
รศ.ดร.ปิติเขต	สุรักษา	
รศ.ณรงค์	เหมกรณ์	
รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงศ์เวช	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 พฤษภาคม 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัทธู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....50.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. 2546.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับ สัญญาณอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม
นักศึกษา	นางสาวจินตนา ไกรวัลย์
รหัสประจำตัว	43061146
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กนก เจริญพงษ์เวช
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.อรลภก แสงอรุณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์แบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของสัญญาณผ่านดาวเทียมเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยทำการศึกษาแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R ซึ่งจำลองการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของสัญญาณผ่านดาวเทียมมุมเงยต่ำ จากการศึกษาแบบจำลองทั้งสองพบว่าเมื่อนำไปใช้ในการจำลองการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันจะต้องทำการปรับปรุงให้เหมาะสมกับสภาพอากาศในแต่ละพื้นที่ที่รับสัญญาณ ในบทวิจัยนี้ได้้นำแบบจำลองทั้งสองมาจำลองการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันสำหรับสัญญาณผ่านดาวเทียมที่มุมเงยสูง โดยรับสัญญาณจากดาวเทียมไทยคม 2 ย่านความถี่ Ku (12.260 GHz) ณ จุดรับสัญญาณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในประเทศไทย พบความแตกต่างระหว่างค่าความแปรปรวน σ_n^2 ที่วัดได้ จึงได้ทำการปรับปรุงโดยหาระยะเวลาเฉลี่ยที่เหมาะสมระหว่างค่าความแปรปรวน σ_n^2 ของสัญญาณที่วัดได้และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา คือ อุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจริง จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ_n^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ดีที่สุด แสดงสมการความสัมพันธ์ตามแบบจำลองของ Karasawa ได้เป็น $\sigma_n^2 = (0.003N_{wet} - 0.1313)^2$ จากผลการจำลองการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของสัญญาณผ่านดาวเทียมที่มุมเงยสูง ด้วยแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้วจะให้ค่าความแปรปรวนของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณที่วัดได้ ณ เวลาจริง

Thesis Title	Study on Prediction model of Tropospheric Scintillation on Satellite Links
Student	Miss. Jintana Griwan
Student ID	43061146
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kanok Janchitrapongvej
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Omlarp Sangaroon

ABSTRACT

This thesis presents the studies on prediction models of tropospheric scintillation on low elevation angle. The prediction scintillation models are Karasawa and ITU-R , which can be improved for different locations and circumstances. In this thesis , the investigation of average time between variance , σ_n^2 and wet part of refractivity , N_{wet} under various conditions of meteorological parameters have been carried out at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in the range of Ku-band (12.260 GHz) on high elevation angle from Thaicom 2 satellite. From studies results shows that average period of time of 30 days are best suitable for find out the relation between average time variance , σ_n^2 and wet part of refractivity , N_{wet} according to Karasawa model, the average time variance is express as $\sigma_n^2 = (0.003N_{wet} - 0.1313)^2$, the appropriation model for occurrence of scintillation has been analyzed and experimental results are carried out.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีนั้น ต้องกราบขอบพระคุณมารดาและทุกคนในครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจและโอกาสแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. กนก เจริญพงศ์เวช และ รศ. อรลภก แสงอรุณ อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำปรึกษา เอาใจใส่ และให้ความเป็นกันเองแก่ข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Yoshiaki Moriya ผู้เชี่ยวชาญจาก JICA ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในบางจุดที่ข้าพเจ้าติดปัญหาบางอย่าง ซึ่งมีส่วนช่วยให้ข้าพเจ้าเข้าใจในปัญหาเหล่านั้นยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณอมรินทร์ เทียนประยูร คุณก้องเกียรติ เอนกพงษ์พันธ์ และรุ่นน้องที่ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านที่ข้าพเจ้าร้องขอ จนงานวิจัยสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของกรมอุตุนิยมวิทยา พนักงานบริษัทแอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิสทุกท่านที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและคำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับการทำวิจัย

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการเรียนในระดับปริญญาโทและและการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

จินตนา ไกรวัลย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ผลกระทบของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การลดทอนของสัญญาณ.....	4
2.3 การลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน.....	5
2.4 การดูดกลืนสัญญาณโดยก๊าซ.....	11
2.5 การหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	13
2.6 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจาก.....	13
ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์	
2.7 สัญญาณรบกวนบนท้องฟ้า (Sky noise).....	16
2.8 สรุป.....	18
บทที่ 3 ทฤษฎีและแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....	19
เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์	
3.1 ทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจาก.....	19
ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์	
3.1.1 การแพร่กระจายคลื่นในชั้นบรรยากาศที่แปรปรวน.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การแกว่งขึ้นลงของสัญญาณ ในระยะสั้น (Short-term).....	21
3.1.3 การแจกแจงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	25
3.2 แบบจำลองทำนาย.....	26
3.2.1 แบบจำลองสำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในระยะยาว.....	26
3.2.2 แบบจำลองสำหรับการแจกแจงระดับสัญญาณ.....	29
3.3 สรุป.....	32
บทที่ 4 การทดลองและผลการวิเคราะห์.....	33
4.1 อุปกรณ์การทดลองและการทดลอง.....	33
4.1.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	33
4.1.2 เครื่องรับสัญญาณและเครื่องบันทึกสัญญาณ.....	33
4.2 ผลการวิเคราะห์.....	35
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณแบบแห้ง.....	35
4.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงระหว่างวัน.....	35
4.2.1.2 การแจกแจงค่าความแปรปรวน.....	37
4.2.1.3 การเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีในปัจจุบัน.....	40
4.2.1.4 ความสัมพันธ์ทางอุคูนิยมวิทยา.....	42
4.2.1.4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ.....	42
อย่างกะทันหันในระยะสั้น	
4.2.1.4.2 การแสดงค่าสหสัมพันธ์ในระยะยาวของ.....	45
ค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก	
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณแบบเปียก.....	53
4.2.2.1 การแยกการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....	53
และการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝน	
4.2.2.2 การแจกแจงสะสม.....	55
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 บทสรุปและวิเคราะห์.....	58
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก รายละเอียดของดาวเทียมไทยคม 2.....	63
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ความถดถอยและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	65
ภาคผนวก ค การแยกผลกระทบการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....	71
ออกจากผลกระทบการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝน	
ภาคผนวก ง โปรแกรมตัวกรองความถี่แบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์.....	74
ภาคผนวก จ บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองการลดทอนเนื่องจากฝน[2].....	8
4.1 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบการวัด.....	33
4.2 สัมประสิทธิ์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ตามระยะเวลาเฉลี่ยต่างๆ.....	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพแสดงผลกระทบของการแพร่กระจายระหว่างดาวเทียมและพื้นโลก[1].....	4
2.2 ภาพแสดงการดูดกลืนของสัญญาณ.....	5
2.3 ภาพแสดงการกระจายตัวของสัญญาณ.....	5
2.4 การลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน.....	6
2.5 กราฟแสดงการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน.....	8
2.6 ภาพแสดงเส้นทางการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน.....	9
2.7 โครงสร้างของพายุฝน.....	10
2.8 การเรียงตัวของโมเลกุลเชิงขั้วตามสนามไฟฟ้าประยุกต์.....	11
2.9 กราฟแสดงการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากไอน้ำและออกซิเจน.....	12
2.10 กราฟแสดงการลดทอนของสัญญาณในสภาวะอากาศแห้งและไอน้ำ.....	12
2.11 การโค้งงอของรังสีเนื่องจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	13
2.12 สัญญาณที่วัดได้ที่ความถี่ 12.5, 20 และ 30 GHz ในขณะเกิดการเปลี่ยนแปลง.....	14
ระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน (a) สัญญาณที่วัดได้จริง (b) สัญญาณผ่านตัวกรองผ่านสูง	
2.13 กราฟแสดงความเข้มการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....	15
2.14 กราฟแสดงสเปกตรัมกำลังของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....	15
เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์	
2.15 ภาพแสดงแหล่งสัญญาณรบกวนบนท้องฟ้า.....	17
2.16 ภาพแสดงนิยามสำหรับการคำนวณสัญญาณรบกวนในระบบ.....	17
3.1 ภาพแสดงการจำลองชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนของ Komolgorov.....	19
3.2 กราฟแสดงการแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็นของระดับสัญญาณ y	24
(หน่วยเดซิเบล) สำหรับพารามิเตอร์ $\xi=0.05$ (ยอดที่แหลมที่สุด) 0.1, 0.15, ..., 0.4 (การลาดที่ใหญ่ที่สุด)	
3.3 กราฟแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับสัญญาณในหน่วยเดซิเบล σ_y	24
และค่าพารามิเตอร์ ξ	
3.4 กราฟแสดงความน่าจะเป็นสะสมของสัญญาณเฟดและสัญญาณเอนฮานสมেন্ট.....	30
แบบนอร์แมลไลซ์ของ Karasawa	
3.5 กราฟแสดงการแจกแจงสะสมสำหรับสัญญาณเฟดและสัญญาณเอนฮานสมেন্ট.....	31
แบบนอร์แมลไลซ์ซึ่งคำนวณจากการแจกแจงในสมการ (3.11)	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด.....	34
4.2 เครื่องรับและบันทึกสัญญาณ.....	34
4.3 ระบบการวัดและบันทึกสัญญาณ.....	34
4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวน σ^2 ในระหว่างวัน.....	36
4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวน σ^2 ในระหว่างวัน โดยแบ่งเป็นช่วงเวลา.....	36
4.6 ตัวอย่างการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติล็อกของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้.....	37
4.7 ตัวอย่างการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเกมมาของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้.....	38
4.8 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $\log(\sigma^2)$	39
4.9 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า σ	39
4.10 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง $m\sigma^2$ และค่าความแปรปรวน ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ^2	40
4.11 การแจกแจงสะสมของเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่วัดได้.....	41
ของเดือนมกราคม 2546 เปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R	
4.12 เปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....	42
ที่วัดได้กับแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R	
4.13 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงของระยะเวลา 1 ปี.....	43
4.14 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจริงของระยะเวลา 1 ปี.....	43
4.15 ค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียกที่คำนวณได้.....	44
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อกความแปรปรวน ($\log \sigma^2$).....	44
ของการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันและอุณหภูมิในแต่ละชั่วโมง	
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อกความแปรปรวน ($\log \sigma^2$).....	45
ของการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันและค่าดัชนีการหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ในแต่ละชั่วโมง	
4.18 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2	46
และค่าดัชนีการหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ระยะเวลาเฉลี่ย 7 วัน	
4.19 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2	46
และค่าดัชนีการหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ระยะเวลาเฉลี่ย 15 วัน	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าความแปรปรวน σ^247 และค่าดัชนีการหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน	
4.21 เปรียบเทียบสมการการจำลองค่าความแปรปรวน σ^2 ระหว่างแบบจำลอง.....47 ของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการออกแบบจำลองที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน	
4.22 เปรียบเทียบระหว่างค่าความแปรปรวนในระยะยาว σ_{lt}^2 ที่จำลองได้และแบบจำลอง.....49 ของ Karasawa และ ITU-R	
4.23 การแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....49 เดือนมกราคม พ.ศ. 2546 ที่วัดได้เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลอง	
4.24 การแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....50 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 ที่วัดได้เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลอง	
4.25 การแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....51 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2545 ที่วัดได้เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลอง	
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้และอุณหภูมิ.....52 ของระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน	
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้และความชื้นสัมพัทธ์.....52 ของระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน	
4.28 การแยกผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝนจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ.....54 อย่างกะทันหันของข้อมูลวันที่ 24 เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2545 (ก) แสดงตัวอย่างอินพุตจากสัญญาณดาวเทียมขณะฝนตกและเกิดผลกระทบทั้งสอง (ข) แสดงผลการกรองการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากสัญญาณ อินพุตโดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านสูงแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ของ อัลกอริทึม QLMP (ค) แสดงผลการกรองการลดทอนเนื่องจากน้ำฝนโดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านต่ำ แบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ของอัลกอริทึม QLMP	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 การแยกผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝนออกจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ.....55 อย่างกะทันหันของข้อมูลวันที่ 4 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2545 (ก) แสดงตัวอย่างอินพุตจากสัญญาณดาวเทียมขณะฝนตกและเกิดผลกระทบทั้งสอง (ข) แสดงผลการกรองการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากสัญญาณ อินพุตโดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านสูงแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ของ อัลกอริทึม QLMP (ค) แสดงผลการกรองการลดทอนเนื่องจากน้ำฝน โดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านต่ำ แบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ของอัลกอริทึม QLMP	55
4.30 การแจกแจงสะสมของค่าความแปรปรวน σ^2 ขณะเกิดฝนและปราศจากฝน.....56	56
4.31 การแจกแจงสะสมของระดับสัญญาณขณะเกิดฝนและปราศจากฝน.....56	56
4.32 เปรียบเทียบค่าความแปรปรวน σ^2 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน.....57 แบบแห้งและแบบเปียกที่วัดได้ และแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R โดยใช้สมการ (3.20) และสมการ (3.23) ตามลำดับ	57
ก.1 ดาวเทียมไทยคม 2.....63	63
ก.2 พื้นที่ให้บริการของดาวเทียมไทยคม 2 (ก) ย่านความถี่ C (ข) ย่านความถี่ Ku.....64	64
ค.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Adaptive IIR digital filter.....71	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ความต้องการใช้บริการด้านสื่อสารผ่านดาวเทียมเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยการเติบโตอย่างรวดเร็วของเครือข่ายโทรคมนาคมขนาดเล็กที่มีการเปิดให้บริการด้านมัลติมีเดีย (Multimedia) ต่าง ๆ ช่องสัญญาณที่มีอยู่เดิมในย่านความถี่ต่ำ คือ ย่าน C (6/4 GHz) ไม่เพียงพอต่อความต้องการในการใช้งาน จึงได้มีการขยายย่านความถี่สูงขึ้นไปเป็นย่าน Ku (14/12 GHz) เมื่อความถี่สูงขึ้นผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่นในชั้นบรรยากาศจึงเพิ่มมากขึ้นด้วย ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การส่งสัญญาณผ่านดาวเทียมย่าน Ku และย่านความถี่ที่สูงกว่า ประกอบด้วย การลดทอนเนื่องจากเมฆและฝน (Rain Attenuation) การดูดกลืนโดยก๊าซ (Gaseous absorption) และการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่เรียกว่า ชินทิลเลชัน (Scintillation) เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) ในหลาย ๆ ประเทศได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบเหล่านี้และมีการนำเสนอแบบจำลอง เช่น แบบจำลองของ Karasawa และแบบจำลองของ ITU-R (International Telecommunications Union-Radio) ได้นำเสนอแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยอาศัยค่าตัวแปรทางด้านอุตุนิยมวิทยาเป็นเครื่องมือในการพัฒนาแบบจำลองและเปรียบเทียบกับข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการเฝ้าสังเกต สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาวิจัยเรื่องแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และประกอบกับประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน มีอากาศแปรปรวนตลอดปี โอกาสในการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันมีมาก จึงเป็นปัญหาที่สำคัญในการศึกษาแบบจำลองหลาย ๆ แบบที่นิยมใช้เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาแบบจำลองแบบใหม่ที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของสัญญาณผ่านดาวเทียมเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในย่าน Ku ณ ตำแหน่งมุมเงยสูง ในเขตร้อน วิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบ และ

เพื่อศึกษาแบบจำลองการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของสัญญาณผ่านดาวเทียมเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ณ ตำแหน่งมุมเงยต่ำของแบบจำลอง Karasawa และ ITU-R เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่าง

กะทันหันที่เหมาะสมกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันในสัญญาณผ่านดาวเทียม ณ ตำแหน่งมุมเงยสูง และสภาพภูมิอากาศเขตร้อน ต่อไป

1.3 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา คือ อุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ในการปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลอง ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลองมาใช้งานจึงจำเป็นต้องปรับปรุงค่าตัวแปร เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน (Variance) ของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันและค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก (Wet term of refractivity, N_{wet}) ซึ่งค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียกนี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยการศึกษาจากค่าสหสัมพันธ์ระยะเวลาเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสอง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ จะทำให้ทราบถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน และสามารถจำลองลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันได้อย่างเหมาะสม

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้บริเวณเขตเส้นศูนย์สูตรซึ่งเป็นเขตอากาศร้อน ในฤดูฝนบางครั้งจะเกิดฝนตกหนักติดต่อกันเป็นเวลานาน ลักษณะอากาศเช่นนี้ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของสัญญาณผ่านดาวเทียมอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันสามารถเกิดในเวลาเดียวกับผลกระทบการลดทอนเนื่องจากฝน ดังนั้นในการวิเคราะห์จำเป็นต้องแยกผลกระทบทั้งสองออกจากกันก่อน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแคปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ในการแยกผลกระทบทั้งสองออกจากกัน

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ย่านความถี่ Ku ความถี่ 12.260 GHz ซึ่งรับสัญญาณจากดาวเทียมไทยคม 2 ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น การแจกแจงความน่าจะเป็น การแจกแจงสะสม ค่าสหสัมพันธ์ ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น รวมถึงวิธีการแยกผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝน เพื่อใช้ในการศึกษาแบบจำลอง ทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ของ Karasawa และ ITU-R [16] เนื่องจากทั้งสองแบบจำลองได้นำข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยามาใช้

ร่วมในการออกแบบจำลองทำให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงได้ แบบจำลองที่ได้จากการวิจัยจึงมีความเหมาะสมกับลักษณะของสัญญาณผ่านควาเทียมที่เกิดขึ้นจริง

บทที่ 2 กล่าวถึงผลกระทบของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ประกอบด้วย การลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน การดูดกลืนของสัญญาณโดยก๊าซ การหักเหในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และสัญญาณรบกวนต่าง ๆ บนท้องฟ้า

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีและแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยศึกษาฟังก์ชันการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ การแจกแจงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแบบจำลองทำนาย

บทที่ 4 กล่าวถึง วิธีการทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์

บทที่ 5 บทสรุปกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัยและข้อเสนอแนะต่าง ๆ สำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไป

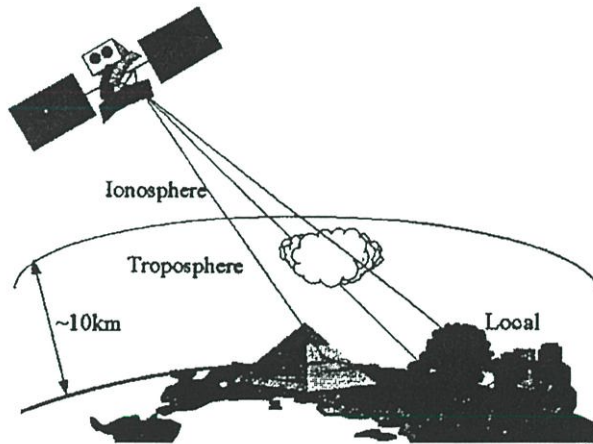
ในส่วนภาคผนวก ก แสดงรายละเอียดและส่วนประกอบต่าง ๆ ของควาเทียมไทยคม 2 ภาคผนวก ข กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์ ภาคผนวก ค กล่าวถึงวิธีการแยกผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ออกจากการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝนโดยใช้ตัวกรองความถี่จิตอลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ อัลกอริทึมแบบ Quantized Least Mean p -Power (QLMP) ภาคผนวก ง ตัวอย่างโปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับแยกผลกระทบการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ออกจากการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำออกจากกัน

บทที่ 2

ผลกระทบของบรรยากาศชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

2.1 บทนำ

การสื่อสารด้วยดาวเทียมค้างฟ้า (Geostationary satellite : GEO) นั้น ดาวเทียมจะโคจรเหนือพื้นโลก 36,000 กิโลเมตรด้วยมุมและความเร็วตามการหมุนของโลก ดังนั้นสายอากาศจึงถูกยึดติดคงที่หรืออาจจะปรับได้เพียงเล็กน้อยเพื่อให้เกิดความถูกต้องของทิศทางระหว่างดาวเทียมและสถานีภาคพื้นดิน การสูญเสียในอวกาศว่าง (Free space loss) เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากอวกาศสู่พื้นดินประกอบด้วย ผลกระทบเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric effect) ผลกระทบเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric effect) และ สถานีที่ตั้ง (Local) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับในบทนี้จะกล่าวเฉพาะผลกระทบเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์



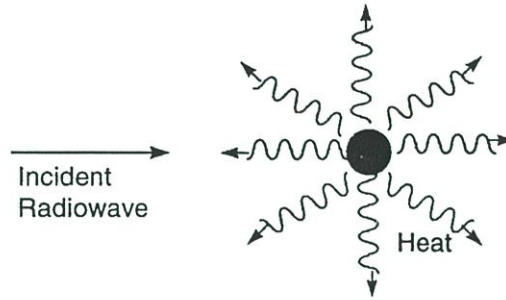
รูปที่ 2.1 ภาพแสดงผลกระทบของการแพร่กระจายระหว่างดาวเทียมและพื้นโลก[1]

2.2 การลดทอนของสัญญาณ

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ของอนุภาคซึ่งมีขนาดและขอบเขตกว้างขวางเริ่มตั้งแต่โมเลกุลของก๊าซในชั้นบรรยากาศจนถึงขนาดเม็ดฝนและลูกเห็บ เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านตัวกลางเหล่านี้จะเกิดอนุต่าง ๆ มากมาย เป็นผลทำให้สัญญาณถูกดูดกลืน (Absorption) และ การกระจัดกระจาย (Scatter) ดังนั้นการสูญเสียรวม (Total loss) ของสัญญาณคลื่นวิทยุในหน่วยเดซิเบล (Decibel) จึงเท่ากับ

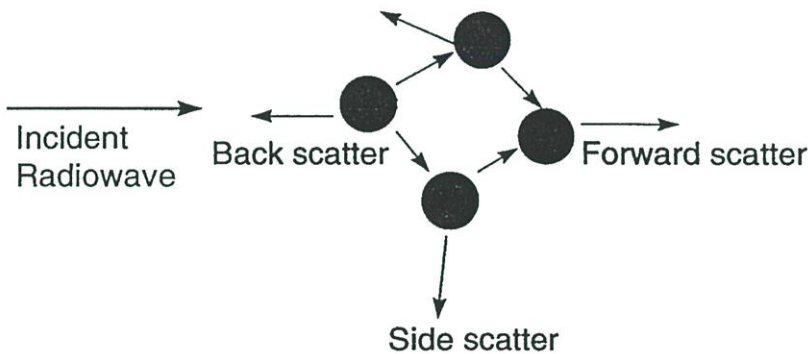
$$L_{\text{total}} = L_{\text{ab}} + L_{\text{sc}} \quad (2.1)$$

การดูดกลืนของสัญญาณเกิดจากพลังงานถูกเปลี่ยนมาเป็นพลังงานความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงการดูดกลืนของสัญญาณ

การกระจายของสัญญาณ เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของคลื่นไปในทิศทางต่าง ๆ ซึ่งจะเหลือพลังงานเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกส่งไปยังเครื่องรับแสดงดังรูปที่ 2.3 การกระจายของสัญญาณขึ้นอยู่กับความถี่ หากสัญญาณมีความยาวคลื่นยาวกว่าขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้น การกระจายของสัญญาณจะเกิดน้อยลง

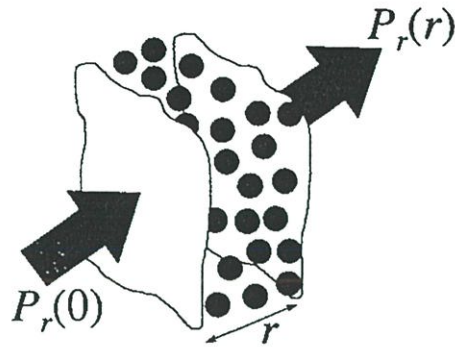


รูปที่ 2.3 ภาพแสดงการกระจายของสัญญาณ

การกระจายของสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบดาวเทียมเกิดจาก เม็ดฝน หมอก และเมฆ และทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณที่ความถี่สูงกว่า 10 GHz ส่วนการดูดกลืนของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ด้วยอย่างช้า ๆ

2.3 การลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน

การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝน จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของฝน ขนาดของเม็ดฝน และความยาวขณะเคลื่อนที่ผ่านฝน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน

ถ้าความหนาแน่นและรูปร่างของเม็ดฝนคงที่ พบว่ากำลังงานที่รับได้ P_r ในสายอากาศ มี การลดลงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) ตามระยะทาง r ที่เคลื่อนที่ผ่านฝน

$$P_r(r) = P_r(0) \exp(-\alpha r) \quad (2.2)$$

เมื่อ α เป็นส่วนลดเลขระยะทางที่ต้องการสำหรับกำลังงานที่ลดลงด้วยค่าแฟกเตอร์ e^{-1} ดังนั้น สมการแสดงการสูญเสียการแพร่กระจายในหน่วยเดซิเบล คือ

$$L = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 4.343 \alpha r \quad (2.3)$$

เมื่อนำสมการ (2.3) มาใช้ในการคำนวณการสูญเสียรวม ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อเมตร สามารถแสดงได้เป็น

$$\gamma = \frac{L}{r} = 4.343 \alpha \quad (2.4)$$

ค่าของ α หาได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \int_{D=0}^{\infty} N(D) \times C(D) dD \quad (2.5)$$

เมื่อ $N(D)$ คือ การกระจายของเม็ดฝน และ $C(D)$ คือ ภาคตัดขวาง (Cross-section) การลดทอนของเม็ดฝน [dB m^{-1}] ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่

สมการ (2.5) นี้ ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าการลดทอนของสัญญาณสำหรับเส้นทางที่มีการกระจายขนาดของเม็ดฝน $N(D)$ ไม่คงที่ โดยกำหนดค่าการลดทอนของสัญญาณลงบนจุดของเส้นทาง $\gamma(r)$ และทำการอินทิเกรต (Integrate) ตลอดความยาวเส้นทางทั้งหมด r_T โดยสามารถหาการสูญเสียเส้นทางรวม (Total path loss) ได้เป็น

$$L = \int_0^{r_T} \gamma(r) dr \quad (2.6)$$

วิธีการแก้ปัญหสมการ (2.6) คือ ระบุการกระจายขนาดของเม็ดฝน และทำการอินทิเกรต ผลลัพธ์ที่ได้ พบว่าเม็ดฝนที่มีขนาดใหญ่จะเกิดการสูญเสียของสัญญาณน้อยกว่าเม็ดฝนที่มีขนาดเล็ก และการกระจายที่ใช้ในการหาค่าเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเช่นกัน คือ

$$N(D) = N_0 \exp\left(\frac{-D}{D_m}\right) \quad (2.7)$$

เมื่อ N_0 และ D_m เป็นค่าพารามิเตอร์ ค่า D_m ขึ้นอยู่กับ R ซึ่งเป็นค่าอัตราปริมาณน้ำฝนที่วัดบนพื้นดินในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยค่าที่ใช้เป็น

$$\begin{aligned} N_0 &= 8 \times 10^3 \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \\ D_m &= 0.122R^{0.21} \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ภาคตัดขวางของการลดทอน $C(D)$ สามารถวิเคราะห์ตามทฤษฎีการลดทอนสัญญาณได้ เนื่องจากเม็ดฝนมีรูปร่างเป็นทรงกลมสามารถอธิบายด้วยคลื่นระนาบ (Plane wave) ได้ ที่ความถี่ต่ำ เม็ดฝนจะมีค่าเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ดังนั้นการลดทอนของสัญญาณส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนของเม็ดฝน ในกรณีนี้ภาคตัดขวางจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ตรงกับการประมาณแบบเรเลย์ (Rayleigh approximation) คือ

$$C(D) \propto \frac{D^3}{\lambda} \quad (2.9)$$

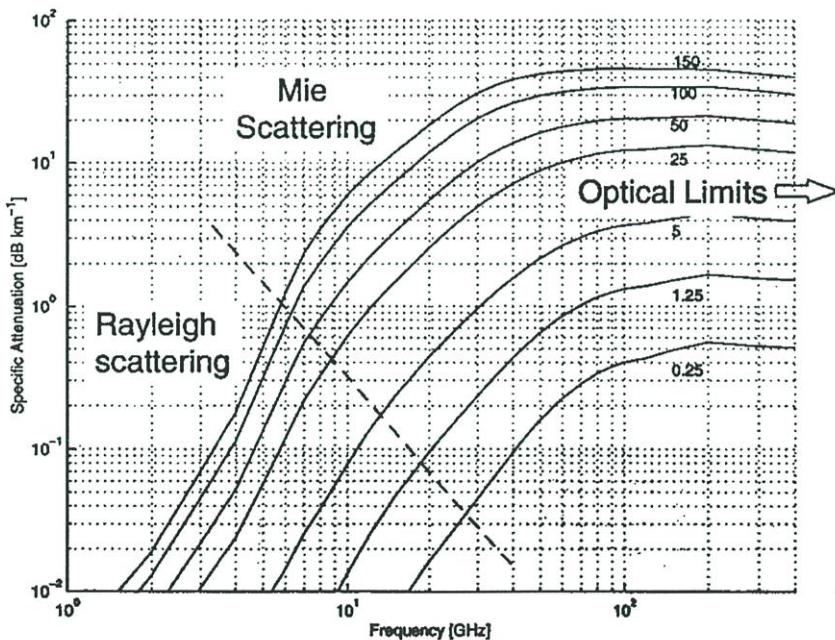
สำหรับที่ความถี่สูง การลดทอนของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ไปจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ขีดจำกัดทางแสง (Optical limit) การลดทอนของสัญญาณส่วนใหญ่เกิดจากการกระจัดกระจายของสัญญาณ โดยทั่วไป ภาคตัดขวางจะคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีการกระจัดกระจาย

ของ Mie (Mie scattering theory) และเมื่อนำไปใช้งานจะต้องทำการปรับปรุงให้เหมาะสมกับแต่ละสถานที่ เพราะหากความยาวคลื่นมีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดฝนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Resonance) ขึ้นได้

ในสมการ (2.5) สามารถทำการแก้ไขได้โดยตรง และใช้สมการ (2.6) ในการประมาณค่าการลดทอนรวมของสัญญาณ และจุดหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการเฝ้าสังเกต คือ สมมติ γ ขึ้นอยู่กับค่าของ R ซึ่งเป็นอัตราการตกของฝนที่วัดได้บนพื้นดินมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อชั่วโมง สามารถแสดงได้เป็น

$$\gamma = a R^b \quad (2.10)$$

เมื่อ a และ b ขึ้นอยู่กับความถี่และอุณหภูมิฝนเฉลี่ย และ γ มีหน่วยเป็น dB km^{-1} ตารางที่ 2.1 แสดงค่า a และ b ที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิ 20 องศา [2] สำหรับโพลาไรเซชันทางแนวราบ (Horizontal Polarization) รูปที่ 2.5 แสดงเส้นโค้งของ α เปรียบเทียบกับความถี่ f

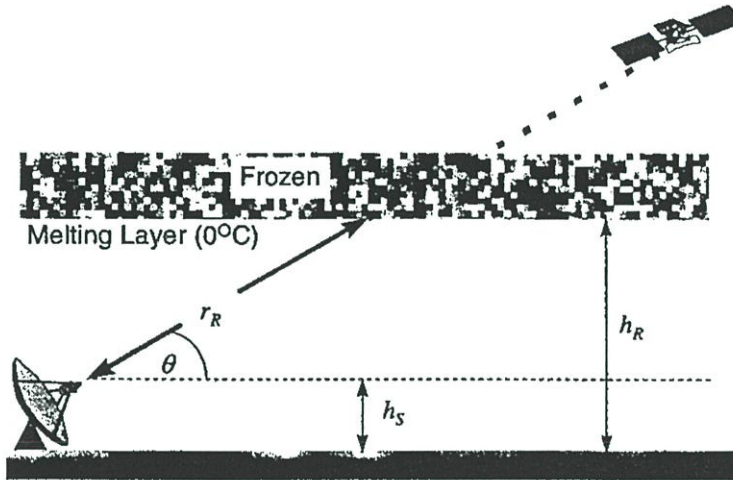


รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน [2]

f [GHz]	a	b
1	0.0000387	0.912
10	0.0101	1.276
20	0.0751	1.099
30	0.187	1.021
40	0.350	0.939

ความยาวเส้นทาง r_R ในสมการ (2.10) เป็นค่าความยาวเส้นทางที่ยกขึ้นเนื่องจากฝน (Rainy slant path length) ซึ่งใช้สำหรับหาค่าการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน ดังแสดงรูปที่ 2.6 โดยความสูงทั้งหมดวัดจากค่าเฉลี่ยของระดับน้ำทะเล



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงเส้นทางการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน

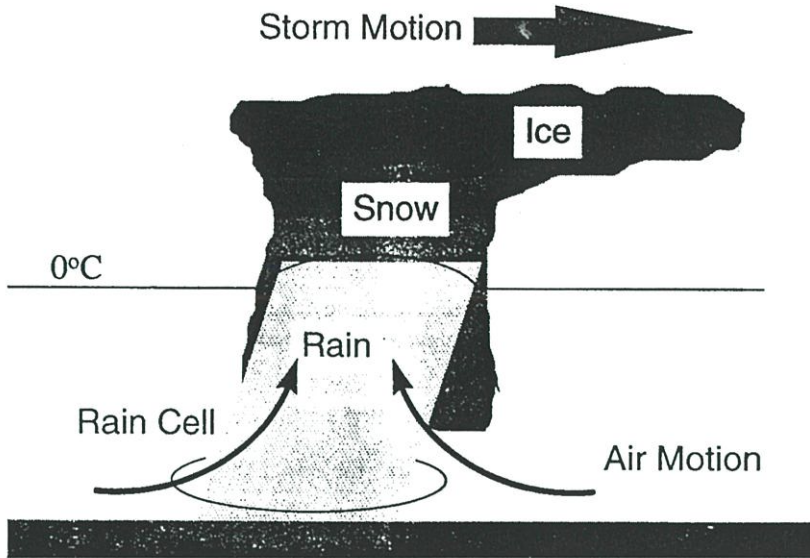
เมื่อ h_R คือ ความสูงของฝน ปกติมีค่าเท่ากับ ความสูงของชั้นที่มีการสลายตัว (Melting) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ค่าความยาวเส้นทางจากฝน (Rainy path length) สามารถคำนวณได้จาก (สำหรับ $\theta > 5$ องศา)

$$r_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \quad (2.11)$$

ที่มุมเงย (Elevation angle, θ) น้อยกว่า 90 องศา จำเป็นต้องกำหนดการเปลี่ยนแปลงของฝนเป็นทิศทางแนวราบ ทำให้สามารถลดจำนวนการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเนื่องจากการจำกัดขนาดของเซลล์ฝน (Rain cell) ได้ โดยเกิดขึ้นตามโครงสร้างของเมฆและฝนในแต่ละพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการลดความยาวเส้นทาง และเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$L = \alpha s r_R = a R^b s r_R \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของพายุฝน

โดยฝนสามารถเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาต่าง ๆ คือ

- (ก) ฤดูกาล อัตราการตกของฝนจะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูฝน และบางเดือนในฤดูร้อน
- (ข) ประจำปี ค่าอัตราการตกของฝนที่ได้ในรอบปีอาจจะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละปี
- (ค) ระหว่างวัน อาจจะมีฝนตกในตอนบ่ายอย่างรวดเร็วเนื่องจากโลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์และความร้อนนี้จะทำให้เกิดกระแสความร้อน ซึ่งทำให้เกิดพายุและฝนฟ้าคะนอง

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นข้างบนสามารถใช้สมการ (2.12) ในการทำนายค่าการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝนได้ไม่เกิน 0.01% ของช่วงเวลา $L_{0.01}$ ในเทอมของ $R_{0.01}$ สำหรับอัตราการตกของฝนที่เกิน 0.01% ของระยะเวลาเฉลี่ย 1 ปี ค่าการลดทอนสามารถแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์เวลา P คือ

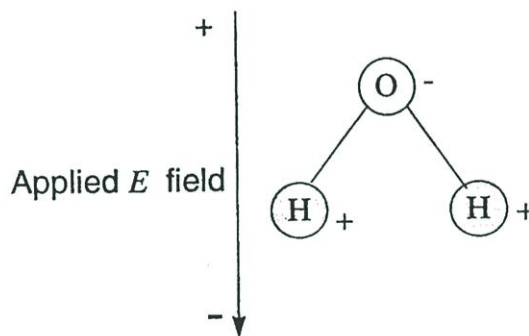
$$L_P = L_{0.01} \times 0.12 P^{-(0.546+0.043 \log P)} \quad (2.13)$$

เมื่อ P อยู่ระหว่าง 0.001% และ 1%

อัตราการตกของฝนที่อ้างอิง $R_{0.01}$ จะขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่ เช่น ยุโรปมีค่าประมาณ 30 mmh^{-1} ยกเว้นบางส่วนของภูมิภาคเมดิเตอร์เรเนียน (Mediterranean) อาจสูงถึง 50 mmh^{-1} ส่วนในเขตศูนย์สูตรมีค่าสูงประมาณ 160 mmh^{-1}

2.4 การดูดกลืนสัญญาณโดยก๊าซ

โมเลกุลของก๊าซที่พบในชั้นบรรยากาศ อาจจะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นวิทยุที่เคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลเหล่านั้นได้ซึ่งเป็นสาเหตุของการลดทอนของสัญญาณ การลดทอนนี้เกิดขึ้นมากสำหรับโมเลกุลเชิงขั้ว (Polar) เช่น น้ำ (H_2O) ประจุด้านตรงข้ามของโมเลกุลเกิดการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าประยุกต์ (รูปที่ 2.8) ทำให้สนามไฟฟ้าในคลื่นวิทยุเกิดการเปลี่ยนทิศทาง 2 ครั้งต่อ 1 รอบ การเปลี่ยนแนวของโมเลกุลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งอาจก่อให้เกิดการสูญเสียขึ้นได้ ที่ความถี่สูง การเรียงตัวของโมเลกุลจะเกิดเร็วกว่าความถี่ต่ำ ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนของสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับความถี่



รูปที่ 2.8 การเรียงตัวของโมเลกุลเชิงขั้วตามสนามไฟฟ้าประยุกต์

สำหรับโมเลกุลที่ไม่เป็นเชิงขั้ว เช่น ออกซิเจน (O_2) อาจจะดูดกลืนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเช่นกันเนื่องจากการคงอยู่ของสนามแม่เหล็กชั่วขณะ การดูดกลืนของโมเลกุลมักส่งผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณขึ้นอยู่กับความถี่ และส่งผลกระทบต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ต่าง ๆ

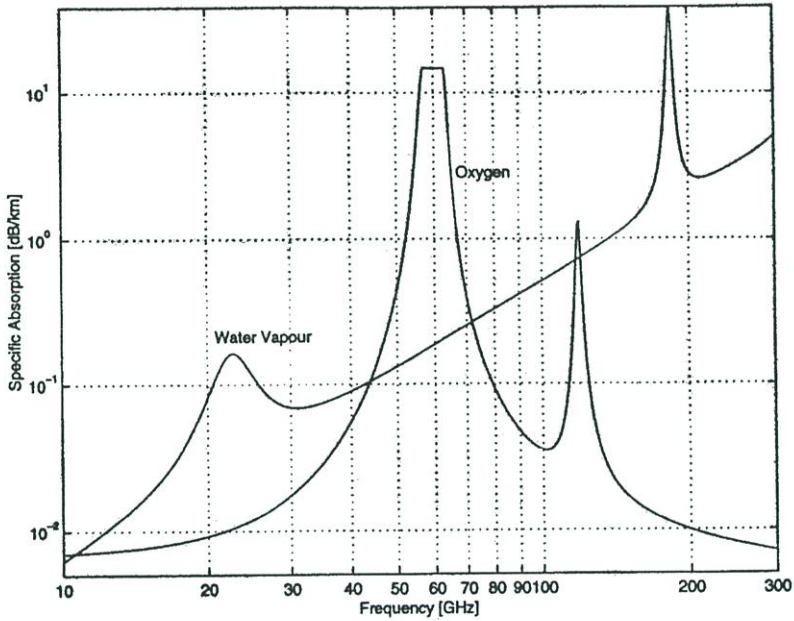
ชั้นบรรยากาศในสภาวะปกติ ออกซิเจนและน้ำเท่านั้นที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดกลืนสัญญาณ แม้ว่าในชั้นบรรยากาศจะมีก๊าซชนิดอื่น ๆ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณลงได้ โดยค่าความถี่เรโซแนนซ์ของออกซิเจนที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ความถี่ 60 GHz จะส่งผลกระทบต่อ การลดทอนของสัญญาณ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันผลกระทบนี้จึงจัดไม่ให้มีการใช้งานการสื่อสารดาวเทียมในช่วงความถี่ 57 - 64 GHz รูปที่ 2.9 เป็นค่ามาตรฐานของชั้นบรรยากาศสำหรับไอน้ำ γ_w และ ออกซิเจน γ_0

การลดทอนรวมเนื่องจากชั้นบรรยากาศ L_a หาได้จาก

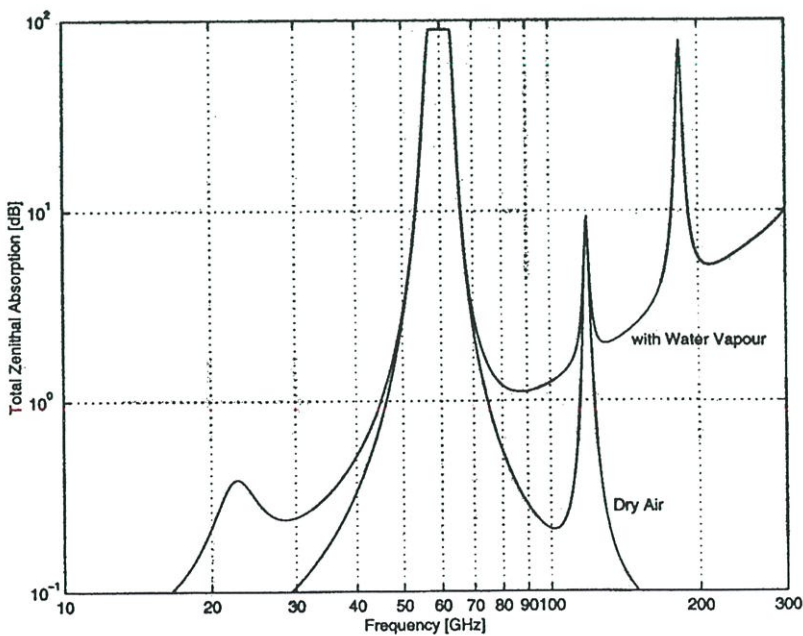
$$L_a = \int_0^{r_T} \gamma_a(l) dl = \int_0^{r_T} \{\gamma_w(l) + \gamma_0(l)\} dl \quad [\text{dB}] \quad (2.14)$$

การอินทิเกรตในสมการ (2.14) ใช้สำหรับ $\theta = 90$ องศา แสดงดังรูปที่ 2.10 สมมติให้ ความหนาแน่นของก๊าซลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล สำหรับการลดทอนของเส้นทางที่มุม $\theta > 10$ องศา สามารถหาได้จาก

$$L_a = \frac{L_z}{\sin \theta} \tag{2.15}$$



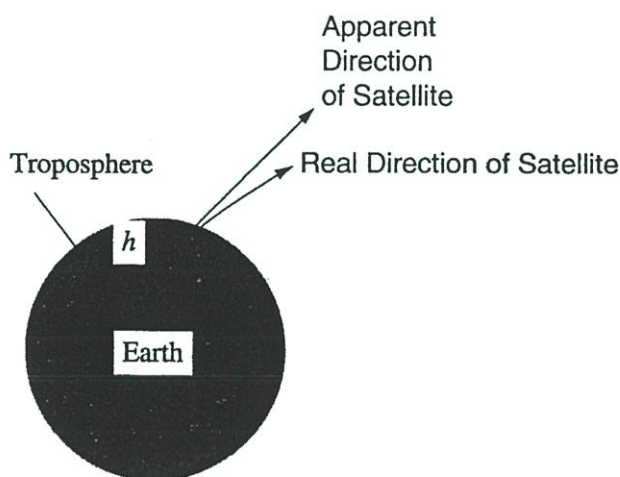
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากไอน้ำและออกซิเจน



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการลดทอนของสัญญาณในสภาวะอากาศแห้งและไอน้ำ

2.5 การหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหส่วนใหญ่จะเกิดทางแนวตั้ง ดังนั้นหากสัญญาณถูกส่งและรับด้วยมุมสูงผลกระทบนี้จะเกิดขึ้นไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีการคำนวณการโค้งงอเพื่อให้เพียงพอในการออกแบบสายอากาศ (รูปที่ 2.11)

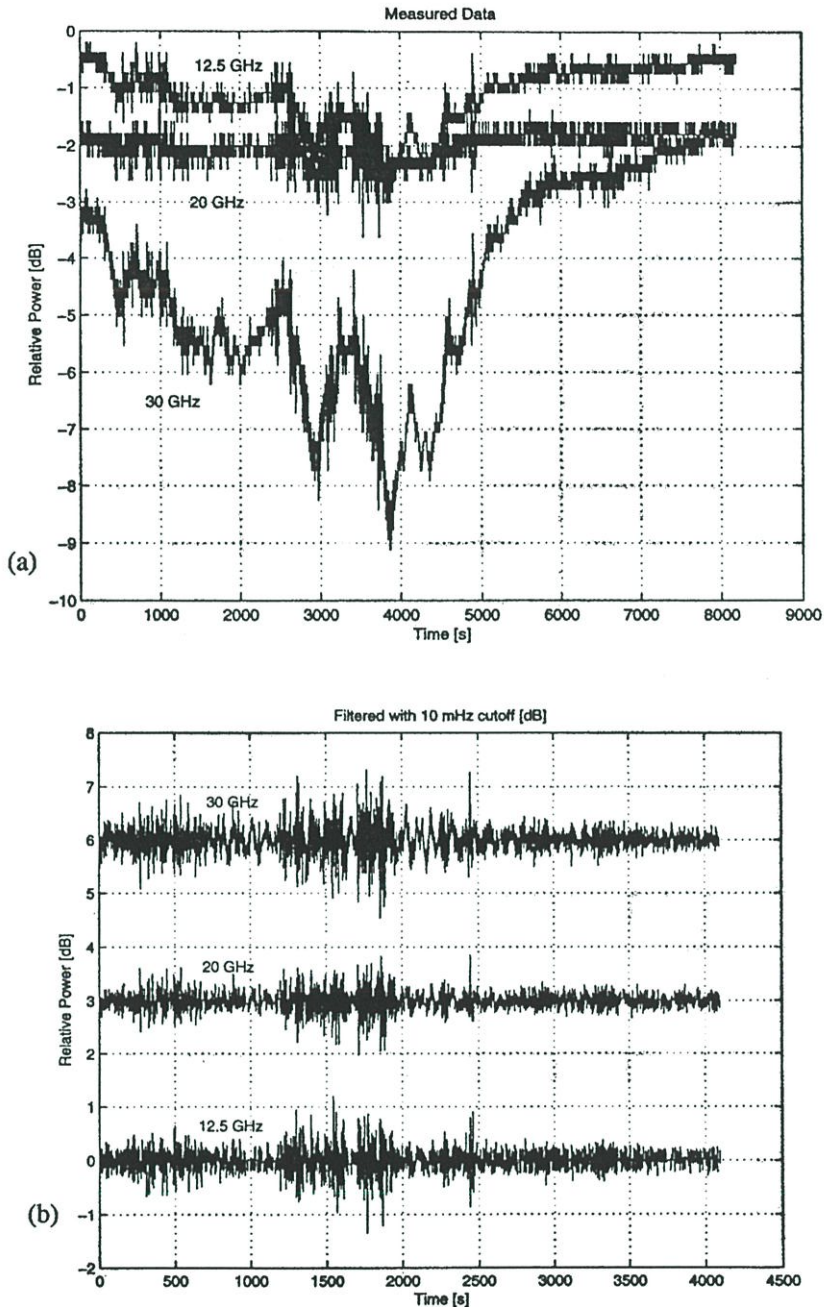


รูปที่ 2.11 การโค้งของรังสีเนื่องจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

2.6 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

เมื่อมีกระแสลมเกิดขึ้น ค่าดัชนีหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทางแนวราบอาจเกิดการรวมตัวกันเนื่องจากความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาสั้น ๆ เมื่อคลื่นเดินทางผ่านค่าดัชนีหักเหที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางขนาดและเฟสของสัญญาณ ซึ่งเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์แบบแห้ง (Dry tropospheric scintillation) ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ คือ ฝน ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันในส่วนเปียก (Wet) แต่เกิดขึ้นช้ากว่าผลกระทบจากแบบแห้ง

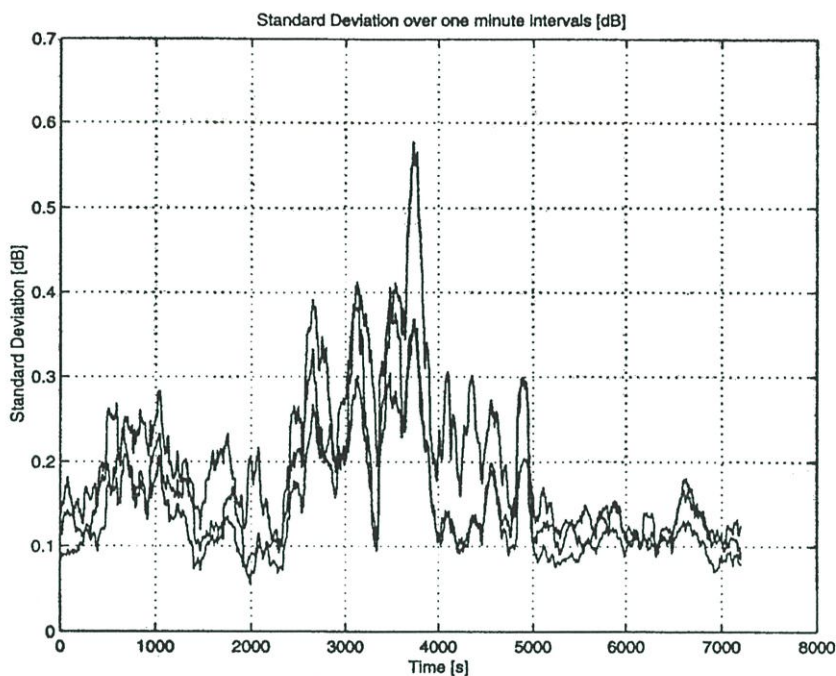
การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ไม่ใช่ผลกระทบของการดูดกลืนสัญญาณ เนื่องจากระดับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง ผลกระทบนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ถ้าความยาวคลื่นของสัญญาณสั้นกว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดมากกว่า และขนาดสามารถพิจารณาได้จากการมอนิเตอร์ (Monitoring) การเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่เส้นทางใกล้เคียงกันและค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross-correlation) ระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันบนเส้นทาง ถ้าผลกระทบที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันขนาดของการเปลี่ยนแปลงจะมีขนาดใหญ่ขึ้น



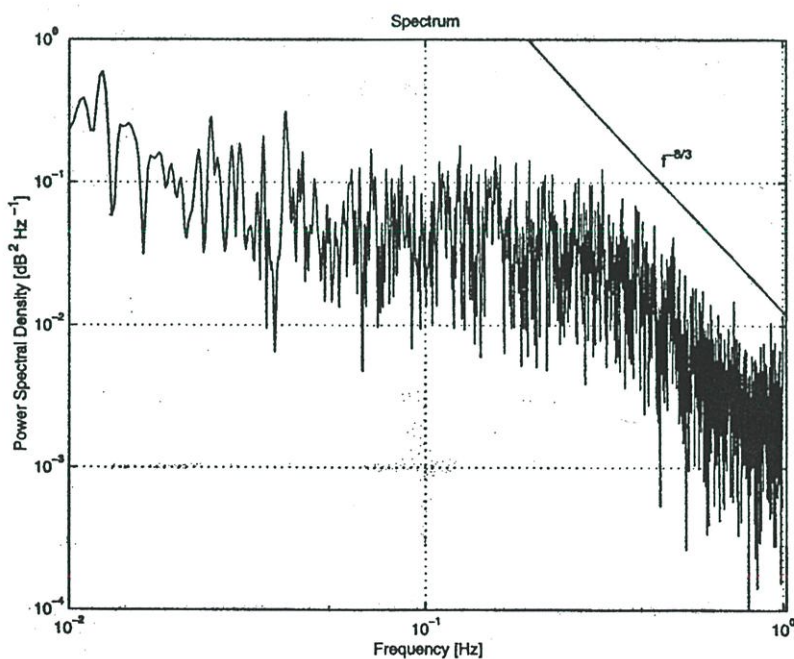
รูปที่ 2.12 สัญญาณที่วัดได้ที่ความถี่ 12.5, 20 และ 30 GHz ในขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน (a) สัญญาณที่วัดได้จริง (b) สัญญาณผ่านตัวกรองผ่านสูง

รูปที่ 2.12 (a) แสดงตัวอย่างสัญญาณ 3 ความถี่ที่วัดได้ในเวลาเดียวกัน ขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน จะเห็นว่าการดูดกลืนของสัญญาณเกิดขึ้นแต่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ สำหรับการแยกการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจาก การดูดกลืนนั้นข้อมูลจะถูกกรองด้วยวงจรกรองผ่านสูง (High pass filter) ที่มีความถี่ตัด (Cut-off frequency) ที่อยู่ประมาณ 0.01 Hz โดยผลจะแสดงในรูปที่ 2.12 (b) ขนาดของการเปลี่ยนแปลง

ระดับสัญญาณอย่างกะทันหันจะถูกวัดด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) หรือ เรียกว่า ความเข้ม (หน่วยเดซิเบล) โดยวัดทุกๆ 1 นาที แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความเข้มการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงสเปกตรัมกำลังของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน
เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

โดยทั่วไป การแจกแจงของการแกว่งขึ้นลงจะประมาณเป็นการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) และมวลอากาศในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะนำไปสู่การกำหนดค่าโรลloff (Roll-off) ของสเปกตรัมซึ่งมีอัตราการลดลงเป็น $f^{-8/3}$ ที่ความถี่มากกว่า 0.3 Hz แสดงดังรูปที่ 2.14 โดยความเข้มของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน σ_{pre} สามารถทำนายได้จากแบบจำลอง ITU-R [2] คือ

$$\sigma_{\text{pre}} = \frac{\sigma_{\text{ref}} f^{7/12} g(D)}{\sin \theta^{1.2}} \quad [\text{dB}] \quad (2.16)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ หน่วย GHz

θ คือ มุมเงย

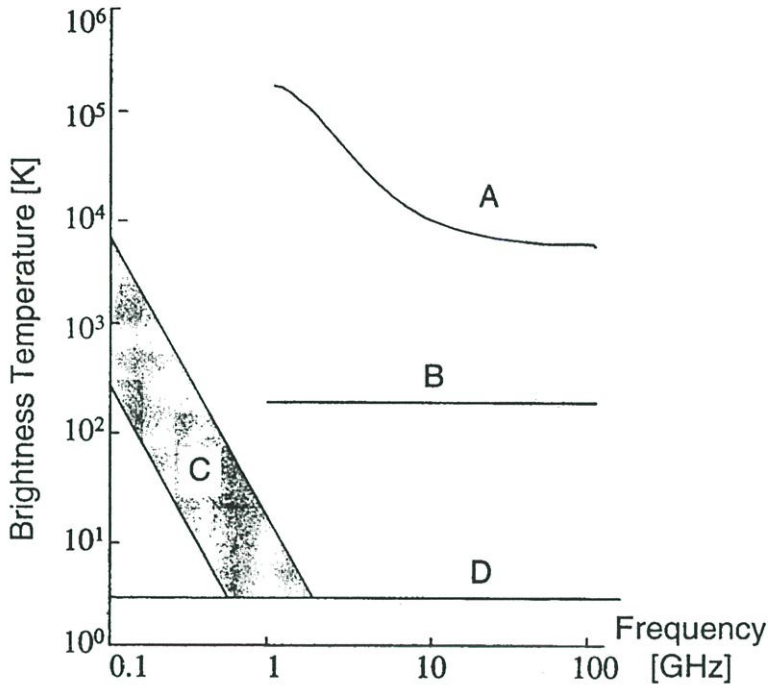
σ_{pre} ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความกดอากาศ

$g(D)$ ขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันตัดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ

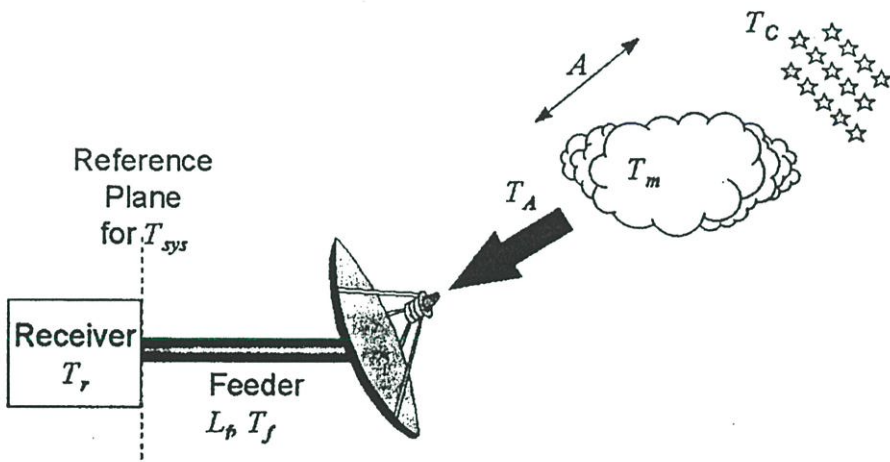
2.7 สัญญาณรบกวนจากฟ้า (Sky noise)

สายอากาศซึ่งชี้ไปยังตำแหน่งดาวเทียมบนท้องฟ้า จะได้รับสัญญาณรบกวนจากแหล่งต่าง ๆ รวมเป็นสัญญาณรบกวนภายในเครื่องรับทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องรับลดลง ผลกระทบนี้จะถูกระบุในการคำนวณอุณหภูมิสัญญาณรบกวนประสิทธิผล (Effective noise temperature) สำหรับสายอากาศ

แหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนภายนอกแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าการแผ่กระจายรังสี D ไม่ขึ้นกับความถี่และสามารถเกิดขึ้นได้ทุก ๆ แห่งเท่ากันบนท้องฟ้าที่อุณหภูมิ 2.7 องศาเคลวิน (Kelvin) อุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงตามวงรอบของจุดดับดวงอาทิตย์ (Sun spot) และความถี่ อุณหภูมิประมาณ $10^2 - 10^5$ องศาเคลวิน แต่ผลกระทบจะถูกจำกัดภายใต้มุม 0.5 องศา (เส้น A) สำหรับอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากดวงจันทร์อาจมีผลกระทบเช่นเดียวกับดวงอาทิตย์แต่อุณหภูมิสัญญาณรบกวนต่ำกว่า (เส้น B) สำหรับอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากกาแล็กซี (Galactic noise temperature) ของดาวปล่อยคลื่นวิทยุ (Radio star) กลุ่มก๊าซในอวกาศ (Nebulas) จะเปลี่ยนแปลงตัดท้องฟ้าและลดลงอย่างรวดเร็วตามความถี่ ขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงนี้แสดงอยู่ในช่วง C



รูปที่ 2.15 ภาพแสดงแหล่งสัญญาณรบกวนบนท้องฟ้า



รูปที่ 2.16 ภาพแสดงนิยามสำหรับการคำนวณสัญญาณรบกวนในระบบ

เมื่อเกิดการดูดกลืนของสัญญาณในชั้นบรรยากาศ การดูดกลืนสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิสัญญาณรบกวนประสิทธิผลและเท่ากับการดูดกลืนรวมของสัญญาณ ถ้าการดูดกลืนรวม ของสัญญาณเกิดเนื่องจากฝนและกลุ่มก๊าซ คือ A และอุณหภูมิของตัวกลางฝน คือ T_m ดังนั้น อุณหภูมิสัญญาณรบกวนรวมของสายอากาศสามารถคำนวณหาได้

$$T_A = T_m(1 - 10^{-A/10}) + T_c \times 10^{-A/10} \quad (2.17)$$

เมื่อ T_m เท่ากับ 280 องศาเซลวิน และ 260 องศาเซลวินสำหรับ เมฆ และ ฝน ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวนรวมของระบบหาได้จาก

$$T_{sys} = T_R + T_f (1 - 10^{-L_f/10}) + T_A \times 10^{-L_f/10} \quad (2.18)$$

เมื่อ T_{sys} เป็นอุณหภูมิสัญญาณรบกวนรวมของระบบ

T_R เป็นค่าสมมูลของสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ

T_f เป็นอุณหภูมิของสายเคเบิล (Feeder)

L_f เป็นการสูญเสียในสายเคเบิล

สำหรับค่า L_f ในเทอมอุณหภูมิสัญญาณรบกวนรวมของสายอากาศ T_A เป็นค่าของ T_m ซึ่งเสมือนเป็นค่าสูญเสียในสายเคเบิลตัวหนึ่ง รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.16

2.8 สรุป

การเชื่อมโยงสัญญาณผ่านดาวเทียมแบบคงที่นั้น จำเป็นต้องจัดเตรียมการติดต่อสื่อสารให้มีความน่าเชื่อถือสูง ดังนั้นเส้นทางในแนวระดับสายตา (Line-of-sight) จึงต้องมีเสถียรภาพในการรับ-ส่งสัญญาณที่ดี และสายอากาศต้องมีอัตราขยายสูง เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียที่อาจเกิดจากสิ่งกีดขวางในระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงบนพื้นโลกด้วย อย่างไรก็ตาม การลดทอนและการจางหายของสัญญาณยังคงเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นมากในการแพร่กระจายคลื่นในชั้นบรรยากาศ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดค่าในทางสถิติ เพื่อให้เกิดการยอมรับความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหายต่ำสุดครอบคลุมระยะเวลาที่ถูกวัดในปีนั้น ๆ

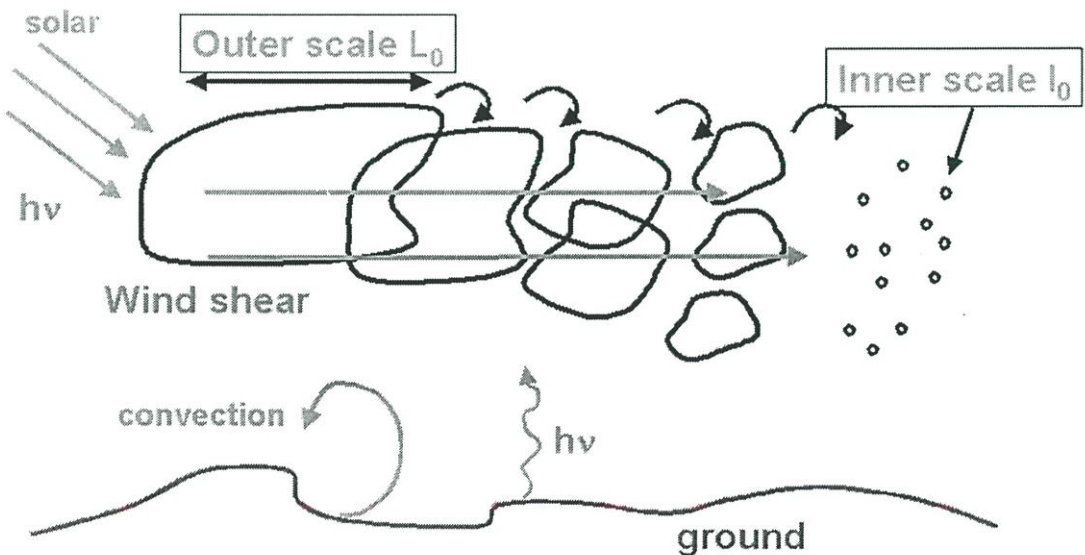
บทที่ 3

ทฤษฎีและแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ อย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

3.1 ทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศ โทรโพสเฟียร์

3.1.1 การแพร่กระจายคลื่นในชั้นบรรยากาศที่แปรปรวน (Turbulent atmosphere)

ทฤษฎีพื้นฐานการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน คือ การจำลองทางพลวัต (Dynamic) ของของไหลสำหรับความเร็วการแกว่งขึ้นลงในตัวกลางที่แปรปรวนที่มีการนำเสนอครั้งแรกโดย Kolmogorov ได้กำหนดสเกลของชั้นบรรยากาศที่แปรปรวน คือ สเกลชั้นนอก L_0 และสเกลชั้นใน l_0 ถ้าพลังงานจลน์ถูกเหนี่ยวนำเข้าไปในของไหลที่มีขนาดใหญ่เท่ากับ L_0 (Input range) ผลลัพธ์ที่ได้ คือ เกิดการไหลวนในชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนขึ้น ที่สเกลขนาดใหญ่เกิดการสูญเสียพลังงาน และพลังงานจะถูกถ่ายเทให้ไปไหลวนในสเกลขนาดเล็กถึงกลาง (Inertial-range) ท้ายสุดก็ไปถึงสเกล l_0 เนื่องจากอัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียพลังงานเท่ากัน พลังงานจะถ่ายเทกลายเป็นพลังงานความร้อน (Dissipation range) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงการจำลองชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนของ Komolgorov

สเกลชั้นใน L_0 มีขนาดเป็นมิลลิเมตร ในขณะที่สเกลชั้นนอก L_0 มีขนาดตั้งแต่ 20-30 เมตรไปจนถึงกิโลเมตร และสมมติว่าระหว่างสเกลชั้นในและชั้นนอก (Inertial subrange) มีการไหลวนเป็นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) และชั้นบรรยากาศ L_0 สมมติขนาดเป็น $h/3$ เมื่อ h เป็นความสูง [3]

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความดัน และความชื้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห โดย Tatarski ได้ประยุกต์ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ได้มาจากการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณ ซึ่งทฤษฎีนี้นำไปสู่การนำเสนอของ Von Karman คือ สเปกตรัมทางอวกาศของการแกว่งขึ้นลงของค่าดัชนีหักเห [4] ค่าคงที่ทางโครงสร้าง C_n^2 ของการแกว่งขึ้นลงของค่าดัชนีหักเห เป็นพารามิเตอร์หลักของแบบจำลองที่ได้มาจากทฤษฎีของทาทากิ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางอวกาศของการแกว่งขึ้นลงของค่าดัชนีหักเห โดยขึ้นอยู่กับความสูง หากขนาดของการไหลวนที่เกิดขึ้นใหญ่กว่าขนาดของเขตเฟรสเนลที่หนึ่ง (First Fresnel zone) จะทำให้การแกว่งขึ้นลงของสัญญาณลดลง

การแกว่งขึ้นลงของระดับสัญญาณที่ได้รับ เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห โดยทั่วไปจะแสดงในเทอมการเบี่ยงเบนจากระดับสัญญาณเฉลี่ยแสดงในหน่วยเดซิเบล สำหรับความยาวเส้นทางของชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนแต่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous, L) เราจะสมมติตำแหน่งของเครื่องรับ ดังนั้นค่าความแปรปรวน σ_y^2 ของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณที่เป็นล็อก y กำหนดโดย

$$\sigma_y^2 = 23.16 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3.1)$$

k เป็นเลขคลื่นเท่ากับ $2\pi f / c$ เมื่อ c เป็นความเร็วแสง ในเส้นทางการแพร่กระจายไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) C_n^2 จะต้องถูกอินทิเกรตตลอดเส้นทางการแพร่กระจาย [5]

สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางสายอากาศ D การแก้ไขในสมการ (3.1) จำเป็นต้องพิจารณาตามความเป็นจริงที่ว่า ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศเพิ่มขึ้นการแกว่งขึ้นลงหน้าคลื่นตกกระทบน้อย เอาต์พุตสายอากาศเป็นช่องว่างของการเปลี่ยนแปลงรังสีตกกระทบ โดยสายอากาศจะกระทำที่วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ (Low pass filter) สำหรับส่วนที่กระจายตรงกับความยาวคลื่นที่เล็กกว่าขนาด D การแกว่งขึ้นลงของสัญญาณที่สังเกตเห็นจะมีขนาดเล็กกว่าสัญญาณที่รับจากจานรับ แต่ปัญหานี้ครอบคลุมโดยการนำเสนอจากผู้อื่น ซึ่งใช้แบบจำลองอย่างง่าย ๆ สำหรับแบบรูป (Pattern) ของสายอากาศ โดย Haddon และ Vilar [6] พบว่าเฟลคเตอร์ที่ดีสำหรับอะเพอร์เจอร์ (Aperture) กำหนดเป็น

$$g(D_e) = \sqrt{3.8637(x^2 + 1)^{11/12} \sin\left[\frac{11}{16} \arctan \frac{1}{x}\right] - 7.0835x^{5/6}} \\ \approx \sqrt{1 - 7.0835x^{5/6}} \quad \text{สำหรับ } x \ll 1 \quad (3.2)$$

เมื่อ $x = 0.0584k D_e^2 / z$ เป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (Effective antenna diameter, D_e) และขนาดของเขตเฟรสเนล (Fresnel zone, $\sqrt{2\pi z/k}$) เมื่อ z คือระยะทางของชั้นบรรยากาศที่ไม่สม่ำเสมอจากจุดเครื่องรับ ค่า D_e สามารถคำนวณได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางสายอากาศเชิงเรขาคณิต (Geometrical antenna diameter, D) และประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สายอากาศ (Antenna aperture efficiency, η) คือ

$$D_e = D\sqrt{\eta} \quad (3.3)$$

ระยะทาง z ของชั้นบรรยากาศที่ไม่สม่ำเสมอสามารถคำนวณได้จากความสูง h ของชั้น คือ

$$z = \frac{2h}{\sqrt{\sin^2 \varepsilon + 2h/a_c + \sin \varepsilon}} \quad (3.4)$$

เมื่อ ε คือ มุมเงย และ a_c คือ รัศมีของโลกขึ้นอยู่กับความสูงของสถานีและระดับน้ำทะเล ประมาณเท่ากับ 8.5×10^6 เมตร

3.1.2 การแกว่งขึ้นลงของสัญญาณในระยะสั้น (Short-term)

โดยทั่วไป จะสมมติว่าการแกว่งขึ้นลงของระดับสัญญาณเนื่องจากชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนในระยะสั้น (เช่น 1 นาที หรือ หลาย ๆ นาที) มีการแจกแจงแบบเกาส์เซียน รอบ ๆ ระดับสัญญาณเฉลี่ย ภายใต้สมมติฐานนี้ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function) ของการเบี่ยงเบนสัญญาณ y จากระดับสัญญาณเฉลี่ยสามารถเขียนได้เป็น

$$p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2\sigma^2} \quad (3.5)$$

การแสดงในระยะสั้นที่แตกต่างจากการแจกแจงแบบเกาส์เซียน ตัวอย่างเช่น แบบจำลองของ Banjo และ Vilar [7] พบว่าถ้าความเข้มของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันมีขนาดใหญ่มา ๆ ฟังก์ชันการแจกแจงในระยะสั้นจะมีความลาดเอียงเป็นลบ ดังนั้นการแสดงผลจึง

แตกต่างจากเกาส์เซียน โดยการเบี่ยงเบนสัญญาณที่เป็นลบอ้างอิงเป็นสัญญาณเฟด (Fade) และการเบี่ยงเบนสัญญาณที่เป็นบวกจะอ้างอิงเป็นสัญญาณเอนฮานสมেন্ট (Enhancement)

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนของสัญญาณในหน่วยเดซิเบล จะทำให้การจำลองเข้าใกล้ความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น [8] โดยสัญญาณทางแสงจะเกิดการกระจายตัวเนื่องจากตัวกลางแบบแรนดอม (Random medium) ถ้าเครื่องรับถูกติดตั้งภายในตัวกลางชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนและนำหน้าการกระจายตัวยาวและแคบ สนามที่รับได้ E จะเป็นผลคูณของการกระจายตัว ด้วยเหตุนี้สนามที่รับได้ E ก่อให้เกิดสนามตกกระทบคูณด้วยจำนวนแฟคเตอร์อิสระ เมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีเซนทรัล-ลิมิต (Central-limit) กับค่า $\log E$ จะนำไปสู่การแจกแจงแบบเกาส์เซียนสำหรับ $\log E$ ดังนั้นการแจกแจงแบบเกาส์เซียนสำหรับ $y \sim \text{Re}(\log E) = \log |E|$ และการแจกแจงแบบปรกติล็อก (Lognormal Distribution) สำหรับสัญญาณ $|E|$

อย่างไรก็ตาม สาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันบนเส้นทางควาทียม คือ ความไม่สม่ำเสมอในเมฆ [10] หมายความว่าชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนจะมีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ อยู่ไกลจากเครื่องรับ จากโครงสร้างนี้ สนามที่ได้รับเป็นผลรวมของจำนวนคลื่นที่กระจายตัวจากพื้นที่ที่แตกต่างกันด้วยค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ที่ไม่สัมพันธ์กัน สนามที่รับได้ E สามารถเขียนได้เป็น

$$E = E_1 e^{j2\pi f t} + \tilde{x}(t) \quad (3.6)$$

เมื่อ E_1 = ระดับของคลื่นตรง

t = เวลา

$\tilde{x}(t)$ = สัญญาณเชิงซ้อน

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเซนทรัล-ลิมิตในลักษณะนี้จะนำไปสู่บทสรุปว่า $\tilde{x}(t)$ เป็นเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ จากผลอันนี้ ระดับของสนามไฟฟ้าที่รับได้ $E_0 = |E|$ จะไม่เป็นไปตามการแจกแจงแบบปรกติล็อก แต่จะเป็นการแจกแจงแบบไรซ-นาคากามิ (Rice-Nakagami)

$$p(E_0) = \frac{E_0}{\sigma_x^2} e^{-\left(\frac{E_0^2 + E_1^2}{2\sigma_x^2}\right)} I_0\left(\frac{E_0 E_1}{\sigma_x^2}\right) \quad (3.7)$$

เมื่อ σ_x = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของ $|\tilde{x}(t)|$

$I_0(\)$ = modified Bessel function order 0 th

สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ความแตกต่างระหว่างการแจกแจงแบบปกติล็อกและแบบไรซ-นาคากามิจะน้อยมาก หากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีขนาดปานกลางหรือขนาดใหญ่จะเห็นความแตกต่าง

Van [10] ได้กล่าวว่า การจำลองฟังก์ชันการแจกแจงระดับสัญญาณ y ในหน่วยเดซิเบล จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับสัญญาณจริง หากสมมติว่ามีการแทรกแซงด้วยสัญญาณมัลติพาทนาการไหลวนของชั้นบรรยากาศที่แปรปรวน ซึ่งเป็นสัดส่วนกับระดับของสัญญาณคลื่นตรง E_1 ภายใต้สมมติฐานนี้ σ_x จะเป็นสัดส่วนกับ E_1 คือ

$$\sigma_x = \xi E_1 \quad (3.8)$$

การเบี่ยงเบนของสัญญาณจากค่าเฉลี่ยในหน่วยเดซิเบล สามารถคำนวณจาก

$$y = 20 \log \left(\frac{E_0}{E_1} \right) \quad (3.9)$$

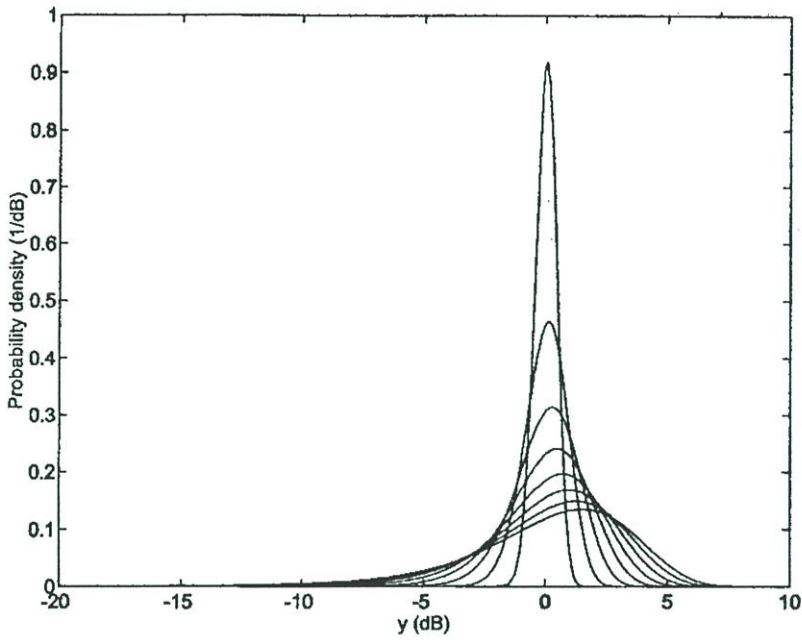
การแจกแจงของ y กำหนดโดย

$$\begin{aligned} p(y) &= \frac{dE_0}{dy} p(E_0) = \frac{\ln 10}{20} E_1 10^{y/20} p(E_0) \\ &= \frac{\ln 10}{20} E_1^2 \frac{10^{2y/20}}{\sigma_x^2} e^{-E_1^2 (10^{2y/20} + 1)/2\sigma_x^2} I_0 \left(\frac{E_1^2 10^{y/20}}{\sigma_x^2} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.8)

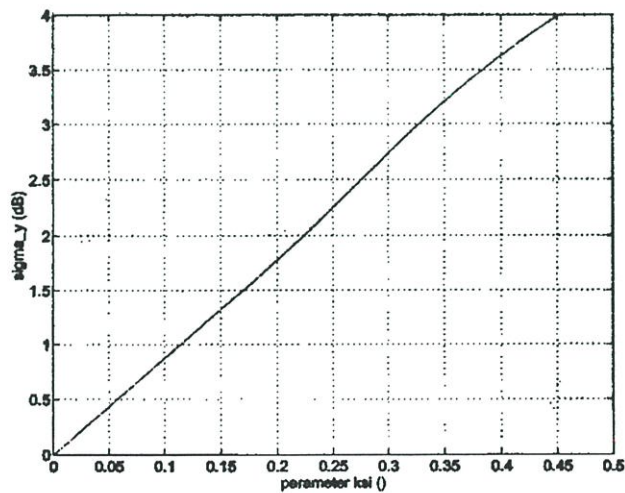
$$p(y) = \frac{\ln 10}{20} \frac{10^{2y/20}}{\xi^2} e^{-(10^{2y/20} + 1)/2\xi^2} I_0 \left(\frac{10^{y/20}}{\xi^2} \right) \quad (3.11)$$

พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการแจกแจงนี้คือ $\xi = \sigma_x / E_1$ ซึ่งเป็นการวัดความเข้มของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน รูปที่ 3.2 แสดงการแจกแจง $p(y)$ สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า ξ จะเห็นว่าเมื่อค่า ξ เพิ่มขึ้นไม่เฉพาะช่วงกว้างที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ความลาดเอียงของการแจกแจงจะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงการแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็นของระดับสัญญาณ y (หน่วยเดซิเบล) สำหรับพารามิเตอร์ $\zeta=0.05$ (ยอดที่แหลมที่สุด) 0.1, 0.15, ..., 0.4 (การลาดที่ใหญ่มากที่สุด)

การแจกแจงในรูปที่ 3.2 เป็นการพล็อตที่ฟังก์ชันของการเบี่ยงเบนระดับสัญญาณจากค่าเฉลี่ย ดังนั้นจากนิยาม ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงในรูป คือ 0 เดซิเบล



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับสัญญาณในหน่วยเดซิเบล σ_y และค่าพารามิเตอร์ ζ

แม้ว่าผลกระทบของการลาดเอียงนี้จะถูกสังเกตอยู่บ่อยครั้ง (เช่น Banjo และ Vilar [7] Otung และ Evans [11]) แต่การแจกแจงระดับสัญญาณในระยะสั้น $p(y)$ ส่วนใหญ่จะยังคงถูกจำลองเป็นแบบเกาส์เซียน ค่าความแปรปรวน σ^2 หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ ที่นำมาแสดงลักษณะการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน จะต้องมียุทธศาสตร์มากกว่า 1 นาที ความสัมพันธ์ของค่า ξ แสดงในรูปที่ 3.3 เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_y ของ y ถูกคำนวณจากการแจกแจง $p(y)$ ที่แสดงฟังก์ชันของ ξ

3.1.3 การแจกแจงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน σ ที่แสดงในระยะยาว (เช่น หลาย ๆ สัปดาห์) บางครั้งการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นการแจกแจงแบบเกาส์เซียน ซึ่ง Moulaley และ Vilar [12] พบว่าการแจกแจงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เหมาะสม คือ การแจกแจงแบบปรกติล็อก สามารถแสดงเป็น [13]

$$p(\sigma) = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{2\pi} \sigma_1 \sigma} e^{-\frac{(\log \sigma - m_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (3.12)$$

เมื่อ $\log =$ ล็อกการิทึมฐาน 10

$\ln =$ ล็อกการิทึมฐาน e

$m_1 =$ ค่าเฉลี่ยของ $\log \sigma$

$\sigma_1 =$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\log \sigma$ (σ หน่วยเป็นเดซิเบล)

ในที่นี้ $\log(\sigma^2) = 2\log \sigma$ ดังนั้นค่าความแปรปรวนจะเป็นการแจกแจงแบบปรกติล็อกด้วย คือ

$$p(\sigma^2) = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{2\pi} \sigma_{12} \sigma^2} e^{-\frac{(\log \sigma^2 - m_{12})^2}{2\sigma_{12}^2}} \quad (3.13)$$

เมื่อ $m_{12} =$ ค่าเฉลี่ยของ $\log \sigma^2 = 2m_1$

$\sigma_{12} =$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\log \sigma^2 = 2\sigma_1$

อย่างไรก็ตาม Karasawa Yamada และ Allnult [14] กล่าวว่าฟังก์ชันการแจกแจงในระยะยาวของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถประมาณให้ใกล้เคียงได้โดยใช้การแจกแจงแบบแกมมา

$$p(\sigma) = \frac{(a/m_\sigma)^a}{\Gamma(a)} \sigma^{a-1} e^{-a\sigma/m_\sigma} \quad (3.14)$$

เมื่อ $a = m_\sigma^2 / \sigma_\sigma^2$

m_σ = ค่าเฉลี่ยของ σ

σ_σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ σ

$\Gamma(\)$ = ฟังก์ชันแกมมา กำหนดโดย

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx \quad (3.15)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงค่าความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเป็น

$$p(\sigma^2) = \frac{p(\sigma)}{2\sigma} = \frac{(a/m_\sigma)^a}{2\Gamma(a)} (\sigma^2)^{a/2-1} e^{-a\sqrt{\sigma^2}/m_\sigma} \quad (3.16)$$

จะเห็นว่าสมการ (3.16) ไม่ใช่การแจกแจงแบบแกมมาอย่างแท้จริง แต่เป็นลักษณะเด่นซึ่ง Karasawa ได้กำหนดความสัมพันธ์เป็น

$$m_\sigma^2 = 10\sigma_\sigma^2 \quad (3.17)$$

ดังนั้นสมการ (3.17) เป็นการแจกแจงแบบแกมมาที่กำหนดโดยพารามิเตอร์ 1 ตัวเท่านั้น

3.2 แบบจำลองทำนาย

3.2.1 แบบจำลองสำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในระยะยาว

แบบจำลองทำนายค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันในระยะยาวที่ได้จากทฤษฎีในหัวข้อ 3.1.1 นั้นมีความยุ่งยากมาก เนื่องจากค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห C_n^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางชั้นบรรยากาศโดยเฉพาะดังในสมการ (3.1) และเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง เพื่อให้แบบจำลองสามารถปรับปรุงและพัฒนาได้ในอนาคต คุณสมบัติบางอย่างจึงต้องได้รับจากการวัดระดับการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันโดยตรง

Roger และ Allnutt [15] ได้แสดงว่าสูตรของ Tatarski ที่ทำนายค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ของระดับสัญญาณที่แกว่งขึ้นลงขึ้นอยู่กับความถี่ มุมเงย และขนาดของสายอากาศ คือ

$$\sigma \propto g(D_e) f^{7/12} / \sin^{11/12} \epsilon \quad (3.18)$$

เมื่อ f คือ ความถี่หน่วย GHz

ϵ คือ มุมเงย

และฟังก์ชันเฉลี่ยสายอากาศ $g(D_e)$ กำหนดได้เป็น

$$g^2(D_e) = \begin{cases} 1.0 - 0.7 \left(\frac{D_e}{\sqrt{\lambda z}} \right) & , 0 \leq \frac{D_e}{\sqrt{\lambda z}} \leq 1.0 \\ 0.3 - 0.2 \left(\frac{D_e}{\sqrt{\lambda z}} \right) & , 1.0 < D_e \leq 2.0 \\ 0.1 & , 2.0 < \frac{D_e}{\sqrt{\lambda z}} \end{cases} \quad (3.19)$$

เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น หน่วยเมตร

D_e เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางสายอากาศประสิทธิภาพ กำหนดในสมการ (3.3)

z เป็นระยะทางที่ผ่านชั้นบรรยากาศแปรปรวน กำหนดในสมการ (3.4)

สมการ(3.19) สามารถสลับกลับไปยังสมการ (3.2) ได้ เนื่องจากการประมาณแบบลิเนียร์ของฟังก์ชันเฉลี่ยสายอากาศจาก Tatarski การสเกลในสมการ (3.19) ของ Roger และ Allnutt นี้เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางสำหรับความถี่ตั้งแต่ 1 - 35 GHz โดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางสายอากาศอย่างเหมาะสม และจะไม่แนะนำให้นำไปประยุกต์ใช้กับมุมเงยต่ำกว่า 3 องศา เนื่องจากจะมีผลกระทบของการมัลติพาทของชั้นบรรยากาศหลายอย่างเกิดขึ้นที่มุมเงยต่ำมาก ๆ

Karasawa Yamada และ Allnutt [14] ได้เสนอแบบจำลองทำนายสำหรับการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแกว่งขึ้นลงของระดับสัญญาณ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน เริ่มจากสมการ(3.1) สำหรับเส้นทางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (ขึ้นอยู่กับความสูง C_n^2) โดยทำการวัดทดสอบในระหว่างปี ค.ศ. 1983 ที่เมืองยามากูชิ (Yamaguchi) ประเทศญี่ปุ่น มุมเงย 6.5 องศา ความถี่ 11.5 GHz และ 14.2 GHz เส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศ 7.6 เมตร สำหรับการขึ้นอยู่กัมุมเงยได้ใช้ข้อมูลในระยะยาวจากสถานีเดียวกันที่มุมเงย 4 องศา และ 9 องศา จากการประมาณ โดยการสังเกตความเข้มของการแกว่งขึ้นลงเท่ากับที่กำหนดใน C_n^2 และนำเสนอใหม่โดยการทำนายแบบนอร์แมลไลซ์ σ_n ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการหักเหที่พื้นดิน

ผลลัพธ์ของการทำนายมีรูปแบบเป็น

$$\sigma = 0.0228 \sigma_n f^{0.45} g(D_c) / \sin^{1.3} \epsilon \quad (3.20)$$

เมื่อ

$$\sigma_n = 0.15 + 5.2 \times 10^{-3} N_{wet} \quad \text{dB} \quad (3.21)$$

$$N_{wet} = \frac{22790 RH e^{19.7T/(T+273)}}{(T+273)^2} \quad (3.22)$$

เมื่อ $g(D_c)$ กำหนดโดยสมการ (3.19)

N_{wet} เป็นการหักเหในเทอมเปียกที่ระดับพื้นดิน

RH เป็นความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)

T เป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

การคำนวณค่า z ในสมการ (3.19) Karasawa ได้แนะนำค่าความสูง h สำหรับชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนเป็น 2,000 เมตร สำหรับมุมเงยต่ำกว่า 5 องศา ค่า $\sin \epsilon$ ในสมการ (3.20) จะถูกแทนด้วย $(\sin \epsilon + \sqrt{\sin^2 \epsilon + 2h_w/a_c})/2$ เมื่อ h_w เป็นความสูงของความดันไอน้ำในชั้นบรรยากาศซึ่งสมมติให้เป็น 2000 เมตร และ a_c เป็นรัศมีของโลก

แบบจำลองของ Karasawa ได้ทำการทดสอบการวัดอีกครั้งจาก 4 สถานีที่แตกต่างกันของภาคตะวันตก ประเทศญี่ปุ่น และจากเมือง Hayatack ประเทศสหรัฐอเมริกา เมือง Chilbolton ประเทศอังกฤษ การวัดจะใช้มุมเงยตั้งแต่ 4 - 30 องศา ความถี่ตั้งแต่ 7.3 - 14.2 GHz เส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศ 3 - 36.6 เมตร ค่า N_{wet} เฉลี่ยจากฐานข้อมูลที่แตกต่างกันจะเปลี่ยนแปลงจาก 20 - 130 ppm สมการของ Karasawa ได้คาดหวังไว้ว่าแบบจำลองจะสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในพื้นที่ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับสภาพทางอุตุนิยมวิทยาที่แตกต่างกัน แต่สถานที่นั้น ๆ จะต้องตรวจสอบหรือปรับปรุงกระบวนการทำนายด้วยเสียก่อน

ITU-R Recommendation PN.618-3 (1994b) [16] ได้มีการบรรจุแบบจำลองไว้ตามเทคนิคสูตรพื้นฐานของ Karasawa แต่นำเสนอสูตรการทำนายเป็น

$$\sigma = \sigma_n f^{7/12} g(D_c) / \sin^{1.2} \epsilon \quad (3.23)$$

เมื่อ

$$\sigma_n = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} N_{\text{wet}} \quad \text{dB} \quad (3.24)$$

$g(D_c)$ เป็นฟังก์ชันเฉลี่ยอะเพอร์เจอร์ของ Haddon และ Vilar ที่กำหนดในสมการ (3.2) โดย ITU-R ได้แนะนำความสูง h ของชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนเป็น 1,000 เมตร

แบบจำลองนี้ครอบคลุมมุมเงยตั้งแต่ 4 - 32 องศา เส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศระหว่าง 3 - 36 เมตร ย่านความถี่ 7 - 14 GHz และสามารถใช้ได้ ในลักษณะสภาพอากาศท้องถิ่นที่แตกต่างกัน

ทั้งสองแบบจำลอง สามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลการวัดทางอุตุนิยมวิทยาซึ่งมีระยะเวลาเฉลี่ยมากกว่า 1 เดือนได้ การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันในระยะสั้น ๆ หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในแต่ละวันไม่สามารถนำมาในการใช้ทำนายได้ และเป็นที่น่าสนใจมากในการหาระยะเวลาเฉลี่ยต่ำที่สุดว่าเป็นเท่าใด

ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอนในการทดสอบและประยุกต์ของแบบจำลอง Karasawa และ ITU-R ที่เห็นได้ชัด คือ ความสูง h ของชั้นบรรยากาศที่แปรปรวน ในบางครั้งการประมาณค่าพารามิเตอร์นี้สามารถใช้ข้อมูลที่วัดทางอุตุนิยมวิทยาที่ความสูงของอุณหภูมิและความชื้น หรือการวิเคราะห์สเปกตรัมของการวัดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน จะให้ความเที่ยงตรงน้อยมาก อย่างไรก็ตาม สามารถกล่าวได้ว่าแบบจำลองจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าของความสูง h

3.2.2 แบบจำลองสำหรับการแจกแจงระดับสัญญาณ

การพัฒนาแบบจำลองการแจกแจงในระยะยาวของการเบี่ยงเบนระดับสัญญาณ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน สามารถที่จะคำนวณได้จากการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณในระยะสั้น โดยใช้สมการ

$$p(y) = \int_0^{\infty} p(\sigma) p(y/\sigma) d\sigma \quad (3.25)$$

เมื่อ $p(\sigma)$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ในระยะสั้นและ $p(y/\sigma)$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงในระยะสั้นของระดับสัญญาณ y สำหรับการกำหนดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สมการนี้จะถูกต้องถ้าสมมติให้ฟังก์ชันการแจกแจงของ $p(y/\sigma)$ ขึ้นอยู่กับค่า σ เท่านั้น

สำหรับ $p(y/\sigma)$ สามารถใช้การแจกแจงแบบเกาส์เซียนในสมการ (3.5) ได้หรือจะสลับใช้การแจกแจงของสมการ (3.11) ก็ได้ สมการ (3.25) สามารถใช้คำนวณจากการแจกแจง $p(\sigma)$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในระยะสั้น และการแจกแจงในระยะยาวของการเบี่ยงเบนระดับสัญญาณ

ซึ่ง [14] ได้กำหนดผลลัพธ์ว่าเป็นการแจกแจงแบบเกาส์เซียนสำหรับ $p(y/\sigma)$ ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะให้ความไม่สมมาตรระหว่างสัญญาณเฟดและสัญญาณเอนฮานสมেন্টก็ตาม

Karasawa, Yamada และ Allnutt [14] ได้เสนอการแจกแจงสำหรับการแจกแจงสะสมในระยะยาวของการเบี่ยงเบนระดับสัญญาณ y โดยสมการ (3.25) ด้วยการสมมติให้เป็นการแจกแจงแบบเกาส์เซียนสำหรับ $p(y/\sigma)$ และการแจกแจงแบบแกมมาสำหรับ $p(\sigma)$ ดังนั้นความสัมพันธ์ในสมการ (3.17) จะถูกสมมติเป็นค่าเฉลี่ยในระยะยาวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ด้วยเช่นกัน ผลลัพธ์ของการเบี่ยงเบนระดับสัญญาณสำหรับเปอร์เซ็นต์เวลา (Time percentage) P กำหนดโดย

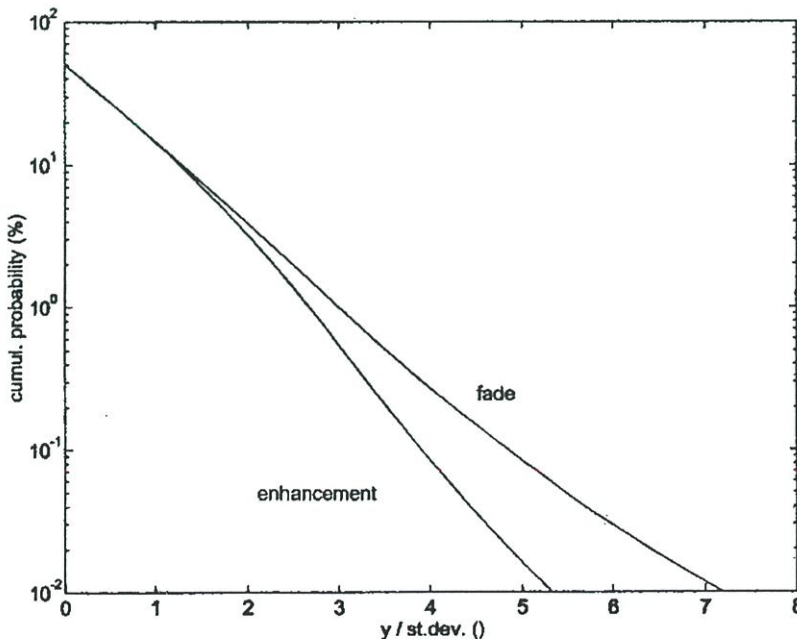
$$y = (-0.0597 \log^3 P - 0.0835 \log^2 P - 1.288 \log P - 2.677) \sigma t \quad (3.26)$$

$(0.01\% \leq P \leq 50\%)$

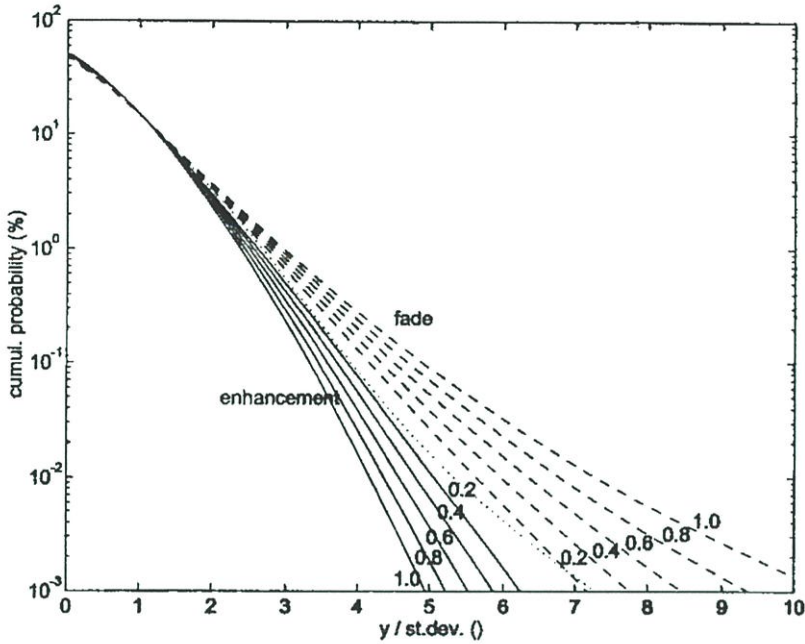
เมื่อ σt เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณในระยะยาว ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.20) โดยสมการ (3.26) นี้ได้รับการยอมรับว่าดีมาตามการวัดของ Karasawa สำหรับสัญญาณเอนฮานสมেন্ট อย่างไรก็ตามสำหรับสัญญาณเฟดที่การเบี่ยงเบนวัดได้มีขนาดใหญ่ กำหนดความสัมพันธ์เป็น

$$y = (-0.061 \log^3 P + 0.027 \log^2 P - 1.711 \log P + 3.0) \sigma t \quad (3.27)$$

$(0.01\% \leq P \leq 50\%)$



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความน่าจะเป็นสะสมของสัญญาณเฟดและสัญญาณเอนฮานสมেন্টแบบนอร์มัลไลซ์ของ Karasawa



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการแจกแจงสะสมสำหรับสัญญาณเฟดและสัญญาณแอนฮานสมেন্টแบบนอร์แมลไลซ์ซึ่งคำนวณจากการแจกแจงในสมการ (3.11)

ITU-R ได้นำการแจกแจงในสมการ (3.27) มาใช้สำหรับการทำนายสัญญาณเฟดเท่านั้น การนำเสนอของทั้งสองแบบจำลองได้ถูกนำมาพล็อตในรูปที่ 3.4 สำหรับการเบี่ยงเบนสัญญาณแบบนอร์แมลไลซ์ y/n

จะเห็นได้ว่าการแจกแจงสะสมในระยะยาวซึ่งแสดงเป็น $y(p)$ จะเป็นสัดส่วนกับ σ ด้วยผลที่ได้มาจากการคำนวณโดยใช้การแจกแจงแบบเกมมาสำหรับ $p(\sigma)$ ภายใต้สมมติฐานที่ว่า σ_σ และ m_σ เป็นสัดส่วนกัน ดังแสดงในสมการ (3.17) หากเงื่อนไขนี้ไม่ถูกปฏิบัติตามจะเป็นเรื่องยุ่งยากมาก

ความแตกต่างระหว่างสัญญาณเฟดและสัญญาณแอนฮานสมেন্টที่เกิดขึ้นจากความไม่เป็นสมมาตรของการแกว่งขึ้นลงของระดับสัญญาณในระยะสั้น ซึ่งอธิบายในหัวข้อ 3.1.2 ความไม่เป็นสมมาตรนี้จะไม่ถูกระบุหากเป็นการแจกแจงแบบเกาส์เซียนสำหรับ $p(y/\sigma)$ อย่างไรก็ตามรูปที่ 3.2 ได้แสดงว่าการแจกแจงของสมการ (3.11) ซึ่งสมมติเป็นการแจกแจงแบบไรซ-นาคากามิสำหรับระดับของสนามไฟฟ้าที่ได้รับนั้น สามารถแสดงความแตกต่างของสัญญาณเฟดและสัญญาณแอนฮานสมেন্টได้ การแจกแจงในสมการ (3.11) เมื่อนำไปแทน $p(y/\sigma)$ ในสมการ (3.25) สมการ (3.11) จะแสดงการแจกแจงที่ขึ้นอยู่กับค่า ξ และความสัมพันธ์ระหว่าง ξ และ σ ที่ถูกพบในรูปที่ 3.3 จะคล้ายกับของ Karasawa ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบเกมมาในสมการ (3.14) ที่ถูกนำไปใช้สำหรับ $p(\sigma)$ ความสัมพันธ์ที่สมมติในสมการ (3.17) ระหว่าง σ_σ และ m_σ จึงถูก

นำมาใช้ ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 3.5 สำหรับค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณแบบนอร์มัลไลซ์ y/m_{σ} และค่าที่แตกต่างของ m_{σ}

3.3 สรุป

การสื่อสารดาวเทียมที่มีความถี่มากกว่า 10 GHz การแกว่งขึ้นลงของระดับสัญญาณเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และการลดทอนในระดับสัญญาณเนื่องจากฝน ซึ่งผลกระทบทั้งสองนี้เป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านดาวเทียม โดยเฉพาะเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่ใช้มุมเงยต่ำจะเกิดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันขึ้นบ่อยครั้ง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์นี้เพื่อใช้ในการออกแบบระบบดาวเทียมให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

การศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้มีการดำเนินการทั้งทางทฤษฎีและการทดสอบ และนำเสนอวิธีการทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน แบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R ได้นำตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยามาใช้เป็นอินพุตพารามิเตอร์ในการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้น ค่าอินพุตพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ คือ ค่าดัชนีหักเหในชั้นเปียก N_{wet} โดยทั้งสองแบบจำลองได้ทำการทดสอบความเที่ยงตรงด้วยข้อมูลที่เก็บบันทึกจากสถานีต่าง ๆ มาเปรียบเทียบ

บทที่ 4

การทดลองและผลการวิเคราะห์

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

4.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

การวัดสัญญาณในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ติดตั้งงานสายอากาศที่ชั้นดาดฟ้าตึก E12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รับสัญญาณจากดาวเทียมไทยคม 2 ย่านความถี่ Ku ทำการเก็บบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 จนถึงปัจจุบัน รายละเอียดต่าง ๆ ของระบบแสดงดังตารางที่ 4.1 และบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.1

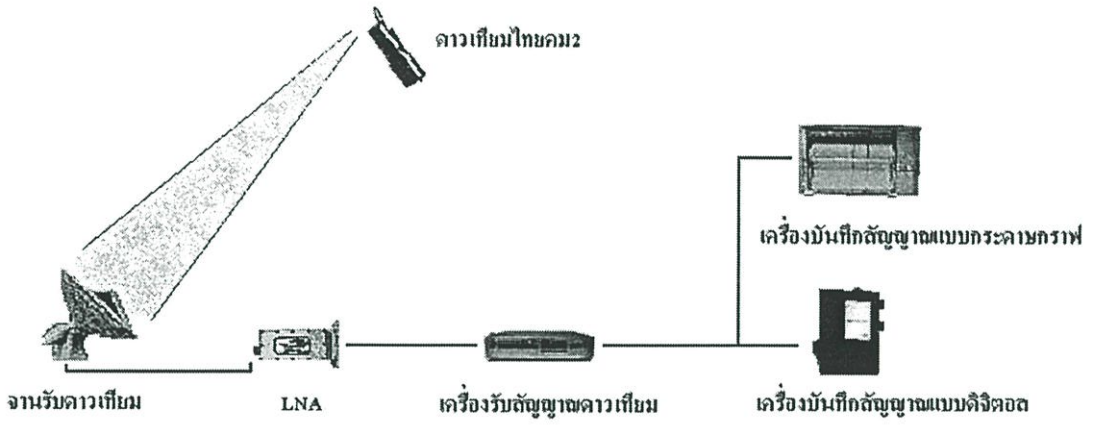
4.1.2 เครื่องรับสัญญาณและเครื่องบันทึกสัญญาณ

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องรับสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog) โดยสัญญาณจะผ่านวงจรกรองสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise amplifier, LNA) ไปยังเครื่องรับสัญญาณซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และถูกบันทึกเป็นระดับสัญญาณมีหน่วยเป็น โวลต์

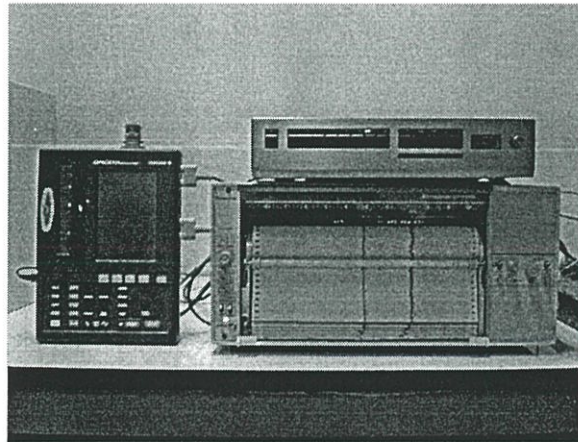
การบันทึกสัญญาณประกอบด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณแบบแอนะล็อก หรือ Pen recorder และเครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล หรือ OR-100 recorder เครื่องบันทึกสัญญาณทั้งสองจะทำการบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการสุ่มค่าตัวอย่าง (Sampling rate) 8 จุดต่อวินาที เครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัลจะถ่ายโอนข้อมูลสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อจัดเก็บเป็นแฟ้มทุก ๆ 145 นาที

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบการวัด

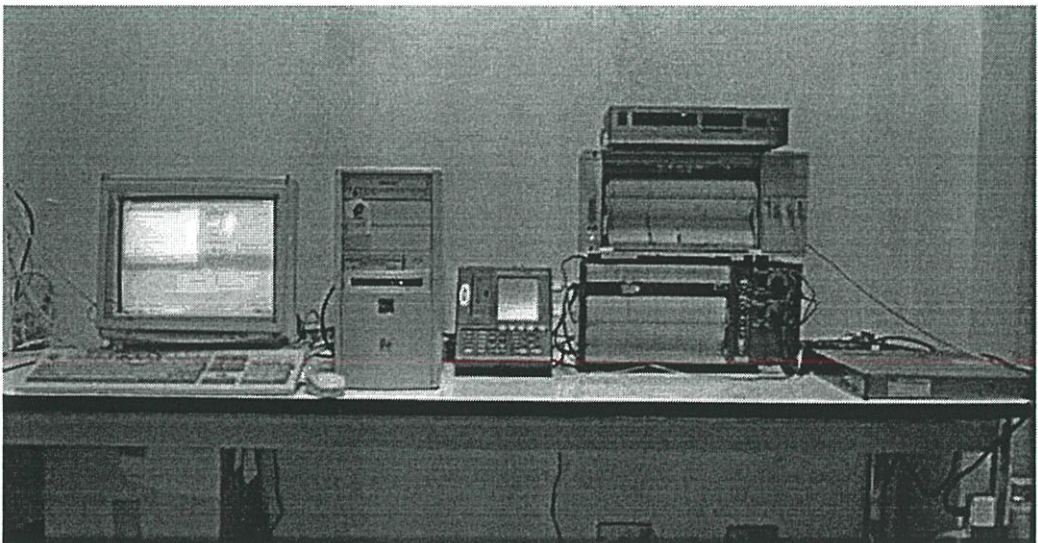
สถานีรับ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดาวเทียมที่ใช้	ดาวเทียมไทยคม 2
ตำแหน่งสถานีภาคพื้นดิน	13° 45' 36" เหนือ 100.8° 48' 17" ตะวันออก
ขนาดจานรับ	30 cm แบบออฟเซต
ความถี่ด้านขาลง	12.260 GHz
มุมเงย	59.9 องศา
อัตราการสุ่มค่าตัวอย่าง	125 mSec



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด



รูปที่ 4.2 เครื่องรับและบันทึกสัญญาณ



รูปที่ 4.3 ระบบการวัดและบันทึกสัญญาณ

4.2 ผลการวิเคราะห์

หัวข้อนี้ เป็นผลการทดลองและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทำการทดลอง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองครั้งนี้เป็นข้อมูลที่ได้รับจากดาวเทียมไทยคม 2 ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545 ถึง เดือนมกราคม พ.ศ. 2546

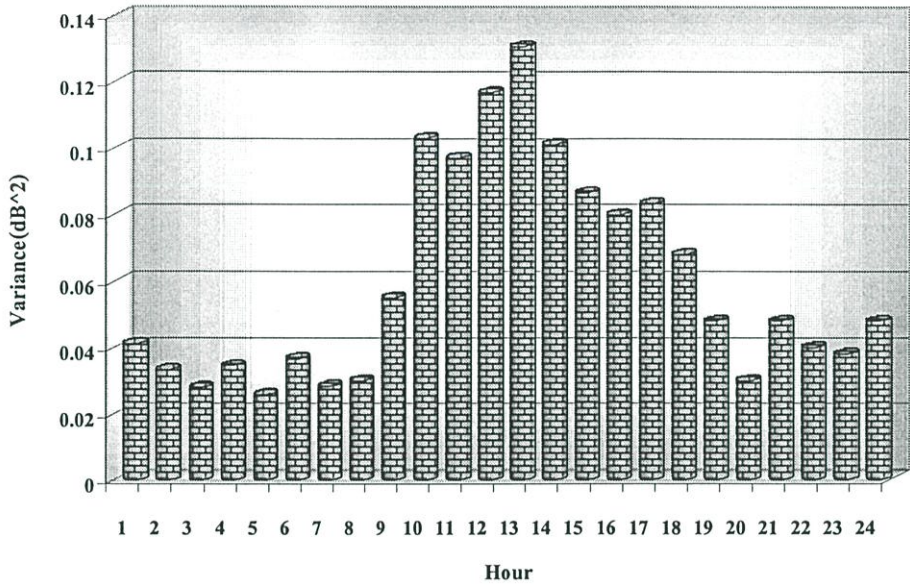
การวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน จะพิจารณาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของสัญญาณที่บันทึก โดยมีการเปลี่ยนแปลงพีคทูพีค (Peak-to-Peak) ตั้งแต่ 1 เดซิเบลขึ้นไป และเกิดขึ้นนานตั้งแต่ 5 นาทีขึ้นไปเท่านั้น เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงจากผลกระทบต่างๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบ่งแสดงเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้ง (Dry scintillation) คือ การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันโดยไม่มีผลกระทบของฝนเข้ามาเกี่ยวข้อง และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเปียก (Wet scintillation) คือ การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันขณะเกิดฝนตก

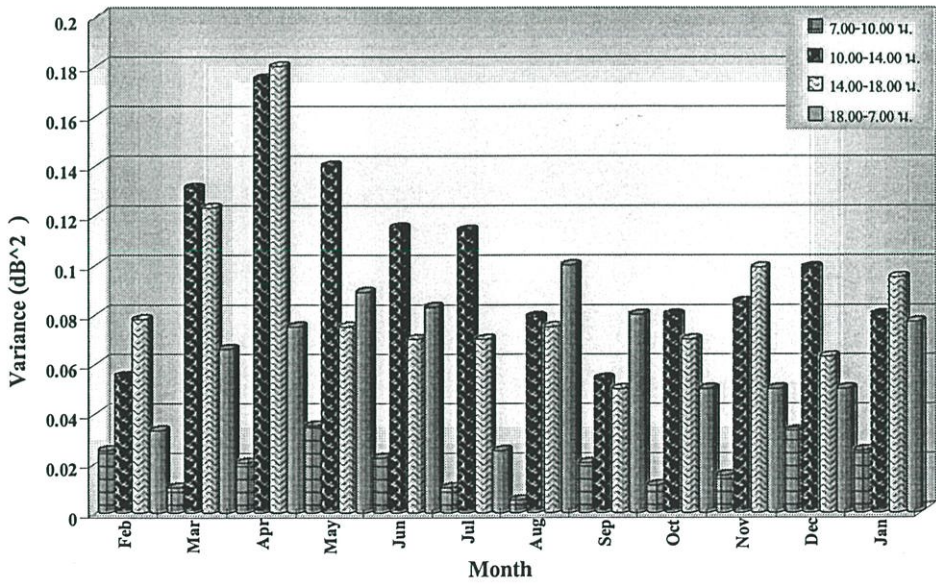
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้ง

4.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงระหว่างวัน

พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน คือ ค่าความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน σ^2 สามารถคำนวณได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับสัญญาณ (หน่วยเดซิเบล) ยกกำลังสอง การเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันในระหว่างวัน พิจารณาได้จากการนำข้อมูลซึ่งแบ่งออกเป็นช่วง ๆ ช่วงละ 5 นาที ในแต่ละช่วงนำมาหาค่าความแปรปรวน σ^2 ค่าหนึ่ง แล้วแยกเป็นราย 1 ชั่วโมง รูปที่ 4.4 แสดงค่าความแปรปรวน σ^2 ของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมงของข้อมูลระยะเวลา 1 ปี จะเห็นว่าค่าความแปรปรวน σ^2 มีค่าสูงหลังเวลาที่เที่ยงวัน และมีค่าสูงสุด คือ เวลาประมาณ 13.00 น. สำหรับรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแปรปรวน σ^2 เช่นเดียวกับรูปที่ 4.4 โดยแบ่งเวลาออกเป็นช่วง ๆ คือ ช่วงแรก 7.00 น. - 10.00 น. ช่วงที่สอง 10.00 น. - 14.00 น. ช่วงที่สาม 14.00 น. - 18.00 น. และช่วงสุดท้าย 18.00 น. - 7.00 น. ผลที่ได้จะคล้ายกับแสดงในรูปที่ 4.4 คือ ค่าความแปรปรวน σ^2 ส่วนมากจะมีค่าสูงในช่วงเวลา 10.00 น. - 14.00 น.



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวน σ^2 ในระหว่างวัน

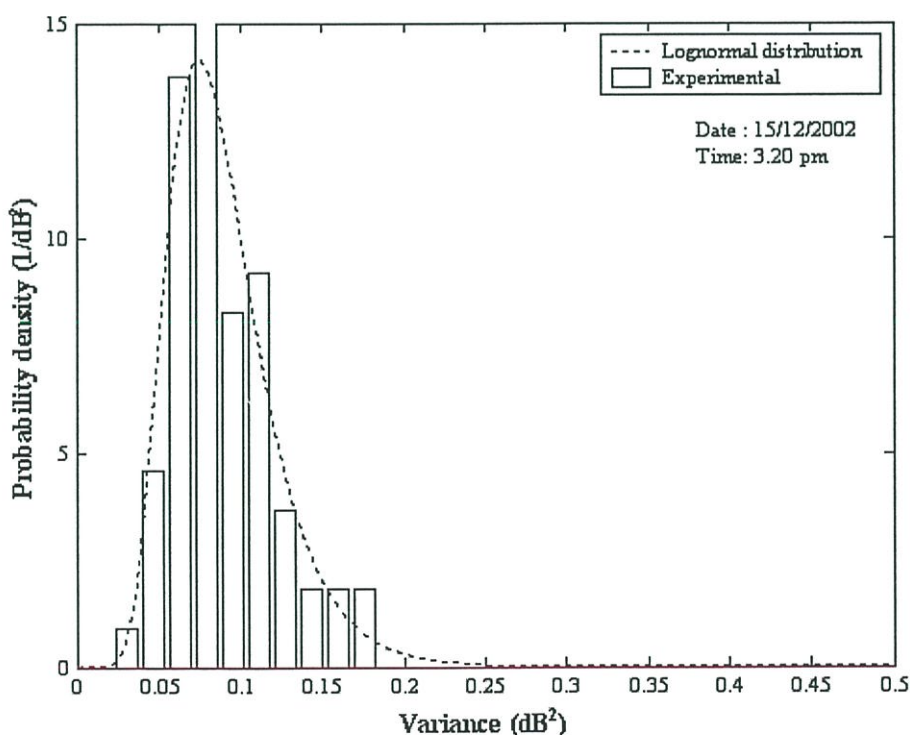


รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวน σ^2 ในระหว่างวันโดยแบ่งเป็นช่วงเวลา

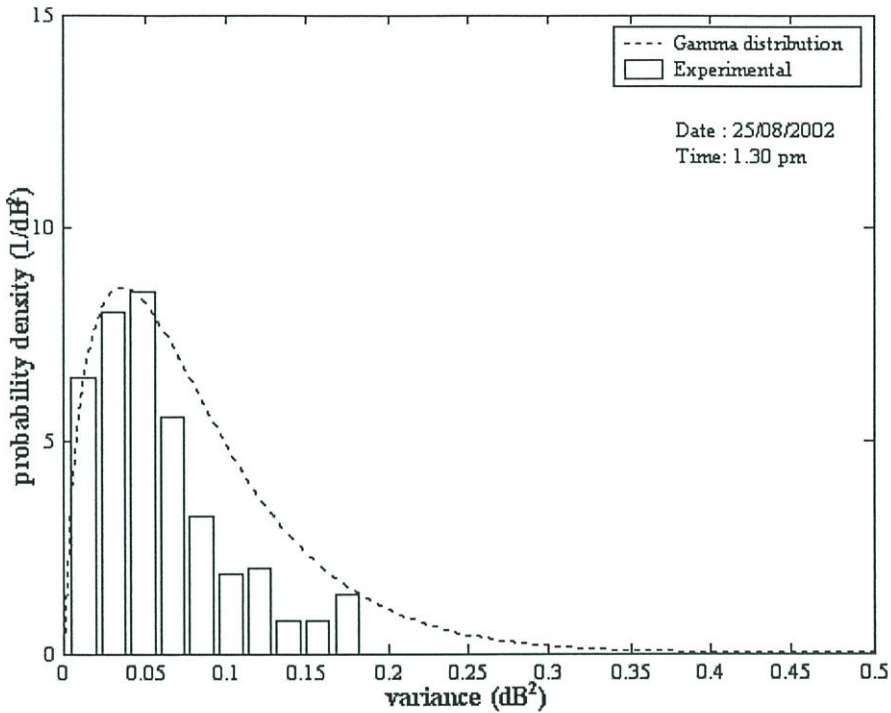
4.2.1.2 การแจกแจงค่าความแปรปรวน

จากหัวข้อ 3.1.3 ได้แสดงว่าการแจกแจงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ การแจกแจงแบบปรกติล็อกและแบบแกมมานั้น มีการกำหนดอินพุตพารามิเตอร์สำหรับการแจกแจงแบบปรกติล็อก คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\log(\sigma^2)$ และสำหรับการแจกแจงแบบแกมมา คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ σ โดยรูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการแจกแจงแบบปรกติล็อกของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 15 เดือนธันวาคม 2545 และรูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างการแจกแจงแบบแกมมาของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 25 เดือนสิงหาคม 2545 จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าการแจกแจงแบบปรกติล็อกและการแจกแจงแบบแกมมาจะเหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลที่เกิดขึ้น

จากการนำตัวอย่างข้อมูลทั้งหมดมาพล็อตด้วยการแจกแจงทั้งสองแบบ พบว่าในบางครั้งการแจกแจงแบบปรกติล็อกจะเหมาะสมกับข้อมูลมากกว่าการแจกแจงแบบแกมมา แต่บางครั้งการแจกแจงแบบแกมมาจะเหมาะสมกว่าการแจกแจงแบบปรกติล็อก หรือบางครั้งทั้งสองการแจกแจงก็เหมาะสมกับข้อมูลพอ ๆ กัน แต่บางครั้งก็ไม่เหมาะสมทั้งสองแบบ เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าการแจกแจงทั้งสองเป็นการประมาณค่าเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม สำหรับอธิบายการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปรกติล็อกของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้

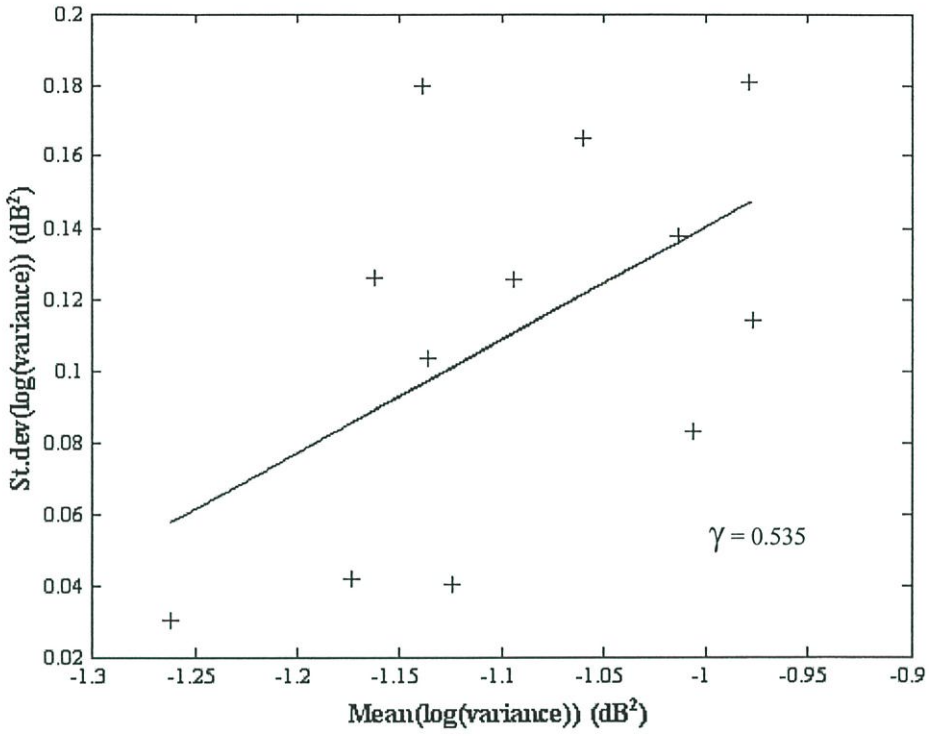


รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบแกมมาของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้

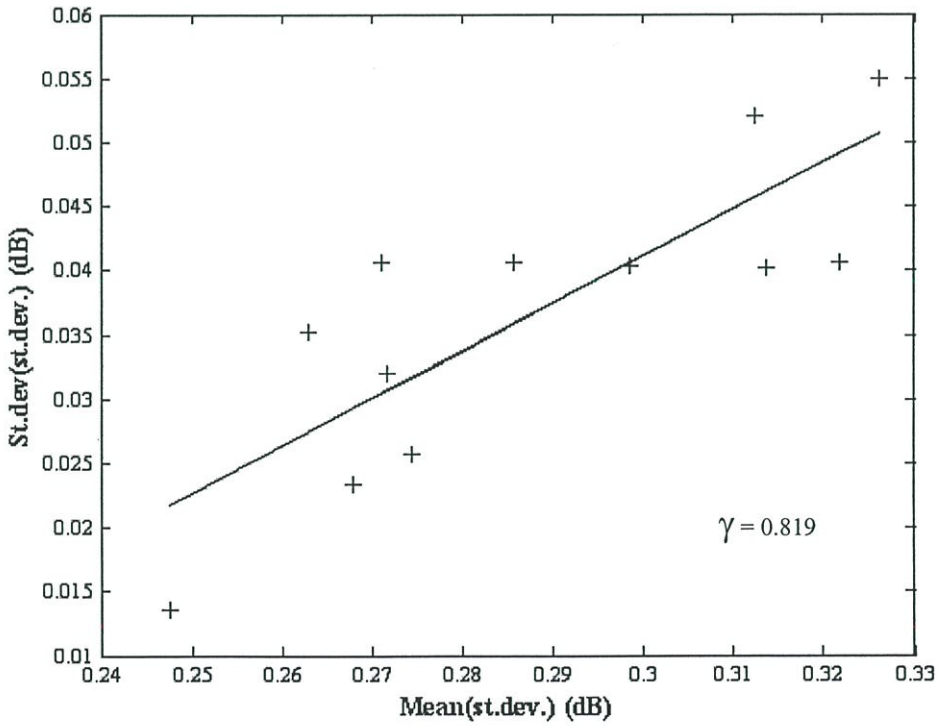
ความแตกต่างระหว่างการแจกแจงแบบปรกติสี่อกและแบบแกมมานั้น เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีการพล็อตแบบกระจาย (Scatter plot) โดยใช้อินพุตพารามิเตอร์ของการแจกแจงทั้งสอง คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\log(\sigma^2)$ สำหรับการแจกแจงแบบปรกติสี่อกและค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ σ สำหรับการแจกแจงแบบแกมมาของข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 ปี จากภาคผนวก ข เราสามารถหาค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองและเส้นแนวโน้มที่เหมาะสมได้ แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ σ สำหรับการแจกแจงแบบแกมมาเท่ากับ 0.819 ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ที่ดีกว่าระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\log(\sigma^2)$ สำหรับการแจกแจงแบบปรกติสี่อก ค่าสหสัมพันธ์ที่ดีระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ σ นี้จะนำไปตามทฤษฎีการแจกแจงแบบแกมมา [14] ในสมการ (3.17) คือ

$$m_{\sigma^2} = 10 \sigma_{\sigma^2}^2$$

การหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ σ สามารถแสดงได้โดยการพล็อตค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง m_{σ^2} และ ค่าความแปรปรวนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma_{\sigma^2}^2$ แสดงดังรูปที่ 4.10 จากรูปจะได้สมการเส้นแนวโน้มที่เหมาะสมคือ



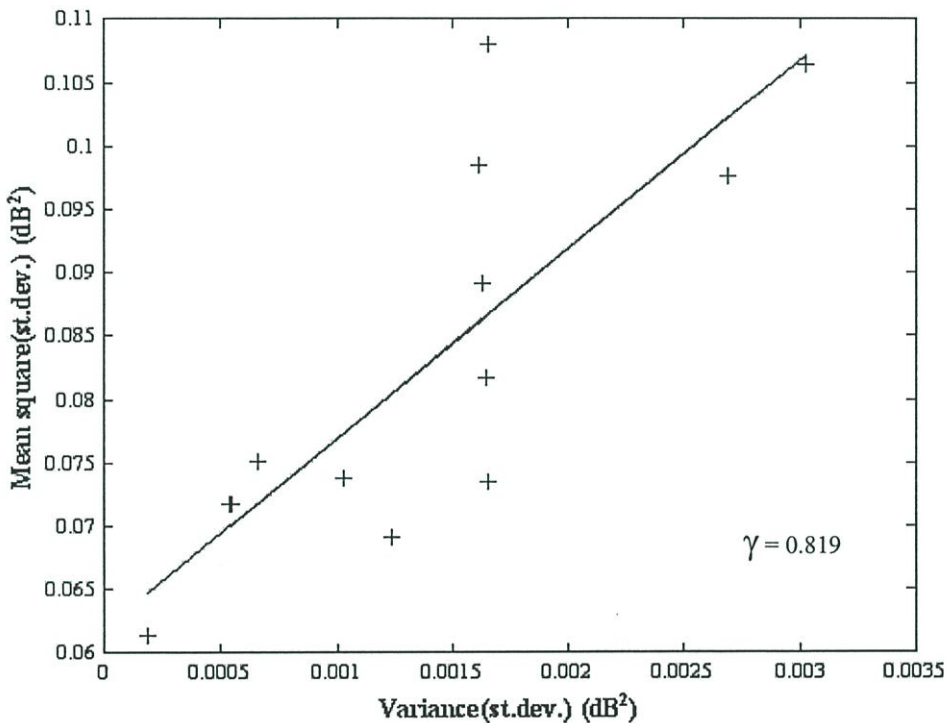
รูปที่ 4.8 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $\log(\sigma^2)$



รูปที่ 4.9 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า σ

$$m_{\sigma}^2 = 14.949\sigma_{\sigma}^2 + 0.0619 \quad (4.1)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ (4.1) ซึ่งได้จากการพล็อตในรูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_{σ} จะไม่เป็นสัดส่วนกับค่า m_{σ} เหมือนกับที่ได้ในสมการ (3.17) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R ได้ ดังนั้นในการทดลองนี้เราจะใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (3.17) สำหรับการแสดงแบบจำลอง



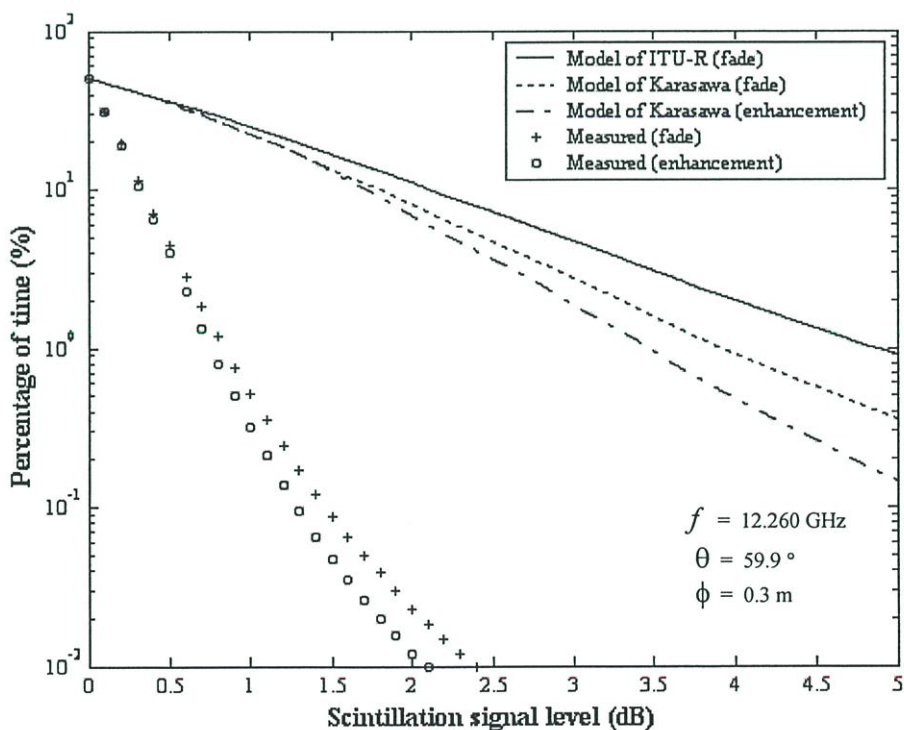
รูปที่ 4.10 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง m_{σ}^2 และค่าความแปรปรวนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_{σ}^2

4.2.1.3 การเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีในปัจจุบัน

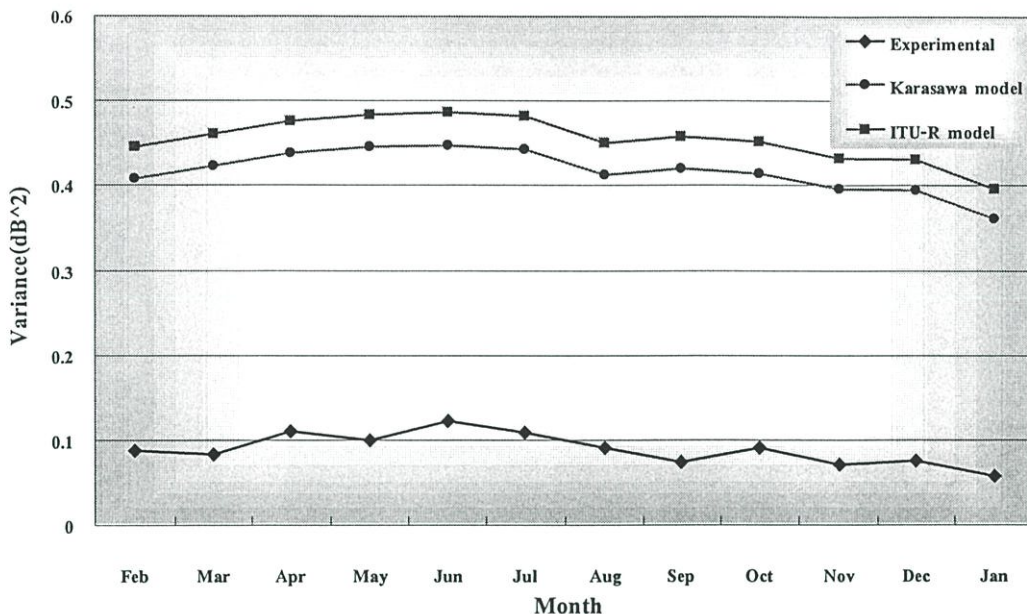
จากตัวอย่างการแจกแจงสะสมของระดับสัญญาณที่ถูกวัดได้ในเดือนมกราคม พ.ศ. 2546 เปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R [14] [16] จากสมการ (3.26) และ (3.27) สำหรับสัญญาณเฟดและสัญญาณเอนฮานสเมนต์ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยอินพุตพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลอง คือ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งนำมาเฉลี่ยให้ครอบคลุมกับระยะเวลาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของเดือนมกราคม จะได้ค่าดัชนีหักเหในชั้นบรรยากาศ N_{wet} ของเดือนมกราคมเท่ากับ 103.56 ppm และสมมติให้ความสูง h ของชั้นบรรยากาศที่แปรปรวนเท่ากับ 1000 เมตรสำหรับแบบจำลองของ ITU-R และเท่ากับ 2000 เมตร

สำหรับแบบจำลองของKarasawa และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ $f = 12.260$ GHz , $\epsilon = 59^\circ$, $\phi = 0.3$ m , $\eta = 0.5$ และเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง จะเห็นได้ว่าทั้งสองแบบจำลองมีการประมาณค่าระดับสัญญาณเกินกว่าการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง

สำหรับรูปที่ 4.12 แสดงค่าความแปรปรวนที่วัดได้ σ^2 เปรียบเทียบกับค่าความแปรปรวน σ_{It}^2 ที่จำลองจากแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R ในสมการ (3.20) และ (3.23) ตามลำดับ โดยแสดงเป็นค่าความแปรปรวนในแต่ละเดือนของระยะเวลา 1 ปี จะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความแปรปรวนของแบบจำลองทั้งสองนั้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแปรปรวนที่วัดได้ σ^2 โดยแบบจำลองของ Karasawa จะประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความแปรปรวนที่วัดได้ σ_{It}^2 มากกว่าแบบจำลองของ ITU-R จากรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้งสองยังคงไม่เหมาะสมกับลักษณะข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน โดยในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการปรับค่าพารามิเตอร์ทางออดิโนมิเวีย ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.11 การแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่วัดได้ของเดือนมกราคม 2546 เปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่วัดได้กับแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R

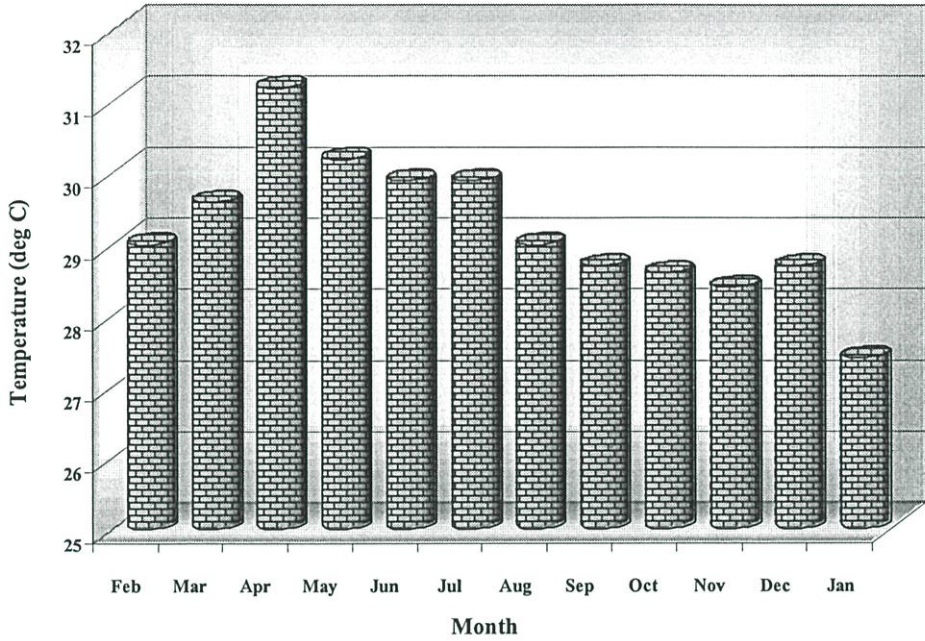
4.2.1.4 ความสัมพันธ์ทางอุตุนิยมวิทยา

เนื่องจากแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R ได้นำค่าพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยามาใช้ร่วมในการคำนวณแบบจำลอง ดังนั้นการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันในแต่ละสถานที่ สามารถทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง นั่นคือ ค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนและค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียกที่เกิดขึ้น

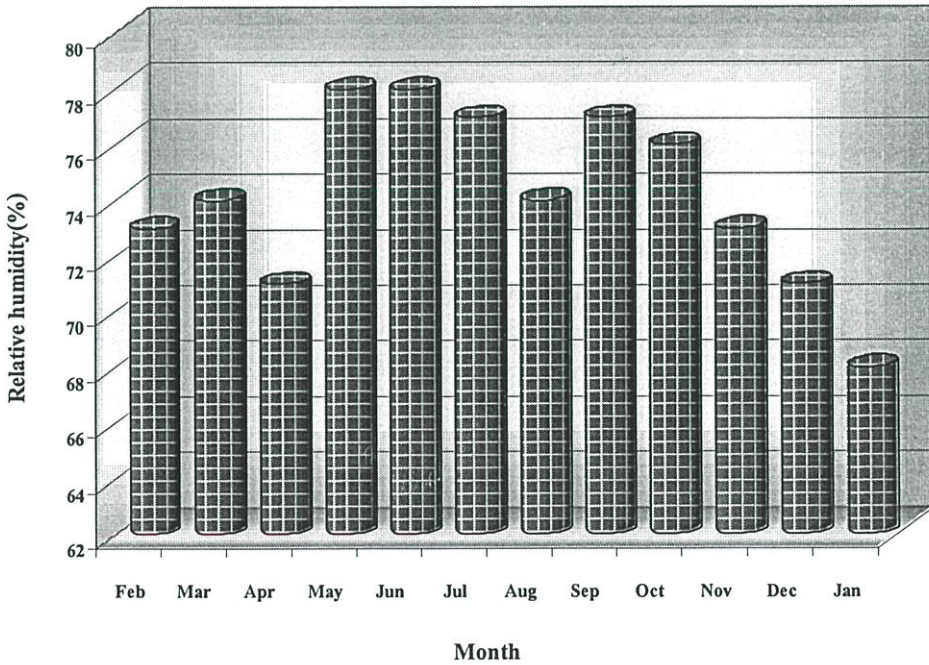
4.2.1.4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันในระยะสั้น

การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละสถานที่ ซึ่งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน คือ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่าตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียกนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.22) ในหัวข้อ 3.1.4.1

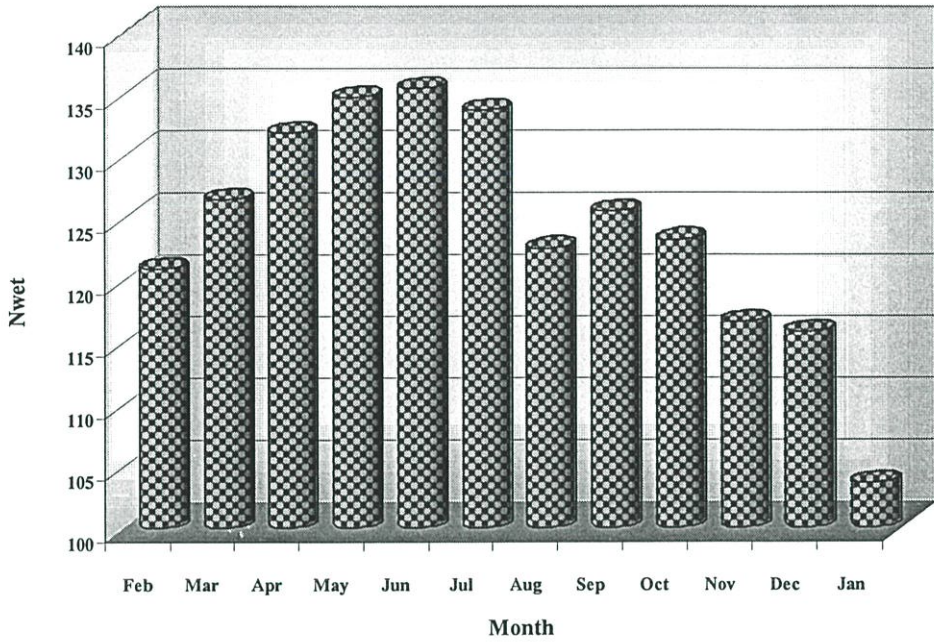
รูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละเดือนของระยะเวลา 1 ปี สำหรับรูปที่ 4.15 แสดงค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ที่คำนวณจากสมการ (3.22) โดยใช้ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14



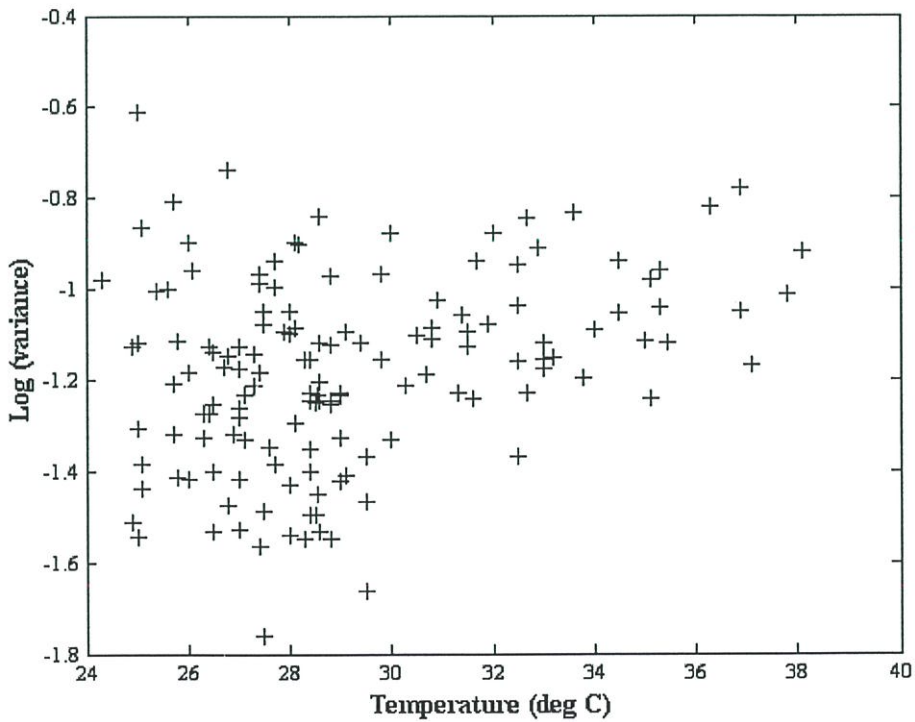
รูปที่ 4.13 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงของระยะเวลา 1 ปี



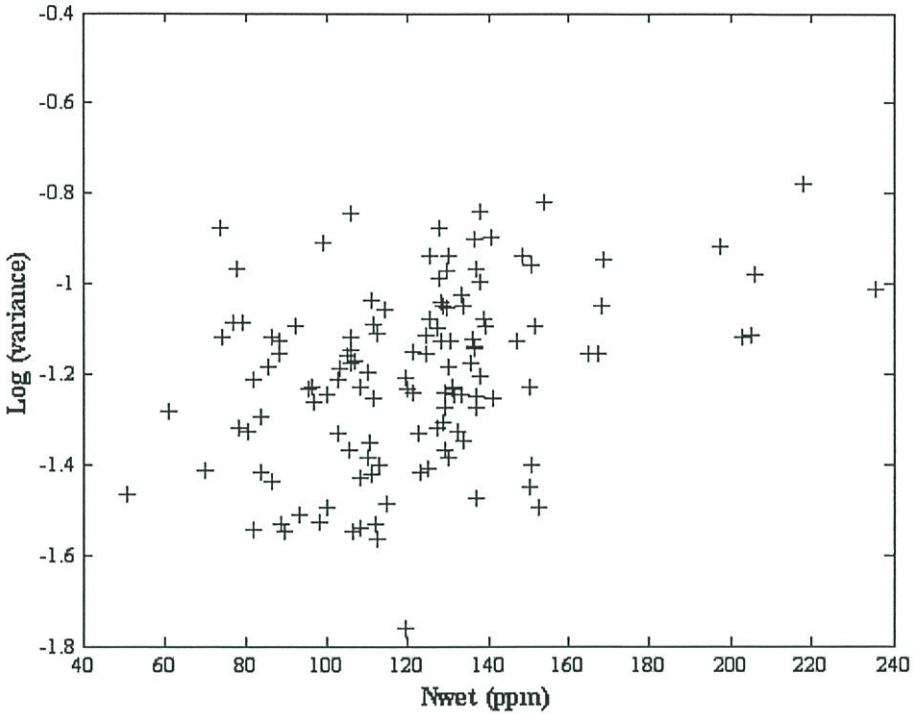
รูปที่ 4.14 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจริงของระยะเวลา 1 ปี



รูปที่ 4.15 ค่าดัชนีหักเหของส่วนเปียกที่คำนวณได้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อกความแปรปรวน ($\log \sigma^2$) ของการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันและอุณหภูมิในแต่ละชั่วโมง

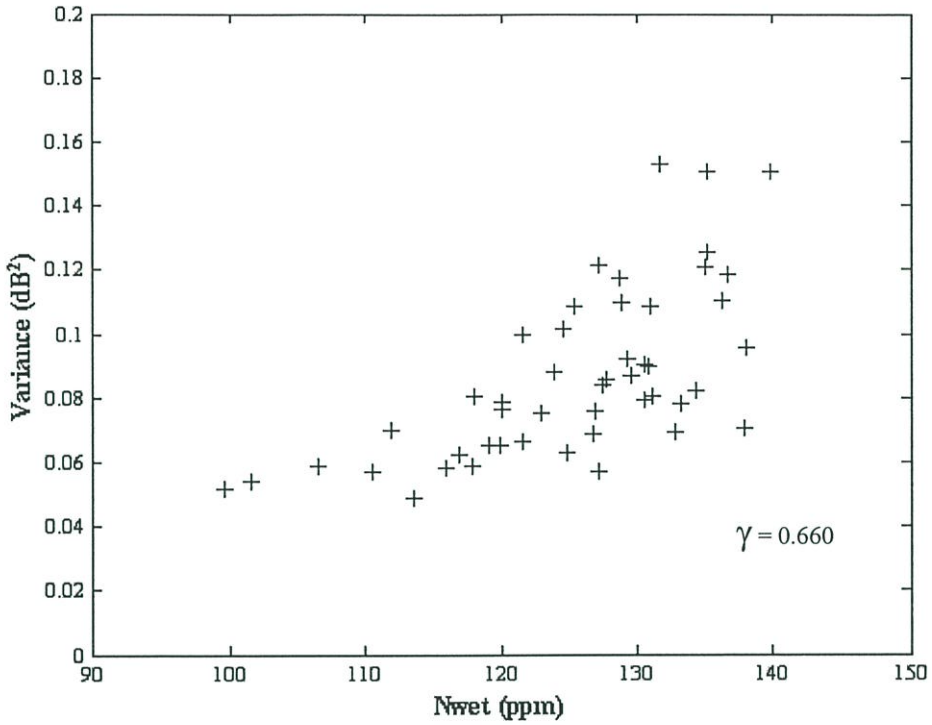


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อกของความแปรปรวน ($\log \sigma^2$) ของการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันและค่าดัชนีการหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ในแต่ละชั่วโมง

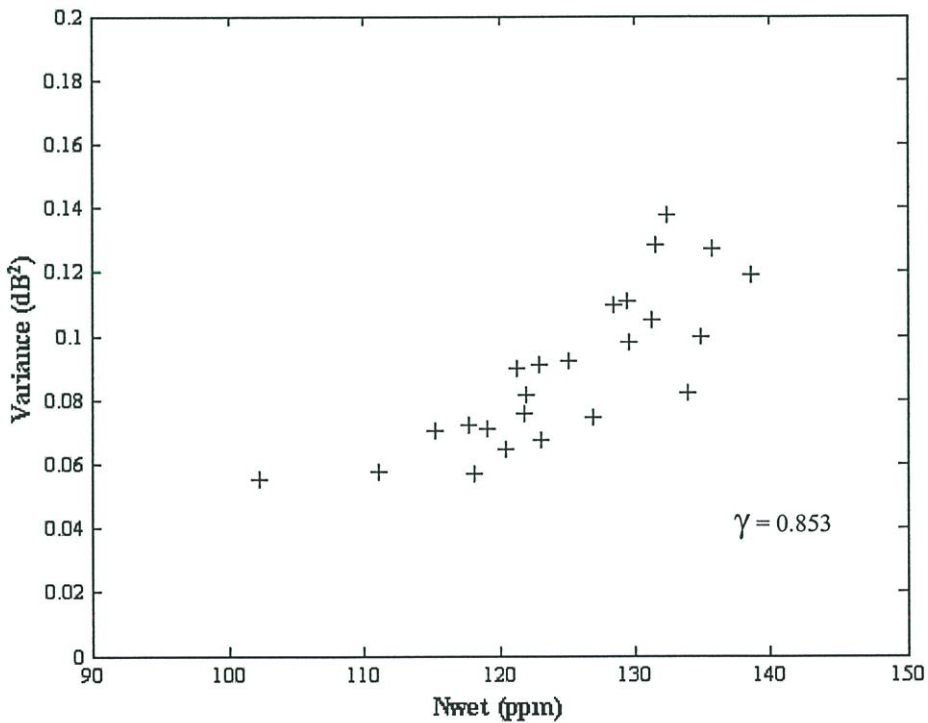
รูปที่ 4.16 แสดงการพล็อตแบบกระจายเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน (ค่าล็อกของความแปรปรวน, $\log \sigma^2$) และ อุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละชั่วโมง และรูปที่ 4.17 แสดงการพล็อตแบบกระจายระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันและค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} จากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่าระหว่างค่าล็อกของความแปรปรวนและค่าอุณหภูมิและค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} มีความสัมพันธ์ที่ติดต่อกัน

4.2.1.4.2 การแสดงค่าสหสัมพันธ์ในระยะยาวของค่าดัชนีการหักเหในส่วนเปียก

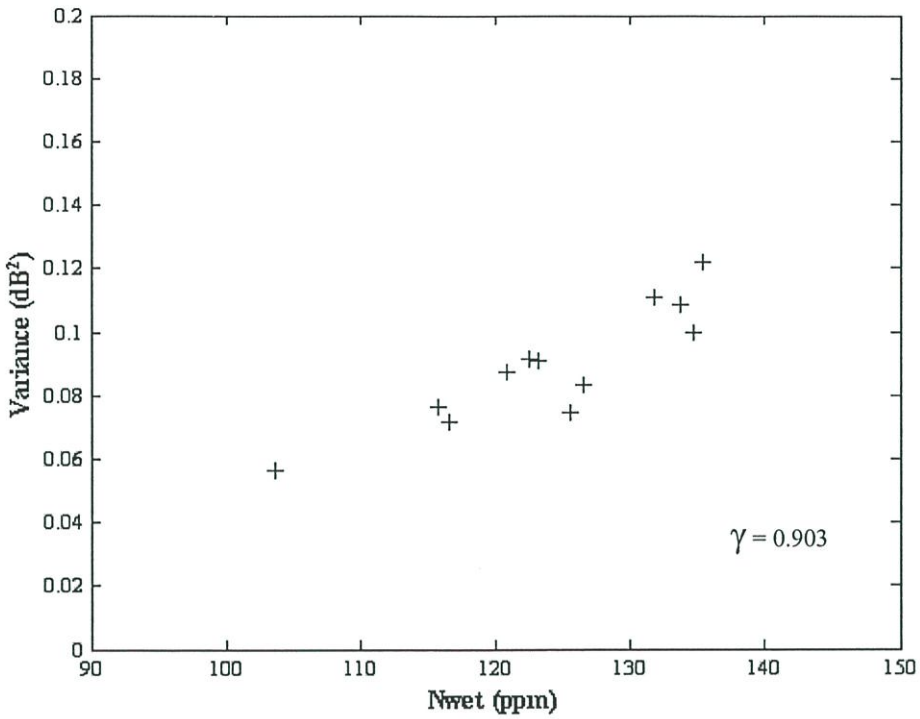
โดยในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ของระยะเวลาเฉลี่ยต่าง ๆ วัตถุประสงค์ก็เพื่อหาอิทธิพลของระยะเวลาเฉลี่ยที่เหมาะสมของค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} เพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าความแปรปรวน σ^2 ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น



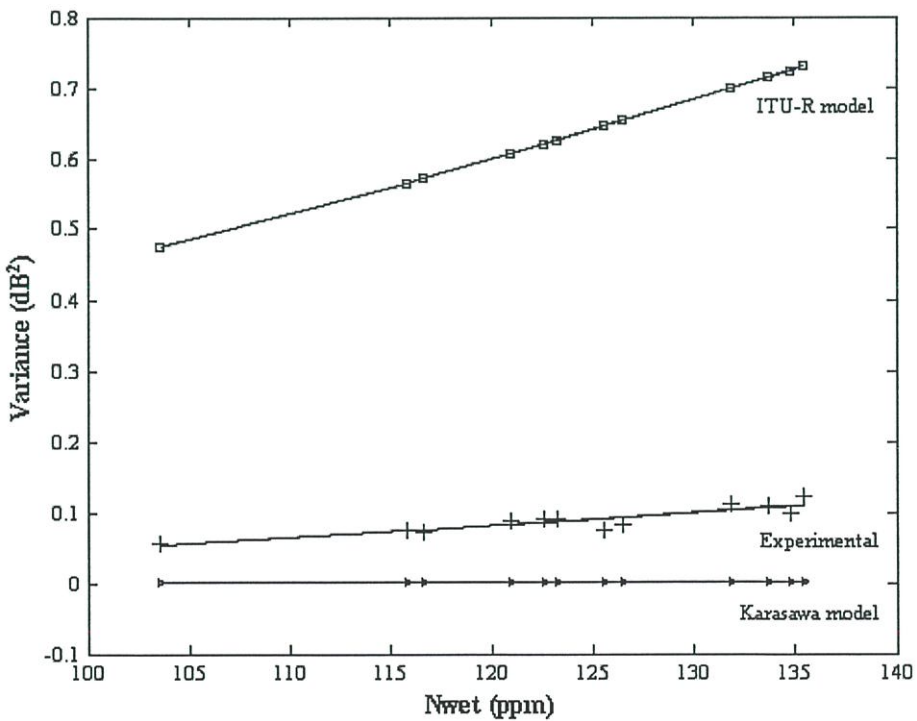
รูปที่ 4.18 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีการหักเห
ในส่วนเปียก N_{wet} ระยะเวลาเฉลี่ย 7 วัน



รูปที่ 4.19 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเห
ในส่วนเปียก N_{wet} ระยะเวลาเฉลี่ย 15 วัน



รูปที่ 4.20 การพล็อตแบบกระจายระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเห ในส่วนเปียก N_{wet} ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบผลการจำลองค่าความแปรปรวน σ^2 ระหว่างแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการออกแบบจำลองที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน

การแสดงค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ซึ่งถูกพล็อตแบบกระจายแสดงในรูปที่ 4.18 รูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20 โดยค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} จะถูกเฉลี่ยครอบคลุมระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 7 วัน 15 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ของระยะเวลาเฉลี่ยต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยได้คาดหวังก่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} จะดีสำหรับระยะเวลาเฉลี่ย 1 เดือน

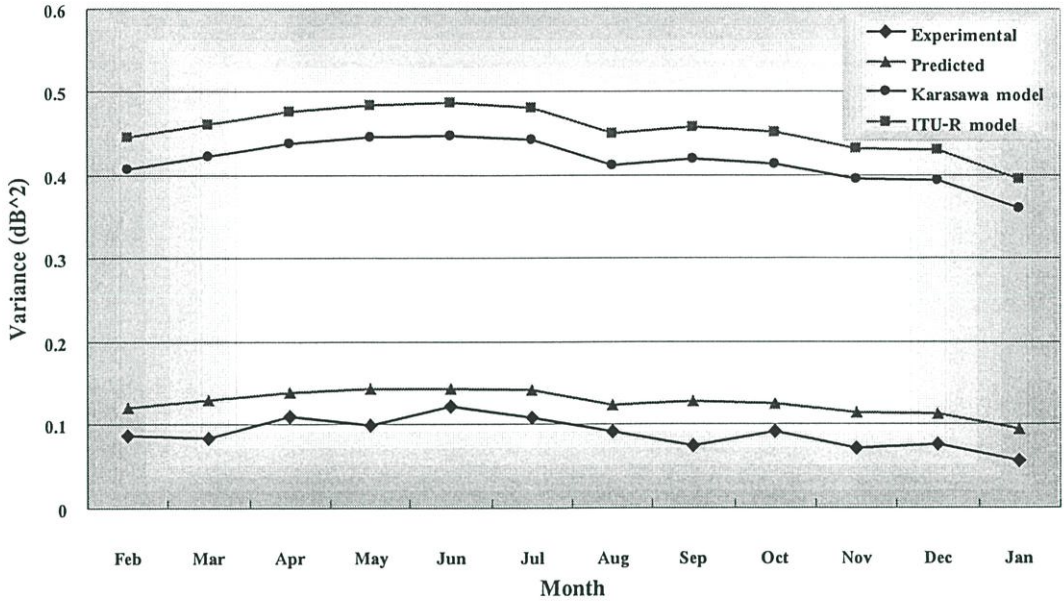
ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ตามระยะเวลาเฉลี่ยต่างๆ

ระยะเวลา	ค่าสหสัมพันธ์
7 วัน	0.660
15 วัน	0.853
30 วัน	0.903

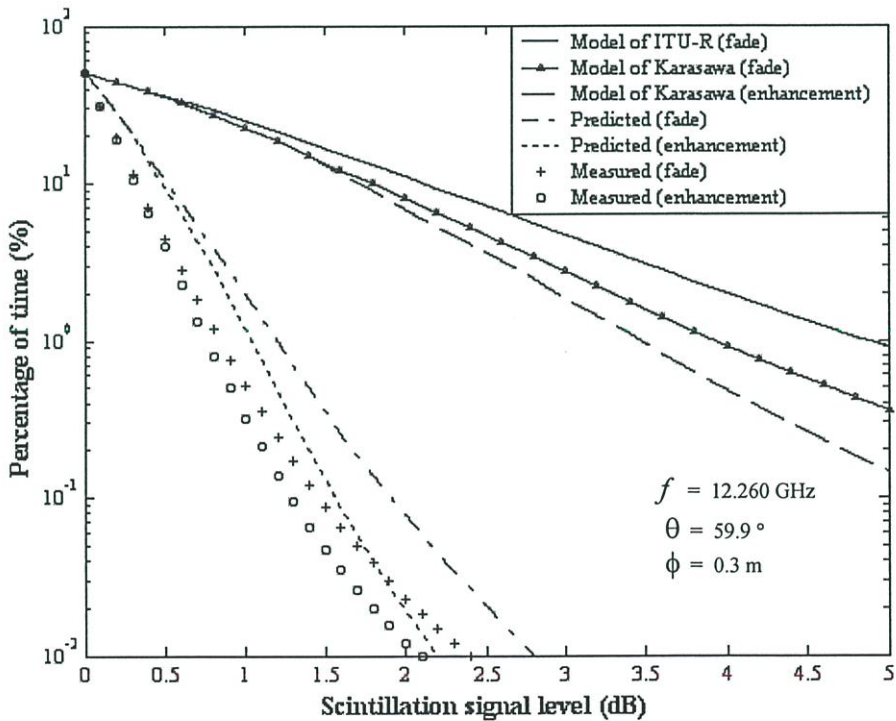
รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเส้นแนวโน้มที่เหมาะสมของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้ของระยะเวลาเฉลี่ย 30 วันและแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R ในสมการ (3.21) และสมการ (3.23) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเส้นสมการที่จำลองโดยแบบจำลองของ ITU-R จะสูงกว่าเส้นแนวโน้มที่เหมาะสมของค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้จริงค่อนข้างมาก ส่วนเส้นสมการของแบบจำลอง Karasawa นั้นจะมีค่าต่ำกว่าค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้ จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.20 จะได้ค่าความแปรปรวน σ^2 ที่เหมาะสมกับลักษณะข้อมูลเป็น

$$\sigma_n^2 = (0.003N_{wet} - 0.1313)^2 \quad \text{dB}^2 \quad (4.2)$$

เมื่อนำสมการ (4.2) แทนลงสมการ (3.20) และสมการ (3.23) ซึ่งเป็นสมการจำลองค่าความแปรปรวนในระยะยาว σ_{lt}^2 โดยพล็อตเปรียบเทียบด้วยข้อมูลระยะเวลา 1 ปี แสดงดังรูปที่ 4.22 ปรากฏว่าสามารถจำลองค่า σ_{lt}^2 ได้ใกล้เคียงมากกว่าแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R โดยเลือกใช้สมการ (3.20) ในการจำลองค่า σ_{lt}^2

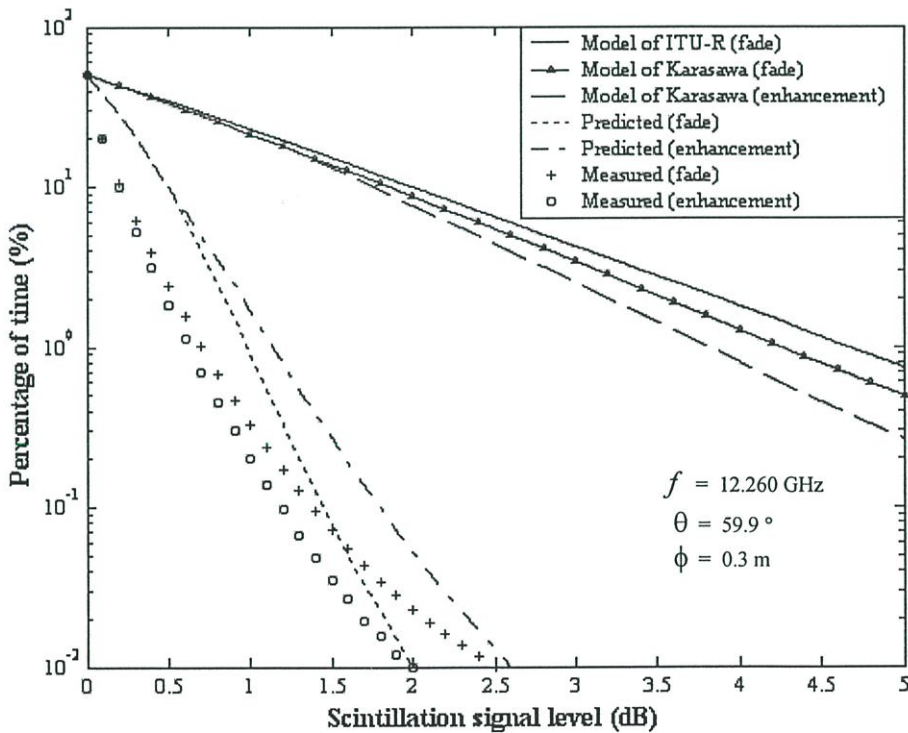


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบระหว่างค่าความแปรปรวนในระยะยาว σ_{It}^2 ที่จำลองได้และแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R

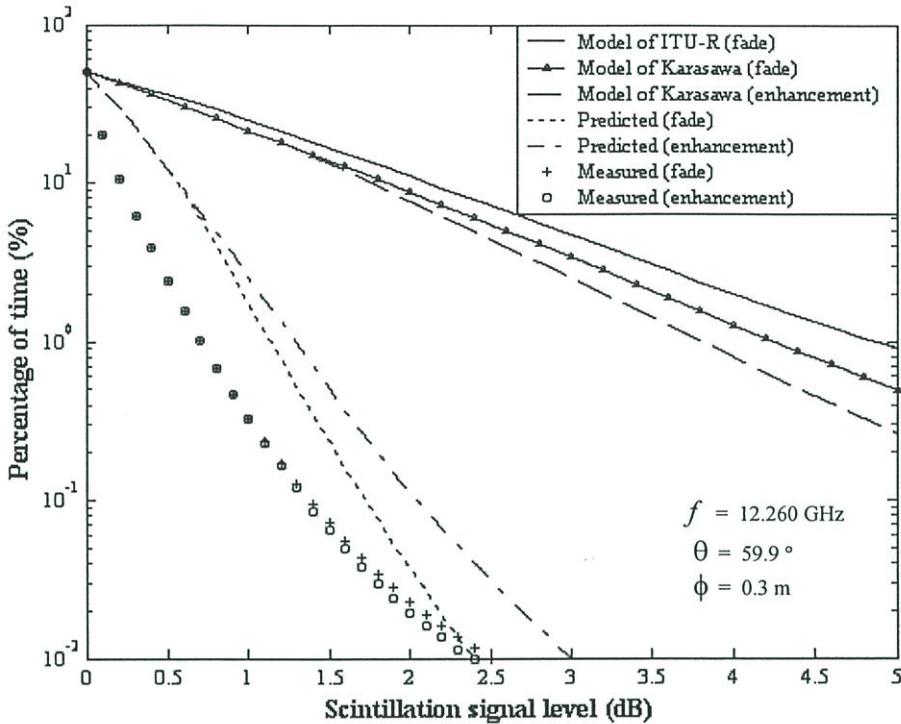


รูปที่ 4.23 การแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันหั่นเดือนมกราคม พ.ศ. 2546 ที่วัดได้เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลอง

รูปที่ 4.23 การแจกแจงสะสมของระดับสัญญาณของแบบจำลอง Karasawa และ ITU-R เปรียบเทียบกับการจำลองที่ได้ของเดือนมกราคม พ.ศ. 2546 โดยนำค่าความแปรปรวนในสมการ (4.2) แทนลงในสมการ (3.20) และแทนลงในสมการ (3.27) สำหรับสัญญาณเฟดและสมการ (3.26) สำหรับสัญญาณเอนฮานสมเมนต์ จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลองใหม่จะใกล้เคียงกับลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน มากกว่าแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R ทั้งสัญญาณเฟดและสัญญาณเอนฮานสมเมนต์ สำหรับรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของแบบจำลอง Karasawa และ ITU-R เปรียบเทียบกับการจำลองที่ได้ของเดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 และเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2545 ตามลำดับ โดยค่าดัชนีหักเหในชั้นเปียก N_{wet} ของเดือนตุลาคมเท่ากับ 123.31 ppm และเดือนมิถุนายนเท่ากับ 135.45 ppm ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะใช้เหมือนกับเดือนมกราคมในหัวข้อ 4.2.1.36 จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 เส้นโค้งที่ได้จากการปรับปรุงจำลองใหม่จะใกล้เคียงกับลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นมากกว่าทั้งสัญญาณเฟดและสัญญาณเอนฮานสมเมนต์ของแบบจำลองทั้งสอง

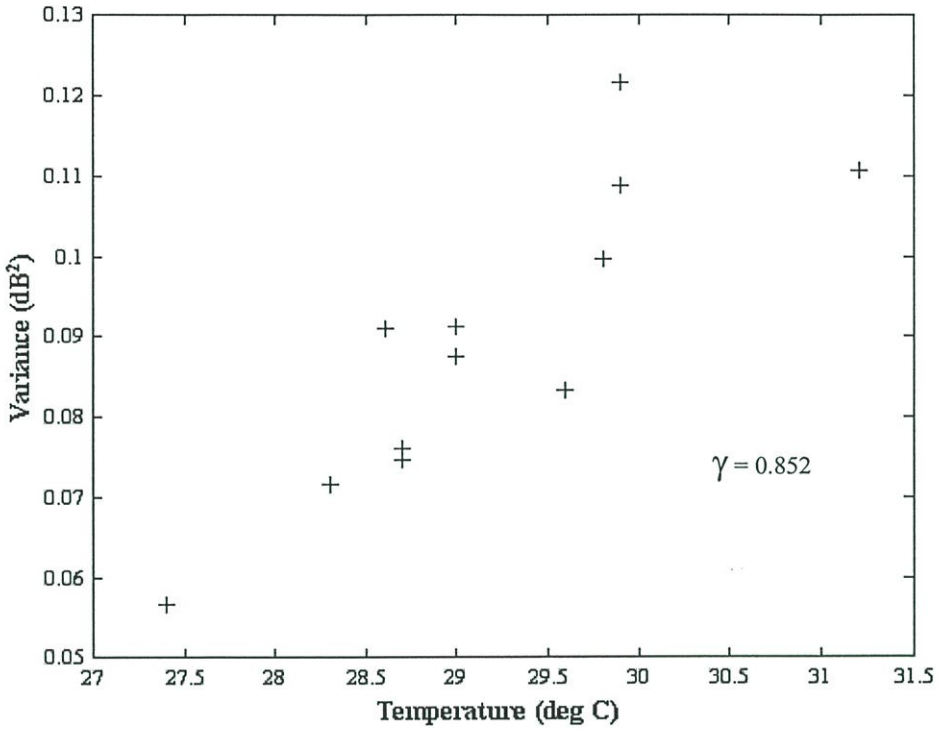


รูปที่ 4.24 การแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันของเดือนตุลาคม พ.ศ. 2545 ที่วัดได้เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลอง

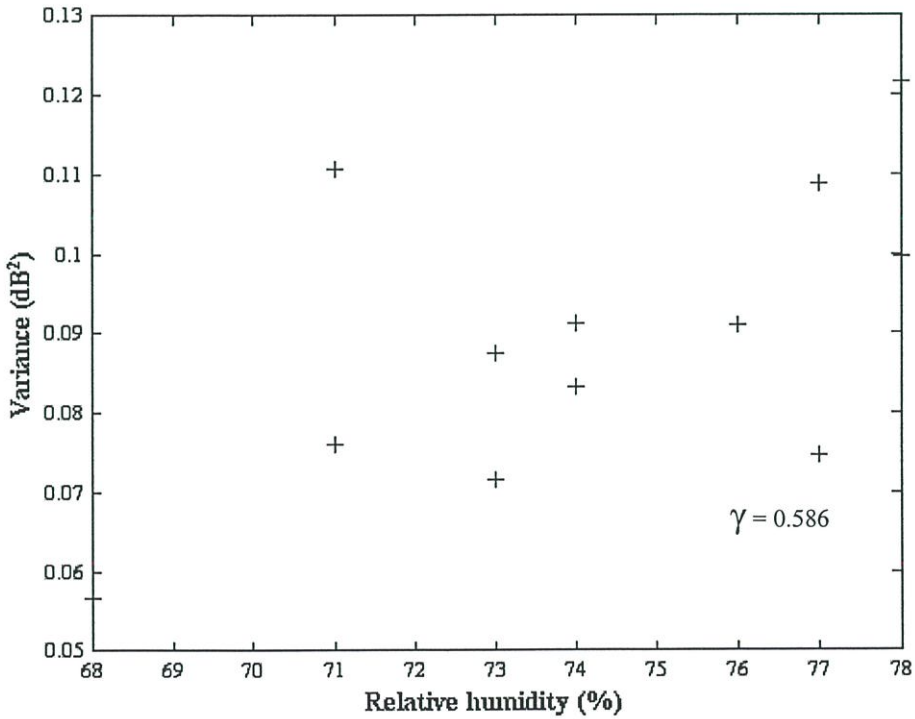


รูปที่ 4.25 การแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2545 ที่วัดได้เปรียบเทียบกับระหว่างแบบจำลองของ Karasawa และ ITU-R และที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลอง

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาเฉลี่ย 1 เดือน ค่าสหสัมพันธ์จะสูงที่สุดและสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลอง โดยได้คาดหวังว่าค่าสหสัมพันธ์ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วันควรมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 0.95 จากการตรวจสอบพบว่าสาเหตุที่ค่าสหสัมพันธ์ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วันน้อยกว่า 0.95 เนื่องจากค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนที่วัดได้ σ^2 และความชันสัมพัทธ์มีค่าไม่สูงมากนัก จึงทำให้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนที่วัดได้กับค่าดัชนีหักเหมีค่าน้อย โดยรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนที่วัดได้ σ^2 และค่าอุณหภูมิ ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองเท่ากับ 0.852 สำหรับรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนที่วัดได้ σ^2 และค่าความชันสัมพัทธ์ จะเห็นได้ว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองเท่ากับ 0.586 ซึ่งค่อนข้างน้อย



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้และอุณหภูมิ
ของระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้และความชื้นสัมพัทธ์
ของระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน

4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเป็ยก

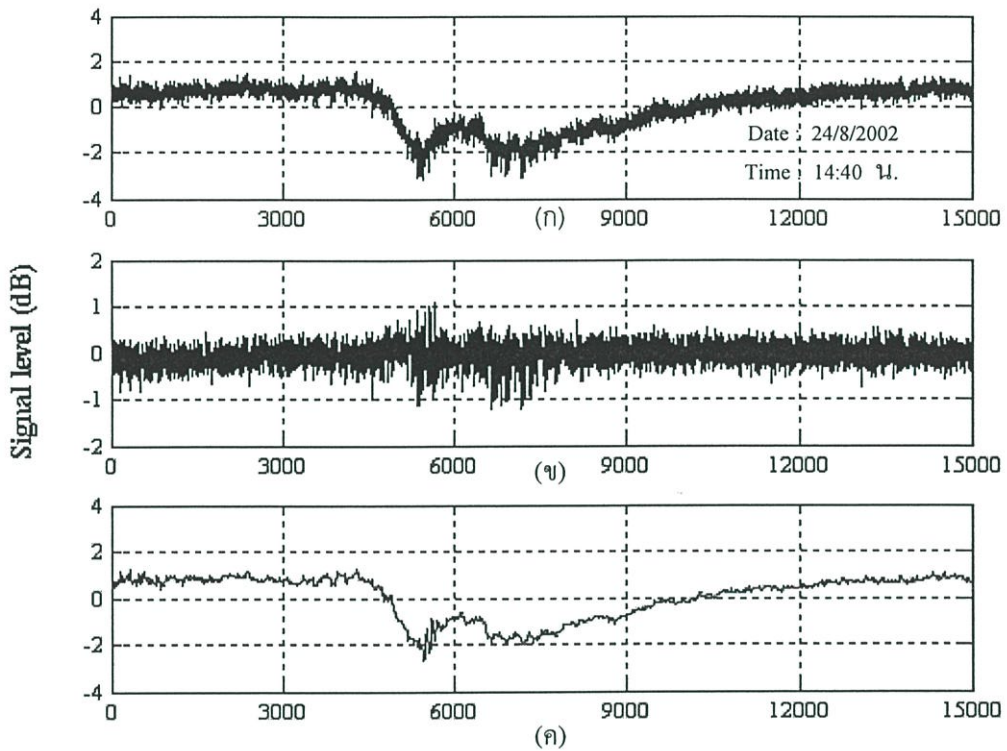
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณแบบเป็ยกนั้น เป็นการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่เกิดขึ้นในขณะฝนตก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาว่าการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณขณะเกิดฝนตก มีลักษณะแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้งอย่างไร ซึ่งก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจำเป็นต้องแยกผลกระทบของการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝนออกจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันเสียก่อน

4.2.2.1 การแยกการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันและการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝน

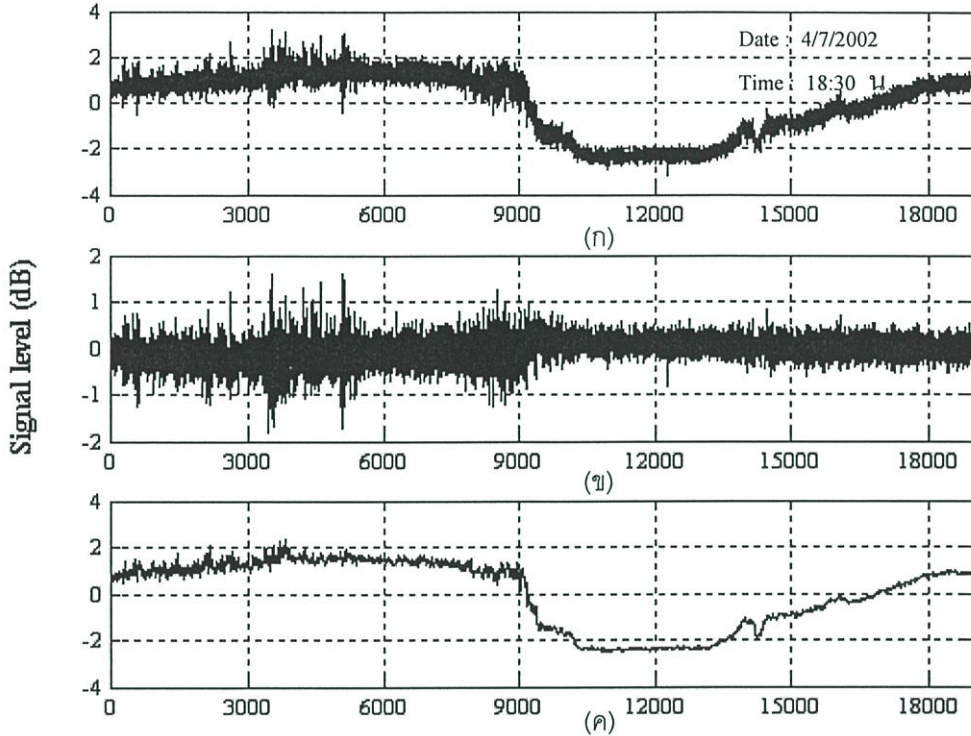
ในหัวข้อนี้ อธิบายกระบวนการแยกการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝนออกจากกัน เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้บริเวณเส้นศูนย์สูตร เป็นเขตอากาศร้อน อากาศแปรปรวนตลอดเวลา สำหรับในฤดูฝนบางครั้งฝนตกหนักติดต่อกันเป็นเวลานานส่งผลกระทบต่อระบบการส่งสัญญาณผ่านดาวเทียมอย่างมาก จากการเก็บข้อมูลที่ผ่านมามีพบว่าในขณะที่ฝนตกจะเกิดผลกระทบทั้งสองขึ้นพร้อมกัน ทำให้วิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณได้ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญในการแยกการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝนออกจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ (Filter) โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟไอ ไอ อาร์ (Adaptive IIR Digital Filter) อัลกอริทึมแบบ Quantized Least Mean p -Power (QLMP) [17], [18], [19] เนื่องจากการทำงานของตัวกรองนี้ไม่ยุ่งยากและสะดวกต่อการใช้งาน จากภาคผนวก ง สามารถแยกผลกระทบการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝนออกจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันได้เป็นผลสำเร็จ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29

รูปที่ 4.28 (ก) แสดงตัวอย่างอินพุตจากสัญญาณผ่านดาวเทียมขณะเกิดฝนตกและเกิดผลกระทบทั้งสองพร้อมกันในวันที่ 24 สิงหาคม 2545 รูปที่ 4.28 (ข) แสดงผลการกรองการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากสัญญาณอินพุตโดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านสูงแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ของอัลกอริทึม QLMP โดยปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ $\rho=0.955$, $\mu=0.000008$, $\eta=1$ รูปที่ 4.28 (ค) แสดงผลการของการกรองการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน โดยการป้อนสัญญาณอินพุตผ่านตัวกรองความถี่ผ่านต่ำแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ของอัลกอริทึม QLMP โดยปรับค่าพารามิเตอร์เช่นเดียวกับตัวกรองความถี่สูงผ่านแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์

สำหรับรูปที่ 4.29 เป็นอีกตัวอย่างแสดงการแยกผลกระทบทั้งสองออกจากกัน โดยใช้ตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ของอัลกอริทึม QLMP ของข้อมูลวันที่ 4 กรกฎาคม 2545 โดยปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ $\rho=0.955$, $\mu=0.000008$, $\eta=1$



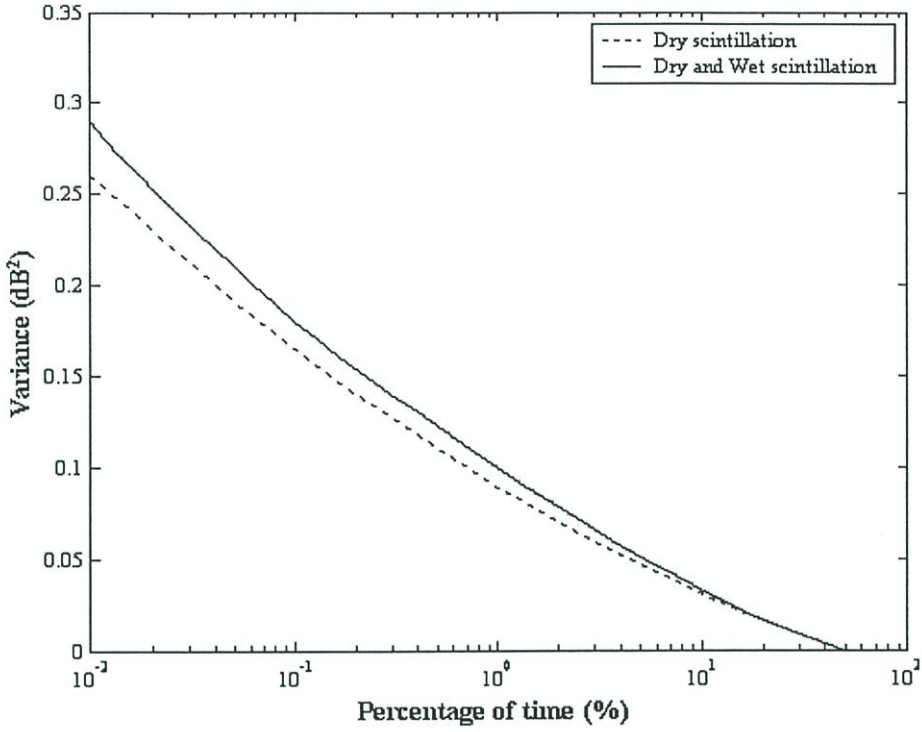
- รูปที่ 4.28 การแยกผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝนออกจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ของข้อมูลวันที่ 24 เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2545
- (ก) แสดงตัวอย่างอินพุตจากสัญญาณผ่านควมเทียมขณะฝนตกและเกิดผลกระทบทั้งสอง
- (ข) แสดงผลการกรองการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากสัญญาณอินพุต โดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านสูงแบบอะแคปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ของอัลกอริทึม QLMP
- (ค) แสดงผลการกรองการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝน โดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านต่ำแบบอะแคปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ของอัลกอริทึม QLMP



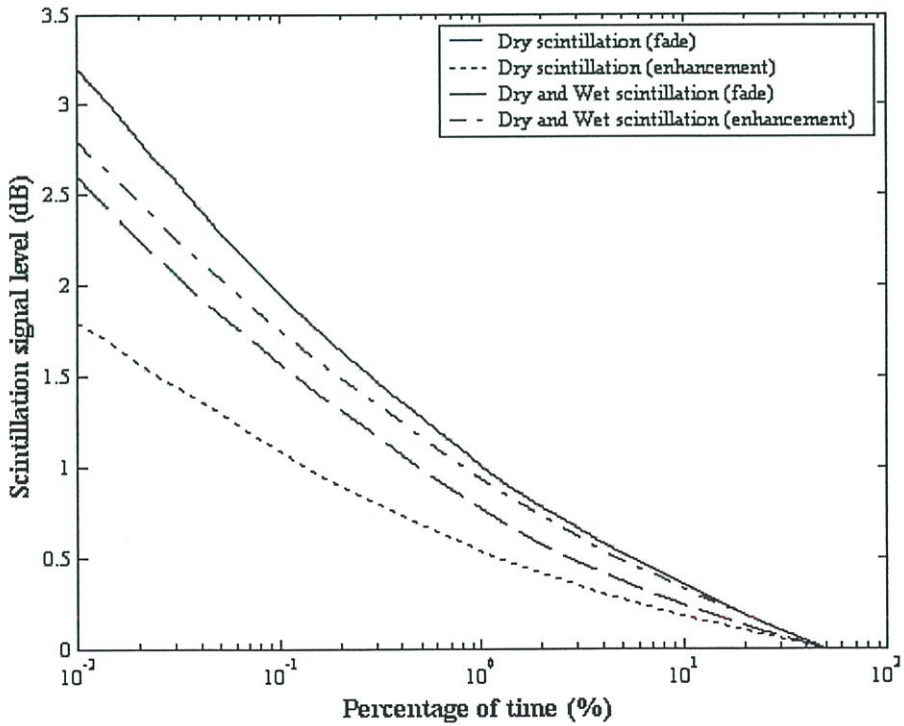
- รูปที่ 4.29 การแยกผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝนออกจากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ของข้อมูลวันที่ 4 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2545
- (ก) แสดงตัวอย่างอินพุตจากสัญญาณผ่านดาวเทียมขณะฝนตกและเกิดผลกระทบทั้งสอง
- (ข) แสดงผลการกรองการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากสัญญาณอินพุต โดยใช้ตัวกรองความความถี่ผ่านสูงแบบอะแคปทีฟ ไอ ไอ อาร์ของอัลกอริทึม QLMP
- (ค) แสดงผลการกรองการลดทอนสัญญาณเนื่องจากน้ำฝน โดยใช้ตัวกรองความถี่ผ่านต่ำแบบอะแคปทีฟ ไอ ไอ อาร์ของอัลกอริทึม QLMP

4.2.2.2 การแจกแจงสะสม

รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของค่าความแปรปรวน σ^2 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้งและแบบเปียกของระยะเวลา 1 ปี โดยการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเปียกจะประกอบด้วยแบบแห้งและแบบเปียก เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความแปรปรวน σ^2 ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเปียก จะมีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้ง เนื่องจากขณะที่เกิดฝนตกค่าพิคทิวคของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณที่ได้มีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณขณะไม่เกิดฝนตก

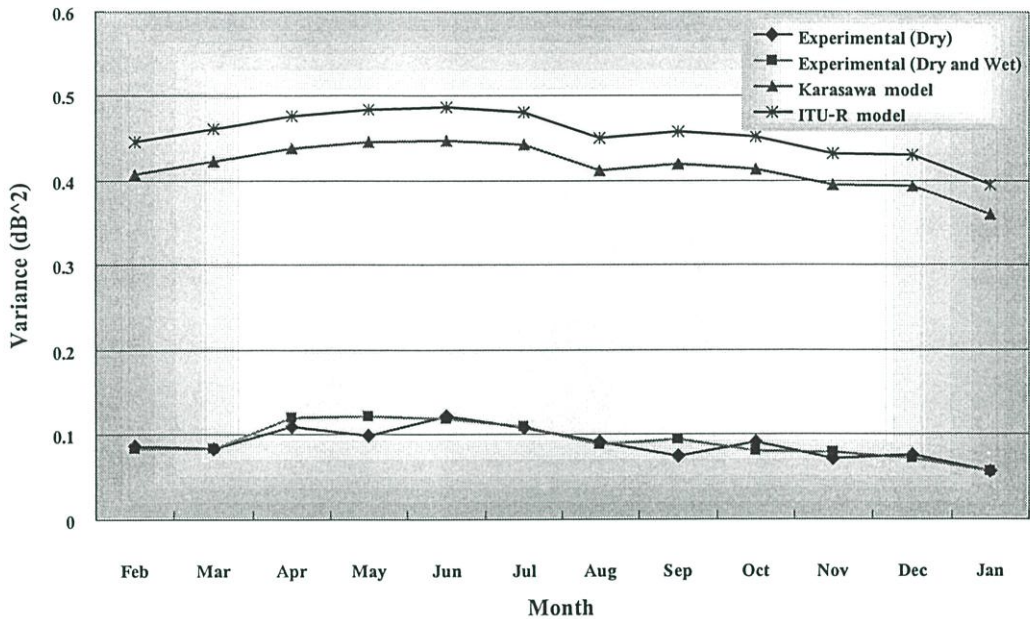


รูปที่ 4.30 การแจกแจงสะสมของค่าความแปรปรวน σ^2 ขณะเกิดฝนและปราศจากฝน



รูปที่ 4.31 การแจกแจงสะสมของระดับสัญญาณขณะเกิดฝนและปราศจากฝน

สำหรับรูปที่ 4.31 แสดงการแจกแจงสะสมระดับสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้งและแบบเปียก จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเปียกจะมีระดับสัญญาณสูงกว่าแบบแห้ง และระดับสัญญาณเฟดจะมีค่ามากกว่าสัญญาณแอนฮานสมেন্টทั้งในการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณแบบแห้งและแบบเปียก



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่าความแปรปรวน σ^2 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้งและแบบเปียกที่วัดได้ และแบบจำลองของKarasawa และ ITU-R โดยใช้สมการ (3.20) และสมการ (3.23) ตามลำดับ

รูปที่ 4.32 แสดงค่าความแปรปรวน σ^2 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้งและแบบเปียกเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Karasawa และ ITU-R สำหรับระยะเวลา 1 ปี จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความแปรปรวน σ^2 ของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเปียกจะใกล้เคียงกับค่าความแปรปรวน σ^2 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้ง แต่ในเดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคมซึ่งเป็นเดือนที่เกิดฝนตกหนัก ค่าความแปรปรวน σ^2 ของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเปียกจะสูงกว่า

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปและวิเคราะห์

ในบทนี้ เป็นผลการวิจัยของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลอง ทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยศึกษาและวิเคราะห์จากการวัดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ณ สถานีรับสถานบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ย่านความถี่ Ku ความถี่ 12.260 GHz จากการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแจกแจงค่าความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันที่นำเสนอ คือ การแจกแจงแบบปรกติลือกและการแจกแจงแบบแกมมา สามารถใช้สำหรับการแจกแจงข้อมูลได้ดีพอ ๆ กัน ในบางครั้งการแจกแจงแบบปรกติลือกจะเหมาะสมกับข้อมูลมากกว่าการแจกแจงแบบแกมมา บางครั้งการแจกแจงแบบแกมมาจะเหมาะสมกับข้อมูลมากกว่าการแจกแจงแบบปรกติลือก และบางครั้งก็ไม่เหมาะสมทั้งสองแบบ เพราะฉะนั้นจึงสรุปว่าการแจกแจงทั้งสองเป็นการประมาณค่าเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม สำหรับอธิบายการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน

2. การแจกแจงแบบแกมมาซึ่งมีอินพุตพารามิเตอร์ คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ σ จะมีค่าสหสัมพันธ์ที่ดีกว่าการแจกแจงแบบปรกติลือกซึ่งมีอินพุตพารามิเตอร์ คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\log \sigma^2$ จากการทดลองจะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบแกมมา คือ $m\sigma^2 = 14.949\sigma^2 + 0.0619$ แต่จะแตกต่างจาก การทำนายของแบบจำลองคาราชาวา ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น $m\sigma^2 = 10\sigma^2$ หากนำค่าที่ได้จากการเก็บรวบรวมไปใช้ในการออกแบบจำลองจะเกิดความยุ่งยากเนื่องจากค่า $\sigma\sigma$ จะไม่เป็นสัดส่วนกับค่า $m\sigma$ ดังนั้นในการทดลองจึงใช้ความสัมพันธ์ของแบบจำลองคาราชาวา

3. จากการเปรียบเทียบค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้และคำนวณจากแบบจำลองคาราชาวาและ ITU-R พบว่ามีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเหมาะสมค่าพารามิเตอร์ที่สามารถนำมาปรับปรุงแบบจำลองได้ คือ ค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} บนระยะเวลาเฉลี่ยต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าค่าสหสัมพันธ์จะดีที่สุดที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วัน และได้ค่าความแปรปรวนที่ทำนาย คือ $\sigma_n^2 = (0.003 N_{wet} - 0.1313)^2$ เมื่อนำสมการนี้มาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าความแปรปรวน σ^2 ของแบบจำลองทั้งสอง พบว่าสามารถจำลองได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้มากกว่า

4. ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ของระยะเวลาเฉลี่ย 30 วันที่ทดลองได้ คือ 0.903 โดยเราได้คาดหวังว่าค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 วันควรมากกว่า 0.95 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนที่วัดได้ σ^2 และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าไม่สูงมากนัก จึงทำให้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} น้อยลง

5. ค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียก N_{wet} ที่นำเสนอ ไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวันตามค่าการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันที่วัดได้

6. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันจำเป็นต้องแยกผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝนออกการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ อัลกอริทึมแบบ QLMP ในการแยกผลกระทบทั้งสองออกจากกัน เนื่องจากการทำงานของตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ไม่ยุ่งยากในการใช้งานและสามารถกรองผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝนออกได้เป็นที่น่าพอใจ สามารถปรับปรุงตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้โดยการปรับปรุงอัลกอริทึม เช่น สามารถปรับค่า Step-size ของค่าสัมประสิทธิ์ได้

7. จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบแห้งและแบบเปียก ซึ่งแบบเปียกประกอบด้วยแบบแห้งและแบบเปียกรวมกัน จากผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์ความน่าจะเป็นการเกิดค่าความแปรปรวน σ^2 ของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันแบบเปียกมีค่าสูงกว่าแบบแห้ง เนื่องจากขณะที่ฝนตกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันจะสูงกว่าขณะที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

จากการศึกษาแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ของคาราชาวาและ ITU-R โดยใช้ข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 ปีนั้นอาจจะมี ความละเอียดไม่เพียงพอจึงทำให้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวน σ^2 ที่วัดได้และค่าดัชนีหักเหในส่วนเปียกมีค่าสูงไม่มากนัก เพื่อให้ได้การแบบจำลองที่แม่นยำควรใช้ข้อมูลหลาย ๆ ปี เช่น 3 ปีขึ้นไป หรืออาจจะเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จากสถานีอื่น ๆ อีกทั้งการปรับปรุงแบบจำลองอาจนำค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ เข้ามาใช้ได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาวิจัยต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Simon R. Saunders.: “ Antennas and Propagation for Wireless Communication System ”, John Wiley, 1999.
- [2] International Telecommunication Union ,*ITU-R Recommendation P838*, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, Geneva, 1992.
- [3] Fante, R. L.: “ Electromagnetic beam propagation in turbulent media: an update”, *Proc. IEEE.*, 1980, 68(11), pp 1424-1443.
- [4] Ishimaru, A. : “ Wave propagation and Scattering in Random Media ”, 2 , Academic Press, NewYork, 1978.
- [5] Cole, R. S., K. L. Ho and N. D. Mavroukoulakis.: “ The effect of the outer scale of turbulence and wavelength on scintillation fading at millimeter wavelengths ”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1978, 26(5), pp 712-715
- [6] Haddon, J. and E. Vilar.: “ Scattering Induced Microwave Scintillations from Clear Air and Rain in Earth Space Paths and the Influence of Antenna Aperture ”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1986, 34(5), pp. 646-657.
- [7] Banjo, O. P. and E. Vilar.: “ Measurement and Modeling of Amplitude Scintillations on Low-Elevation Earth-Space Paths and Impact on Communication Systems ”, *IEEE Trans.*, (1986), *Commun.*, 34(8), pp. 774-780.
- [8] Strohbehn, J. W., T. Wang, and J. P. Speck.: “ On the probability distribution of line-of-sight fluctuations of optical signals”, *Radio Sci.*, 1975, 10(1), pp 59-70.
- [9] Van de Kamp, M. M. J. L., J. K. Tervonen, E. T. Salonen, and J. P. V. Poiaras Baptista. : “ Improved Models for Long-Term Prediction of Tropospheric Scintillation on Slant Paths ”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1999, 47(2), pp 249-260.
- [10] Van de Kamp, M.M.J.L.: “ Asymmetrical signal level distribution due to tropospheric scintillation ”, *Electron. Lett.*, 1998, 34(11), pp 1145-1146.
- [11] Otung, I. E. and B. G. Evans.: “ Short term distribution of amplitude scintillation on a satellite link ”, *Electron. Lett.*, 1996, 31(16), pp 1328-1329.
- [12] Mouldsley, T. J. and E. Vilar. : “ Experimental and Theoretical Statistics of Microwave Amplitude Scintillations on Satellite Down Links ”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1982, 30(6), pp. 1099-1106.

- [13] Ortgies, G.: "Probability density function of amplitude scintillations", *Electron. Lett.*, 1985, 21(4), pp 141-142.
- [14] Karasawa, Y., M. Yamada and J. E. Allnutt.: " A New Prediction Method for Tropospheric Scintillation on Earth-Space Paths ", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1988, 36(11), pp. 1608-1614
- [15] Rogers, D. V. and J. E. Allnutt.: " A practical tropospheric scintillation model for low – elevation angle satellite systems", 5th International Conference on Antennas and Propagation, IEE Conf. Publ. 274, 1978, 2, pp 273-276.
- [16] ITU-R. : " Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunications systems ", Recommendations of the ITU-R, 5(F), Rec. PN. 618-3, 1994b, pp 329-343.
- [17] S. Haykin., *Adaptive Filter Theory*, Englewood Cliffs, Prentice Hall second edition, NJ, 1991.
- [18] S.C. Pei and C.C. Tseng.: " Adaptive IIR Notch Filter Based on Least Mean p-Power Error Criterion ", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol.40, no.8, Aug 1993, pp. 525-529.
- [19] P. Chumchu, R. Puchalard and C. Benjangkprasert.: " Simplify Adaptive IIR Notch Filter Based on Least Mean p-Power Error Critirion ", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, Nov. 1998, pp. 335-338.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของดาวเทียมไทยคม 2



รูปที่ ก.1 ดาวเทียมไทยคม 2

ก.1 คุณสมบัติของดาวเทียมไทยคม 2

ดาวเทียมไทยคม 2 เป็นดาวเทียมรุ่นแรกของโครงการดาวเทียมไทยคม เป็นดาวเทียมรุ่น HS-376 ผลิตโดยบริษัท ฮิวจ์ แอร์คราฟท์ ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ บริษัทโบอิงในปัจจุบัน พื้นที่การให้บริการย่านความถี่ C ของดาวเทียมไทยคม 2 ครอบคลุมประเทศไทย ลาว กัมพูชา เมียนมาร์ เวียดนาม มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ เกาหลี ญี่ปุ่น และชายฝั่งตะวันออกของประเทศจีน โดยมีความแรงของสัญญาณด้านขาลง (Down link) ณ ประเทศไทย 36 dBW (เดซิเบลวัตต์) ส่วนพื้นที่ให้บริการในย่านความถี่ Ku ของดาวเทียมไทยคม 2 ครอบคลุมประเทศไทยและประเทศในแถบอินโดจีน โดยมีความแรงของสัญญาณด้านขาลง 50 dBW

การออกแบบ	ดาวเทียมรุ่น HS-376 แบบ Dual spin
กำลัง	800 วัตต์
น้ำหนักขณะส่งขึ้นวงโคจร	1,080 กิโลกรัม
มวลในวงโคจร	เมื่อเริ่มใช้งานจะมีน้ำหนัก 629 กิโลกรัม เมื่อสิ้นสุดการใช้งาน จะมีน้ำหนัก 450 กิโลกรัม
อายุการใช้งาน	15 ปี

จำนวนช่องสัญญาณ	ย่านความถี่ C มีจำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยความถี่ของช่องสัญญาณของดาวเทียมอยู่ที่ 36 MHz ย่านความถี่ Ku มีจำนวน 3 ช่องสัญญาณ โดยความถี่ช่องสัญญาณอยู่ที่ 54 MHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	ย่านความถี่ C ความกว้างของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 500 MHz ย่านความถี่ Ku ความกว้างของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 250 MHz
ตำแหน่งวงโคจร	78.5 ° ตะวันออก
บริษัทนำส่งดาวเทียม	บริษัทเอเรียนสเปซ ประเทศฝรั่งเศส
วันให้บริการ	ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม 2537 เริ่มให้บริการในเดือนธันวาคม 2537

2. พื้นที่การให้บริการของดาวเทียมไทยคม 2



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.2 พื้นที่ให้บริการของดาวเทียมไทยคม 2

- (ก) ย่านความถี่ C
- (ข) ย่านความถี่ Ku

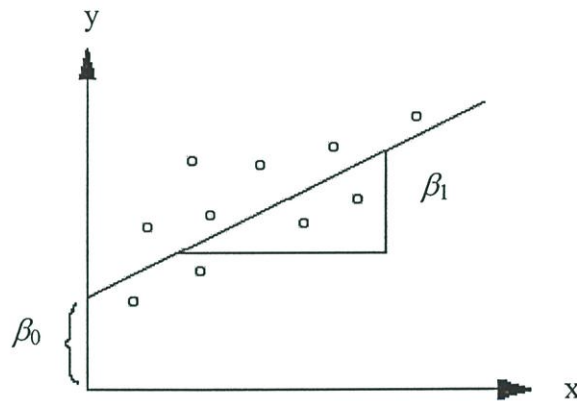
ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ความถดถอยและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ข.1 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear regression Analysis)

เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (\text{ข.1})$$



โดยที่ Y คือตัวแปรตาม (Dependent variable) เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่าของ X

X = ตัวแปรอิสระ (Independent variable)

β_0 = ส่วนตัดแกน Y หรือ คือค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์

e = ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (Random error)

β_1 = ความชัน (Slope) ของเส้นตรง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไป 1 หน่วยและจะเรียก β_1 ว่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression coefficient) ค่าของ β_1 อาจจะเป็น

ก). $\beta_1 > 0$ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกันคือ ถ้า X เพิ่ม Y จะเพิ่มด้วย แต่ถ้าว่า X ลดลงค่า Y จะลดลงด้วย

ข). $\beta_1 < 0$ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้าม คือ คือ ถ้า X เพิ่ม Y จะลดลง แต่ถ้าว่า X ลดลงค่า Y จะเพิ่มขึ้น

ค). β_1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าค่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

ง). $\beta_1 = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน

ข.2 การประมาณค่า β_0 และ β_1 โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพการกระจาย ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y แล้วพบว่า X และ Y สัมพันธ์กันในรูปเส้นตรง จะต้องคำนวณหาค่า β_0 และ β_1 ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามีความสัมพันธ์ตามกันหรือตรงข้ามกันและความสัมพันธ์นั้นมากหรือน้อยเพียงใด ถ้า β_1 มีค่ามากแสดงว่า Y มีความสัมพันธ์กับ X มากด้วย ในทางปฏิบัติเราใช้ข้อมูลตัวอย่างขนาด n ในการประมาณค่า β_0 และ β_1 ดังนั้นค่าประมาณของ Y คือ

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i$$

หรือ
$$\hat{Y}_i = a + b X_i \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่ $\hat{\beta}_0 = a$, $\hat{\beta}_1 = b$

การประมาณค่า β_0 และ β_1 ด้วย a และ b ตามลำดับนั้น มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า Y_i ด้วย Y_i ค่าต่ำสุด โดยใช้วิธีที่เรียกว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องการหาค่า a และ b ที่ทำให้ผลบวกของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด

เนื่องจาก
$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i$$

และ
$$\hat{Y}_i = a + b X_i$$

$$\therefore Y_i - \hat{Y}_i = e_i$$

ผลบวกของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง = $\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ ดังนั้น วิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือการหาค่า a และ b ที่ทำให้ $\sum_{i=1}^n e_i^2$ มีค่าต่ำที่สุด การที่ต้องใช้ผลบวกของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเนื่องจากค่า e_i อาจจะเป็นค่าบวกเมื่อ Y_i มากกว่า \hat{Y}_i และจะเป็นค่าลบถ้าเมื่อ Y_i น้อยกว่า \hat{Y}_i ซึ่งอาจมีผลทำให้ $\sum e_i$ เป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยกว่าที่เป็นจริง การหาค่า a และ b ที่ทำให้ $\sum e_i^2$ มีค่าต่ำสุดจะทำได้โดยการใช้อนุพันธ์เชิงส่วน (Partial derivation) เทียบกับ a และ b แล้วทำให้เท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad \frac{\partial}{\partial a} \left[\sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \right] &= \frac{\partial}{\partial a} \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - a - b X_i)^2 \right] = 0 \\ &- 2 \sum (Y_i - a - b X_i) = 0 \\ &- 2 \sum Y_i + 2na + 2b \sum X_i = 0 \\ &an + b \sum_1^n X_i = \sum_1^n Y_i \end{aligned} \quad (\text{ข.3})$$

$$\text{และ} \quad \frac{\partial}{\partial a} \left[\sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \right] = -2 \sum (Y_i - a - b X_i)(X_i) = 0$$

$$\text{หรือ} \quad a \sum_1^n X_i + b \sum_1^n X_i^2 = \sum_1^n X_i Y_i \quad (\text{ข.4})$$

และเรียกสมการ (ข.3) และ (ข.4) ว่าสมการปกติ (Normal equations) แก่สมการ (ข.3) และ (ข.4) เพื่อหาค่า a และ b ดังนี้

นำ $(\sum X_i)$ คูณสมการที่ (ข.3) ได้สมการ (ข.5)

$$an(\sum X_i) + b(\sum X_i)^2 = (\sum X_i)(\sum Y_i) \quad (\text{ข.5})$$

นำ n คูณสมการ (ข.4) ได้สมการ (ข.6)

$$an(\sum X_i) + bn(\sum X_i)^2 = n(\sum X_i Y_i) \quad (\text{ข.6})$$

นำสมการ (ข.6) ลบด้วยสมการ (ข.5) ได้

$$bn(\sum X_i)^2 - b(\sum X_i)^2 = n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)$$

$$b[n(\sum X_i)^2 - (\sum X_i)^2] = n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)$$

$$b = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}$$

$$= \frac{\sum X_i Y_i - \frac{(\sum X_i)(\sum Y_i)}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}$$

หรือ

$$b = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}$$

จากสมการ (ข.3) จะได้ว่า

$$an + b(\sum X_i) = \sum Y_i$$

$$an = \sum Y_i - b(\sum X_i)$$

หรือ

$$a = \frac{\sum Y_i}{n} - b \frac{(\sum X_i)}{n}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\hat{\beta}_1 = b = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{(\sum X_i)(\sum Y_i)}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}$$

(ข.7)

$$\hat{\beta}_0 = a = \bar{y} - b\bar{x}$$

การประมาณค่า β_0 และ β_1 ด้วยค่า a และ b โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะทำให้

1. ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า Y_i ด้วย \hat{Y}_i เป็นศูนย์ คือ $\sum (Y_i - \hat{Y}_i) = \sum e_i = 0$
2. จุด (\bar{x}, \bar{y}) เป็นจุดที่อยู่บนเส้นความถดถอย
3. $\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ มีค่าต่ำสุด

ข.3 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : r^2 หรือ R^2)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้ ดังนั้นถ้า r^2 มีค่ามากแสดงว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันมากหรือ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า Y ได้มากโดยที่

$$R^2 = r^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนของ Y ที่เกิดจาก X}}{\text{ความแปรปรวนของ Y ทั้งหมด}}$$

ข.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ในหัวข้อแรกเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร X และ Y และเป็นการทดสอบว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยการทดสอบสัมประสิทธิ์ความถดถอย β_1 โดยใช้ค่าประมาณ (b) ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อย เนื่องจากค่า b ที่ได้มีหน่วยตามค่าของ Y สำหรับสถิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามากหรือน้อยนั้นจะเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) ซึ่งในกรณีที่ค่าของ Y ขึ้นกับ X เพียงตัวเดียวจะเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple correlation coefficient) โดยที่ (ρ) จะไม่มีหน่วยจึงสามารถใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X ได้ว่ามีความสัมพันธ์มากหรือน้อยเพียงใด เนื่องจาก (ρ) จะมีค่าสูงสุดเป็น 1 และต่ำสุดเป็น -1

เนื่องจากเราใช้ข้อมูลตัวอย่าง จึงประมาณค่า (ρ) ด้วยค่า r โดยที่ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตัวอย่าง

ความหมายของค่า r

1. ค่า r เป็นลบ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม คือถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะลดลง แต่ถ้า X ลด ค่า Y จะเพิ่ม
2. ค่า r เป็นบวกแสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะเพิ่มด้วย แต่ถ้า X ลด Y จะลดลงด้วย
3. ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก
4. ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม และมีความสัมพันธ์กันมาก
5. ถ้า $r=0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน
6. ถ้า r เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

ในทางปฏิบัติที่พิจารณาว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อย จะพิจารณาจากค่า r (ไม่ใช่ค่า b) เนื่องจาก r ไม่มีหน่วย นอกจากนั้น r และ b จะมีเครื่องหมายเดียวกัน คือ เป็นบวกเหมือนกันหรือเป็นลบเหมือนกัน เนื่องจากทั้ง r และ b เป็นค่าแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การตัดสใจ และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$$\text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} = \sqrt{\text{สัมประสิทธิ์การตัดสใจ}}$$

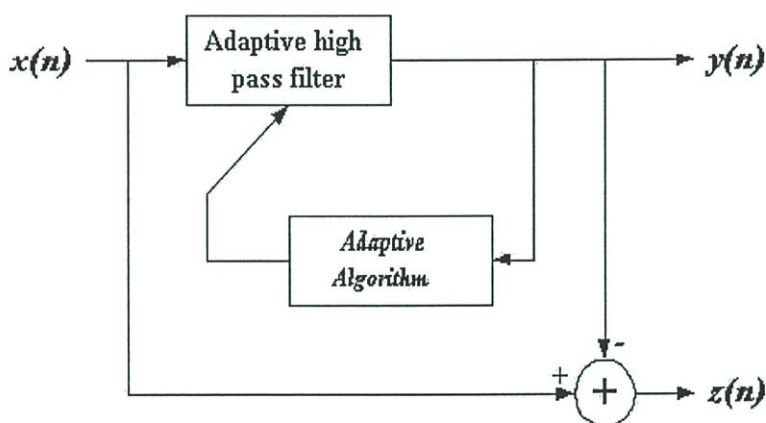
$$\text{หรือ} \quad r = \sqrt{r^2}$$

ภาคผนวก ค

การแยกผลกระทบการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหัน ออกจากผลกระทบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝน

รูปที่ ค. 1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ กำหนดให้สัญญาณอินพุต $x(n)$ คือ สัญญาณดาวเทียมที่บันทึกได้ขณะที่ฝนตก ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันและการลดทอนเนื่องจากฝนสัญญาณพร้อมกัน $y(n)$ เป็น เอาต์พุตซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันที่แยกมาจากอินพุต $x(n)$ ด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่าน $z(n)$ เป็นการลดทอนในระดับสัญญาณที่แยกจาก $x(n)$ ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน อธิบายได้ด้วยสมการ (ค.1)

$$z(n) = x(n) - y(n) \quad (\text{ค.1})$$



รูปที่ ค.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Adaptive IIR digital filter

ค.1 อะแดปทีฟอัลกอริทึม แบบ Quantized Least Mean p -Power (QLMP)

อะแดปทีฟอัลกอริทึมแบบ QLMP เป็นอัลกอริทึมที่ปรับปรุงจาก LMP (Least Mean p -Power Error Criterion) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ใช้หลักการค้นหาจุดต่ำสุดของ cost ฟังก์ชัน ด้วยวิธีการแบบ steepest decent

กำหนดให้สัญญาณอินพุต $x(n)$ คือระดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดาวเทียมที่บันทึกได้ขณะฝนตก โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณ 8 จุดต่อวินาที โดยที่เราไม่ทราบความถี่ของการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันและการลดทอนในระดับสัญญาณเนื่องจากฝน

ดังนั้นถ้าป้อนอินพุตผ่านตัวกรองความถี่สูงผ่านแบบอะแดปทีฟ IIR จะสามารถแยกการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างกะทันหันออกจากระดับสัญญาณทั้งหมดได้ ในทำนองเดียวกันถ้าป้อนอินพุตผ่านตัวกรองความถี่ต่ำแบบอะแดปทีฟ IIR จะสามารถแยกการลดทอนของระดับสัญญาณเนื่องจากฝนออกมาได้เช่นเดียวกัน

ค.1.1 ตัวกรองความถี่สูงผ่านแบบอะแดปทีฟ IIR (Adaptive IIR High-Pass Filter)

ฟังก์ชันถ่ายโอนของ high pass filter (HPF) แสดงดังสมการ (ค.2)

$$H(z) = -\frac{z^{-1} + a(n)}{1 + \rho a(n)z^{-1}} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ $a(n)$ คือ Variable coefficient ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -2 กับ 2 ($-2 < a(n) < 2$) หาได้จาก

$$a(n) = -2 \cos(\omega_n) \quad (\text{ค.3})$$

และ ρ มีค่าระหว่าง 0 กับ 1 ($0 < \rho < 1$) เป็นค่า Constant coefficient สำหรับอะแดปทีฟดิจิทัลฟิลเตอร์ สัมประสิทธิ์ $a(n)$ จะเป็นตัวกำหนดค่าเฉลี่ยกำลัง p ค่าสุดของเอาต์พุตของดิจิทัลฟิลเตอร์ ซึ่งเป็นค่าประมาณของ steepest decent อัลกอริทึมที่ใช้ปรับปรุงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่สูง แสดงดังสมการ (ค.4)

$$a(n+1) = a(n) - \mu \frac{\partial |y(n)|^2}{\partial a} \quad (\text{ค.4})$$

เนื่องจาก

$$|y(n)|^p = \begin{cases} (y(n))^p & ; p: \text{even} \\ \text{sgn}(y(n)) (y(n))^p & ; p: \text{odd} \end{cases} \quad (\text{ค.5})$$

ดังนั้นสมการ (ค.5) เขียนใหม่ได้ตามสมการ (ค.6)

$$\begin{aligned} a(n+1) &= a(n) - \mu \cdot \left\{ p \cdot (y(n))^{p-1} \frac{\partial y(n)}{\partial a} \right\} & ; p = \text{even} \\ a(n+1) &= a(n) - \mu \cdot \text{sgn} \left\{ p \cdot \text{sgn}(y(n)) (y(n))^{p-1} \frac{\partial y(n)}{\partial a} \right\} & ; p = \text{odd} \end{aligned} \quad (\text{ค.6})$$

เมื่อ $\text{sgn}(x) = x/|x|$, μ เป็น step size parameter จะได้เอาต์พุตของตัวกรองความถี่สูงเขียนสมการในขอบเขตของเวลาได้ตามสมการ (ค.7)

$$y(n) = -x(n-1) - a(n)x(n) - \rho a(n)y(n-1) \quad (\text{ค.7})$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเอาต์พุตแสดงดังสมการ (ค.8)

$$\frac{\partial y(n)}{\partial a} = -x(n) - \rho y(n-1) \quad (\text{ค.8})$$

ค.1.2 ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอะแดปทีฟ IIR (Adaptive IIR Low-Pass Filter)

ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Low-pass-filter (LPF) แสดงตามสมการ (ค.9)

$$H(z) = \frac{z^{-1} - a(n)}{1 - \rho a(n)z^{-1}} \quad (\text{ค.9})$$

ในการหาสูตรของสมการตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลอะแดปทีฟ ในทำนองเดียวกันกับสมการ (ค.3) (ค.4) (ค.5) และ (ค.6) สามารถหาค่าสมการอะแดปทีฟดิจิทัลฟิลเตอร์ได้ตามสมการ(ค.10)

$$y(n) = x(n-1) - a(n)x(n) + \rho a(n)y(n-1) \quad (\text{ค.10})$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเอาต์พุตได้ดังสมการ (ค.11)

$$\frac{\partial y(n)}{\partial a} = -x(n) + \rho y(n-1) \quad (\text{ค.11})$$

ภาคผนวก ง

โปรแกรมตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์

ตัวอย่างโปรแกรม MATLAB ตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบอะแดปทีฟ ไอ ไอ อาร์ อัลกอริทึมแบบ Quantized Least Mean p -Power (QLMP) ที่ใช้ในการแยกผลกระทบบการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอย่างกะทันหันออกจากผลกระทบบการลดทอนเนื่องจากน้ำฝน

```

clc;
clf;
load 200210302103240250.m;
SNR=8;
at=1;
p=input('p=');
u=0.0006;
N=length(200210302103240250);
n=0:N-1;
rh0=0.965;
data=200210302103240250(,:);
x=data;
x1=mean(x);
x2=x-x1;
subplot(3,1,1);
plot(x2);
axis tight;
y=zeros(size(x));
a=zeros(1,N+2);
dy=zeros(size(x));
for k=3:N-1;
    y(k)=-x(k-1)-a(k)*x(k)-rh0*a(k)*y(k-1);
    dy(k)=-x(k)-rh0*y(k-1);
    if rem(p,2)==0
        update(k)=p*y(k)^(p-1)*dy(k);
    end
end

```

```
else
update(k)=p*sign (y(k))*(y(k)^(p-1))*dy(k);
end;
a(k+1)=a(k)-u*sign (update(k));
end
subplot(3,1,2);
plot(y);
axis tight;
grid;
%-----
subplot(3,1,3);
z=x2-y;
plot(z);
axis tight;
grid;
```

ภาคผนวก จ

บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

- [1] J.Griwan., J.Nakasuwan., V.Chutchavong., O.Sangaroon., C.Benjangkaprasert. and Y.Moriya. : “ On Applicatiion of Adaptive IIR Digital Filter For Extracting Scintillation and Rain Attenuation ” International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications , Xi,an, PRC, Oct. 2002, pp.1017-1020.
- [2] จินตนา ไกรวัลย์ วันวิสา ชัชวงษ์ อรลาภ แสงอรุณ ชวลิต เบญจางคประเสริฐ กนก เจนจิระพงษ์เวช. “ การใช้งานวงจรกรองความถี่แบบอะแดปทีฟ IIR ในการแยกซินทิลเลชันและการลดทอนเนื่องจากฝนของสัญญาณดาวเทียม.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. vol. II หน้า98-102

ISITA/NOLTA 2002

**2002 International Symposium on Information Theory
and Its Applications (ISITA 2002)**

**2002 International Symposium on Nonlinear Theory
and Its Applications (NOLTA 2002)**

- Organization of the Conference
- Message From Conference Chairs
- Advanced Program
- Invited Talks

<http://freedom.katayama.nuce.nagoya-u.ac.jp>

<http://risa.is.tokushima-u.ac.jp/nolta2002/>

<http://www.xjtu.edu.cn>

On Application Of Adaptive IIR Digital Filter For Extracting Scintillation And Rain Attenuation

J.Griwan*, J.Nakasuwan**, V.Chutchavong*, O.Sangaroon*, C.Benjangkprasert*, and Y.Moriya***

*Research Center for Communication and Information Technology
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520
E-mail:ksomlar@kmitl.ac.th, kai_2521@hotmail.com

**Faculty of Engineering, Rajamangala Institute of Technology, Pratuapane, Thailand 12110

***1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanakawa
School of Engineering, Tokai University, Japan, 259-1292**Abstract**

Characteristic of two combination phenomena in Ku-band satellite down link, troposphere amplitude scintillation concurrent with rain attenuation are examined, and extracted individually from raw data with the aid of a filtering technique. Based on application of adaptive IIR digital filter, Fast algorithm of variable step-size QLMP (VSQMLP) are available. The procedure of application can be concluded and successful, the spectra of two-combination effect are extracted individually, the harmonic of noise is reduced for all weather condition and system characteristic by variable step-size adaptive algorithm.

1. Introduction

This work have so far been the investigation of short-term and long-time statistics of scintillation and rain attenuation phenomena in Ku-band satellite down link. This measurement focus on near equator region in Thailand, where large scintillation and heavy rainfall occur frequently. In particular, both phenomena can concurrently. Base on data analysis, the effect of two combination are described. By utilizing the difference in amplitude variation rate for rain attenuation and scintillation fading, the effect of two phenomena are extracted with the aid of a filtering technique [1][2]. In the past, the extraction of scintillation from attenuation has been carried out by Butterworth digital low-pass filter and Butterworth digital high-pass filter [1][2][3], however, it is not possible to establish a unique filter cutoff frequency for all weather condition and system characteristics. Therefore, be expected to be applied to wide regions and different climates. This work separate two combination phenomena by technique of adaptive IIR digital filter which are very useful in various signal processing applications, such as the variation of satellite signal with unknown frequencies from observation time series. By this technique, the cutoff frequency of variable signal are adapting by adjust parameters in the algorithm. In reference [4] two combination effect are extracted by Quantized Gradient-based algorithm (QLMP) when the step-size is constant parameters. This paper separate the two effect and reduce noise by fast algorithm of the variable step-size QLMP algorithm (VSQMLP). This method shows a difference approach to control step-size used with adaptive IIR filter for frequency estimation.

2. Measurement and Data Analysis

Scintillation and rain attenuation measurements were carried out in Bangkok, Thailand. The configuration of earth station is presented in table1.

Satellite	Thalcom2
Location of ground station	13° 45' 36" N 108° 48' 17" E
Antenna Diameter	30 cm offset
Receiving frequency	12.260 GHz
Elevation angle	59.9°
Data sampling rate	100 ms

The results are presented here correspond to selected data acquired from January 2001 until December 2001. All data were recorded on digital recorder with the sampling interval of 125 mSec (8 sampling point per second). From the measurement, Figure1 shows the probability density of occurring number of two combination phenomena measured in monthly. Two combination phenomena (scintillation concurrent with rain attenuation) shows a marked seasonal of rainy dependence, reaching a maximum number of occurring in August and minimum number of occurring in May.

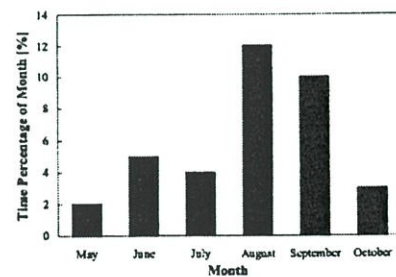


Figure 1. Diurnal variation of rain attenuation

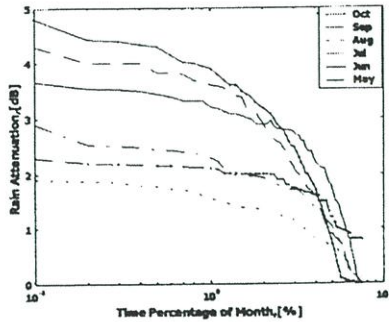


Figure 2. Cumulative probability of rain attenuation

Figure 2. shows cumulative probability of rain attenuation concurrent with scintillation, reaching a maximum total fade in June and minimum total fade in August. Therefore, the data in June is most effective to analyze. There are two type of data analysis, time domain and frequency domain. As for the frequency domain, the power spectrum was derived by Fast Fourier Transform (FFT), the data length size is set to 20,000 point. The mean power spectrum can be displayed by two asymptotic with value close to slope of Kolmogorov spectrum.

The next, selected data of combination phenomena are passing through Fast algorithm of the variable step-size VSQMLP digital high-pass filter first order. To estimate the effect on scintillation phenomena of cutoff frequency used for data filtering. The filter coefficient will be estimated by adaptive algorithm, described in the next section.

3. The Variable Step-Size QLMp Algorithm.

In this section, we describe the variable step-size QLMp algorithm that was proposed in ref [5]. To simplify, assuming that the input signal to the adaptive digital filter ($x(n)$) is satellite signal variations measured during 60 minute and 8 sampling of the scintillation concurrent with rain attenuation. The filter is analyzed at various parameters from the derivation of the transfer function High Pass Filter (HPF) and Low Pass Filter (LPF).

The transfer function of the HPF can be expressed as follows:

$$H(z) = -\frac{z^{-1} + a(n)}{1 + \rho a(n)z^{-1}} \quad (1)$$

where $a(n)$ is the filter coefficient will be estimated by an adaptive algorithm, ρ is the pole construction factor should be close and less than unity to ensure the stability of the

filter. The steepest decent algorithm used to update the HPF filter coefficient is:

$$a(n+1) = a(n) - \mu \frac{\partial y(n)^p}{\partial a} \quad (2)$$

because

$$|y(n)|^p = \begin{cases} (y(n))^p & ; p : \text{even} \\ \text{sgn}(y(n)) \cdot (y(n))^p & ; p : \text{odd} \end{cases} \quad (3)$$

thus Eq. (2) becomes

$$a(n+1) = a(n) - \mu \cdot p \cdot (y(n))^{p-1} \frac{\partial y(n)}{\partial a} ; \quad (4)$$

$p = \text{odd}$

$$a(n+1) = a(n) - \mu \cdot p \cdot \text{sgn}(y(n)) \cdot (y(n))^{p-1} \frac{\partial y(n)}{\partial a} ;$$

$p = \text{even}$

The output signal of the first-order adaptive HPF is as follows:

$$y(n) = x(n-1) - a(n)x(n) + \rho a(n)y(n-1) \quad (5)$$

and the differential of the filter output with respect to $a(n)$ is given by:

$$\frac{\partial y(n)}{\partial a} = -x(n) + \rho y(n-1) \quad (6)$$

Next, the used of the *Quantizing Gradient* algorithm which does not require any matrix inversion or division and it can reduce an amount of multiplication computational equal to the length of input data, the updated formula of Eq. (4) becomes:

$$a(n+1) = a(n) - \mu \cdot \text{sgn} \left\{ p \cdot (y(n))^{p-1} \frac{\partial y(n)}{\partial a} \right\} ; \quad (7)$$

$p = \text{odd}$

$$a(n+1) = a(n) - \mu \cdot \text{sgn} \left\{ p \cdot \text{sgn}(y(n)) \cdot (y(n))^{p-1} \frac{\partial y(n)}{\partial a} \right\} ;$$

$p = \text{even}$

where $\text{sgn}(x) = x/|x|$, μ is step size parameter.

In the next section, we analyzed adaptive IIR Low Pass Filter present in Figure 3. and then the variable step-size QLMp algorithm. From the block diagram, $x(n)$ is the satellite signal which scintillation and rain attenuation concurrently, $y(n)$ is the output signal which scintillation are extracted from input signal by adaptive IIR HPF, $z(n)$ is the output signal which attenuation are extracted from input signal by adaptive IIR LPF described by:

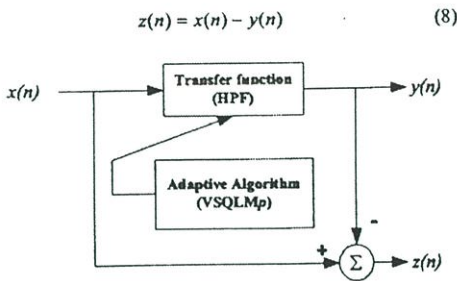


Figure 3. Block diagram of Adaptive IIR Digital Filter

The objective of the variable step-size QLMP algorithm is to ensure large $\mu(n)$ when the algorithm is far from the optimum and the $\mu(n)$ decreasing as we approach the optimum. The adaptive algorithm used to update recursion is given by:

$$a(n+1) = a(n) - \mu(n) \cdot \text{sgn} \left[\text{sgn}(y(n)) \cdot \frac{\partial y(n)}{\partial a} \right] \quad (9)$$

where

$$\mu(n+1) = \kappa\mu(n) + \beta\varphi^2(n) \quad (10)$$

and

$$\varphi(n) = \alpha\varphi(n-1) + (1-\alpha)y^2(n) \quad (11)$$

the parameters $0 < \kappa < 1$, $\beta > 0$ and $\mu(n+1)$ are set to μ_{\min} or μ_{\max} , the positive constant α ($0 < \alpha < 1$) is an exponential weighting parameter that governs the averaging time constant, i.e., the quality of the estimation.

4. The Results

Figure 4. (a) shows the example of input satellite signal variation during rain observed in June 11, 2001. As can be seen two kinds of phenomena persist, attenuation phenomena caused by bulk rain and scintillation phenomena arising from scattering at atmospheric reflective index. Two combination phenomena are concurrently. The periodic of occurring about 1 hour. Figure 4. (b) shows scintillation extracting from raw data by using the variable step-size QLMP algorithm (VSQMLP) for a 1st order adaptive high pass filter. Figure 4. (c) shows rain attenuation extracting from raw data by using the variable step-size QLMP algorithm (VSQMLP) for a 1st order adaptive low pass filter. In this case, the step-size parameter value $\alpha=0.989$, $\kappa=0.955$, $\beta=0.0001$ and the pole radius ρ of the 1st order IIR high pass filter and low pass filter is 0.955.

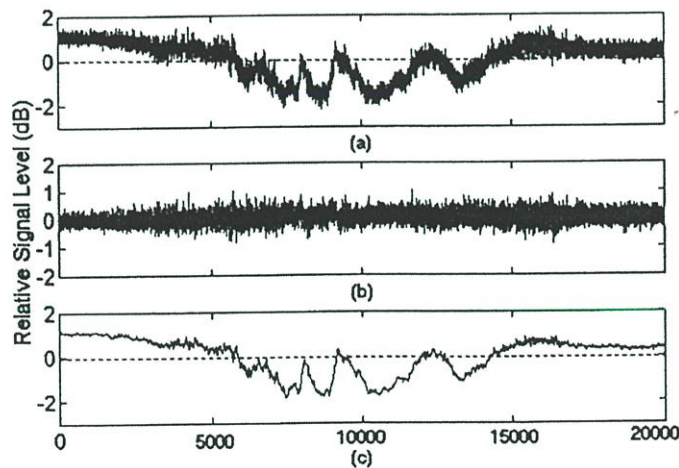


Figure 4. (a) Example of scintillation concurrent with rain
 (b) Scintillation extracting from raw data by using VSQMLP algorithm (HPF)
 (c) Rain attenuation extracting from raw data by using VSQMLP algorithm (LPF)

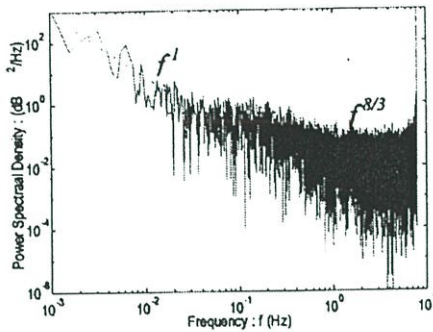


Figure 5. The frequency spectral of signal level variation during rain showed in figure 4.(a)

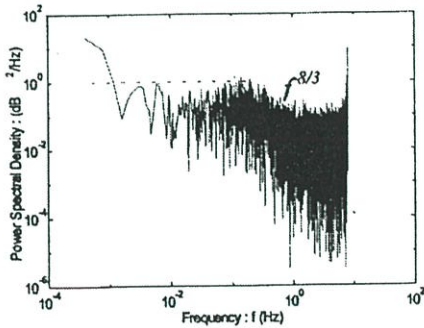


Figure 6. The frequency spectral of scintillation showed in figure 4. (b)

Figure 5. shows the power spectrum of signal variation present in figure 4.(a) The spectrum was derived by Fast Fourier Transform(FFT). As can be seen that the shape of signal fluctuations due to scintillation superimposed on rain attenuation. It could be seen that the -20dB/dec slope occurs between 0.04 Hz until 0.04 Hz , while a flat portion appears between 0.04 Hz and 0.3 Hz .

Figure 6. shows the power spectral of scintillation after extracting present in figure 4.(b). The shape of spectral are quite close to the theoretical for Kolmogorov spectrum as derived and published by Takarskii [6].

Figure 7. shows the power spectral of rain attenuation after extracting present in figure 4.(c). The shape of spectral occurs -20dB/dec as the slope theoretically predicted for rain effect Matricciari [3].

5. Conclusion

In the past, the extraction of scintillation from the underlying dominant attenuation has been carried out by Butterworth high-pass filtering. However, it is not possible

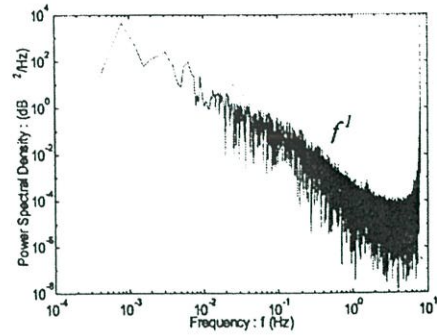


Figure 7. The frequency spectral of attenuation showed in figure 4.(c)

to establish a unique filter cutoff frequency for all weather VSQMP application have been encountering in satellite signal. This algorithm has used the output signal energy of QLMP to control step-size update with the gradient noise reduced and high convergence speed than QLMP. In application of real-time experiment an initial value of step-size is an important condition because its performance depend on the presence of noise. If high presence of noise, minimum point of error surface then providing inaccuracies of estimated frequency.

References

- [1] W. J. Vogel, G. W. Torrence, and J. E. Allnut, "Scintillation fading on a low elevation angle satellite path: Assessing the Austin experiment at 11.2 GHz ," in *Proc. Eight Int. Conf. Antennas Propagat.*, Heriot-Watt Univ., UK, March 30 April 2, 1993, IEE Conf. Publ. Nr. 370, pt. 1, pp. 48-51.
- [2] Y. Karasawa and T. Matsudo, "Characteristics of fading on low-elevation angle earth-space paths with concurrent rain attenuation and scintillation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 5, pp. 657-661, May 1991
- [3] E. Matricciari, M. Mauri, and C. Riva, "Relationship between scintillation and rain attenuation at 19.77 GHz ," *Radio Science*, vol 31, no. 2, pp. 273-279, March-April 1996.
- [4] O. Sangaroon, V. Chutchavong, C. Benjangkprasert, J. Nakasuwan, and Y. Moriya, "On design of adaptive IIR digital filter for extraction scintillation and rain attenuation phenomena," *ICFS 2002*, pp. 16-12, March 27-28, 2002.
- [5] R. Punalard, P. Chumchu, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirchai, and O. Sangaroon, "The reduction of gradient-based algorithm by using variable step-size technique," *APCCAS2000*, pp. 415-418, December 4-6, 2000.
- [6] V.I. Tatarskii, "Wave propagation in a turbulent medium," Mc-GHill, New York, 1961.

ประวัติผู้เขียน

นางสาว จินตนา ไกรวัลย์ เกิดเมื่อวันที่ 4 เมษายน พ.ศ. 2518 จังหวัดราชบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท (ทดลองเรียน) หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ปีการศึกษา 2543 ปรับสภาพเป็นนักศึกษาสามัญ ในระหว่าง การศึกษาในระดับปริญญาโท มีบทความตีพิมพ์ทั้งสิ้น 2 บทความ